

卒業論文
BGPS ダストコアを対象とした
6.7GHz メタノールレーザー探査

2014 年度
(平成 26 年度)
茨城大学 理学部理学科
物理学コース
学籍番号 11s2010f
大橋拓人

概要

天の川銀河には大質量星と呼ばれる恒星が存在しており、それらは太陽質量の 8 倍以上の質量を持っている。大質量星はアウトフローの形成や超新星爆発を起こすことで、銀河内のエネルギー放出の約 15% を担っており、次世代の星形成に寄与していることが知られている (Ellingsen et al. 2011)。だが、大質量星の形成過程については未だ謎に包まれているものが多い。電波領域では、メーザー (MASER: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) という特有の現象があり、星形成領域の 3 次元運動や変動現象を探る手掛かりとして有益とみなされている。現在のところ星形成領域で観測される代表的なメーザーには、OH、水、クラス I・II のメタノール (発生場所、励起条件で分類) の 4 種が存在する。しかし、星形成の過程で 4 種のメーザーの出現時期の関連性を述べた研究例は少なく、個別の天体を基に比較が行われているだけにすぎない。そのため、過去に議論されている水メーザーとメタノールメーザーの出現時期に関しては研究者間でも解釈が大きく分かれている。そこで、本研究では BGPS (Bolocam Galactic Plane Survey) データベースとしてまとめられているダストコアを観測対象として統一のカタログから各メーザーの出現時期を確立することを目的とし、その中で 6.7GHz クラス II メタノールメーザーの探索を行った。

観測は日立 32m 電波望遠鏡を用いて、2014 年 11 月 3 日 (月)~2015 年 1 月 22 日 (木) にかけての計 7 回実施した。Shirley et al. (2013) により、BGPS データベースに対する分子輝線の観測によって系統速度が求められた 3126 天体について、分子コアトレーサーである $\text{N}_2\text{H}^+(3-2)(280\text{GHz})$ と $\text{HCO}^+(3-2)(268\text{GHz})$ の有無と強度比の点から 4 つのカテゴリーに分類し、そこから各カテゴリーの強度順に 296 天体を選出した。

その結果 296 天体中 53 天体からの放射が確認され、検出率は 17.9% となった。そのうち新検出と思われる天体は 4 天体であった。

今回の観測結果から各カテゴリーごとの検出率を算出したところ、 $\text{N}_2\text{H}^+/\text{HCO}^+$ の強度比が大きくなると検出率も上がるということがわかった。 $\text{N}_2\text{H}^+(3-2)$ は低温で臨界密度が 10^7 個/cm³ と高密度な領域で発生する分子輝線である。6.7GHz メタノールメーザーは、 H_2 分子密度 10^6 から 10^8 個/cm³ で励起されると述べられているが (Cragg et al. 2005)、今回の観測でその条件を満たす結果が得られた。星形成の初期段階は低温で CO が凍りついてダストに付着しているため N_2H^+ が卓越しているが、進化の後期段階で温度が上がると CO が昇華してガスとなる。その際に N_2H^+ と CO が反応して HCO^+ が生まれる。今回の観測をふまえると、6.7GHz メタノールメーザーは N_2H^+ が卓越している星形成初期段階に出現すると考えられる。

目次

1	研究背景・目的	4
1.1	大質量星	4
1.2	メーザー	4
1.2.1	メーザー現象	4
1.2.2	星形成領域とメーザー	5
2	観測	6
2.1	観測天体の選出	6
2.2	観測方法	15
2.2.1	茨城局 32m 電波望遠鏡	15
2.2.2	観測概要	15
3	結果	17
3.1	観測結果	17
3.2	既知のメーザー源とのスペクトル比較	17
3.3	追観測結果	40
3.3.1	複数回観測結果	40
3.3.2	9 点法観測結果	42
4	考察	46

1 研究背景・目的

1.1 大質量星

天の川銀河には太陽の 8 倍以上の質量を持つ大質量星と呼ばれる恒星が存在している。大質量星はアウトフローガスの放出や超新星爆発を起こし、銀河内のエネルギー放出の約 15% を担っており、次世代の星形成に寄与していることが知られている。そのため、大質量星の形成過程を知ることは銀河規模での現象の理解に必要不可欠である。太陽質量程度及びそれ以下の小質量星や中質量星に対しては、分子雲コアが重力収縮によって周囲のガス円盤から質量を獲得して星が形成されるというシナリオが考えられている。小・中質量星形成領域は地球近傍に多数存在することから、詳しい観測事実からもそのシナリオが裏付けられている。しかし大質量星の形成過程に関しては、大質量原始星も同様に周囲のガス円盤からの質量降着によって成長できるのか、またいつから恒星として輝き始めるのか、等の細かなタイムスケールがまだわかっていない。これらを知るためには、大質量星形成領域の周囲のガスの 3 次元運動の観測を行って議論する必要があるが、大質量星はその大半が地球から 1kpc(1pc=3.26 光年) 以遠にあり、観測には非常に高い空間分解能が必要となる。高い空間分解能を得られる観測として、VLBI(Very Long Baseline Interferometer) という方法がある。複数の電波望遠鏡を同時に使った観測を行いそのデータを相関させることで、数ミリ秒角を切る分解能を実現できる技術である。しかし VLBI による観測では、非常に高い輝度温度を有する対象源しか観測ができない。そこで、輝度温度が概ね $10^6 - 10^{10}$ K と高く、放射もコンパクトであるメーザー (MASER) が着目されている。

1.2 メーザー

1.2.1 メーザー現象

地上のように粒子数密度の高いところでは通常、粒子どうしの衝突によって各エネルギー準位にある粒子数が決まり (熱平衡状態)、二つの準位間の粒子数 (n_1, n_2) の比はボルツマン分布

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

で与えられる。ここで、(g_1, g_2) は統計的重み、 T は励起温度である。したがって統計的重みあたりの粒子数 (n_i/g_i) は下のエネルギー準位の方が多くなる (図 1(a))。しかし粒子数密度の低い星間空間では、粒子同士の衝突よりも輻射場のやりとり (自発放射、誘導放射、吸収) の方が卓越する場合があります、高いエネルギー準位の方により多くの粒子が分布することがある。このような状態を反転分布と呼ぶ (図 1(b))。反転分布は不安定であり、外からこの 2 準位間のエネルギー差に相当する周波数の電波が入射してくると上の準位の粒子がすぐに下の準位に落ちて同じ周波数の電波を誘導放射する。それがまた隣の分子に入射して同様な放射を起こし、これが連続的に起きて非常に強い放射を起こす。これがメーザー (MASER: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) と呼ばれる現象である (星間物質と星形成 シリーズ現代の天文学 6)。

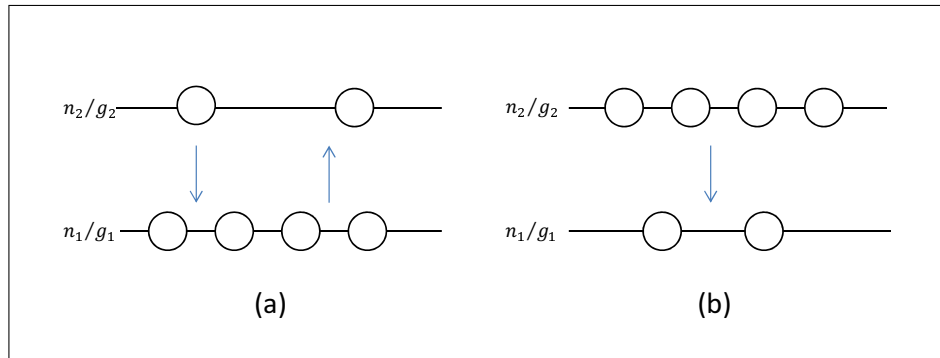


図1 (a) 熱平衡状態の分布, (b) 反転分布.(星間物質と星形成 シリーズ現代の天文学 6 参考)

1.2.2 星形成領域とメーザー

メーザーは星形成領域で多く検出されており、メーザー放射がコンパクトであることや強度変動をすること等から星形成領域の3次元運動や変動現象を探る手掛かりとして有益とみなされている。大質量星形成領域では、主に、OH、水、クラスI・IIのメタノール(発生場所、励起条件で分類)の計4種のメーザー源を伴っていることが知られている。しかし、星形成の過程で各メーザーの出現時期の関連性を述べた研究例は少なく、個別の天体を基に比較が行われているにすぎない。そのため、過去に議論されている水メーザーとメタノールメーザーの出現時期に関しては研究者間でも解釈が大きく分かれている。Ellingsen et al. 2007では、主に赤外線観測結果を基にして図2のような出現時期が考えられている。例えば水メーザーとクラスIIメタノールメーザーの比較では、GLIMPSEによる中赤外線の観測結果から、水メーザーは中赤外線で見えるところに、クラスIIメタノールメーザーは中赤外線で見えないところにより多く付随していたため、水メーザーよりもクラスIIメタノールメーザーが先に出現するであろうと述べている。しかしEllingsenらはこの図は根拠に乏しく研究がさらに進めば改訂が必要であると述べている。一方で、Reid 2007によるとミリ波ダストに基づいた観測結果から図3のような例も考えられている。こちらではミリ波観測に基づき、水メーザーはコアの部分に付随しているためどのメーザーよりも先に出現すると述べられている。そこで本研究ではBGPS(Bolocam Galactic Plane Survey)データベースとしてまとめられているダストコアを観測対象として、統一のカタログから各メーザーの出現時期を確立することを目的とした。特にその中で6.7GHzクラスIIメタノールメーザーの探査を行った。

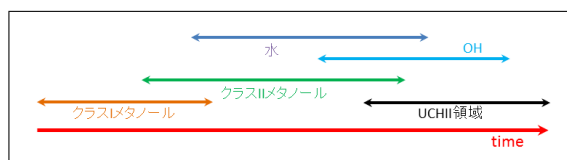


図2 大質量星形成領域におけるメーザーの出現時期の例1(Ellingsen et al. 2007を参考)

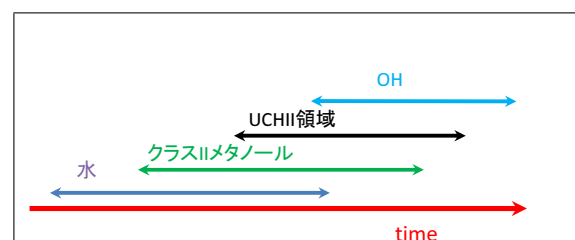


図3 メーザーの出現時期の例2(Reid 2007を参考). こちらではクラスIメタノールメーザーの出現時期に関しては理解が不十分であると述べられている。

2 観測

2.1 観測天体の選出

本研究の観測天体はハワイのカルテクサブミリ波天文台 (CSO) で過去に行われた、1.1mm 波長でのダスト連続波を用い、観測領域 $-10^\circ \leq l \leq 194^\circ$ の銀河面サーベイによって作成された BGPS データベース (Rosolowsky et al. 2010) を使用した。BGPS データベースを用いた先行研究に、Shirley et al.(2013) の BGPS ダストコア分類がある。この研究では、BGPS 天体を対象に分子コアトレーサーとして $\text{N}_2\text{H}^+(3-2)(280\text{GHz})$ と $\text{HCO}^+(3-2)(268\text{GHz})$ の検出の有無や強度比等を調査している。調査対象とされたのは $7.5^\circ \leq l \leq 194^\circ$ の 6194 天体で、そのうち 3126 天体からガス輝線とそれに伴う系統速度が検出された。

本研究では $\text{N}_2\text{H}^+(3-2)(280\text{GHz})$ と $\text{HCO}^+(3-2)(268\text{GHz})$ の有無と強度比から以下の 4 つのカテゴリーに分類し、そこから各カテゴリーの強度順に 296 天体を選出した。

- (a) N_2H^+ のみ検出 : 36 天体
- (b) $I(\text{N}_2\text{H}^+)/I(\text{HCO}^+) > 1$: 55 天体
- (c) $I(\text{N}_2\text{H}^+)/I(\text{HCO}^+) \leq 1$: 151 天体
- (d) HCO^+ のみ検出 : 54 天体

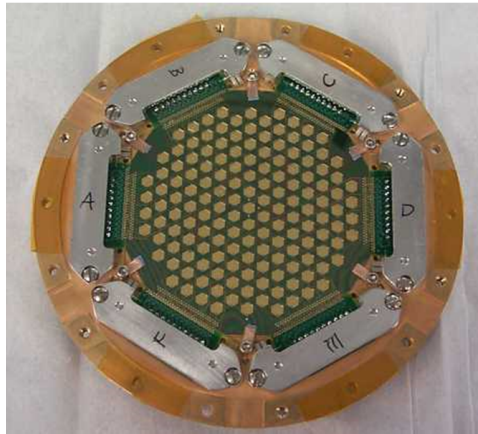


図 4 Bolocam.(Bolocam Web Page から引用)

以下に観測した天体のリストをまとめた。

表 1: 観測した天体

天体名	RA(h m s)	Dec(d m s)
G007.600-00.142	18 3 15	-22 27 10.1

表 1: 観測した天体

天体名	RA(h m s)	Dec(d m s)
G009.212−00.202	18 6 52.6	−21 4 36.8
G010.150−00.408	18 9 35.5	−20 21 25.5
G010.152−00.344	18 9 21.6	−20 19 27.7
G010.192−00.390	18 9 36.5	−20 18 43.8
G010.214−00.324	18 9 24.6	−20 15 39.2
G010.226−00.208	18 9 0.5	−20 11 40.1
G010.286−00.120	18 8 47.3	−20 5 57.5
G010.472+00.026	18 8 38.3	−19 51 54.9
G010.681−00.028	18 9 16.2	−19 42 29.3
G010.683−00.126	18 9 38.8	−19 45 16.3
G010.750−00.200	18 10 3.5	−19 43 43.2
G011.895−00.220	18 12 27.9	−18 44 12.8
G012.387+00.230	18 11 47.9	−18 5 21
G012.681−00.182	18 13 54.2	−18 1 42.1
G012.805−00.318	18 14 40.4	−17 59 3.6
G012.853−00.226	18 14 25.4	−17 53 51.5
G012.861−00.272	18 14 36.2	−17 54 56.4
G012.935−00.274	18 14 45.8	−17 50 59.6
G012.999−00.358	18 15 11.9	−17 50 0.6
G013.179+00.060	18 14 1	−17 28 33.5
G013.186−00.108	18 14 39.3	−17 32 56.5
G013.213−00.076	18 14 35.4	−17 30 40
G013.397−00.228	18 15 31.1	−17 25 19.3
G013.471−00.286	18 15 52.9	−17 23 0
G014.492−00.139	18 17 22.1	−16 25 1.6
G014.634+00.308	18 16 0.6	−16 4 52.7
G015.079−00.604	18 20 13.9	−16 7 10.2
G015.294−00.014	18 18 28.8	−15 39 6
G016.798+00.124	18 20 56.3	−14 15 33.3
G018.091−00.302	18 24 58.5	−13 18 57.9
G018.494−00.198	18 25 22.6	−12 54 49.1
G018.690−00.379	18 26 24.7	−12 49 21.4
G018.802−00.295	18 26 19.2	−12 41 14.1
G019.044−00.561	18 27 44.1	−12 35 43.1
G019.309+00.065	18 25 58.8	−12 4 8.4
G019.718−00.169	18 27 36.7	−11 49 4.6
G022.548−00.525	18 34 13.2	−9 28 22.8

表 1: 観測した天体

天体名	RA(h m s)	Dec(d m s)
G022.836−00.438	18 34 26.9	−9 10 43.6
G023.300−00.074	18 33 59.9	−8 35 59.8
G023.330−00.234	18 34 38.2	−8 38 45.2
G023.437−00.184	18 34 39.2	−8 31 32.6
G023.484+00.096	18 33 44.1	−8 21 17.2
G023.603−00.014	18 34 21	−8 18 3.3
G023.800−00.002	18 34 40	−8 7 14.4
G024.329+00.142	18 35 8.1	−7 35 0.5
G024.545−00.248	18 36 56	−7 34 15.7
G024.632+00.173	18 35 35.8	−7 18 7.1
G024.676−00.151	18 36 50.1	−7 24 44.8
G024.757+00.091	18 36 7.3	−7 13 42.4
G024.791+00.083	18 36 12.8	−7 12 7.5
G025.643−00.115	18 38 30.2	−6 32 20
G026.177+00.139	18 38 34.6	−5 56 41.4
G027.019+00.201	18 39 54.4	−5 10 5.2
G027.283+00.149	18 40 34.8	−4 57 26.4
G027.903−00.016	18 42 18	−4 28 51.7
G028.109−00.450	18 44 13.9	−4 29 50
G028.321−00.012	18 43 3.3	−4 6 27.7
G028.707−00.296	18 44 46.4	−3 53 39.4
G029.193+00.123	18 44 10.3	−3 16 14.9
G029.888−00.000	18 45 53.1	−2 42 27.3
G029.933−00.064	18 46 11.5	−2 41 58.5
G029.955−00.018	18 46 4.1	−2 39 25
G030.004−00.270	18 47 4	−2 43 41.2
G030.019−00.050	18 46 18	−2 36 52.4
G030.369−00.134	18 47 14.4	−2 20 30.3
G030.603+00.175	18 46 33.9	−1 59 31.8
G030.629−00.029	18 47 20.4	−2 3 43.6
G030.652−00.203	18 48 0	−2 7 18.9
G030.688−00.039	18 47 28	−2 0 56.9
G030.704−00.067	18 47 36.6	−2 0 49
G030.746−00.059	18 47 39.5	−1 58 21.3
G031.012+00.363	18 46 37.9	−1 32 42.1
G031.028+00.265	18 47 1.2	−1 34 25.7
G032.704−00.059	18 51 14.2	0 13 42.8

表 1: 観測した天体

天体名	RA(h m s)	Dec(d m s)
G033.390+00.008	18 52 14.5	0 24 54.5
G033.740−00.017	18 52 58.6	0 42 36.7
G034.410+00.232	18 53 18.4	1 25 24.1
G034.686+00.070	18 54 23.4	1 35 35.2
G034.698+00.004	18 54 38.8	1 34 25.3
G037.320+00.164	18 58 52.5	3 58 50.1
G037.737−00.208	19 0 57.7	4 10 50.3
G037.765−00.216	19 1 2.7	4 12 8.5
G037.820−00.382	19 1 43.9	4 10 22.4
G038.119−00.232	19 1 44.7	4 30 38.8
G038.203−00.068	19 1 19.1	4 39 29.3
G038.378−00.020	19 1 28.1	4 50 15.2
G038.664+00.226	19 1 6.9	5 12 15.7
G038.694−00.454	19 3 35.6	4 55 8.1
G039.899−00.079	19 4 28.7	6 9 40.8
G040.106−00.517	19 6 25.7	6 8 42.3
G040.361−00.061	19 5 16.1	6 34 48.4
G042.305−00.301	19 9 44.1	8 11 43.6
G043.093−00.043	19 10 16.9	9 0 48.6
G043.164−00.031	19 10 21.9	9 5 0
G043.307−00.213	19 11 17.6	9 7 31.6
G044.576−00.449	19 14 31.5	10 8 25.1
G045.805−00.355	19 16 30.7	11 16 16.7
G048.750−00.142	19 21 24	13 58 24.6
G049.033−00.298	19 22 30.9	14 8 56
G049.097−00.254	19 22 28.6	14 13 35.9
G049.106−00.272	19 22 33.9	14 13 35.1
G049.115−00.296	19 22 40	14 13 19.8
G049.125−00.282	19 22 38.1	14 14 15.3
G049.152−00.366	19 22 59.5	14 13 21.2
G049.267−00.338	19 23 6.6	14 20 12.5
G049.371−00.350	19 23 21.2	14 25 16.9
G049.389−00.320	19 23 17.3	14 27 8.8
G049.561−00.276	19 23 27.6	14 37 30.8
G049.599−00.250	19 23 25.9	14 40 17.2
G050.377−00.417	19 25 34.8	15 16 26.7
G053.136+00.028	19 29 26.3	17 54 51

表 1: 観測した天体

天体名	RA(h m s)	Dec(d m s)
G053.218+00.012	19 29 39.8	17 58 42.5
G055.372+00.185	19 33 24.5	19 56 58.9
G059.786+00.067	19 43 11	23 44 15.1
G071.524−00.384	20 12 57.4	33 30 26.8
G072.954−00.028	20 15 21.6	34 53 50.7
G075.757+00.339	20 21 40.7	37 25 20
G075.790+00.557	20 20 52.2	37 34 24.4
G075.841+00.367	20 21 47.5	37 30 22.6
G076.156−00.287	20 25 24.8	37 23 25.1
G076.358−00.601	20 27 17.1	37 22 18.1
G076.382−00.623	20 27 27.1	37 22 46.6
G076.781−00.045	20 26 14.1	38 2 25.6
G077.790+00.679	20 26 13.1	39 16 51.9
G077.790+00.501	20 26 58	39 10 40.1
G077.820−01.313	20 34 34.2	38 7 55.2
G077.915−01.157	20 34 12.8	38 17 56
G077.929+00.871	20 25 49.2	39 30 4.2
G078.114−00.637	20 32 41.3	38 46 11.8
G078.632+00.983	20 27 28.5	40 8 35
G078.969+00.541	20 30 22.7	40 9 24.2
G078.978+00.351	20 31 12	40 3 14.3
G079.132−00.369	20 34 41.6	39 45 1
G079.233+00.425	20 31 41.1	40 18 5
G079.248+00.525	20 31 18.7	40 22 24.3
G079.308+01.307	20 28 9	40 52 58.5
G079.335+00.341	20 32 20.9	40 20 12.5
G079.343−00.487	20 35 51.3	39 50 45.1
G079.472+00.203	20 33 22.2	40 21 46.1
G079.879+01.179	20 30 28.4	41 16 0.1
G079.927+00.907	20 31 48.1	41 8 45.8
G079.966+00.583	20 33 18.4	40 59 8.9
G080.632+01.290	20 32 23.2	41 56 25.9
G080.864+00.422	20 36 51.6	41 36 28.7
G081.174−00.100	20 40 4.8	41 32 19.7
G081.213+00.802	20 36 20.6	42 7 1.2
G081.302+01.052	20 35 33.8	42 20 16.9
G081.344+00.760	20 36 57.3	42 11 40.2

表 1: 観測した天体

天体名	RA(h m s)	Dec(d m s)
G081.445+00.762	20 37 16.8	42 16 36.6
G081.477+00.022	20 40 33.2	41 50 58.7
G081.721+00.572	20 39 0.1	42 22 52.8
G081.753+00.593	20 39 1.7	42 25 4.3
G082.281+00.723	20 40 12.9	42 54 56.8
G082.521+00.111	20 43 39.2	42 43 44.2
G084.745−01.238	20 57 6.9	43 35 31.5
G084.805−01.112	20 56 48.1	43 43 10.4
G084.811−01.176	20 57 5.5	43 40 57.1
G084.829−01.092	20 56 48.2	43 45 2.9
G084.844−01.084	20 56 49.2	43 45 59.9
G084.962−01.174	20 57 37.5	43 47 51.6
G085.030+00.362	20 51 17	44 50 30.9
G085.111−01.204	20 58 17.6	43 53 30.4
G098.856+02.932	21 40 29.7	56 35 53.9
G098.978+03.960	21 36 7.3	57 26 39
G099.115+03.926	21 37 4.8	57 30 46.2
G099.981+04.168	21 40 41.5	58 16 6.6
G099.992+03.094	21 46 2.3	57 27 35.5
G109.995−00.282	23 5 23.2	59 53 58
G110.045−00.028	23 4 56.7	60 9 8.5
G110.073−00.088	23 5 20.6	60 6 30.5
G110.087+00.126	23 4 45.6	60 18 37.1
G110.097−00.066	23 5 27	60 8 17.5
G110.331+00.006	23 6 57.1	60 17 47.9
G111.192−00.796	23 15 46.7	59 52 40.4
G111.259−00.770	23 16 11.7	59 55 33.3
G111.281−00.706	23 16 10.5	59 59 36.7
G111.284−00.664	23 16 5.1	60 2 3
G111.367+00.746	23 12 29.4	61 22 35
G111.381+00.748	23 12 35.5	61 23 0.5
G111.481+00.804	23 13 11.7	61 28 21.2
G111.484+00.746	23 13 24.3	61 25 12.5
G111.497+00.814	23 13 17.3	61 29 16
G111.513−00.648	23 17 44.8	60 7 49.5
G111.522+00.800	23 13 32.1	61 29 3.7
G111.528+00.818	23 13 31.6	61 30 11.9

表 1: 観測した天体

天体名	RA(h m s)	Dec(d m s)
G111.537+00.756	23 13 46.8	61 26 54.9
G111.545+00.776	23 13 46.8	61 28 12.5
G111.561+00.832	23 13 43.9	61 31 41.1
G111.573+00.750	23 14 4.7	61 27 22.4
G111.591+00.660	23 14 29.6	61 22 44.6
G111.597+00.806	23 14 5.6	61 31 1.7
G111.668+00.596	23 15 17.7	61 20 52.2
G111.733+00.034	23 17 27.4	60 50 46.1
G111.817+00.750	23 15 59	61 32 41.6
G111.819+00.572	23 16 32.1	61 22 46.1
G111.865+00.860	23 16 1.6	61 39 53.2
G111.876+00.818	23 16 14.9	61 37 47.7
G111.882+00.992	23 15 46.1	61 47 39.9
G111.945+00.808	23 16 48.8	61 38 41.7
G132.950+00.743	2 18 10.8	61 54 56.9
G133.001+00.753	2 18 36.5	61 54 31.6
G133.513+00.971	2 23 19.8	61 56 25.4
G133.603+01.131	2 24 31.5	62 3 31.8
G133.616+00.111	2 21 39.9	61 5 49.8
G133.646+01.177	2 25 0.9	62 5 10.9
G133.715+01.217	2 25 40.8	62 5 58.7
G133.729+01.283	2 25 59.6	62 9 22.8
G133.733+01.329	2 26 10	62 11 52.3
G133.736+01.271	2 26 1.2	62 8 32.1
G133.748+01.059	2 25 28.3	61 56 23.6
G133.748+01.197	2 25 53.4	62 4 7.9
G133.777+01.177	2 26 3.2	62 2 24.6
G133.778+01.201	2 26 8.5	62 3 42.7
G133.801+01.225	2 26 23.4	62 4 35.1
G133.811+01.267	2 26 36	62 6 43.3
G133.854+01.229	2 26 50	62 3 38.7
G133.865+01.057	2 26 23.2	61 53 47.9
G133.890+01.137	2 26 50.2	61 57 43
G133.949+01.063	2 27 4.2	61 52 19.3
G133.961+01.121	2 27 20.6	61 55 18.4
G133.997+00.519	2 25 48.4	61 20 49.1
G134.051+00.699	2 26 46	61 29 44.6

表 1: 観測した天体

天体名	RA(h m s)	Dec(d m s)
G134.074+00.709	2 26 59.1	61 29 47.1
G134.203+00.753	2 28 7.1	61 29 27.7
G134.211+00.729	2 28 6.4	61 27 56.7
G134.218+00.787	2 28 20.8	61 31 0.6
G134.221+00.811	2 28 26.2	61 32 18.4
G134.241+00.751	2 28 24.5	61 28 31
G134.265+01.147	2 29 49.5	61 50 4.7
G134.896+01.545	2 36 4.5	61 57 40.7
G135.891−00.461	2 37 5.7	59 43 32.8
G136.121+02.080	2 47 26	61 56 38.2
G136.719+00.782	2 47 16.1	60 30 53.9
G136.828+01.062	2 49 3.1	60 43 13.5
G136.914+01.092	2 49 47.5	60 42 35.1
G137.067+03.004	2 58 13.4	62 20 38.3
G137.481+00.638	2 52 16.9	60 3 3.2
G137.506+01.394	2 55 13.6	60 42 50.8
G137.713+01.472	2 57 1.7	60 41 15
G137.744+01.492	2 57 19.3	60 41 28.6
G138.144+01.682	3 0 56.1	60 40 14
G138.295+01.556	3 1 31.9	60 29 14.1
G138.466+01.632	3 3 2.3	60 28 19.3
G138.503+01.646	3 3 21.8	60 27 57.1
G188.792+01.027	6 9 6	21 50 39.1
G188.948+00.883	6 8 52.9	21 38 16.9
G188.975+00.911	6 9 2.7	21 37 37.5
G188.991+00.859	6 8 53	21 35 16.5
G189.015+00.823	6 8 47.9	21 32 58.1
G189.030+00.781	6 8 40.1	21 31 0.8
G189.032+00.793	6 8 43.1	21 31 15.4
G189.231+00.893	6 9 30.6	21 23 39.8
G189.682+00.185	6 7 47.5	20 39 27.4
G189.713+00.335	6 8 25.1	20 42 8.9
G189.744+00.335	6 8 28.8	20 40 34.5
G189.776+00.343	6 8 34.6	20 39 7.7
G189.782+00.265	6 8 17.9	20 36 32.6
G189.782+00.323	6 8 30.9	20 38 13.9
G189.783+00.433	6 8 55.8	20 41 19.6

表 1: 観測した天体

天体名	RA(h m s)	Dec(d m s)
G189.783+00.465	6 9 3	20 42 15.4
G189.788+00.281	6 8 22.2	20 36 41.7
G189.789+00.291	6 8 24.7	20 36 52.8
G189.804+00.355	6 8 40.8	20 38 0.5
G189.810+00.369	6 8 44.7	20 38 6.1
G189.831+00.343	6 8 41.6	20 36 11.4
G189.834+00.317	6 8 36	20 35 19.7
G189.836+00.303	6 8 33.1	20 34 49
G189.864+00.499	6 9 20.6	20 39 2.7
G189.879+00.319	6 8 42.2	20 32 58.4
G189.885+00.319	6 8 42.9	20 32 39.5
G189.888+00.303	6 8 39.6	20 32 5.3
G189.921+00.331	6 8 50.1	20 31 7.1
G189.950+00.231	6 8 31.1	20 26 44.4
G189.951+00.331	6 8 53.8	20 29 32.6
G189.990+00.353	6 9 3.4	20 28 11.3
G190.006+00.361	6 9 7.2	20 27 34.9
G190.044+00.543	6 9 52.7	20 30 52.2
G190.054+00.533	6 9 51.7	20 30 3.3
G190.063+00.679	6 10 25.7	20 33 45.6
G190.171+00.733	6 10 51.2	20 29 38.8
G190.192+00.719	6 10 50.5	20 28 11.4
G190.240+00.911	6 11 39.6	20 31 12.8
G192.581−00.043	6 12 52.9	18 0 29
G192.596−00.051	6 12 52.8	17 59 31
G192.602−00.143	6 12 33.2	17 56 33.1
G192.629−00.123	6 12 41	17 55 39.2
G192.629−00.157	6 12 33.5	17 54 40.4
G192.644+00.003	6 13 10.6	17 58 32.6
G192.662−00.083	6 12 53.7	17 55 7.3
G192.719+00.043	6 13 28.6	17 55 41.6
G192.764+00.101	6 13 46.8	17 55 2.5
G192.816+00.127	6 13 58.8	17 53 3
G192.968+00.093	6 14 9.6	17 44 3.9
G192.981+00.149	6 14 23.7	17 44 56.1
G192.985+00.177	6 14 30.4	17 45 31.6

2.2 観測方法

2.2.1 茨城局 32m 電波望遠鏡

観測は茨城局 32m 電波望遠鏡の日立アンテナを用いて行った。茨城局は KDDI から国立天文台へ譲渡された 2 台の直径 32m アンテナを電波望遠鏡として再活用しており、日立市、高萩市にある 2 台のアンテナをそれぞれ日立アンテナ、高萩アンテナと呼んでいる。観測周波数帯は 6.3–7GHz、8–8.8GHz、21–24GHz である。現在は茨城大学を中心に運用が行われているが、他の研究機関と連携して VLBI 観測にも利用されている。

2.2.2 観測概要

観測は 2014 年 11 月 3 日 (月) から 2015 年 1 月 22 日 (木) にかけて 7 回実施した。観測パラメータは以下の通りである。

観測パラメータ	
ビームサイズ	4.6 分角
周波数	6664-6672 MHz
分光点数	8192 点
速度分解能	0.44 km/s
積分時間	5 min/source
rms ノイズ (1σ)	~ 0.3 Jy

1 天体につき on-off 点各 5 分間の積分によるスペクトルの取得を行った後に on 点のデータを off 点で減算し、ベースラインフィッティング補正を行った。その後 3 チャンネルずつ移動平均することで、検出感度 $5\sigma \sim 1.5$ Jy を達成した。上記の観測方法で得られたスペクトルにピークが見られる場合はピーク値とノイズレベルの除算を行った。それにより得られた値が 5σ 以上の場合はレーザー検出とみなし、 $3-5\sigma$ の場合はマージナルディテクション (疑わしい検出) として取り扱った。また、過去に茨城大学が Xu et al. (2009) 等の過去の論文からレーザー源について独自にまとめたカタログ (master catalog) と今回の観測天体の位置比較を行い、既知天体の放射のサイドローブからの混入の確認と放射源の同定を行った。同一の放射源からの混入と思われる天体が複数あった場合は、その放射源の天体からの距離が最も近い天体のみを検出数にカウントした。

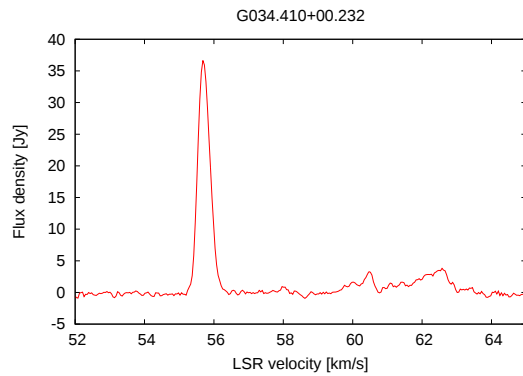


図 5 検出 (5σ 以上) の例. 速度成分 55.7km/s 付近のピークは約 131.8σ である。

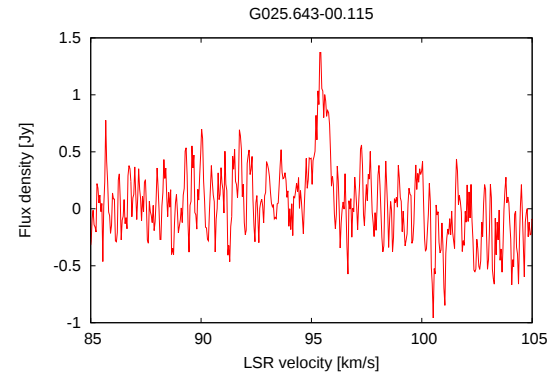


図 6 マージナルディテクション ($3-5\sigma$) の例. 速度成分 95.4km/s 付近のピークは約 4.4σ である。

スペクトルを検出した領域で過去に観測例が見られない天体は 9 点法という方法で追観測を実施した。9 点法とは図 7、図 8 のように観測天体を中心に赤経赤緯方向に日立ビームの半値半幅ずつオフセットを入れて 9 点の観測を行い、観測天体の位置を正確に算出する測定法である。これにより BGPS ダストコアの座標にレーザーが付随しているのかを日立アンテナのビームサイズ程度の精度で明らかにすることができる。また、マージナルなレーザー放射及びマージナルで新検出と思われるレーザー放射は 5 分間積分を複数回数行うことで感度を向上させ、レーザー放射の有無の確認を行った。マージナルなレーザー放射については、この複数回数の 5 分間積分によって 5σ 以上を達成したものを検出数としてカウントした。

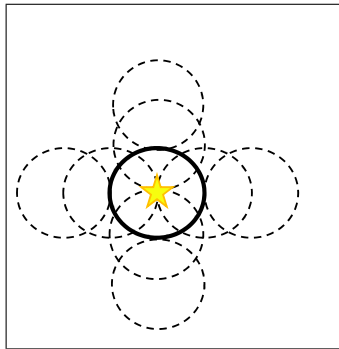


図 7 9 点法イメージ図. 中心の星マークは観測天体。実線が on 点に向けた時の日立ビームで、点線が赤経赤緯方向にオフセットを入れた日立ビームである。日立ビームの半値幅が 2.3 分角なので、観測天体を中心に赤経赤緯方向に ± 2.3 、 ± 4.6 分角ずつのオフセットを入れた 9 点の観測を行う。

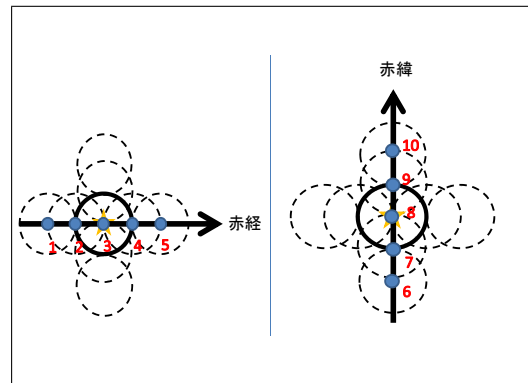


図 8 9 点法イメージ図その 2. 実際に 9 点法を行うときには、このように中心点の観測を 2 回行い、かつ各点の off 点の観測も行うため、10(点) $\times$ 2(on,off) の 20 ポイントで 1 セットの観測となる。

3 結果

3.1 観測結果

296 天体中 53 天体からの放射が確認され、検出率は 17.9% となった。そのうち新検出と思われる天体は 4 天体であった。

3.2 既知のメーザー源とのスペクトル比較

前章で記述した master catalog に記載されている天体は、茨城大学が別のプロジェクトで高頻度のモニタリングを行っている。以下に記載する master catalog 天体のスペクトルは 2014 年 11 月 10 日 (月) から 2014 年 11 月 24 日 (月) の間に計 9 回行われた観測から得られたデータを使用している。以下では今回の観測で得られたスペクトルを左、既知天体を右に記載していく。

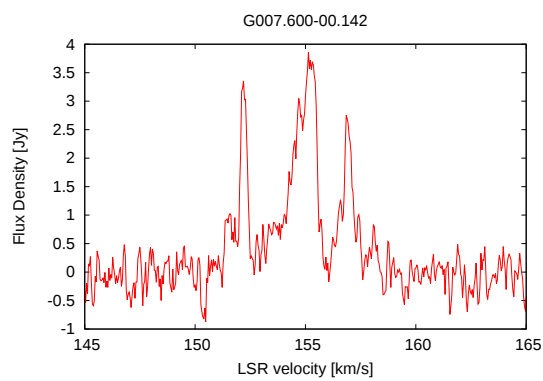


図 9 G007.600-00.142

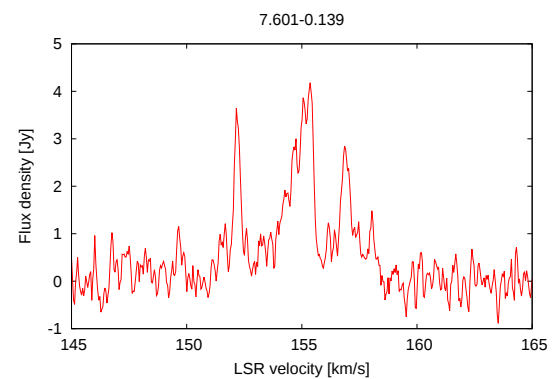


図 10 既知天体 G007.601-0.139. 離角は約 0.20 分角

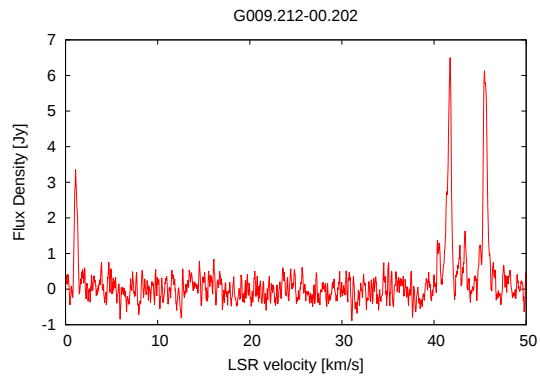


図 11 G009.212-00.202 40–50km/s 付近の成分は
図 12 の天体から、0km/s 付近の成分は図 13 からと、
それぞれ考えられる。

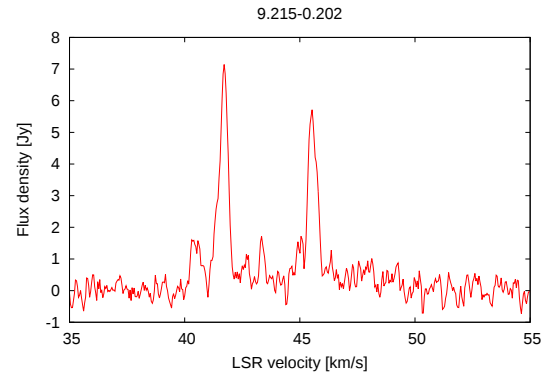


図 12 既知天体 G009.215-0.202. 離角は約 0.16 分角

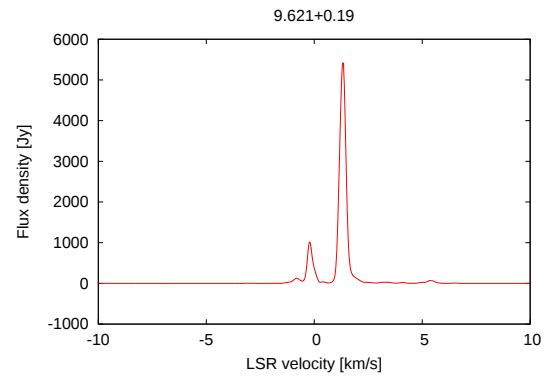


図 13 既知天体 G009.621+0.196. 離角は約 34 分角

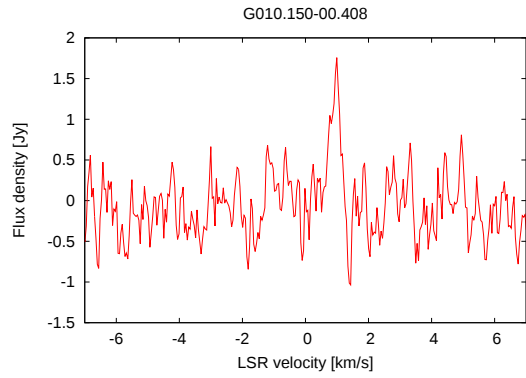


図 14 G010.150-00.408 マージナルディテクション
かつ新検出の可能性有り

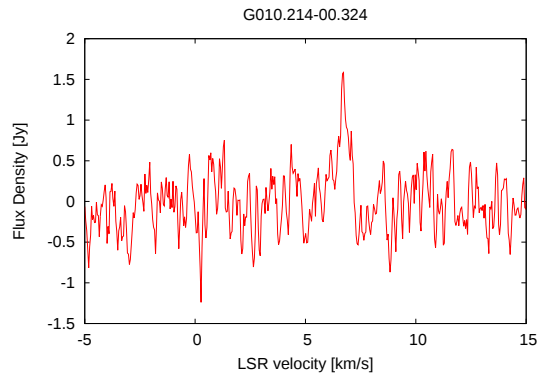


図 15 G010.214-00.324

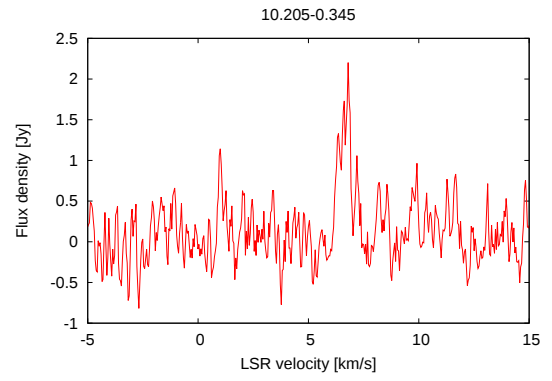


図 16 既知天体 G010.205-0.345. 離角は約 1.4 分角

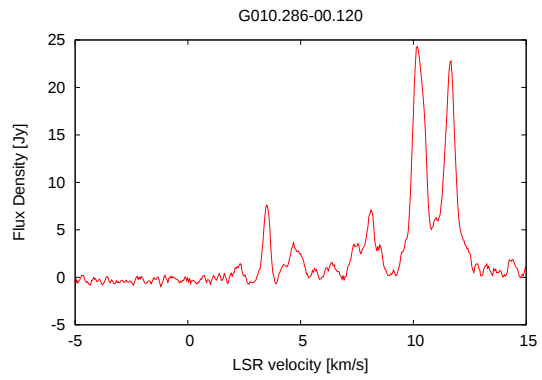


図 17 G010.286-00.120

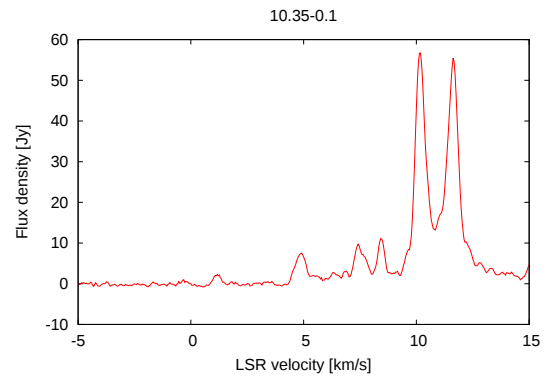


図 18 既知天体 G010.356-0.148. 離角は約 4.7 分角

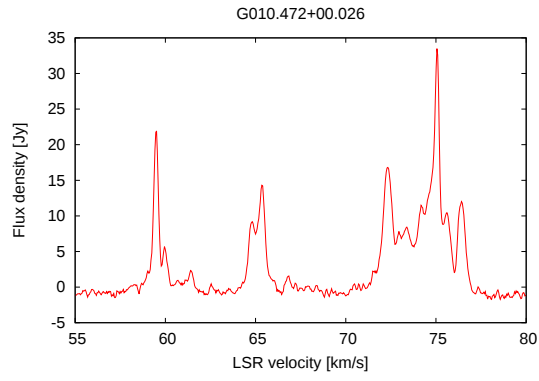


図 19 G010.472+00.026

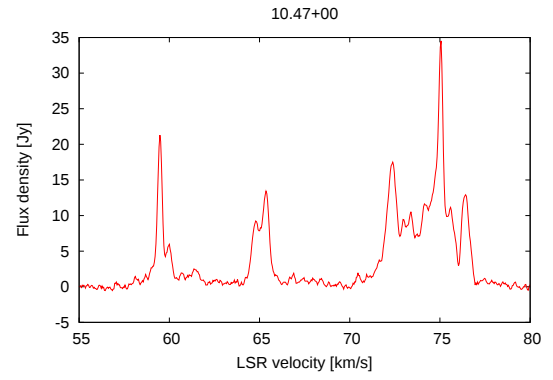


図 20 既知天体 G010.472+00.027. 離角は約 0.08 分角

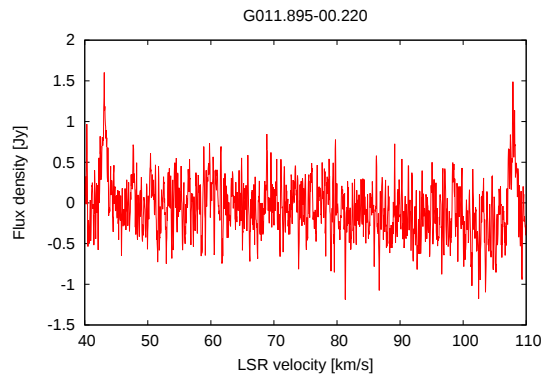


図 21 G011.895-00.220

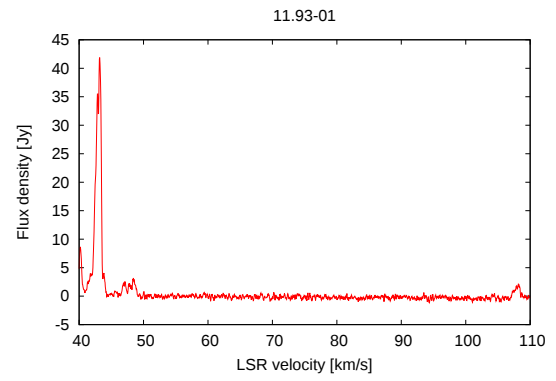


図 22 既知天体 G011.936-0.150. 離角は約 4.9 分角

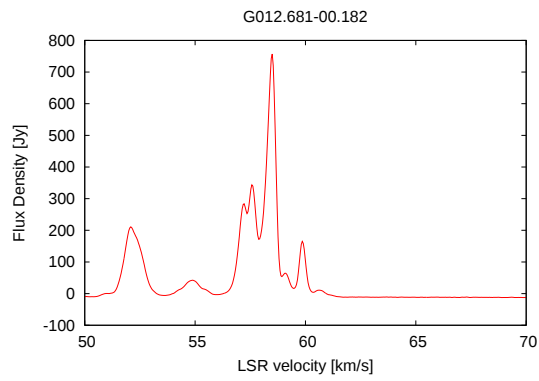


図 23 G012.681-00.182

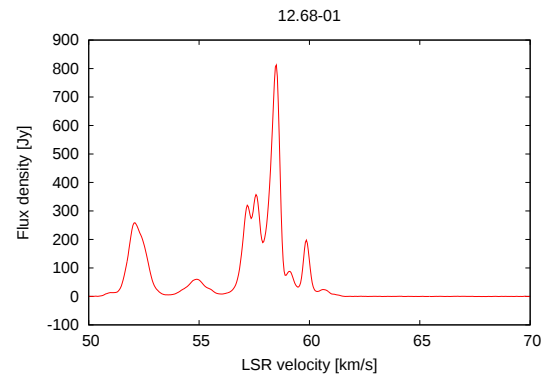


図 24 既知天体 G012.681-0.182. 離角は約 0.16 分角

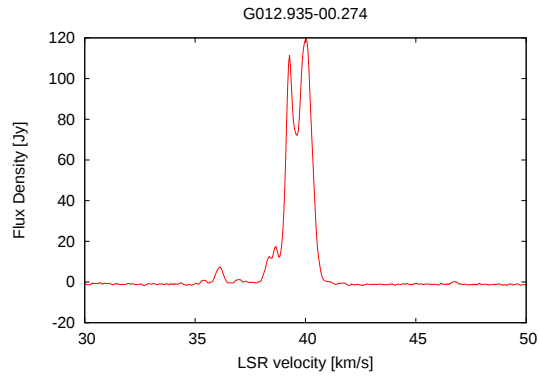


図 25 G012.935-00.274

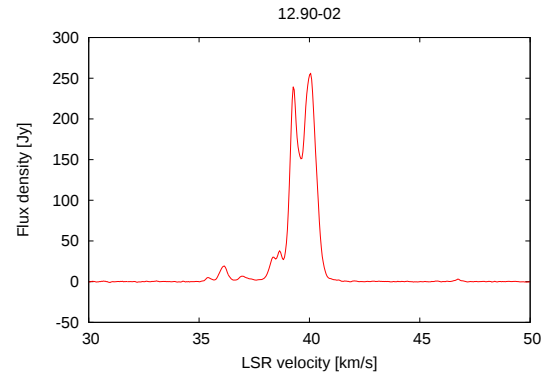


図 26 既知天体 G012.909-0.260. 離角は約 1.8 分角

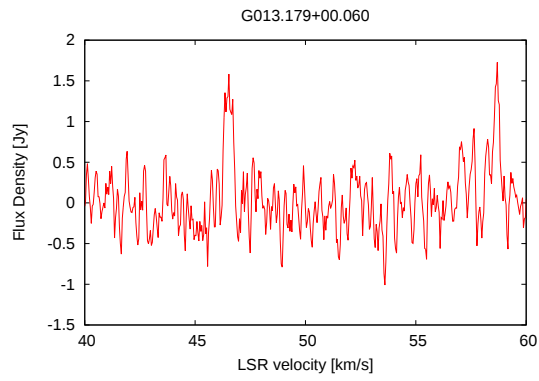


図 27 G013.179+00.060

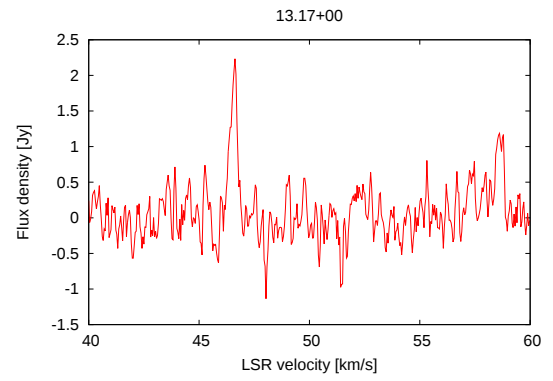


図 28 既知天体 G013.179+00.060. 離角は約 0.02 分角

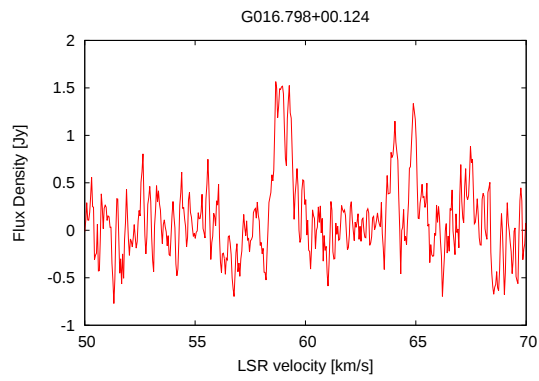


図 29 G016.798+00.124

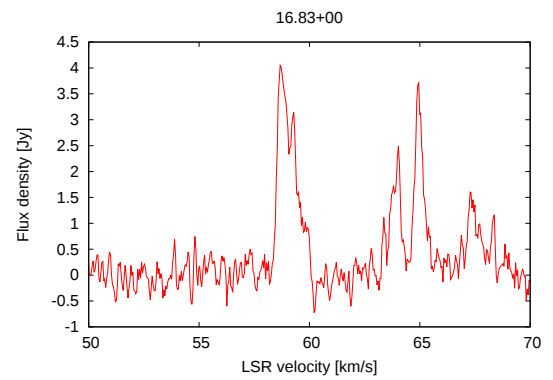


図 30 既知天体 G016.831+0.079. 離角は約 3.2 分角

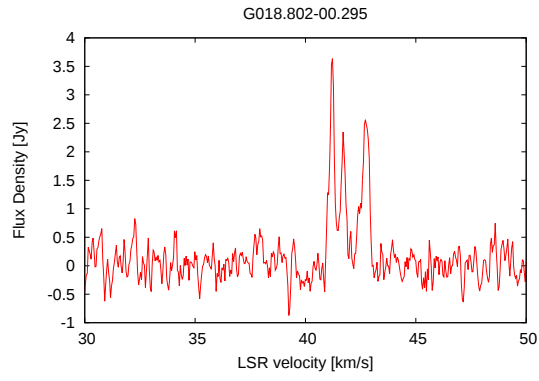


図 31 G018.802-00.295

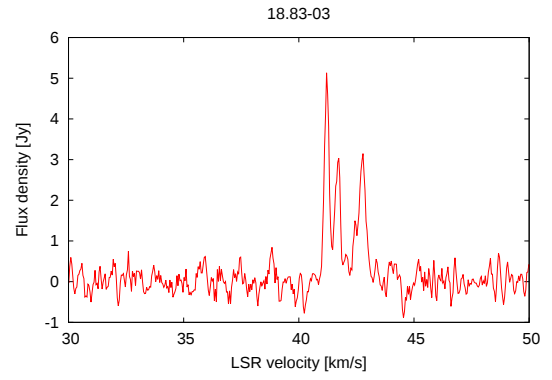


図 32 既知天体 G018.834-0.300. 離角は約 1.9 分角

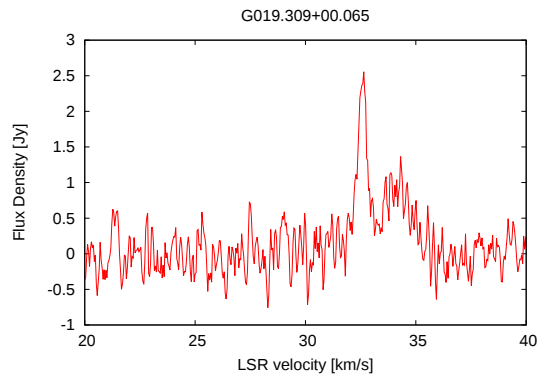


図 33 G019.309+00.065 新検出の可能性有り

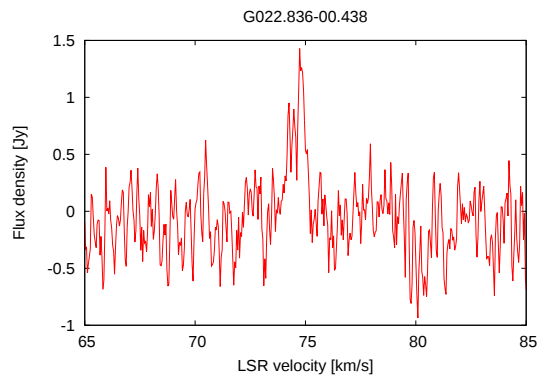


図 34 G022.836-00.438

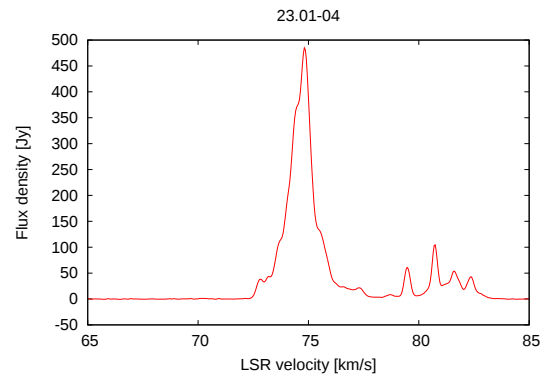


図 35 既知天体 G023.01-0.41. 離角は約 11 分角

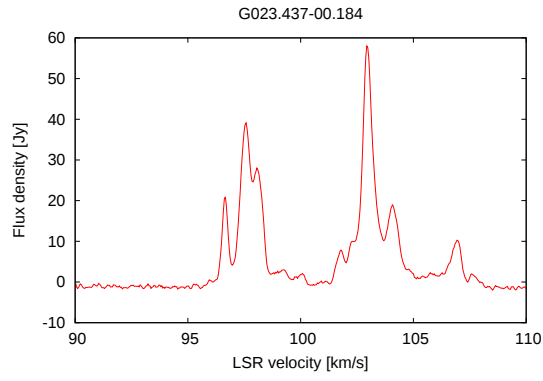


図 36 G023.437-00.184

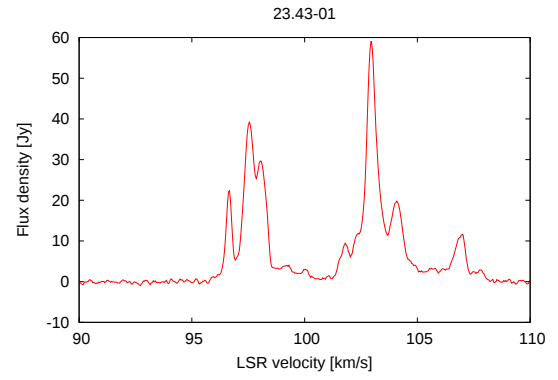


図 37 既知天体 G023.43-0.18. 離角は約 0.12 分角

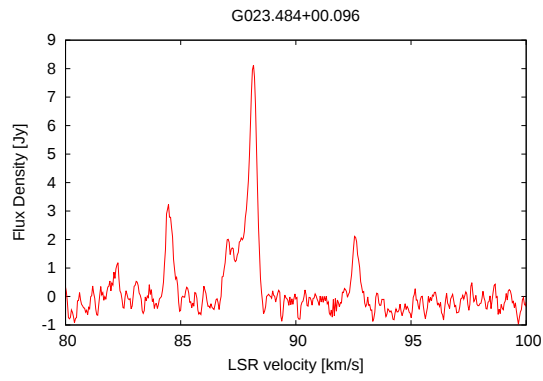


図 38 G023.484+00.096

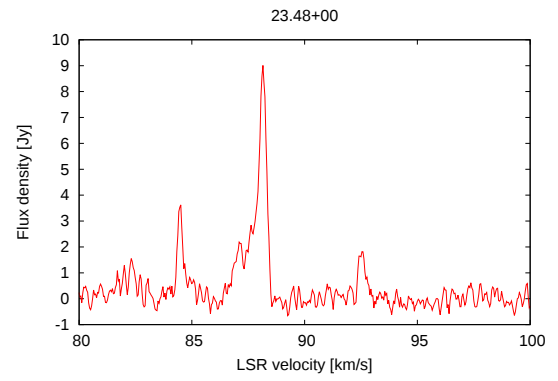


図 39 既知天体 G023.48+0.08. 離角は約 0.06 分角

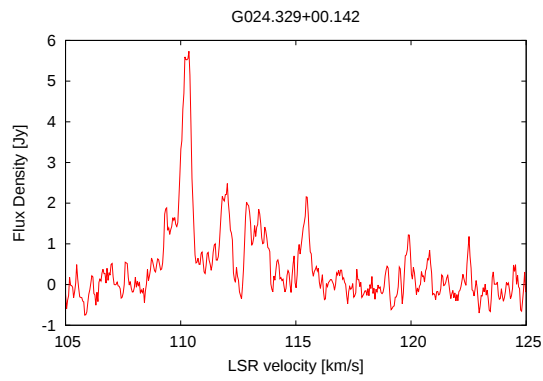


図 40 G024.329+00.142

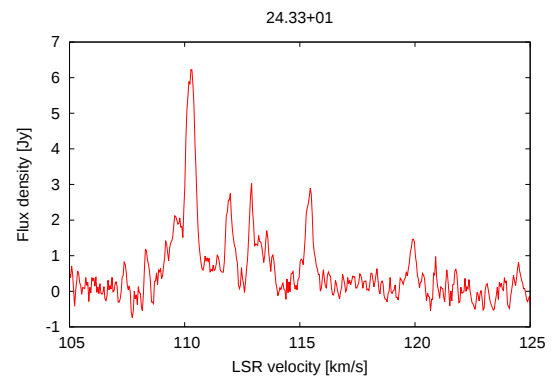


図 41 既知天体 G024.33+0.14. 離角は約 0.06 分角

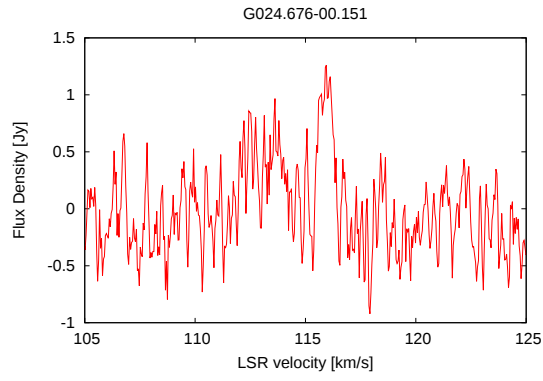


図 42 G024.676-00.151 マージナルディテクション

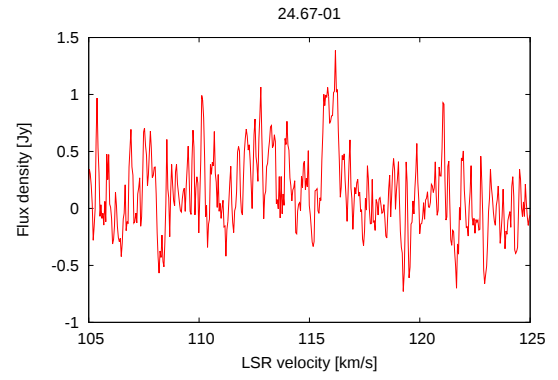


図 43 既知天体 G024.67-0.14. 離角は約 0.54 分角

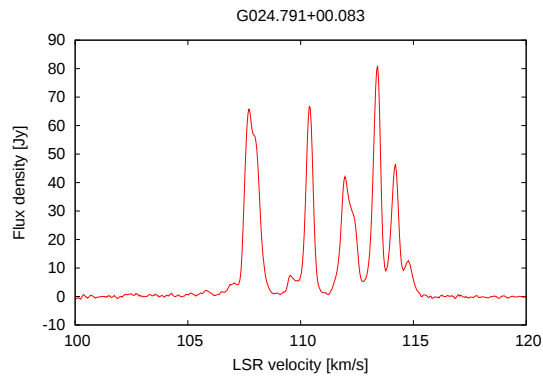


図 44 G024.791+00.083

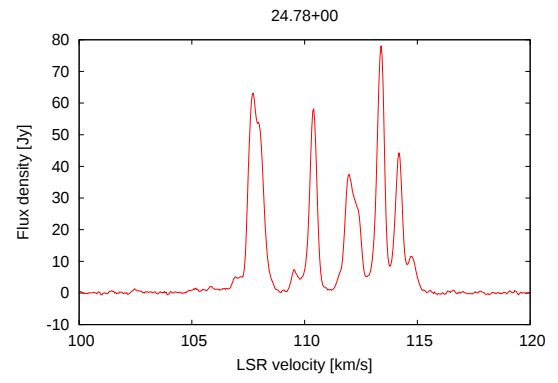


図 45 既知天体 G024.78+0.08. 離角は約 0.09 分角

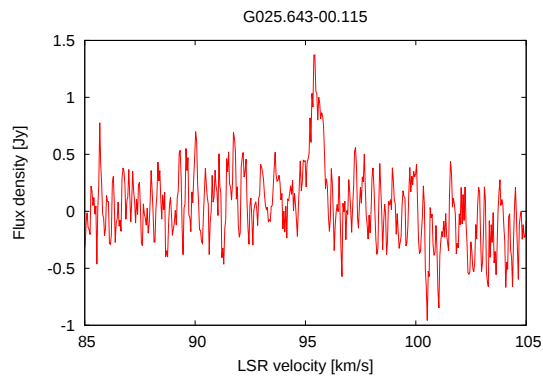


図 46 G025.643-00.115 マージナルディテクション

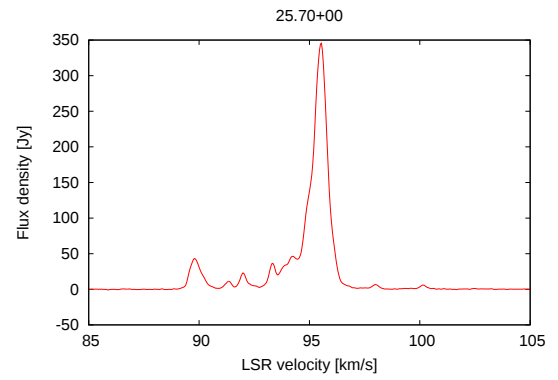


図 47 既知天体 G025.70+0.04. 離角は約 11 分角

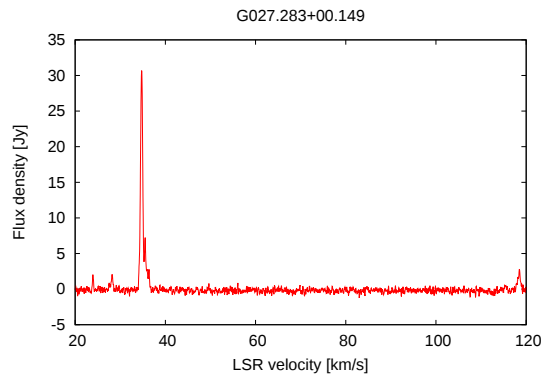


図 48 G027.283+00.149 120km/s 付近の成分は図 49 の天体から、20–40km/s 付近の成分は図 50 からと、それぞれ考えられる。

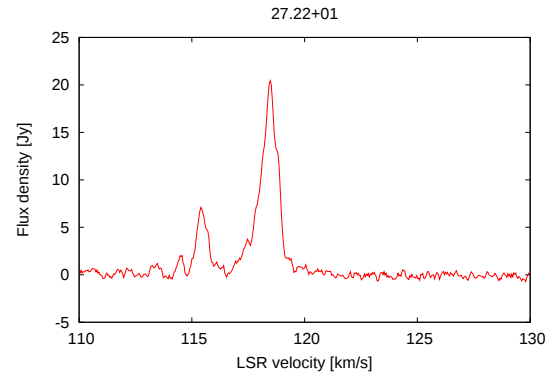


図 49 既知天体 G027.22+0.13. 離角は約 3.7 分角

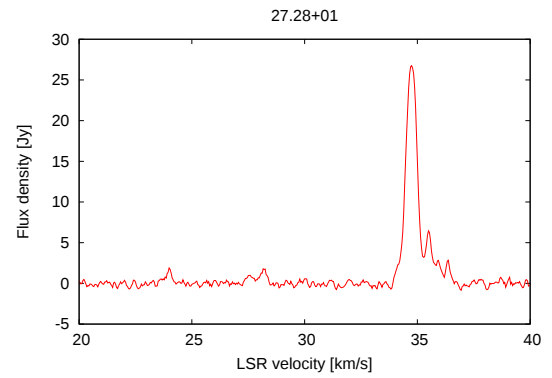


図 50 既知天体 G027.28+0.15. 離角は約 0.23 分角

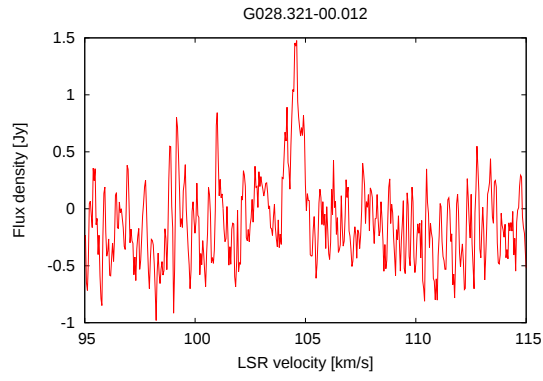


図 51 G028.321-00.012 マージナルディテクション

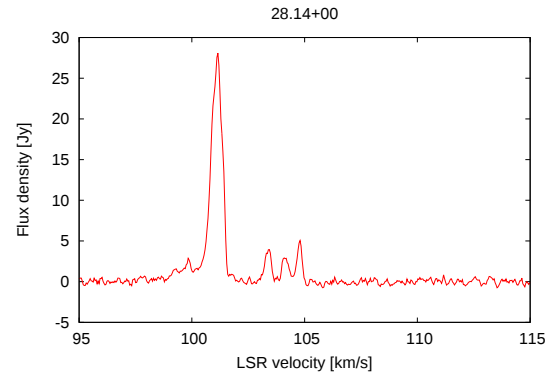


図 52 既知天体 G028.14+0.00. 離角は約 10 分角

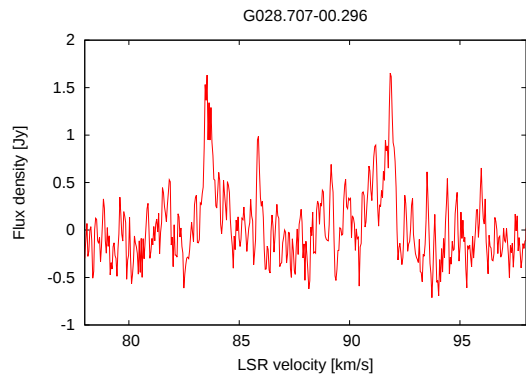


図 53 G028.707-00.296

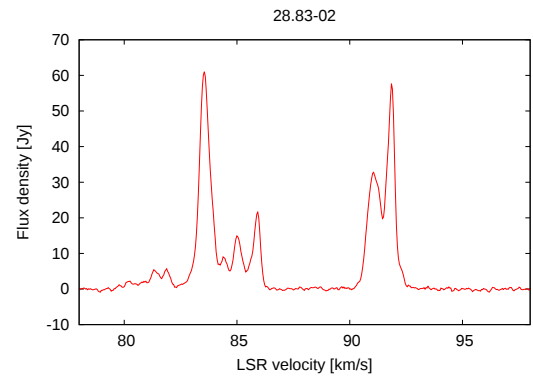


図 54 既知天体 G028.83-0.25. 離角は約 7.9 分角

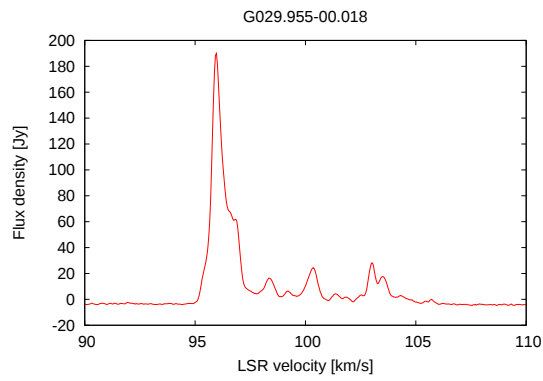


図 55 G029.955-00.018

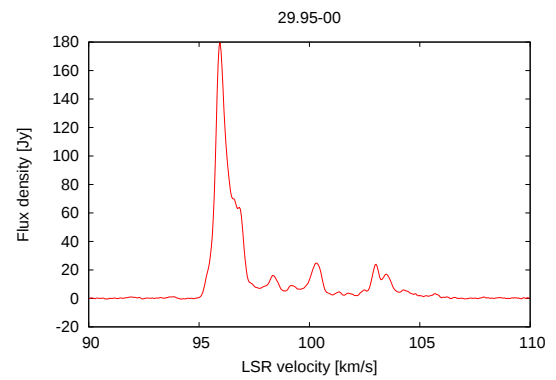


図 56 既知天体 G029.95-0.02. 離角は約 0.10 分角

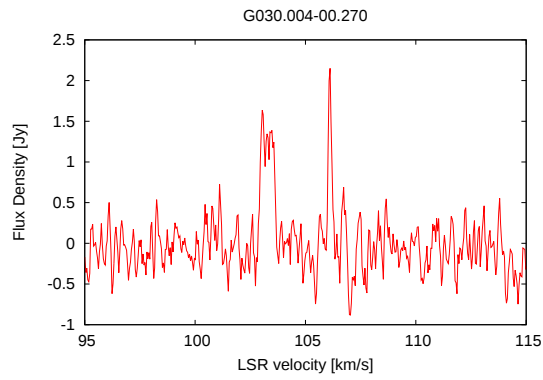


図 57 G030.004-00.270 新検出の可能性有り

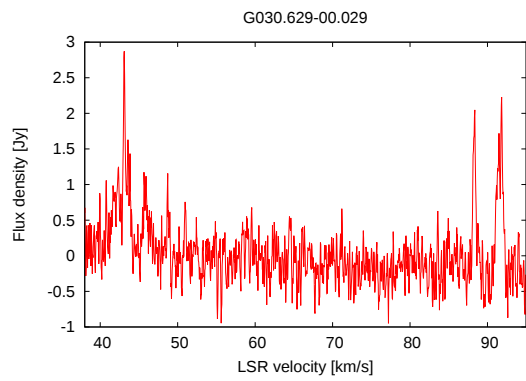


図 58 G030.629-00.029 40–50km/s 付近の成分は
図 59 の天体から、90km/s 付近の成分は図 60 から
と、それぞれ考えられる。

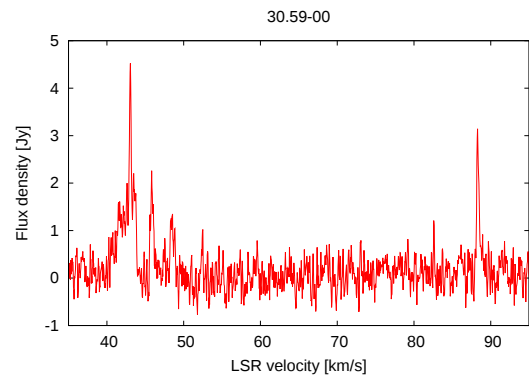


図 59 既知天体 G030.59-0.04. 離角は約 2.4 分角

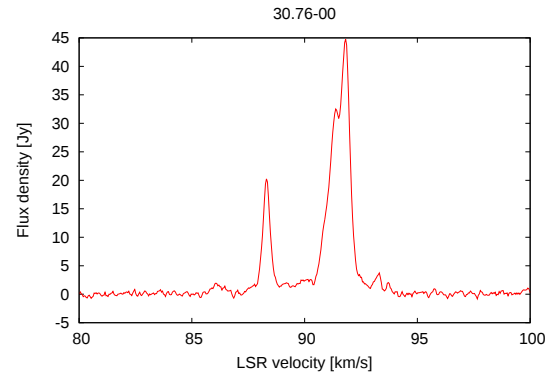


図 60 既知天体 G030.76-0.05. 離角は約 8.0 分角

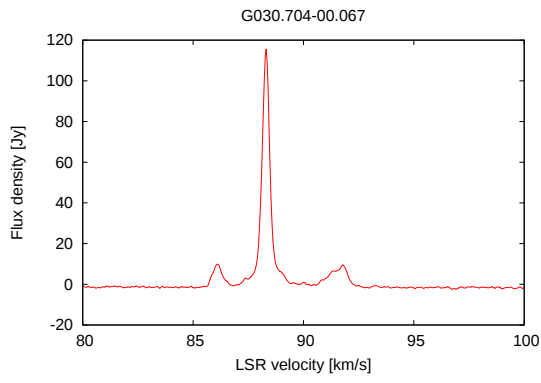


図 61 G030.704-00.067

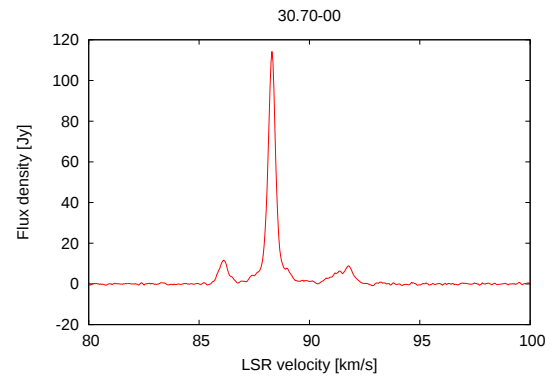


図 62 既知天体 G030.70-0.07. 離角は約 0.30 分角

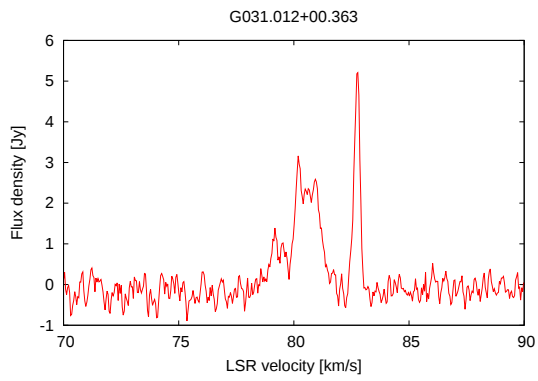


図 63 G031.012+00.363

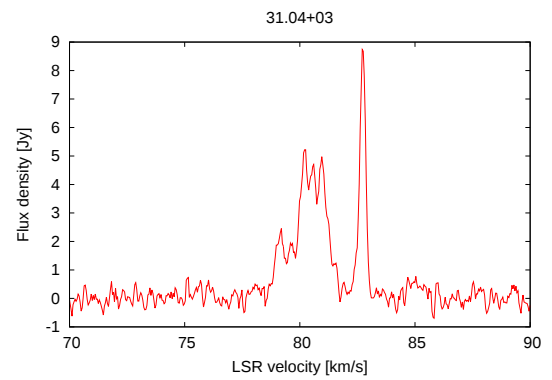


図 64 既知天体 G031.04+0.36. 離角は約 2.2 分角

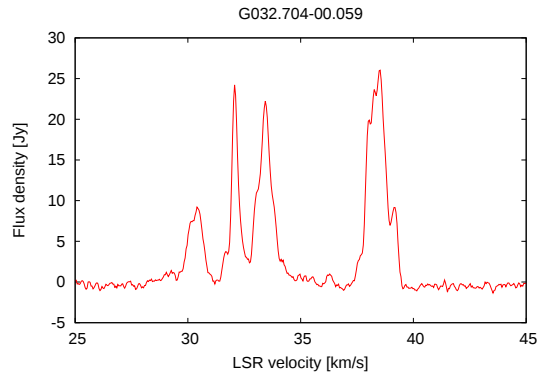


図 65 G032.704-00.059

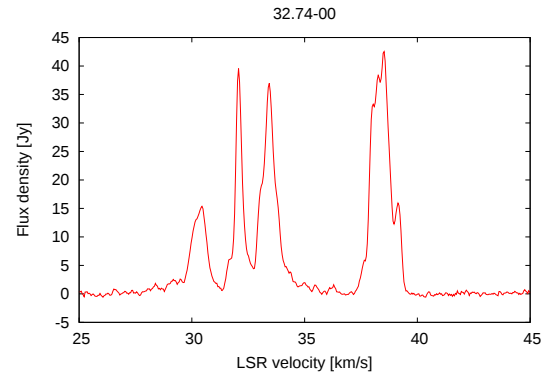


図 66 既知天体 G032.74-0.08. 離角は約 2.6 分角

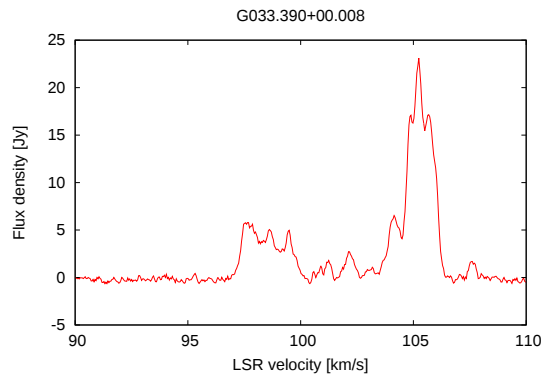


図 67 G033.390+00.008

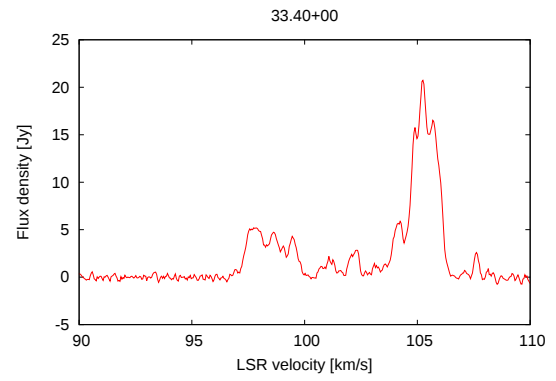


図 68 既知天体 G033.40+0.01. 離角は約 1.0 分角

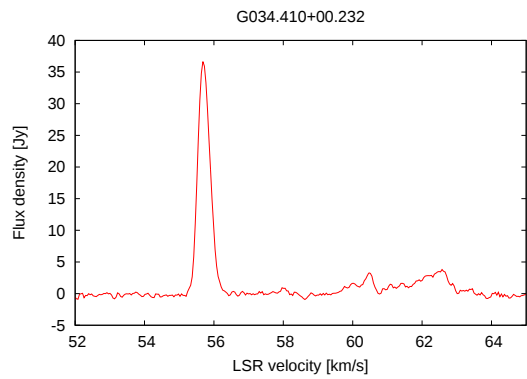


図 69 G034.410+00.232

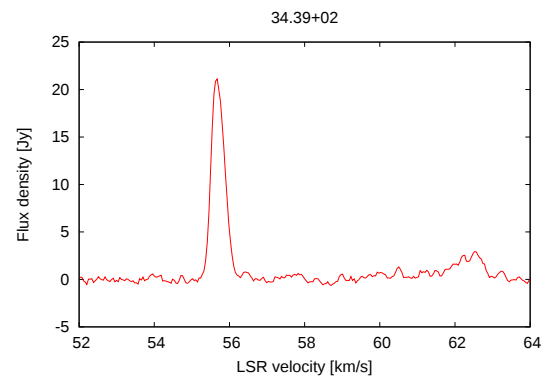


図 70 既知天体 G034.39+0.24. 離角は約 1.5 分角

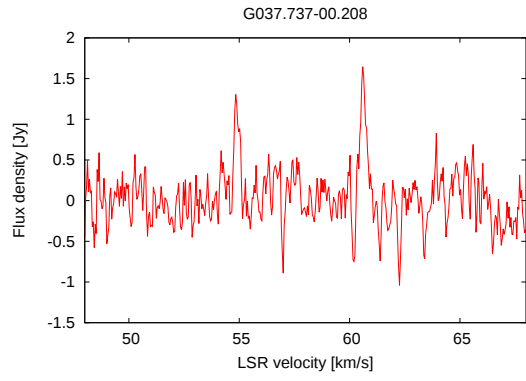


図 71 G037.737-00.208

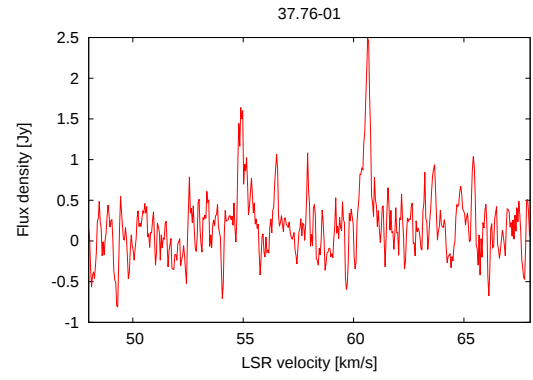


図 72 既知天体 G037.76-0.19. 離角は約 1.5 分角

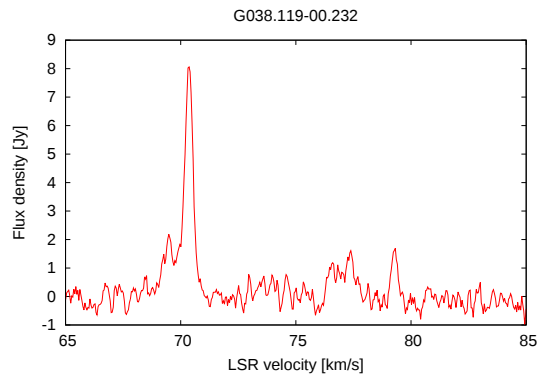


図 73 G038.119-00.232

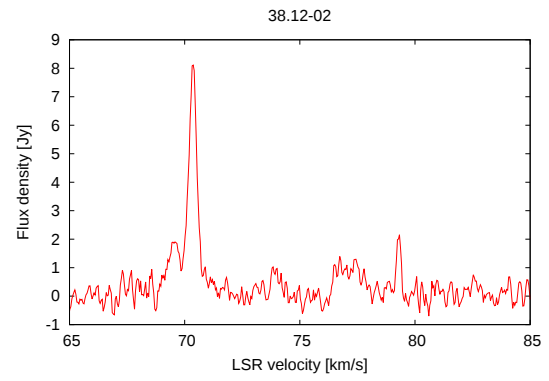


図 74 既知天体 G038.12-0.24. 離角は約 0.14 分角

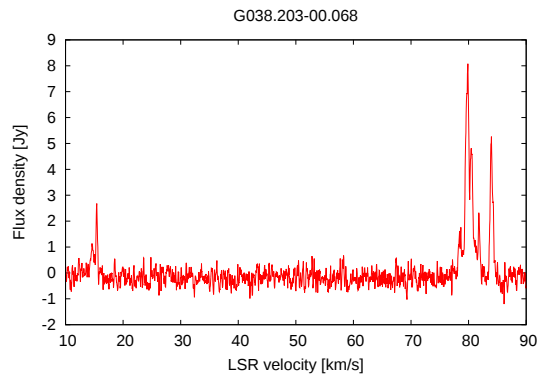


図 75 G038.203-00.068 80km/s 付近の成分は図 76 の天体から、10–20km/s 付近の成分は図 77 からと、それぞれ考えられる。

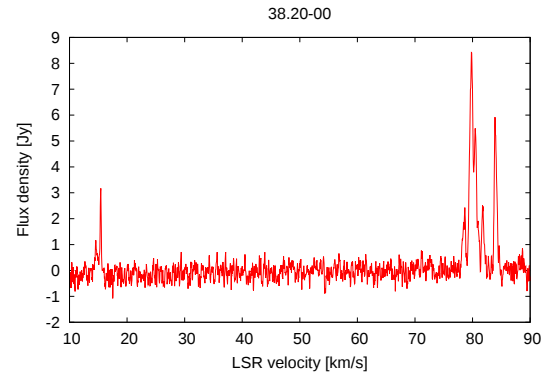


図 76 既知天体 G038.20-0.08. 離角は約 0.13 分角

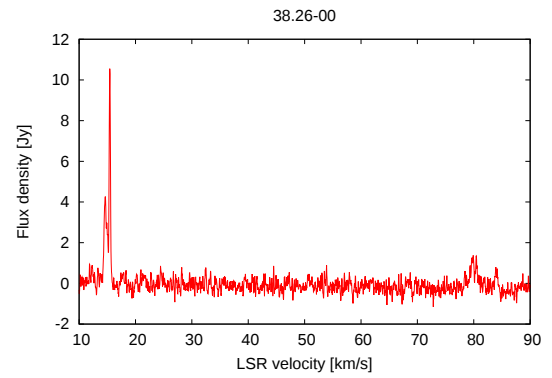


図 77 既知天体 G038.26-0.20. 離角は約 3.3 分角

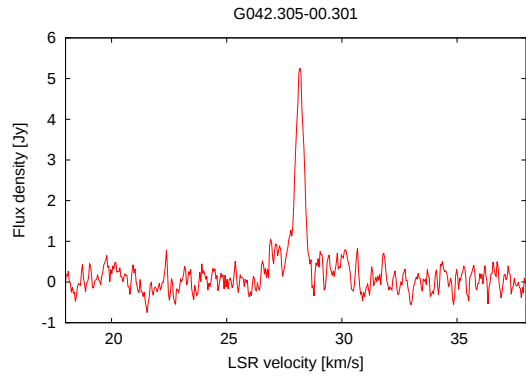


図 78 G042.305-00.301

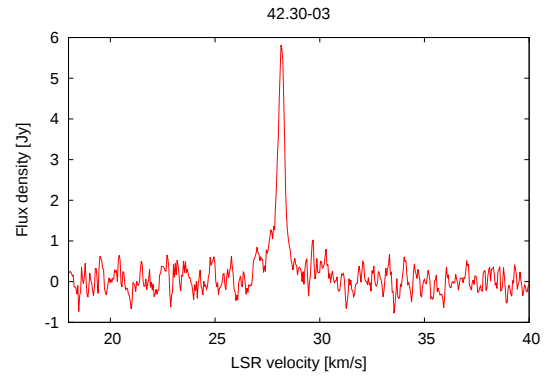


図 79 既知天体 G042.30-0.30. 離角は約 0.13 分角

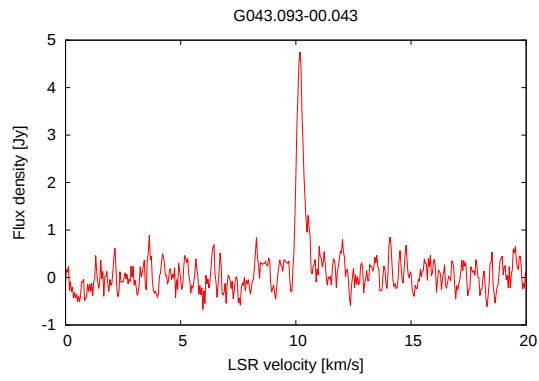


図 80 G043.093-00.043

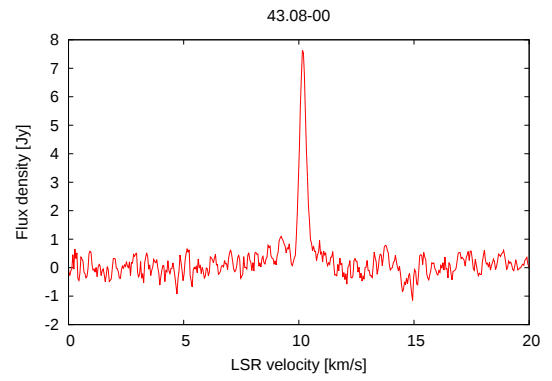


図 81 既知天体 G043.08-0.08. 離角は約 2.3 分角

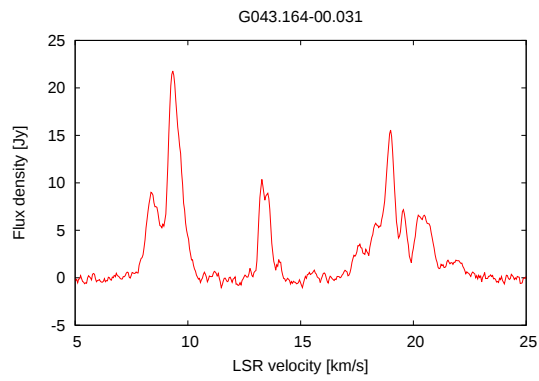


図 82 G043.164-00.031

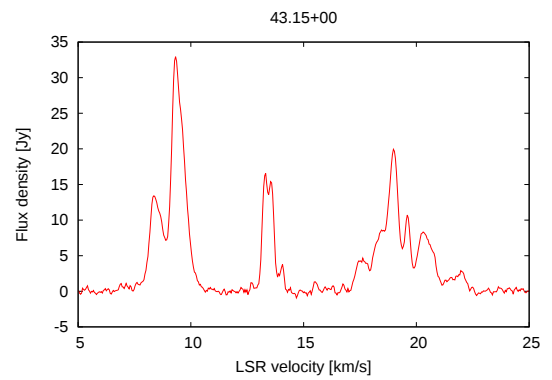


図 83 既知天体 G043.15+0.02. 離角は約 2.7 分角

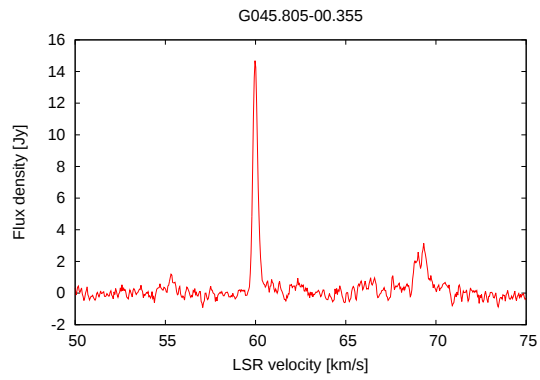


図 84 G045.805-00.355

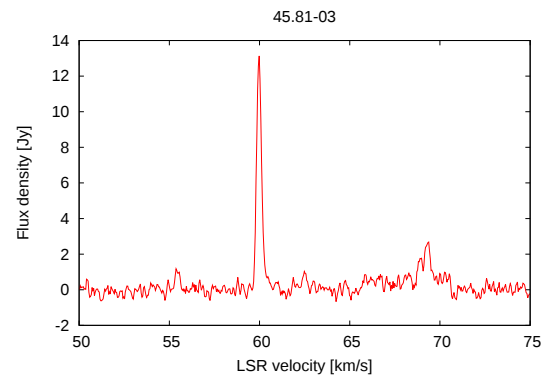


図 85 既知天体 G045.81-0.36. 離角は約 0.12 分角

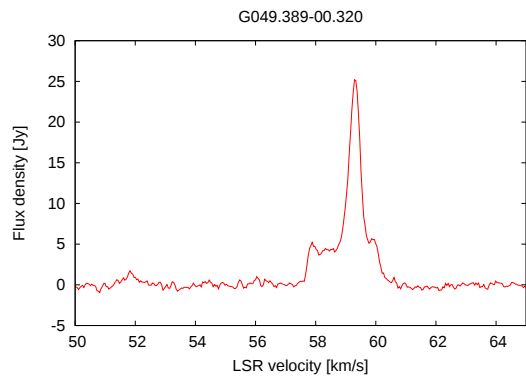


図 86 G049.389-00.320

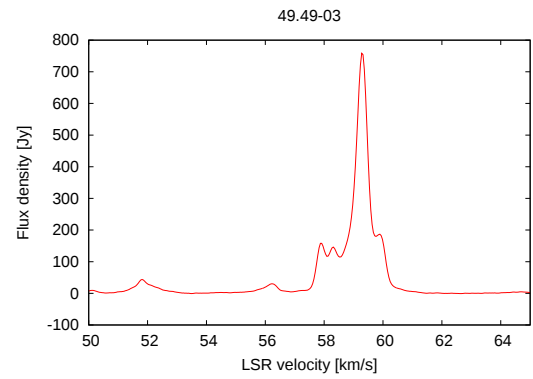


図 87 既知天体 G049.49-0.39.
G049.389-00.320 からの離角は約 7.3 分角で、
G049.561-00.276 からの離角は約 8.0 分角

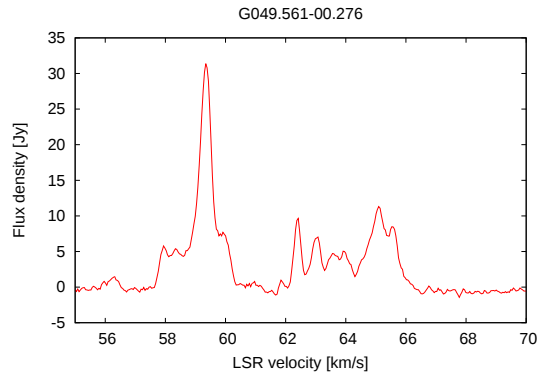


図 88 G049.561-00.276 58–60km/s 付近の成分は
図 87 の天体から、62–66km/s 付近の成分は図 89 から、それぞれ考えられる。

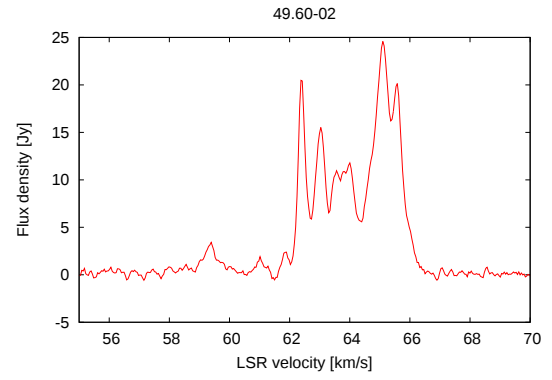


図 89 既知天体 G049.60-0.25. 離角は約 2.8 分角

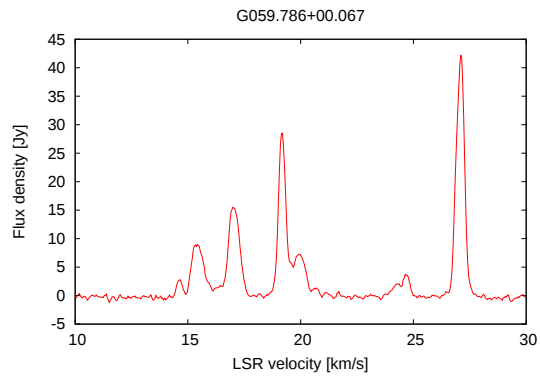


図 90 G059.786+00.067

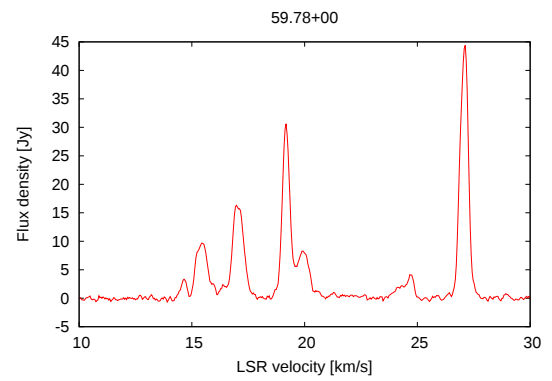


図 91 既知天体 G059.78+0.06. 離角は約 0.20 分角

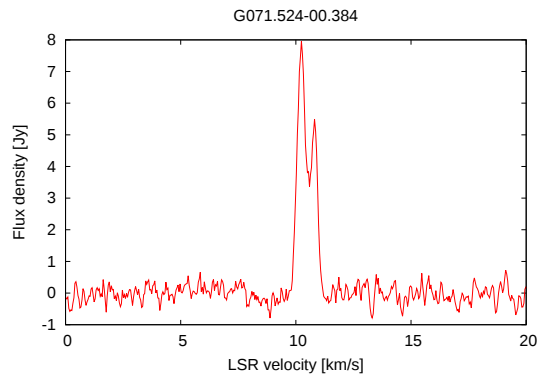


図 92 G071.524-00.384

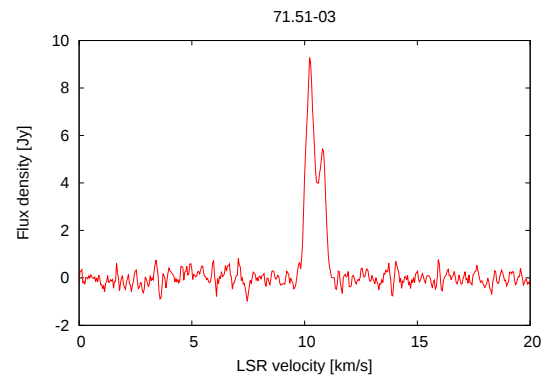


図 93 既知天体 G071.51-0.38. 離角は約 0.38 分角

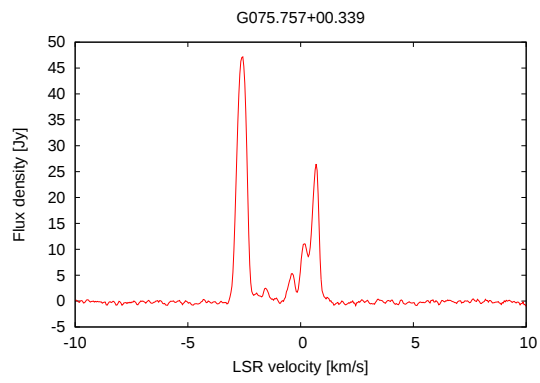


図 94 G075.757+00.339

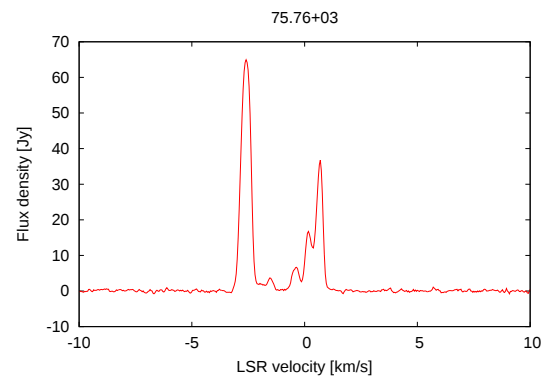


図 95 既知天体 G075.76+0.34. 離角は約 1.4 分角

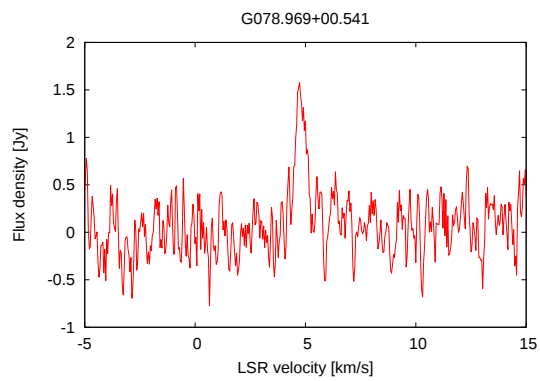


図 96 G078.969+00.541 マージナルディテクション
ンかつ新検出の可能性あり

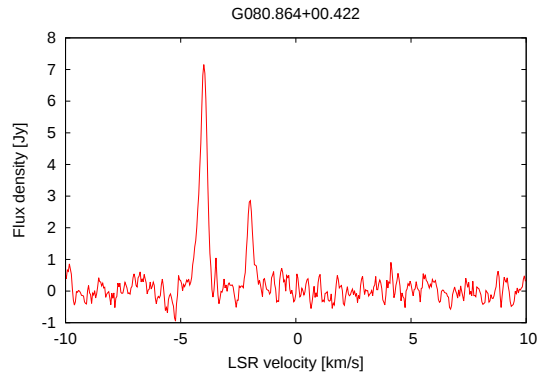


図 97 G080.864+00.422

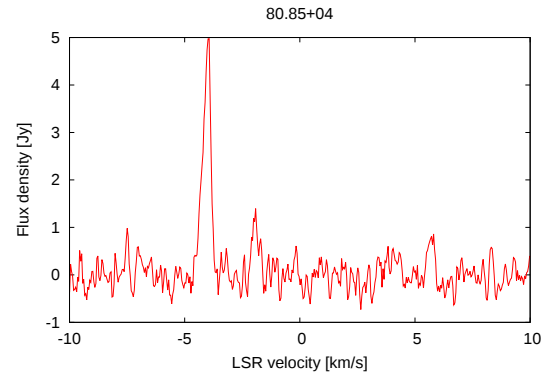


図 98 既知天体 80.85+0.43. 離角は約 0.71 分角

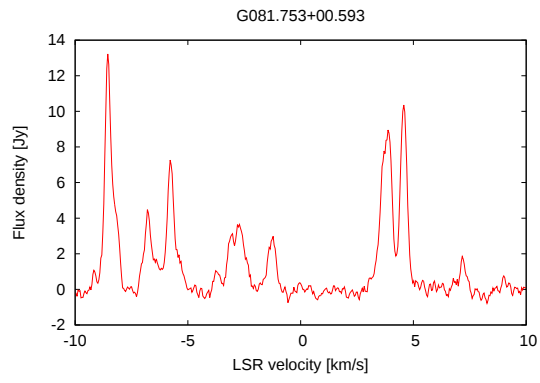


図 99 G081.753+00.593

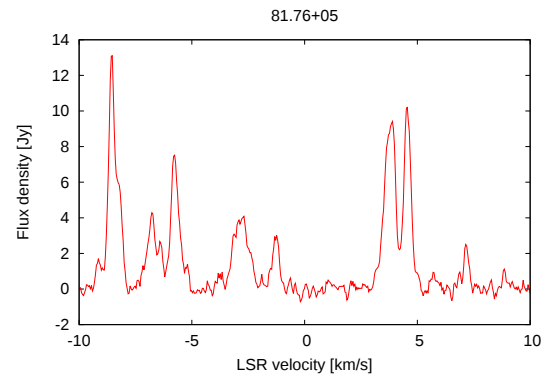


図 100 既知天体 81.76+0.59. 離角は約 0.10 分角

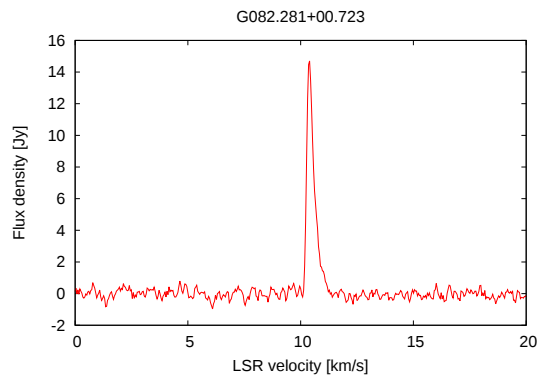


図 101 G082.281+00.723 新検出の可能性有り

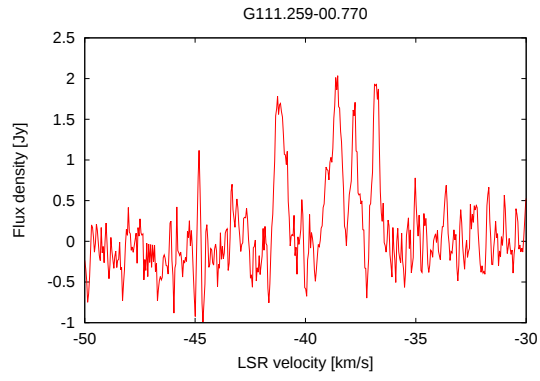


図 102 G111.259-00.770

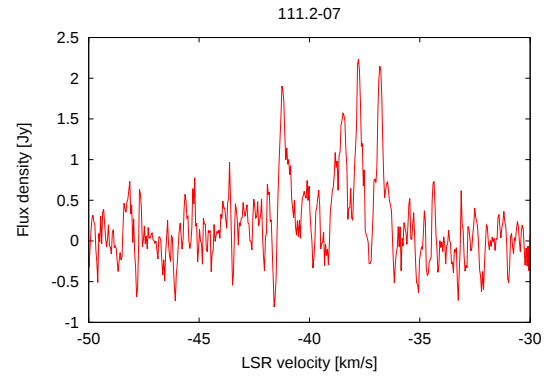


図 103 既知天体 G111.24-0.76. 離角は約 0.81 分角

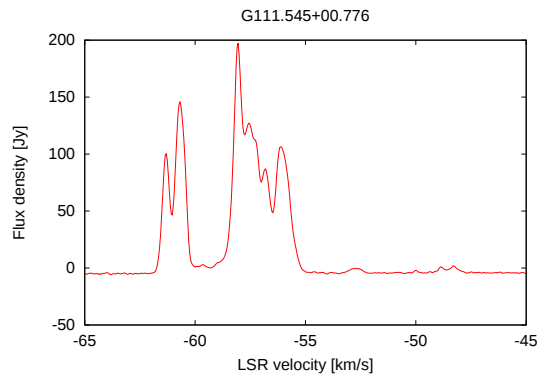


図 104 G111.545+00.776

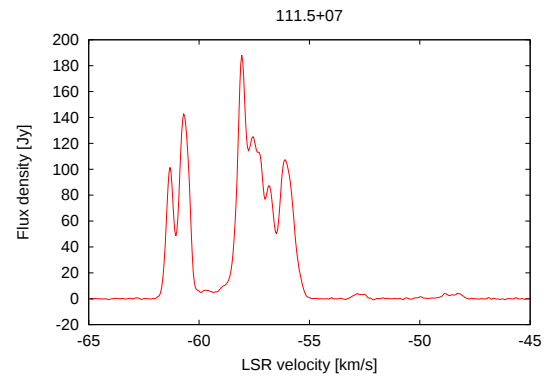


図 105 既知天体 G111.53+0.76. 離角は約 0.17 分角

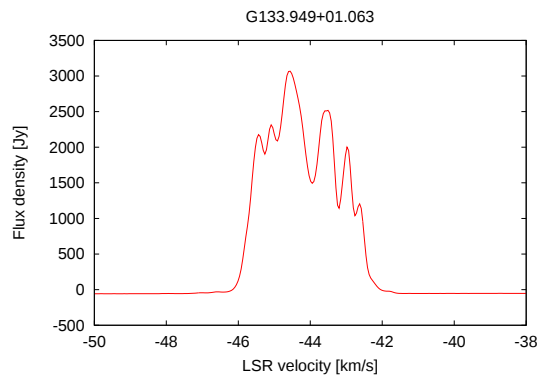


図 106 G133.949+01.063

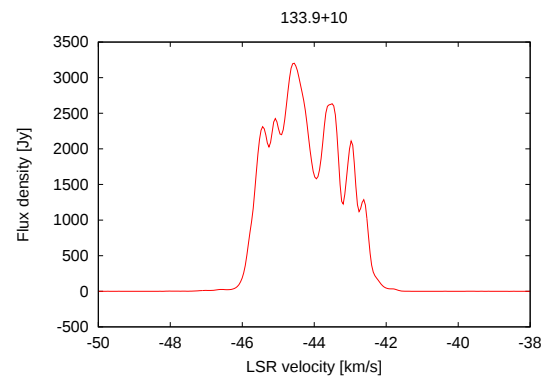


図 107 既知天体 G133.94+1.04. 離角は約 0.11 分角

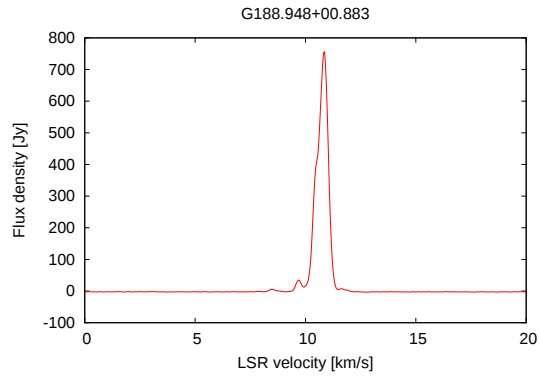


図 108 G188.948+00.883

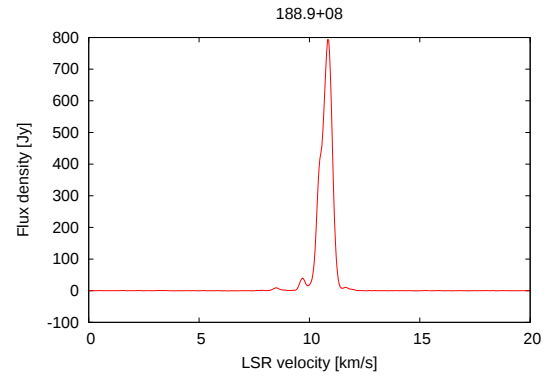


図 109 既知天体 G188.95+0.89. 離角は約 0.23 分角

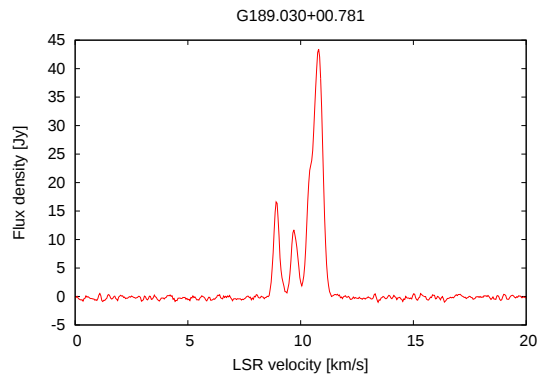


図 110 G189.030+00.781

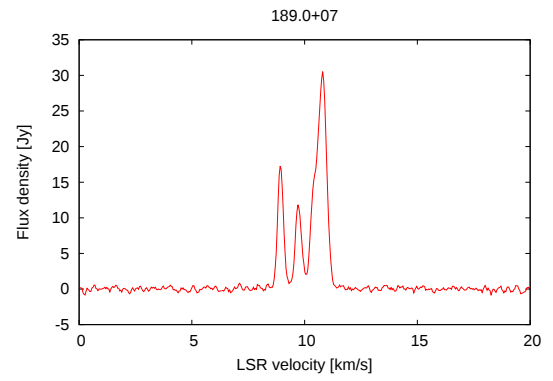


図 111 既知天体 G188.948+00.883. 離角は約 0.17 分角

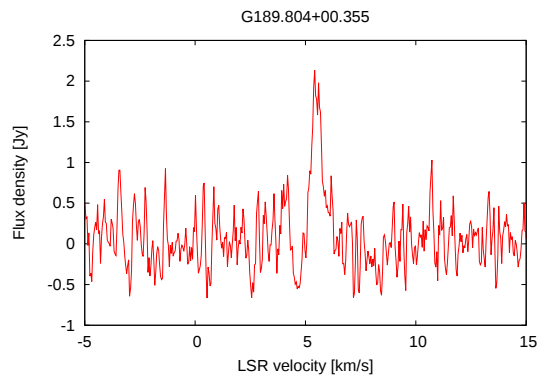


図 112 G189.804+00.355

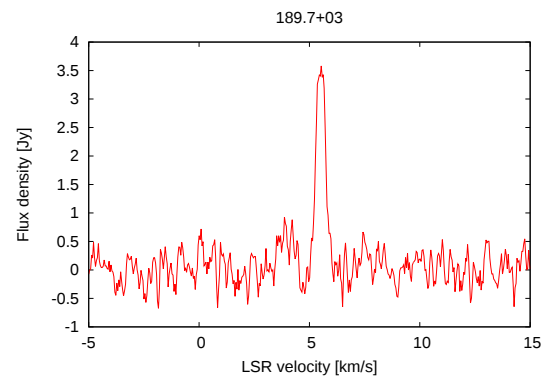


図 113 既知天体 G189.78+0.34. 離角は約 1.7 分角

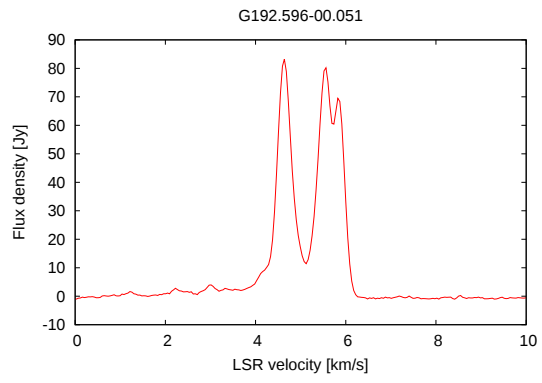


図 114 G192.596-00.051

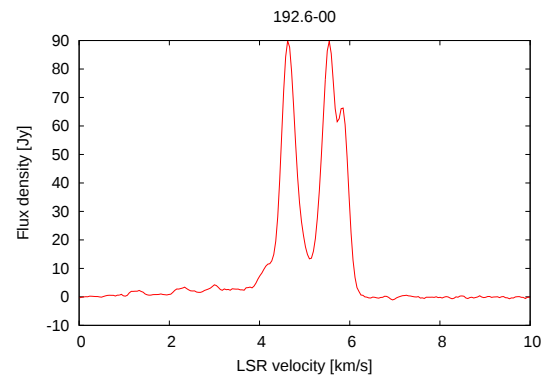


図 115 既知天体 G192.60-0.05. 離角は約 0.32 分角

3.3 追観測結果

マージナルディテクションであった G010.150-00.408(図 14)、G022.836-00.438(図 34)、G024.676-00.151(図 42)、G025.643-00.115(図 46)、G028.321-00.012(図 51)、G078.969+00.541(図 96) の 6 天体については、それぞれ 2 – 3 回の複数回観測を行い、その平均を取ることで感度を向上させた。新検出の可能性のある G019.309+00.065(図 33) と G030.004-00.270(図) については 9 点法を実施した。G082.281+00.723(図 101) の追観測はまだ行っていない。

3.3.1 複数回観測結果

複数回観測によって得られた結果では、G010.150-00.408(図 14) 以外の 5 天体で 5σ 以上を達成した。それぞれの得られたスペクトルは以下のとおりである。

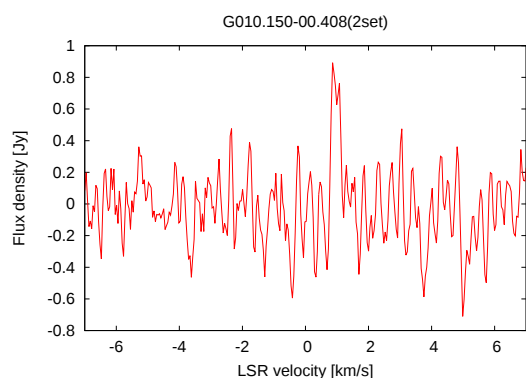


図 116 G010.150-00.408 の追観測 2 回の平均。
ピークは 4.0σ であったため検出数としてカウントしていない。

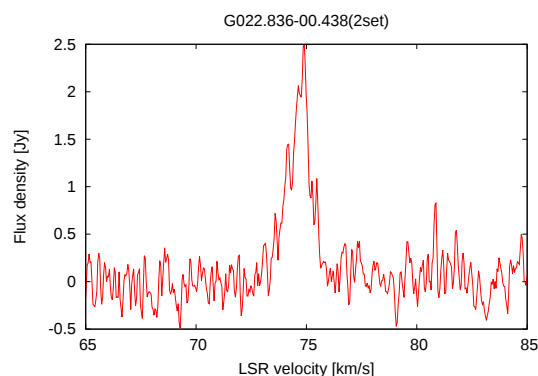


図 117 G022.836-00.438 の追観測 2 回の平均。

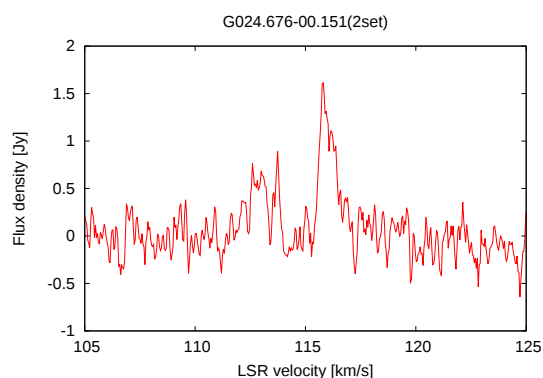


図 118 G024.676-00.151 の追観測 2 回の平均

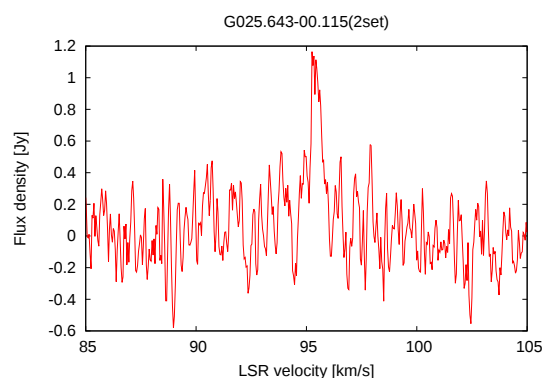


図 119 G025.643-00.115 の追観測 2 回の平均。

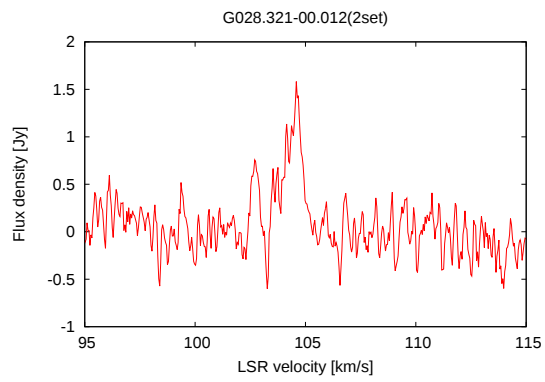


図 120 G028.321-00.012 の追観測 2 回の平均

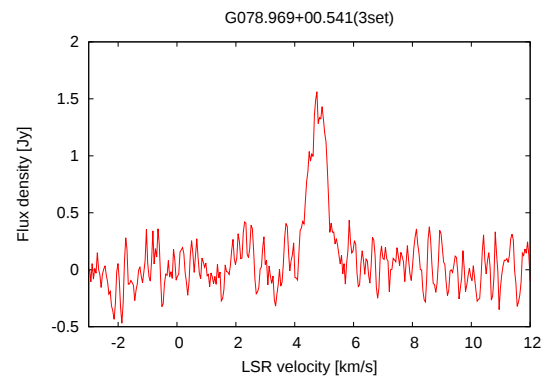


図 121 G078.969+00.541 の追観測 3 回の平均

3.3.2 9点法観測結果

G019.309+00.065 の9点法の結果は図122のとおりである。中心のピークが最も強く見えていることから、この天体に6.7GHzメタノールメーザーが付随している可能性が高いことがわかる。

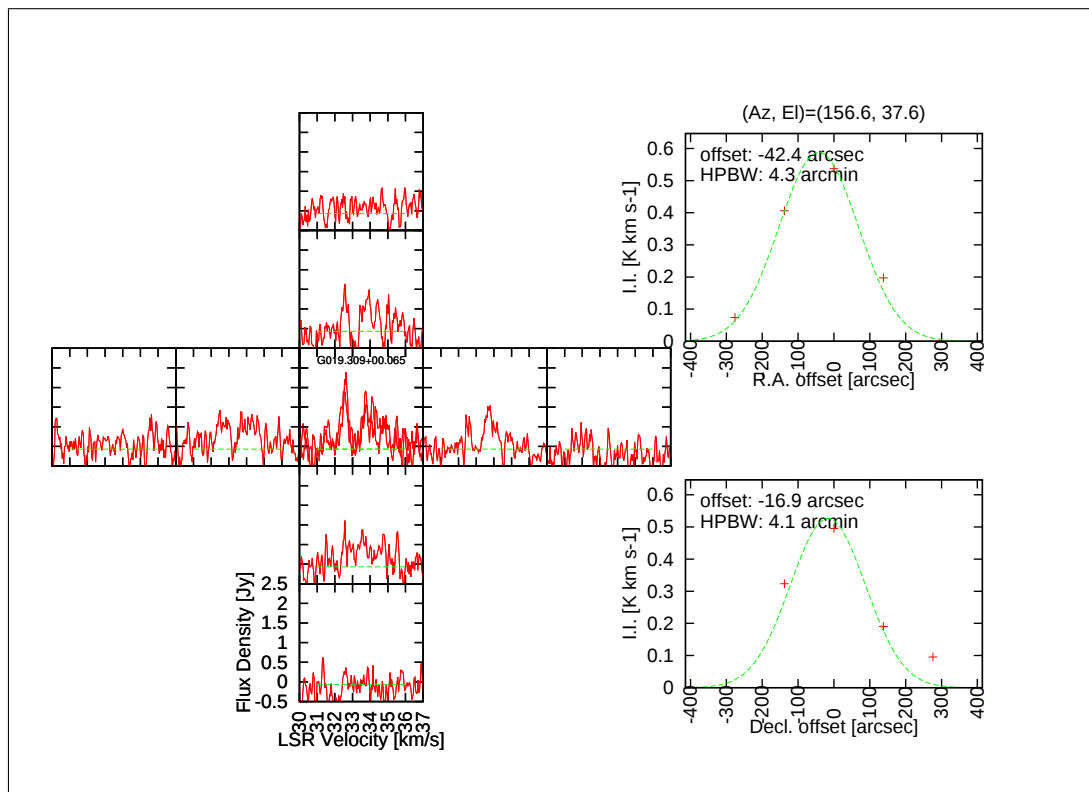


図122 G019.309+00.065 の9点法結果。 中心にメーザーが付随している場合、スペクトルのピーク値は同心円状に等しくなる

G030.004-00.270 の 9 点法の結果は図 123、図 124、図 125 のとおりである。ピークが 103km/s 付近と 106km/s 付近の二箇所に見られるため、103km/s 付近でフィッティングした図が図 124 で 106km/s 付近でフィッティングした図が図 125 である。こちらも同様に中心のピークが最も強く見えているが、103km/s 付近の成分は中心よりも -RA 方向、106km/s 付近の成分は中心よりも +RA 方向に付随している可能性がある。

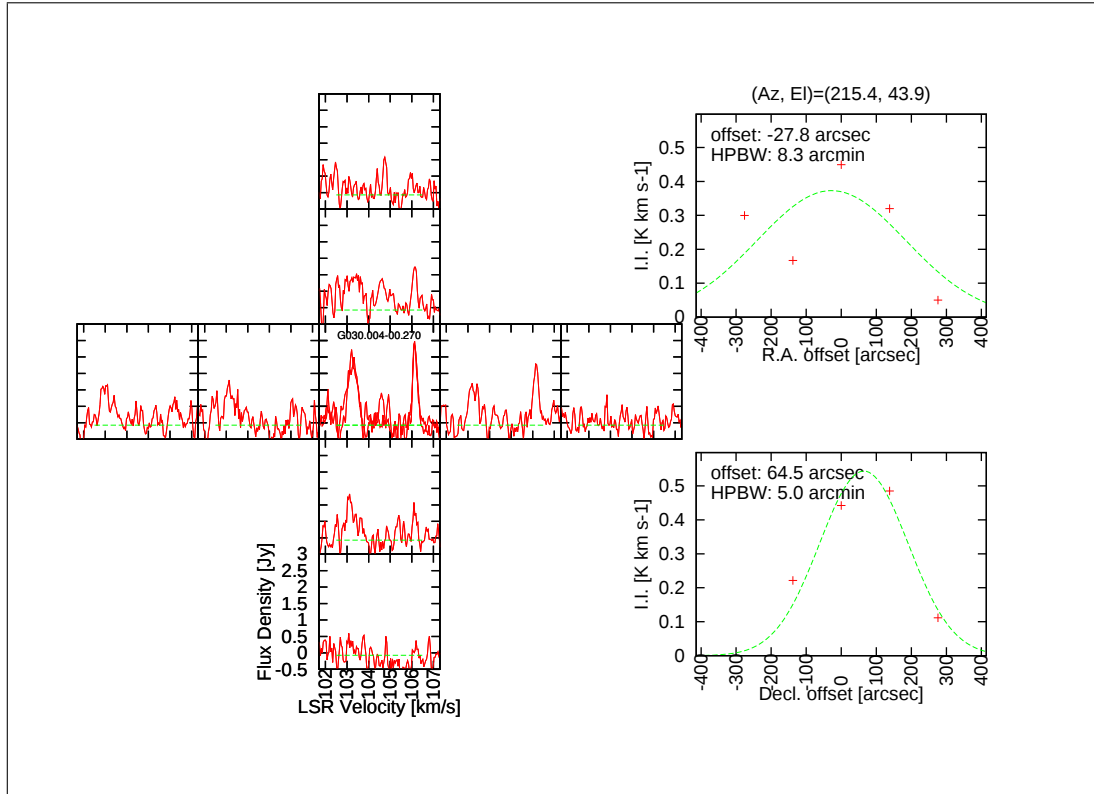


図 123 G030.004-00.270 の 9 点法結果.

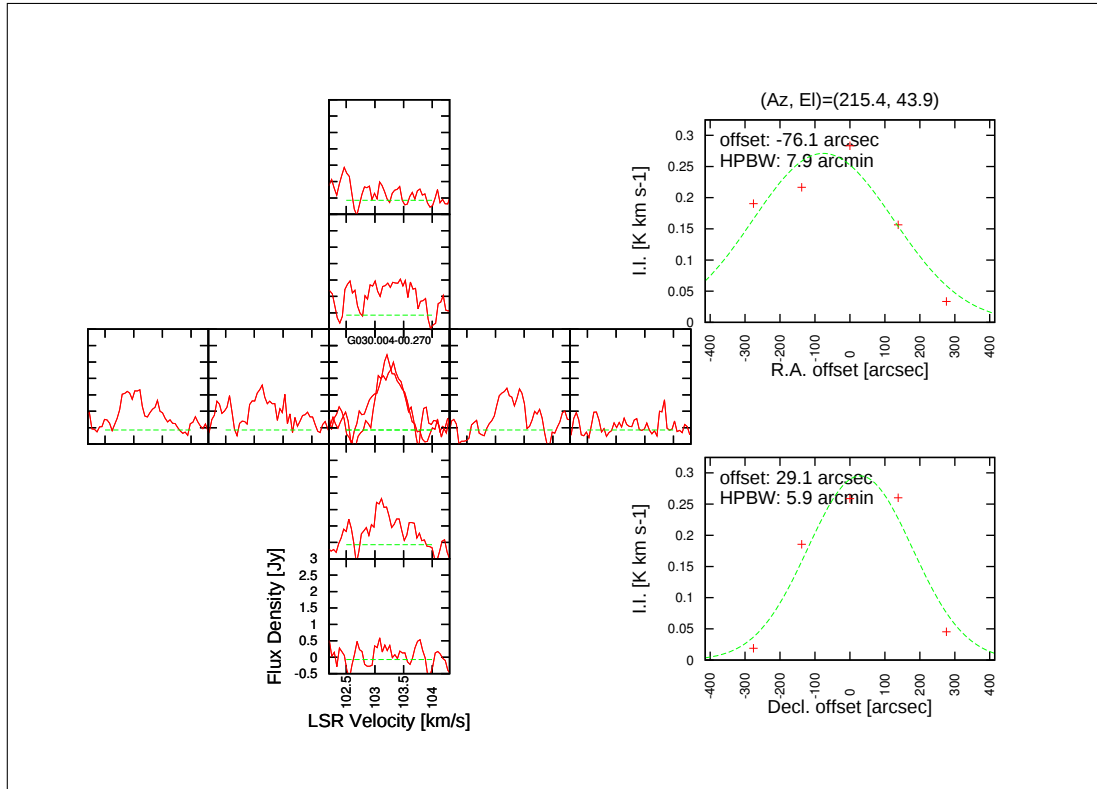


図 124 G030.004-00.270 の 9 点法結果 (103km/s 付近).

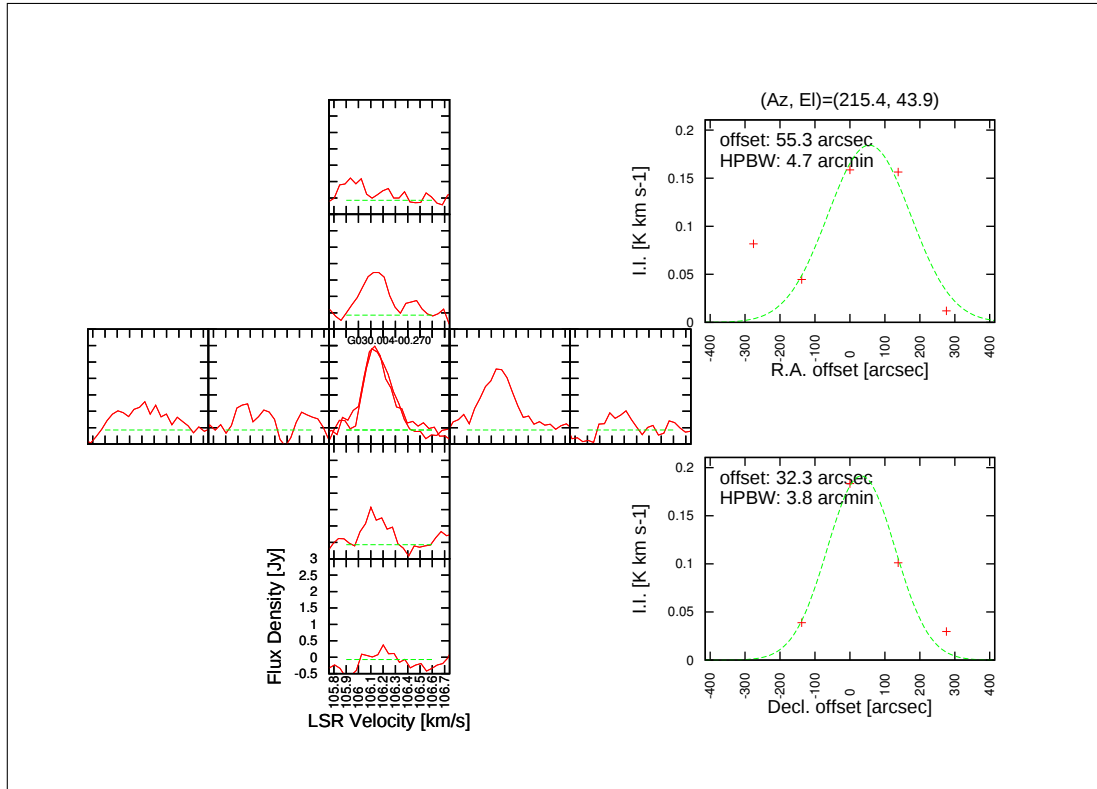


図 125 G030.004-00.270 の 9 点法結果 (106km/s 付近).

表 2 カテゴリー別の検出率

天体区分	観測天体数	検出数	検出率	検出数 N の不確定性を $\sqrt{N}$ としたときの検出率誤差範囲
(a) N_2H^+ のみ検出	36	14	39%	28 – 49%
(b) $I(N_2H^+)/I(HCO^+) > 1$	55	19	35%	27 – 42%
(c) $I(N_2H^+)/I(HCO^+) \leq 1$	151	19	13%	10 – 15%
(d) HCO^+ のみ検出	54	1	2%	0 – 2%

4 考察

今回の観測結果を基に、 $N_2H^+(3-2)(280GHz)$ と $HCO^+(3-2)(268GHz)$ の強度比 (Shirley et al. 2013) に対するヒストグラムを作成したところ図 126 の結果が得られた。さらに今回の観測結果から各カテゴリごとの検出率を算出したところ、表 4 の結果が得られた。今回の観測では $N_2H^+(3-2)/HCO^+(3-2)$ の強度比が大きい天体で 6.7GHz メタノールメーザーの検出が多いことが読み取れる。

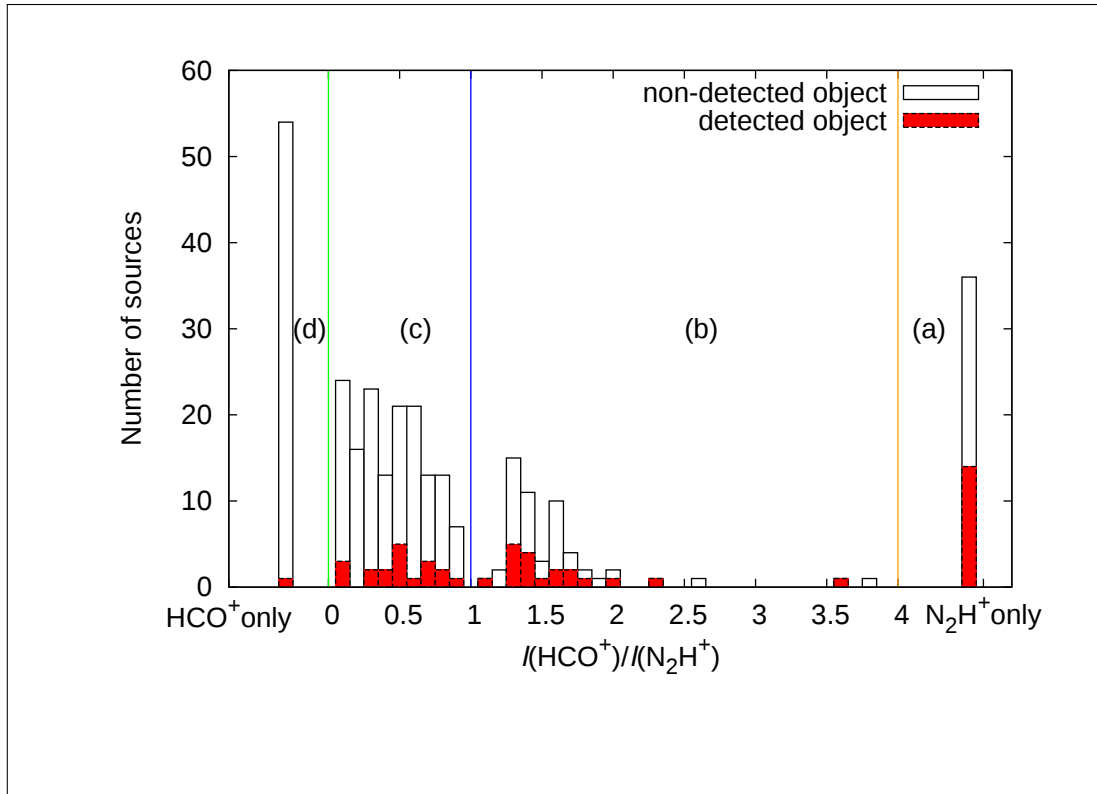


図 126 2 成分の強度比とメーザー検出の有無. 緑、橙の線が描かれている所はそれぞれ天体区分 (d), (a) の天体で、青線の左が区分 (c), 右側が区分 (b) の天体である。メーザーが検出された天体は赤く色付けし、未検出の天体は無色でプロットしている。

$\text{N}_2\text{H}^+(3-2)$ は低温で臨界密度が 10^7 個/ cm^3 と高密度な領域で発生する分子輝線である。6.7GHz メタノールメーザーは、 H_2 分子密度 10^6 から 10^8 個/ cm^3 で励起されると述べられているが (Cragg et al. 2005)、今回の観測でその条件を満たす結果が得られた。

N_2H^+ と HCO^+ の消滅・生成は以下の 3 つの化学式からなる。



Jørgensen et al. (2004) によると、標準的な CO の存在量 ($[\text{CO}/\text{H}_2] \sim 10^{-4}$ 程度) であれば H_3^+ は HCO^+ の生成に使われる (2) が、CO が凍りつく (2) の反応は極度に落ち込み、代わりに (3) の反応が進んで H_3^+ は N_2H^+ の生成に使われるようになる。しかし、CO が溶けだしてガスに戻ると式 4 の反応が始まり、 N_2H^+ が消滅して HCO^+ が卓越するようになる。よって今回の観測結果から 6.7GHz メタノールメーザーは、大質量星形成領域が低温で CO がダストに凍りついて付着しているような初期の段階に出現し、温度が上がる後期段階では N_2H^+ が枯渇するのに合わせて消滅していくのではないかと考えられる。

今後は Infrared Dark Clouds (IRDCs) の付随状況を調査することで、 $\text{N}_2\text{H}^+(3-2)$ 及び $\text{HCO}^+(3-2)$ の強度比との関連性を元にメタノールメーザーの出現時期に制限を加えていく予定である。IRDCs は中赤外線ですくフィラメンタリーな形状を示す低温で高密度な分子雲である。これは大質量星の形成初期を示す兆候であるため、メタノールメーザーの出現時期を定性的にはあるが議論するための良いプローブとなり得る。また、同じ BGPS カタログの天体に対して、国立天文台 VERA20m 電波望遠鏡を用いて 22GHz 水メーザーと 44GHz クラス I メタノールメーザーについて観測を実行しているため、この 3 種のメーザーの出現時期の違いについても議論を進めていく。

謝辞

本研究を行うにあたり、大変多くの方々からの御指導・御協力を頂きました。指導教員の百瀬宗武先生、米倉覚則先生には研究に関する天文学はもちろんのこと、一般物理学全般の基礎知識から熱心に御指導頂きました。大変感謝致しております。研究員の杉山孝一郎様、宮本祐介様は些細な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。深く感謝申し上げます。国立天文台の砂田様、坂井様もこの研究を進めるにあたって様々な御指導・御協力を頂いたことを感謝致します。研究室の先輩方、同学年の皆様からも様々な御協力を頂き大変感謝しております。研究室同学年の柴田君とは本研究を共に進めており、彼の支えのおかげでここまで研究をすすめることができました。ありがとうございました。

参考文献

- [1] Cragg,D.M.,et al. 2005,MNRAS,360,533
- [2] Ellingsen,S.P.,et al. 2007,IAU Symp. 242,213
- [3] Ellingsen,S.P.,et al. 2012,in proc. “Science with Parks @ 50 Years Young”
- [4] Jørgensen,J.K., et al. 2004,A&A,416,616
- [5] Reid,M.J. 2007,IAU Symp. 242,526
- [6] Rosolowsky,E.,et al. 2010,ApJS,188,123
- [7] Shirley,Y.L.,et al. 2013,ApJS,209,2
- [8] Xu,Y.,et al. 2009,A&A,507,1117
- [9] 福井康雄ほか, 星間物質と星形成 シリーズ現代の天文学 6, 日本評論社
- [10] 中井直正ほか, 宇宙の観測 II-電波天文学 シリーズ現代の天文学 16, 日本評論社
- [11] 森智彦,2013, 茨城大学大学院修士論文
- [12] 斎藤貴文,2012, 茨城大学大学院修士論文
- [13] Bolocam Web Page(www.cso.caltech.edu/bolocam/)