

修士学位論文

BGPS ダストコアを対象とした
大質量星形成過程における
6.7GHz メタノールレーザーの出現時期の調査

2016 年度

(平成 28 年度)

茨城大学大学院理工学研究科

理学専攻

15NM154Y

大橋拓人

論文要旨

星形成領域で観測されてきた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、OH メーザーは HII 領域が形成されるような後期に発生していることは知られていても、水メーザーとメタノールメーザーの出現時期に関する過去の議論では、研究者間で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クラス I・II メタノールメーザー、および水メーザーの出現時期の相対関係を確立することを目的とした。その中で私は 6.7GHz クラス II メタノールメーザーの探査を担当した。

観測は日立 32m 電波望遠鏡を用いて、2014 年 11 月 3 日から 2015 年 5 月 27 日にかけて計 8 回実施した。Shirley et al. (2013) により、BGPS データベースに対して分子雲コアトレースである $\text{N}_2\text{H}^+(3-2)(280\text{GHz})$ と $\text{HCO}^+(3-2)(268\text{GHz})$ の観測が行われた 3153 天体について、強度と強度比の点から 4 つのカテゴリーに分類し、そこから 296 天体を観測対象として選出した。その内訳は (a) N_2H^+ のみ検出した天体:強度順に 36 天体、(b) N_2H^+ の強度が HCO^+ よりも強い天体:強度比が高い順に 55 天体、(c) HCO^+ の強度が N_2H^+ よりも強い天体:強度比が高い順に 151 天体、(d) HCO^+ のみ検出した天体:強度順に 54 天体、となっている。観測時間は 1 天体あたり 300 秒で、rms ノイズレベルは 1σ あたり 0.3Jy となっており、スペクトルのピークが 5σ を超えたものを検出とみなした。

その結果 296 天体中 53 天体から 6.7GHz メタノールメーザーの放射が確認され、検出率は 17.9% となった。そのうちメタノールメーザーが新検出されたと思われる天体は 3 天体であった。メタノールメーザー放射が確認された BGPS 天体のうち新検出の 3 天体を除いた 50 天体については、BGPS 天体にメタノールメーザー源が付随しているかをより精度よく求めるため、既に位置が 1 秒角より良い精度で求まっている既知のメーザー源 (Methanol Multibeam Survey) との位置比較を行った。離角が 0.5 分角以内であれば BGPS 天体にメーザー源が付随しているとみなした。その結果、BGPS 50 天体中 28 天体にメタノールメーザー源が付随していることがわかった。

今回の観測結果から付随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 6.7GHz メタノールメーザーの付随率も上がる傾向が明らかになった。星形成の初期段階は低温で CO が凍りついてダスト表面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^+ が生まれるということが知られている (Jørgensen et al. 2004)。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^+ が卓越しているような低温で高密度の星形成初期段階に出現すると考えられる。このことを確認するために N_2H^+ と HCO^+ のライン幅による比較と MIPS GAL24 μm の赤外線データによる比較を行ったが、今回の比較だけでは 6.7GHz メタノールメーザーが初期段階に出現する決定的な証拠を掴むまでに至らなかった。

目次

1	研究背景	4
1.1	大質量星形成過程	4
1.2	メーザー	5
1.2.1	メーザー現象	5
1.2.2	メーザーの出現時期	6
1.3	星形成領域における N_2H^+ と HCO^+ の関係	6
1.3.1	関係式	6
1.3.2	大質量星での観測例	7
1.4	研究目的	8
2	観測	10
2.1	観測天体の選出	10
2.1.1	BGPS ダストコア	10
2.1.2	選出方法	10
2.2	観測諸元	10
3	結果	13
3.1	観測結果	13
3.2	追観測結果	14
3.2.1	複数回観測結果	14
3.2.2	9点法観測結果	16
4	考察	17
4.1	強度比と付随率	17
4.2	ライン幅との比較	18
4.3	赤外線のマップとの比較	22
4.4	今後の展望	24
付録 A	観測天体リスト	26
付録 B	検出天体及び既知のメーザー源とのスペクトル比較	35
付録 C	MIPSGAL $24\mu\text{m}$	58

1 研究背景

1.1 大質量星形成過程

この節は「シリーズ現代の天文学 6 星間物質と星形成」(福井康雄 他 2008) を参考に記述する。

恒星の性質は質量によって大きく支配され、太陽の 8 倍以上の質量を持つ大質量星と、それ以下の質量を持つ小・中質量星の二つに大別される。大質量星は

- 表面温度が高いために紫外線量が大きく、周囲のガスを電離、加熱する。
- 星風と呼ばれるガス流を発生して周囲の物質を圧縮する。
- 進化の終末で超新星爆発を起こし、星間空間に膨大なエネルギーを与え、同時に爆発時に重元素を生成・供給する。

等の特徴を持ち、銀河系内の環境に多大な影響を与える。したがって、大質量星の形成過程を知ることが銀河規模での現象の理解に必要不可欠である。現在考えられている大質量星形成のシナリオは以下の通りである (Purcell 博士論文 2006)。

- i. 巨大分子雲内のガスやダストで構成される低温高密度領域で星形成が始まる。
- ii. これらのガスやダストは自己重力で重力崩壊を起こし、星の芯は降着によって質量を増やしていく。
- iii. 中心の原始星からの輻射やアウトフローによってダスト粒子の氷が蒸発し、大型の有機分子が気相中に生成される。
- iv. 中心星からの紫外線によってガスが電離されることにより UCHII (ultra-compact HII) 領域が形成され、周囲の分子を破壊しながら広がっていく。
- v. 高温の電離ガスの膨張が続き、giant HII 領域が形成される。やがて、星団にさらされることでガスが晴れていく。

しかし、地球近傍に多数存在することで観測的事実から星形成のシナリオの裏付けが取れる小・中質量星に対して、大質量星はその大半が地球から 1kpc ($1\text{pc}=3.09 \times 10^{16}\text{m}$) 以遠にあり、また大質量原始星の周囲が高密度な星間物質に埋もれていることから観測が難しく、それぞれの細かなタイムスケール等が明らかになっていない。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、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) という観測方法がある。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しか観測ができない。そこで、輝度温度が概ね $10^6 - 10^{10}\text{K}$ 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、粒子どうしの頻繁な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。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。これは、図 1 のように Level2 よりも上の準位に励起された粒子が、自発放射などにより Level2 へと遷移し、この現象が多数の粒子で起こることで実現される。このような状態を反転分布と呼ぶ。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)。

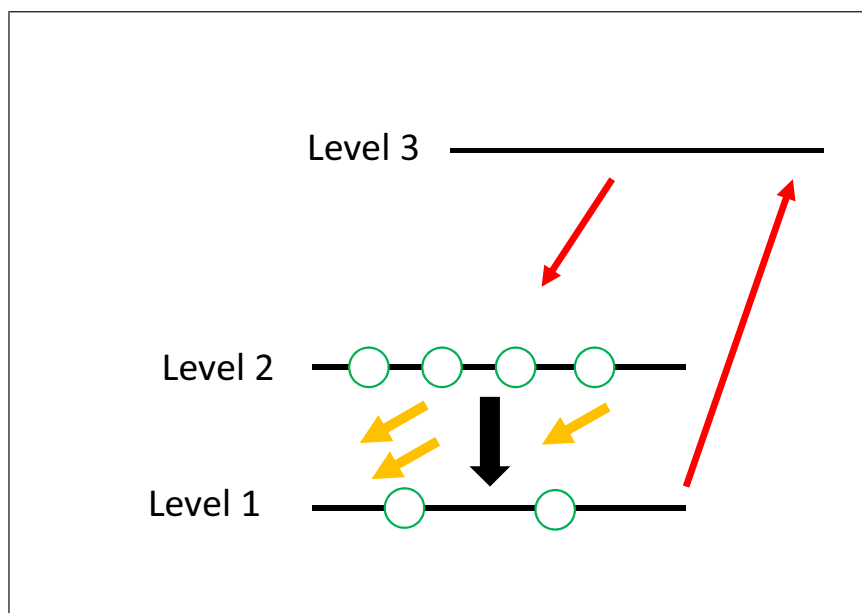


図 1 メーザー現象の三準位モデル

1.2.2 メーザーの出現時期

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、OHメーザーはUCHII領域が現れるような進化の後期段階に出現することは知られていても、水メーザーとメタノールメーザーの出現時期に関する過去の議論では、研究者間で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も述べている。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、水メーザーはミリ波でのみ見えるコアに多く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。

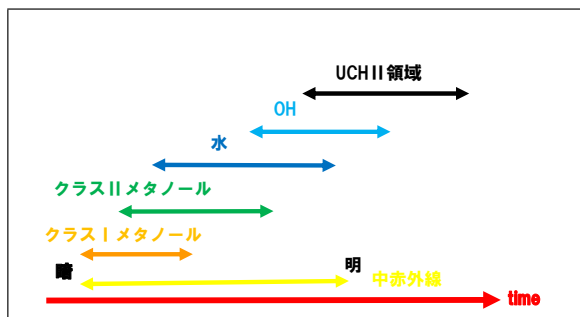


図2 大質量星形成領域におけるメーザーの出現時期の例1(Ellingsen et al. 2007 を参考)

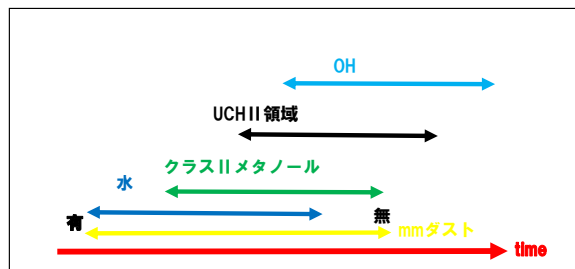


図3 メーザーの出現時期の例2(Reid 2007 を参考)。こちらではクラスIメタノールメーザーの出現時期に関しては理解が不十分であると述べられている。

1.3 星形成領域における N_2H^+ と HCO^+ の関係

1.3.1 関係式

N_2H^+ と HCO^+ は高密度のトレーサーとして用いられており、Jørgensen et al. (2004) によると、星形成領域における N_2H^+ と HCO^+ の消滅・生成には以下の3つの化学反応が関係している。





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)。だが、CO が凍りついてダストの表面に付着するような低温の状態 (典型的には 10K 程度) だと、(2) の反応は極度に落ち込み、代わりに (3) の反応が進んで N_2H^+ が生成されるようになる。しかし、温度が上がって CO が昇華してガスになると (2) と (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。すなわち、星が進化して温度が上昇するに連れて N_2H^+ が減少して HCO^+ が増加、つまり $\text{N}_2\text{H}^+/\text{HCO}^+$ が減少すると考えられる。

1.3.2 大質量星での観測例

Jørgensen の理論は小質量星にて適用されるものであると考えられていたが、大質量星形成領域での観測例も見つかっている。それが Busquet et al (2011). である。この論文では、大質量星形成領域 AFGL5142 を対象に 3.2mm 連続波と $\text{N}_2\text{H}^+(1-0)$ の観測を行い、過去の NH_3 や H^{13}CO^+ などの観測データと比較をすることで化学的な星周環境を調査することを目的とした研究となっている。図 4 は、 N_2H^+ と H^{13}CO^+ を比較したものであり、上の図は N_2H^+ の柱密度を、下の図は上の灰色で囲まれた範囲を拡大して H^{13}CO^+ の柱密度を示したものである。白い十字は 3.2mm 連続波のピークであり、この部分で原始星の成長が進んでいると考ええると、星の近傍にあったであろう N_2H^+ が H^{13}CO^+ の生成に使われたと考えることができる。よって、大質量星でも進化の過程で温度が上昇するに連れて $\text{N}_2\text{H}^+/\text{HCO}^+$ が減少すると考えられる。

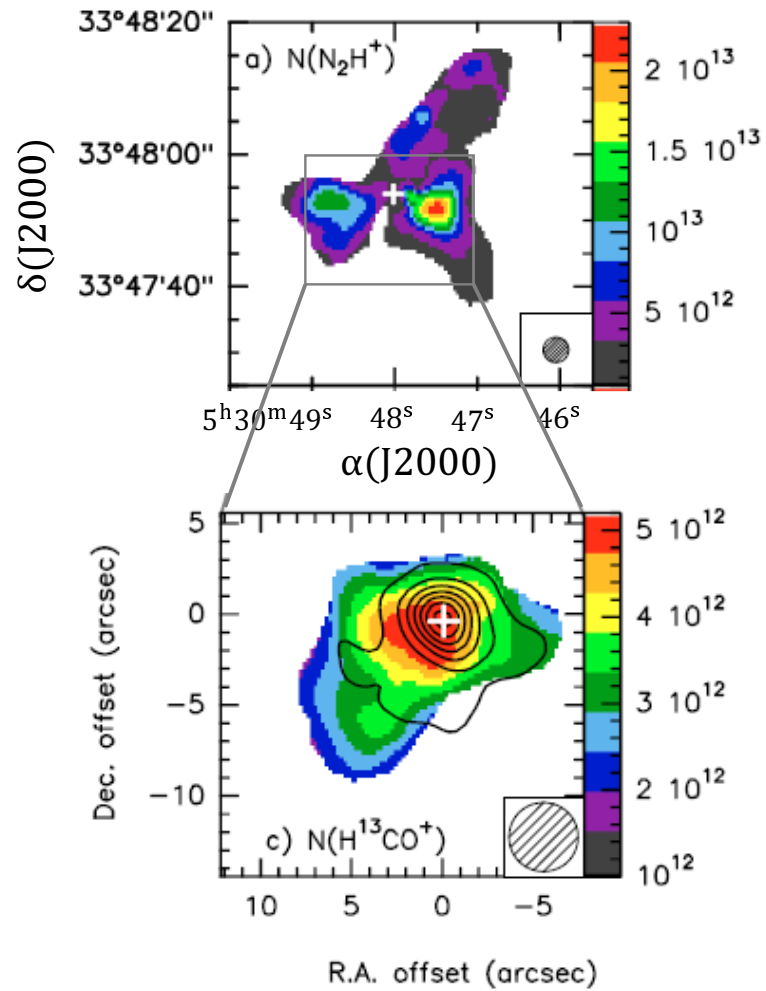


図 4 大質量星形成領域 AFGL5142(Busquet et al. 2011 を一部改訂)。3.2mm 連続波でコントアが引かれており、白い十字がそのピークである。上の図は N_2H^+ の柱密度で色分けされており、下の図は上の灰色で囲まれた範囲を拡大して $H^{13}CO^+$ の柱密度で色分けされている。十字部分で星の進化が進んでいると考え、星の近傍にあったであろう N_2H^+ が $H^{13}CO^+$ の生成に使われていると考えることができる。

1.4 研究目的

本研究では、メーザーの出現時期や存在期間を確立することで、それらが大質量星の年齢の指標とすることを目的として、茨城県日立市に位置する日立 32m 電波望遠鏡を用いて 6.7GHz クラスII メタノールメーザーの観測を行い、その出現時期を調査した。このために、観測対象は天体の時間

変化や状態変化の過程を追えるサンプルでなくてはならないと判断したため、前述した N_2H^+ と HCO^+ の関係に注目をした。この二つの分子が観測されている天体に対してメーザーの探査を行い、メーザーの付随率を比較をすることでその出現時期を制限することが可能となる。また、今回観測対象とした天体 (2.1 節で詳細に記述) に対しては、6.7GHz クラスⅡメタノールメーザーの他に 22GHz 水メーザーと 44GHz クラスⅠメタノールメーザーの探査が共同研究者により並行して行われている。それらのメーザーの出現時期の調査も行うことで、未だ不明な点が多い大質量星形成過程のタイムスケールの解明に貢献できると期待される。

2 観測

2.1 観測天体の選出

2.1.1 BGPS ダストコア

N_2H^+ と HCO^+ の関係を適用させて天体の年齢を調査するためには星形成の初期の段階を観測する必要があるため、ダストコアを対象として観測を行った。観測に使用したダストコアのカatalogは BGPS(Bolocam Galactic Plane Survey) データベース (Rosolowsky et al. 2010) である。こちらの研究は、ハワイのカリフォルニア工科大学サブミリ波天文台 (CSO) で波長 1.1mm でのダスト連続波を用いて行われた銀河面サーベイである。観測領域は銀経が $-10^\circ \leq l \leq 194^\circ$ 、銀緯が $|b| \leq 0.5^\circ$ であり、この観測で検出された 8358 のダストコアがカタログ化されている。BGPS ダストコア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 N_2H^+ または HCO^+ が検出された。

2.1.2 選出方法

本研究では、Shirley et al.(2013) によって N_2H^+ または HCO^+ が検出された BGPS ダストコアについて、それらの分子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。ここで強度とは、メインビーム輝度温度 T_{mb} を視線速度で積分した積分強度 I を表している。

- (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

付録 A に観測した天体のリストをまとめている。

2.2 観測諸元

本研究では茨城県日立市に位置する日立 32m 電波望遠鏡を用いて、296 天体に対して 6.7GHz クラスIIメタノールメーザーの観測を行った。観測は 2014 年 11 月 3 日から 2015 年 5 月 27 日にかけて 8 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)	$\sim 0.3\text{Jy}$

観測はポジションスイッチング法を用いて行った。1 天体につき on 点 off 点 (off 点は赤経方向に $+60\text{arcmin}$ または -60arcmin 離れた点) 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、さらに R-off で割り、R の温度 ($\sim 300\text{K}$) をかけた後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 $5\sigma \sim 1.5\text{Jy}$ 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 (1σ) の除算を行った。それにより得られた値が 5σ 以上の場合はメ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、Breen et al.(2015) や Green et al.(2010) 等でまとめられている既知のメーザー源^{*1}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。

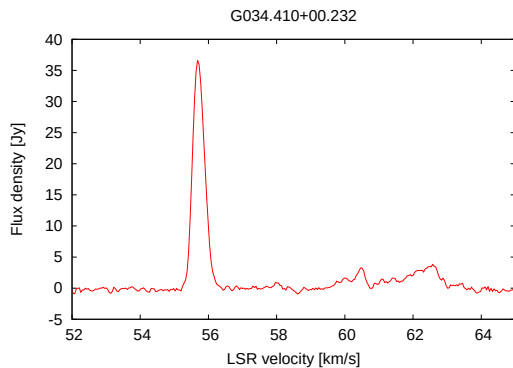


図 5 検出 (5σ 以上) の例。速度成分 55.7km/s 付近のピークは約 131.8σ である。

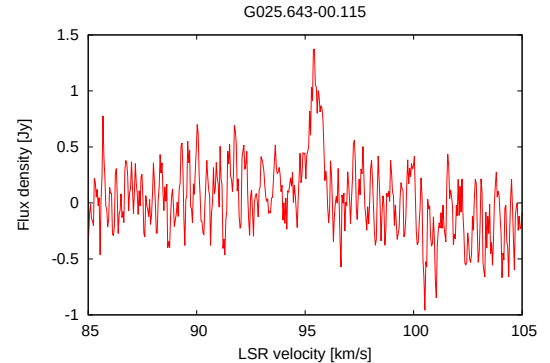


図 6 マージナルディテクション ($3-5\sigma$) の例。速度成分 95.4km/s 付近のピークは約 4.4σ である。

^{*1} 使用した論文は Breen et al.(2015)、Caswell et al. (2010)、Cyganowski et al. (2009)、Green et al. (2010)、Green et al. (2012)、Pandian et al. (2011)、Xu et al. (2009)

スペクトルを検出した領域で過去に観測例がない天体は 9 点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アンテナのビームサイズ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メ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、マージナルなメーザー放射及びマージナルで新検出と思われるメーザー放射は 5 分間積分を複数回数行うことで感度を向上させ、メーザー放射の有無の確認を行った。マージナルなメ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。

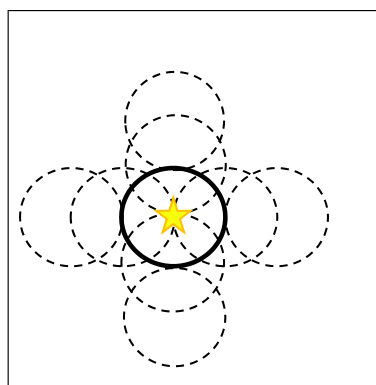


図 7 9 点法イメージ図。 中心の星マークは観測天体。実線が on 点を向けた時の日立アンテナのビームサイズで、点線が赤経赤緯方向にオフセットを入れたビームサイズである。日立アンテナのビームサイズの半値半幅が 2.3 分角なので、観測天体を中心に赤経赤緯方向に ± 2.3 、 ± 4.6 分角ずつのオフセットを入れた 9 点の観測を行う。

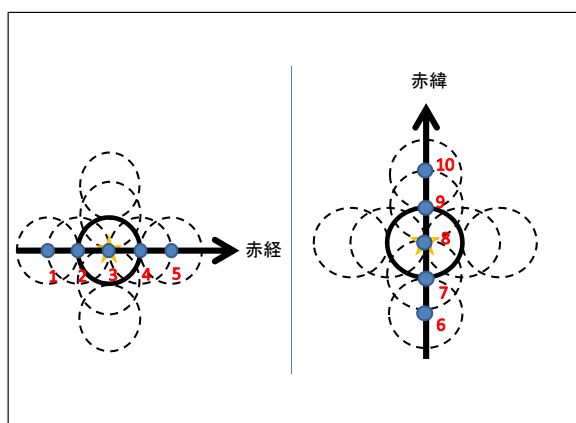


図 8 9 点法イメージ図その 2。 実際に 9 点法を行うときには、このように中心点の観測を 2 回行い、かつ各点の off 点の観測も行うため、10(点) $\times$ 2(on,off) の 20 ポイントで 1 セットの観測となる。

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 3 天体であった。以下に新検出と思われる 3 天体のスペクトルを記載する。その他の検出天体については、今回の観測で得られたスペクトルと既知のメーザー源のスペクトルとの比較を付録 B にまとめている。

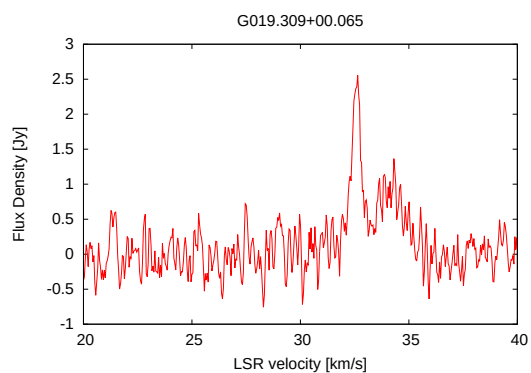


図 9 G019.309+00.065

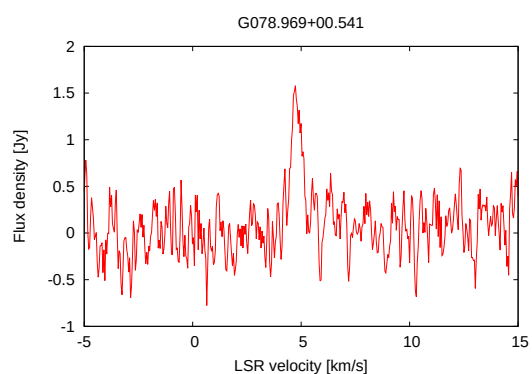


図 10 G078.969+00.541 5σ は超えているが 1.5Jy を超えていないため、複数回積分も実施している。

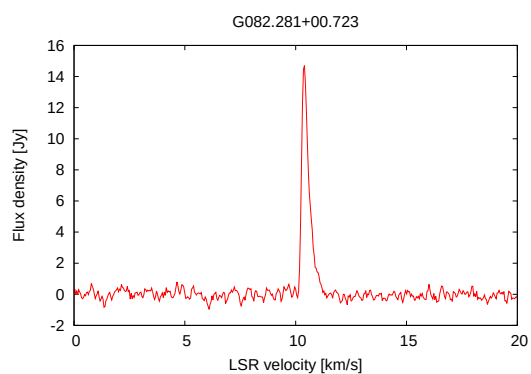


図 11 G082.281+00.723

3.2 追観測結果

3.2.1 複数回観測結果

マージナルディテクションであった G010.150-00.408、G022.836-00.438、G024.676-00.151、G025.643-00.115、G028.321-00.012、G078.969+00.541 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。複数回観測によって得られた結果では、G010.150-00.408 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。

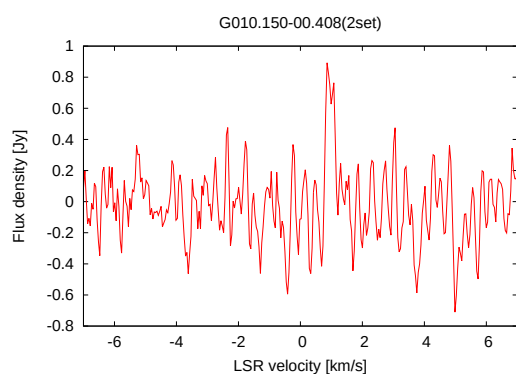


図 12 G010.150-00.408 の追観測 2 回の平均。
ピークは 4.0σ であったため検出数としてカウントしていない。

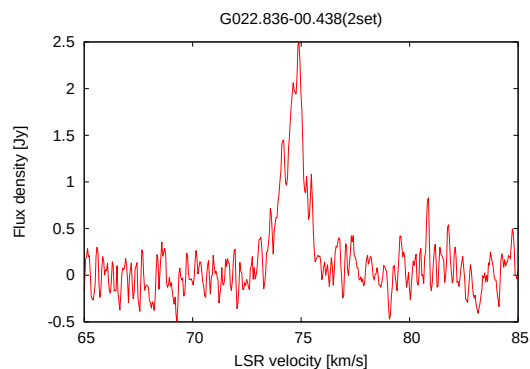


図 13 G022.836-00.438 の追観測 2 回の平均

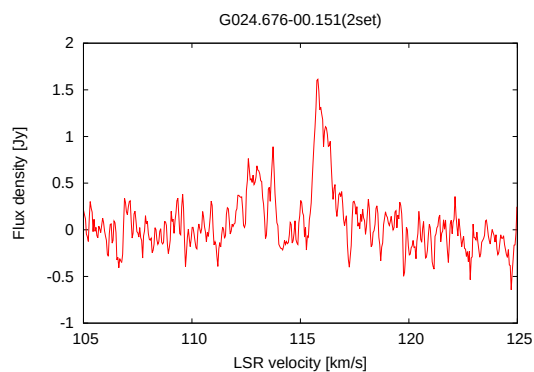


図 14 G024.676-00.151 の追観測 2 回の平均

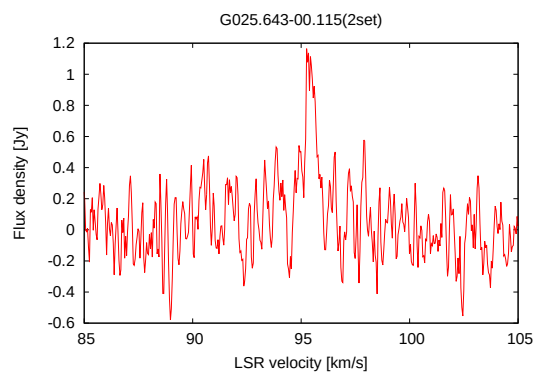


図 15 G025.643-00.115 の追観測 2 回の平均.

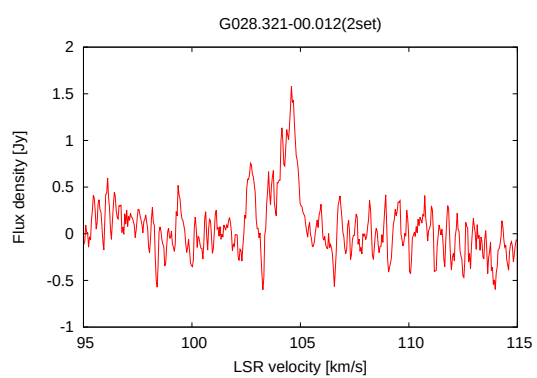


図 16 G028.321-00.012 の追観測 2 回の平均

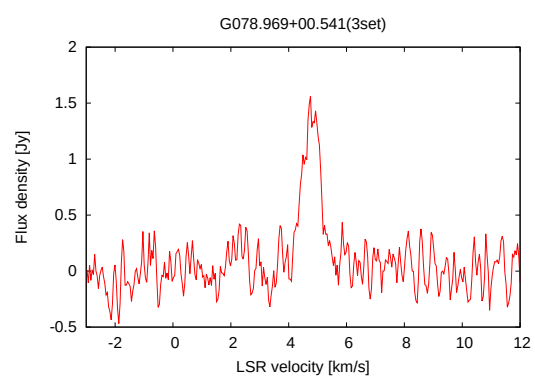


図 17 G078.969+00.541 の追観測 3 回の平均

3.2.2 9点法観測結果

新検出の可能性のある G019.309+00.065 については9点法を実施した。G019.309+00.065 の9点法の結果は図18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。

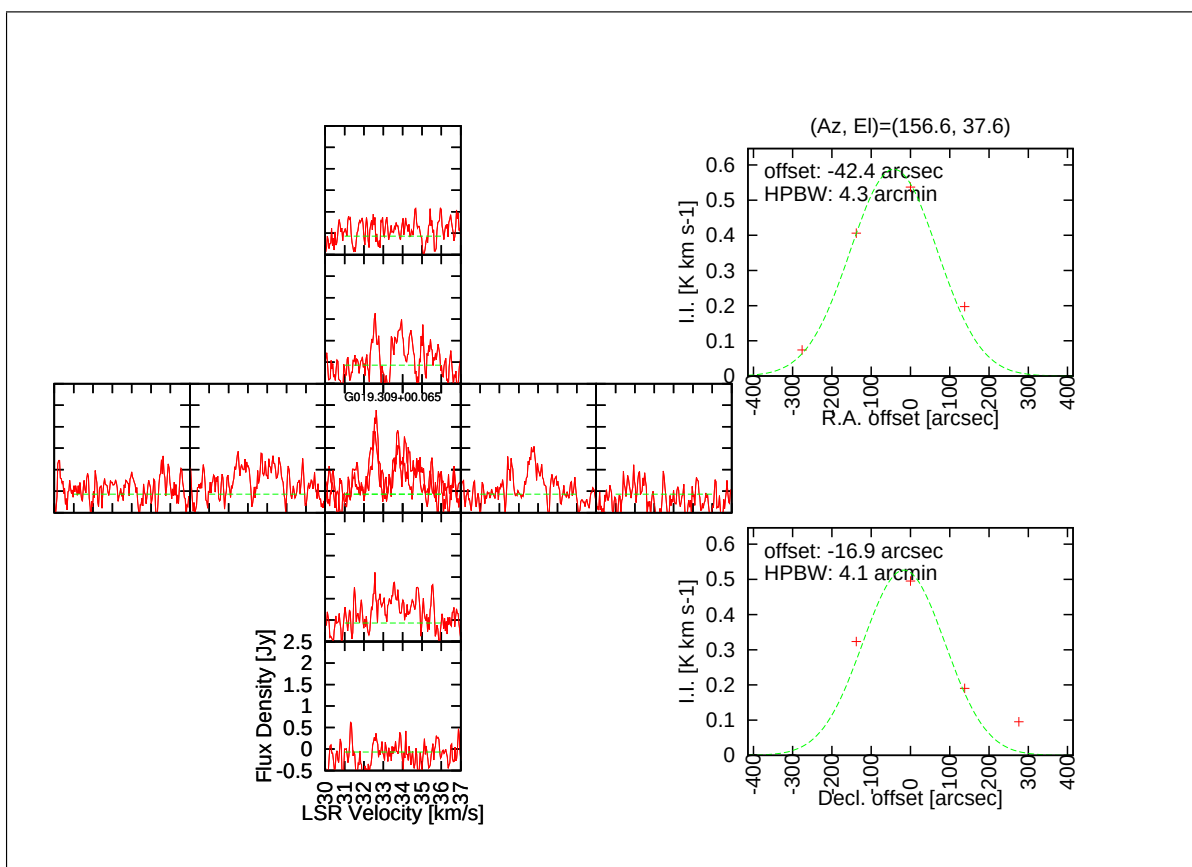


図18 G019.309+00.065 の9点法結果。中心にメーザーが付随している場合、スペクトルのピーク値は同心円状に等しくなる

表 1 カテゴリー別の付随率

天体区分	観測天体数	検出数	付随数	付随率
(a) N_2H^+ のみ検出	36	14	5	14%
(b) $I(\text{N}_2\text{H}^+)/I(\text{HCO}^+) > 1$	55	19	12	22%
(c) $I(\text{N}_2\text{H}^+)/I(\text{HCO}^+) \leq 1$	151	19	10	7%
(d) HCO^+ のみ検出	54	1	1	2%

4 考察

4.1 強度比と付随率

今回の観測でメタノールメーザーが検出された 53 天体のうち新検出を除いた 50 天体については、その天体にメーザー源が付随しているかを調査した。2.2 節で述べた既知のメーザー源は 1 秒角よりも良い精度でその位置が求められているため、高い精度で位置の比較を行うことができる。BGPS 観測に使用された Bolocam のビームサイズが 0.5 分角であるため、位置比較を行った際に天体とメーザー源との離角が 0.5 分角以内であればそのダストコアにメタノールメーザーが付随しているとみなした。その結果、50 天体中 28 天体にメタノールメーザーが付随していた。この結果を基に、 $\text{N}_2\text{H}^+(3-2)(280\text{GHz})$ と $\text{HCO}^+(3-2)(268\text{GHz})$ 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 19 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付随率を算出したところ、表 1 の結果が得られた。 N_2H^+ と HCO^+ のどちらが卓越しているかの議論のために、強度比は 1 で区切りを入れている。今回観測した天体数には各カテゴリ間で偏りがあるため、各カテゴリ間の分布を比較する際には付随率を基に議論を行う。これらの結果から、 N_2H^+ が HCO^+ よりも卓越している天体に 6.7GHz メタノールメーザーが付随している割合が高いということが読み取れる。

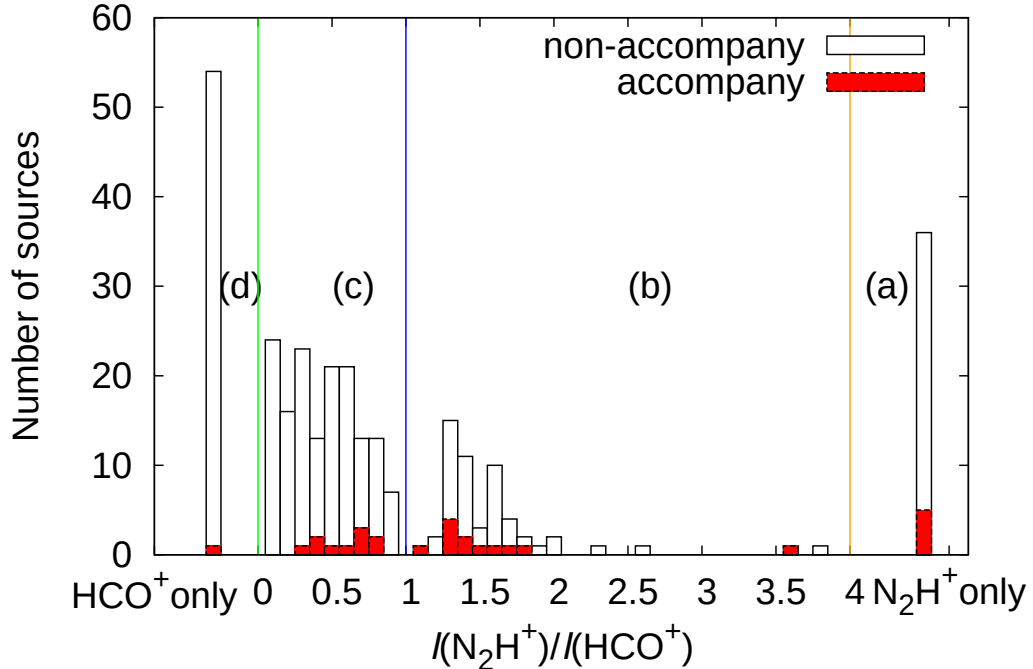


図 19 2 成分の強度比とメーザー付随の有無。 緑、橙の線が描かれている所はそれぞれ天体区分 (d),(a) の天体で、青線の左が区分 (c), 右側が区分 (b) の天体である。メーザーが付随しているとみなした天体は赤く色付けし、未付随の天体は無色でプロットしている。

1.3.1 節で述べた N_2H^+ と HCO^+ の関係にこの結果を当てはめると、6.7GHz メタノールメーザーは CO 分子がダストに凍り付いて付着しているような非常に低温の星形成の初期段階から出現し、進化の過程で温度が上がると N_2H^+ が枯渇していくのに合わせて消滅していくと考えることができる。しかし、星形成が始まるよりもはるかに前の広がった分子雲を見ていた場合、最初に CO 分子がガスとして存在しているために HCO^+ も存在していることになる。つまり、 HCO^+ が卓越している状態は、星形成が進んだ後期の状態と星形成が始まるよりもはるかに前の状態の二つの可能性があると考えられる。これらの切り分けも含めたより細かな進化段階の制限のために、以下の節では (1) N_2H^+ と HCO^+ の二つの分子のライン幅 (2)24 μm 赤外線のマッピング の二つの方法で検証をしていく。

4.2 ライン幅との比較

星形成の初期段階は乱流が緩和していないためライン幅が大きく、周囲から原始星への質量降着が進むにつれてライン幅が小さくなっていくと推測することができる。よって、 N_2H^+ と HCO^+ のライン幅に注目することで、星形成の初期段階と後期段階の切り分けが可能になると期待される。特に HCO^+ は進化前と進化の後期段階の二つで卓越している可能性があるた

め、 HCO^+ のみ検出したダストコアのライン幅のヒストグラムを作成し、その分散速度が低速側と高速側に二分されるような結果が得られれば、ダストコアの進化段階に制限をかけることが可能となる。そこで、今回観測したダストコアの中で Shirley et al. (2013) によってこれらの分子のライン幅が測定されていた天体について、実際にヒストグラムを作成した。図 20 は HCO^+ について、図 21 は N_2H^+ についてそれぞれ 0.5km/s ごとに区切り、2.1.2 節のカテゴリごとに色を分けている。また、図 22 は HCO^+ のみが検出されている区分 (d) についてのみ抜き出し、0.2km/s ごとに区切りを入れた図となっている。こちらには平均ライン幅と標準偏差 1σ 、 2σ で線を入れている。この図から、区分 (d) のほぼすべての天体が平均値から $\pm 2\sigma$ 以内にあり、 2σ を超えた天体は 1 天体のみであった。この結果から、予測したように区分 (d) の速度が二分されていると考えるには高速側のサンプルが足りず、ライン幅から HCO^+ のみが検出されている区分 (d) の進化段階の切り分けをすることは困難であることがわかった。また、区分 (b) と区分 (c) の両方の分子輝線のライン幅が測定されている天体についてはそれぞれの分子のライン幅の比較も行った。それが図 23 と図 24 である。区分 (b)、区分 (c) のメーザーの付随、未付随でそれぞれプロットし、フィッティングをしている。この結果から、両方の分子が検出されている天体については、同一の天体からのそれぞれの分散速度に大きな違いは見られず、 N_2H^+ が卓越している天体の方が分散速度が速いということがわかり、進化に伴ってライン幅が減少するという仮定が正しいならば、進化段階の初期では N_2H^+ が卓越しているということが確認できる。メタノールメーザーの付随の有無については、(c) については有意な差が見受けられないが、(b) についてはメーザーが付随していると N_2H^+ よりも HCO^+ のライン幅が大きくなる傾向が見られる。 N_2H^+ は HCO^+ よりも高密度のトレーサーであるため、 N_2H^+ の方が励起星に近い場所で放射していると考えられる。よって単純なケプラー回転を仮定すると、より内側で放射をしているであろう N_2H^+ の方が回転速度が大きくなりライン幅も広がると考えられるのだが、それに反した結果が得られた。一つの可能性としては星形成に伴うアウトフロー現象を HCO^+ はとらえているためにライン幅が大きくなっているのかもしれない。今後はアウトフローの有無について調べる必要がある。

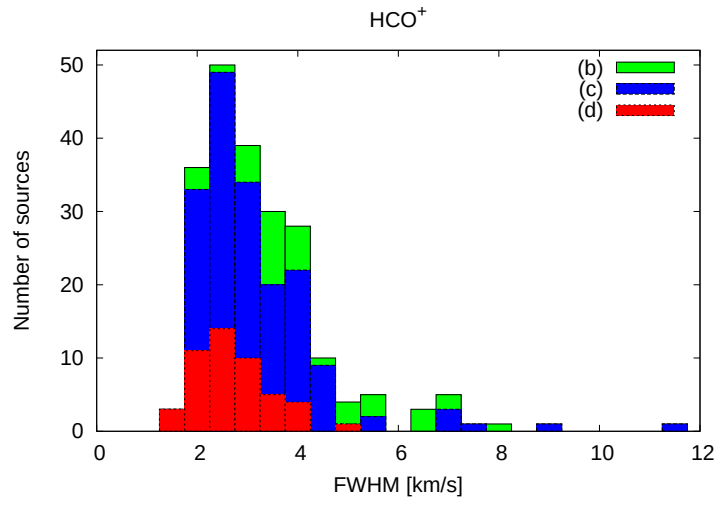


図 20 各カテゴリーごとの HCO^+ のライン幅。横軸は半値全幅 (FWHM) で、縦軸は天体数である。横軸は 0.5km/s ごとに区切っている。天体区分 (b)、(c)、(d) をそれぞれ緑、青、赤で色分けしている。

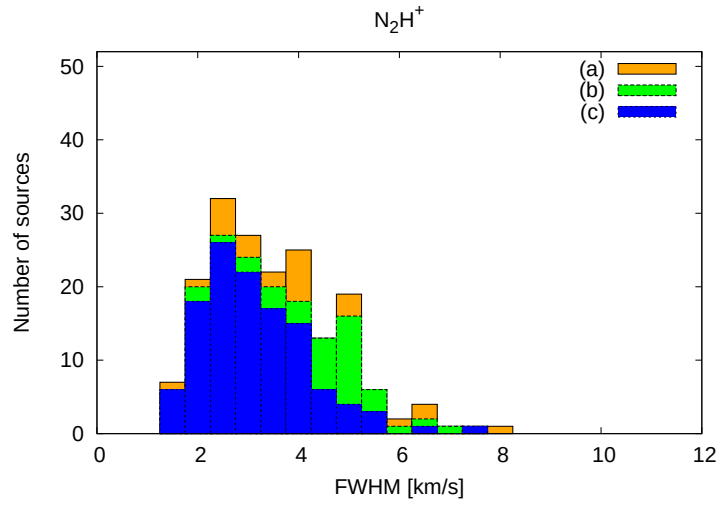


図 21 各カテゴリーごとの N_2H^+ のライン幅。横軸は半値全幅 (FWHM) で、縦軸は天体数である。横軸は 0.5km/s ごとに区切っている。天体区分 (a)、(b)、(c) をそれぞれオレンジ、緑、青で色分けしている。

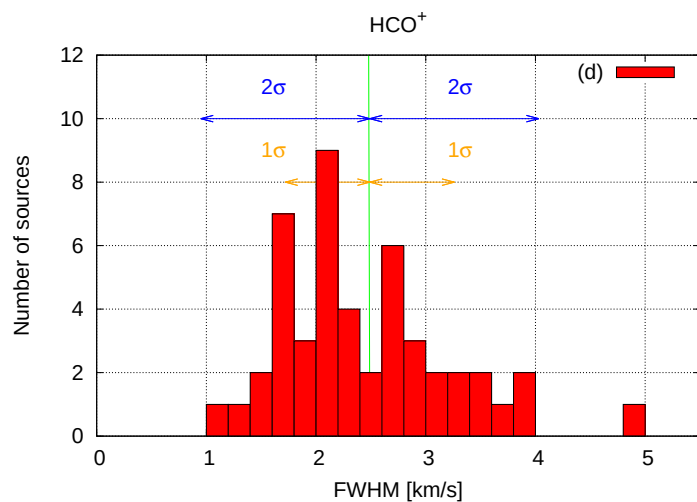


図 22 カテゴリー (d) の HCO^+ のライン幅。横軸は半値全幅 (FWHM) で、縦軸は天体数である。横軸は 0.2km/s ごとに区切っている。緑の線は平均値で 2.49km/s であり、標準偏差は $1\sigma = 0.77$ である。

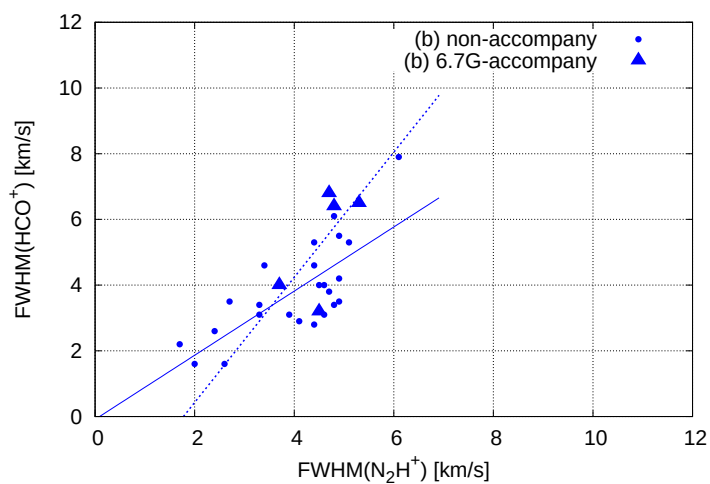


図 23 N_2H^+ と HCO^+ のライン幅の比較。両方の速度幅が測定されている天体の中で、 N_2H^+ の強度が HCO^+ の強度よりも強い天体 (天体区分 (b)) について、横軸を N_2H^+ の半値全幅、縦軸を HCO^+ の半値全幅でプロットしている。6.7GHz メタノールメーザーが付随していた天体を三角でプロットしている。メーザーが付随していた天体を青色の点線、未付随の天体を青色の実線でフィッティングしている。フィッティング関数はそれぞれ、 $1.9044x - 3.3803$ 、 $0.9759x - 0.0863$ である。

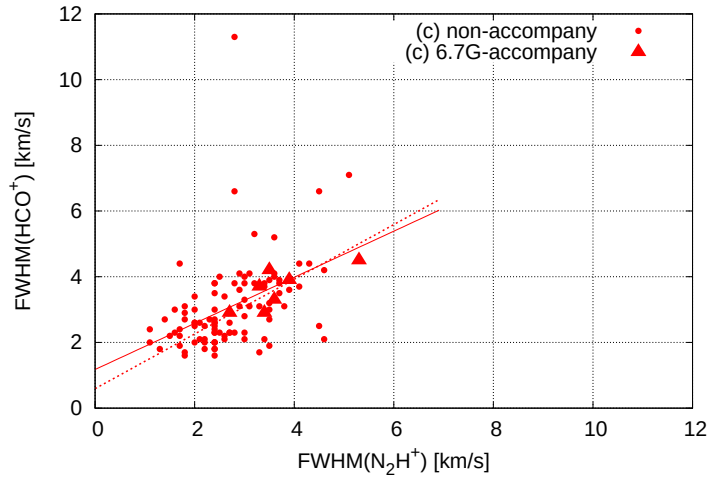


図 24 N_2H^+ と HCO^+ のライン幅の比較。 両方の速度幅が測定されている天体の中で、 HCO^+ の強度が N_2H^+ の強度よりも強い天体 (天体区分 (c)) について、横軸を N_2H^+ の半値全幅、縦軸を HCO^+ の半値全幅でプロットしている。6.7GHz メタノールメーザーが付随していた天体を三角でプロットしている。メーザーが付随していた天体を赤色の点線、未付随の天体を赤色の実線でフィッティングしている。フィッティング関数はそれぞれ、 $0.8325x + 0.5929$ 、 $0.7017x + 1.1765$ である。

4.3 赤外線のマップとの比較

赤外線のマップとダストコアとの比較を行うことで、定性的ではあるがダストコアの進化段階に制限をかけることが期待される。Sakai et al. (2010) では MSX(Midcourse Space Experiment) という $8.28\mu\text{m}$ 波長の中赤外天文衛星観測装置で得られたデータをもとに、MSX で暗い天体を MSX dark、明るい天体を MSX source として、図 25 のように進化していくと考えている。これを複数の赤外線波長に対して行うことで、複数の波長で暗い状態 (低温でダストに埋もれた若い状態) から、短波長で暗く長波長で明るい状態 (ダストに埋もれているが輝き始めた状態)、複数の波長で明るい状態 (周囲のダストが晴れ上がった状態) へと進化が進むと考えられる。

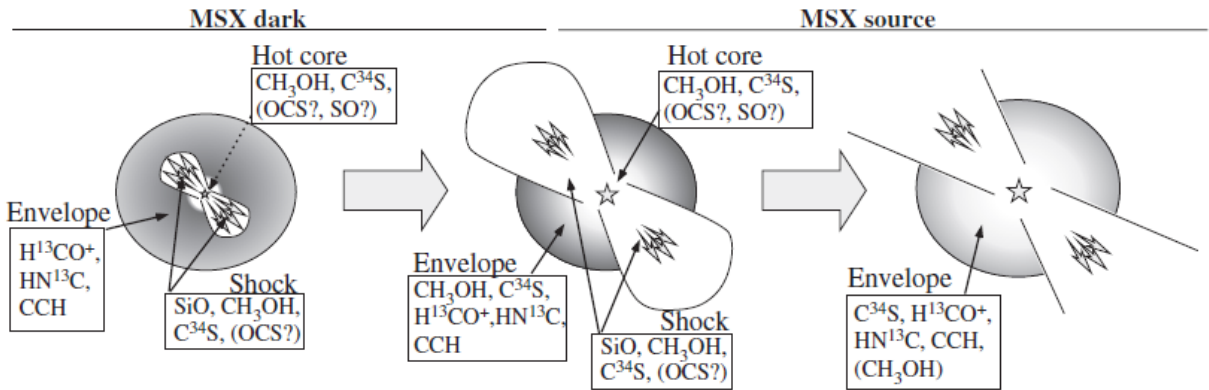


図 25 赤外線の名暗と天体の進化段階 (Sakai et al. 2010 より引用)。

本研究では、まず $24\mu\text{m}$ の赤外線データを用いて、ダストコアのマップ上での明るさを調査した。使用したカタログは MIPS GAL である。MIPS GAL は Carey et al. (2009) によってカタログ化されており、 $24\mu\text{m}$ の分解能が 6 秒角と、非常に高分解能な観測を達成している。観測範囲は銀経が $5^\circ \leq l \leq 63^\circ$ 、 $298^\circ \leq l \leq 355^\circ$ で、銀緯が $|b| \leq 1^\circ$ (一部では $|b| \leq 3^\circ$) である。そのため、今回は我々が観測した BGPS 天体でこの範囲に該当する 115 天体についてのみ比較を行った。比較の図の詳細は付録 C に記載する。BGPS ダストコアの座標から 0.5 分角以内に点源などがある状態をダストコアが明るい状態とし、メタノールメーザーが付随しているかどうかでさらに分類をしたところ、下の表の結果が得られた。ここで判別不可能としたものは、W31 や W43 等の分子雲複合体とダストコアの座標が重なっており、ダストコア周辺の真の情報得難くなっていたものである。これらの結果から、6.7GHz メタノールメーザーが付随している天体はそのほとんどが波長 $24\mu\text{m}$ では点源などが見えて明るい状態となっていることが分かった。

表 2 24 μm マップ上での明暗

6.7G メーザー	明るい	暗い	判別不可能
付随	13	0	8
未付随	35+ 新検出 1	28	30
計	49	28	38

4.4 今後の展望

今後の展望として、8 μm の赤外線源のカタログを用いて同様の行程を行い、8 μm と 24 μm の二つの波長での比較が有意義であろう。8 μm で暗くフィラメンタリーな形状の分子雲は Infrared Dark Clouds(IRDCs) と呼ばれる。IRDCs は低温で高密度な分子雲であり、大質量星の形成初期を示す兆候であるため、定性的ではあるがメタノールメーザーの出現時期の調査のための良いプローブとなり得る。さらに、赤外線源の明暗とメーザーの有無、 N_2H^+ と HCO^+ の強度比の間にどのような関係があるかも調査すべきである。また、同じ BGS カタログの天体に対して共同研究者の砂田氏によって国立天文台 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の探査が並行して行われているため、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られる見込みである。

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教授には、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論文執筆の際や口頭発表時の細かな作法等、研究に携わるうえで必要となる様々なことについて熱心に御指導頂きました。大変感謝致しております。米倉覚則准教授には研究や観測等、研究を進めていく上での方針に関して大変多くのことをご指導いただき大変感謝しております。塚越崇助教にも、ゼミや発表練習の際など多くのことをご教授頂き誠にありがとうございました。研究員の杉山孝一郎様、齋藤悠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。いつも明るくまじめな研究室の皆様、いつも不真面目で不甲斐ない僕を支えていただき本当にありがとうございました。先輩方や後輩の皆様には日常の面でも学習の面でも様々な御協力を頂き大変感謝しております。同期の皆様はいつも支えあいながらも切磋琢磨し、僕を大きく成長させてくれました。感謝で胸がいっぱいです。本論文は皆様の支えなしには書き上げることはできませんでした。最後に、今まで自分を育て、ここまで支えてくれた家族には感謝で頭が上がりません。皆様に支えていただいたこの3年間、私は本当に幸せでした。本当にありがとうございました。

付録 A 観測天体リスト

本研究で観測した天体は以下の通りである。

表 3: 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
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

表 3: 観測した天体

天体名	RA(h m s)	Dec(d m s)
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
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

表 3: 観測した天体

天体名	RA(h m s)	Dec(d m s)
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
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

表 3: 観測した天体

天体名	RA(h m s)	Dec(d m s)
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
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

表 3: 観測した天体

天体名	RA(h m s)	Dec(d m s)
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
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

表 3: 観測した天体

天体名	RA(h m s)	Dec(d m s)
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
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

表 3: 観測した天体

天体名	RA(h m s)	Dec(d m s)
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
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

表 3: 観測した天体

天体名	RA(h m s)	Dec(d m s)
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
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

表 3: 観測した天体

天体名	RA(h m s)	Dec(d m s)
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

付録 B 検出天体及び既知のメーザー源とのスペクトル比較

2.2 節で記載した既知のメーザー源天体は、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。以下に記載する既知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。

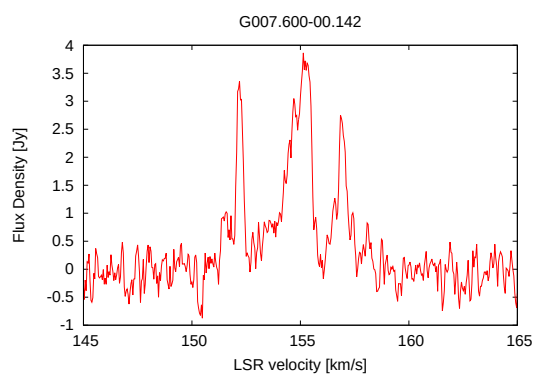


図 26 G007.600-00.142

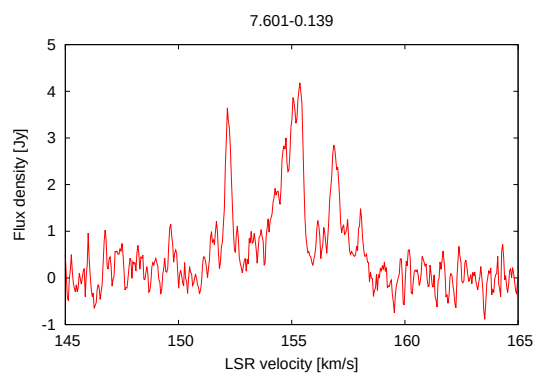


図 27 既知天体 G007.601-0.139. 離角は約 0.20 分角

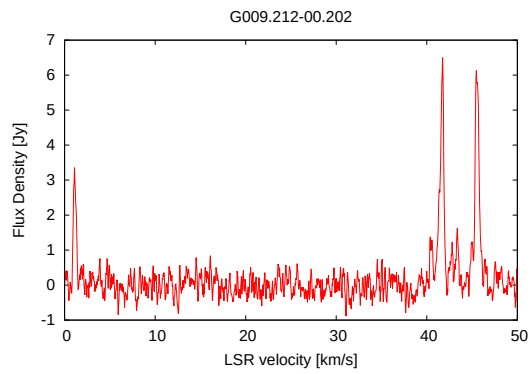


図 28 G009.212-00.202 40–50km/s 付近の成分は図 29 の天体から、0km/s 付近の成分は図 30 からと、それぞれ考えられる。

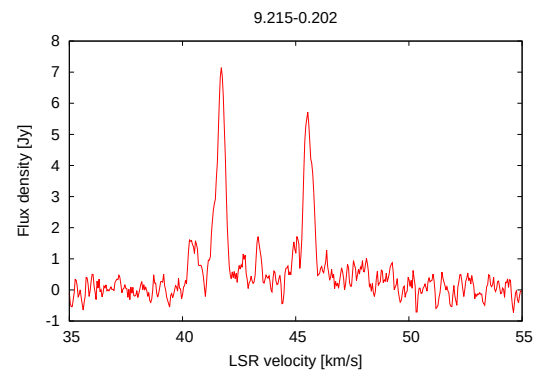


図 29 既知天体 G009.215-0.202. 離角は約 0.16 分角

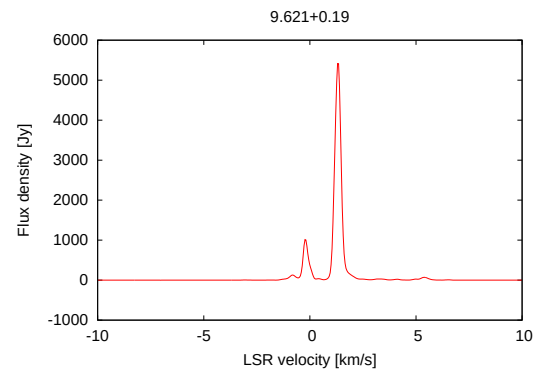


図 30 既知天体 G009.621+0.196. 離角は約 34 分角

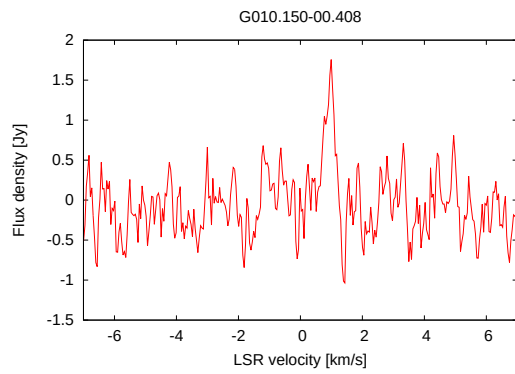


図 31 G010.150-00.408. 新検出の可能性有りだが、複数回積分を行っても 5σ を達成できなかった。

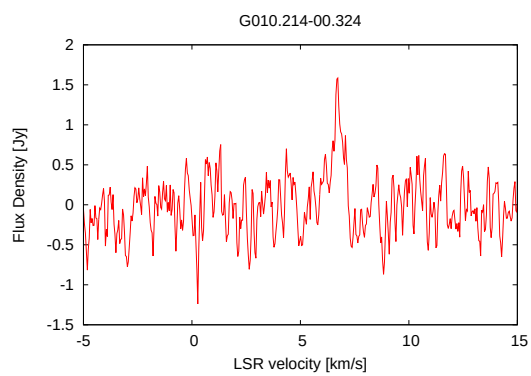


図 32 G010.214-00.324

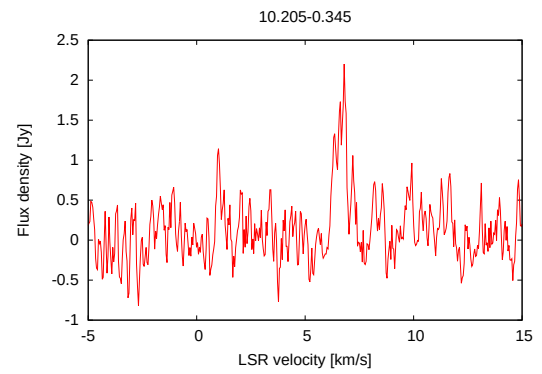


図 33 既知天体 G010.205-0.345. 離角は約 1.4 分角

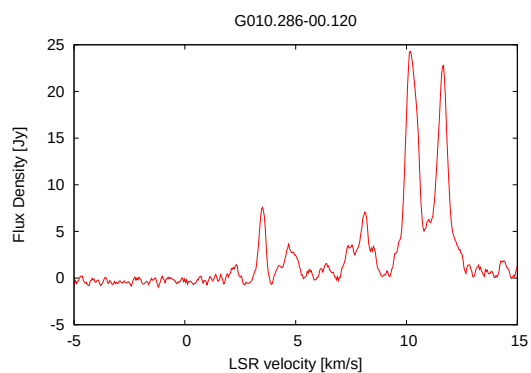


図 34 G010.286-00.120

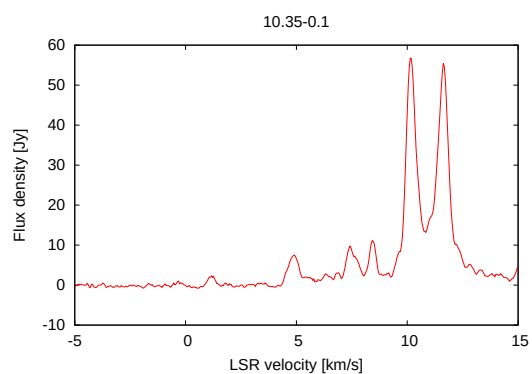


図 35 既知天体 G010.356-0.148. 離角は約 4.7 分角

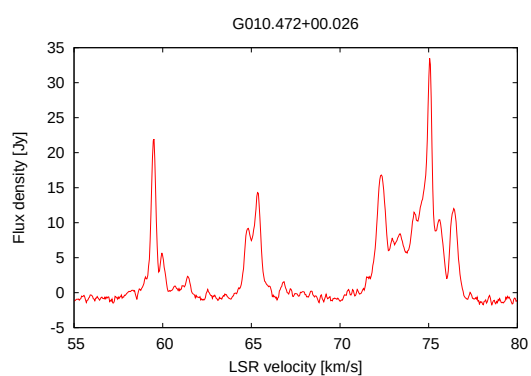


図 36 G010.472+00.026

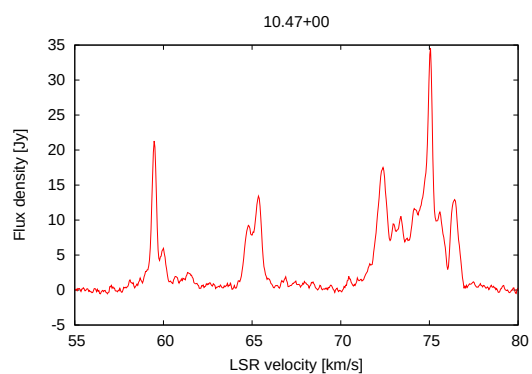


図 37 既知天体 G010.472+0.027. 離角は約 0.08 分角

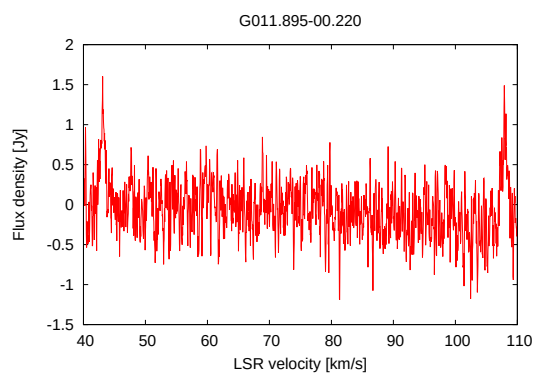


図 38 G011.895-00.220

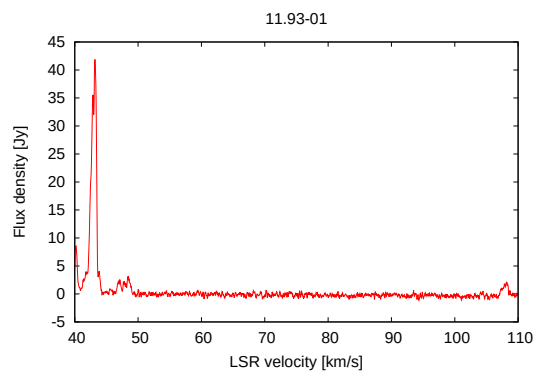


図 39 既知天体 G011.936-0.150. 離角は約 4.9 分角

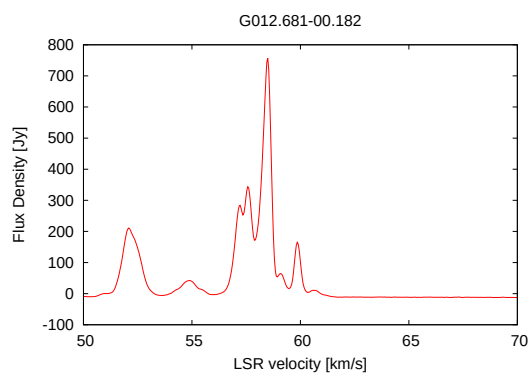


図 40 G012.681-00.182

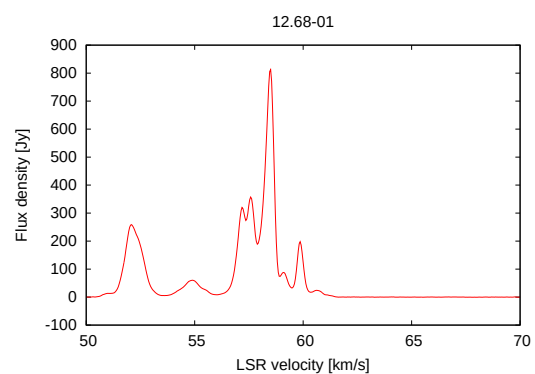


図 41 既知天体 G012.681-0.182. 離角は約 0.16 分角

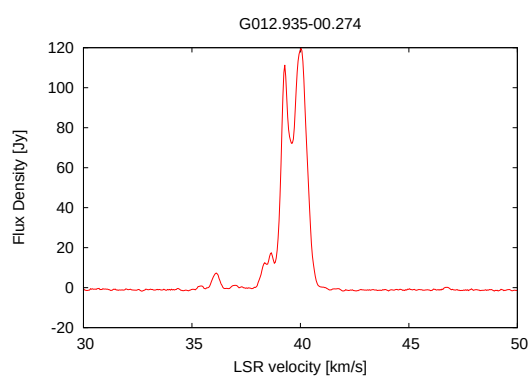


図 42 G012.935-00.274

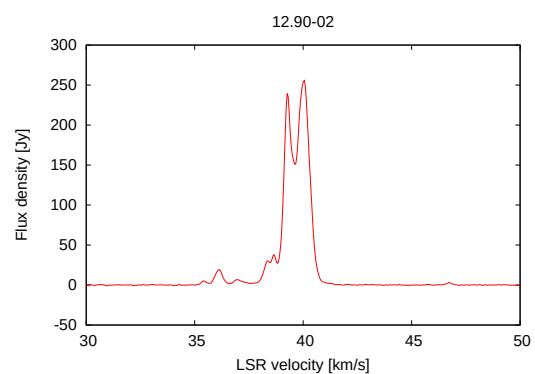


図 43 既知天体 G012.909-0.260. 離角は約 1.8 分角

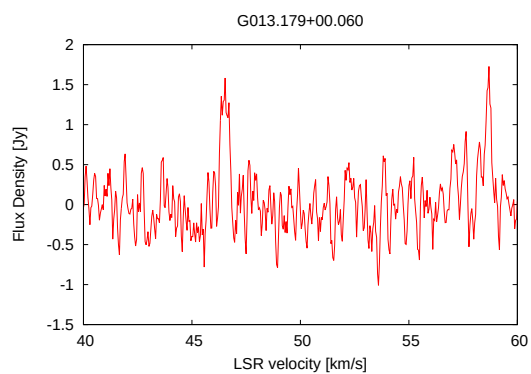


図 44 G013.179+00.060

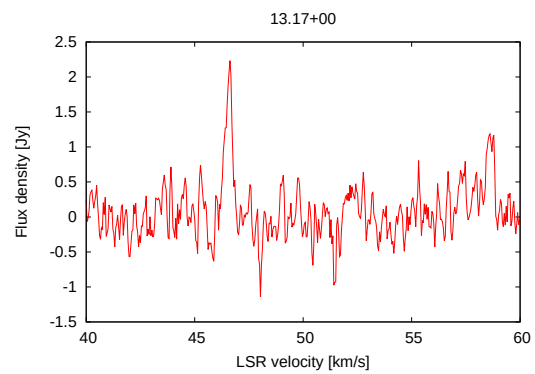


図 45 既知天体 G013.179+00.060. 離角は約 0.02 分角

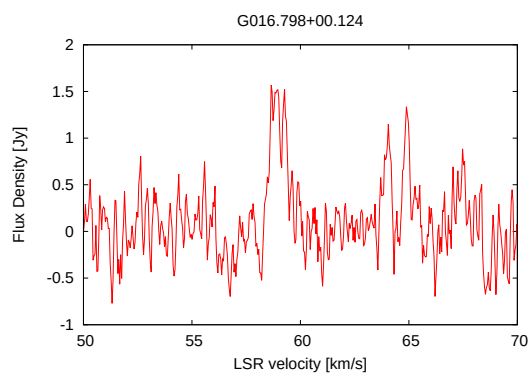


図 46 G016.798+00.124

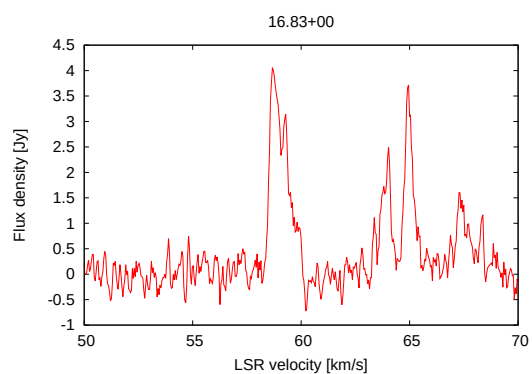


図 47 既知天体 G016.831+0.079. 離角は約 3.2 分角

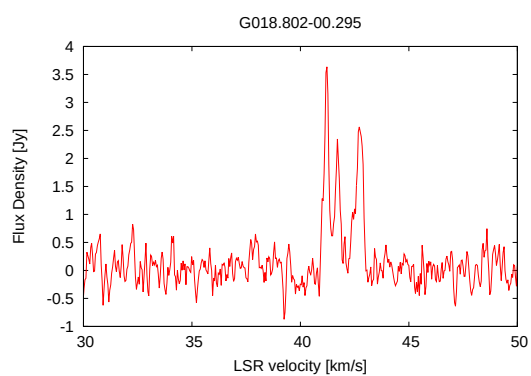


図 48 G018.802-00.295

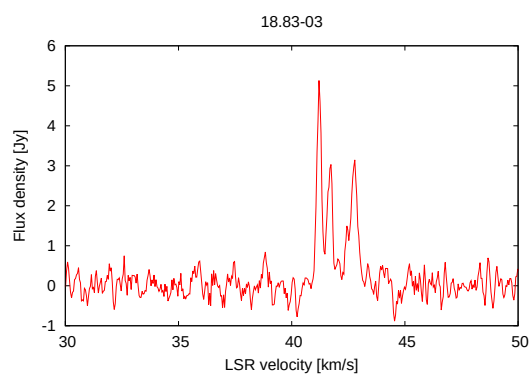


図 49 既知天体 G018.834-0.300. 離角は約 1.9 分角

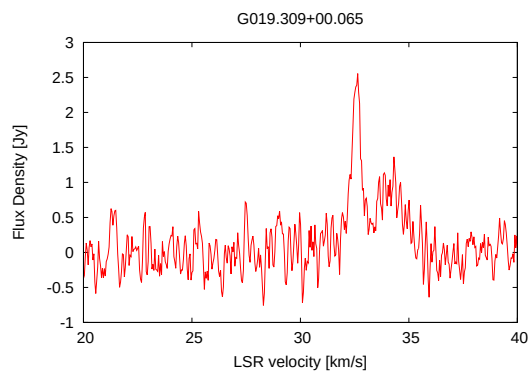


図 50 G019.309+00.065 新検出の可能性有り

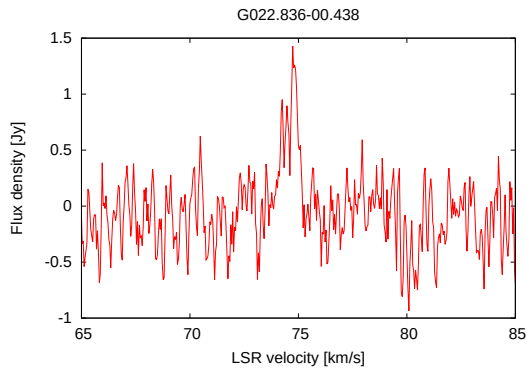


図 51 G022.836-00.438

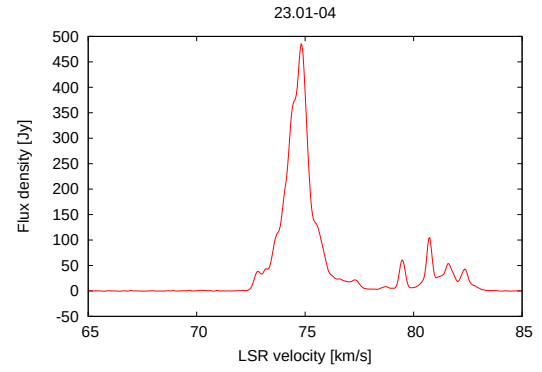


図 52 既知天体 G023.01-0.41. 離角は約 11 分角

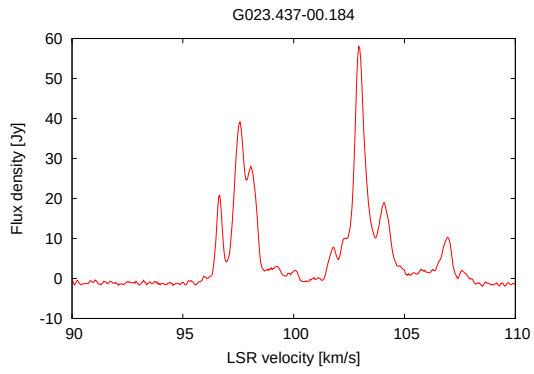


図 53 G023.437-00.184

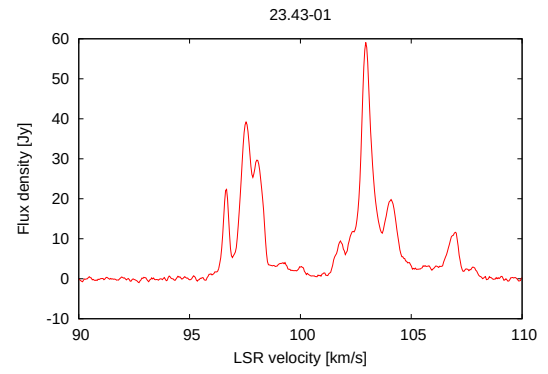


図 54 既知天体 G023.43-0.18. 離角は約 0.12 分角

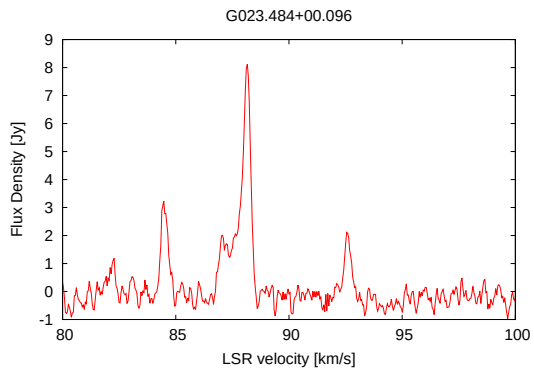


図 55 G023.484+00.096

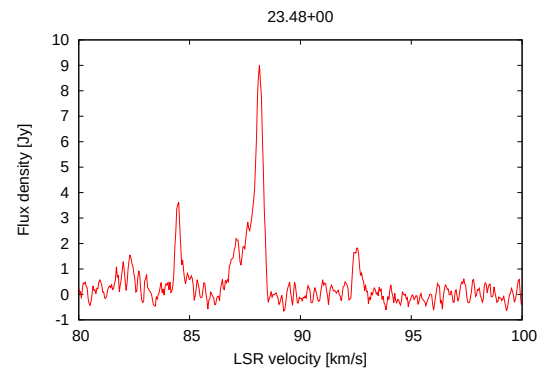


図 56 既知天体 G023.48+0.08. 離角は約 0.06 分角

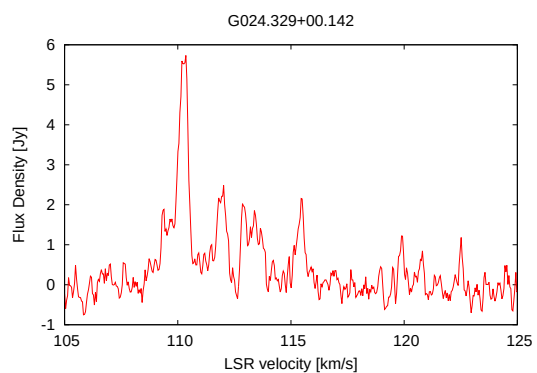


図 57 G024.329+00.142

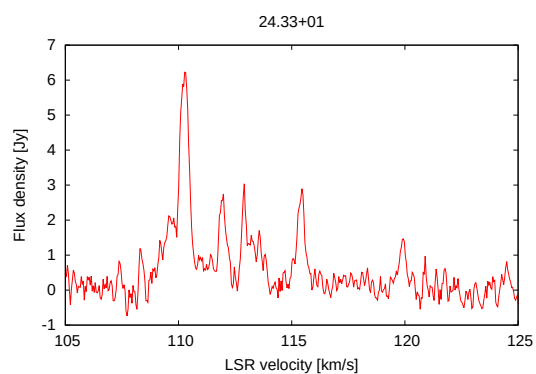


図 58 既知天体 G024.33+0.14. 離角は約 0.06 分角

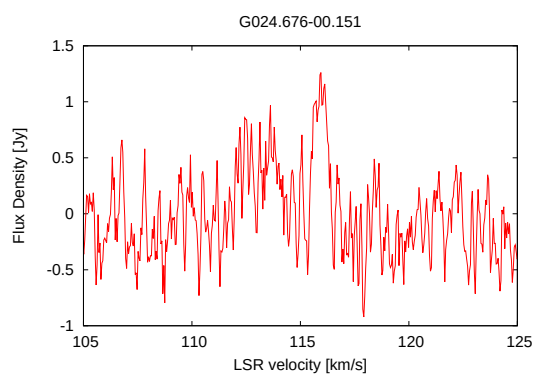


図 59 G024.676-00.151 マージナルディテクション

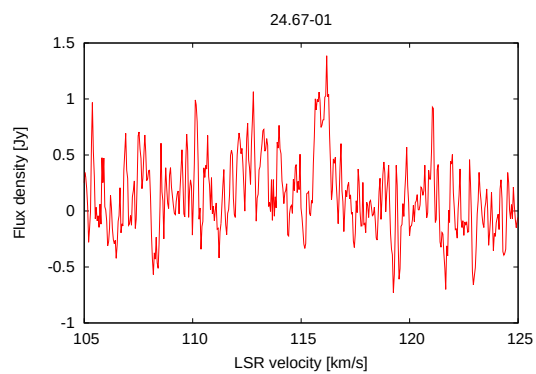


図 60 既知天体 G024.67-0.14. 離角は約 0.54 分角

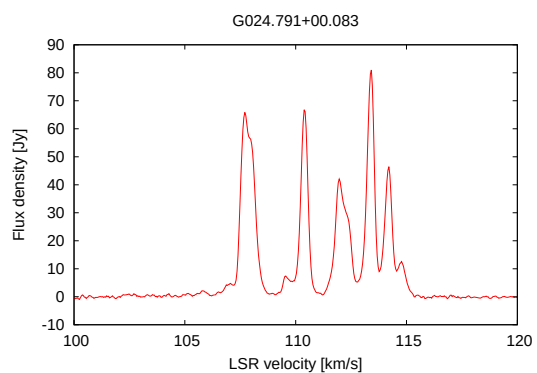


図 61 G024.791+00.083

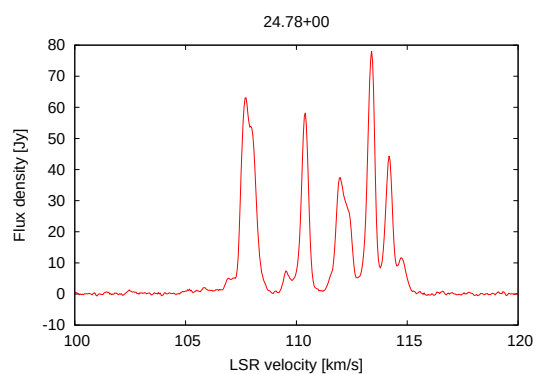


図 62 既知天体 G024.78+0.08. 離角は約 0.09 分角

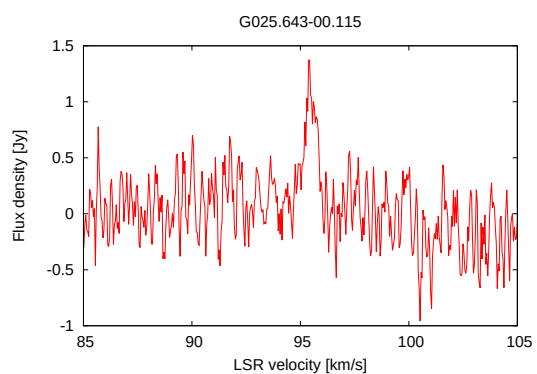


図 63 G025.643-00.115 マージナルディテクション

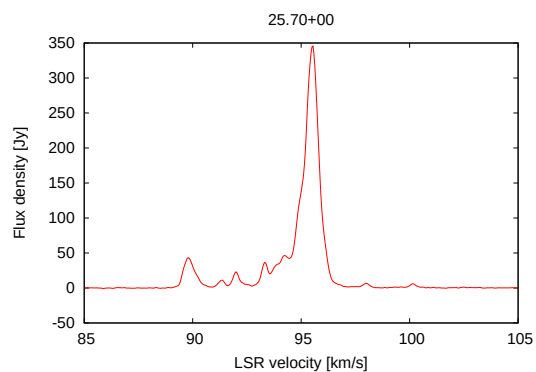


図 64 既知天体 G025.70+0.04. 離角は約 11 分角

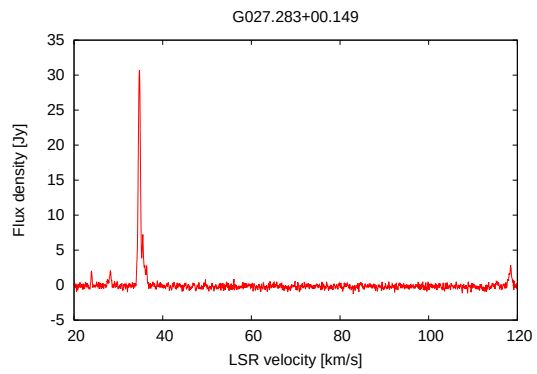


図 65 G027.283+00.149 120km/s 付近の成分は図 66 の天体から、20–40km/s 付近の成分は図 67 からと、それぞれ考えられる。

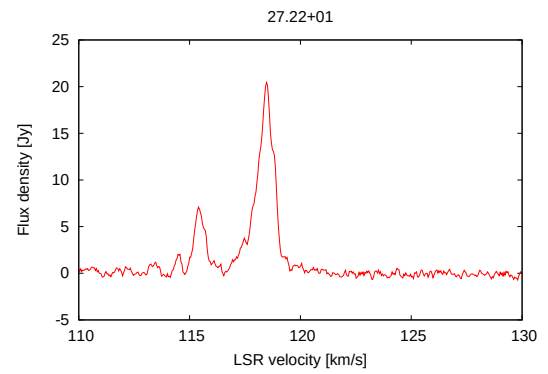


図 66 既知天体 G027.22+0.13. 離角は約 3.7 分角

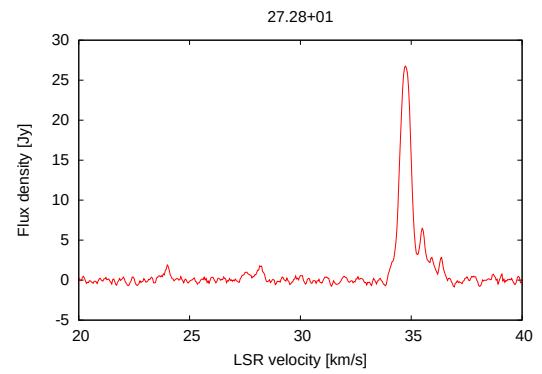


図 67 既知天体 G027.28+0.15. 離角は約 0.23 分角

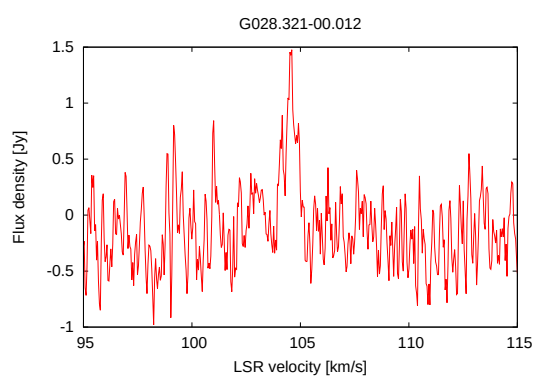


図 68 G028.321-00.012 マージナルディテクション

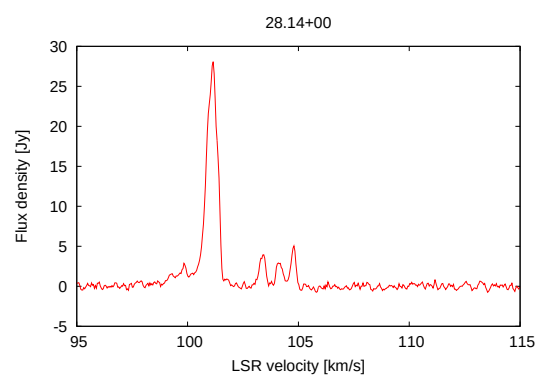


図 69 既知天体 G028.14+0.00. 離角は約 10 分角

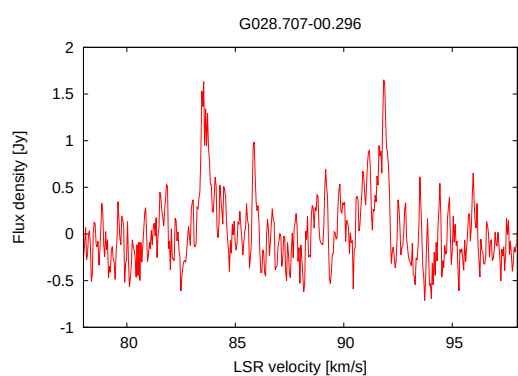


図 70 G028.707-00.296

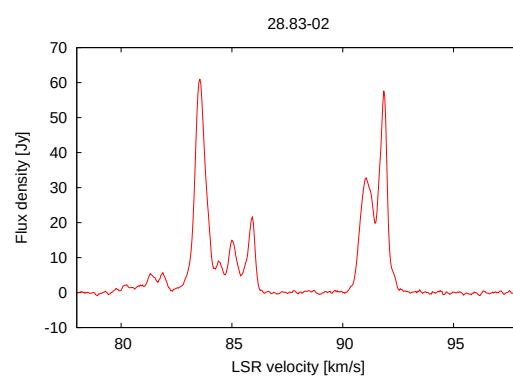


図 71 既知天体 G028.83-0.25. 離角は約 7.9 分角

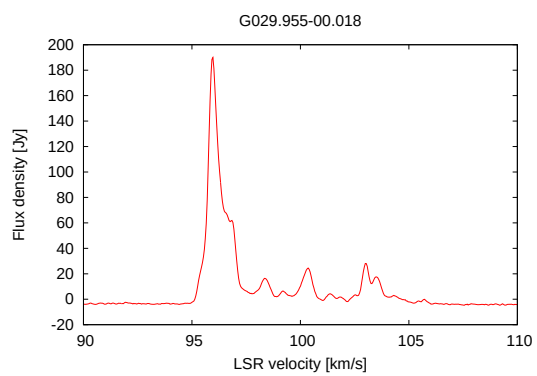


図 72 G029.955-00.018

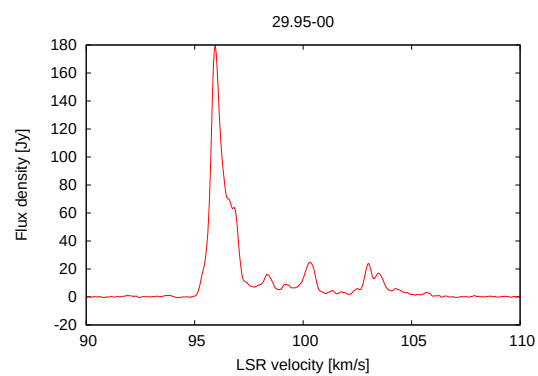


図 73 既知天体 G029.95-0.02. 離角は約 0.10 分角

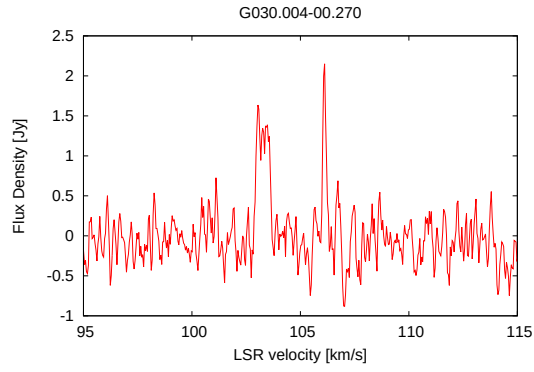


図 74 G030.004-00.270

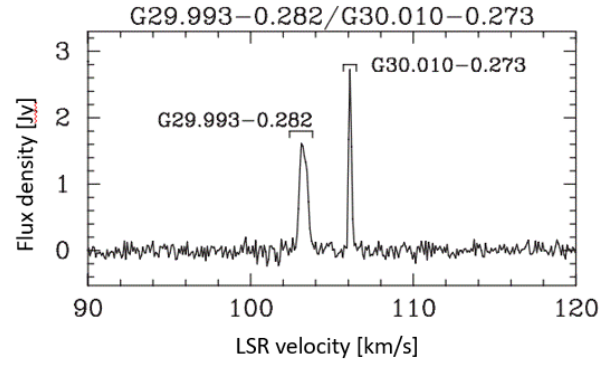


図 75 既知天体 G029.993-0.282/G030.010-0.273(Breen et al. 2015)。この観測を行った 2014 年より後に新検出された天体であるため、こちらのデータのみ Breen et al. (2015) から引用している。G029.993 との離角は約 1.0 分角で、G030.010 との離角は約 0.24 分角

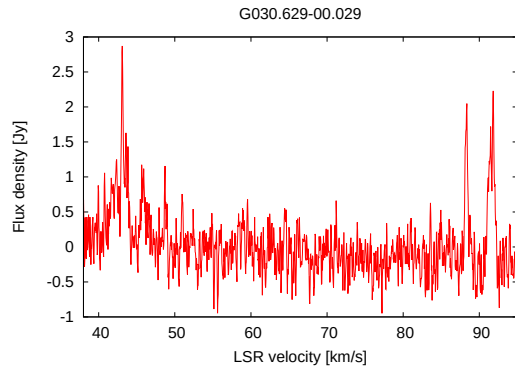


図 76 G030.629-00.029 40–50km/s 付近の成分は図 77 の天体から、90km/s 付近の成分は図 78 からと、それぞれ考えられる。

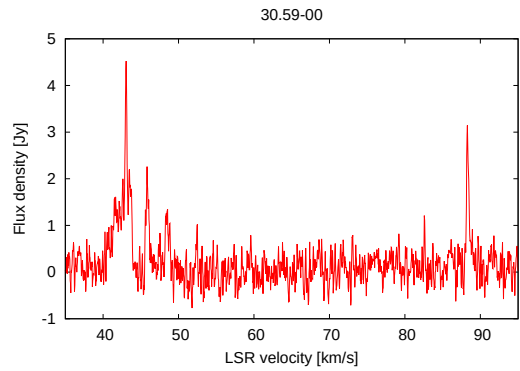


図 77 既知天体 G030.59-0.04. 離角は約 2.4 分角

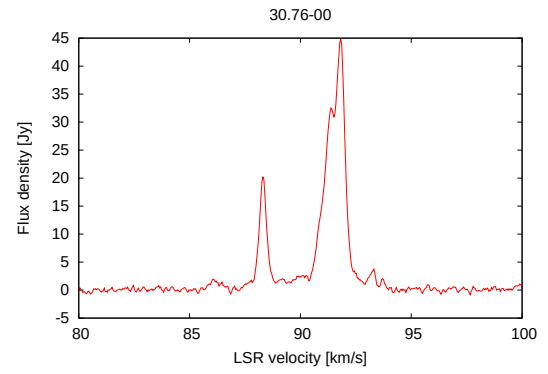


図 78 既知天体 G030.76-0.05. 離角は約 8.0 分角

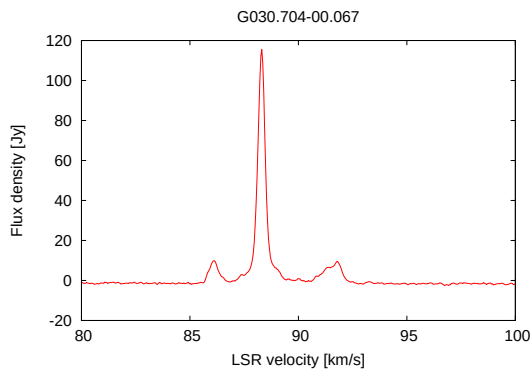


図 79 G030.704-00.067

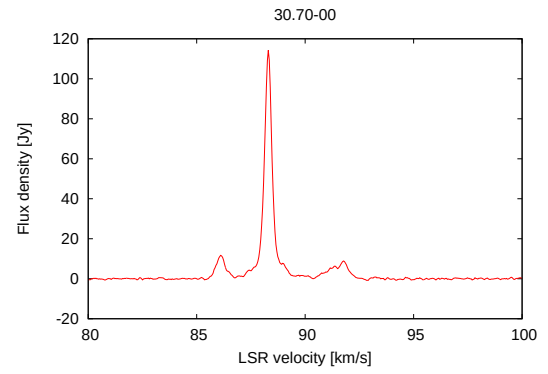


図 80 既知天体 G030.70-0.07. 離角は約 0.30 分角

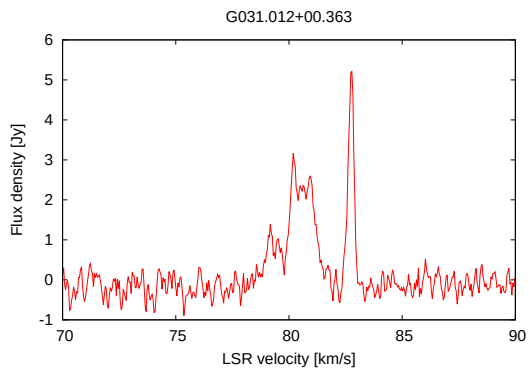


図 81 G031.012+00.363

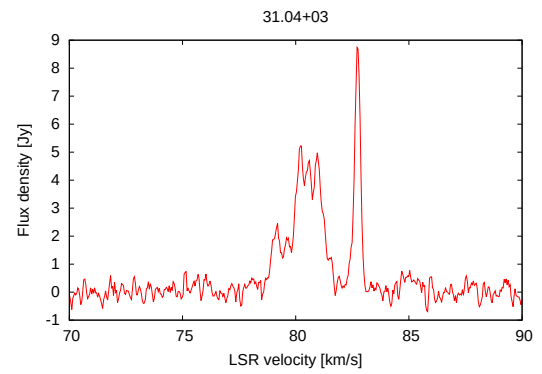


図 82 既知天体 G031.04+0.36. 離角は約 2.2 分角

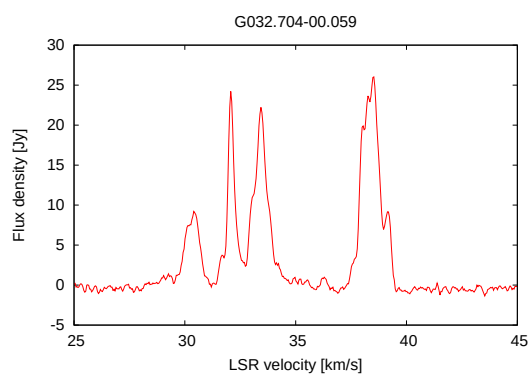


図 83 G032.704-00.059

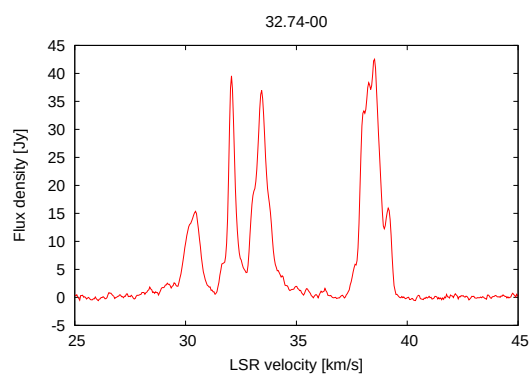


図 84 既知天体 G032.74-0.08. 離角は約 2.6 分角

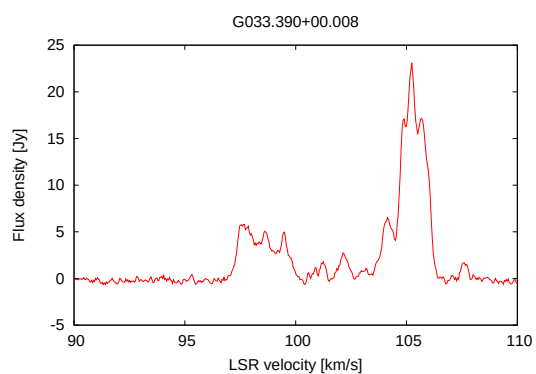


図 85 G033.390+00.008

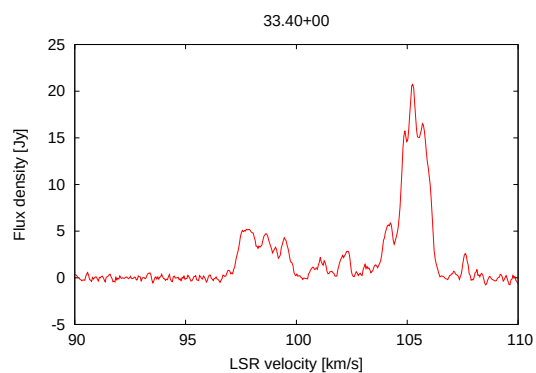


図 86 既知天体 G033.39+0.01. 離角は約 0.04 分角

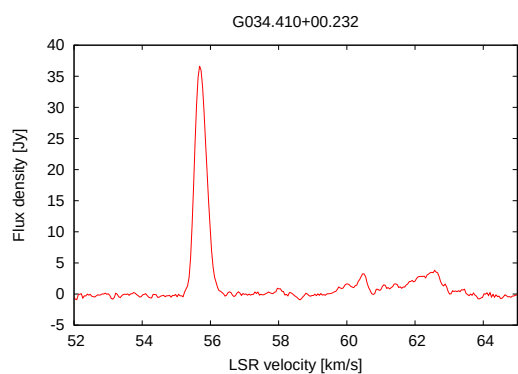


図 87 G034.410+00.232

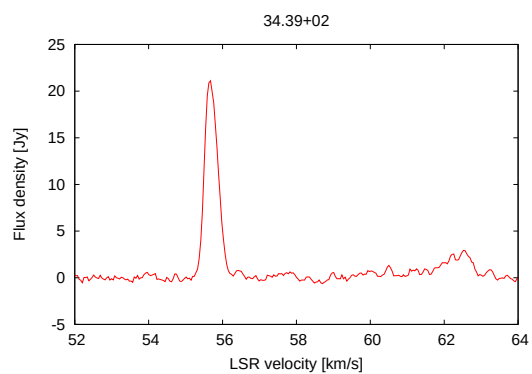


図 88 既知天体 G034.39+0.24. 離角は約 1.5 分角

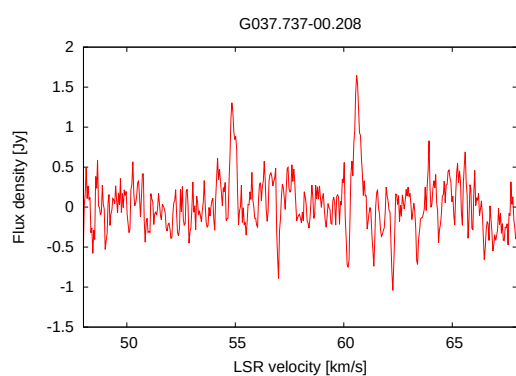


図 89 G037.737-00.208

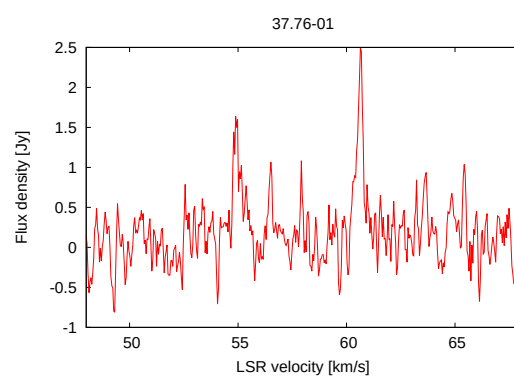


図 90 既知天体 G037.76-0.19. 離角は約 1.5 分角

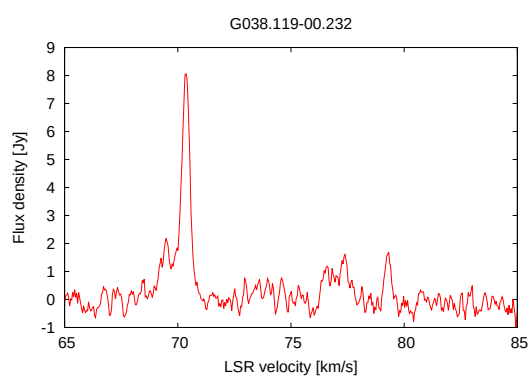


図 91 G038.119-00.232

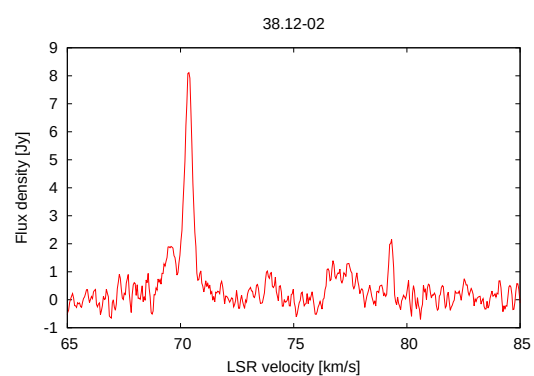


図 92 既知天体 G038.12-0.24. 離角は約 0.14 分角

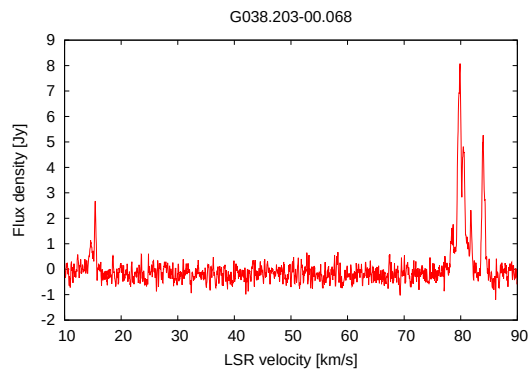


図 93 G038.203-00.068 80km/s 付近の成分は図 94 の天体から、10–20km/s 付近の成分は図 95 からと、それぞれ考えられる。

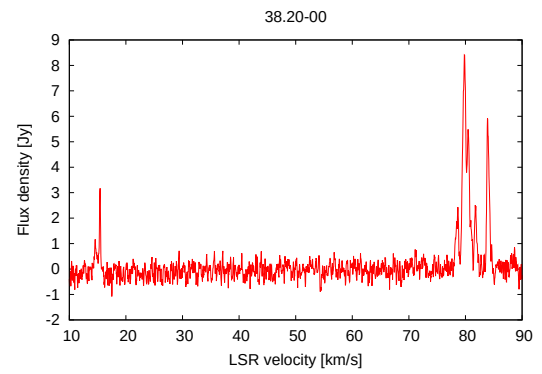


図 94 既知天体 G038.20-0.08. 離角は約 0.13 分角

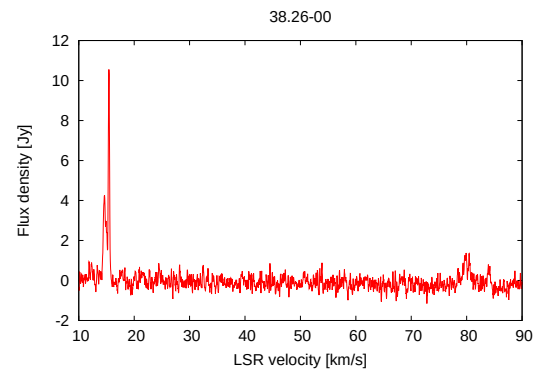


図 95 既知天体 G038.26-0.20. 離角は約 3.3 分角

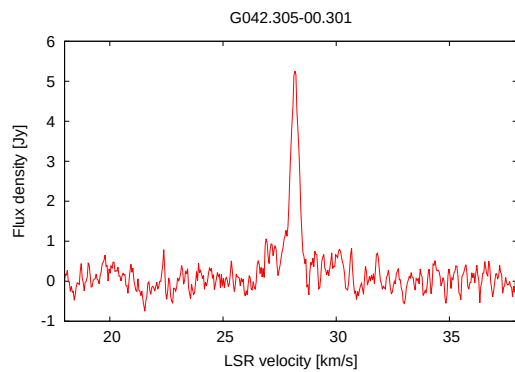


図 96 G042.305-00.301

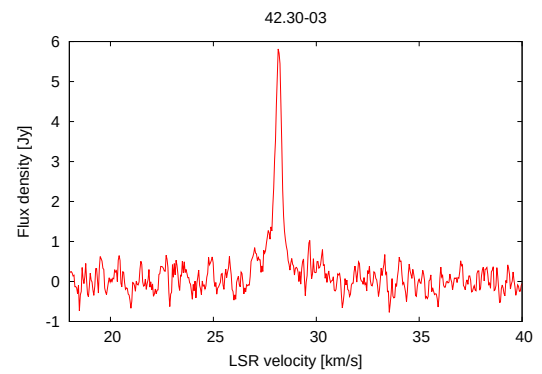


図 97 既知天体 G042.30-0.30. 離角は約 0.13 分角

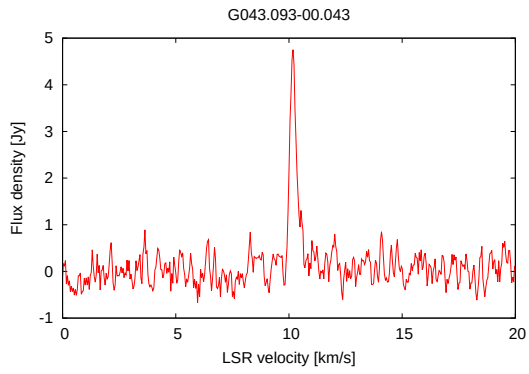


図 98 G043.093-00.043

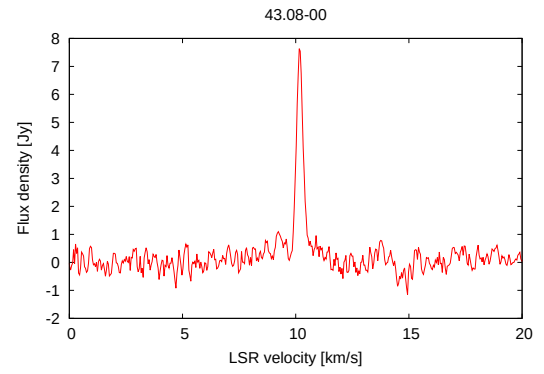


図 99 既知天体 G043.08-0.08. 離角は約 2.3 分角

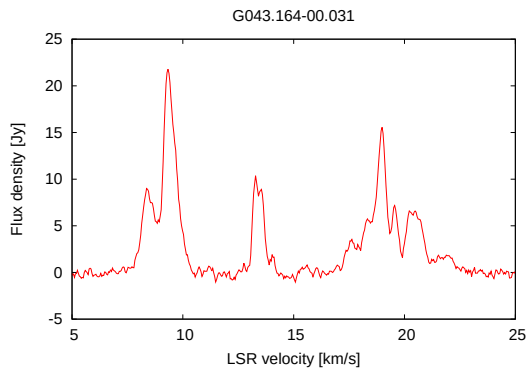


図 100 G043.164-00.031

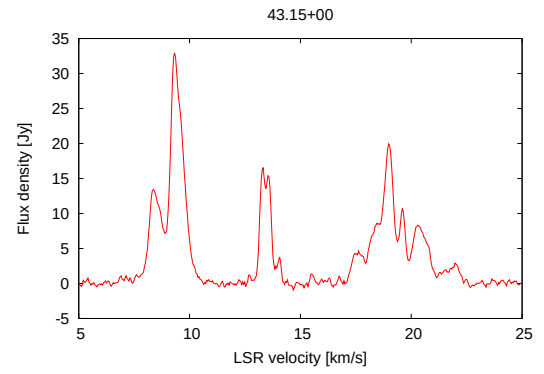


図 101 既知天体 G043.15+0.02. 離角は約 2.7 分角

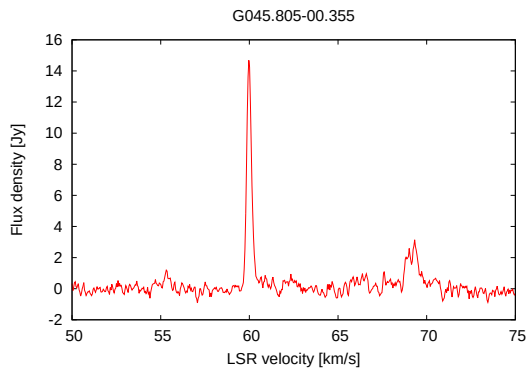


図 102 G045.805-00.355

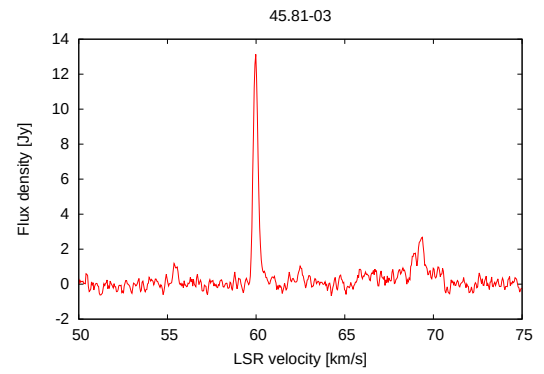


図 103 既知天体 G045.81-0.36. 離角は約 0.12 分角

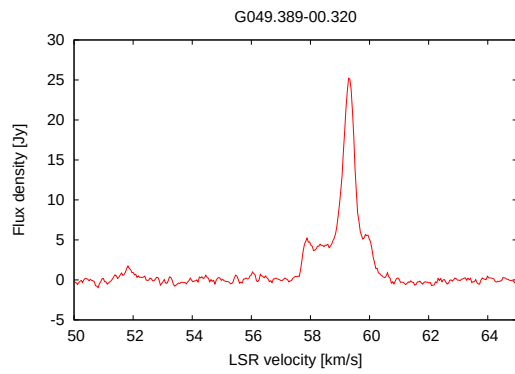


図 104 G049.389-00.320

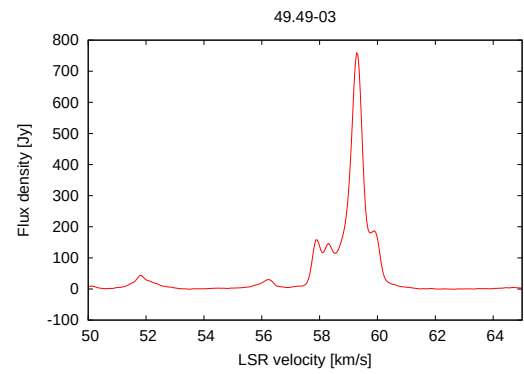


図 105 既知天体 G049.49-0.39.G049.389-00.320 からの離角は約 7.3 分角

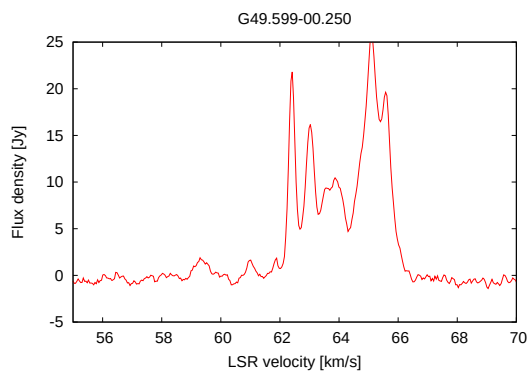


図 106 G049.599-00.250

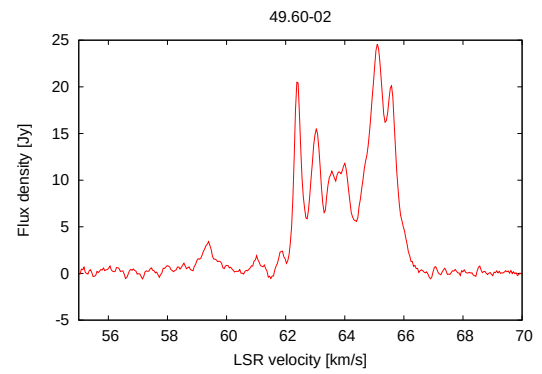


図 107 既知天体 G049.60-0.25. 離角は約 0.16 分角

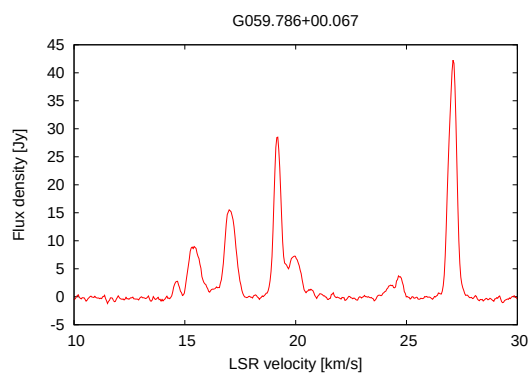


図 108 G059.786+00.067

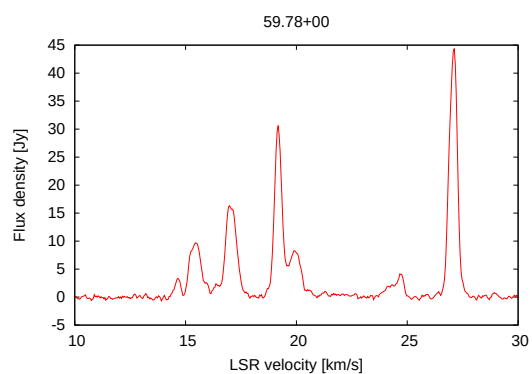


図 109 既知天体 G059.78+0.06. 離角は約 0.20 分角

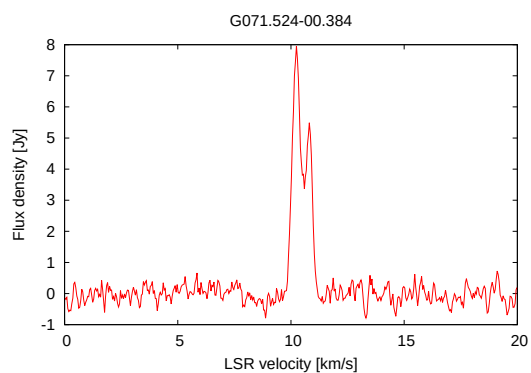


図 110 G071.524-00.384

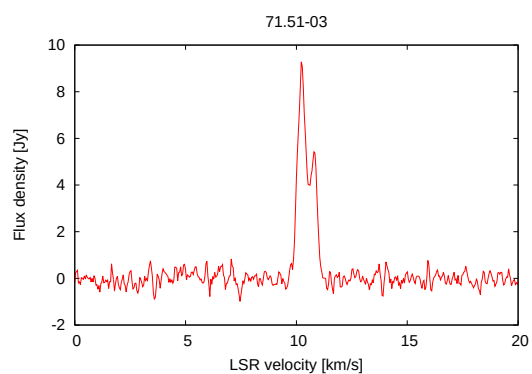


図 111 既知天体 G071.51-0.38. 離角は約 0.38 分角

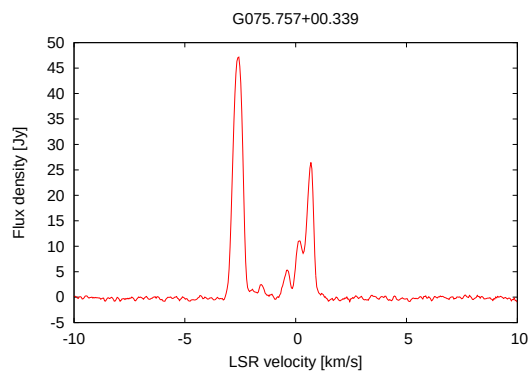


図 112 G075.757+00.339

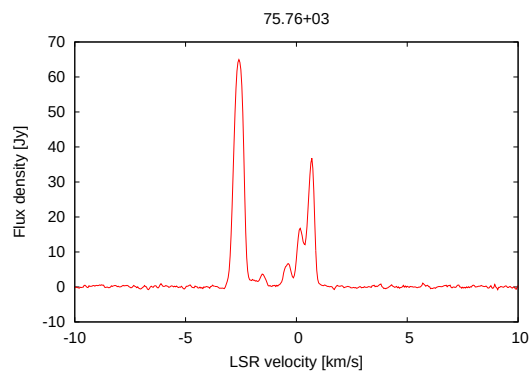


図 113 既知天体 G075.76+0.34. 離角は約 1.4 分角

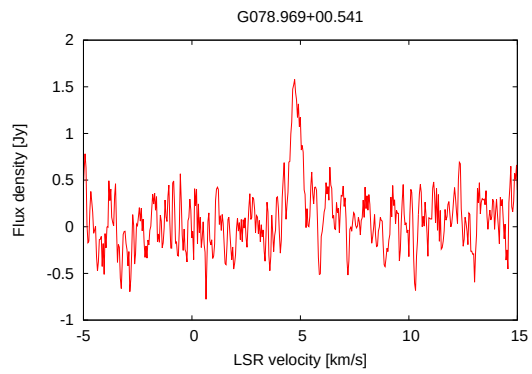


図 114 G078.969+00.541 マージナルディテクションかつ新検出の可能性あり

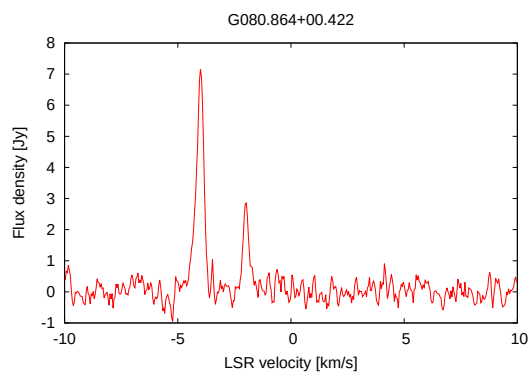


図 115 G080.864+00.422

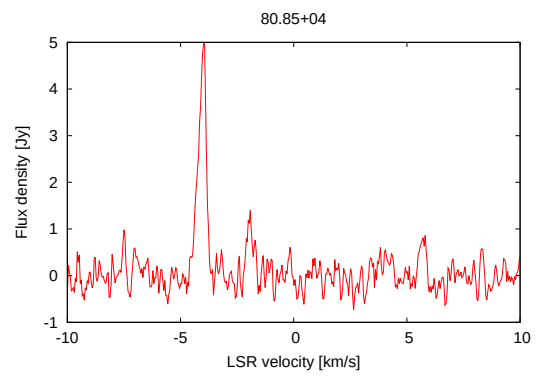


図 116 既知天体 G080.85+0.43. 離角は約 0.71 分角

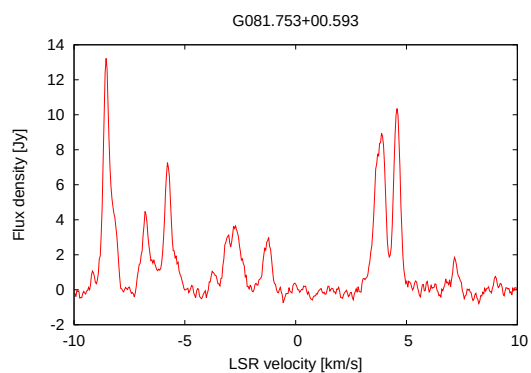


図 117 G081.753+00.593

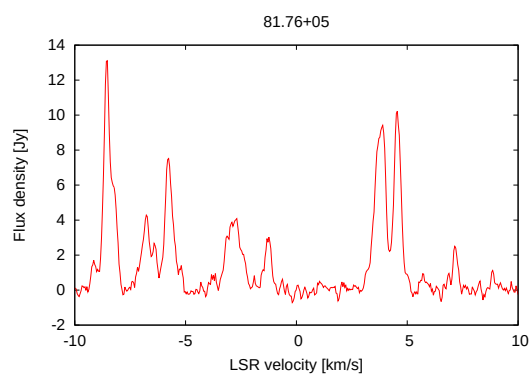


図 118 既知天体 G081.76+0.59. 離角は約 0.10 分角

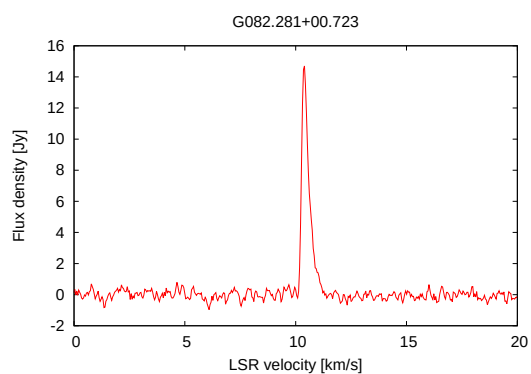


図 119 G082.281+00.723 新検出の可能性有り

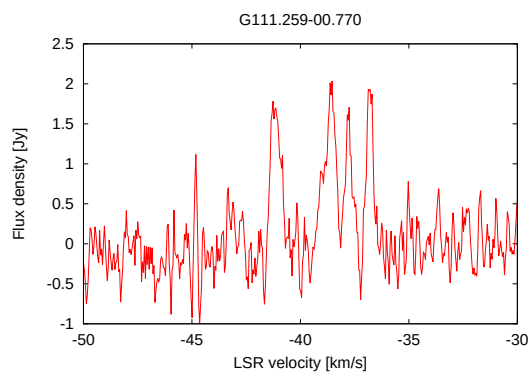


図 120 G111.259-00.770

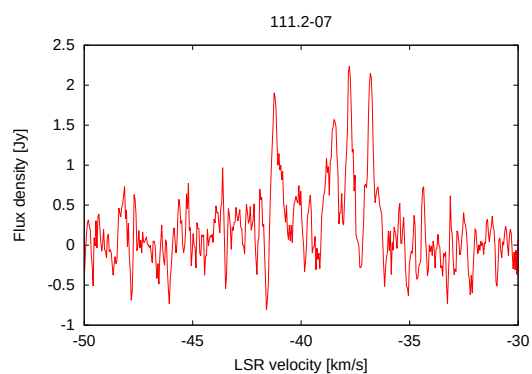


図 121 既知天体 G111.24-0.76. 離角は約 0.81 分角

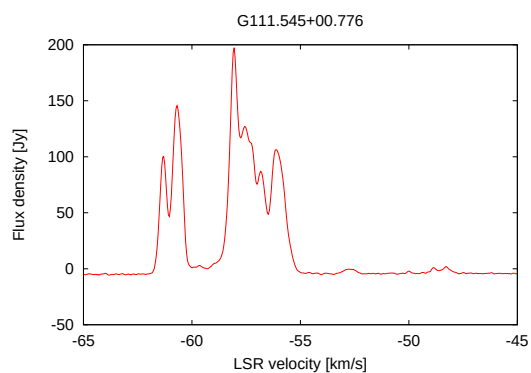


図 122 G111.545+00.776

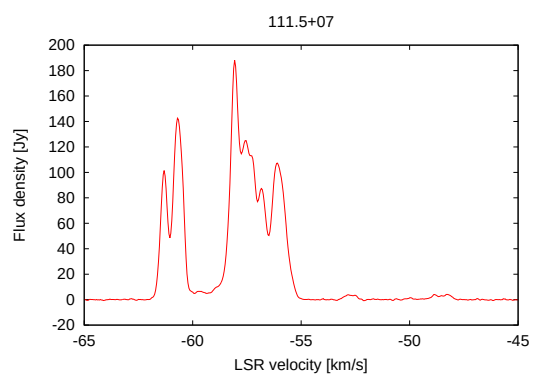


図 123 既知天体 G111.53+0.76. 離角は約 0.17 分角

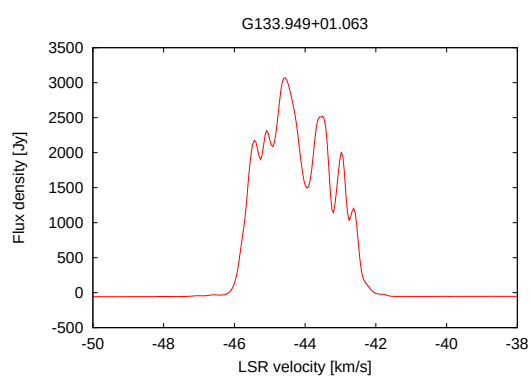


図 124 G133.949+01.063

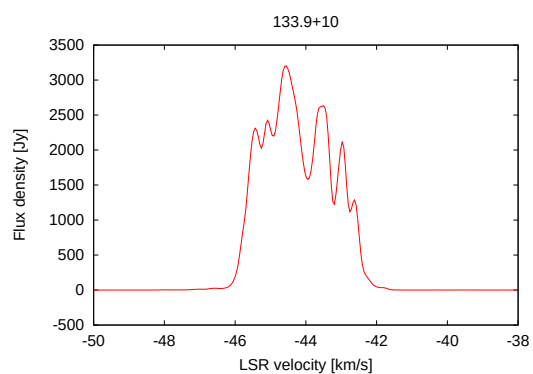


図 125 既知天体 G133.94+1.04. 離角は約 0.11 分角

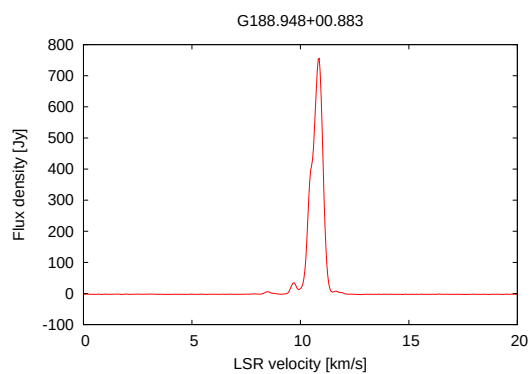


図 126 G188.948+00.883

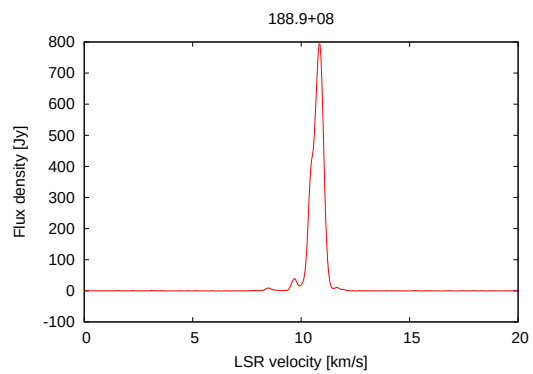


図 127 既知天体 G188.95+0.89. 離角は約 0.23 分角

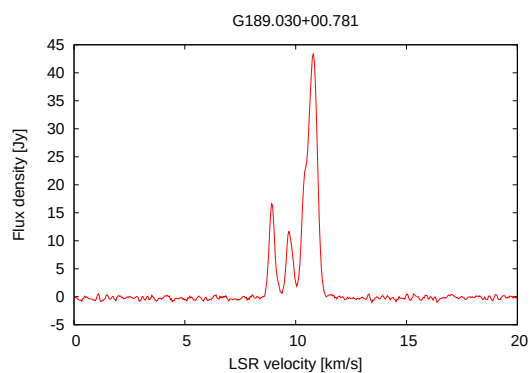


図 128 G189.030+00.781

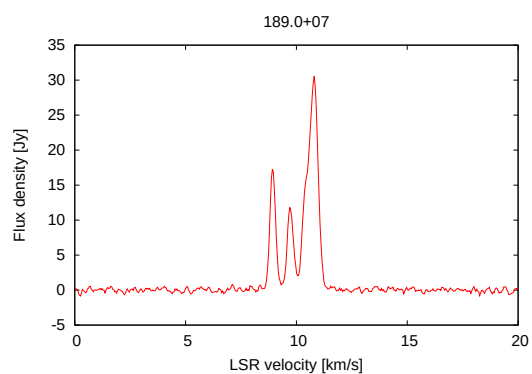


図 129 既知天体 G188.948+00.883. 離角は約 0.17 分角

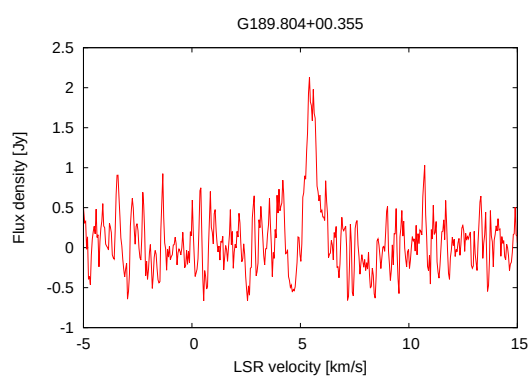


図 130 G189.804+00.355

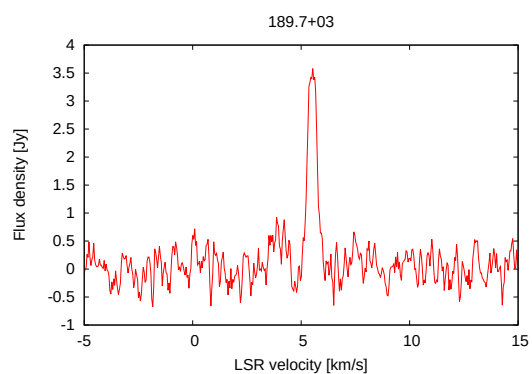


図 131 既知天体 G189.78+0.34. 離角は約 1.7 分角

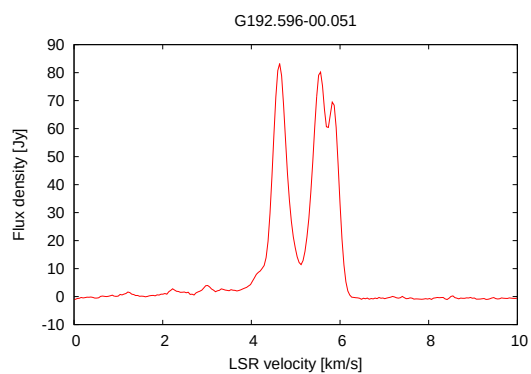


図 132 G192.596-00.051

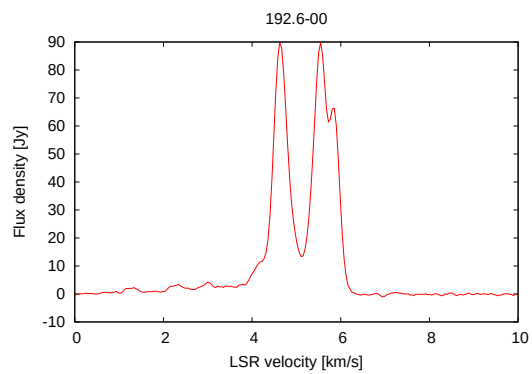


図 133 既知天体 G192.60-0.05. 離角は約 0.32 分角

付録 C MIPS GAL 24 μ m

MIPSGAL24 μ m マップと観測した BGPS ダストコアの比較。ダストコアの座標を中心に半径 0.5 分角で円を描いており、メーザー源を十字で示している。

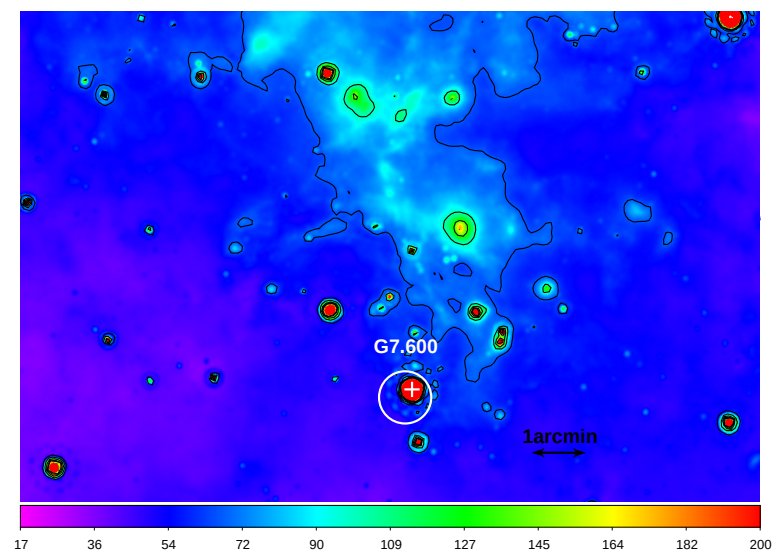


図 134 G007.600-00.142

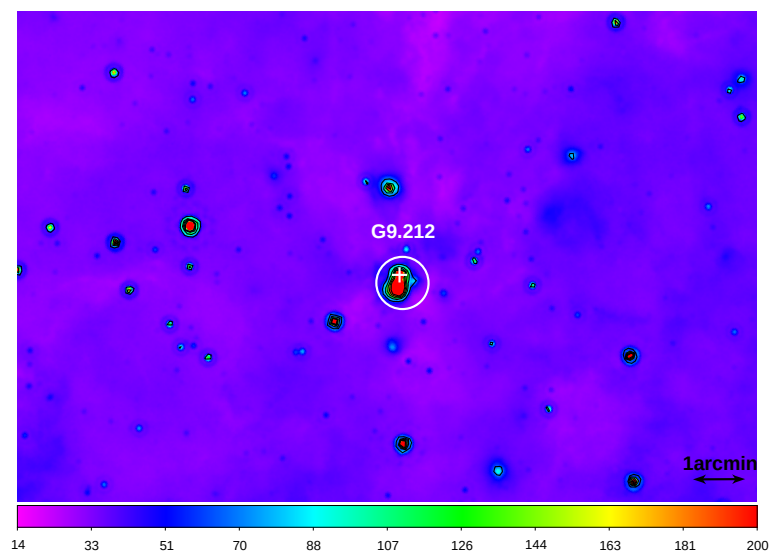


图 135 G009.212-00.202

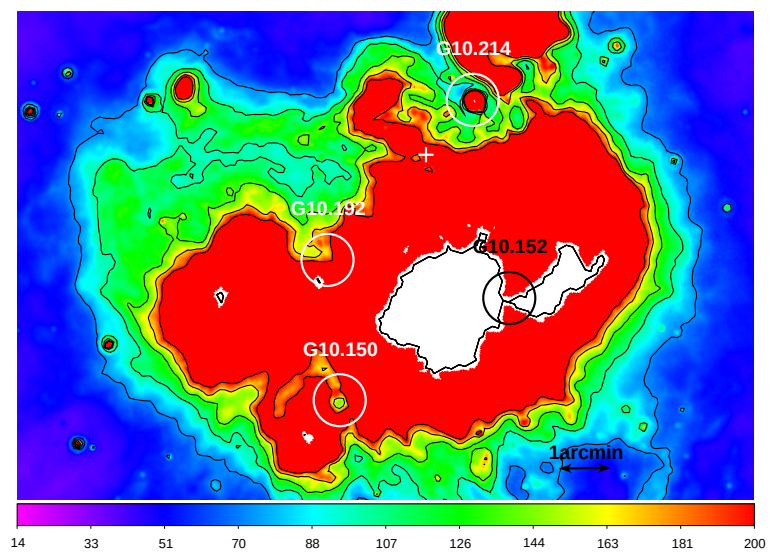


图 136 G010.150-00.408 G10.152-00.344 G10.192-00.390 G10.214-00.324

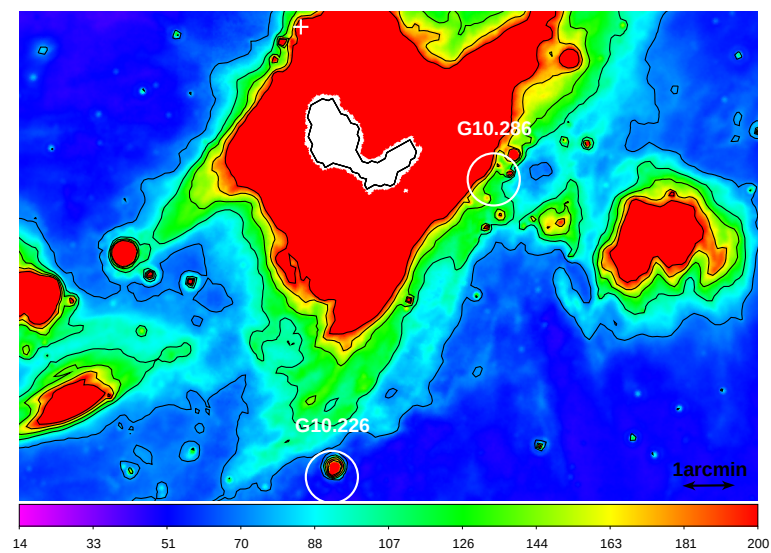


図 137 G010.226-00.208 G010.286-00.120

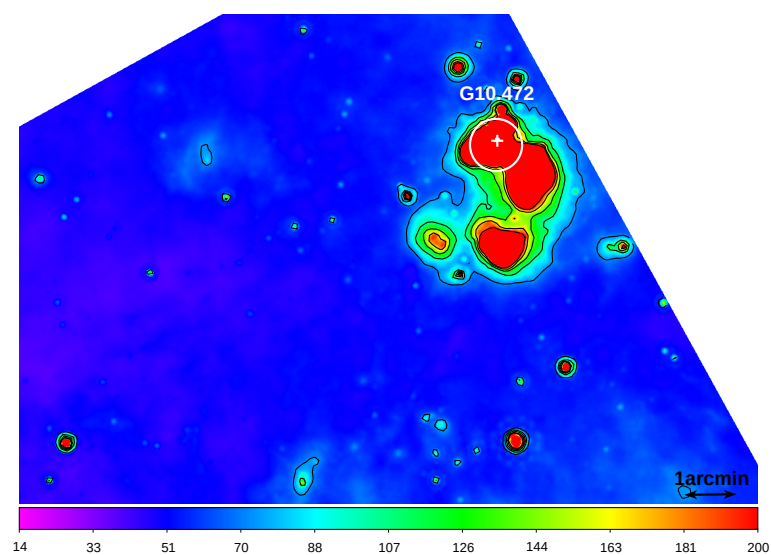


図 138 G010.472+00.026

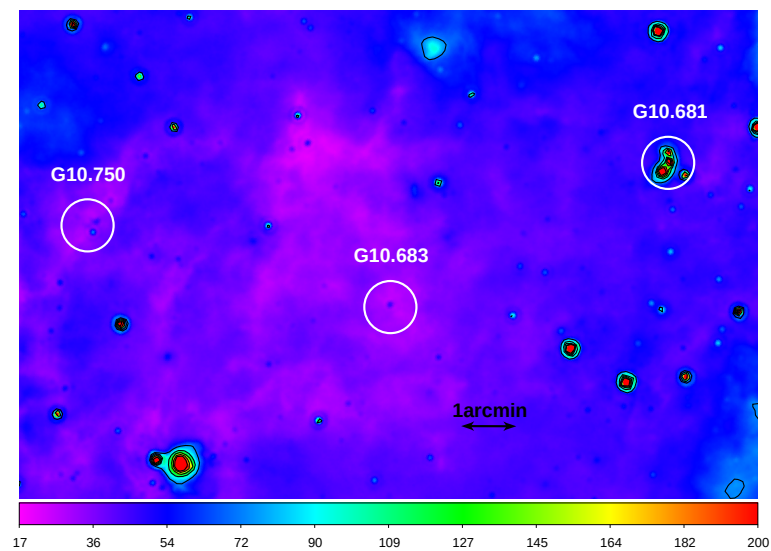


図 139 G010.681-00.028 G010683-00.126 G10.750-00.200

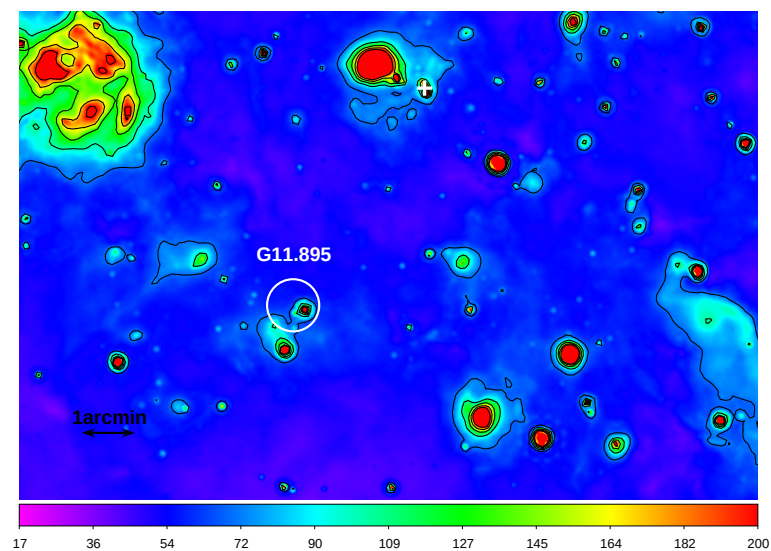


図 140 G011.895-00.220

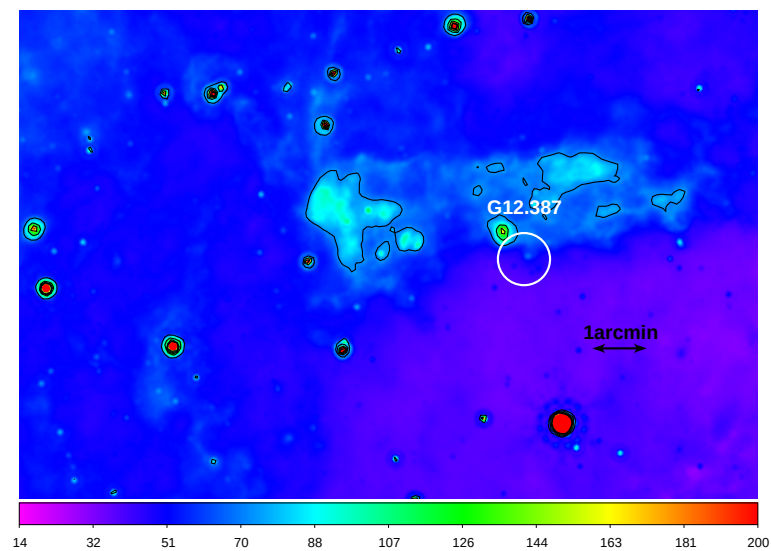


图 141 G012.387+00.230

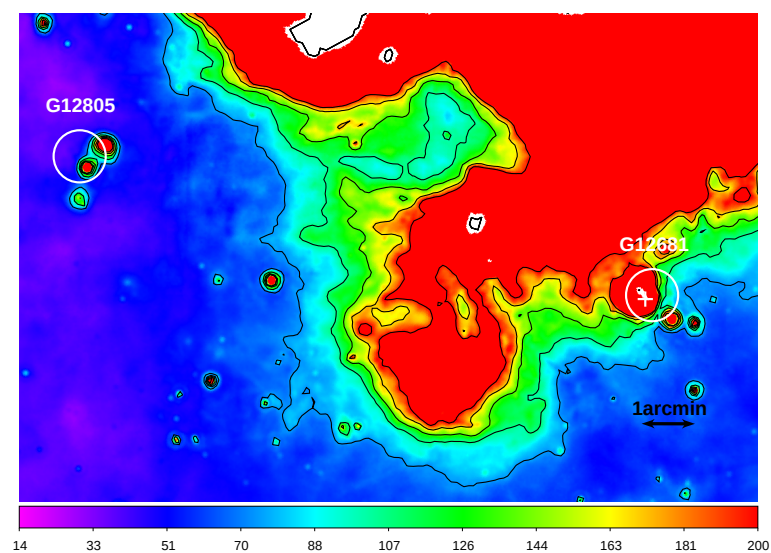


图 142 G012.681-00.182 G12.805-00.318

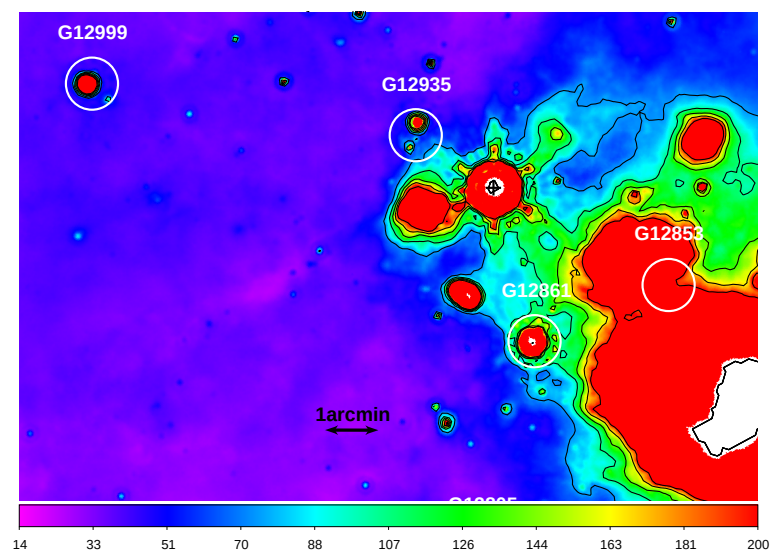


图 143 G012.853-00.226 G12.861-00.272 G012.999-00.358

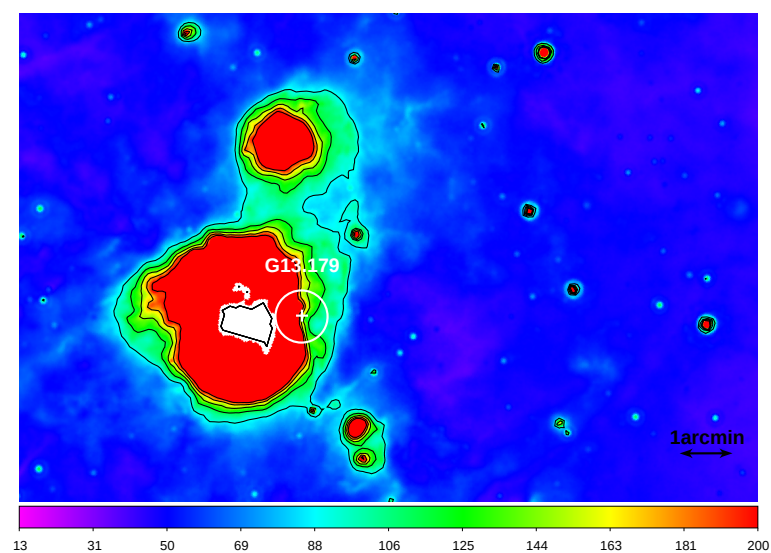


图 144 G013.179+00.060

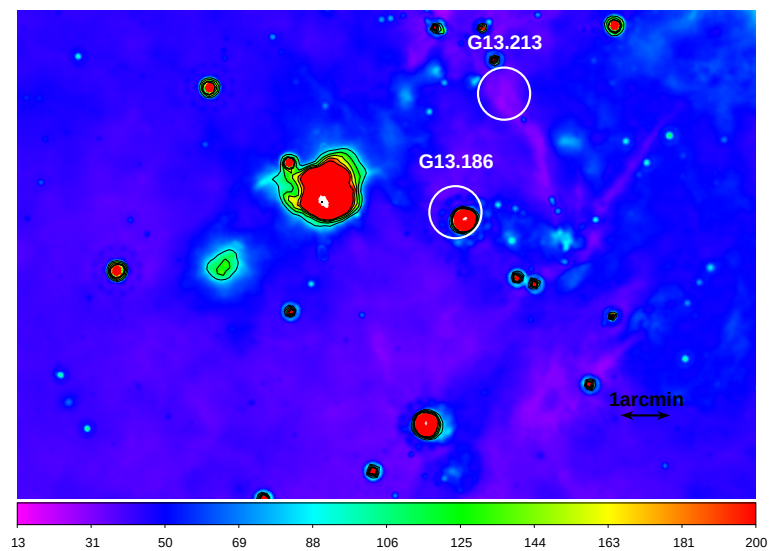


図 145 G013.186-00.108 G013.213-00.076

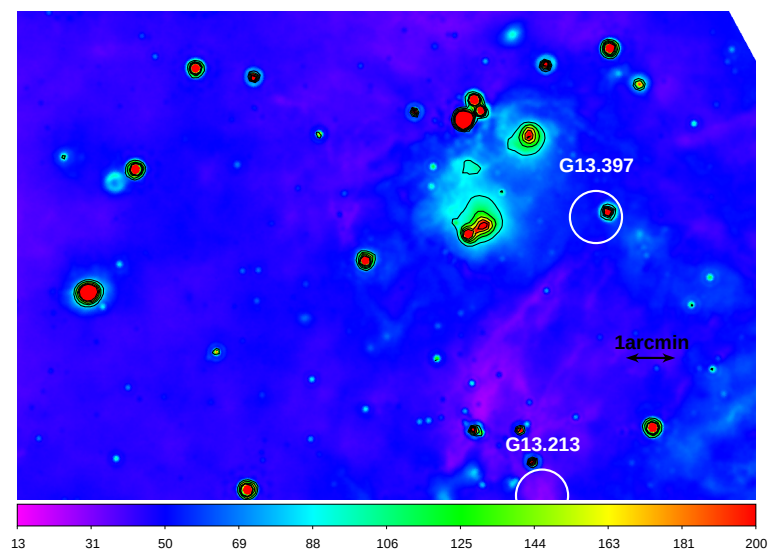


図 146 G013.397-00.228

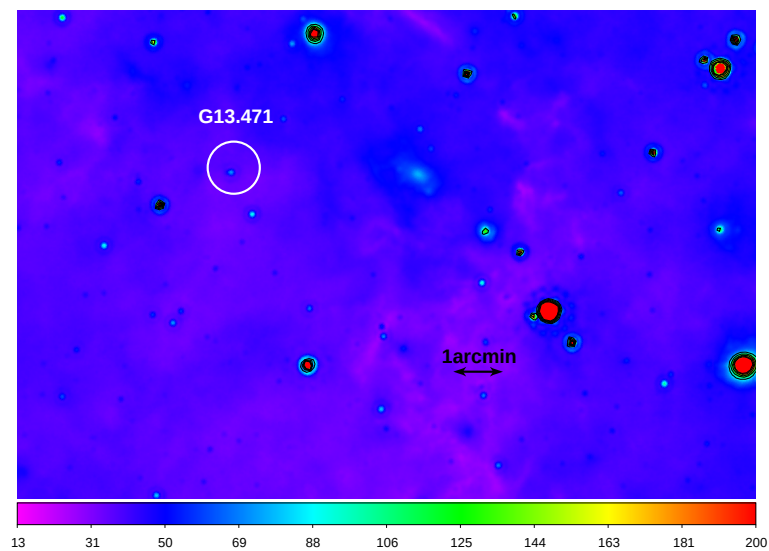


図 147 G013.471-00.286

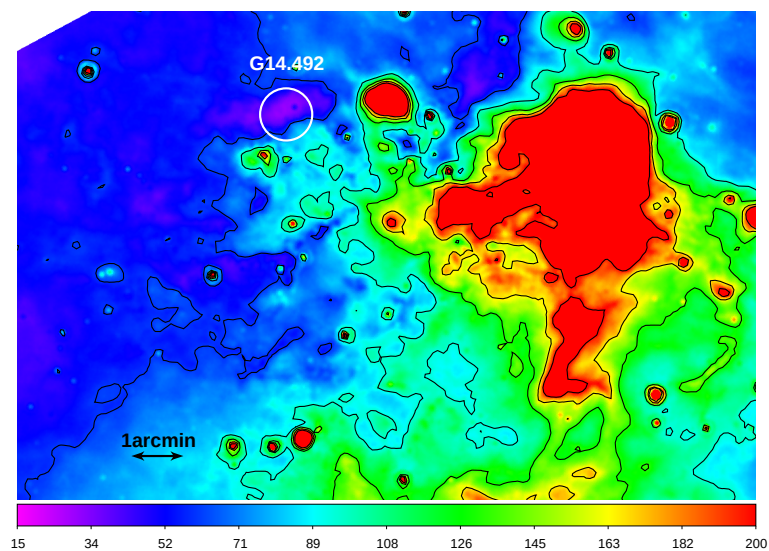


図 148 G014.492-00.139

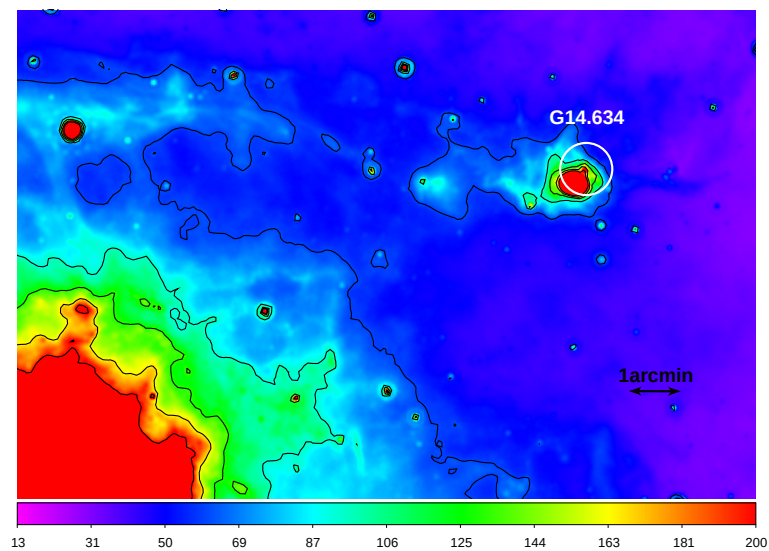


图 149 G014.634+00.308

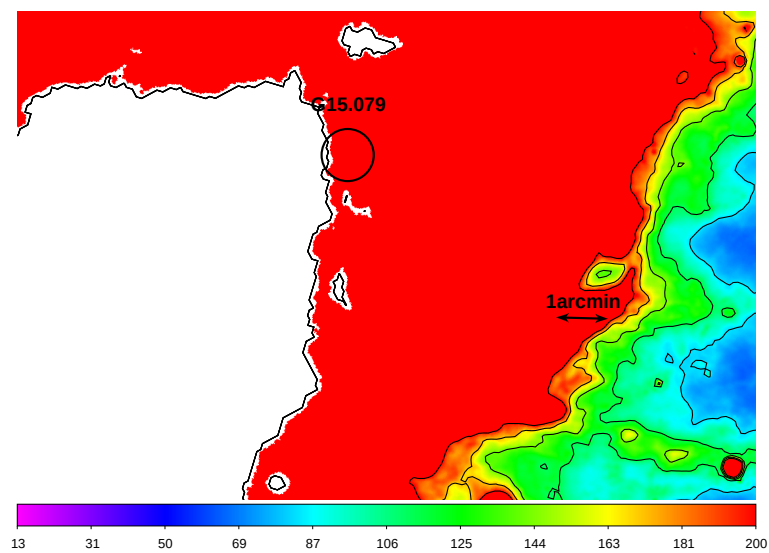


图 150 G015079-00.604

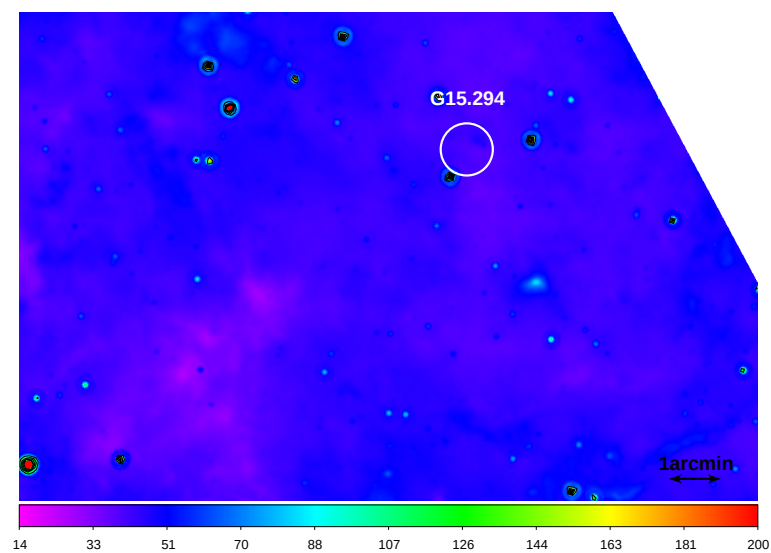


図 151 G015.294-00.014

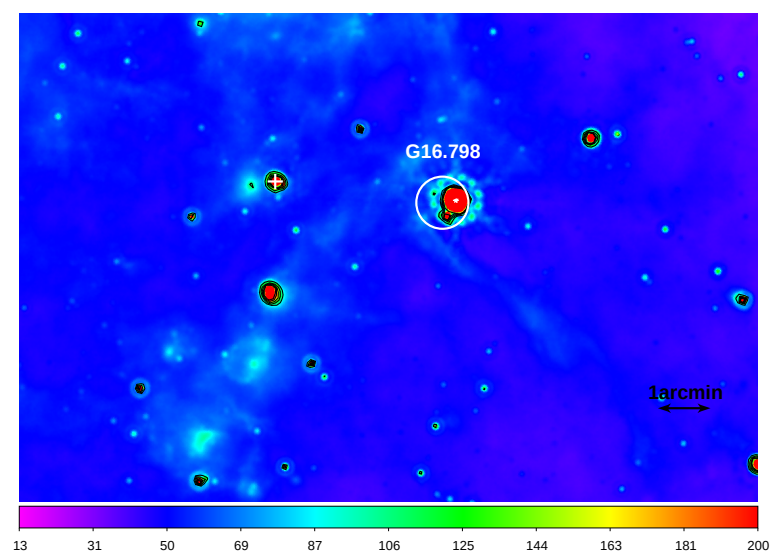


図 152 G016.798+00.124

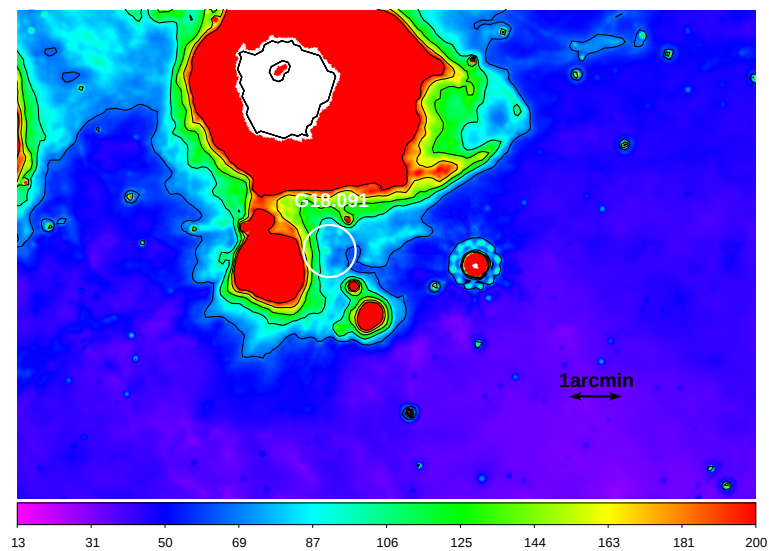


図 153 G018.091-00.302

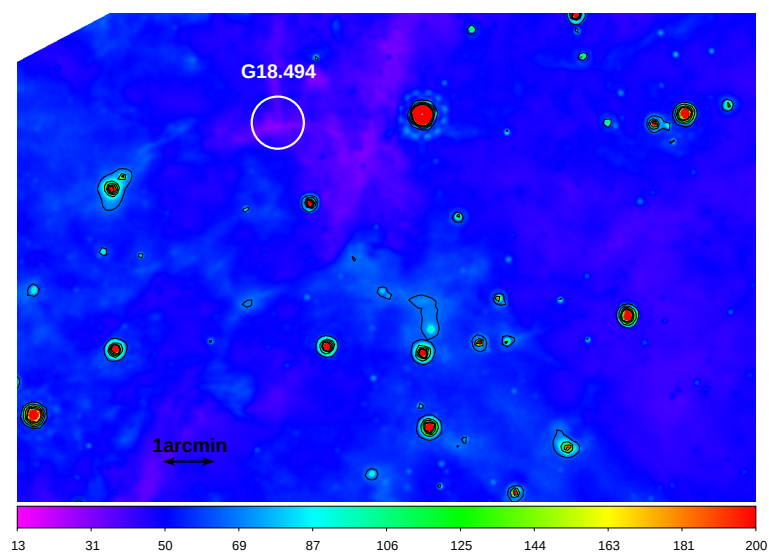


図 154 G018.494-00.198

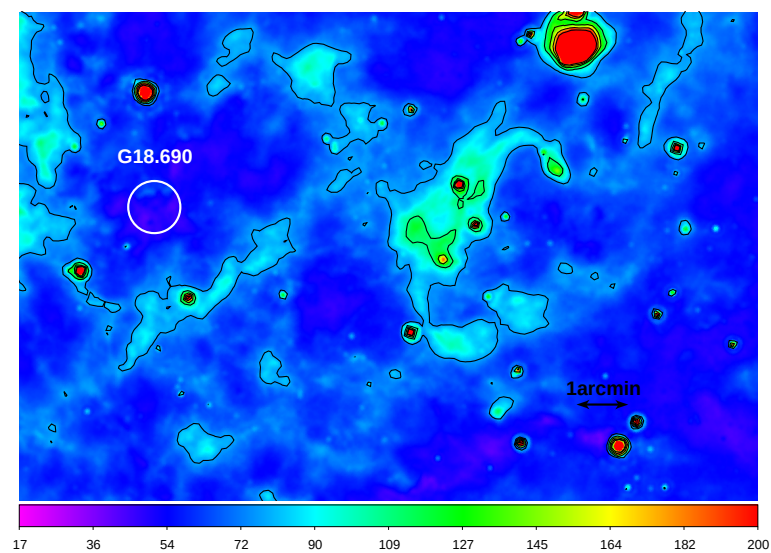


図 155 G018.690-00.379

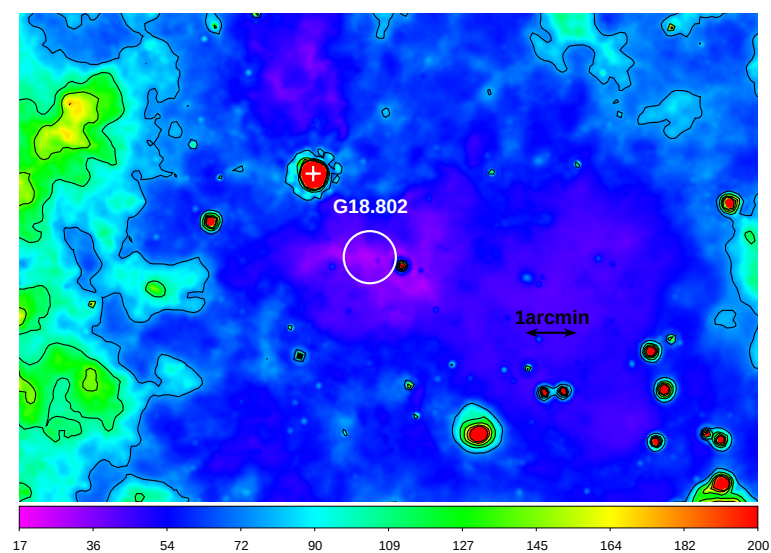


図 156 G018.802-00.295

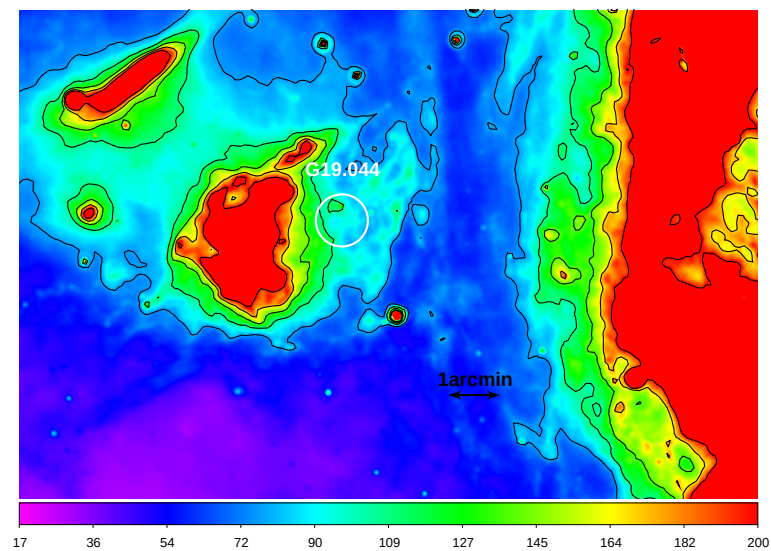


図 157 G019.044-00.561

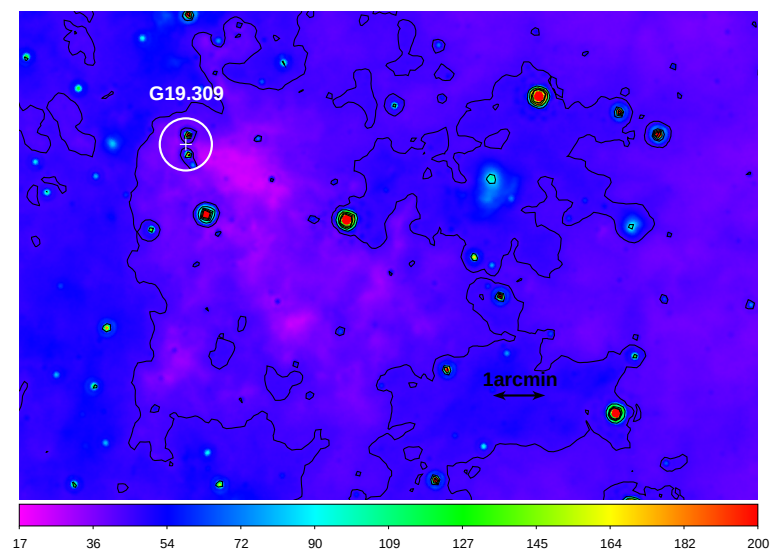


図 158 G019.309+00.065

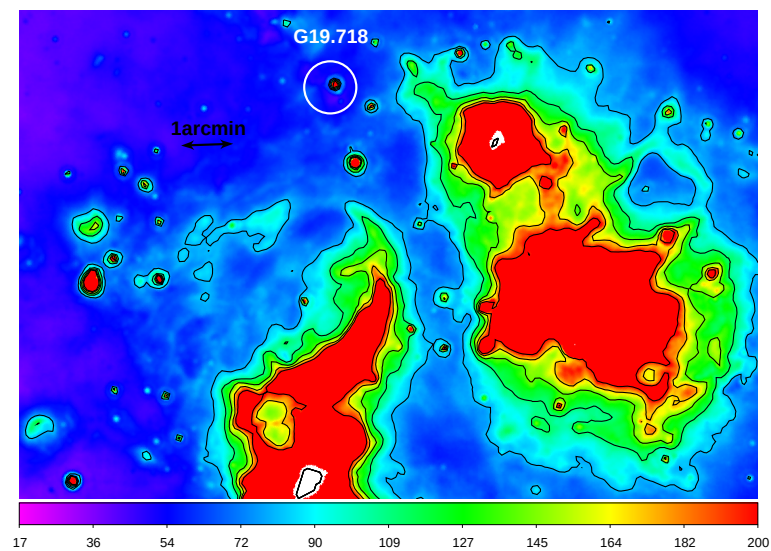


図 159 G019.718-00.169

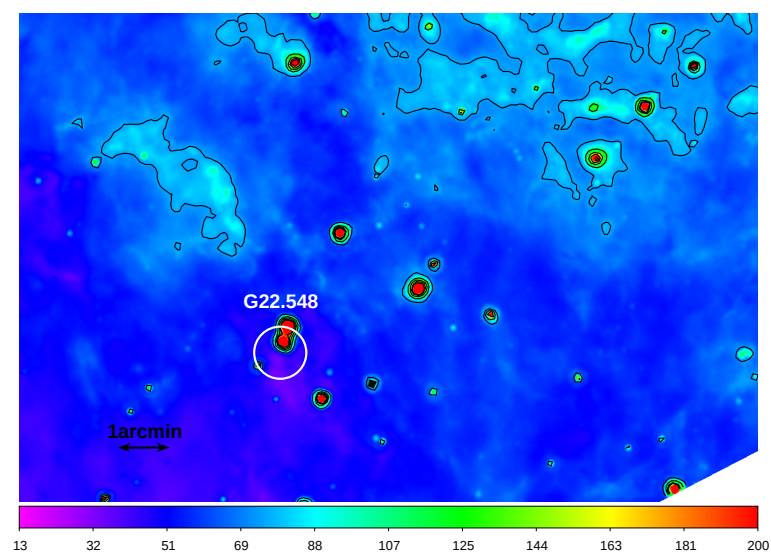


図 160 G022.548-00.525

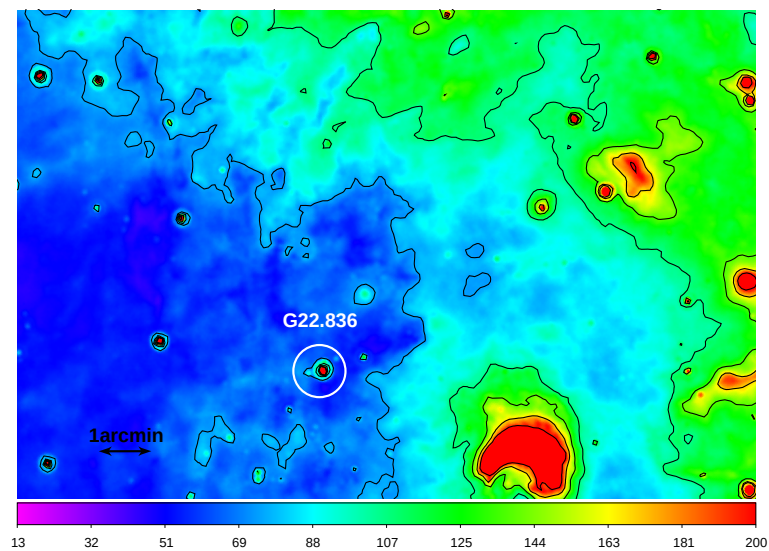


图 161 G022.836-00.438

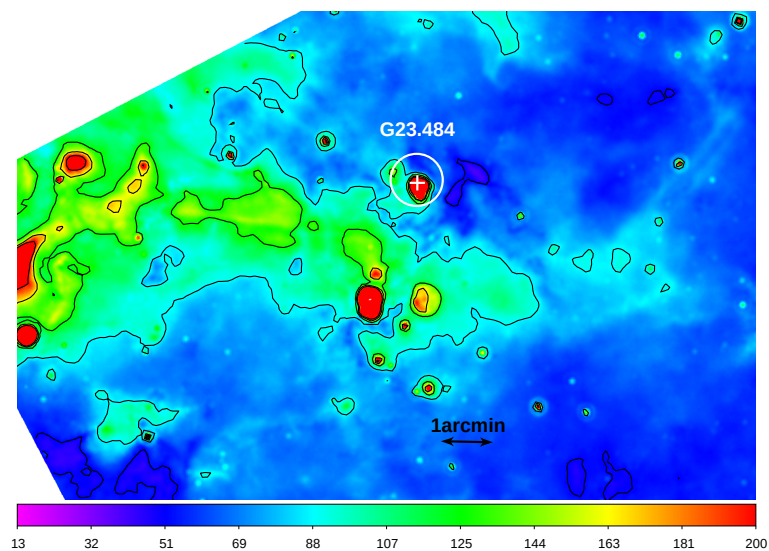


图 162 G023.484+00.096

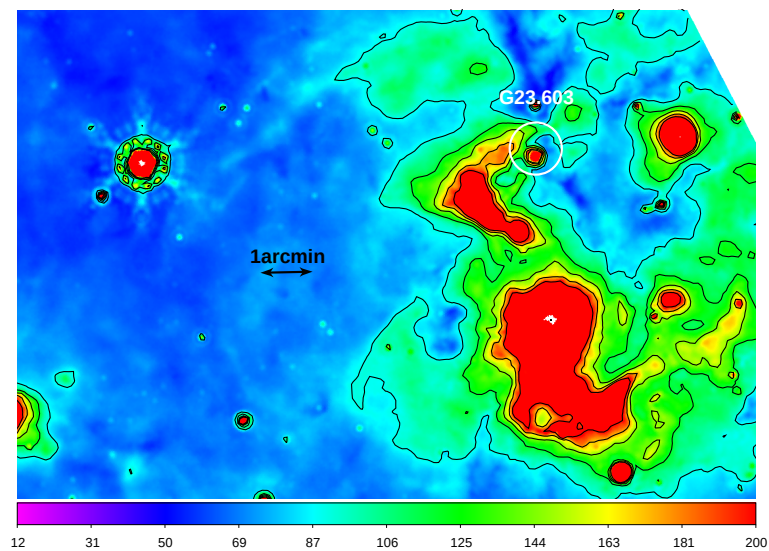


図 163 G023.603-00.014

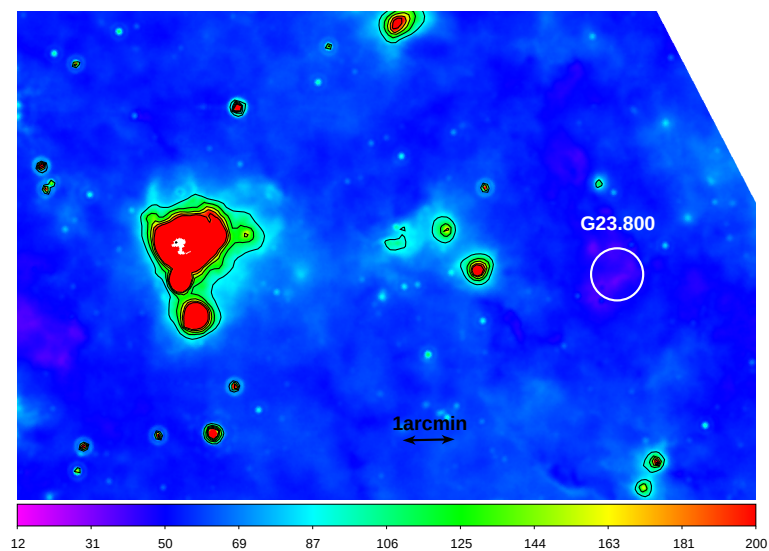


図 164 G023.800-00.002

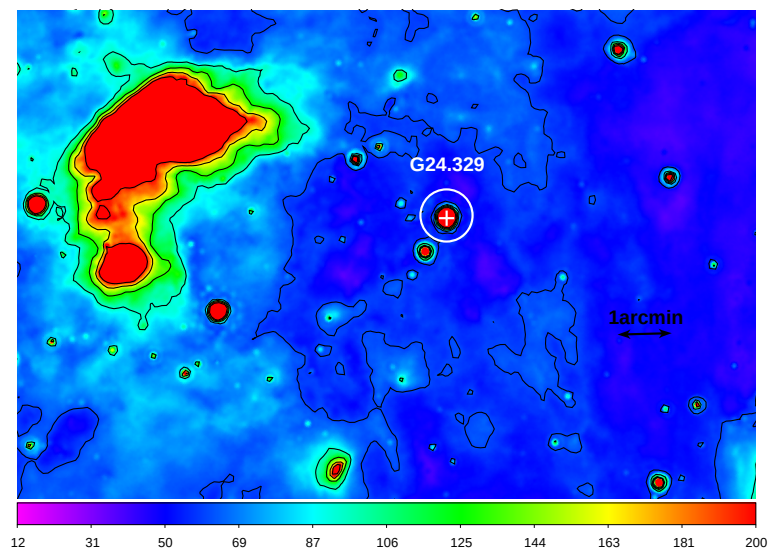


图 165 G024.329+00.142

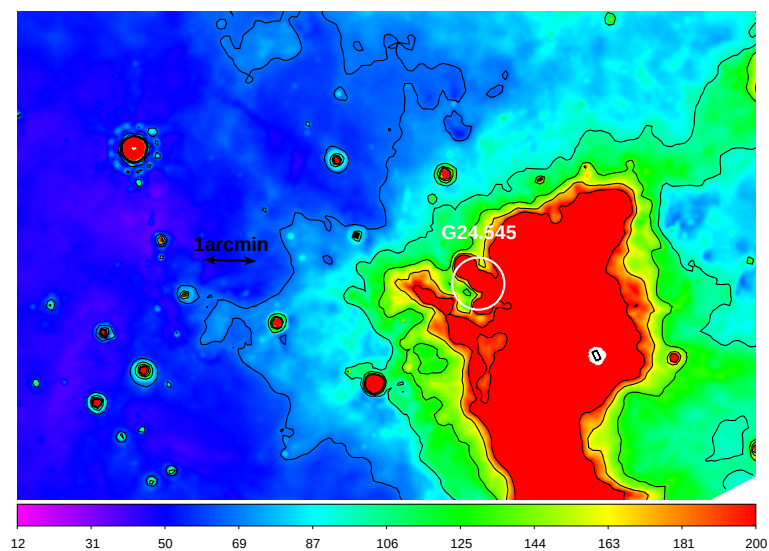


图 166 G024.545-00.248

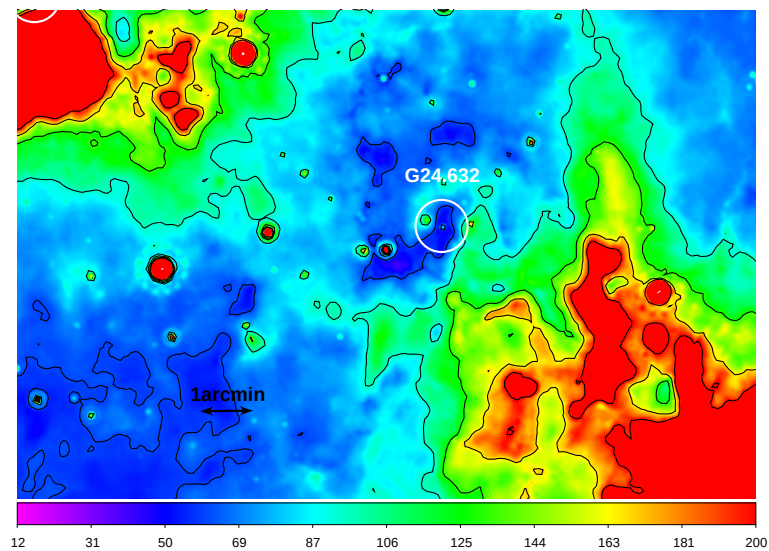


图 167 G024.632+00.173

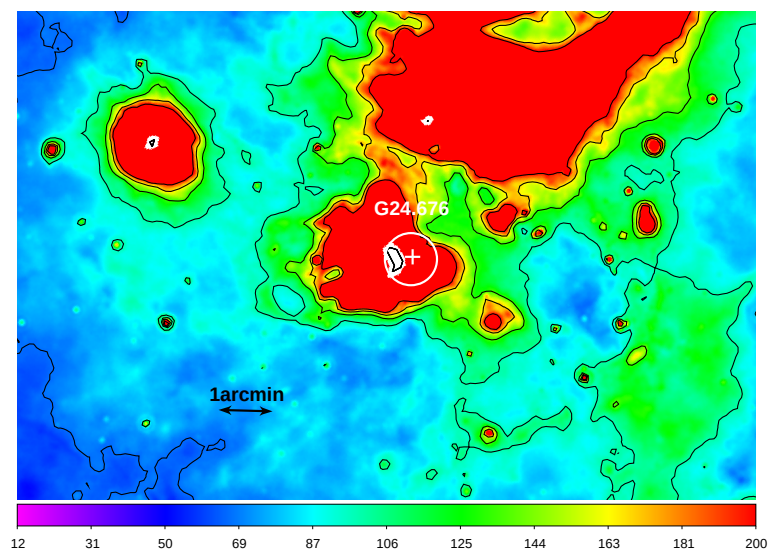


图 168 G024.676-00.151

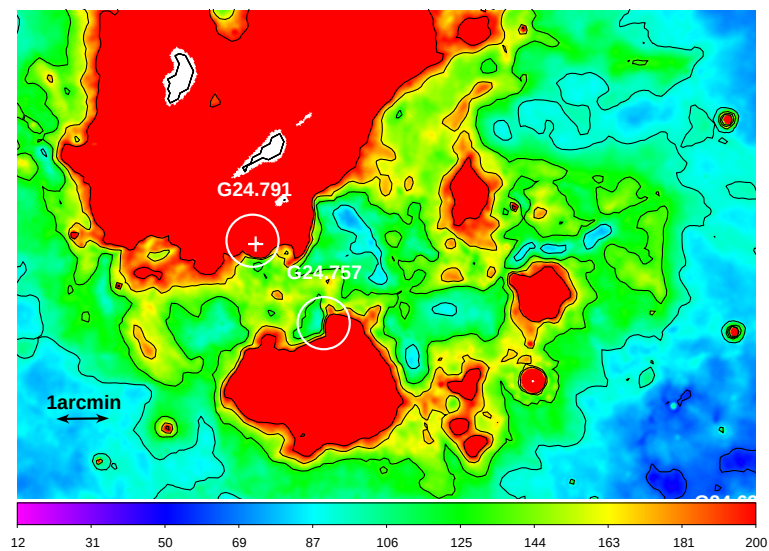


図 169 G024.757+00.091 G024.791+00.083

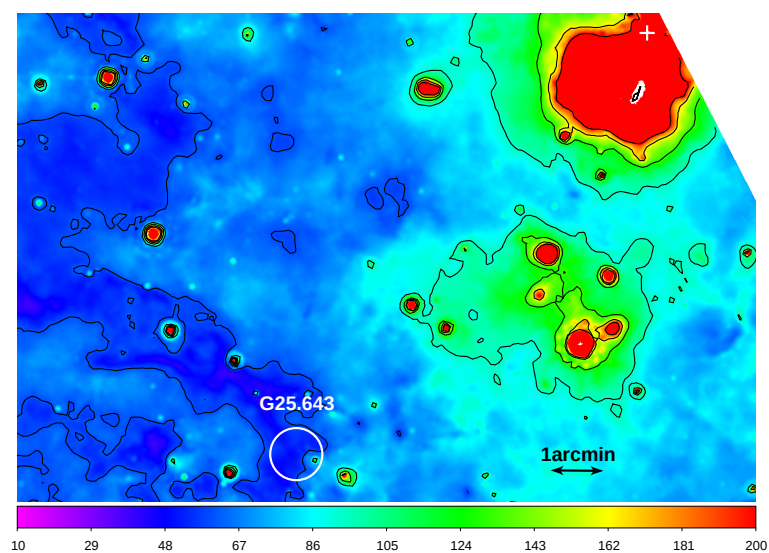


図 170 G025.643-00.115

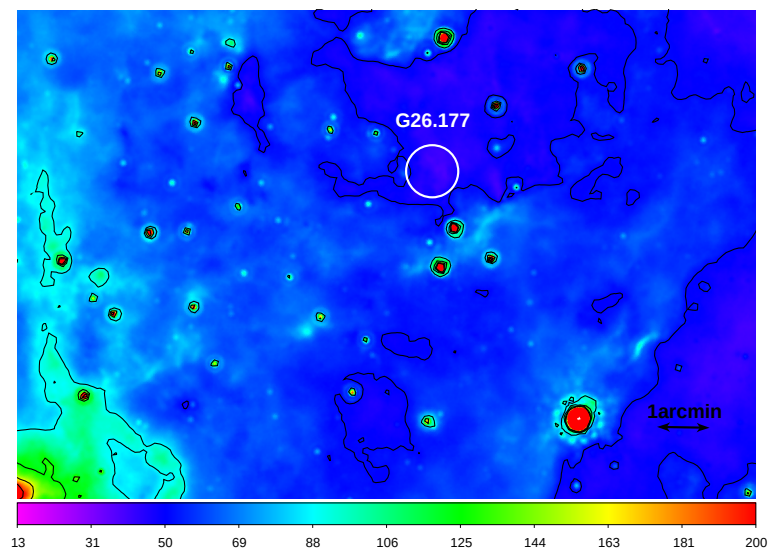


图 171 G026.177+00.139

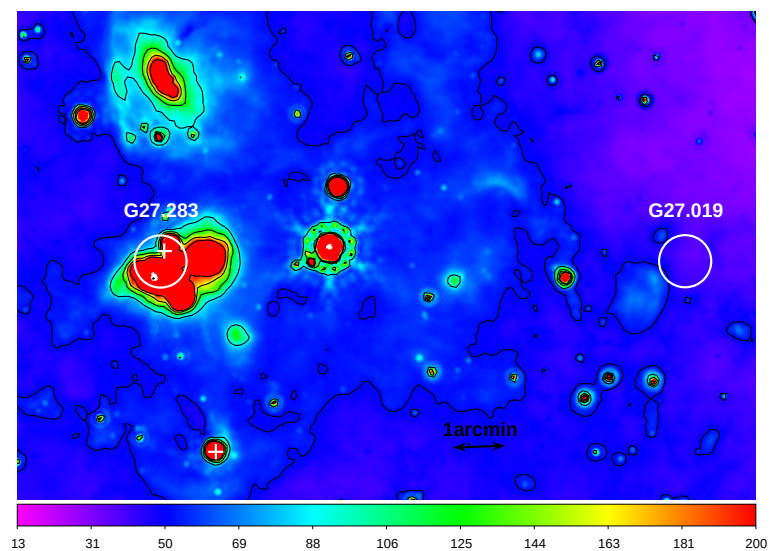


图 172 G027.019+00.201 G027.283+00.149

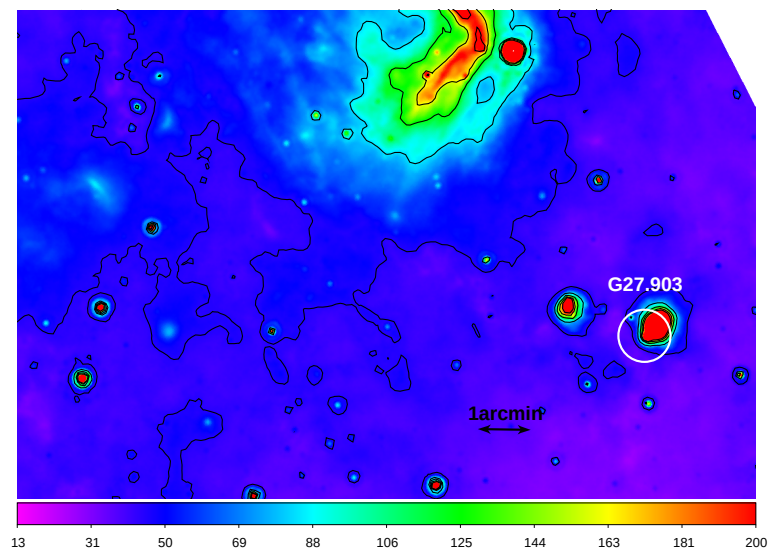


図 173 G027.903-00.016

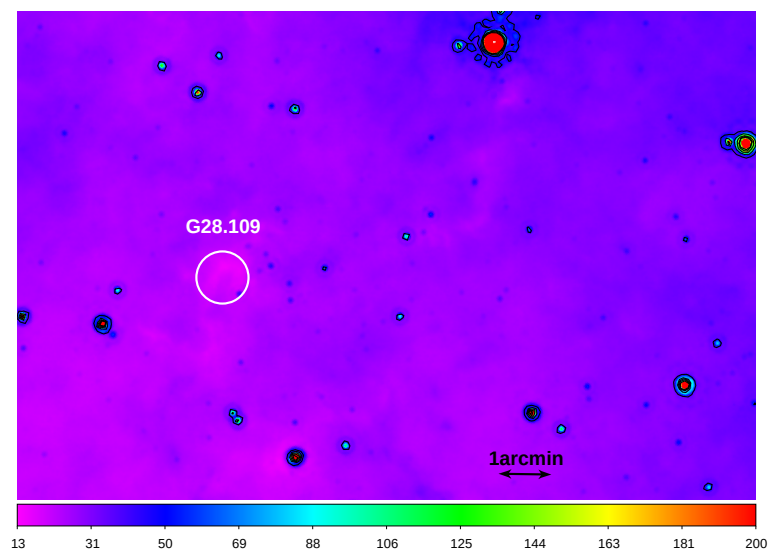


図 174 G028.109-00.450

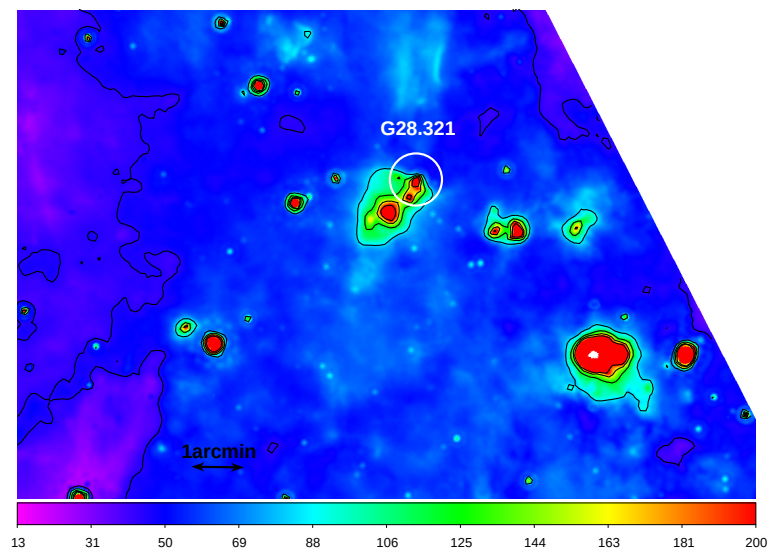


図 175 G028.321-00.012

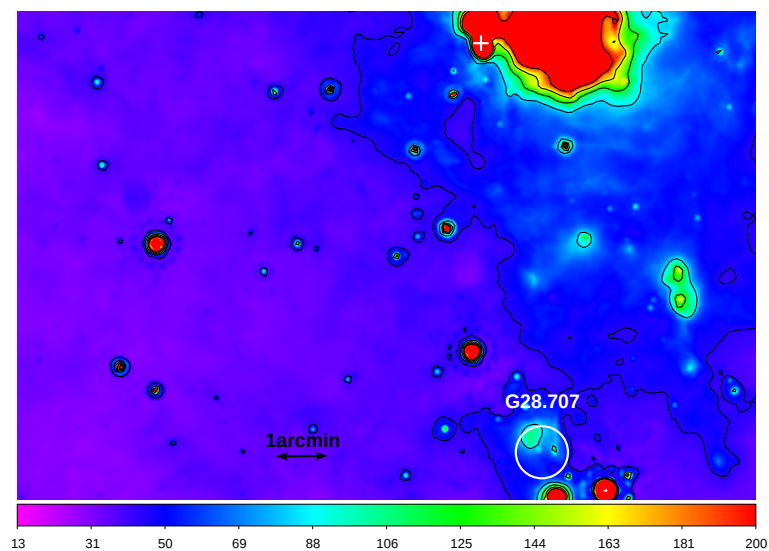


図 176 G028.707-00.296

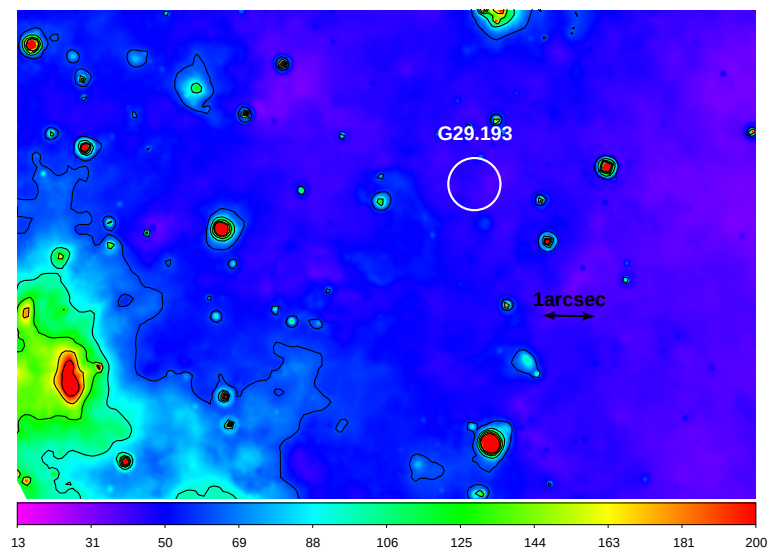


図 177 G029.193+00.123

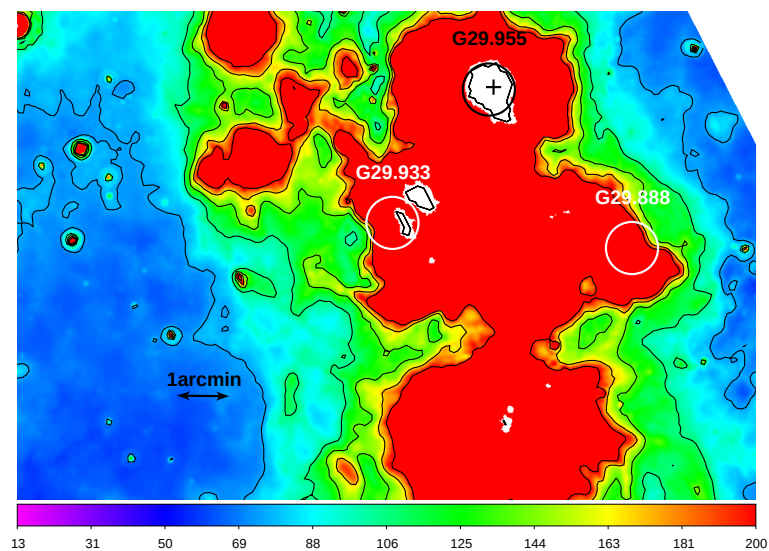


図 178 G029.888-00.000 G029.933-00.064 G029.955-00.018

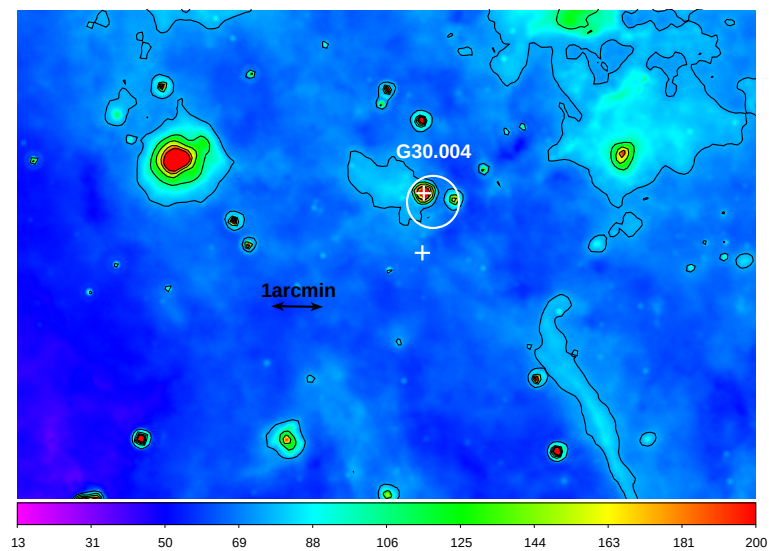


図 179 G030.004-00.270

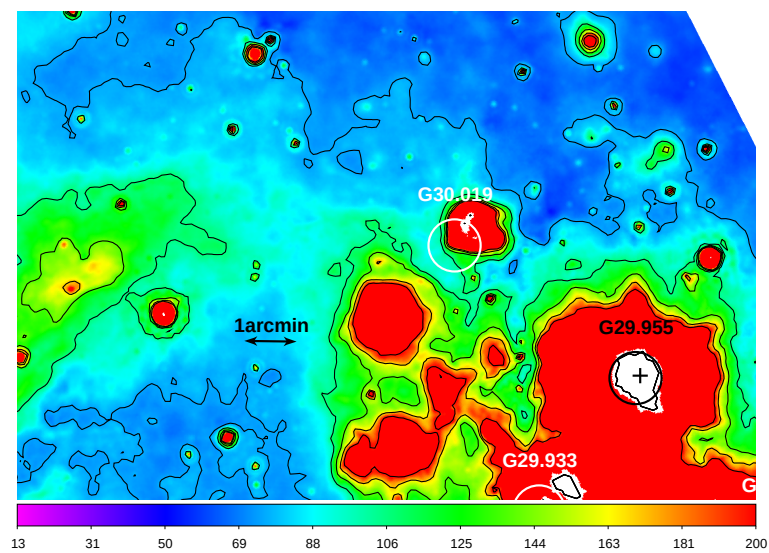


図 180 G030.019-00.050

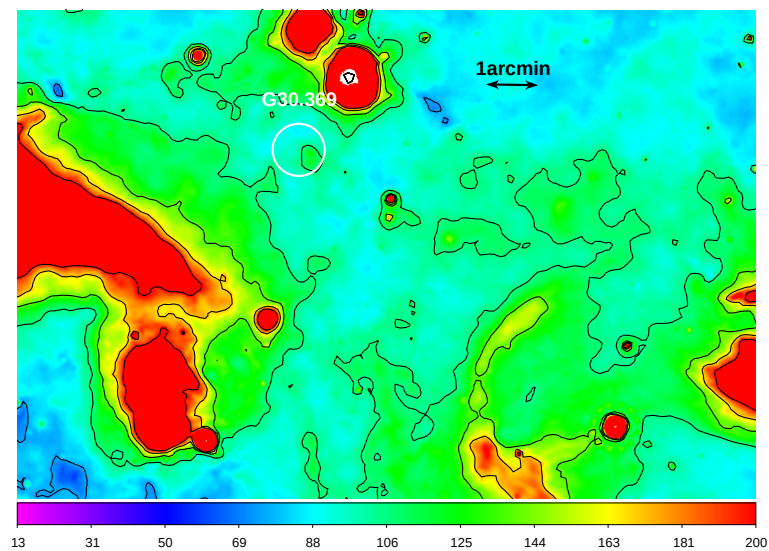


图 181 G030.369-00.134

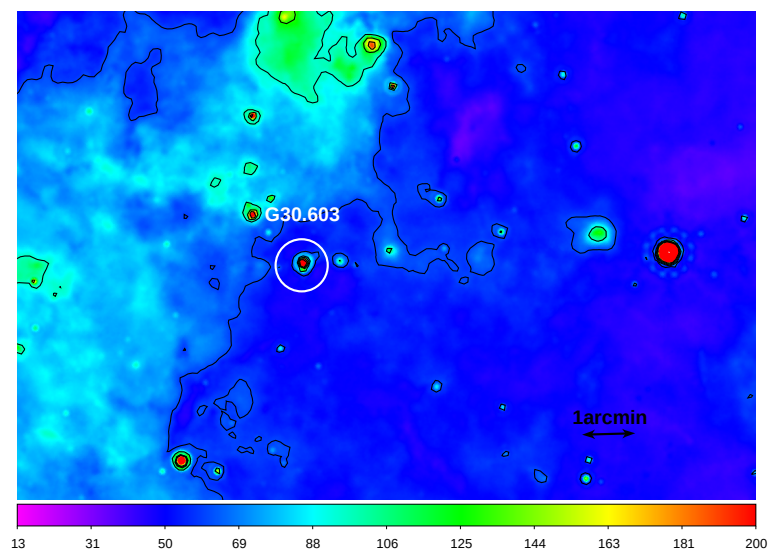


图 182 G030.603+00.175

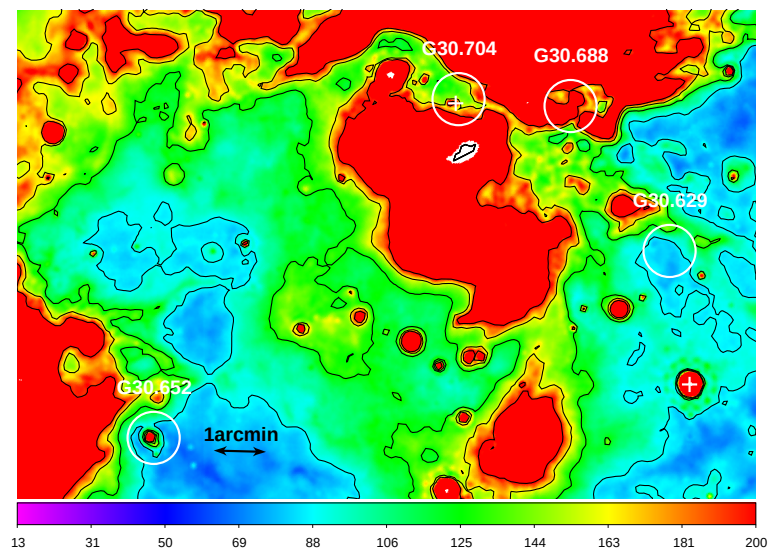


図 183 G030.629-00.029 G030.652-00.203 G030.688-00.039 G030.704-00.067

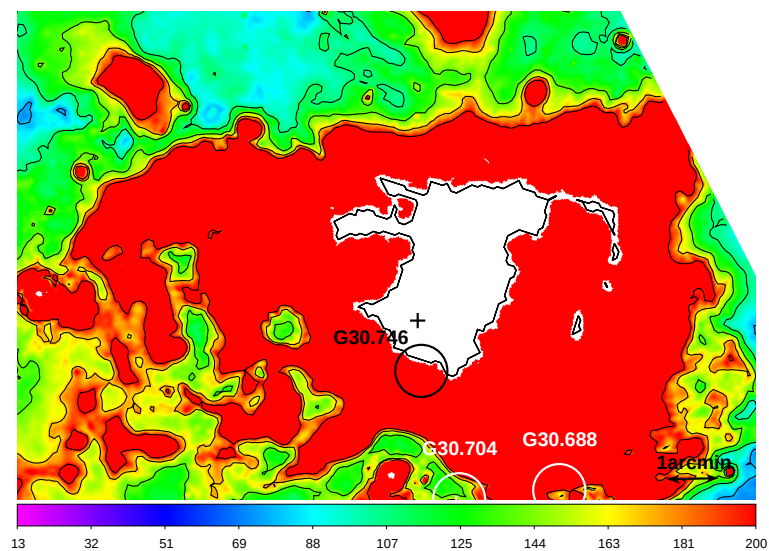


図 184 G030.746-00.059

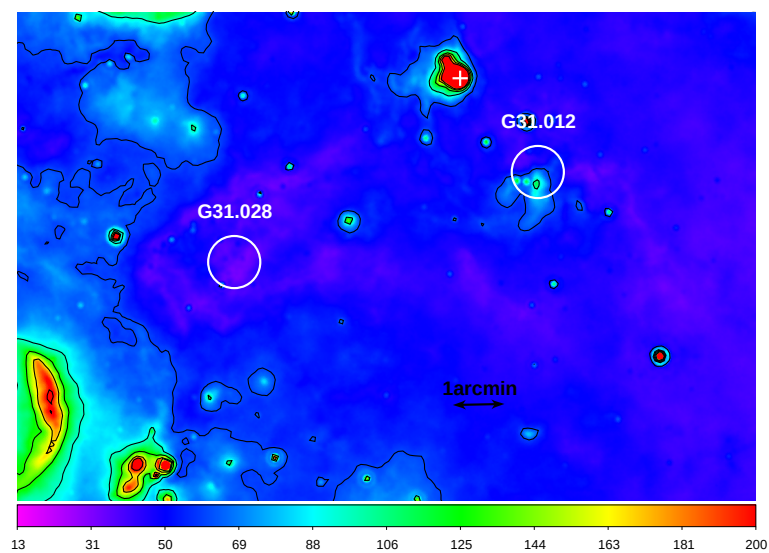


図 185 G031.012+0.363 G031.028+00.265

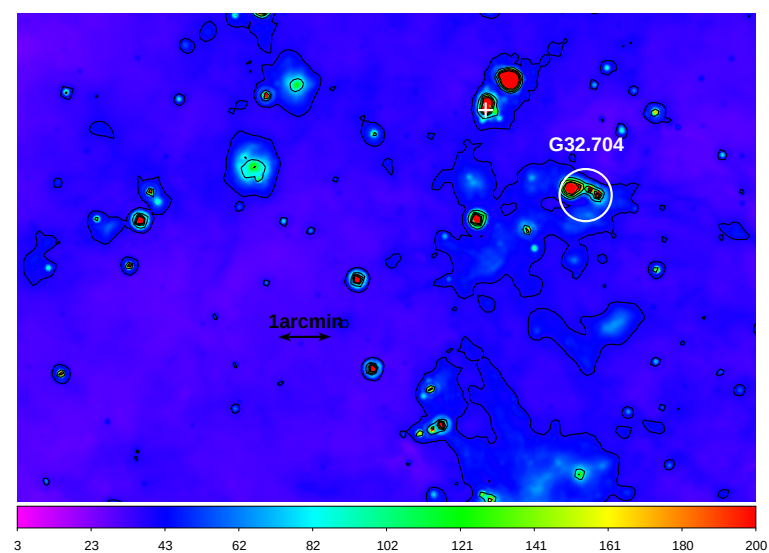


図 186 G032.704-00.059

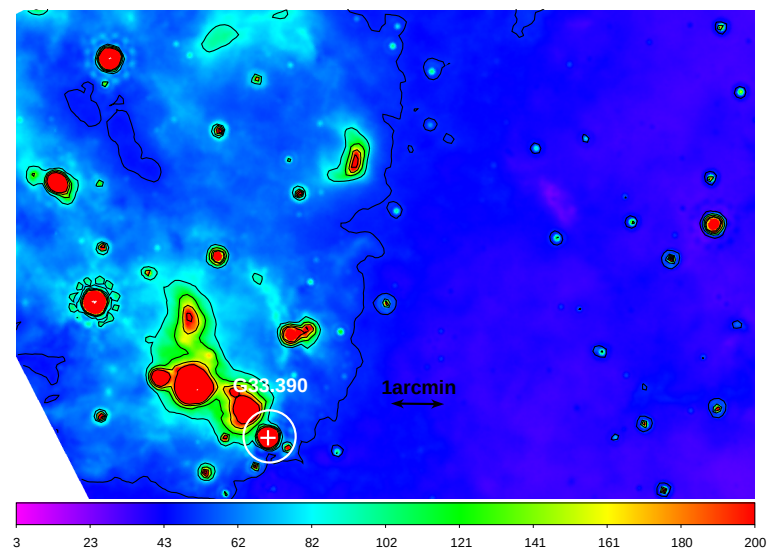


图 187 G033.390+00.008

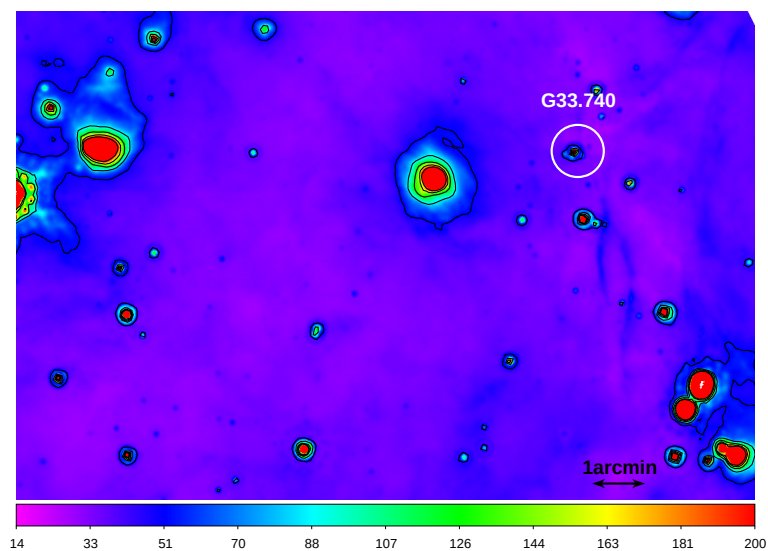


图 188 G033.740-00.017

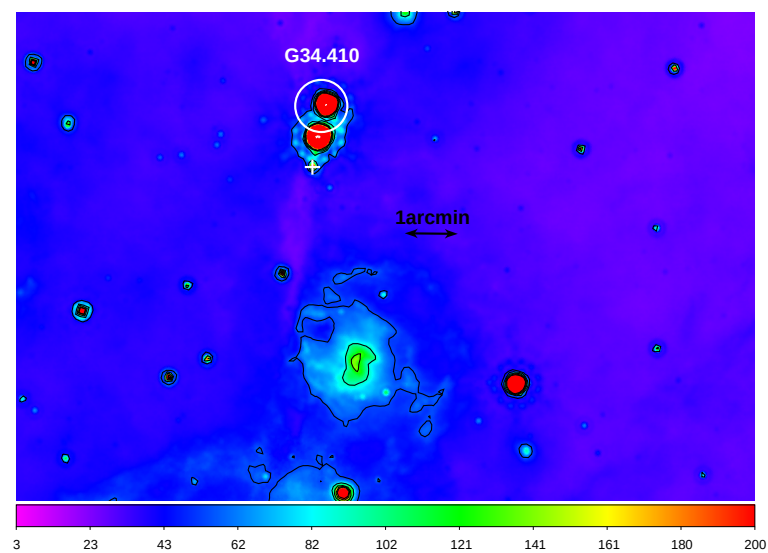


図 189 G034.410+00.232

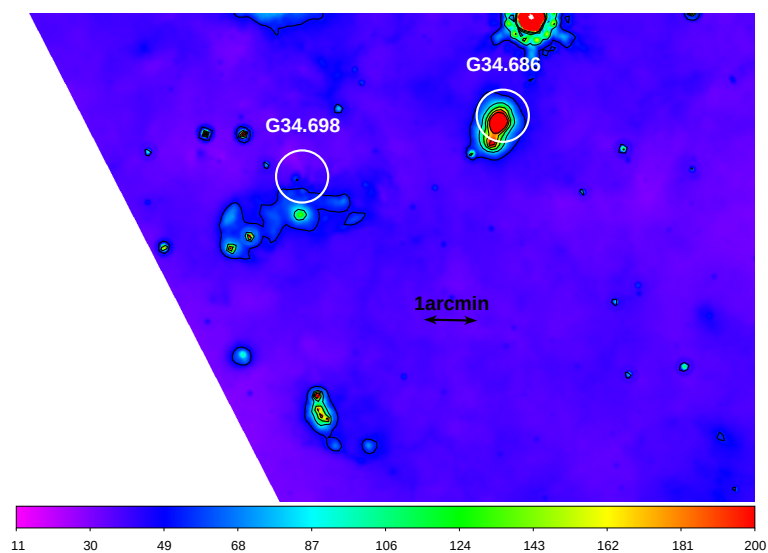


図 190 G034.686+00.070 G034.698+00.004

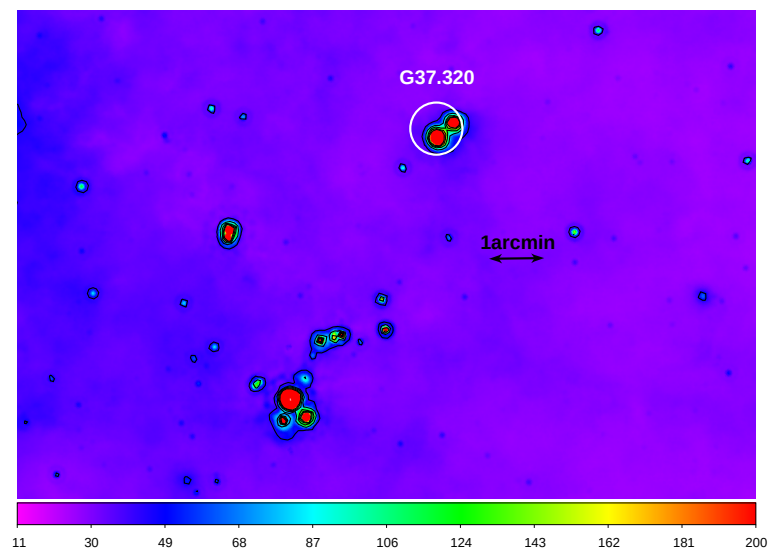


图 191 G037.320+00.164

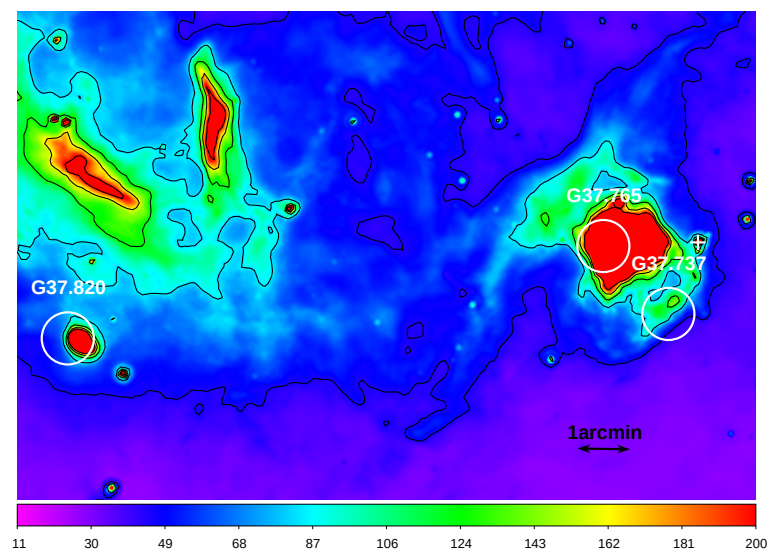


图 192 G037.737-00.208 G037.765-00.216 G037.820-00.382

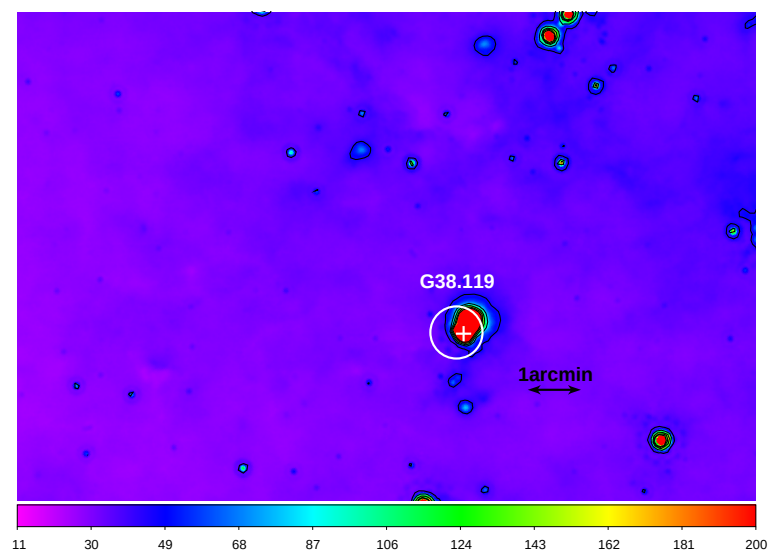


図 193 G038.119-00.232

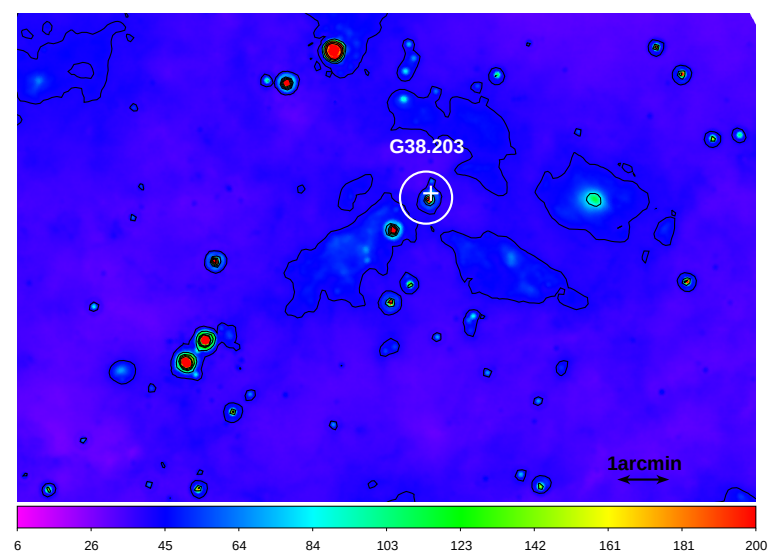


図 194 G038.203-00.068

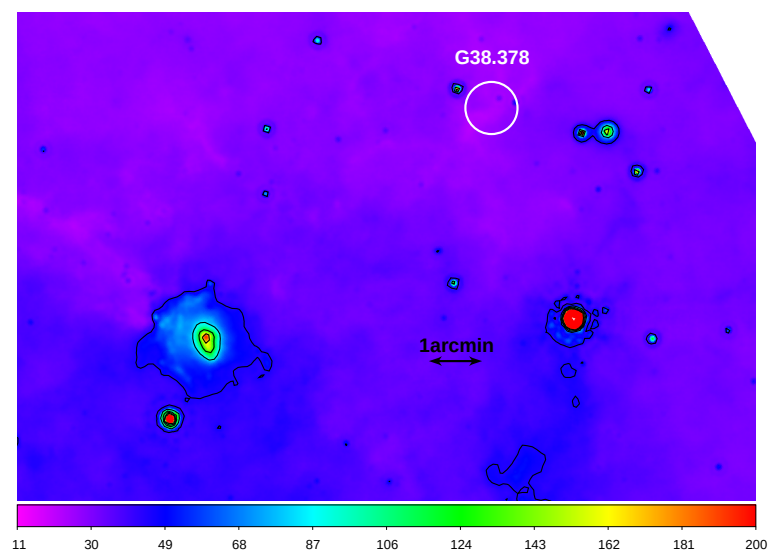


図 195 G038.378-00.020

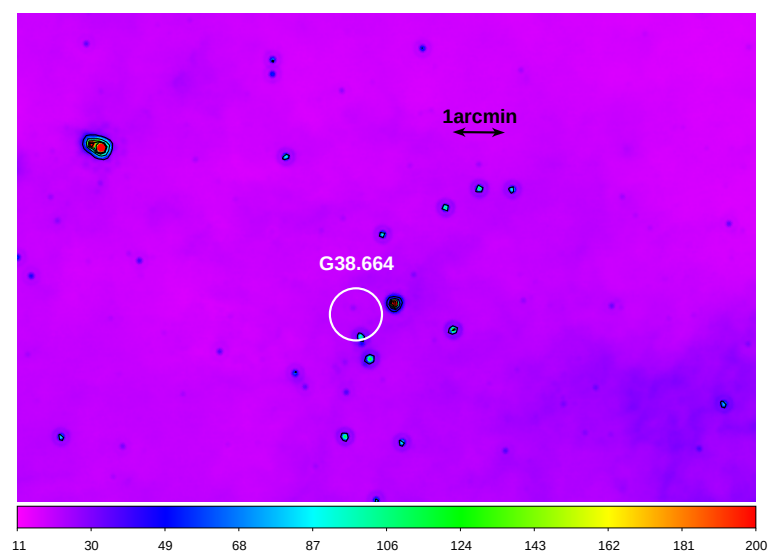


図 196 G038.664+00.226

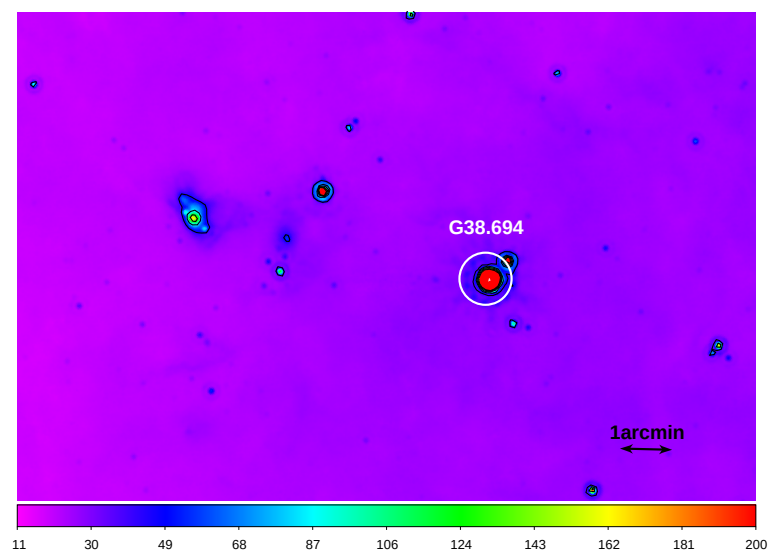


図 197 G038.694-00.454

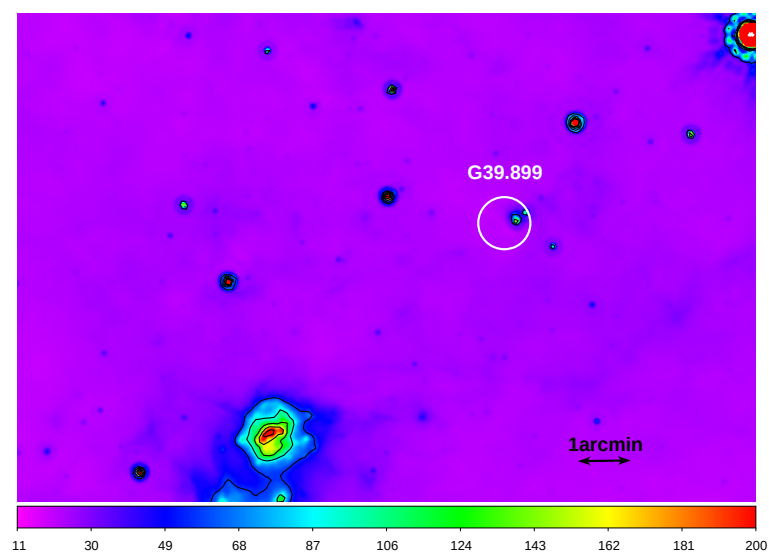


図 198 G039.899-00.079

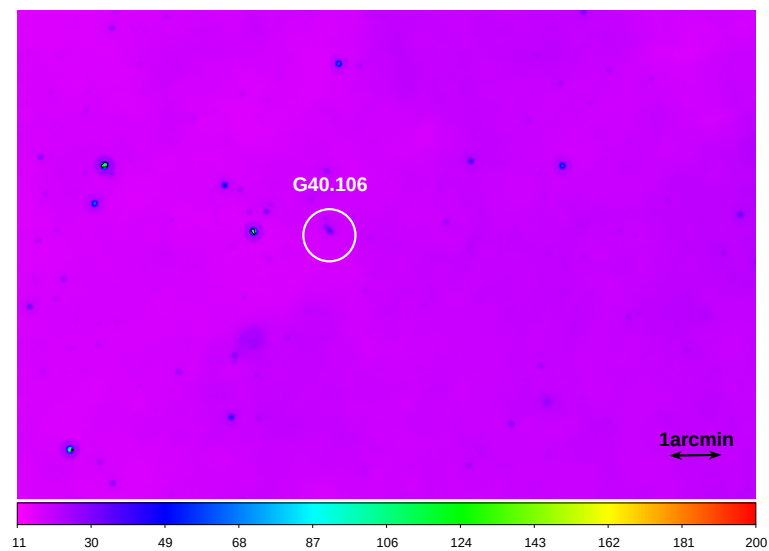


図 199 G040.106-00.517

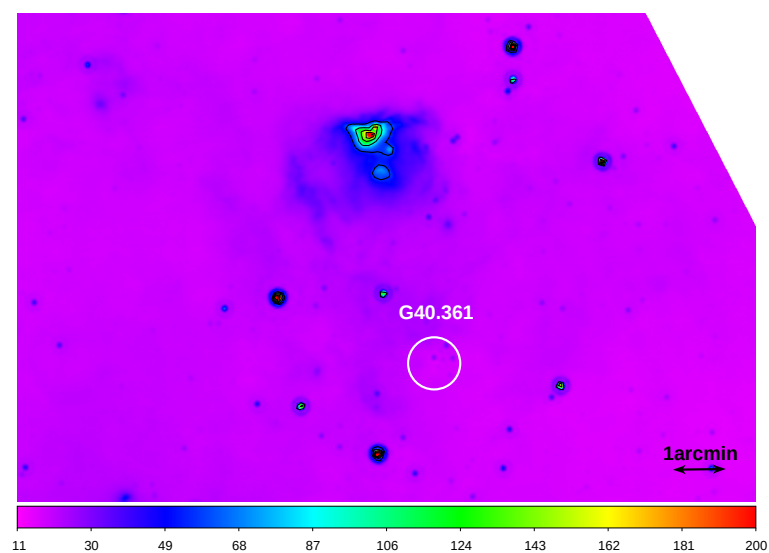


図 200 G040.361-00.061

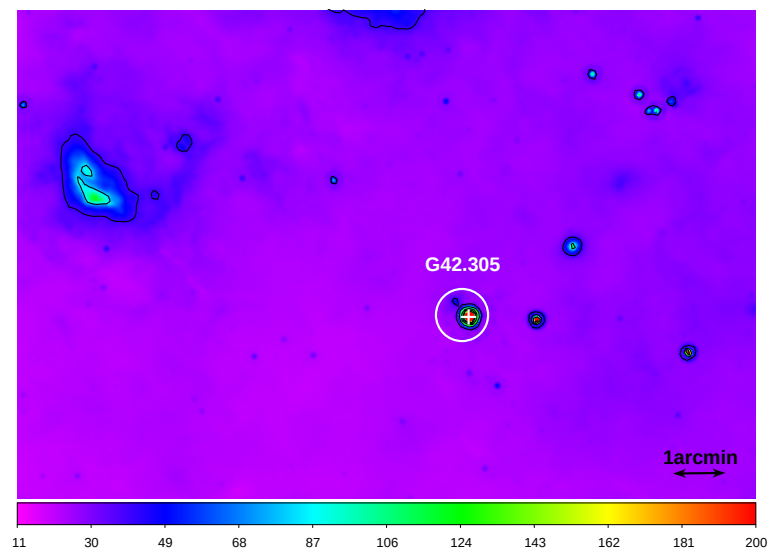


図 201 G042.305-00.301

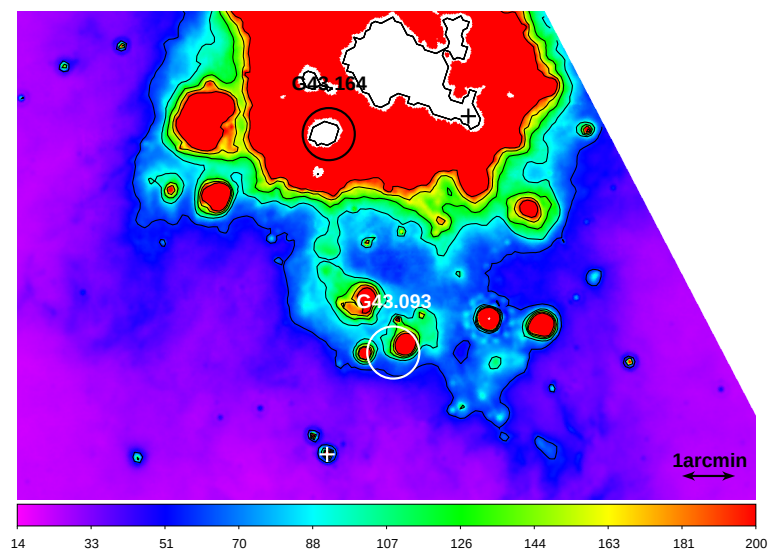


図 202 G043.093-00.043 G043.164-00.031

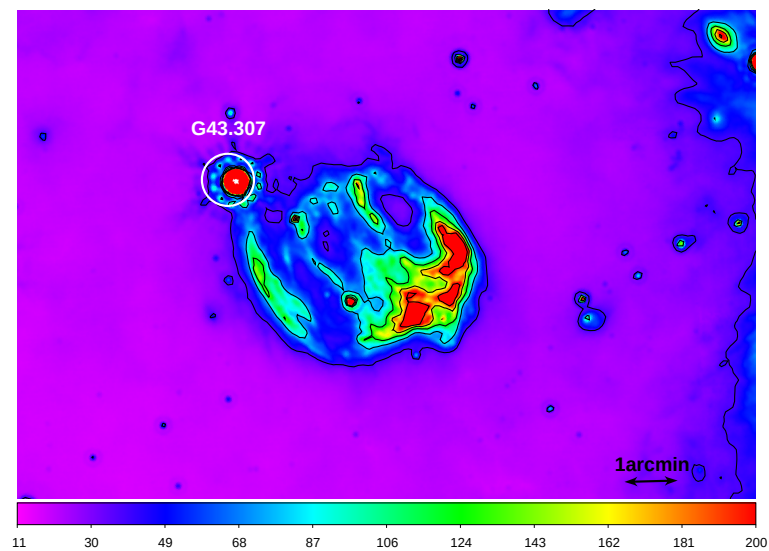


図 203 G043.307-00.213

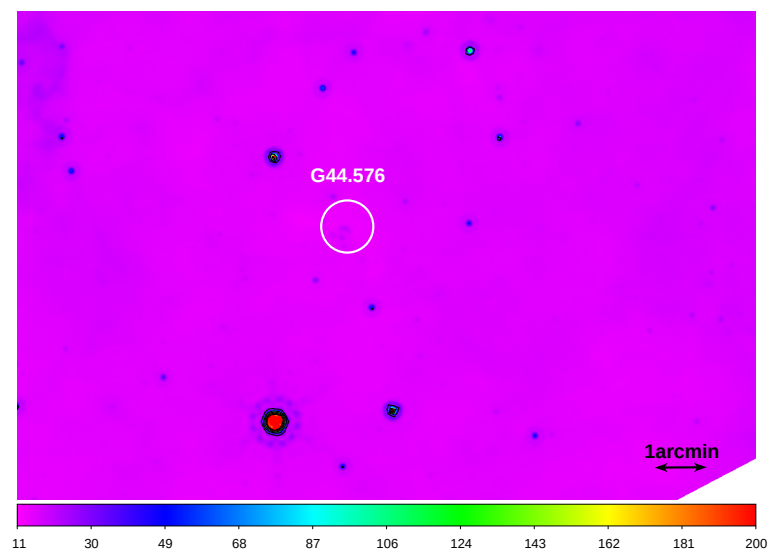


図 204 G044.576-00.449

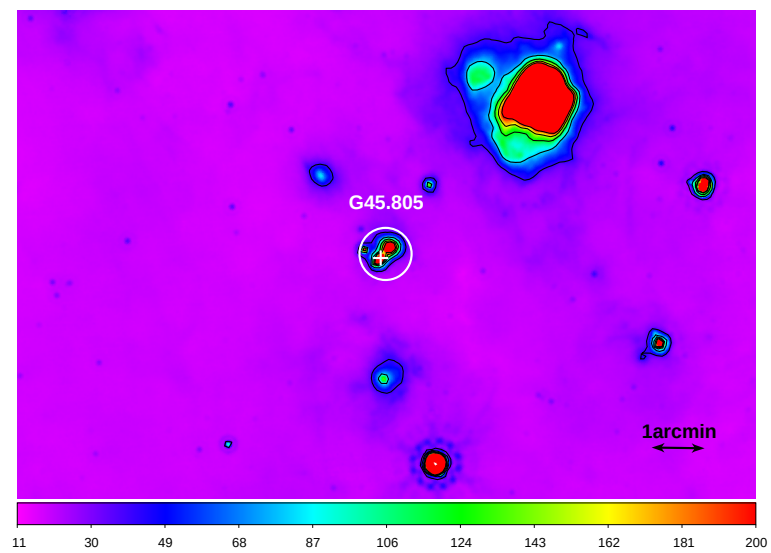


図 205 G045.805-00.355

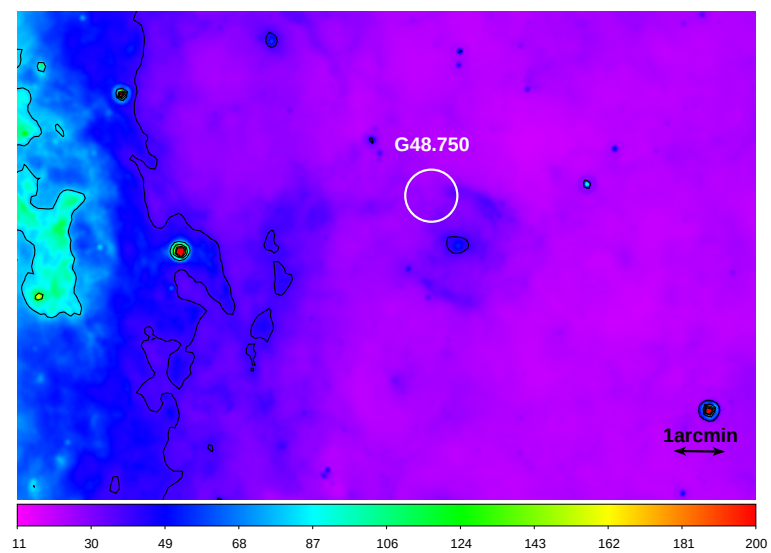


図 206 G048.750-00.142

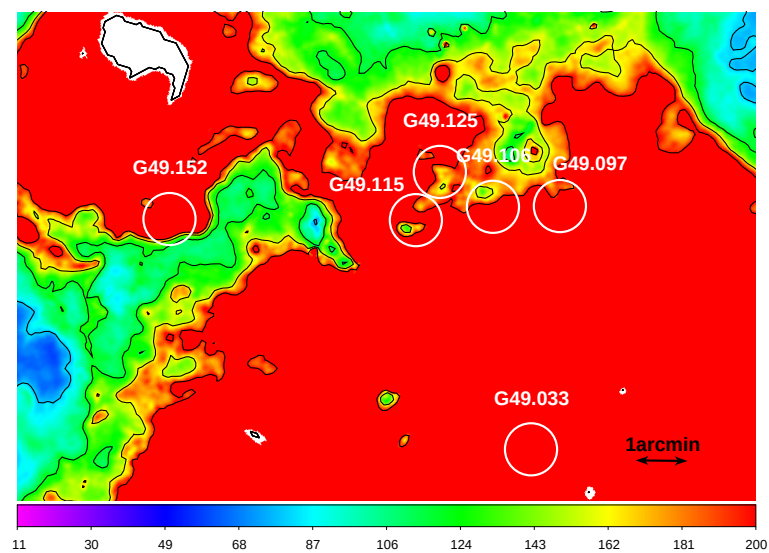


図 207 G049.033-00.298 G49.097-00.254 G049.106-00.272 G049.115-00.296 G049.125-00.282 G049.152-00.366

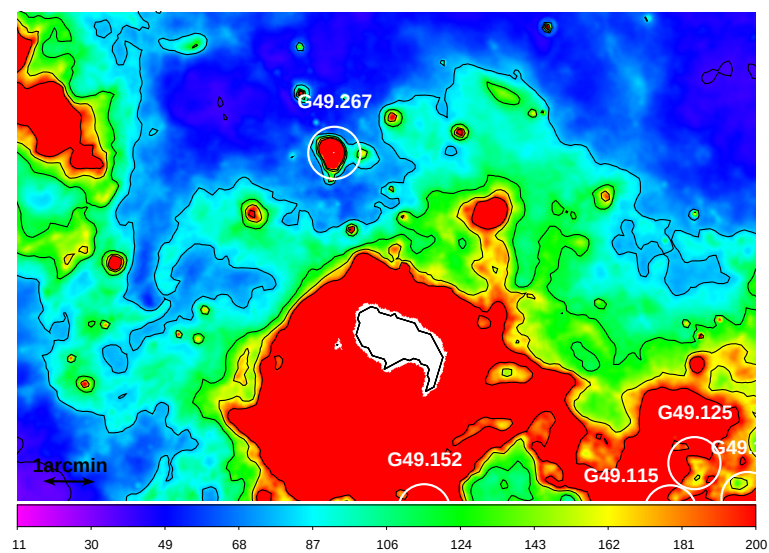


図 208 G049.267-00.338

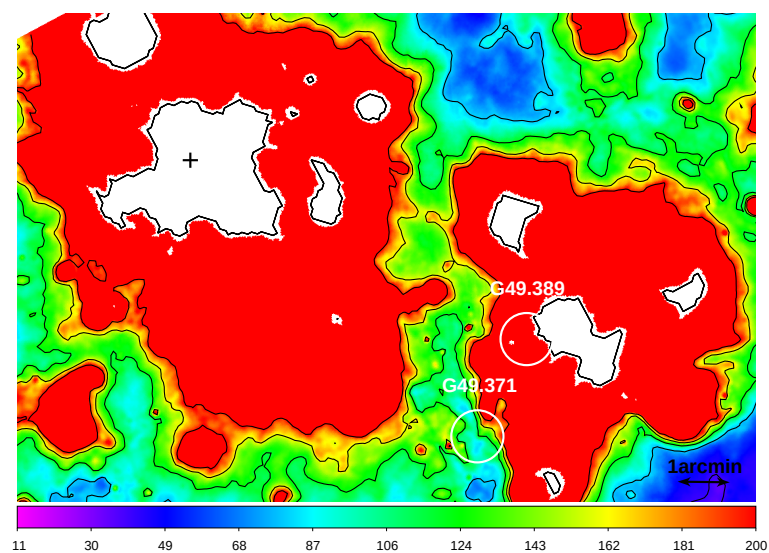


図 209 G049.371-00.350 G049.389-00.320

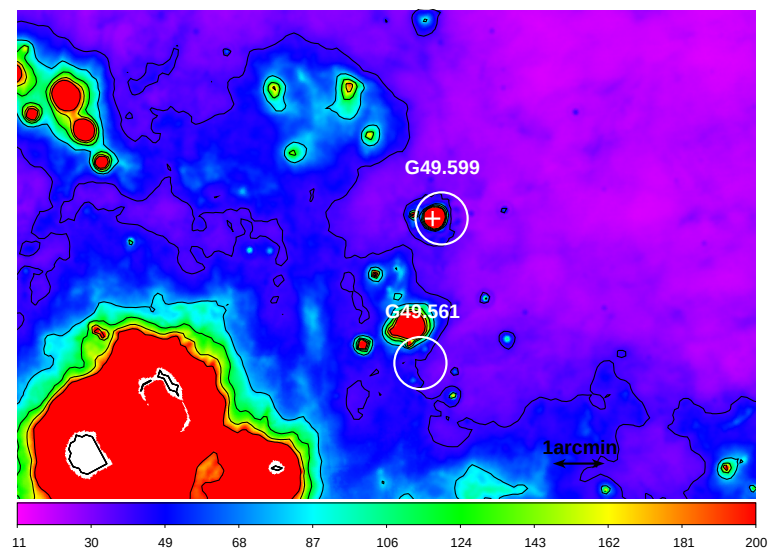


図 210 G049.561-00.276 G49.599-00.250

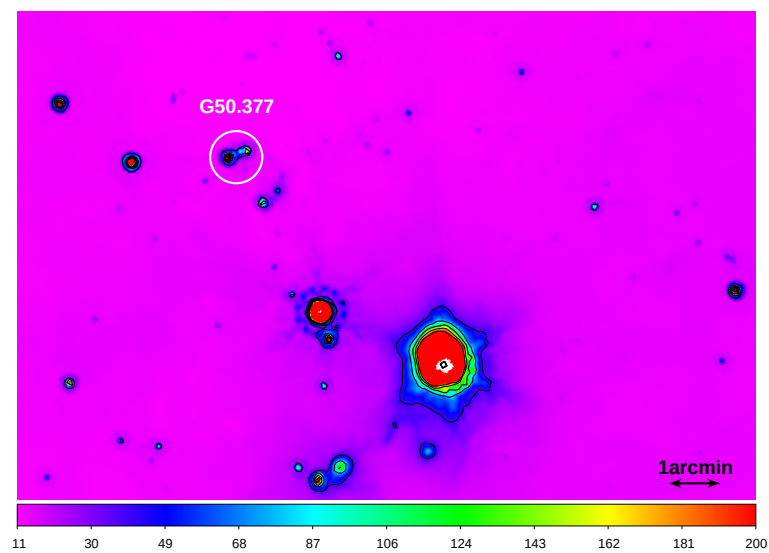


図 211 G050.377-00.417

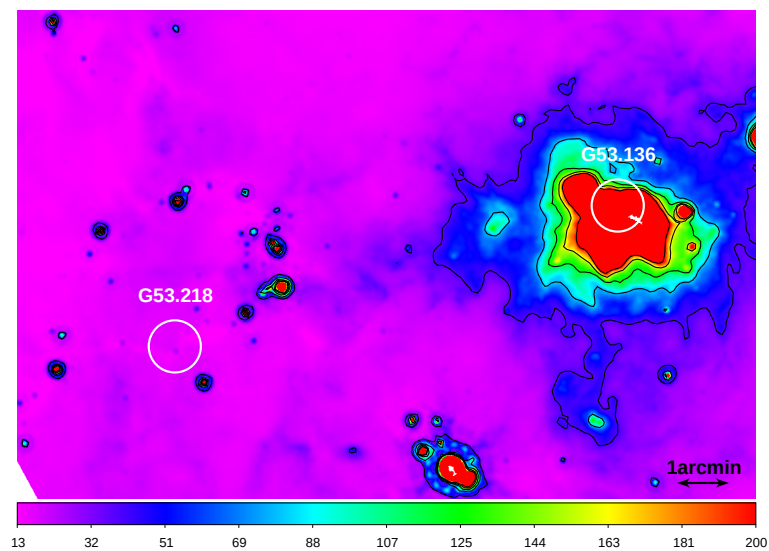


図 212 G053.136+00.028 G053.218+00.012

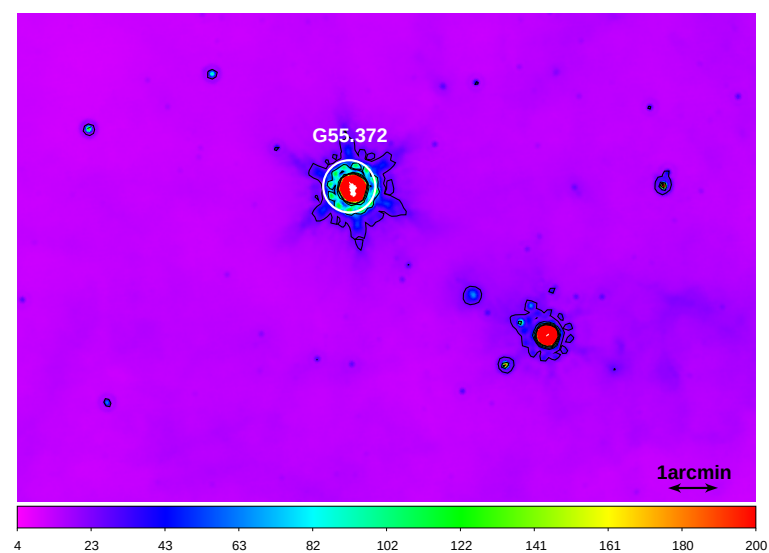


図 213 G055.372+00.185

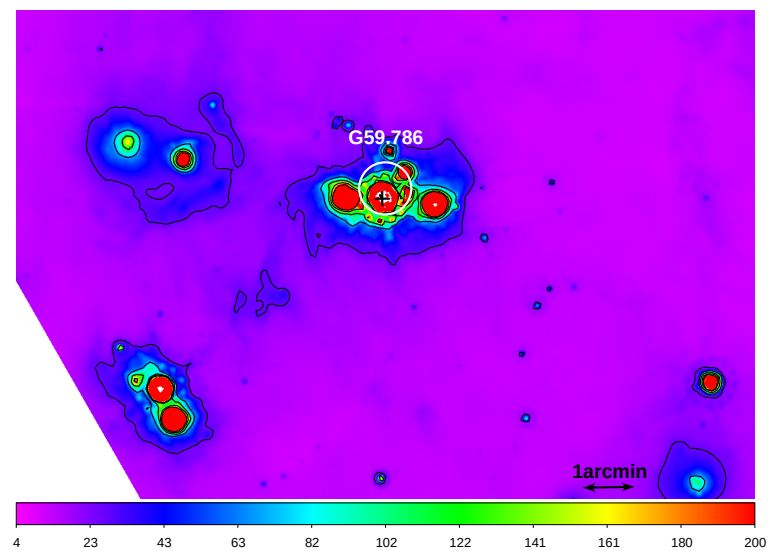


图 214 G059.786+00.067

参考文献

- [1] Breen,S.L.et al. 2015,MNRAS,450,4109
- [2] Busquet,G.et al. 2011,A&A,525,A141
- [3] Carey,S.J. et al. 2009,PASP,121,76
- [4] Caswell,J.L.et al. 2010,MNRAS,404,1029
- [5] Cragg,D.M.,et al. 2005,MNRAS,360,533
- [6] Cyganowski,C.J. et al. 2009,ApJS,702,1615
- [7] Ellingsen,S.P.,et al. 2007,IAU Symp. 242,213
- [8] Ellingsen,S.P.,et al. 2012,in proc. “Science with Parks @ 50 Years Young”
- [9] Green,J.A.et al.,2010,MNRAS,409,913
- [10] Green,J.A.et al.,2012,MNRAS,420,3108
- [11] Jørgensen,J.K., et al. 2004,A&A,416,616
- [12] Pandian,J.D.et al. 2011,ApJS,730,55
- [13] Reid,M.J. 2007,IAU Symp. 242,526
- [14] Rosolowsky,E.,et al. 2010,ApJS,188,123
- [15] Sakai,N. et al. 2010,ApJS,714,1658
- [16] Shirley,Y.L.,et al. 2013,ApJS,209,2
- [17] Xu,Y.,et al. 2009,A&A,507,1117
- [18] 赤羽賢司, 海部宜男, 田原博人 宇宙電波天文学, 共立出版
- [19] 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
- [20] 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
- [21] Cormac,R.Purcell,2006,The University of New South Wales, 博士論文
- [22] 石井翔太,2014, 茨城大学大学院修士論文
- [23] 沖本有,2015, 茨城大学大学院修士論文
- [24] 永瀬桂,2015, 茨城大学大学院修士論文
- [25] 安井靖堯,2015, 茨城大学大学院修士論文