

平成 26 年度 (2014 年度)
卒業論文

CORNISH HII 領域候補を対象とした メタノールメーザーサーベイ

茨城大学理学部理学科学際理学コース
電波天文観測研究室
11s6025g
鈴木恵美子

ABSTRACT

6.7GHz メタノールメーザーは大質量星形成過程における降着円盤形成段階の星周構造を解明する有力なツールと考えられている。しかし 6.7GHz メタノールメーザーの存在期間は厳密には決定されていない。そこで 6.7GHz メタノールメーザーと HII 領域 (電離水素領域) のサイズの関係を探るべく、HII 領域のカタログ Co-Ordinated Radio ‘N’ Infrared Survey for High-mass star formation(CORNISH) database 中の天体を対象とした 6.7GHz メタノールメーザーのサーベイを行った。その結果、新たに 3 天体からメーザーを検出した。そして 6.7GHz メタノールメーザーが付随している HII 領域のサイズはそうでないものと比較して平均で 23%(約 1.2×10^4 AU) 小さいことがわかった。これより、HII 領域が膨張するに伴い、6.7GHz メタノールメーザーは消滅する傾向があると考えられる。

目 次

1	序章	2
1.1	大質量星と HII 領域	2
1.2	6.7GHz メタノールメーザー	2
1.3	研究目的	4
1.4	CORNISH survey	4
2	観測	5
2.1	観測天体選出	5
2.1.1	既知のメーザー源付随の有無	5
2.1.2	空間位置比較	5
2.2	観測パラメータ	8
2.3	観測方法	8
2.4	追観測	9
3	結果	10
3.1	新検出とみられる天体	10
3.1.1	G026.5444+00.4169	10
3.1.2	G028.6082+00.0185	11
3.1.3	G030.0096-00.2734	12
3.2	既知のメーザーからの混入が検出された天体	14
3.3	既知のメーザーよりも強い強度が検出された天体	23
4	考察	27
4.1	HII 領域全般と 6.7GHz メタノールメーザーとの空間的な相関	27
4.2	CORNISH 天体のサイズ導出	27
4.3	6.7GHz メタノールメーザーの付随の有無と HII 領域のサイズの関係	32
4.4	既知のメーザーよりも強い強度が観測された天体について	33
5	まとめ	34

1 序章

※序章の大部分は『星間物質と星形成 [1]』を参考にしながらまとめた。

1.1 大質量星と HII 領域

大質量星とは質量が太陽の 8 倍程度以上の恒星である。大質量星は、HII 領域の形成・膨張や星風の噴出、超新星爆発による大量の物質放出などの影響を周囲に与える。これらの現象はさらなる星形成を誘起するという重要な役割をもつと考えられている。しかし次のような理由から大質量星の観測は困難である。まず大質量星は絶対数が少なく進化のタイムスケールも短いことから、進化過程を追うことが難しい。さらに地球からの距離が遠い ($\gtrsim 1\text{kpc}$) ため、空間分解能が悪い。加えて高密度なガスに周囲を覆われていることから、可視光での直接観測が難しい。

これまでの観測と理論研究から得られた大質量星形成過程の大枠は図 1 に示した通りである。大質量星は低温の分子雲内の高密度領域である分子雲コアで生まれる。分子雲コアの中心部分が自己重力及び周囲の外圧の働きにより収縮して原始星コアが形成される。原始星コアは周囲からのガス降着によって成長する。降着物質は角運動量を持っているため、原始星の周りに降着円盤が形成されると考えられている。原始星コアの質量が十分大きくなり中心で水素の核融合反応が始まると、主系列星として輝き始める。主系列星から放出される紫外線により周囲に存在する水素が光電離を起こし、HII 領域 (電離水素領域) が形成される。HII 領域は初めのうちは高密度で小さいが、外側の電離されていない星間物質より圧力が高いために膨張していく。

しかし降着円盤形成段階における星周構造の詳細は、あまり解明されていない。

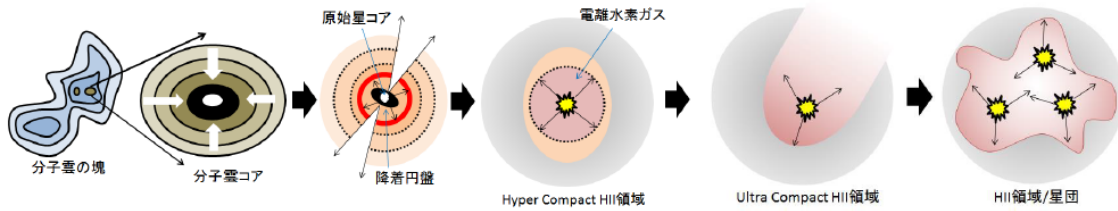


図 1: 大質量星形成過程の概略 (Purcell (2006)[2] を参考に作成)

表 1: HII 領域の分類 [3]

分類	大きさ [pc]	電子密度 [cm^{-3}]	ガスの質量 (電離成分) [$M_{\odot}$]
Hyper compact	$\gtrsim 0.05$	$\gtrsim 10^6$	$\sim 10^{-3}$
Ultra compact	$\gtrsim 0.1$	$\gtrsim 10^4$	$\sim 10^{-2}$
Compact	$\gtrsim 0.5$	$\gtrsim 5 \times 10^3$	~ 1
Classical	~ 10	~ 100	$\sim 10^5$
Giant	~ 100	~ 30	$10^3 - 10^6$
Supergiant	> 100	~ 10	$10^6 - 10^8$

1.2 6.7GHz メタノールレーザー

降着円盤形成段階における星周構造を解明するための有力なツールに 6.7GHz メタノールレーザーがある。6.7GHz メタノールレーザーは大質量星形成領域でのみ検出され、分子流中や円盤上に位置していると考えられ

ている。またメーザー源は輝度が非常に高いため、超長基線干渉法 (VLBI) の超高空間分解能 (～ミリ秒角) 観測により、詳細な空間分布が得られる。さらに時期をずらして複数回観測を行うことにより、3次元運動が解明できる [4]。

6.7GHz メタノールメーザーの出現時期についての先行研究として、Walsh et al. (1998)[5] がある。この研究では赤外線源の IRAS カタログを基にして HII 領域とメタノールメーザーの同時観測を行った。観測には Australia Telescope Compact Array(ATCA) を使用した。この結果は表 2 のようになった。

表 2: 先行研究の結果

検出天体	検出天体数
メーザーが付随している HII 領域	46
HII 領域のみ	131
メーザーのみ	187

検出した HII 領域に対するメーザーの付随率は約 26.0%であった。HII 領域のサイズに対するメーザーが付随している HII 領域としていない HII 領域の天体数のヒストグラムは図 2 のようになり、メーザーが付随している HII 領域のサイズはそうでないものと比べて小さい傾向にあった。

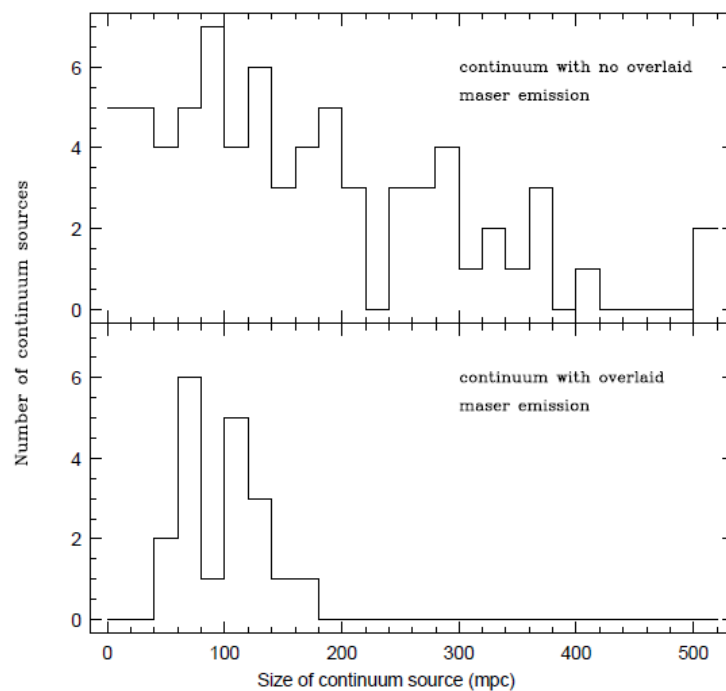


図 2: メーザーが付随していない HII 領域 (上) としている HII 領域 (下) のヒストグラム [5]

これにより 6.7GHz メタノールメーザーは Ultra Compact(UC)HII 領域が形成される前の段階に生じ、UCHII 領域の成長と共に消滅すると示唆した。しかしこの研究ではターゲットの選び方に問題があり、すべての HII 領域をカバーできていない。

1.3 研究目的

本研究では先行研究の問題点を改善するため、HII 領域のカタログを用いてそこにメーザーが付随しているのかを調べることにした。カタログには HII 領域の視直径が導出されている Co-Ordinated Radio ‘N’ Infrared Survey for High-mass star formation(CORNISH)database を用い、6.7GHz メタノールメーザーのサーベイを行った。

1.4 CORNISH survey

CORNISH プロジェクトの目的は大質量星形成過程で鍵となる UCHII 領域の無バイアスサーベイによる結果を提供することである [6]。観測パラメータは表 3 に示した通りである。

サーベイの結果、 7σ 以上を検出として 2638 天体をカタログ化し、HII 領域として 289 天体を同定した。

表 3: CORNISH survey の観測パラメータ [6][7]

装置	Very Large Array(VLA)
配置	B-configuration
領域	northen Spitzer GLIMPSE I region
空間分解能	1.5 秒角
ノイズレベル	$< 0.4\text{mJy/beam}$

2 観測

2.1 観測天体選出

本研究では CORNISH survey により HII 領域と同定された 289 天体のうち、No.97～192 の 96 天体を選んだ。

2.1.1 既知のメーザー源付随の有無

メーザー源が HII 領域の 2 倍の大きさの中に存在するとき、メーザー源は HII 領域 (1.5～17.6 秒角) に付随しているとみなす。既知のメーザー源として 6.7GHz メタノールメーザーについて書かれた論文をまとめたカタログ [8][9][10][11][12][13] を用いた。

CORNISH 天体と既知のメーザー源の離角を導出し、その CORNISH 天体の視直径の大きさと比較した。2 点間の離角 θ [秒角] の導出には (赤経 [度], 赤緯 [度]) = $(\alpha_1, \delta_1), (\alpha_2, \delta_2)$ として次式を用いた。

$$\theta = \sqrt{\cos^2\left(\frac{\delta_2 + \delta_1}{2}\right)(\alpha_2 - \alpha_1)^2 + (\delta_2 - \delta_1)^2} \quad (1)$$

この結果、表 1 に示した 10 天体に既知のメーザーが付随していた。したがってこの 10 天体は観測対象から外した。

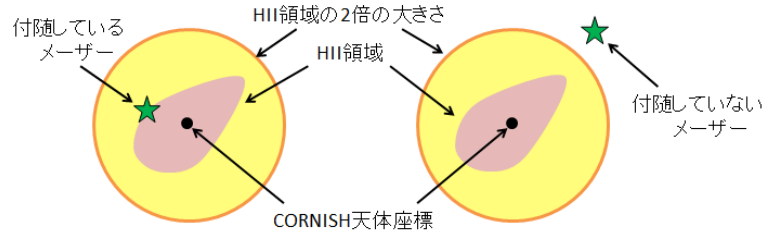


図 3: メーザーが付随している HII 領域 (左) としていない HII 領域 (右)

表 4: 既知の 6.7GHz メタノールメーザーが付随している CORNISH 天体

CORNISH 天体名	銀経 [度]	銀緯 [度]	赤経 [度]	赤緯 [度]	視直径 [秒角]	付随メーザー名
G024.7898+00.0833	24.78977	0.08332	279.05231	-7.20301	1.5	24.78+0.08
G027.3644-00.1657	27.3644	-0.16574	280.4624	-5.02921	2.262	27.36-0.16
G028.1985-00.0503	28.19853	-0.05028	280.74224	-4.23469	3.048	28.20-0.05
G028.2003-00.0494	28.20034	-0.04944	280.74215	-4.23264	2.192	28.20-0.05
G029.9559-00.0168	29.95585	-0.01677	281.51741	-2.65591	9.618	29.95-0.02
G030.5353+00.0204	30.53526	0.02038	281.74732	-2.12352	6.3	30.53+0.01
G031.2801+00.0632	31.28008	0.06322	282.04927	-1.44195	9.327	31.28+0.06
G031.4130+00.3065	31.413	0.30647	281.89289	-1.21237	9.376	31.41+0.31
G032.7966+00.1909	32.79658	0.19091	282.62896	-0.03237	10.013	32.80+0.19
G035.0242+00.3502	35.02419	0.3502	283.50203	2.02175	1.551	35.02+0.35

2.1.2 空間位置比較

日立局において 1 分角離れた時の振幅の減少率 (～13%) と絶対フラックス校正精度 (～10%) はほぼ等しい。そこで観測効率を上げるために、1 分角以内に複数の天体が存在する場合は代表天体 1 ポインティングでそれらを

カバーしたとみなした。既知のメーザーが付随していない CORNISH 天体同士の離角は式 (1) より導出した。

この条件には表 5 に示した 14 天体が該当した。この結果、表 6 に示した 72 ポインティングを観測することになった。

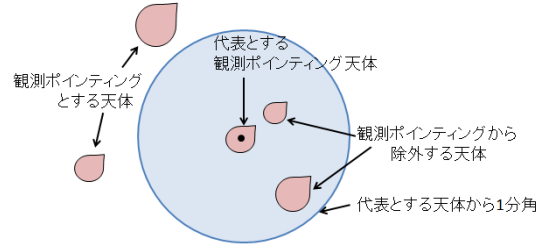


図 4: CORNISH 天体同士の空間位置比較

表 5: 観測ポインティングから除外した天体

CORNISH 天体名	銀経 [度]	銀緯 [度]	赤経 [度]	赤緯 [度]	視直径 [秒角]	観測ポインティング天体名
G025.3824-00.1812	25.38243	-0.18123	279.5636	-6.79794	3.436	G025.3809-00.1815
G025.3983+00.5617	25.3983	0.56167	278.90638	-6.44267	2.51	G025.3970+00.5614
G025.3991-00.1366	25.39914	-0.13658	279.53091	-6.76299	3.359	G025.3981-00.1411
G026.0907-00.0575	26.09075	-0.0575	279.77961	-6.112	6.884	G026.0916-00.0565
G031.1596+00.0448	31.15958	0.04475	282.01128	-1.5569	1.693	G031.1590+00.0465
G031.2420-00.1106	31.24202	-0.11062	282.18621	-1.55403	7.81	G031.2435-00.1103
G031.2448-00.1132	31.24476	-0.11324	282.19067	-1.5533	3.144	G031.2435-00.1103
G032.7492-00.0643	32.7492	-0.06427	282.83336	-0.19192	2.143	G032.7441-00.0755
G033.1419-00.0853	33.14188	-0.08531	283.03114	0.14797	3.652	G033.1328-00.0923
G033.8113-00.1893	33.81127	-0.18932	283.42916	0.69587	12.946	G033.8100-00.1864
G034.2544+00.1460	34.25437	0.14597	283.33297	1.24406	5.875	G034.2572+00.1535
G034.2571+00.1466	34.25712	0.14658	283.33336	1.24624	2.428	G034.2572+00.1535
G034.2573+00.1523	34.25725	0.15235	283.32829	1.24899	1.5	G034.2572+00.1535
G034.2581+00.1533	34.25811	0.1533	283.32783	1.25019	1.5	G034.2572+00.1535

表 6: 観測ポインティングの天体

観測ポインティング天体名	銀経 [度]	銀緯 [度]	赤経 [度]	赤緯 [度]	視直径 [秒角]
G024.7984+00.0967	24.79843	0.09674	279.04411	-7.1892	11.232
G024.8497+00.0881	24.84968	0.08814	79.07575	-7.14759	3.669
G024.9237+00.0777	24.92371	0.07769	279.11804	-7.08654	14.931
G025.3055+00.5305	25.30549	0.53051	278.89119	-6.53909	6.907
G025.3809-00.1815	25.38091	-0.18154	279.56249	-6.80033	8.456
G025.3948+00.0332	25.39478	0.03324	279.37742	-6.68878	4.638
G025.3970+00.5614	25.39695	0.5614	278.90599	-6.44398	2.036
G025.3981-00.1411	25.39808	-0.14107	279.53447	-6.76616	8.598
G025.7157+00.0487	25.71567	0.04868	279.51165	-6.3964	2.358

表 6: 観測ポインティングの天体

観測ポインティング天体名	銀経 [度]	銀緯 [度]	赤経 [度]	赤緯 [度]	視直径 [秒角]
G025.8011-00.1568	25.80114	-0.15685	279.73485	-6.41482	1.786
G026.0083+00.1369	26.0083	0.13693	279.56783	-6.09599	1.836
G026.0916-00.0565	26.09161	-0.05651	279.77913	-6.11069	2.558
G026.1094-00.0937	26.10935	-0.09366	279.82052	-6.11195	1.578
G026.5444+00.4169	26.54436	0.4169	279.56736	-5.4922	12.588
G026.5976-00.0236	26.59757	-0.02358	279.98279	-5.64599	2.649
G026.6089-00.2121	26.60885	-0.21214	280.15628	-5.72225	6.525
G026.8304-00.2067	26.83038	-0.20666	280.25349	-5.52279	1.983
G027.1859-00.0816	27.18595	-0.0816	280.30528	-5.14941	2.03
G027.2800+00.1447	27.27996	0.14468	280.14653	-4.96268	5.745
G027.5637+00.0845	27.56372	0.08454	280.3308	-4.73907	12.278
G027.9352+00.2056	27.93519	0.20564	280.39307	-4.35178	1.601
G027.9782+00.0789	27.97822	0.07893	280.52697	-4.37213	9.468
G028.2447+00.0131	28.24468	0.01305	280.70666	-4.16403	7.282
G028.2879-00.3641	28.28789	-0.36409	281.06292	-4.29888	4.607
G028.4518+00.0027	28.45179	0.00273	280.81087	-3.98517	2.318
G028.5816+00.1447	28.58159	0.14471	280.74357	-3.8048	5.306
G028.6082+00.0185	28.6082	0.01854	280.86868	-3.83865	3.62
G028.6523+00.0273	28.65235	0.02726	280.88088	-3.79593	5.657
G028.6869+00.1770	28.68689	0.17702	280.76346	-3.69605	5.278
G029.7704+00.2189	29.77038	0.2189	281.2215	-2.71363	6.569
G029.7805-00.2661	29.78051	-0.26614	281.65844	-2.9259	2.249
G029.9347-00.0525	29.93465	-0.05249	281.53854	-2.69124	6.519
G030.0096-00.2734	30.00965	-0.27344	281.76963	-2.72534	1.616
G030.2527+00.0540	30.25268	0.05402	281.58922	-2.35981	5.808
G030.5313+00.0205	30.53134	0.02053	281.74659	-2.12679	5.543
G030.5887-00.0428	30.58875	-0.04278	281.82866	-2.10479	1.787
G030.6862-00.2610	30.68625	-0.26097	282.06585	-2.11766	17.609
G030.6881-00.0718	30.68815	-0.07177	281.90064	-2.03077	10.805
G030.7197-00.0829	30.71968	-0.08286	281.92412	-2.0062	4.595
G030.7532-00.0511	30.75315	-0.0511	281.91112	1.96229	3.29
G030.7579+00.2042	30.75791	0.2042	281.68553	-1.84128	4.149
G030.7661-00.0348	30.76614	-0.0348	281.90253	-1.9433	3.265
G030.8662+00.1143	30.8662	0.11429	281.81543	-1.78637	3.092
G030.9581+00.0869	30.95809	0.08686	281.88171	-1.71707	3.204
G031.0495+00.4697	31.04949	0.46972	281.58275	-1.46096	1.785
G031.0595+00.0922	31.05953	0.09221	281.92337	-1.62428	2.012
G031.0709+00.0508	31.07086	0.05084	281.96567	-1.63427	10.371
G031.1590+00.0465	31.15896	0.04647	282.00947	-1.55666	2.02
G031.2435-00.1103	31.24347	-0.11034	282.18767	-1.55294	2.691
G031.3959-00.2570	31.39586	-0.25697	282.38856	-1.48593	10.034
G031.5815+00.0744	31.58148	0.07443	282.17736	-1.16791	2.409

表 6: 観測ポインティングの天体

観測ポインティング天体名	銀経 [度]	銀緯 [度]	赤経 [度]	赤緯 [度]	視直径 [秒角]
G032.0297+00.0491	32.02967	0.04905	282.40438	-0.78062	4.267
G032.1502+00.1329	32.15017	0.13287	282.38562	-0.63487	12.378
G032.2730-00.2258	32.27298	-0.2258	282.75966	-0.69017	9.832
G032.4727+00.2036	32.47274	0.20361	282.46894	-0.31585	2.263
G032.7398+00.1940	32.73977	0.19396	282.59924	-0.08257	1.585
G032.7441-00.0755	32.74408	-0.07553	282.84105	-0.20162	1.784
G032.7982+00.1937	32.79822	0.1937	282.62613	-0.03066	1.987
G032.9273+00.6060	32.92726	0.60601	282.31789	0.27288	6.811
G032.9906+00.0385	32.99057	0.03852	282.85158	0.07022	15.236
G033.1328-00.0923	33.13277	-0.09228	283.03355	0.13683	4.024
G033.4163-00.0036	33.41627	-0.00358	283.08464	0.43019	8.776
G033.8100-00.1864	33.80997	-0.18643	283.42582	0.69644	2.189
G033.9145+00.1105	33.9145	0.11045	283.21011	0.92463	10.141
G034.0901+00.4365	34.09005	0.43652	282.99901	1.22972	2.405
G034.1324+00.4700	34.13236	0.46999	282.98815	1.28344	10.119
G034.1978-00.5912	34.19784	-0.59116	283.96296	0.85698	3.255
G034.2572+00.1535	34.25724	0.15352	283.32667	1.24969	5.755
G034.4032+00.2277	34.4032	0.22771	283.32777	1.41324	1.743
G034.5920+00.2434	34.59203	0.24337	283.39997	1.58843	2.725
G035.0524-00.5177	35.0524	-0.51773	284.28764	1.65079	3.672
G035.1378-00.7622	35.13777	-0.76224	284.54399	1.61591	15.167

2.2 観測パラメータ

観測パラメータは表 7 に示した通りである。

表 7: 観測パラメータ

観測日	2014/8/19, 9/1, 11/28, 12/2, 12/14
装置	日立 32m 電波望遠鏡 (日立局)
ビームサイズ	～5 分角
開口能率	～70%
周波数帯	6664-6672MHz
分光点数	8192 点
チャンネル分解能	0.044km/s
積分時間	300 秒
rms ノイズ	1 σ (～0.3Jy)

2.3 観測方法

まず観測スケジュールを作成した。pc-sched.eve というスケジュール作成ソフトを用いて、DRG ファイルを作成した。次に DRG ファイルをアンテナ制御用の a.skd ファイルとデータ取得用の o.skd ファイルに変換した。変

換には drgconv-ibaraki.eve を用いた。a.skd ファイルには各天体の off 点を観測するために、赤経方向に 60 分角の offset を入れた。

観測当日は茨城大学水戸キャンパスからリモート操作で観測を行った。アンテナ制御用の PC には a.skd ファイルを読み込ませ、データ取得用の PC には o.skd ファイルを読み込ませた。観測終了後に FFT の実行とベースラインフィッティングを行わせた。解析が終了したら観測データを転送し、gnuplot を用いてスペクトルを確認した。

2.4 追観測

上記の観測の結果、新検出とみられる放射については追観測を行った。新検出とみられるメーザー源の放射位置が CORNISH 天体の位置と一致しているかを検証するため、2 分角間隔の 9 点法観測を行った。

1 スキャンの積分時間は 300 秒とした。図 5 に示した 10 点でそれぞれ ON 点 OFF 点をとる 20 スキャンを 1 セットとした。観測により 7σ 以上の放射を検出したものについては 1 セット行い、 5σ 以上 7σ 未満のものについては 2 セット行った。1 セットは以下のように構成した。

1. 赤経方向に offset-4 分角
2. 赤経方向に offset-2 分角
3. CORNISH 天体の座標
4. 赤経方向に offset+2 分角
5. 赤経方向に offset+4 分角
6. 赤緯方向に offset-4 分角
7. 赤緯方向に offset-2 分角
8. CORNISH 天体の座標
9. 赤緯方向に offset+2 分角
10. 赤緯方向に offset+4 分角

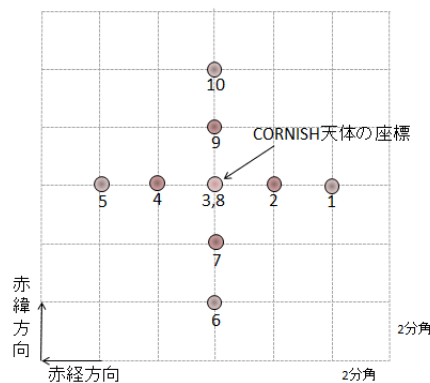


図 5: 9 点法観測の方法

3 結果

メーザー放射を 41 ポインティング・50 天体から検出した。このうち 2 天体については、 4σ 程度の明るさであったが周波数分解能より有意に広いライン幅を示したことから、メーザー放射の検出と判断した。

次に検出されたメーザー放射が新検出であるかを確認するために、検出天体のスペクトルの速度構造を解析した。強度変動の要因を極力少なくするために、観測日の前後 1 週間以内に別のプロジェクトにより日立局で観測された既知のメーザーとのスペクトル比較を行った。その結果は表 8 のようになった。

表 8: スペクトル比較の結果

既知のメーザーとの 速度成分比較	既知のメーザーとの 強度比較	ポインティング数	天体数	解釈
一致しない		3	3	新検出
一致する	弱い	30	34	1 分角よりも離れた位置に存在する 既知のメーザー源からの混入
一致する	強い	9	15	これまでより真の放射位置に 近い場所を観測

3.1 新検出とみられる天体

3.1.1 G026.5444+00.4169

観測により図 6 に示したスペクトルが得られた。82.5km/s 付近に 8.3σ の放射を検出した。この放射と一致する既知の天体はなかったため新検出の可能性があると判断し、9 点法観測を 1 セット行った。追観測の結果は図 7 のようになり、CORNISH 天体の座標位置で最大強度を観測した。これより日立局の精度においては CORNISH 天体 G026.5444+00.4169 付近から放射する新検出の天体であることが確かめられた。

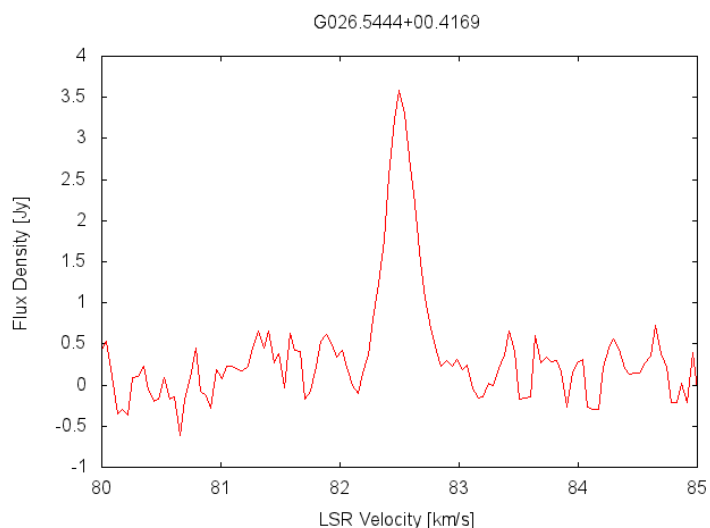


図 6: G026.5444+00.4169 のスペクトル

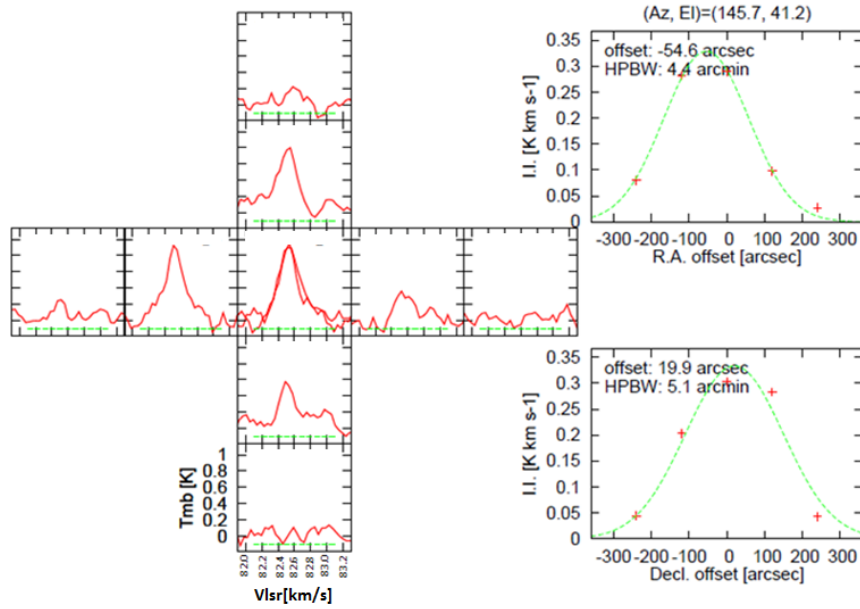


図 7: G026.5444+00.4169 の 9 点法観測の結果。右の 2 つのグラフは赤経方向 (右上) と赤緯方向 (右下) とでガウシアンフィッティングをした結果。

3.1.2 G028.6082+00.0185

観測により図 8 に示したスペクトルが得られた。106.5km/s 付近に 9.0σ の放射を検出した。この放射と一致する既知の天体はなかったため新検出の可能性があると判断し、9 点法観測を 1 セット行った。追観測の結果は図 9 のようになり、CORNISH 天体 G028.6082+00.0185 付近から放射する新検出の天体であることが確かめられた。

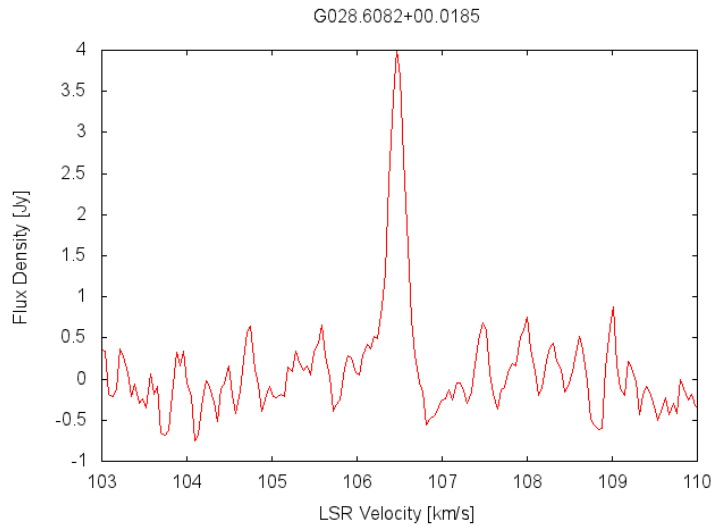


図 8: G028.6082+00.0185 のスペクトル

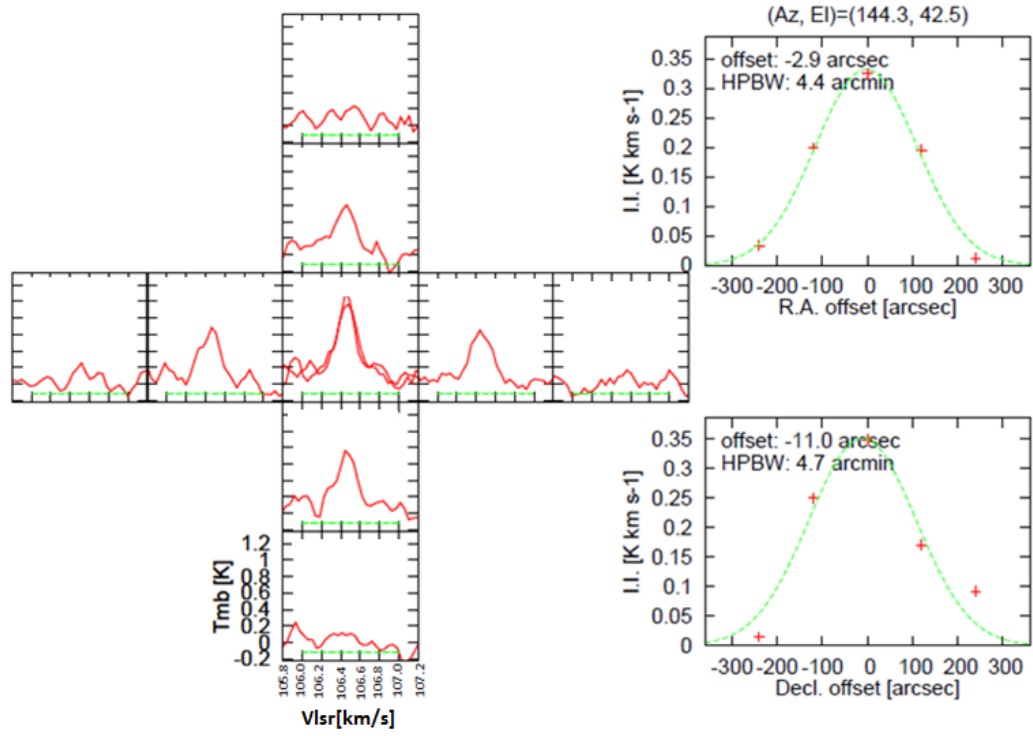


図 9: G028.6082+00.0185 の 9 点法観測の結果。右の 2 つのグラフは赤経方向 (右上) と赤緯方向 (右下) とでガウシアンフィッティングをした結果。

3.1.3 G030.0096-00.2734

観測により図 10 に示したスペクトルが得られた。103km/s 付近に 5.0σ 、106km/s 付近に 5.1σ の放射を検出した。これらの放射と一致する既知の天体はなかったため新検出の可能性があると判断し、9 点法観測を 2 セットを行った。視線速度 103km/s、106km/s 付近の放射それぞれの追観測の結果は図 11、12 のようになり、どちらも CORNISH 天体 G030.0096-00.2734 付近から放射する新検出の天体であることが確かめられた。

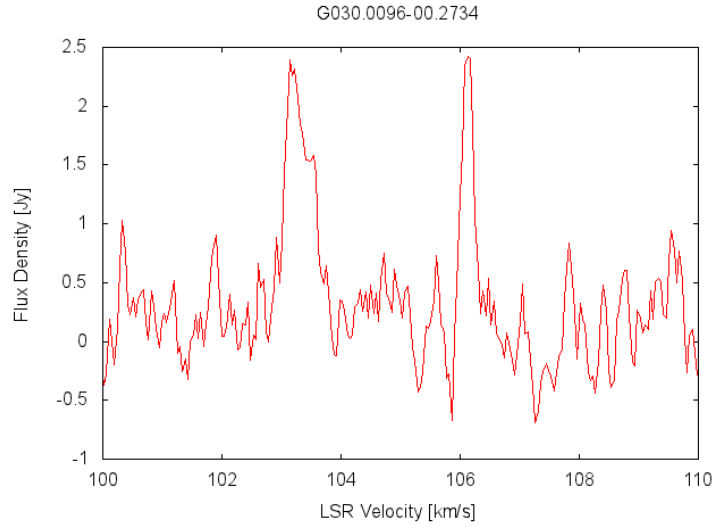


図 10: G030.0096-00.2734 のスペクトル

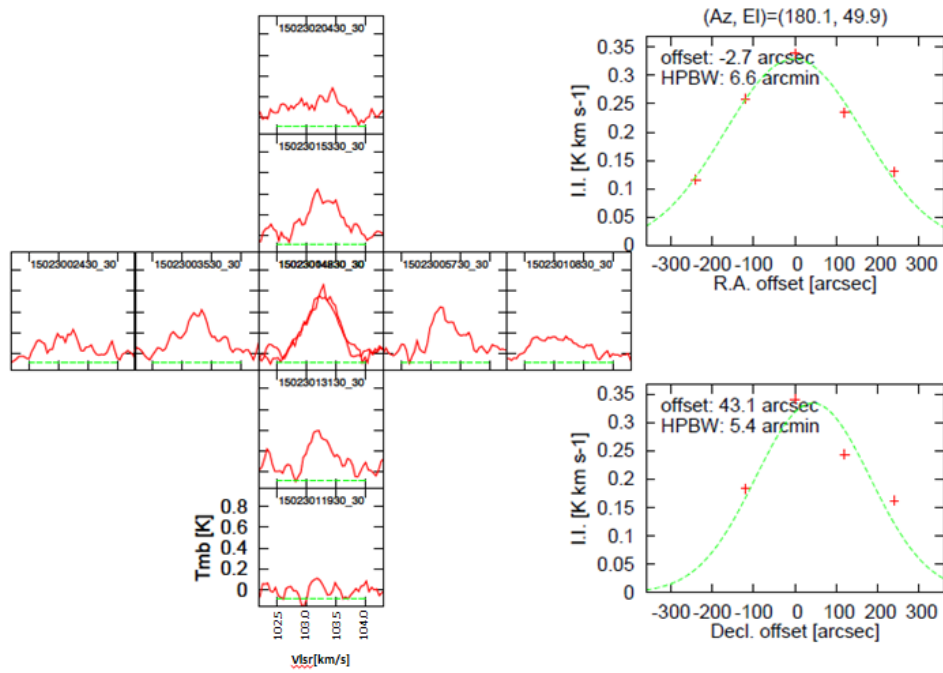


図 11: G030.0096-00.2734 103km/s 付近の放射の 9 点法観測の結果。右の 2 つのグラフは赤経方向 (右上) と赤緯方向 (右下) とでガウシアンフィッティングをした結果。

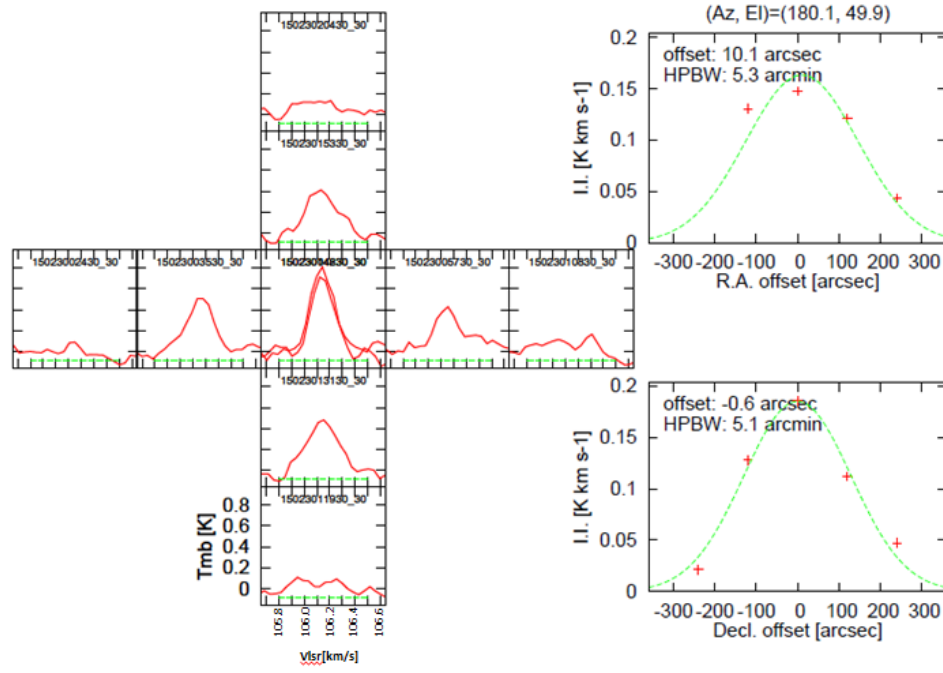


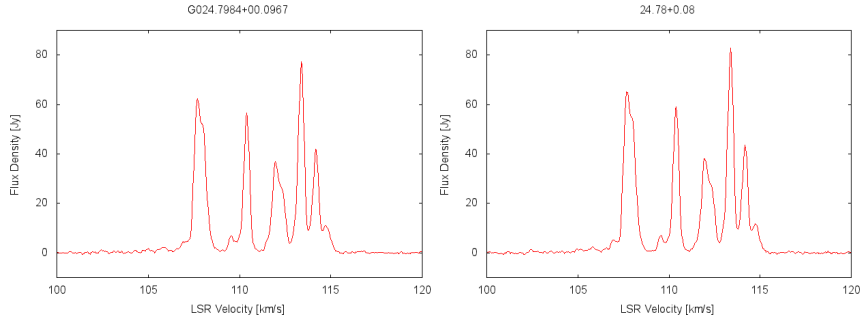
図 12: G030.0096-00.2734 106km/s 付近の放射の 9 点法観測の結果。右の 2 つのグラフは赤経方向 (右上) と赤緯方向 (右下) とでガウシアンフィッティングをした結果。

3.2 既知のメーザーからの混入が検出された天体

既知のメーザー源からの混入が検出されたとみられる天体は表 9 に示したものである。これらのスペクトルは図 13～42 に示した通りである。

表 9: 既知のメーザーからの混入が検出された天体

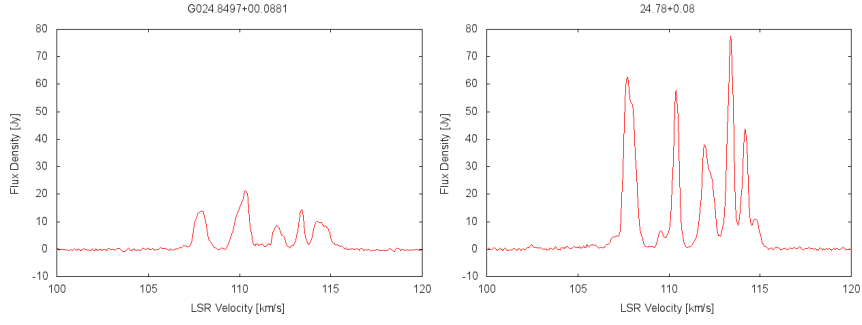
観測ポインティング天体名	混入源メーザー名	離角 [分角]
G024.7984+00.0967	24.78+0.08	0.97
G024.8497+00.0881	24.78+0.08	3.6
G025.3948+00.0332	25.70+0.04	18.9
G025.3981-00.1411	25.38-0.18	2.4
G025.7157+00.0487	25.70+0.04	0.47
G025.8011-00.1568	25.82-0.17	1.9
G026.0083+00.1369	25.70+0.04	18.8
G026.0916-00.0565	25.70+0.04	23.7
G026.1094-00.0937	26.59-0.00	29.3
G026.6089-00.2121	26.60-0.22	0.65
G028.2447+00.0131	28.20-0.05	4.7
G029.7704+00.2189	29.95-0.02	18.0
G029.7805-00.2661	29.95-0.02	18.3
G029.9347-00.0525	29.95-0.02	2.5
G030.5887-00.0428	30.59-0.04	0.17
	30.70-0.07	6.9
G030.6881-00.0718	30.70-0.07	0.79
G030.7197-00.0829	30.70-0.07	1.4
G030.7532-00.0511	30.76-0.05	0.46
	30.70-0.07	3.4
G030.7579+00.2042	30.78+0.23	2.1
G030.7661-00.0348	30.76-0.05	1.1
	30.70-0.07	4.5
G030.8662+00.1143	30.86+0.16	3.4
G031.0595+00.0922	31.06+0.09	0.12
G031.0709+00.0508	31.06+0.09	2.7
G032.0297+00.0491	32.03+0.06	1.1
G032.7441-00.0755	32.74-0.08	0.28
G032.7982+00.1937	32.80+0.19	0.22
G032.9906+00.0385	32.97+0.04	0.56
G033.1328-00.0923	33.13-0.09	0.36
G033.4163-00.0036	33.40+0.01	2.5
G035.1378-00.7622	35.20-0.74	3.7



(左)G024.7984+00.0967

(右)24.78+0.08

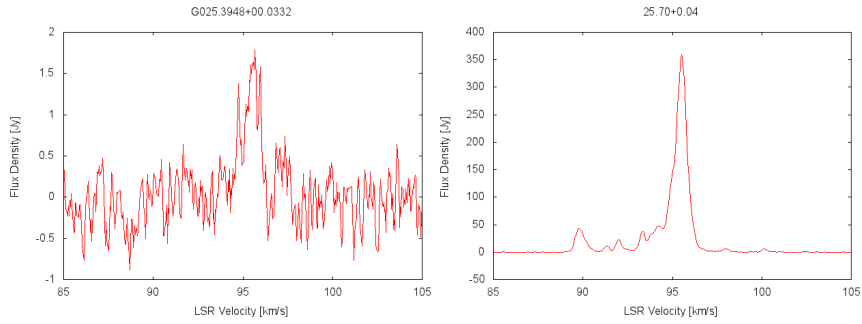
図 13: G024.7984+00.0967 のスペクトル比較



(左)G024.8497+00.0881

(右)24.78+0.08

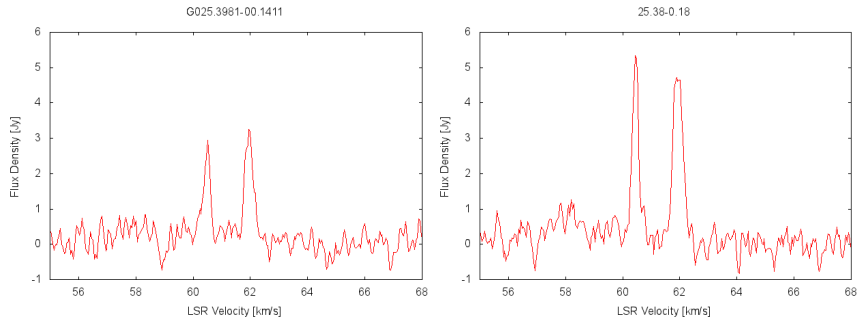
図 14: G024.8497+00.0881 のスペクトル比較



(左)G025.3948+00.0332

(右)25.70+0.04

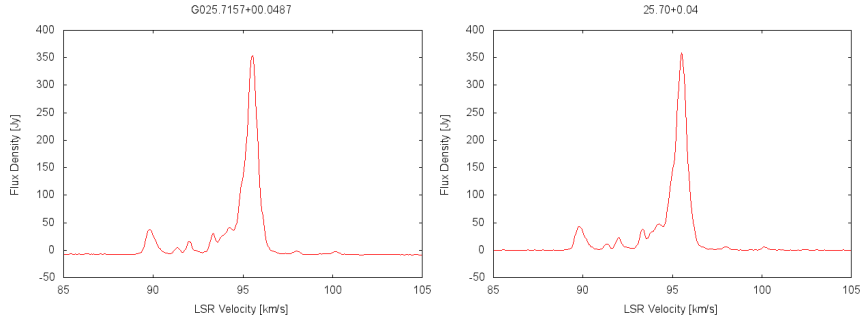
図 15: G025.3948+00.0332 のスペクトル比較



(左)G025.3981-00.1411

(右)25.38-0.18

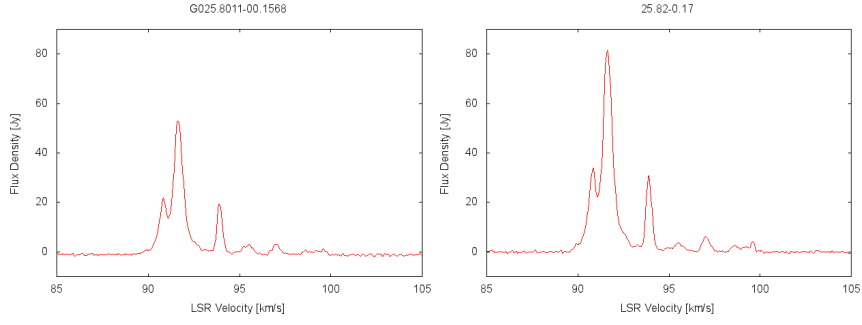
図 16: G025.3981-00.1411 のスペクトル比較



(左)G025.7157+00.0487

(右)25.70+0.04

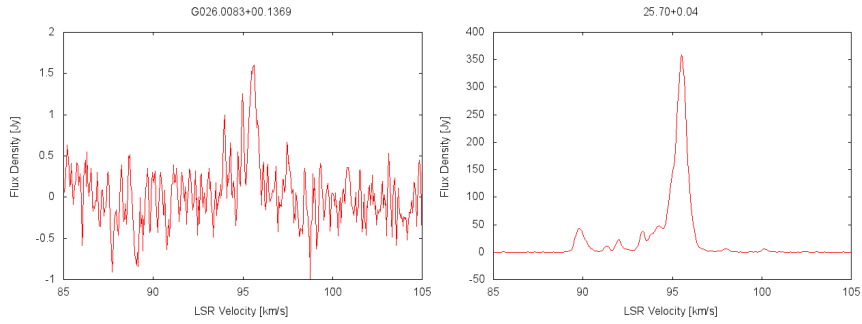
図 17: G025.7157+00.0487 のスペクトル比較



(左)G025.8011-00.1568

(右)25.82-0.17

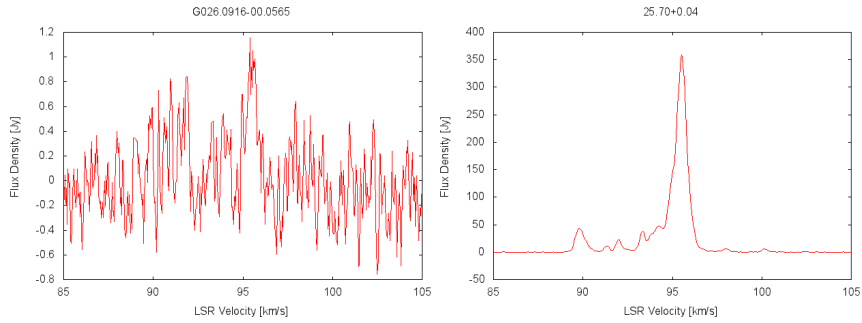
図 18: G025.8011-00.1568 のスペクトル比較



(左)G026.0083+00.1369

(右)25.70+0.04

図 19: G026.0083+00.1369 のスペクトル比較



(左)G026.0916-00.0565

(右)25.70+0.04

図 20: G026.0916-00.0565 のスペクトル比較

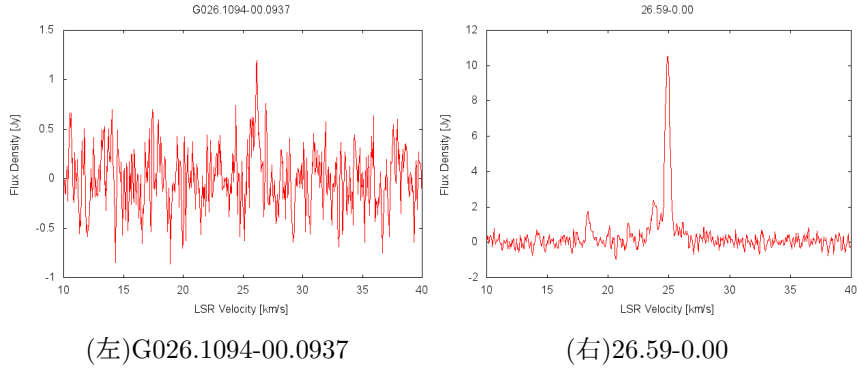


図 21: G026.1094-00.0937 のスペクトル比較

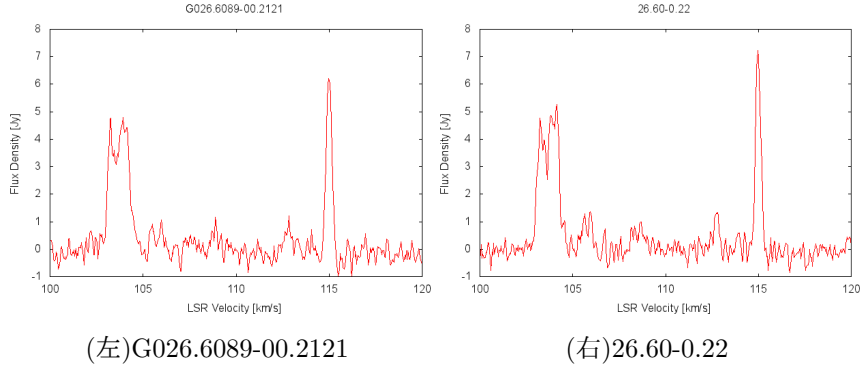


図 22: G026.6089-00.2121 のスペクトル比較

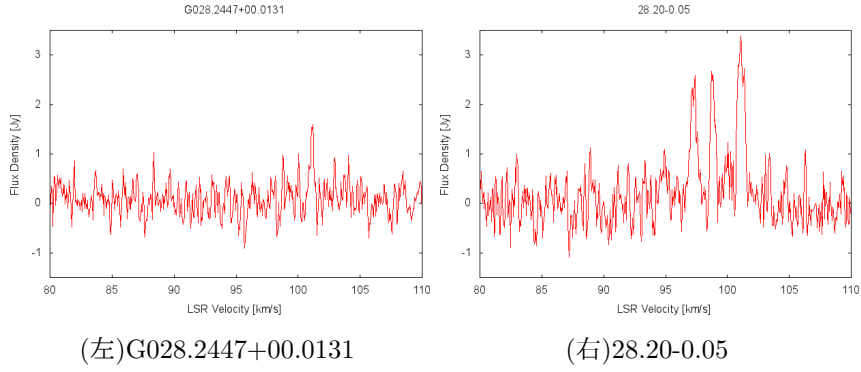


図 23: G028.2447+00.0131 のスペクトル比較

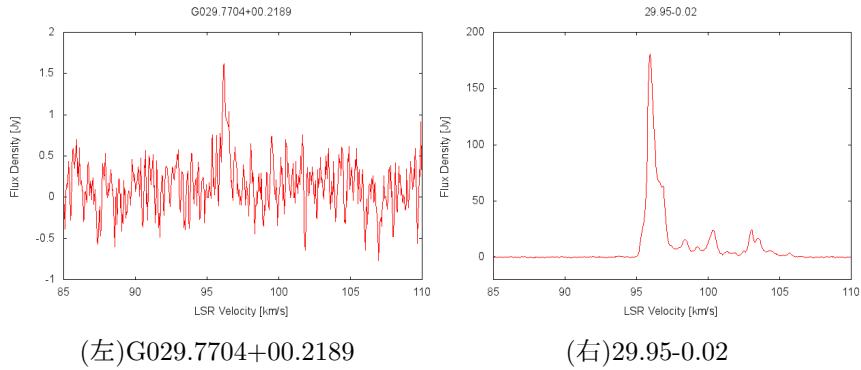
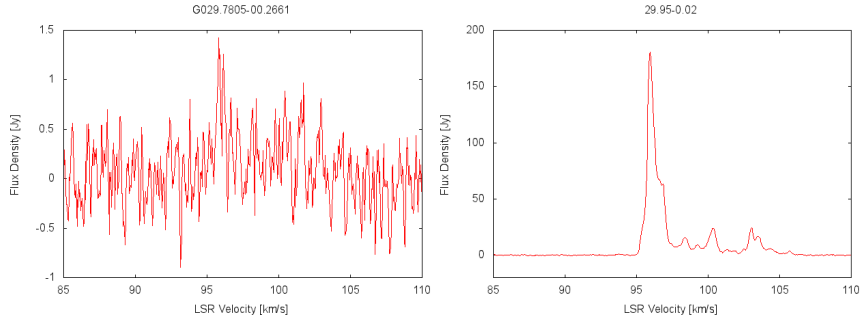


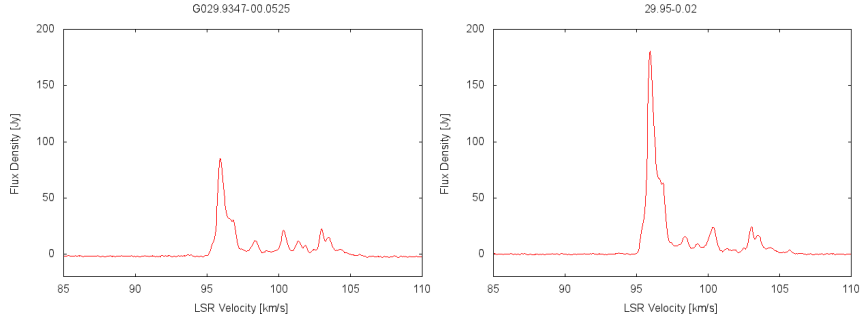
図 24: G029.7704+00.2189 のスペクトル比較



(左)G029.7805-00.2661

(右)29.95-0.02

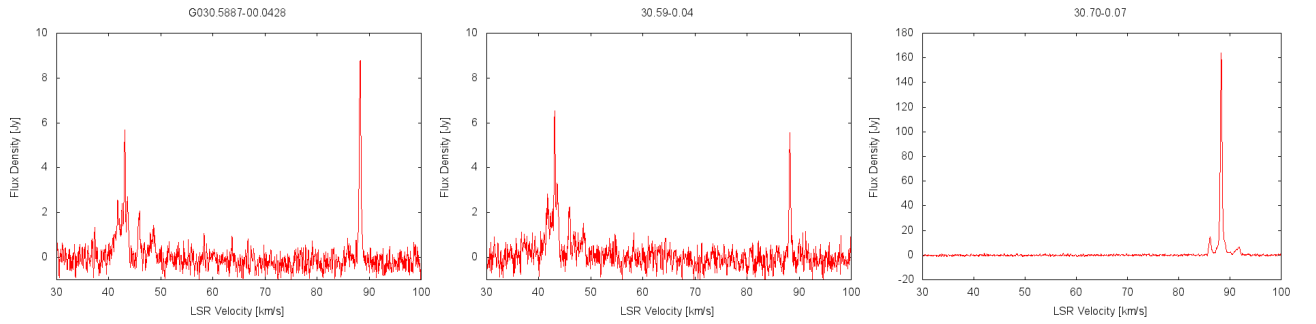
図 25: G029.7805-00.2661 のスペクトル比較



(左)G029.9347-00.0525

(右)29.95-0.02

図 26: G029.9347-00.0525 のスペクトル比較

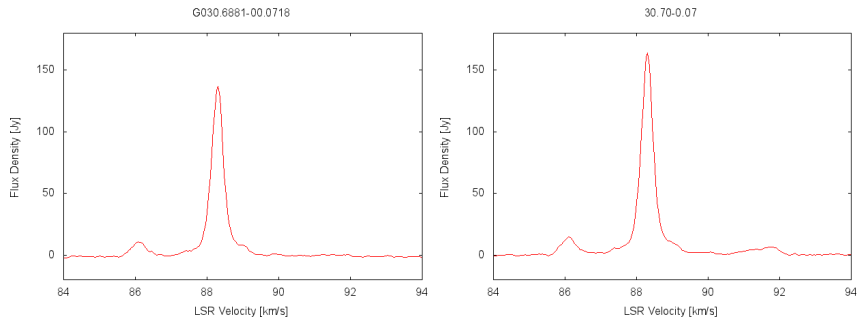


(左)G030.5887-00.0428

(中)30.59-0.04 42km/s 付近の放射

(右)30.70-0.07 88km/s 付近の放射

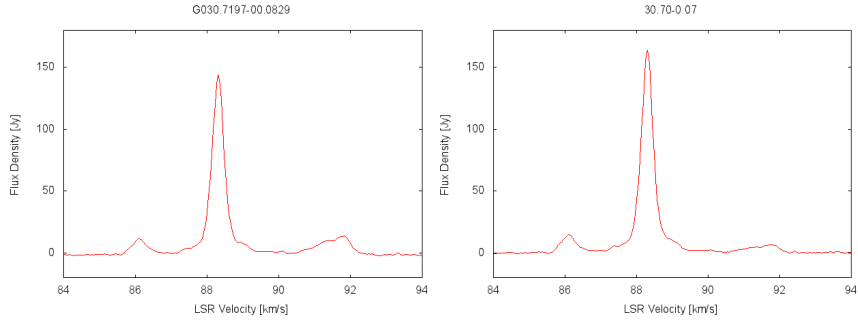
図 27: G030.5887-00.0428 のスペクトル比較



(左)G030.6881-00.0718

(右)30.70-0.07

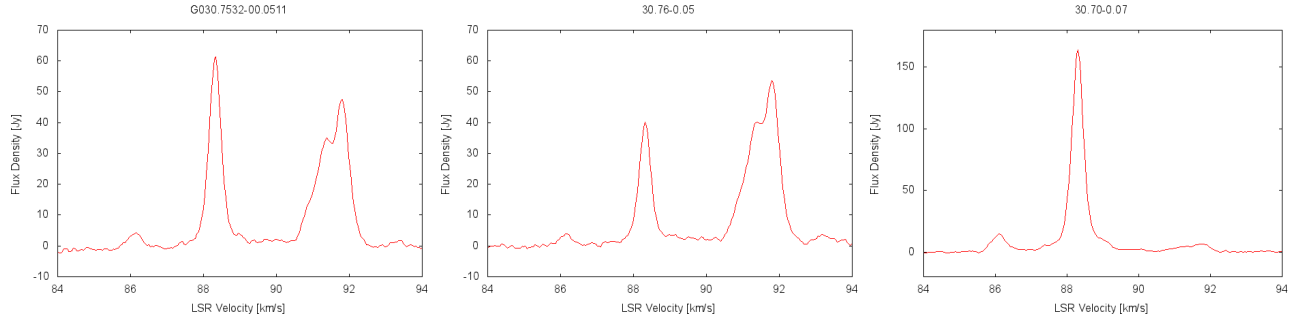
図 28: G030.6881-00.0718 のスペクトル比較



(左)G030.7197-00.0829

(右)30.70-0.07

図 29: G030.7197-00.0829 のスペクトル比較

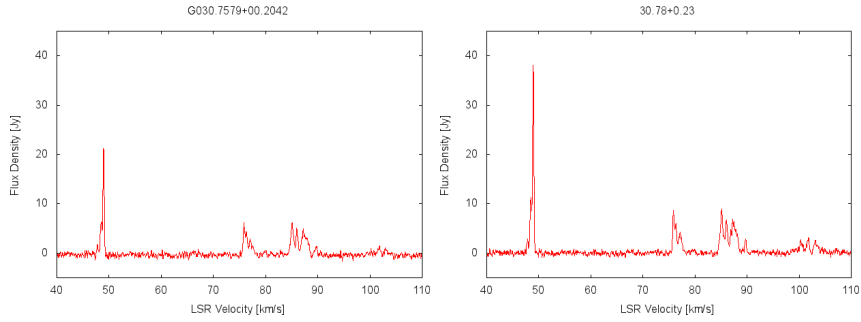


(左)G030.7532-00.0511

(中)30.76-0.05 92km/s 付近の放射

(右)30.70-0.07 88km/s 付近の放射

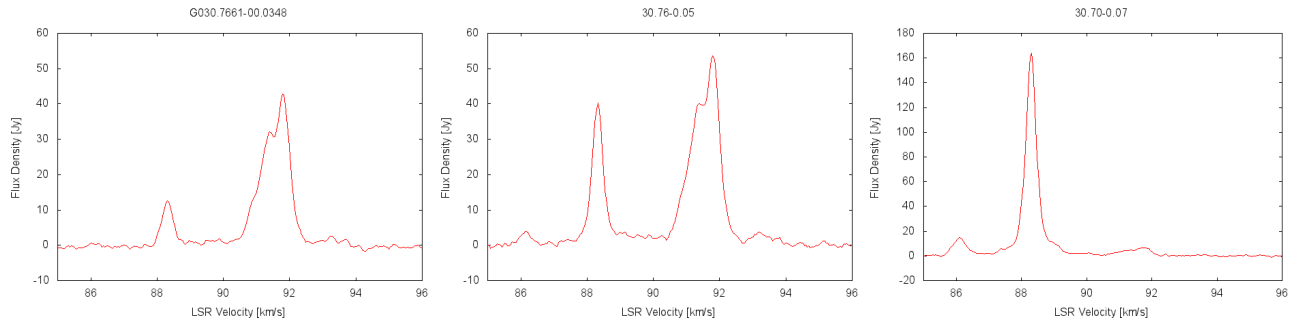
図 30: G030.7532-00.0511 のスペクトル比較



(左)G030.7579+00.2042

(右)30.78+0.23

図 31: G030.7579+00.2042 のスペクトル比較

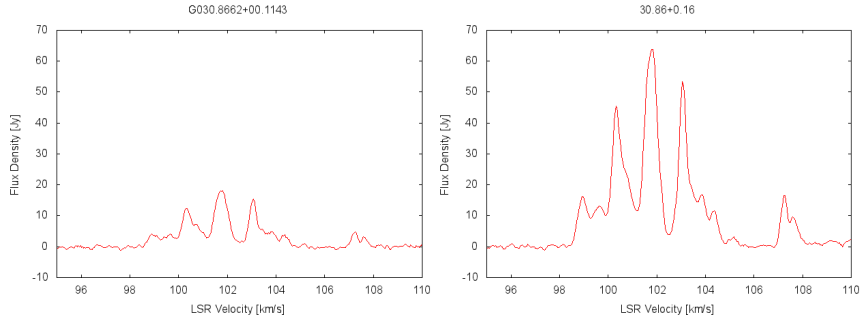


(左)G030.7661-00.0348

(中)30.76-0.05 92km/s 付近の放射

(右)30.70-0.07 88km/s 付近の放射

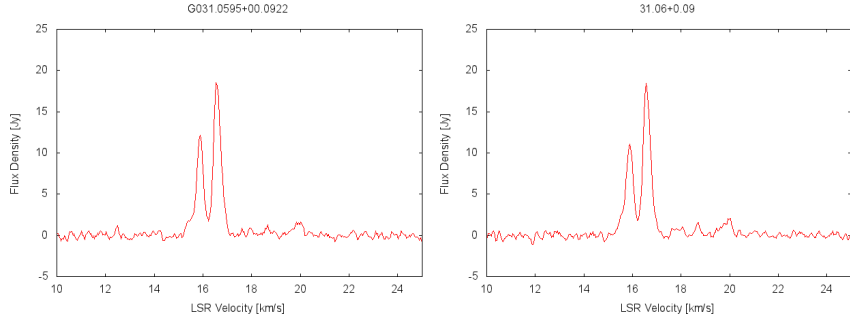
図 32: G030.7661-00.0348 のスペクトル比較



(左)G030.8662+00.1143

(右)30.86+0.16

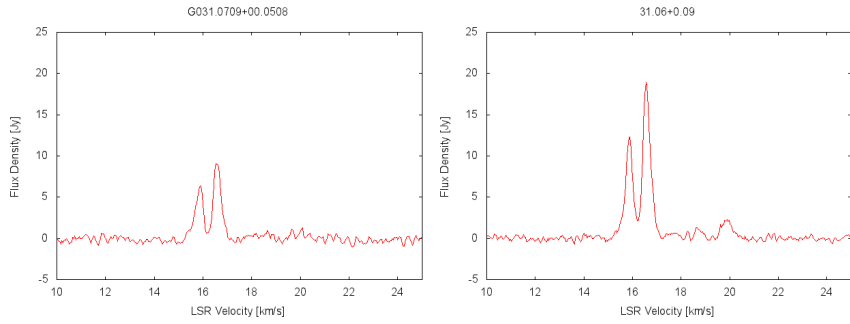
図 33: G030.8662+00.1143 のスペクトル比較



(左)G031.0595+00.0922

(右)31.06+0.09

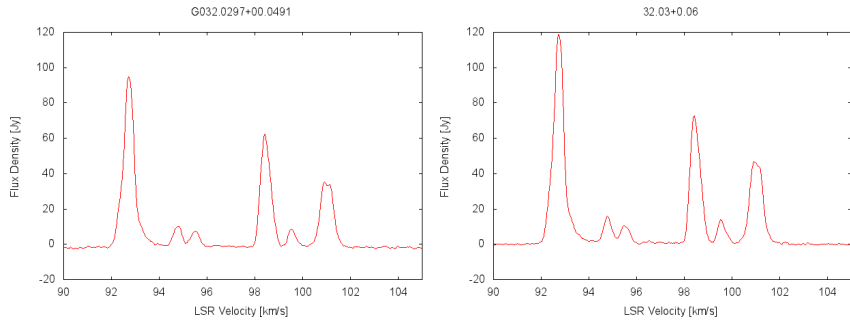
図 34: G031.0595+00.0922 のスペクトル比較



(左)G031.0709+00.0508

(右)31.06+0.09

図 35: G031.0709+00.0508 のスペクトル比較



(左)G032.0297+00.0491

(右)32.03+0.06

図 36: G032.0297+00.0491 のスペクトル比較

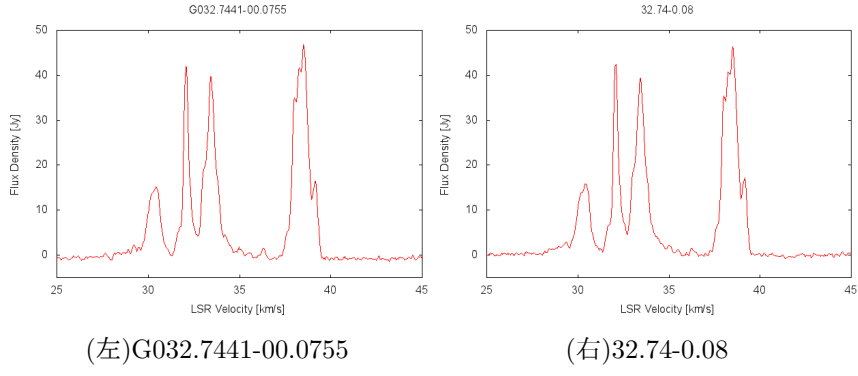


図 37: G032.7441-00.0755 のスペクトル比較

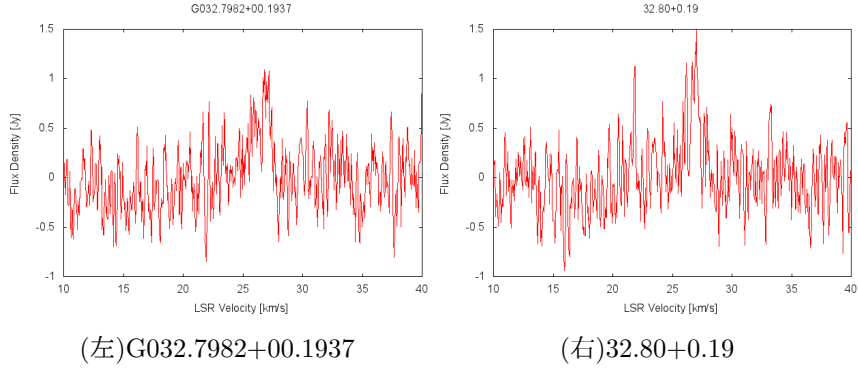


図 38: G032.7982+00.1937 のスペクトル比較

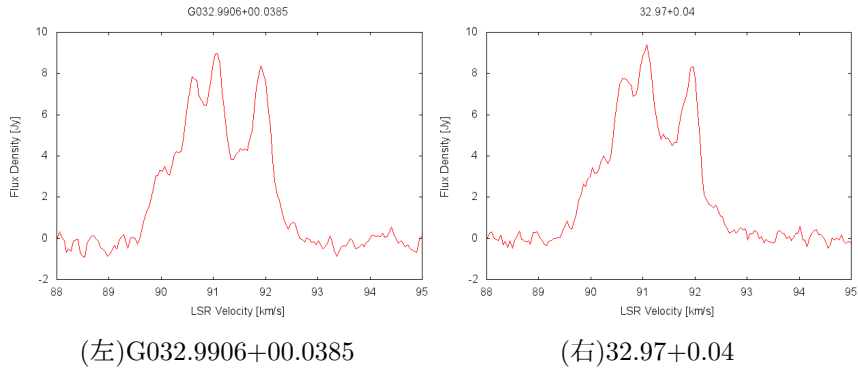


図 39: G032.9906+00.0385 のスペクトル比較

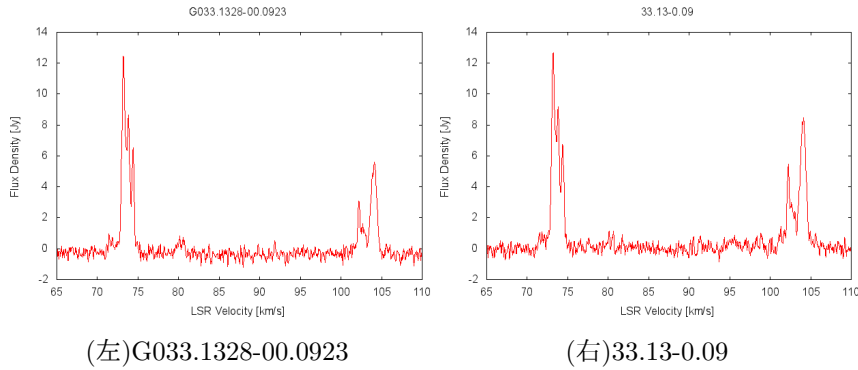


図 40: G033.1328-00.0923 のスペクトル比較

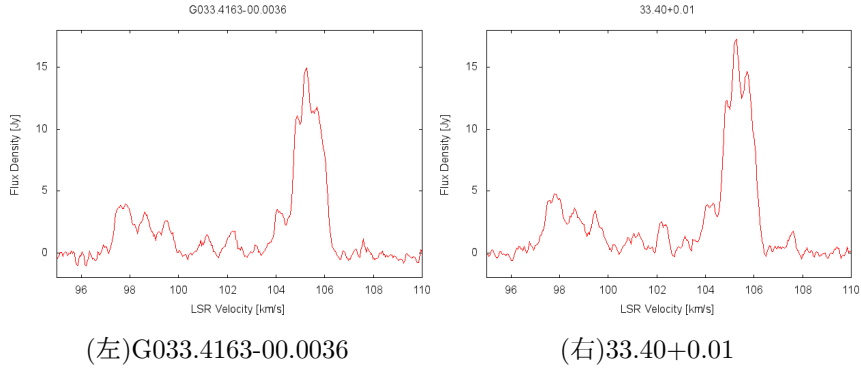


図 41: G033.4163-00.0036 のスペクトル比較

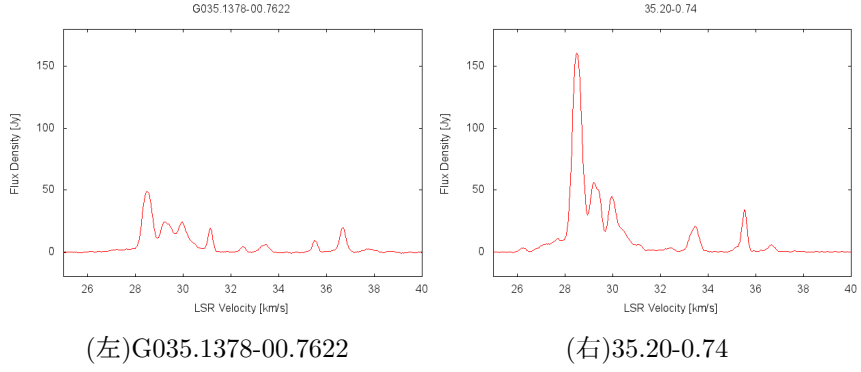


図 42: G035.1378-00.7622 のスペクトル比較

3.3 既知のメーザーよりも強い強度が検出された天体

既知の天体よりも強い強度が検出された天体は表 10 に示したものである。これらのスペクトルは図 43～51 に示した通りである。

表 10: 既知のメーザーよりも強い強度が検出された天体

観測ポインティング天体名	視線速度 [km/s]	強度 [Jy]	既知のメーザー名	強度 [Jy]	離角 [分角]	
G024.9237+00.0777	53.3	6.7	24.93+0.08	5.6	1.2	
	113	1.7	24.78+0.08	77.6	8.0	混入
G025.3809-00.1815	60.5	6.0	25.38-0.18	5.3	0.29	
G026.5976-00.0236	24.9	11.7	26.59-0.00	10.5	0.76	
G027.2800+00.1447	34.7	31.8	27.28+0.15	29.1	0.56	
	115.4	1.5	27.22+0.13	7.1	3.4	混入
G028.2879-00.3641	81.9	35.7	28.28-0.36	23.1	0.48	
	92.7	6.8		4.6		
G031.1590+00.0465	40.8	3.7	31.16+0.06	2.8	1.0	
	110.3	3.7	31.28+0.06	89.6	7.5	混入
G031.5815+00.0744	99.0	6.8	31.58+0.08	5.3	1.3	
G034.2572+00.1535	57.7	24.8	34.24+0.13	22.0	1.5	
G034.4032+00.2277	55.7	25.1	34.39+0.24	17.4	0.96	

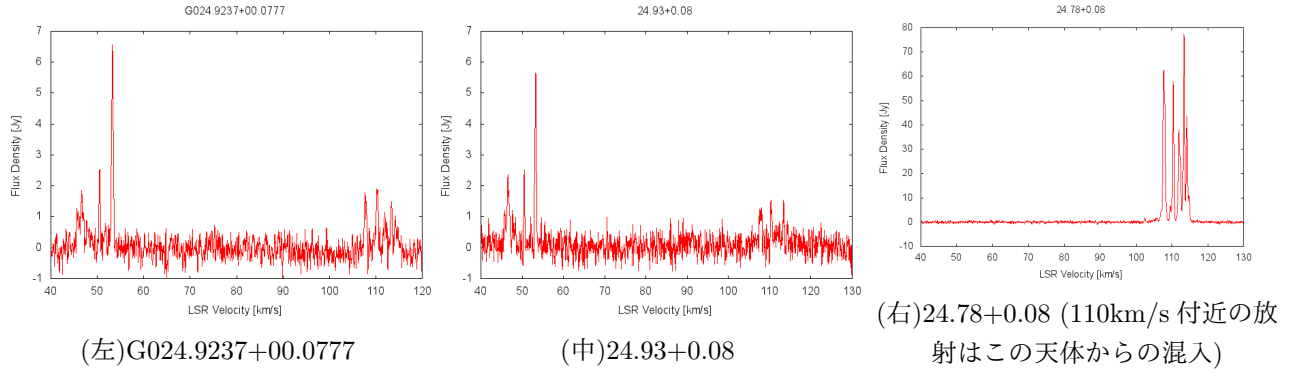


図 43: G024.9237+00.0777 のスペクトル比較

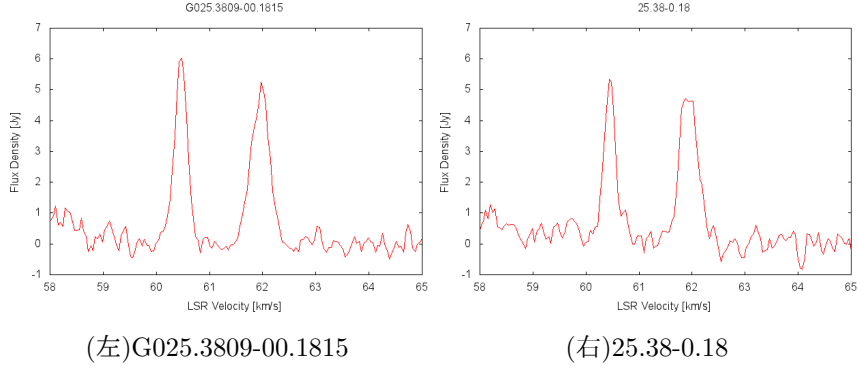


図 44: G025.3809-00.1815 のスペクトル比較

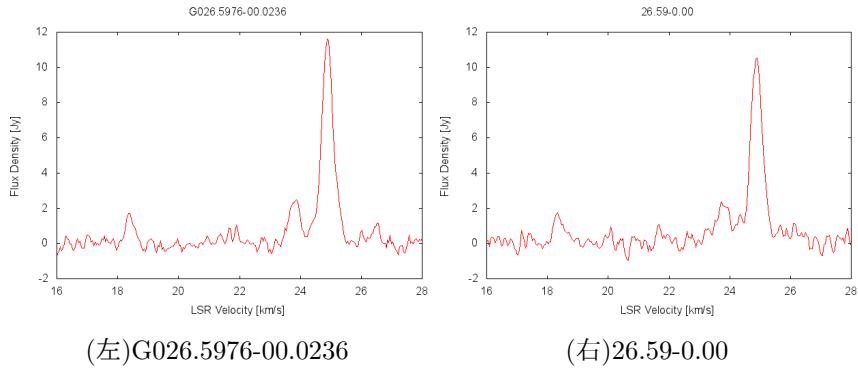


図 45: G026.5976-00.0236 のスペクトル比較

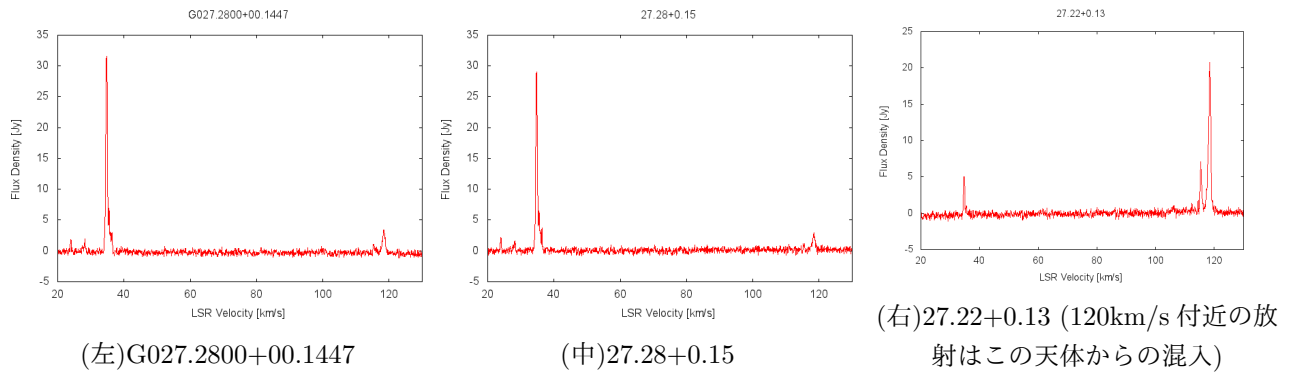
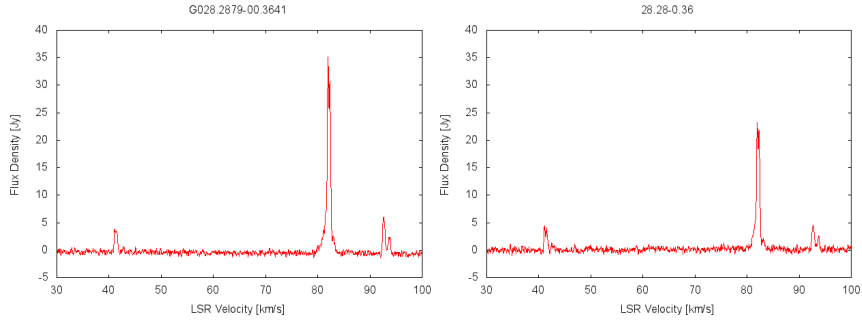


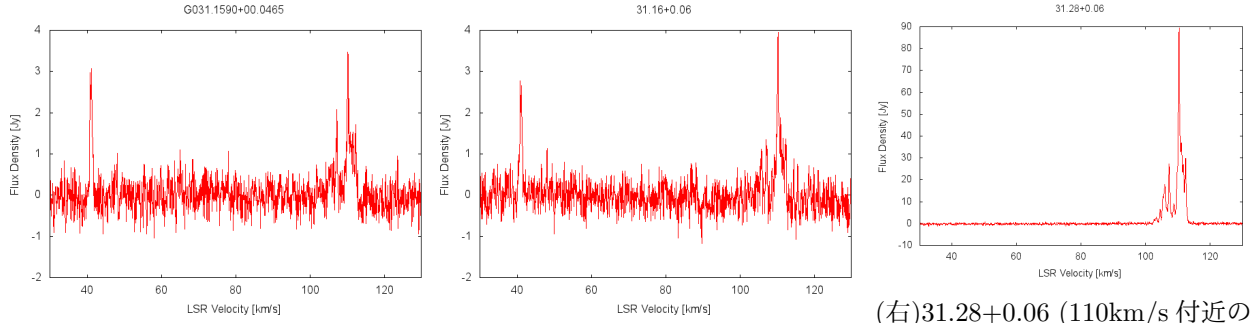
図 46: G027.2800+00.1447 のスペクトル比較



(左)G028.2879-00.3641

(右)28.28-0.36

図 47: G028.2879-00.3641 のスペクトル比較

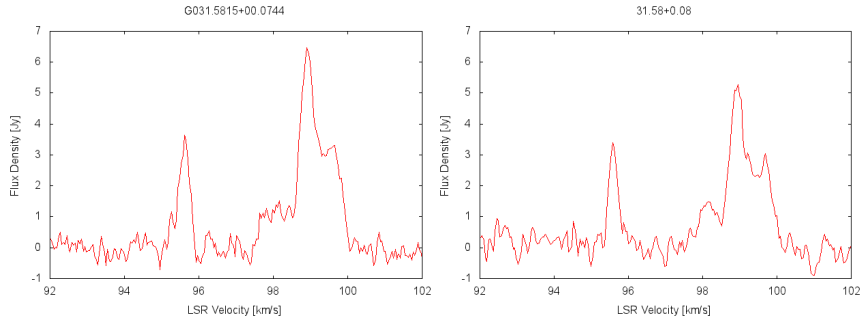


(左)G031.1590+00.0465

(中)31.16+0.06

(右)31.28+0.06 (110km/s 付近の放射はこの天体からの混入)

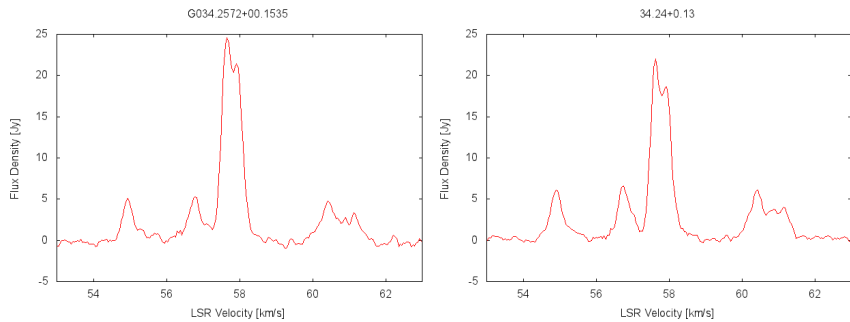
図 48: G031.1590+00.0465 のスペクトル比較



(左)G031.5815+00.0744

(右)31.58+0.08

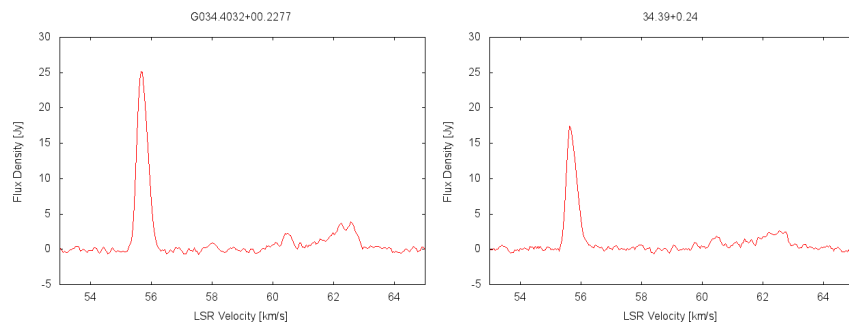
図 49: G031.5815+00.0744 のスペクトル比較



(左)G034.2572+00.1535

(右)34.24+0.13

図 50: G034.2572+00.1535 のスペクトル比較



(左)G034.4032+00.2277

(右)34.39+0.24

図 51: G034.4032+00.2277 のスペクトル比較

4 考察

4.1 HII 領域全般と 6.7GHz メタノールメーザーとの空間的な相関

本研究で用いた CORNISH96 天体のうちメーザーが付随していると考えられるものは、既知のメーザーが付随している 10 天体と新検出のメーザーが付随している 3 天体の合計 13 天体であった (付随率 $\sim 13.5\%$)。したがって、HII 領域全般と 6.7GHz メタノールメーザーとの空間的な相関は低いと考えられる。

4.2 CORNISH 天体のサイズ導出

以降の議論では CORNISH 天体のサイズが必要となるため、ここで導出を行う。

まず Red MSX Source(RMS) database Sever(http://rms.leeds.ac.uk/cgi-bin/publish/RMS_DATABASE.cgi) を使い CORNISH 天体の距離を得た。検索条件は第一に CORNISH 天体の座標位置からの offset が 1 分角以内であること、第二に天体の種類が HII 領域であることとした。これにより 70 天体についての距離が得られた。

次に距離が得られなかったもののうちメーザーが付随している CORNISH 天体については、メーザー自身の視線速度を使った kinematic distance 算出法を使って計算した。kinematic distance 算出法は次の通りである。

銀河回転曲線を仮定する。回転速度は $V_g = 246 \text{ km/s}$ [14] で一定と考えられる (ただし銀河中心から 1kpc 以内では一定でない)。銀経を l とすると、視線方向における太陽の速度 V_s 、距離を求めたい天体の速度 V_m 、視線速度 V_{lsr} の関係は次式のようにになる。ただし、 θ は回転速度 V_g と距離を求めたい天体の速度 V_m のなす角である。

$$V_{lsr} = V_m - V_s \quad (2a)$$

$$V_s = V_g \sin l \quad (2b)$$

$$V_m = V_g \cos \theta. \quad (2c)$$

式 (2) より次式が導かれる。

$$\cos \theta = \frac{V_{lsr} + V_g \sin l}{V_g}. \quad (3)$$

銀河中心から太陽までの距離 $X_g = 8.4 \text{ kpc}$ [14] と距離を求めたい天体までの距離 X_m との関係は以下のようになる。

a) near distance ($X_g > X_m$) の場合

正弦定理より (図 53)

$$\frac{X_g}{\sin(90[\text{deg}] + \theta)} = \frac{X_m}{\sin(90[\text{deg}] - (l + \theta))}. \quad (4)$$

ここで

$$\begin{aligned} \sin(90[\text{deg}] - (l + \theta)) &= \sin 90[\text{deg}] \cos(l + \theta) - \cos 90[\text{deg}] \sin(l + \theta) \\ &= \cos(l + \theta). \end{aligned}$$

したがって天体までの距離は

$$X_m = \frac{X_g}{\cos \theta} \cos(l + \theta). \quad (5)$$

b) far distance ($X_g < X_m$) の場合

正弦定理より (図 53)

$$\frac{X_g}{\sin(90[\text{deg}] - \theta)} = \frac{X_m}{\sin(90[\text{deg}] - (l - \theta))}. \quad (6)$$

ここで

$$\begin{aligned}\sin(90[\text{deg}] - (l - \theta)) &= \sin 90[\text{deg}] \cos(l - \theta) - \cos 90[\text{deg}] \sin(l - \theta) \\ &= \cos(l - \theta).\end{aligned}$$

したがって天体までの距離は

$$X_m = \frac{X_g}{\cos \theta} \cos(l - \theta). \quad (7)$$

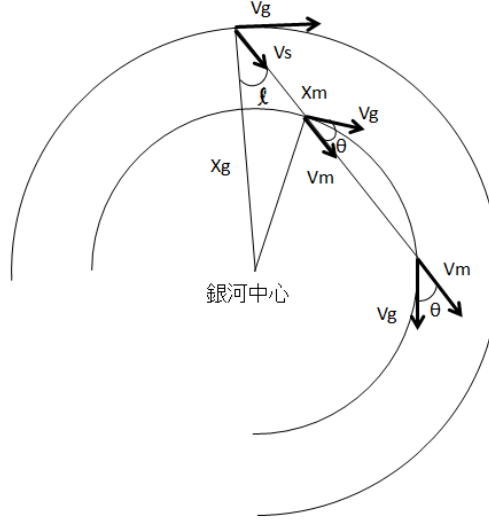


図 52: kinematic distance 算出法の概念図

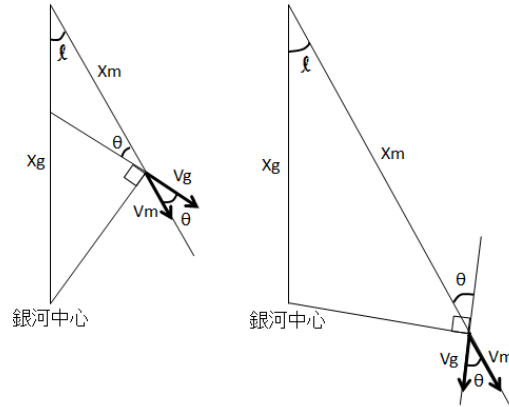


図 53: 正弦定理 (左)near distance (右)far distance

near distance か far distance かの判断には Green et al. (2011)[14] を参照した。この研究では HI self-absorption による決定法を用いて判断している。HI self-absorption による決定法の考え方は次の通りである。HI ガスは星間空間に広く分布している物質であり、光学的に薄い。距離を求めたい CORNISH 天体 (HII 領域) は光学的に十分厚く、輝度温度 $T_b \sim 10^4 \text{K}$ の黒体放射をしているとみなせる。望遠鏡の視野の中で HII 領域がある部分とない部分でのスペクトルを分けて考えると図 54 ようになる。ただし実際には視野内のフラックスを積分した値が観測値となる。

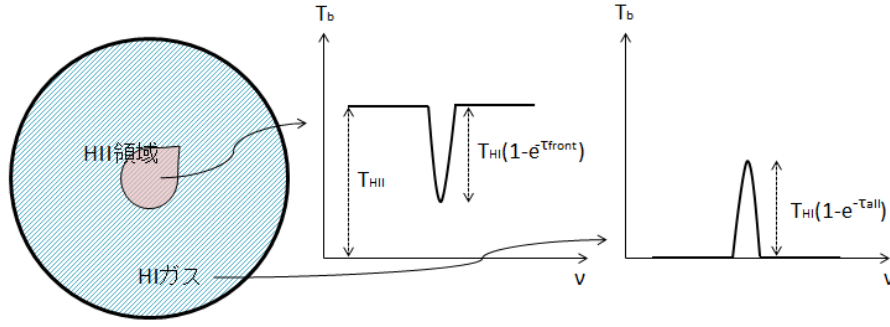


図 54: 観測視野 (左) と HII 領域がある部分 (中) とない部分 (右) でのスペクトル。ただし τ_{front} は HII 領域の前方にある HI ガスの光学的厚み、 τ_{all} は視線方向全域の HI ガスの光学的厚み。

HII 領域が近くにある場合と遠くにある場合を図 55 のように考える。

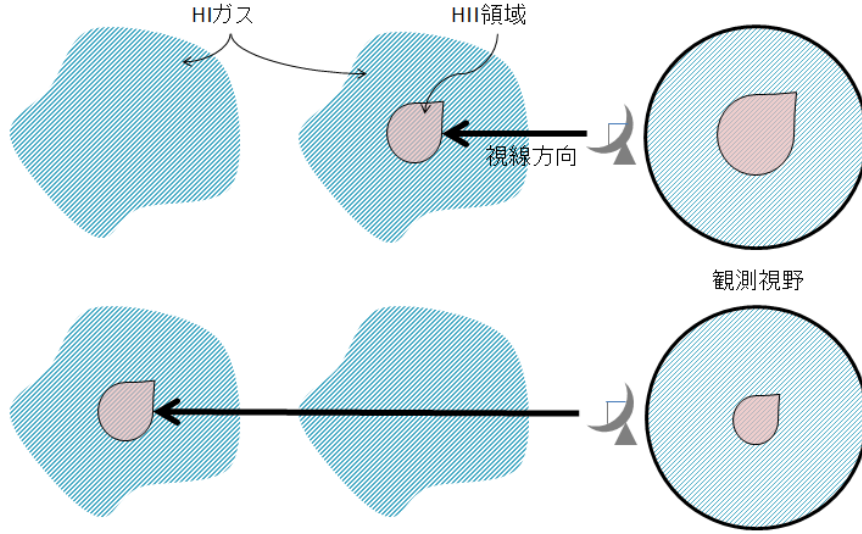


図 55: HII 領域が近くにある場合 (上) と遠くにある場合 (下) の観測概念図と観測視野

HII 領域が遠くにある場合と比較して、近くにある場合は HII 領域の立体角はより大きくなる。そのため、積分すると HI ガスの吸収線が比較的埋もれにくい。したがって、視線速度付近で HI スペクトルの吸収線が見られた場合は near distance の可能性が高いと考えられ、反対に吸収線が見られなかった場合は far distance の可能性が高いと考えられる。

kinematic distance 算出法により 3 天体の距離を導出できた。ただし RMS database Sever から距離を得たうちの 1 天体と kinematic distance 算出法により距離を計算したうちの 1 天体については near distance か far distance かの判断がつかなかった。

次に距離と視直径からサイズを算出した。 $L[10^3 \text{ AU}]$ を CORNISH 天体のサイズ、 $D[\text{kpc}]$ を CORNISH 天体の距離、 $\phi[\text{秒角}]$ を CORNISH 天体の視直径とすると次式が成り立つ。

$$L = \phi D \quad (8)$$

算出した結果は表 11 のようになった。メーザーが付随している天体としていない天体それぞれについてヒストグラムを描くと図 56 のようになった。

表 11: CORNISH HII 領域のサイズ

CORNISH 天体名	距離 [kpc]	サイズ [10^3 AU]		メーザー付随
G024.7898+00.0833	7.7	11.6	RMS より	付随
G024.7984+00.0967	7.7	86.5	RMS より	
G024.8497+00.0881	7.7	28.3	RMS より	
G024.9237+00.0777	3.1	46.3	RMS より	
G025.3055+00.5305	7.6	52.5	RMS より	
G025.3948+00.0332	16.3	75.6	RMS より	
G025.3970+00.5614	13.8	28.1	RMS より	
G025.3981-00.1411	5.2	44.7	RMS より	
G025.3983+00.5617	13.8	34.6	RMS より	
G025.3991-00.1366	5.2	17.5	RMS より	
G025.7157+00.0487	9.8	23.1	RMS より	
G025.8011-00.1568	5.2	9.3	RMS より	
G026.0907-00.0575	12.9	88.8	RMS より	
G026.0916-00.0565	12.9	33.0	RMS より	
G026.1094-00.0937	13.1	20.7	RMS より	付随
G026.5444+00.4169	4.86/10.17	61.2/128.0	RMS より	
G026.5976-00.0236	13.2	35.0	RMS より	
G026.6089-00.2121	7.5	48.9	RMS より	
G027.1859-00.0816	13	26.4	RMS より	付随
G027.2800+00.1447	12.6	72.4	RMS より	
G027.3644-00.1657	11.8	11.8	near distance	
G027.5637+00.0845	10.1	124.0	RMS より	
G027.9352+00.2056	12	19.2	RMS より	付随
G028.1985-00.0503	5.3	16.2	RMS より	
G028.2003-00.0494	5.3	11.6	RMS より	
G028.2447+00.0131	7.4	53.9	RMS より	
G028.2879-00.3641	11.6	53.4	RMS より	付随
G028.6082+00.0185	7.4	26.8	RMS より	
G028.6523+00.0273	7.4	41.9	RMS より	
G028.6869+00.1770	10	52.8	RMS より	
G029.9559-00.0168	4.9	47.1	RMS より	付随
G030.0096-00.2734	5.6/9.0	9.0/14.5	掲載なし	付随
G030.2527+00.0540	10.3	59.8	RMS より	付随
G030.5313+00.0205	11.4	63.2	RMS より	
G030.5353+00.0204	11.4	71.8	RMS より	
G030.5887-00.0428	11.6	20.7	RMS より	
G030.6862-00.2610	4.9	86.3	RMS より	
G030.6881-00.0718	4.9	52.9	RMS より	
G030.7197-00.0829	4.9	22.5	RMS より	
G030.7661-00.0348	4.9	16.0	RMS より	
G030.8662+00.1143	11.8	36.5	RMS より	
G030.9581+00.0869	11.7	37.5	RMS より	

表 11: CORNISH HII 領域のサイズ

CORNISH 天体名	距離 [kpc]	サイズ [10^3 AU]		メーザー付随
G031.0495+00.4697	12.1	21.6	RMS より	
G031.0595+00.0922	13	26.2	RMS より	
G031.0709+00.0508	11.8	122.4	RMS より	
G031.1590+00.0465	2.6	5.3	RMS より	
G031.1596+00.0448	2.6	4.4	RMS より	
G031.2420-00.1106	12.8	100.0	RMS より	
G031.2435-00.1103	12.8	34.4	RMS より	
G031.2448-00.1132	12.8	40.2	RMS より	
G031.2801+00.0632	4.9	45.7	RMS より	付随
G031.3959-00.2570	4.9	49.2	RMS より	
G031.4130+00.3065	4.9	45.9	RMS より	付随
G031.5815+00.0744	4.9	11.8	RMS より	
G032.0297+00.0491	4.9	20.9	RMS より	
G032.1502+00.1329	4.9	60.7	RMS より	
G032.2730-00.2258	12.5	122.9	RMS より	
G032.4727+00.2036	11	24.9	RMS より	
G032.7441-00.0755	11.6	20.7	RMS より	
G032.7492-00.0643	11.6	24.9	RMS より	
G032.7966+00.1909	12.9	129.2	RMS より	付随
G032.7982+00.1937	12.9	25.6	RMS より	
G032.9273+00.6060	17.2	117.1	RMS より	
G032.9906+00.0385	9.2	140.2	RMS より	
G033.1328-00.0923	9.5	38.3	RMS より	
G033.1419-00.0853	9.5	34.7	RMS より	
G033.4163-00.0036	9.6	84.2	RMS より	
G033.8100-00.1864	11	24.1	RMS より	
G033.8113-00.1893	11	142.4	RMS より	
G033.9145+00.1105	7	71.0	RMS より	
G034.1324+00.4700	11.5	116.4	RMS より	
G034.4032+00.2277	1.6	2.8	RMS より	
G035.0242+00.3502	2.7	4.1	near distance	付随
G035.0524-00.5177	10.6	38.9	RMS より	

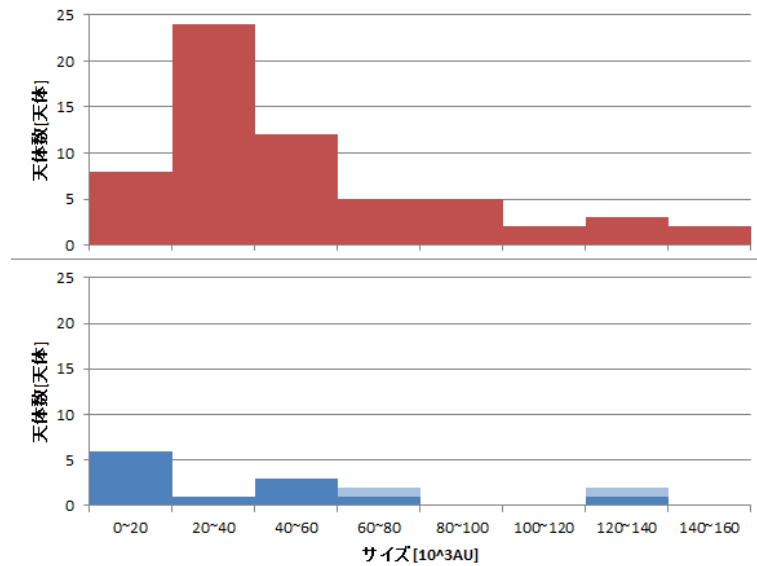


図 56: メーザーが付随していない天体 (上) としている天体 (下) のヒストグラム (薄い部分は near distance と far distance の判断がつかなかったものを示している。)

4.3 6.7GHz メタノールメーザーの付随の有無と HII 領域のサイズの関係

図 57 はメーザーが付随している天体、付随していない天体それぞれについて HII 領域のサイズに対する天体数の累積頻度分布を表したものである。これにより、メーザーが付随している HII 領域はそうでないものに比べてそのサイズが小さい傾向にあることがわかった。HII 領域が膨張するに伴い、6.7GHz メタノールメーザーは消滅する傾向があると考えられる。

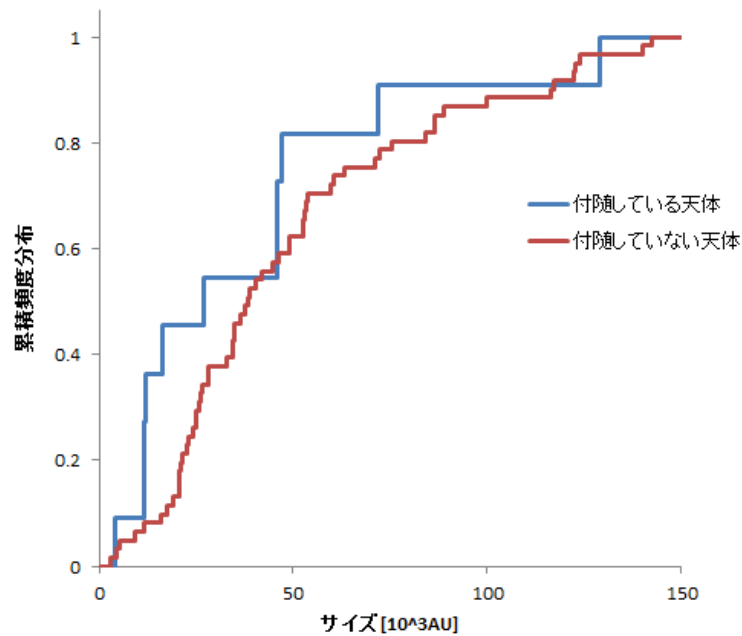


図 57: HII 領域のサイズに対するメーザーが付随している天体としない天体の累積頻度分布

表 12: メーザーが付随している天体としていない天体のサイズ平均値

	天体数 [天体]	サイズ平均値 [10^3 AU]
付随している天体	11	38.3
付随していない天体	61	49.8

4.4 既知のメーザーよりも強い強度が観測された天体について

既知のメーザーのうち $20^\circ < l < 35^\circ$ に位置する天体については単一鏡観測により座標が導出されたものが含まれており、位置精度が低い (5~10 秒角)。既知のメーザーよりも強い強度が観測された天体はすべてこの範囲に位置している。したがってメーザー源の真の位置は本研究により観測した位置により近いのではないかと考えられる。

5 まとめ

HII 領域のカatalog CORNISH database 中の天体を対象とし 6.7GHz メタノールメーザーのサーベイをした結果、新検出とみられるメーザー放射が 3 天体見つかった。これらを含め、6.7GHz メタノールメーザーが付随しているとみられる HII 領域は全体の約 13.6%であった。したがって HII 領域全般と 6.7GHz メタノールメーザーとの空間的な相関は低いと考えられる。さらに 6.7GHz メタノールメーザーの付随の有無と HII 領域のサイズの関係を検証したところ、付随している HII 領域のサイズはそうでないものに比べて平均で 23%(約 1.2×10^4 AU) 小さいことがわかった。したがって HII 領域が膨張するに伴い、6.7GHz メタノールメーザーは消滅する傾向があると考えられる。本研究ではターゲットのバイアスを取り除いて観測を行ったが、上記の通り先行研究と同様の結論が導かれた。また放射源が既存のカatalogの座標位置とは異なるのではないかと考えられる 6.7GHz メタノールメーザーが 15 天体見つかった。これらは高分解能な観測により、精度のより高い位置を特定する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員の百瀬宗武教授、米倉覚則准教授をはじめ、研究員の杉山孝一郎さん、宮本祐介さんにも多くのご指導をいただきました。ご協力いただいた皆様に、心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 福井康雄, 犬塚修一郎, 大西利和, 中井直正, 舞原俊憲, 水野亮編著 2008, 『星間物質と星形成』(シリーズ現代の天文学 第6巻), 日本評論社
- [2] C.R. Purcell 2006, ph.D. “What’s in the brew? A study of the molecular environment of methanol masers and UCHII regions.”
- [3] S.Kurtz 2002, Hot Star Workshop III: The Earliest Stages of Massive Star Birth ASP Conference Series, 267
- [4] A. Sanna, L. Moscadelli, R. Cesaroni, A. Tarchi, R.S. Furuya, C. Goddi 2010, Astronomy and Astrophysics, 517, A71
- [5] A.J. Walsh, M.G. Burton, A.R. Hyland, G.Robinson 1998, Monthly Notices of the ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY, 301, 640-698
- [6] M.G. Hoare, C.R. Purcell, E.B. Churchwell, P. Diamond, W.D. Cotton, C.J. Chandler, S. Smethurst, S.E. Kurtz, L.G. Mundy, S.M. Dougherty, R.P. Fender, G.A. Fuller, J.M. Jackson, S.T. Garrington, T.R. Gledhill, P.F. Goldsmith, S.L. Lumsden, J. Marti, T.J.T. Moore, T.W.B. Muxlow, R.D. Pandian, J.M. Paredes, D.S. Shepherd, R.E. Spencer, M.A. Thompson, G. Umana, J.S. Urquhart 2012, PUBLICATIONS OF THE ASTRONOMICAL SOCIETY OF THE PACIFIC, 124, 939-955
- [7] C.R. Purcell +30 2013, The Astrophysical Journal Supplement Series, 205, 1
- [8] Y. Xu, M.A. Voronkov, J.D. Pandian, J.J. Li, A.M. Soboley, A. Brunthaler, B. Ritter, K.M. Menten 2009, Astronomy and Astrophysics, 507, 1117-1139
- [9] J.L. Caswell +24 2010, Monthly Notices of the ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY, 404, 1029-1060
- [10] J.A. Green, J.L. Caswell, G.A. Fuller, A. Avison, S.L. Breen, S.P. Ellingsen, M.D. Gray, M. Pestalozzi, L. Quinn, M.A. Thompson, M.A. Voronkov 2010, Monthly Notices of the ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY, 409, 913-035
- [11] J.A. Green, J.L. Caswell, G.A. Fuller, A. Avison, S.L. Breen, S.P. Ellingsen, M.D.Gray, M. Pestalozzi, L. Quinn, M.A. Thompson, M.A. Voronkov 2012, Monthly Notices of the ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY, 420, 3108-3125
- [12] J.D. Pandian, E. Momjian, Y. Xu, K.M. Menten, P.F. Goldsmith 2011, The Astrophysical Journal, 730, 55
- [13] J.D. Pandian, P.F. Goldsmith, A.A. Deshpande 2007, The Astrophysical Journal, 656, 255-274
- [14] J.D. Green, N.M. McClure-Griffiths 2011, Monthly Notices of the ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY, 417, 2500-2553