

修 士 学 位 論 文

6.7GHz メタノールメーザー探査に基づく CORNISH HII 領域との共存期間の導出

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

1 5 N M 1 6 2 F

柴 田 裕 輝

論文要旨

大質量星 ($> 8M_{\odot}$) は成長が速く、形成領域が遠方に存在することに加え、星自身が高密度なガスに埋もれているため、可視光での高分解能観測が困難である。それゆえ大質量星の形成過程は未だ多くの謎に包まれている。大質量星形成領域が選択的に示す現象に、メタノール分子によるメーザー放射がある。またその出現時期は、主に原始星段階で生じると考えられており、星形成初期の指標として扱われている。一方で、大質量星は主系列到達後に紫外線を多く放射することから、周囲の中性水素ガスを電離し Ultra Compact (UC) H_{II} 領域という特有な電離領域を形成する。 UCH_{II} 領域の形成には主系列に到達するため、星形成後期の指標として扱われる。

しかし、大質量星形成領域の研究が進むにつれ、星形成後期の指標の UCH_{II} 領域にもメタノールメーザーが付随する例が見受けられるようになってきた。大質量星が成長し、 UCH_{II} 領域を形成する過程でメタノールメーザーが消失するのであれば、両者の共存期間が存在すると考えられる。この共存期間の長さを定量的に導出できれば、メタノールメーザーの付随有無により大質量星の進化段階をより明確に位置付けられると期待できる。

そこで本研究は、発現時期が明らかになっている UCH_{II} 領域を対象に、日立 32m 電波望遠鏡による 6.7GHz メタノールメーザー探査を実施した。 UCH_{II} 領域のサンプルには、過去の無バイアス探査によって作成された CORNISH データベース中の 240 天体を利用した。

観測の結果、 UCH_{II} 領域の 15% にメタノールメーザーが付随しており、共存期間が約 $6 \times 10^3 - 6 \times 10^4$ 年であるとの結論が新たに得られた。この結果を踏まえ、メタノールメーザーの消失の要因を探るべく、2 つの仮説について検証をした。まず、 H_{II} 領域は膨張しつつ成長をするため、メタノールメーザーが付随する UCH_{II} 領域はサイズが小さいとの仮説を立てた。メーザーの付随有無ごとにサイズと天体数の累積頻度分布を作成し、Kolmogorov-Smirnov (K-S) 検定を用いた定量的な検定を行った。その結果、メタノールメーザーの付随有無により UCH_{II} 領域のサイズに有意な差は見受けられなかった。次に、メタノールメーザーが付随する UCH_{II} 領域では励起星がより深くダストに埋もれていることにより、2 色図上で赤い (若い) 側へ偏った分布をすると仮説を立てた。Spitzer IRAC, MSX, AKARI FIS で得られた中間赤外線及び遠赤外線のフラックスから 2 色図を作成し、両軸に対して K-S 検定を行なった。その結果、2 色図上での分布に有意な差を確認することができなかった。以上を踏まえると、6.7GHz メタノールメーザーの消失は UCH_{II} 領域内部の局所的な物理条件に依存する可能性がある。

今回の考察では、 UCH_{II} 領域を形成する電離星の成長速度の違いを考慮していない。今後は電離星のスペクトルタイプにも注目し、メタノールメーザーの付随有無と関連があるかを調査する必要がある。

目次

1	研究背景	3
1.1	大質量星	3
1.1.1	大質量星の形成過程	3
1.2	H _{II} 領域	4
1.2.1	H _{II} 領域の形成	4
1.2.2	H _{II} 領域の分類	5
1.2.3	H _{II} 領域の膨張過程	6
1.2.4	UCH _{II} 領域の寿命	7
1.3	メーザー現象	9
1.3.1	メーザーの原理	9
1.3.2	メタノールメーザー	9
1.4	研究目的	10
1.4.1	先行研究	10
1.4.2	研究目的	11
1.4.3	CORNISH survey	12
2	観測	13
2.1	観測概要	13
2.2	観測方法	13
2.3	観測天体の選出	14
2.3.1	メーザー付随の判定法	14
2.4	追観測	15
3	結果	17
3.1	付随有無の判断	17
3.2	新検出天体	19
4	考察	21
4.1	CORNISH H _{II} 領域と 6.7GHz メタノールメーザーの共存期間の導出	21
4.2	H _{II} 領域のサイズと 6.7GHz メタノールメーザーの付随有無の相関	21
4.2.1	H _{II} 領域のサイズの導出	21
4.2.2	メタノールメーザー付随有無ごとのサイズの相関	22
4.3	UCH _{II} 領域を取り巻くダストによる赤化と 6.7GHz メタノールメーザーの付随有無の相関	23
4.3.1	フラックス値の取得	24
4.3.2	絶対等級への換算	24

4.3.3	メーザー付随の有無による 2 色図上の分布の違い	25
5	まとめ	30
	謝辞	31
	付録 A CORNISH H _{II} 領域 と 6.7GHz メタノールメーザーの空間分布の比較	32
	付録 B 観測スペクトル	39
	付録 C モニター観測スペクトル	47
	付録 D kinematic distance 法	48
	付録 E H _I Self-Absorption (H _I SA) による near/far の切り分け	49
	付録 F Kolmogorov-Smirnov (K-S) 検定	50
	付録 G CORNISH データベース	51

1 研究背景

1.1 大質量星

1.1.1 大質量星の形成過程

恒星は自身の質量によって光度や寿命、及び形成過程が異なる。形成過程を考える際には、中小質量星 ($< 8M_{\odot}$) と大質量星 ($\geq 8M_{\odot}$) の 2 つに大別される。中小質量星は地球の近傍に数多く存在するため、観測によって次のような形成過程のシナリオが確立されている。

- (1) 高密度な分子雲コアの重力崩壊により、内部に原始星が形成される
- (2) 周囲の星間ガスを降着し、原始星の質量が増加する
- (3) ケルビン-ヘルムホルツのタイムスケールで収縮をし、水素燃焼を開始する
- (4) 内部圧力によって恒星の大きさが保たれ、主系列星となる

一方で、観測に基づく大質量星形成過程の解明には、次の 3 つの要因による困難がある。第一に大質量星は進化が速いため観測可能なサンプルが少ないこと、第二に形成領域が高密度なガスに埋もれており、可視光での直接的な観測ができないことが挙げられる。また第三に、形成領域が地球から遠方にあるため、高分解能の観測が実施しにくいことも要因となっている。

大質量原始星段階の形成過程は、観測条件の制限が厳しいためシナリオの確立までには至っていないが、理論計算をもとに 2 つの説が提唱されている。1 つ目が降着説 (McKee & Tan 2003) である。大質量星が中小質量星形成と同等の質量降着率 ($10^{-5} M_{\odot}\text{yr}^{-1}$) を持ち、大質量星の典型的な寿命 (10^7 yr) の間に成長する場合を理論的に計算すると、およそ $20 \sim 30 M_{\odot}$ まで成長する。また降着進化時には原始星周囲に星周円盤を形成することから、円盤方向は光学的に厚く、極方向は光学的に薄い円盤モデルを考えることができる。ここで中小質量星より高い質量降着率を用いて計算を行うと、数十 $M_{\odot}$ 以上の大質量星も形成可能と考えられている。

2 つ目に星同士の衝突・合体により形成される合体説 (Bonnell et al. 1998) がある。大質量星は形成初期段階の星も含め、星団の中央部に多く存在している。OB association のように力学的に緩和した系では星ごとに運動エネルギーが等分配されるため、大質量星の運動速度が小さくなり、中央に集まる効果を説明できる。ところが星形成中で若く、力学的に緩和されないような系でも大質量星は中央に多く観測されるため、星密度の高い環境下で形成される可能性も考えられている。実際にこの過程が起こるためには、 10^8 個 pc^{-3} 以上の星の密度が必要だが、現在までに上記を満たす環境は発見されていない。

大質量星の原始星段階の形成過程には諸説あるが、中心の原始星が主系列星に達し、可視光で光学的に薄くなるまでの形成過程をまとめると図 1 のようになる。なお、図中の原始星段階の記述は降着説に基づいて記載した。

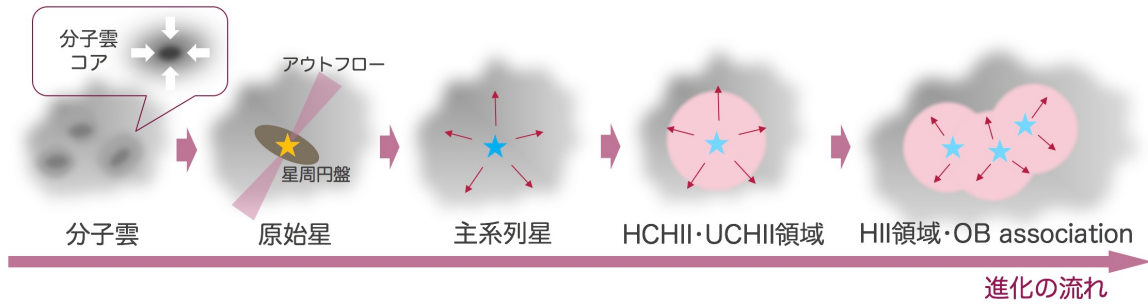


図1 大質量星の形成過程の概略. Purcell (2006) を参照

大質量星は分子雲内の高密度な分子雲コア中で形成が始まる。降着説・合体説のいずれにせよ、原始星が質量降着を継続すると、やがて主系列星へと達する。主系列星は紫外線光子を放射し、周囲のガスを電離した領域 (Hyper Compact (HC) H_{II} , Ultra Compact (UC) H_{II} 領域) を形成する (§1.2.2 で詳述する)。より進化が進むとさらに大きな H_{II} 領域や OB association を形成する。 H_{II} 領域の成長に伴い電離ガスの量は増えるものの、星風が周囲のガスを吹き飛ばす作用によって密度が下がり、可視光で直接観測が可能となる。なお、大質量星は多数の星が密集した星団として形成されるため、個々の恒星を分離できる観測をするためには、近赤外線の高解像度撮像や電波干渉計技術 (分解能 $\leq 1''$) が必要とされる。

1.2 H_{II} 領域

1.2.1 H_{II} 領域の形成

質量の大きな主系列星は、表面温度が十分に高温のため大量の紫外線 (電離光子) を放射する。これにより大質量星周辺の水素ガスは 13.6 eV より高エネルギー (言い換えると 912 Å より短波長) の電離光子を受けて電離し、 H_{II} 領域を形成する。

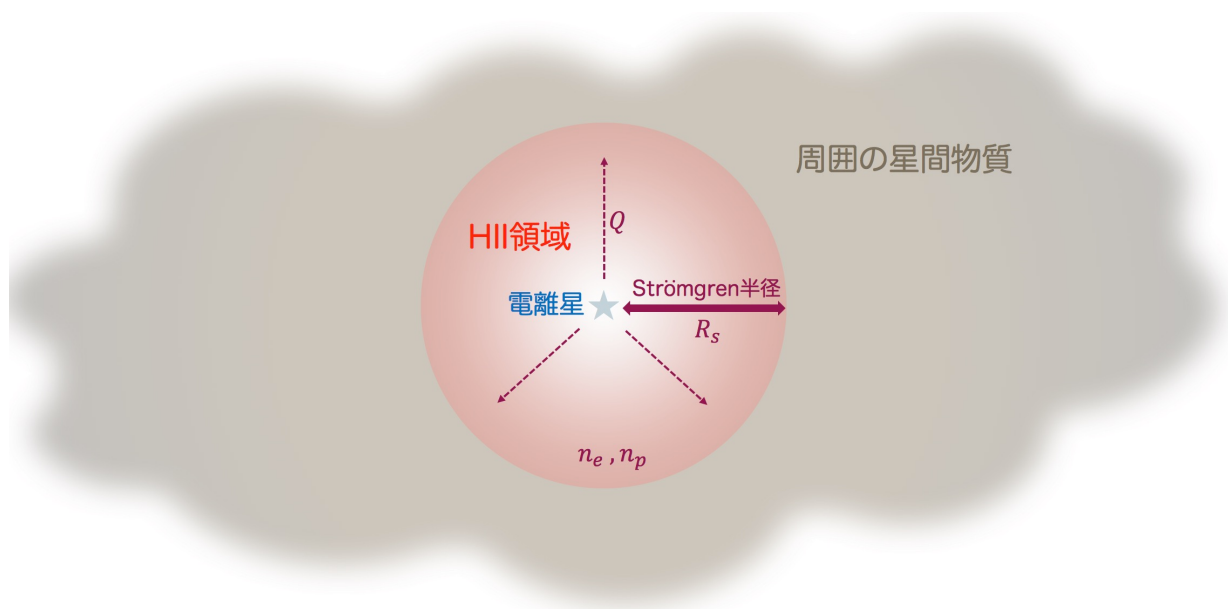


図2 Strömgren 球モデル

H_{II} 領域が拡大する様子を記述する古典的モデルとして、Strömgren 球モデルがある。1 個の大質量星の周囲に、個数密度 n の一様な水素原子ガスが十分に遠くまで分布している場合を仮定する。星間ダストの影響を無視すると、電離領域は球対称に形成され、電離と再結合が釣り合う定常状態に達する。この電離領域の半径を Strömgren 半径 R_s と呼び、以下の式で求められる。

$$Q = \frac{4}{3}\pi R_s^3 n_e n_p \alpha \quad (1)$$

左辺の Q [s^{-1}] は、単位時間あたりに大質量星から放射される電離光子の個数で、右辺は電子・陽子の衝突による単位時間あたりの再結合の回数を示す。なお、 n_e , n_p はそれぞれ球内の電子、陽子の個数密度 [cm^{-3}] である。 α は再結合係数で、全ての準位に自由電子が再結合する割合の総和である。温度の関数で近似的に

$$\alpha = 4 \times 10^{-13} (10^4 T^{-1})^{0.73} [cm^3 s^{-1}] \quad (2)$$

が成り立つ。

ただし実際の電離ガス領域において、主量子数 $n = 1$ の基底状態への再結合時に出る光子は、13.6 eV 以上のエネルギーを持つ。これらの光子は近傍の中性水素原子を電離してしまうので、実質的な再結合係数は基底状態への再結合を除いて求められる。この実質再結合係数を α_B と書くと、近似的に

$$\alpha_B = 2.6 \times 10^{-13} (10^4 T^{-1})^{0.85} [cm^3 s^{-1}] \quad (3)$$

となる。

大質量星の周囲にできる H_{II} 領域の大きさが、上記 Strömgren 半径の中に限られる場合、電離する中心星が H_{II} 領域の外径を決めるため、「電離限界 (ionization-bounded) の H_{II} 領域」と呼ぶ。一方で、中性水素ガスの分布が Strömgren 半径の内部に収まる場合は、H_{II} 領域の大きさはガスの分布範囲で決まるため、「密度限界 (density-bounded) の H_{II} 領域」と呼ぶ。

1.2.2 H_{II} 領域の分類

【サイズによる分類】

近年では電波干渉計や赤外線観測などによる分解能の向上に伴い、小さな H_{II} 領域まで発見されるようになった。星形成の指標として H_{II} 領域をサイズごとに分類したものが表 1 である。これらのうち、HCH_{II} 領域、UCH_{II} 領域と呼ばれている H_{II} 領域は、1 個から数個の電離星によって形成されるものである。それに対して、よりサイズが大きいとされる H_{II} 領域は、系外銀河でも観測されるような多数の OB 型星によって励起される。大質量星が一生を終え、紫外線光子の供給が終わると H_{II} 領域は消失する。

表 1 サイズによる H_{II} 領域の分類 (Kurtz 2005)

分類	サイズ [pc]	電子密度 [cm ⁻³]	電離ガス質量 [$M_{\odot}$]
Hyper Compact	≤ 0.03	$\geq 10^6$	$\sim 10^{-3}$
Ultra Compact	≤ 0.1	$\geq 10^4$	$\sim 10^{-2}$
Compact	≤ 0.5	$\geq 5 \times 10^3$	~ 1
Classical	~ 10	~ 100	$\sim 10^5$
Giant	~ 100	~ 30	$10^3 \sim 10^6$
Super Giant	≥ 100	~ 10	$10^6 \sim 10^8$

【形状による分類】

干渉計を用いて Compact H_{II} 領域より小さな H_{II} 領域を対象に電波連続波の観測をする
と、彗星状、コア・ハロー状、シェル (球殻) 状、不定形、球形 (未分解) のように、様々な
形状を示す。Wood & Churchwell (1989a) では、以下の図 3 のように形状ごとに H_{II} 領域
を分類した。H_{II} 領域の形状は、大質量星近傍の物質分布が反映されていると考えられる。

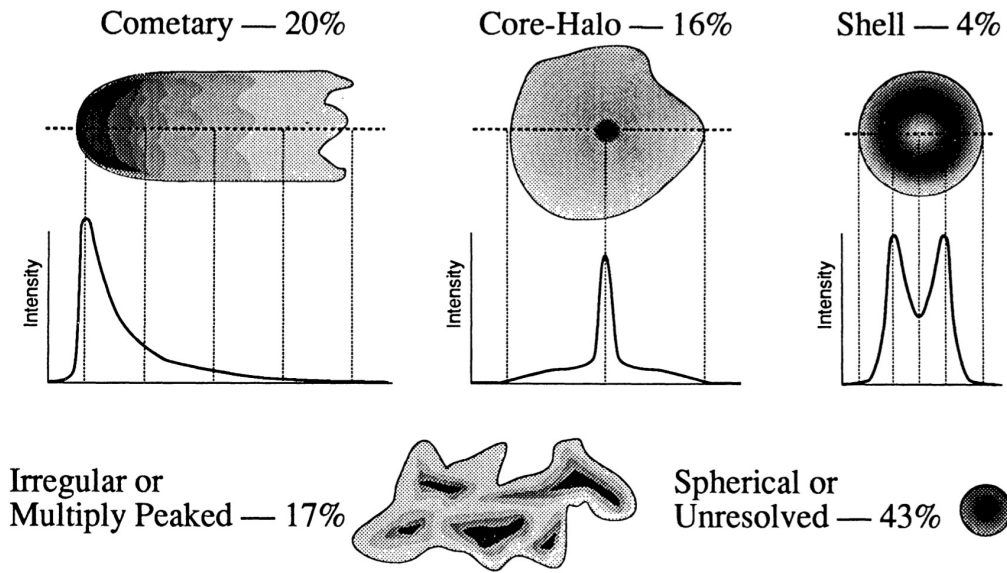


図 3 形状による H_{II} 領域の分類 (Wood & Churchwell 1989a)

1.2.3 H_{II} 領域の膨張過程

H_{II} 領域の大きさは Strömgren 球モデルで記述できるが、H_{II} 領域の膨張進化は主に 2 つ
の段階 (輻射による膨張と圧力による膨張) を経て行われる。一様に十分な範囲まで広がっ
た数密度 n_{H_2} の水素分子ガス中に大質量星が生まれ、紫外線放射を始めたと仮定する。

【第一段階 (輻射による膨張)】

水素分子を電離する過程は 2 つ存在する。まず 1 つ目に水素原子の解離エネルギーである
14.7eV より高エネルギーの紫外線は水素分子を解離し、直ちに水素原子を電離する。2 つ目
には、始めに 11.2-13.6 eV の遠紫外線 (Lyman-Werner 帯) が水素分子を励起状態にする。

励起された水素分子のうち 85-90% は、振動回転遷移の線スペクトルを放射することで基底状態に戻るが、残りの 10-15% は水素分子を解離し、光解離領域 (PDR; Photo-Dissociation Region) を形成する。ここに 13.6 - 14.7 eV のエネルギーを持つ電離光子が作用し、PDR で生成された水素原子を電離することで電離領域を保ち続ける。第一段階では電離水素の再結合量が少なく、 H_{II} 領域の内外で水素原子の数密度がほぼ一定であるため、 H_{II} 領域は密度 n_H の Strömgren 半径まで急激に広がる。

【第二段階 (圧力による膨張)】

H_{II} 領域の内部は、紫外線の吸収に伴って次第に温度が上昇する。また水素原子が電離することにより、粒子数が倍増する。このため非平衡状態となった H_{II} 領域は、周囲の星間物質と圧力平衡になるまでゆっくりと膨張する。この時、 H_{II} 領域の大きさは第一段階のおよそ 100 倍まで膨張する。

1.2.4 UCH_{II} 領域の寿命

UCH_{II} 領域の寿命は Wood & Churchwell (1989a,b) により、理論及び観測に基づいて求められている。

【理論モデルから求まる寿命】

UCH_{II} 領域を形成できる恒星は O3 ~ B3 型にクラス分けされているが、 UCH_{II} 領域の平均の寿命を求めるにあたり、分子雲コア中に孤立した単一の O6 型星が作り出す UCH_{II} 領域の寿命を見積もった。O6 型星は先行研究の観測に基づいて導出された、大質量星のスペクトルタイプの平均である。Very Large Array (VLA) の観測により、 UCH_{II} 領域は電子密度 $n_e \sim 5 \times 10^4 \text{ [cm}^{-3}\text{]}$ 、半径 $r \sim 0.05 \text{ [pc]}$ であることがわかっている。また O6 型星は、単位時間あたりに $Q \sim 1.2 \times 10^{49} \text{ [s}^{-1}\text{]}$ の紫外線光子を放射する (Panagia 1973)。

O 型星が紫外線光子を放射すると、第一段階の膨張により電離面は短時間で Strömgren 半径まで一気に広がる。電離面の拡大速度は最初こそ速いものの、電離面が広がるにつれ電離すべき水素原子が増加するため、音速程度まで減少する。衝撃波面が到達するまでにかかる時間は $\sim 4(n_0\alpha_B)^{-1}$ 程度になる。ここで n_0 は分子雲中の粒子の数密度、 α_B は実質再結合係数で $\alpha_B \sim 3 \times 10^{-13} \text{ [cm}^3 \text{ s}^{-1}\text{]}$ を示す。 $n_0 \sim 10^5 \text{ [cm}^{-3}\text{]}$ とすると、第一段階の膨張にはわずか数年間しかかからず、星形成のタイムスケールで見た場合、観測による直接的な確認は難しい。初期の H_{II} 領域中の電子密度 n_e と陽子密度 n_p は、それぞれが n_0 に等しくなるため、この時の Strömgren 半径 r_i は (1) 式より

$$r_i = \left(\frac{3Q}{4\pi n_0^2 \alpha_B} \right)^{1/3} \quad (4)$$

と表すことができる。

H_{II} 領域は第二段階の膨張をする際、 H_{II} 領域内部の圧力 P_i と外部の分子雲の圧力 P_0 が圧力平衡になるまで膨張する。この時、 k をボルツマン定数、 T_e を H_{II} 領域内部の温度、 T_0

を分子雲の温度として次の式が成り立つ。

$$P_i = 2n_f k T_e = n_0 k T_0 = P_0, \quad (5)$$

$$n_f = \frac{T_0}{2T_e} n_0. \quad (6)$$

ここで n_f は膨張後の H_{II} 領域の粒子数密度である。また膨張後の H_{II} 領域の半径は、(1) 式を用いて同様に

$$r_f = \left(\frac{3Q}{4\pi n_f^2 \alpha_B} \right)^{1/3}, \quad (7)$$

と表すことができる。ここで (7) 式と (4) 式及び (6) 式から、

$$r_f = \left(\frac{2T_e}{T_0} \right)^{2/3} r_i, \quad (8)$$

が得られる。 $T_e = 10^4$ K, $T_0 = 25$ K の場合、 $r_f = 86 r_i$ が得られる。

また第二段階の膨張は次の式にしたがって時間発展することが知られている。

$$r(t) = r_i \left(1 + \frac{7c_i t}{4r_i} \right)^{4/7}. \quad (9)$$

ここで電離ガス中の音速 $c_i \sim 10$ [km/s]、(9) 式、最終的な H_{II} 領域の大きさ $r_f = 86 r_i$ を代入すると、 H_{II} 領域が圧力平衡に達するまでにかかる時間 $t \sim 3 \times 10^6$ yr が得られる。 UCH_{II} 領域のサイズ (~ 0.1 pc) を満たす期間に限定すると、理論的にはおよそ 4×10^4 yr となる。

以下で述べるように、実際に観測で UCH_{II} 領域が発見される頻度は、この寿命から考えられる検出確率より高い。したがって 4×10^4 yr は寿命の下限値として取り扱うのが適切であると思われる。

【観測から求まる寿命】

UCH_{II} 領域は O 型星が形成する領域で、分子雲中で深く埋もれており、可視光では観測することができない。Wood & Churchwell (1989b) は赤外線観測で得られた分子雲に埋もれている O 型星の数と、可視光観測で得られた O 型星の数の比をとることで、 UCH_{II} 領域の寿命を求めた。

まず、InfraRed Astronomical Satellite Point Source Catalog (IRAS PSC) から $12\mu\text{m}$, $25\mu\text{m}$, $60\mu\text{m}$ のフラックス比を用いた 2 色図を描くことで、銀河系内に式 (10) の条件を満たす、分子雲に埋もれた O 型星が 1646 個存在することを明らかにした (Magellanic cloud は除く)。

$$\log(F_{60}/F_{12}) \geq 1.3, \log(F_{25}/F_{12}) \geq 0.57 \quad (10)$$

一方で、分子雲に埋もれていない O 型星は太陽近傍 2.5 kpc 内に 436 個発見されている (Conti et al. 1983)。O 型星が銀河面に分布し、銀河半径が 15kpc であると仮定した場合、太陽近傍 2.5kpc 内から最低でも 45 個の埋もれた O 型星が見つかる。したがって大質量星のおよそ 10% が UCH_{II} 領域の段階であると述べた。O6 型星の寿命 4.3×10^6 yr から算出される UCH_{II} 領域の寿命は 4×10^5 yr となる。

1.3 メーザー現象

1.3.1 メーザーの原理

通常の輝線スペクトルは、分子同士の衝突によって励起された上のエネルギー準位 E_2 の粒子 (粒子数 n_2 , 縮退度 g_2) が下のエネルギー準位 E_1 (粒子数 n_1 , 縮退度 g_1) に自発的に遷移することで微弱な放射をする。ところが宇宙空間のような特殊な環境下においては、ガスの密度が低いいため分子同士の衝突が少ないことや、準位間の励起速度の違いなどから、上の準位の粒子数が下の準位の粒子よりも多くなる反転分布を形成することがある。

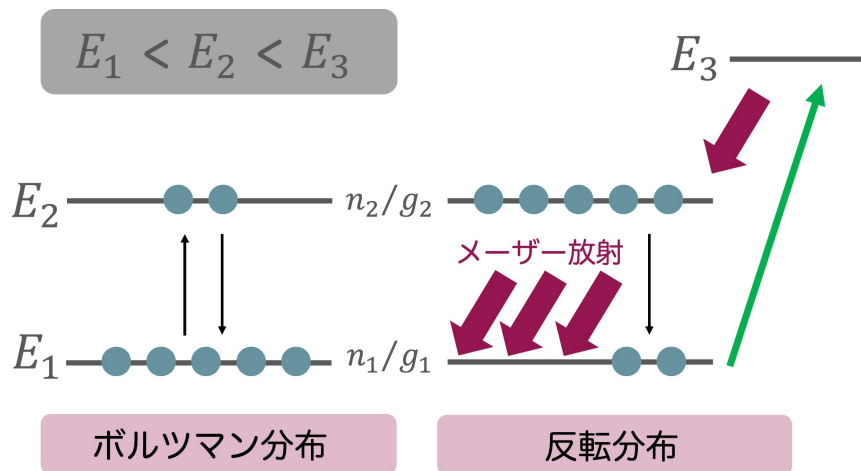


図4 ボルツマン分布と反転分布 (3 準位モデル)

ここに外部からの放射が加わると、連鎖的に上の準位の粒子が下の準位へ遷移を引き起こす。これを誘導放射といい、放射された電波はメーザー (MASER : Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) と呼ばれる非常に強い輝線となる。一般にメーザー放射は以下の特徴を持つ。

- 強度が局所熱平衡状態 (LTE) に比べて大きい
- 電波源の広がり (メーザースポット) が極めて小さく点状である
- 直線または円偏光している
- 線幅は熱運動による幅より小さい場合が多い
- 位相がそろっている

1.3.2 メタノールメーザー

歴史的に初めてメタノールメーザーが検出されたのは 1971 年のことで、Orion-KL 領域から 25GHz の放射が見られた (Barrett et al. 1971)。現在までに様々な周波数帯での遷移が発見されている (表 2)。メタノールメーザーは生まれて間もない大質量星に付随する (Bartula et al. 1987; Menten 1991; Cyganowski et al. 2009) 特徴を持つが、励起メカニズムや発生場所の違いによって class I と class II に分類される。そのため、メーザーが出現する空間スケールや分布の形状は class ごとに異なっている。表 3 にそれぞれの特徴を

記す。現在の高空間分解能かつ高感度な干渉計観測により、class I と class II メタノールメーザーは同一の中心星を励起源として存在していることがわかっている (Ellingsen 2005; Cyganowski et al. 2009)。

表 2 メタノールメーザーの class 分類

class	周波数 [GHz]
I	0.834, 5.0, 9.9, 25.0, 25.8, 26.8, 27.4, 28.1, 29.6, 30.3, 36.1, 44.1, 84.5, 95.2, 104.3, 132.9, 146.6, 229.8
II	6.7, 12.2, 20.0, 23.1, 29.0, 37.7, 38.4, 86.6, 86.9, 107.0, 108.8, 156.6, 156.8, 157.2

表 3 class I & II メタノールメーザーの特徴

分類	class I	class II
発生領域	アウトフローと分子雲の境界	降着円盤上
励起メカニズム	衝突励起	放射励起
メーザースポットのサイズ	数百 au	数 au
典型的な輝度温度	$10^6 - 10^8$ K	$> 10^{10}$ K

1.4 研究目的

1.4.1 先行研究

6.7GHz メタノールメーザーは主に原始星の段階から放射が見られ、星形成初期に出現するとされる。一方で H_{II} 領域は、主系列に達した恒星が周囲の中性水素を電離することで生じる領域のため、星形成後期の特徴と捉えることができる (Churchwell 2002)。しかし、星形成後期の H_{II} 領域からメタノールメーザーが検出される例 (Caswell 2009; Caswell & Breen 2010; Sanna et al. 2010) もあり、両者の共存期間やその詳しい共存の様子はまだよくわかっていない。バイアスの無いサンプルに対して包括的な観測を実施し、共存期間を定量的に導出することができれば、メーザーや各種分子輝線の付随有無で明確に進化段階を切り分けられる可能性がある。また複数の指標を組み合わせることで、星形成全体にかかる時間を解明できると考えられる。大質量星形成過程で放射されるメーザーや分子輝線の出現期間は、過去に Reid や Ellingsen らにより定性的に求められているものの、定量的な議論まではされていなかった (図 5,6)。

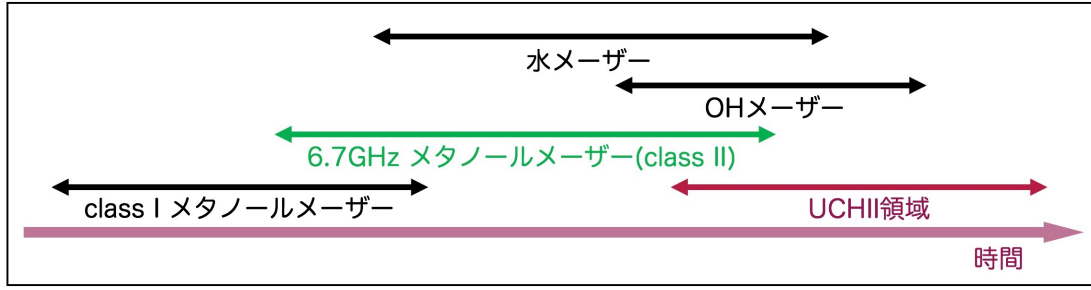


図 5 各種メーザーや分子輝線の出現期間 (Ellingsen et al. 2007, IAU Symp. 242 を参照)

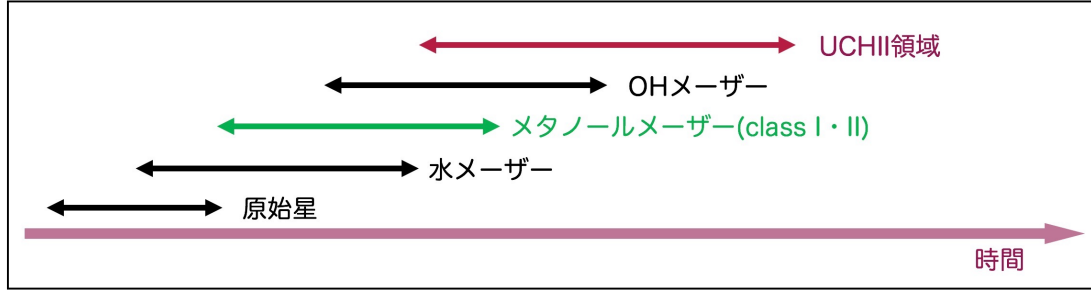


図 6 各種メーザーや分子輝線の出現期間 (Reid 2007, IAU Symp. 242 を参照)

中でも UCH_{II} 領域と 6.7GHz メタノールメーザーの関連性を調べた先行研究に Walsh et al. (1997, 1998) が挙げられる。この先行研究では、式 (10) を満たし、かつ Parkes-MIT-NRAO データベース記載の 4.85GHz 電波連続波源が付随する原始星候補天体に対し、Parkes 64m 電波望遠鏡を用いた 6.7GHz メタノールメーザーの観測が実施された (Walsh et al. 1997)。さらに、メタノールメーザーが検出された領域に対しては、Australia Telescope Compact Array (ATCA) 電波干渉計を用いて UCH_{II} 領域の付随有無を調査した。その結果、233 のメーザー領域のうち 19 天体 (8%) に UCH_{II} 領域が付随していることが明らかになった (Walsh et al. 1998)。

1.4.2 研究目的

先行研究は原始星候補天体に対して包括的に 6.7GHz メタノールメーザーの探査が実施されたが、6.7GHz メタノールメーザーの寿命が未解明であるため、付随率から共存期間の長さの特定ができなかった。また、 UCH_{II} 領域を用いて共存期間の議論をする場合、メタノールメーザーが検出されていない領域がサンプルに含まれていなかった点にバイアスがある。本研究の目的は、 UCH_{II} 領域に対する 6.7GHz メタノールメーザーの付随率の導出、及び両者の共存期間 (緑) の特定である。またメタノールメーザーが付随する UCH_{II} 領域 (緑) と付随しない UCH_{II} 領域 (黄) の違いも定量的に調べた。なお、観測対象の UCH_{II} 領域には Co-Ordinated Radio ‘N’ Infrared Survey for High-mass star formation (CORNISH) データベースを用いた。

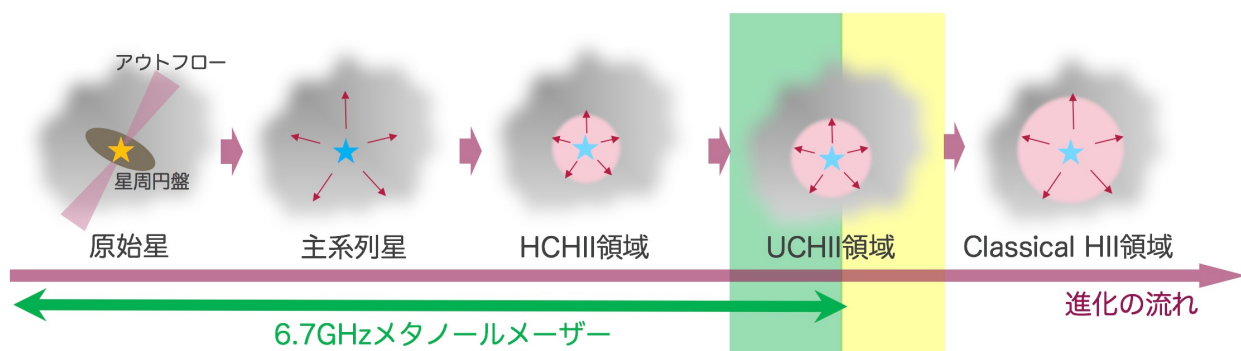


図 7 6.7GHz メタノールメーザーの出現期間

1.4.3 CORNISH survey

CORNISH Survey は銀河面高分解能探査プロジェクトの一環で、Spitzer 宇宙望遠鏡による中間赤外線探査領域 northern GLIMPSE I region ($10^\circ \leq l \leq 65^\circ$, $|b| \leq 1^\circ$) を対象とした多波長観測 (電波～赤外線域) である (Hoare et al. 2012; Purcell et al. 2013)。

Very Large Array (VLA) B-configuration を用いた 5GHz 電波連続波の無バイアス観測により、CORNISH データベースとして 2638 天体がカタログ化されている。また Spitzer IRAC による Galactic Legacy Mid-Plane Survey Extraordinaire (GLIMPSE) との比較により、星形成後期の指標である UCH_{II} 領域は 240 天体が同定済である。

5GHz 帯では過去に単一鏡探査 (Altenhoff et al. 1978; Haynes et al. 1978; Gregory & Condon 1991; Griffith et al. 1994) や干渉計探査 (Becker et al. 1994; Givon et al. 2005; White et al. 2005) が実施されてきたが、秒角程度のデータとの比較には分解能が不足し、さらに northern GLIMPSE I region の 1/5 しかカバーできていないといった問題があった。CORNISH survey は銀河第一象限の一部という制限は付くものの、星形成過程の物理的・科学的な解明に有益なデータを提供した。以下に CORNISH survey の観測パラメータを示す。

表 4 CORNISH survey の観測パラメータ

装置	Very Large Array (VLA)
配置	B-configuration
領域	$10^\circ \leq l \leq 65^\circ$, $ b \leq 1^\circ$ Northern Spitzer GLIMPSE I region
空間分解能	1.5 arcsec
ノイズレベル (1σ)	0.4 mJy / beam

2 観測

2.1 観測概要

観測には日立 32m 電波望遠鏡 (日立局) を使用し、231 天体を 6 日間に分けて実施した。アンテナの制御は茨城大学内の PC からスケジュールファイル (a.skd 及び o.skd ファイル) 実行し、遠隔操作で行った。a.skd ファイルはアンテナ制御、o.skd ファイルはデータ取得のスケジュールファイルに相当する。観測パラメータは次の通りである。

表 5 観測パラメータ

観測日	ビームサイズ	4.6 arcmin
2014/8/19 (火)	観測周波数	6664 - 6672 MHz
9/5 (金)	分光点数	8192
11/28 (金)	速度分解能	0.044 km/s
12/2 (火)	積分時間	(ON 点・OFF 点) 各 300 sec / source
12/14 (日)	システム雑音温度	25 - 35 K (EL > 15°)
12/22 (月)	検出感度 (5σ)	~ 1.5 Jy

得られたメーザースペクトルにピーク (放射) が見られる場合は、放射の両端 ± 10 km/s の範囲内で標準偏差を計算し、 1σ ノイズレベルを求めた。放射強度値が 5σ を超える場合は検出とみなし、スペクトルが記載された論文 (Pestalozzi et al. 2005; Pandian et al. 2007; Xu et al. 2009; Green et al. 2010; Breen et al. 2015) による同定を行った。

2.2 観測方法

地上の望遠鏡は地球大気をまたいで観測を行うため、観測システムの雑音に加えて大気変動の雑音を補正する必要がある。本観測では、天体にアンテナを向けた場合 (ON 点) から周辺の天体がない場合 (OFF 点) の差分を取るポジション・スイッチング観測を採用した。これにより観測システム及び大気変動の雑音が補正できる (図 8)。OFF 点には UCH_{II} 領域の中心座標から RA 方向に +60 arcmin 離れた位置を利用し、ON 点・OFF 点それぞれ 300 sec/source の積分を実施した。

観測で得られた自己相関関数を FFT 変換することで電波強度スペクトルが得られる。電波観測では特定の周波数帯のみを透過するフィルターを使用している。このフィルターは周波数ごとに透過強度が異なるが、吸収体を付けた際の強度から OFF 点の強度を引いた R-OFF を徐算することで周波数特性を平坦にするとともに電波強度の較正をしている。しかし、この方法を実施した後も受信機で得た周波数ごとの強度スケール (ベースライン) が傾くことがある。また ON 点と OFF 点の観測にもわずかな時間差があるため、同様にベースラインがうねる。そこで輝線がない部分に直線または曲線を適合させて差し引きを行い、原点を揃えた (ベースラインフィッティング)。

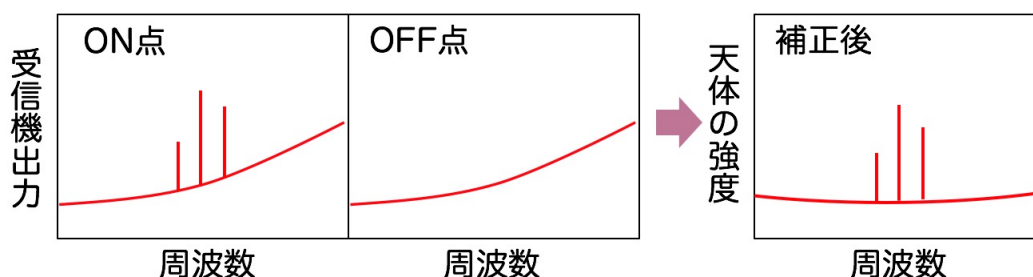


図 8 ポジションスイッチによるスペクトル線の観測

ベースラインフィッティングの終了後に `smooth_rep.sh` ファイルを実行した。これはメーザー放射の速度成分を移動平均するプログラムで、速度分解能を落とすことで S/N 比 (Signal to Noise ratio) を向上させられる。本観測では 3ch ずつ移動平均を行い、S/N 比を $\sqrt{3}$ 倍向上させた。

2.3 観測天体の選出

CORNISH survey によって UCH_{II} 領域と同定された 240 天体のうち、231 天体が観測対象である。銀経 $10^\circ \leq l \leq 20^\circ$ の範囲は、既に Methanol Multi-Beam(MMB) survey (Green et al. 2010) による 6.7GHz メタノールメーザーの無バイアス観測が実施されている。MMB survey とは、Parkes 64m 電波望遠鏡及び ATCA を用いた銀河面上の 6.7GHz メタノールメーザーを包括的に調査したプロジェクトで、高感度 ($1\sigma \sim 0.17 \text{ Jy}$) かつ高い位置精度 ($\sim 0.4''$) を達成している。これにより銀経 $10^\circ \leq l \leq 20^\circ$ の範囲で 119 のメーザーが同定されている。そのため、5GHz 電波連続波で 7σ 以上の強度を示す UCH_{II} 領域上に既知のメタノールメーザー源が存在する場合は「 UCH_{II} 領域に付随する」と判断し、9 天体は観測を実施しなかった。付随有無の判断には、§2.3.1 で述べる方法を用いた。

日立局単一鏡は空間分解能が低いため、複数の天体が密集した領域を分離して観測することは困難である。したがって直径 1 arcmin 内に複数の UCH_{II} 領域が存在する場合は、代表 1 ポインティングで観測を実施した。58 天体がこの条件に相当し、20 ポインティングで観測を実行した。

2.3.1 メーザー付随の判定法

あらかじめ CORNISH データベース (<http://cornish.leeds.ac.uk>) から H_{II} 領域の FITS データをダウンロードしておき、表示したいメタノールメーザー源の RA, Dec (J2000) を記入した Region File (Region.reg) を作成しておく。具体的手順は以下の通りである。

- (1) CORNISH データベースに掲載されている FITS ファイルをダウンロードし、CASA Viewer で raster image と contour map を表示
- (2) Rectangle drawing ボタンを押して、5GHz 連続波放射のない領域 (バックグ

ラウンド) を指定

- (3) 指定した領域をダブルクリックすると、バックグラウンドの分散 (Std dev) が表示されるため、以下の式から 1σ ノイズレベルを算出

$$\text{rms noise}(1\sigma) = \text{Std dev}/2.355$$

- (4) Data Display Options から contour 設定画面を選択し、Unit Contour Level に算出した rms noise(1σ)、Relative Contour Levels に 7 を記入
これにより 7σ 以上の強度を示す H_{II} 領域が表示される
- (5) CASA Viewer で Region File を読み出し、contour 内にメーザー源が存在する場合「付随」と判断

観測対象から除外した 9 つの UCH_{II} 領域の RA, Dec (J2000) と視直径、付随メタノールメーザー源及び 2 天体の離角を表 6 に示す。付随有無の判断に用いたマップは付録 A に記載する。天体同士の離角 θ の算出には Dec の補正が必要なため、 $(\text{RA}[\text{deg}], \text{Dec}[\text{deg}]) = (\alpha_1, \delta_1), (\alpha_2, \delta_2)$ として以下の式を利用した。

$$\theta = \sqrt{\cos^2\left(\frac{\delta_2 + \delta_1}{2}\right)(\alpha_2 - \alpha_1)^2 + (\delta_2 - \delta_1)^2}. \quad (11)$$

表 6 観測除外対象天体

CORNISH 天体名 銀経 $l \pm$ 銀緯 b	RA (J2000)			Dec (J2000)			視直径 arcsec	付随メーザー源 銀経 $l \pm$ 銀緯 b	離角 arcsec
	h	m	s	d	m	s			
G010.3204-00.2586	18	9	23.28	-20	8	6.91	1.67	G10.320-0.259	0.28
G010.4724+00.0275	18	8	38.18	-19	51	49.77	2.24	G10.472+0.027	0.43
G010.9584+00.0221	18	9	39.38	-19	26	27.98	2.20	G10.958+0.022	0.85
G011.9039-00.1411	18	12	11.42	-18	41	29.03	1.84	G11.904-0.141	0.52
G011.9368-00.6158	18	14	1.10	-18	53	23.53	5.89	G11.936-0.616	4.28
G018.4614-00.0038	18	24	36.33	-12	51	4.77	2.76	G18.460-0.004	3.83
G018.8338-00.3002	18	26	23.61	-12	39	40.70	6.72	G18.834-0.300	2.80
G019.6087-00.2351	18	27	38.27	-11	56	36.07	13.11	G19.609-0.234	4.38
G019.7549-00.1282	18	27	31.60	-11	45	54.72	1.64	G19.755-0.128	0.92

2.4 追観測

過去の論文にスペクトルの記載がないメタノールメーザーを検出した場合、放射位置の特定をすべく 9 点法による追観測を実施した。9 点法観測とは、観測対象の中心座標から RA, Dec 方向にそれぞれ ± 2.3 arcmin(日立局ビームサイズの半値) ずつ offset を加えた 20 スキャン (ON 点 : 10 スキャン, OFF 点 : 10 スキャン) を 1 セットとする観測方法 (図 9 を参照) である。観測ビームをガウシアンと仮定することで、検出スペクトルの強度減少率をもとに放射源の位置を観測座標からの offset として算出することができる。

9 点法観測による位置の特定は 2014 年末から実施されていたが、本研究と並行して実施されていた $20^\circ \leq l \leq 60^\circ$, $|b| \leq 1^\circ$ の範囲の MMB survey 観測結果 (Breen et al. 2015) が 2015 年 4 月に公表された。ATCA による位置決定精度は、単一鏡による 9 点法観測によって得られる精度よりも高いため、この時点から MMB survey で検出されず、日立局でのみ検出したメーザー源に対してのみ 9 点法観測を実施する方針へ変更した。

単一鏡観測で得られたメタノールメーザーの強度は微弱であるため、検出感度の向上のために 9 点法観測を 2 セット実施した。これにより S/N 比 $\sqrt{2}$ 倍の向上が見込める。なお、1 スキャンの観測パラメータは、前述の設定と同様である。

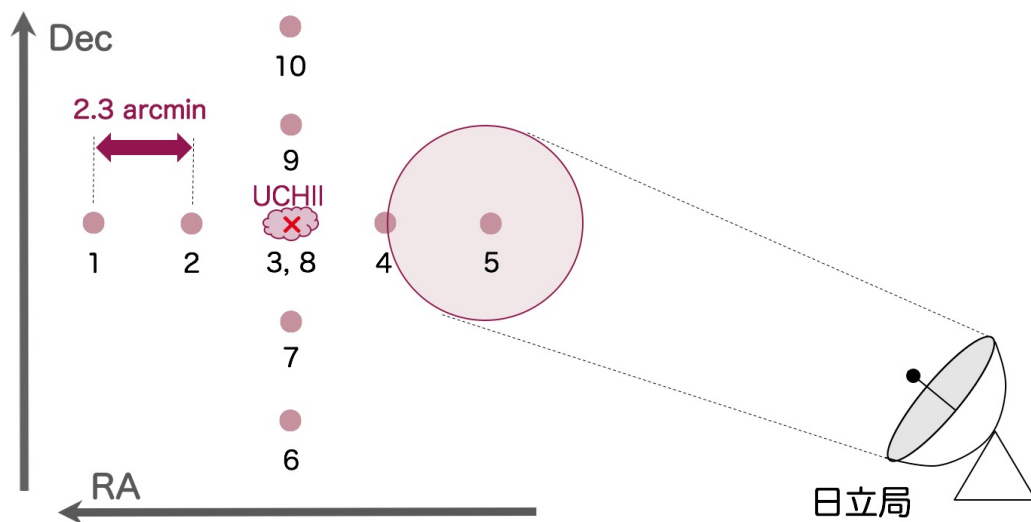


図 9 9 点法観測の方法 図中の番号は観測の順序を示す

3 結果

231 の観測対象のうち、106 の UCH_{II} 領域からメタノールメーザーを検出した。検出したスペクトルは付録 B に記載する。

3.1 付随有無の判断

日立局でメタノールメーザーを検出した場合、MMB survey のカタログに記載されているメタノールメーザーの位置座標を利用して、 UCH_{II} 領域との付随の有無を調べた。付随有無の判断を観測天体選出時 (§2.3.1 を参照) と同様に実施したところ、新たに 6.7GHz メタノールメーザーを検出した UCH_{II} 領域が 2 天体あった。この新検出天体は UCH_{II} 領域への付随有無の切り分けができなかったため、付随率の算出から除外した (§3.2 を参照)。

付随有無を調査した結果、メタノールメーザーが付随する UCH_{II} 領域が 35 天体、付随しない UCH_{II} 領域が 203 天体となった (表 7)。本観測により付随率は 15% と求まった。

銀経 $20^\circ \leq l \leq 60^\circ$ の範囲でメタノールメーザーが付随する UCH_{II} 領域を表 8 にまとめた。また、マッピングの結果は付録 A に記載する。

表 7 メーザー付随有無の判断結果. UCH_{II} 領域の数を記載している. ただし, あらかじめ付随と判断した 9 つの観測除外天体も含む.

新検出	付随あり	付随なし
2	35	203

表 8 UCH_{II} 領域に付随するメタノールメーザー源

CORNISH 天体名 銀経 $l \pm$ 銀緯 b	RA (J2000)			Dec (J2000)			視直径 arcsec	付随メーザー源 銀経 $l \pm$ 銀緯 b	離角 arcsec
	h	m	s	d	m	s			
G020.0809-00.1362	18	28	10.42	-11	28	48.88	2.98	G20.081-0.135	1.95
G020.9636-00.0744	18	29	37.32	-10	40	11.33	2.49	G20.963-0.075	1.30
G024.4921-00.0386	18	36	5.69	-7	31	23.26	4.44	G24.493-0.039	3.38
G025.3809-00.1815	18	38	15.00	-6	48	1.19	8.46	G25.382-0.128	5.81
G026.5976-00.0236	18	39	55.87	-5	38	45.58	2.65	G26.598-0.024	1.33
G027.3644-00.1657	18	41	50.98	-5	1	45.15	2.26	G27.365-0.166	2.04
G028.2003-00.0494	18	42	58.12	-4	13	57.51	2.19	G28.201-0.049	1.44
G029.9559-00.0168	18	46	4.18	-2	39	21.28	9.62	G29.955-0.016	6.66
G030.0096-00.2734	18	47	4.71	-2	43	31.22	1.62	G30.010-0.273	0.02
G030.5887-00.0428	18	47	18.88	-2	6	17.25	1.79	G30.589-0.043	0.30
G031.4130+00.3065	18	47	34.29	-1	12	44.54	9.38	G31.412+0.307	1.06
G033.1328-00.0923	18	52	8.05	+0	8	12.59	4.02	G33.133-0.092	3.46
G034.2572+00.1535	18	53	18.40	+1	14	58.87	5.75	G34.257+0.153	3.75
G037.5457-00.1120	19	00	15.95	+4	3	12.95	8.18	G37.546-0.112	3.55
G038.6529+00.0875	19	1	35.26	+5	7	47.45	1.6	G38.653+0.088	0.30
G040.4251+00.7002	19	2	39.61	+6	59	8.63	2.95	G40.425+0.700	0.40
G042.4345-00.2605	19	9	49.90	+8	19	43.99	3.63	G42.435-0.260	1.53
G043.1489+00.0130	19	10	11.04	+9	5	20.17	1.65	G43.149+0.013	0.36
G043.1652+00.0129	19	10	12.90	+9	6	11.57	2.07	G43.165+0.013	0.70
G043.7954-00.1274	19	11	54.03	+9	35	49.99	1.83	G43.795-0.127	0.85
G043.8894-00.7840	19	14	26.11	+9	22	35.18	5.38	G43.890-0.784	4.38
G044.3103+00.0410	19	12	15.73	+10	7	53.58	1.68	G44.310+0.041	1.33
G045.0712+00.1321	19	13	22.11	+10	50	52.63	1.89	G45.071+0.132	0.55
G048.9901-00.2988	19	22	26.11	+14	6	39.65	1.76	G48.990-0.299	0.33
G049.4905-00.3688	19	23	39.93	+14	31	9.37	5.76	G49.489-0.369	4.75
G051.6785+00.7193	19	23	58.82	+16	57	41.54	1.79	G51.679+0.719	0.76

3.2 新検出天体

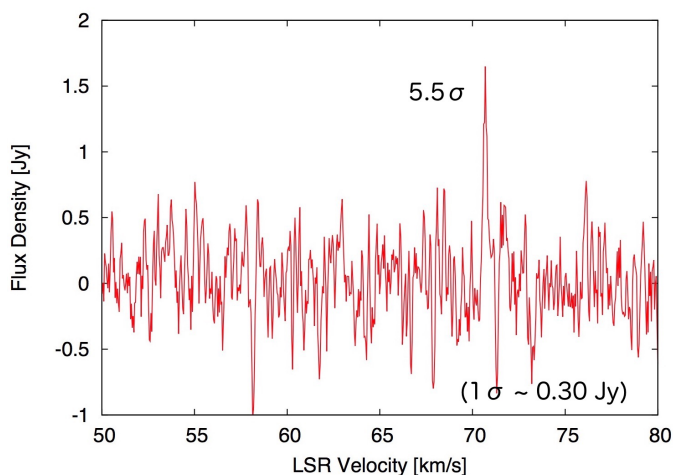


図 10 新検出天体 G019.0754-00.2874 のスペクトル

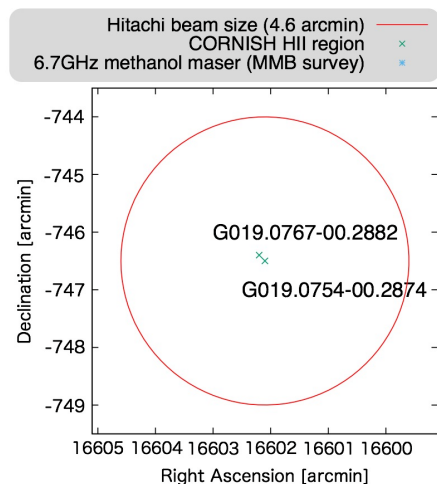


図 11 日立局ビーム内での位置関係

図 10 は UCH_{II} 領域 G019.0754-00.2874 を観測中心として得られた新検出のメタノールメーザースペクトルである。 UCH_{II} 領域 G019.0754-00.2874 の 1 arcmin 以内に UCH_{II} 領域 G019.0767-00.2882 が存在するため、日立局の 1 ポインティングで同時に観測を実施した領域 (図 11 の赤い円は日立局のビームサイズを示す) である。したがって、どちらの UCH_{II} 領域に付随する放射であるかはこのスペクトルのみでは判断できない。そこで G019.0754-00.2874 を中心とした 9 点法観測を 2 スキャン実施したところ、通常のターゲット観測で得られた 70.7km/s 成分が検出されず、58.5km/s の速度成分を検出した (図 12)。

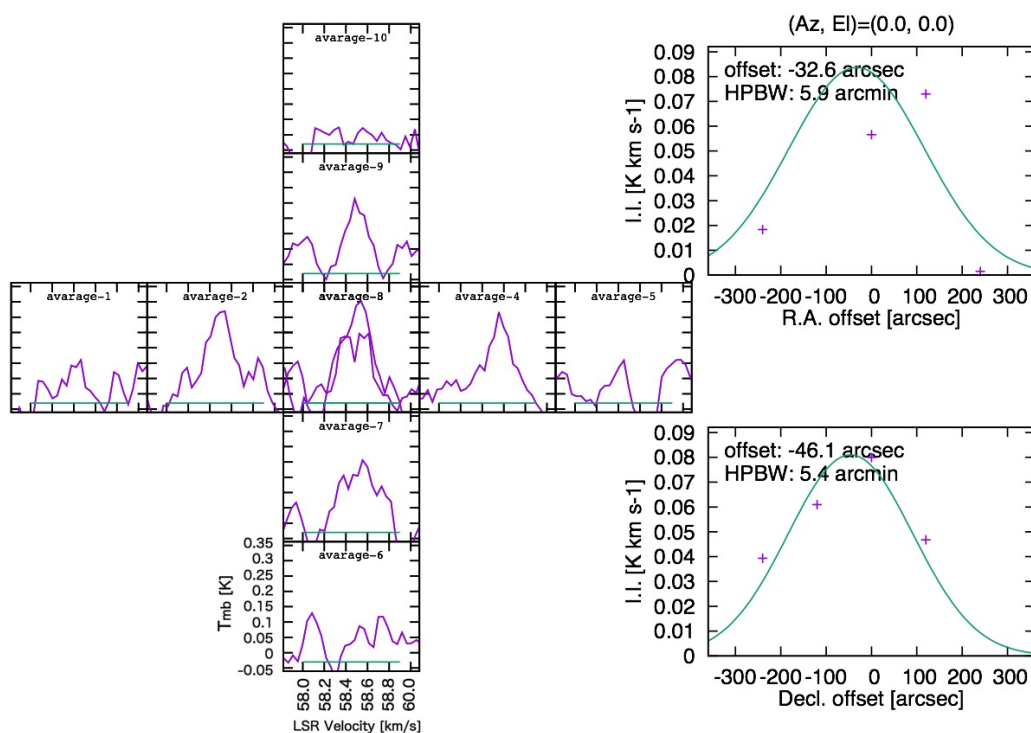


図 12 新検出天体 9 点法観測で得られたスペクトル

両速度成分共に強度変動をしている可能性があるため、UCH_{II} 領域 G019.0754-00.2874 に対して、2016 年 2 月 27 日～5 月 11 日の間、4 日に 1 度の頻度でモニター観測を 15 回実施した。モニター観測のスペクトルは付録 C に示す。15 日間のモニター観測の結果、58.5km/s 成分は各日のデータから常時 3σ を超える放射を確認できた。70.7km/s 成分については、各日のデータから放射を確認できなかった。

ここで 58.5km/s 成分は常時 3σ を超える放射が確認できたため、短期間で大きな強度変動はないと判断し、モニター観測 15 回の観測データを加算平均処理後にスペクトルを表示した (図 13)。その結果、ノイズレベル (1σ) ~ 0.06 Jy を達成し、70.7km/s 成分を 5.2σ で検出できた。

58.5km/s 成分、70.7km/s 成分は放射強度が 1Jy 以下と非常に弱いため、日立局単一鏡による 9 点法観測では 2 つの UCH_{II} 領域のどちらに付随するのかを、分離することは困難であると判断した。したがって、UCH_{II} 領域 G019.0754-00.2874, G019.0767-00.2882 の 2 天体は第 4 章以降の統計から除外して取り扱うものとした。

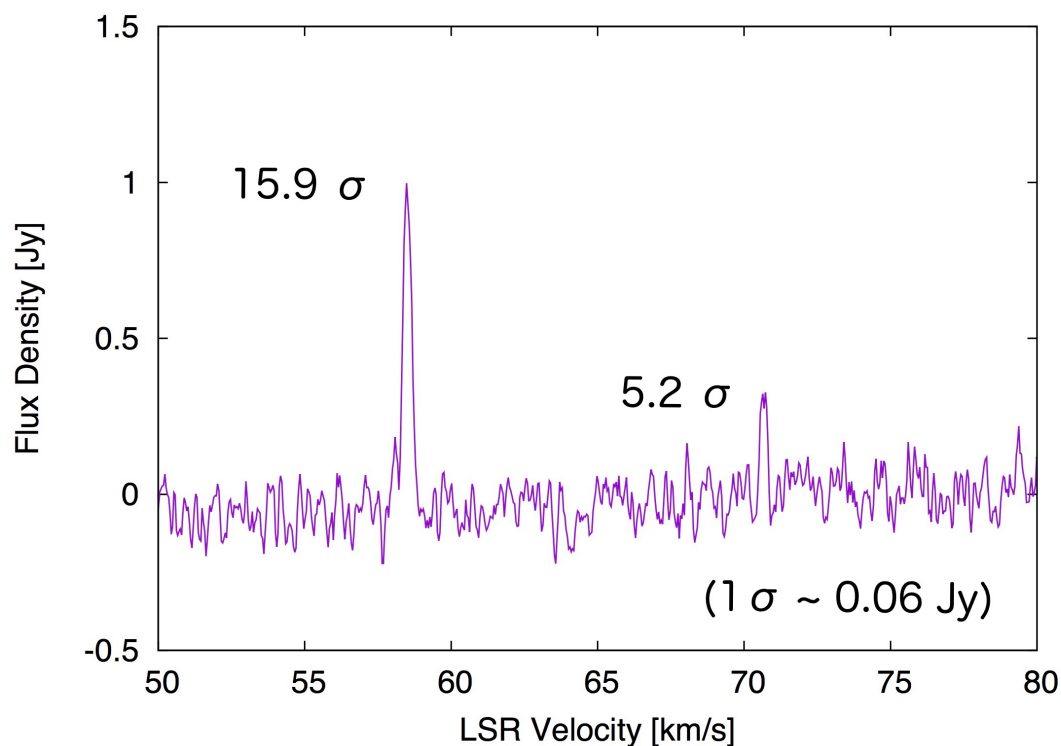


図 13 G019.0754-00.2874 モニター観測 15 回分の加算平均スペクトル

4 考察

4.1 CORNISH H_{II} 領域と 6.7GHz メタノールメーザーの共存期間の導出

観測により、UCH_{II} 領域に 6.7GHz メタノールメーザーが付随する例を実際に確認できた。Wood & Churchwell (1989a,b) により、UCH_{II} 領域の寿命は $4 \times 10^4 - 4 \times 10^5$ yr と導出されている。本観測で無バイアスな UCH_{II} 領域に対して 6.7GHz メタノールメーザーの観測を行った結果、付随率が 15% と得られているため、両者の共存期間は約 $6 \times 10^3 - 6 \times 10^4$ yr と算出できた。

以降、6.7GHz メタノールメーザーが消失する要因について 2 つの視点から統計調査を行った。

4.2 H_{II} 領域のサイズと 6.7GHz メタノールメーザーの付随有無の相関

H_{II} 領域は電離領域を広げながら成長するため、進化早期段階を特徴付ける 6.7GHz メタノールメーザーが付随する UCH_{II} 領域は、メーザーが付随しない UCH_{II} 領域よりもサイズが小さい傾向にあると仮説を立てた。

4.2.1 H_{II} 領域のサイズの導出

メタノールメーザーの付随有無により、UCH_{II} 領域のサイズに有意な差があるかを確かめるため、UCH_{II} 領域のサイズを算出する必要がある。CORNISH データベース中の UCH_{II} 領域は、視直径 ϕ [arcsec] の記載がある。したがって、UCH_{II} 領域までの距離 D [kpc] を調べることで、以下の式からサイズ L [10^3 au] を求めることができる。

$$L = \phi D. \quad (12)$$

UCH_{II} 領域のサイズ L の導出に先立ち、UCH_{II} 領域までの距離 D を以下の文献/データベースから (1) ~ (3) の順番に優先順位を付けて引用した。

- (1) 電波アストロメトリ観測 (Reid et al. 2014)
- (2) フォトメトリ観測 (Red MSX Source データベース)
- (3) kinematic distance 法 & H_I self-absorption (H_ISA) (Green & Griffiths 2011)

(1) のアストロメトリ観測は、数年間にわたる観測により年周視差を調査し、距離を算出する手法である。この観測による測距精度は 10% 程度と非常に高いため、優先的に引用した。(1) で距離が得られない場合は、(2) の Red MSX Source (RMS) データベースに記載されているフォトメトリ観測に基づく距離を引用した。RMS データベースには、Midcourse Space Experiment (MSX) survey (Price et al. 2001) 及び Two Micron All Sky Survey (2MASS)(Skrutskie et al. 2006) から色選出で得られた約 2000 の大質量星候補に対して、多波長観測の結果が記されている (Lumsden et al. 2013)。フォトメトリ観測は、実視等級

m と絶対等級 M の及び減光度 A [mag] から、次式を用いて距離 D を算出する方法である。

$$m - M = 5 \log_{10} D - 5 + A. \quad (13)$$

ここまでで距離がわからない天体については、日立局で得られたメーザー放射の速度中央値を用いて kinematic distance 法 (付録 D) を適用した。kinematic distance 法では、銀河回転に乗る観測対象のメーザー源が太陽軌道の内側に位置する場合、near side と far side の 2 通りの解が得られる。これらに対しては H I Self-Absorption (H I SA) の原理 (付録 E) により near/far の切り分けが実施された Green & Griffiths (2011) の結果を引用した。距離が得られた UCH II 領域に対し、式 (12) を適用することで 187 天体 (付随あり : 31 天体 / 付随なし : 156 天体) のサイズが算出できた。

4.2.2 メタノールメーザー付随有無ごとのサイズの相関

メタノールメーザーの付随有無ごとに、 UCH II 領域のサイズに対する天体数の累積頻度分布を作成した (図 14)。

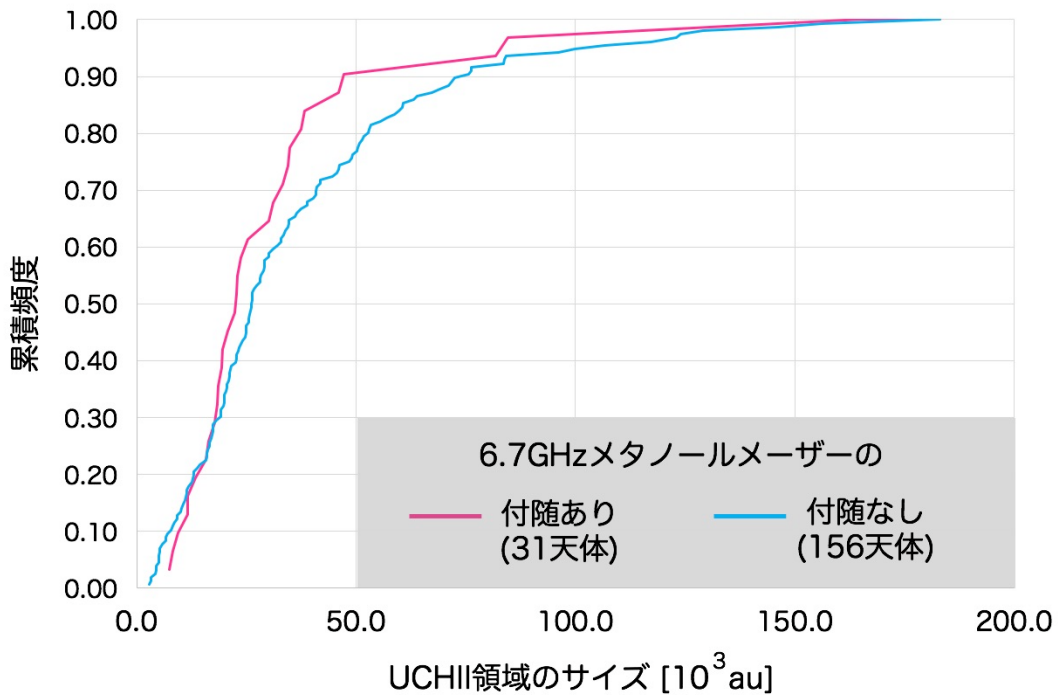


図 14 メーザー付随有無ごとのサイズに対する天体数の累積頻度分布

図 14 を一見すると、メーザーが付随する UCH II 領域 (赤線) の方が左に寄っており、サイズが小さいように見受けられる。ここで「メタノールメーザーが付随する UCH II 領域と付随しない UCH II 領域の 2 つの分布が同一の確率密度関数から発生する」と帰無仮説を立て、Kolmogorov-Smirnov (K-S) 検定 (付録 F) を有意水準 5% で行った。その結果、メタノールメーザーが付随する UCH II 領域はサイズが小さいという仮説は棄却された。

4.3 UCH_{II} 領域を取り巻くダストによる赤化と 6.7GHz メタノールメーザーの付随有無の相関

図 15 は星形成領域 W3 のスペクトルで、主に制動放射による電波連続波とダストからの熱放射が支配的である。6.7GHz メタノールメーザーは、ダストの赤外線再放射により励起されると考えられている。したがってメタノールメーザーの消失に、UCH_{II} 領域を取り巻くダストの量が影響する可能性がある。

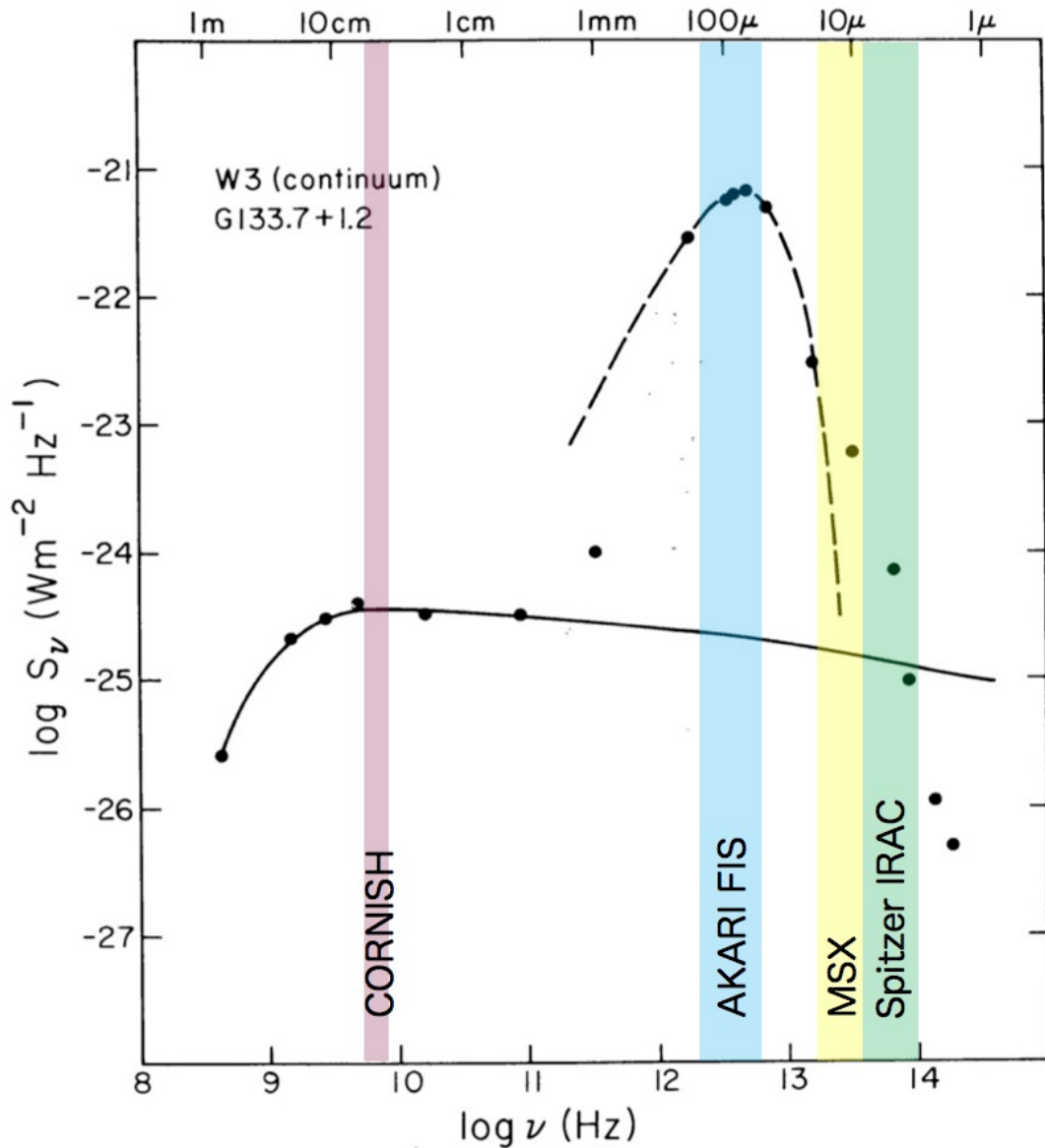


図 15 星形成領域 W3 のスペクトル (Williams 1974). 実線は H_{II} 領域からの制動放射, 破線は 70K のダストによる黒体放射でフィッティングしている. 赤・青・黄・緑の色のついた領域は電波-赤外線帯での観測プロジェクト, 観測機器名を書き加えた.

メタノールメーザーが UCH_{II} 領域の成長に伴う時間経過により消失する場合、メタノールメーザーが付随する UCH_{II} 領域は初期段階、付随しない UCH_{II} 領域は後期段階と考えることができる。H_{II} 領域は成長するにつれ、紫外線放射や恒星風によって周囲のダストを吹き飛ばし、晴れ上がっていく。したがって、メタノールメーザーが付随する初期の UCH_{II}

領域は、ダストによる赤化 (吸収) が大きく、2 色図上で赤い (若い) 方へ偏った分布をする (図 16 を参照) と仮説を立てた。解析には、ダスト温度を 30K とした際の放射ピークである $100\mu\text{m}$ の前後で 2 色図を作成し、仮説の確認を行った。

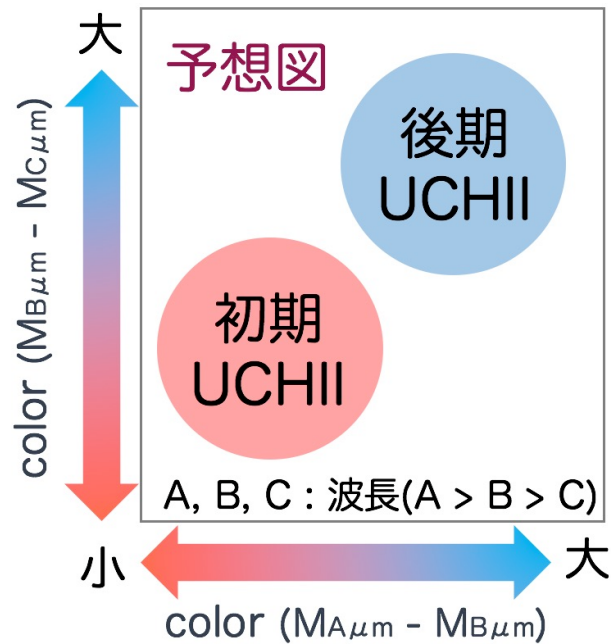


図 16 2 色図上での分布予想図

4.3.1 フラックス値の取得

フラックス情報は中間赤外線-遠赤外線域の Spitzer IRAC (InfraRed Array Camera)、MSX、AKARI FIS (Far Infrared Surveyor) を用いた。NASA/IPAC InfraRed Science Archive (<https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/Gator/>) から該当する観測衛星の赤外線点源カタログを選択し、UCH_{II} 領域の中心座標からの離角による条件を課してフラックス値を得た。離角の条件値は観測機器の分解能を考慮して設定した。観測衛星名と観測波長、及びフラックス値の取得に必要な離角による条件を以下に示す。

表 9 赤外線源の選出条件

観測衛星・機器名	観測波長	離角による条件
Spitzer IRAC	$3.6\mu\text{m}$, $5.8\mu\text{m}$, $8.0\mu\text{m}$	2 arcsec 以内
MSX	$8\mu\text{m}$, $12\mu\text{m}$, $21\mu\text{m}$	18 arcsec 以内
AKARI FIS	$65\mu\text{m}$, $90\mu\text{m}$, $140\mu\text{m}$, $160\mu\text{m}$	30 arcsec 以内

4.3.2 絶対等級への換算

UCH_{II} 領域までの距離はサンプルによって異なるため、比較を行う際には各波長ごとのフラックスを絶対等級に換算する必要がある。絶対等級はこと座の Vega を基準とした Vega

等級を使用し、以下の換算式を用いた。

$$M_{\lambda} = m_{\lambda} - 5 \log_{10} D + 5, \quad (14)$$

$$m_{\lambda} = -2.5 \log_{10} \left(\frac{F_{\lambda}}{F_{0\lambda}} \right). \quad (15)$$

ここで M_{λ} は絶対等級 [mag]、 m_{λ} は実視等級 [mag]、 D は UCH_{II} 領域までの距離 [pc]、 F_{λ} は各波長ごとのフラックス値 [Jy]、 $F_{0\lambda}$ は Vega を基準に 0 [mag] となるフラックスの値 [Jy] である。なお、 $F_{0\lambda}$ の値はそれぞれ GLIMPSE/MSX サーベイデザイン (Meade et al. 2015; Price et al. 2001) 及び Spanish Virtual Observatory Filter Profile Service (<http://svo2.cab.inta-csic.es/svo/theory/fps3/index.php?mode=browse&gname=AKARI&gname2=FIS>) から引用し、以下の表にまとめた。

表 10 0 [mag] となる各波長ごとのフラックス値

観測衛星・機器名	Spitzer IRAC			MSX			AKARI FIS			
観測波長 λ [μm]	3.6	5.8	8.0	8	12	21	65	90	140	160
フラックス $F_{0\lambda}$ [Jy]	280.9	115.0	64.13	58.49	26.51	8.8	0.90	0.52	0.18	0.15

4.3.3 メーザー付随の有無による 2 色図上の分布の違い

得られた各波長における絶対等級 M_{λ} に対し、それぞれの差をとることで色情報を得た。Spitzer IRAC、MSX、AKARI FIS データによる 2 色図は以下の通りである (図 17-20)。図中に示された赤と青の「×」は、それぞれ付随ありと付随なしの分布の平均を表す。

メタノールメーザーの付随有無により分布に有意な差があるのかを確認すべく、縦軸と横軸それぞれの色情報に対して K-S 検定を実施した。図 21-27 はそれぞれの色情報に対する天体数の累積頻度分布図である。赤線はメタノールメーザーが付随する赤外線源、青線は付随しない赤外線源に対応する。Spitzer IRAC のデータはサンプル数が足りず、K-S 検定を実施することができなかった。MSX 及び AKARI FIS のデータからは、メタノールメーザーの付随有無により分布に有意な差が確認できなかった。

分解能の良い ($\sim 2''$) Spitzer IRAC は、原始星近傍の情報を精度良く反映すると考えたが、サンプル数が少なく、有意な差があるかを結論づけることは難しい。一方で MSX、AKARI FIS による 2 色図はサンプルを多く得ることができ、メーザー付随の有無が色情報に依存しないことがわかった。しかし、MSX の分解能は $18''$ 以下、AKARI は $63''$ 以下であるため、集団で生まれた大質量原始星の個々の情報を反映できない問題がある。仮に 1 個または数個の大質量原始星が支配的であった場合を考えると、この 2 色図からメタノールメーザーの付随有無とダストの量に目立った相関はないと思われる。

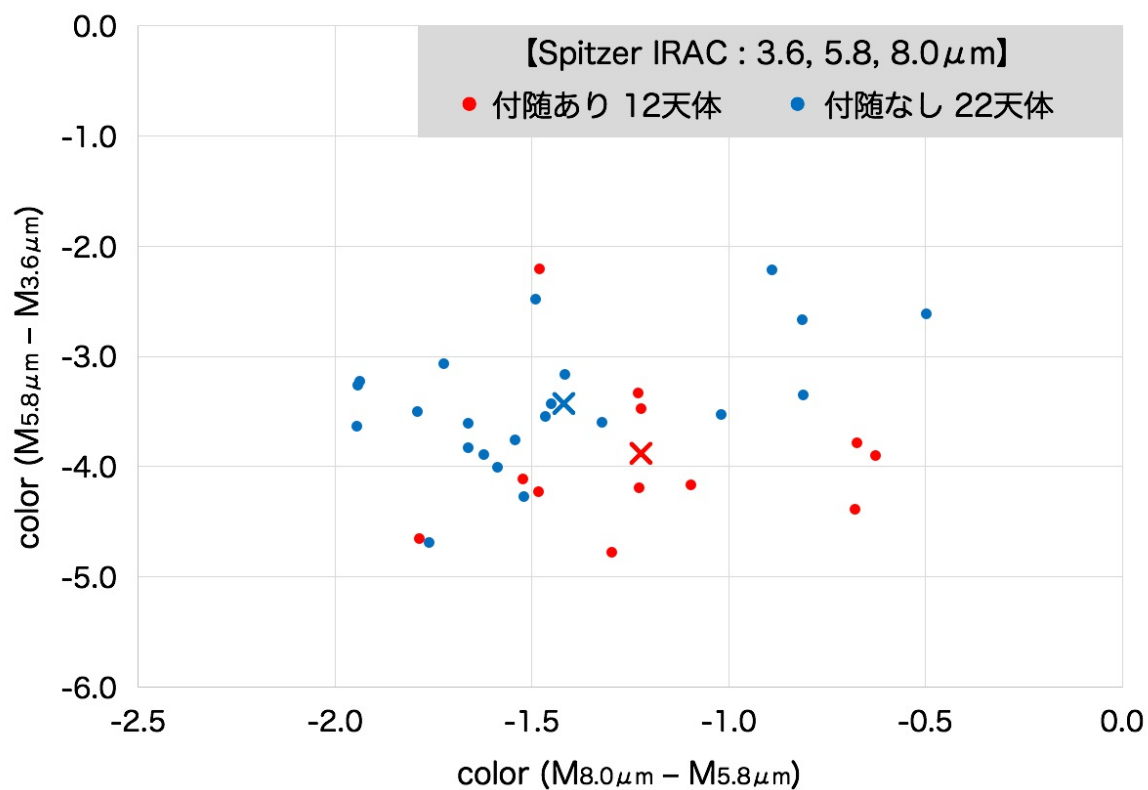


図 17 Spitzer IRAC 3.6, 5.8, 8.0 μm データによる 2 色図. 図中の赤と青の「x」はそれぞれ 6.7GHz メタノールメーザーが付随あり, 付随なしの分布の平均を示す.

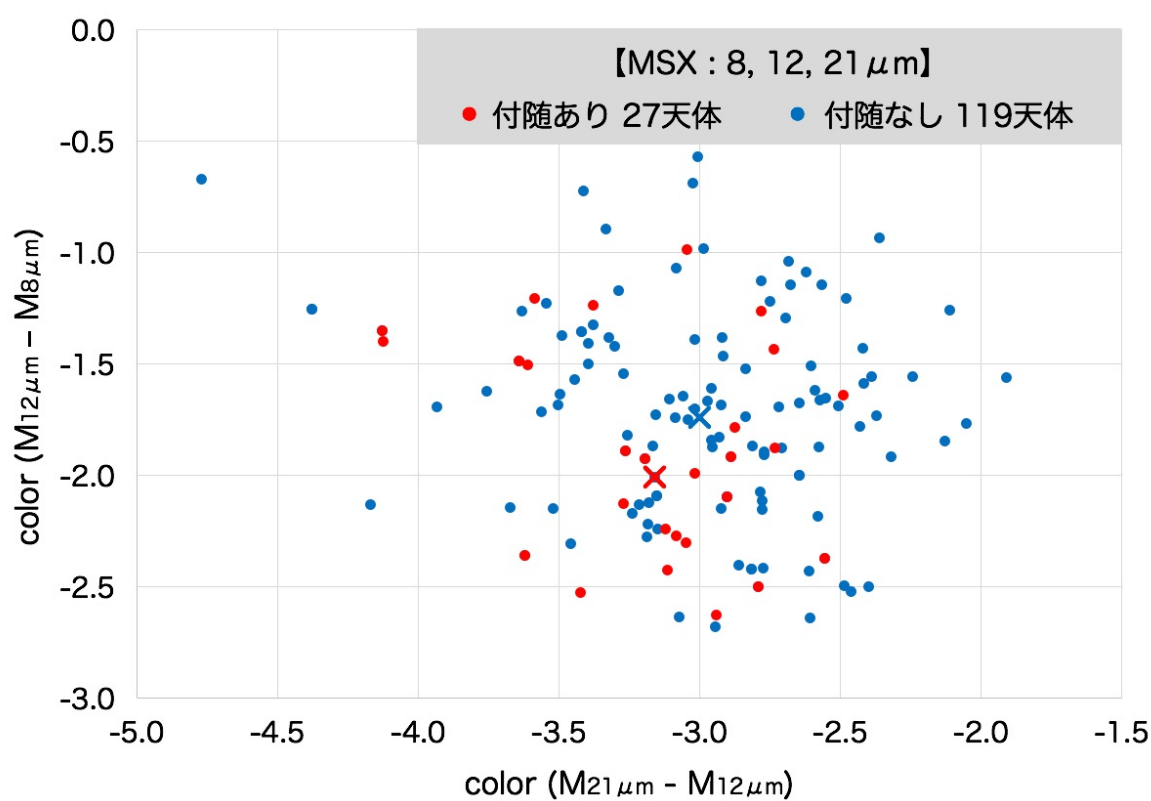


図 18 MSX 8, 12, 21 μm データによる 2 色図

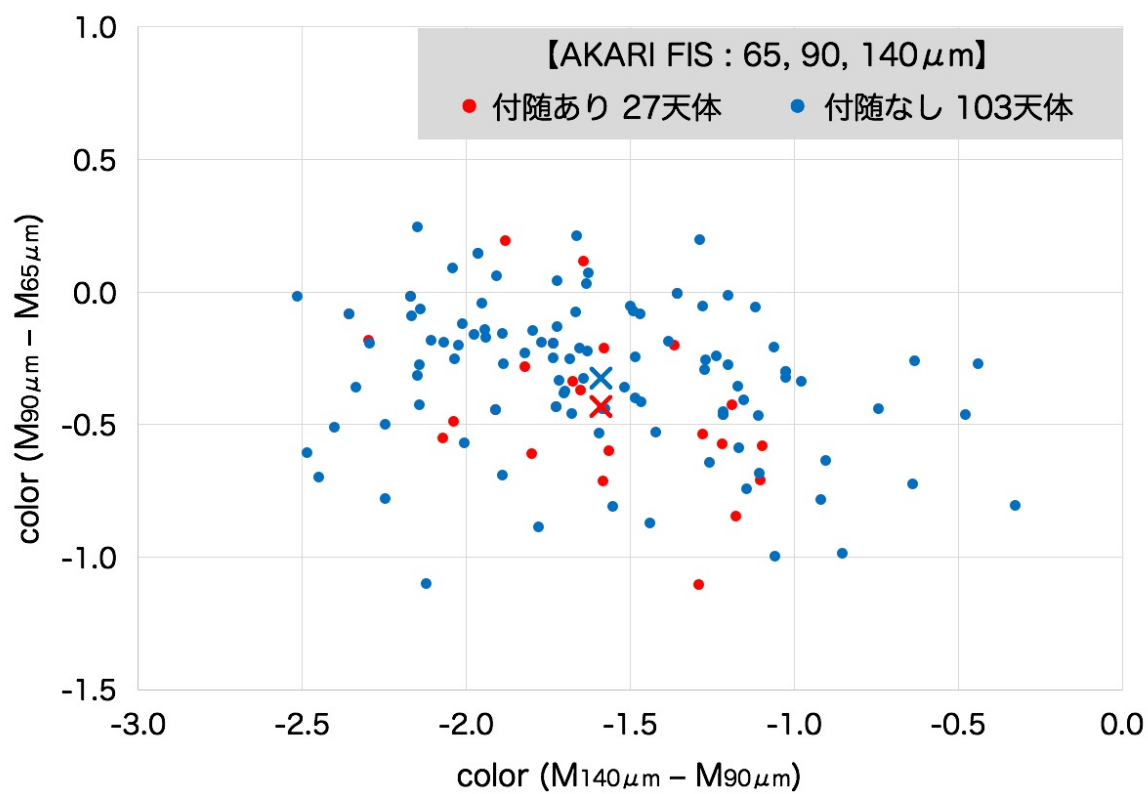


図 19 AKARI FIS 65, 90, 140 μm データによる 2 色図

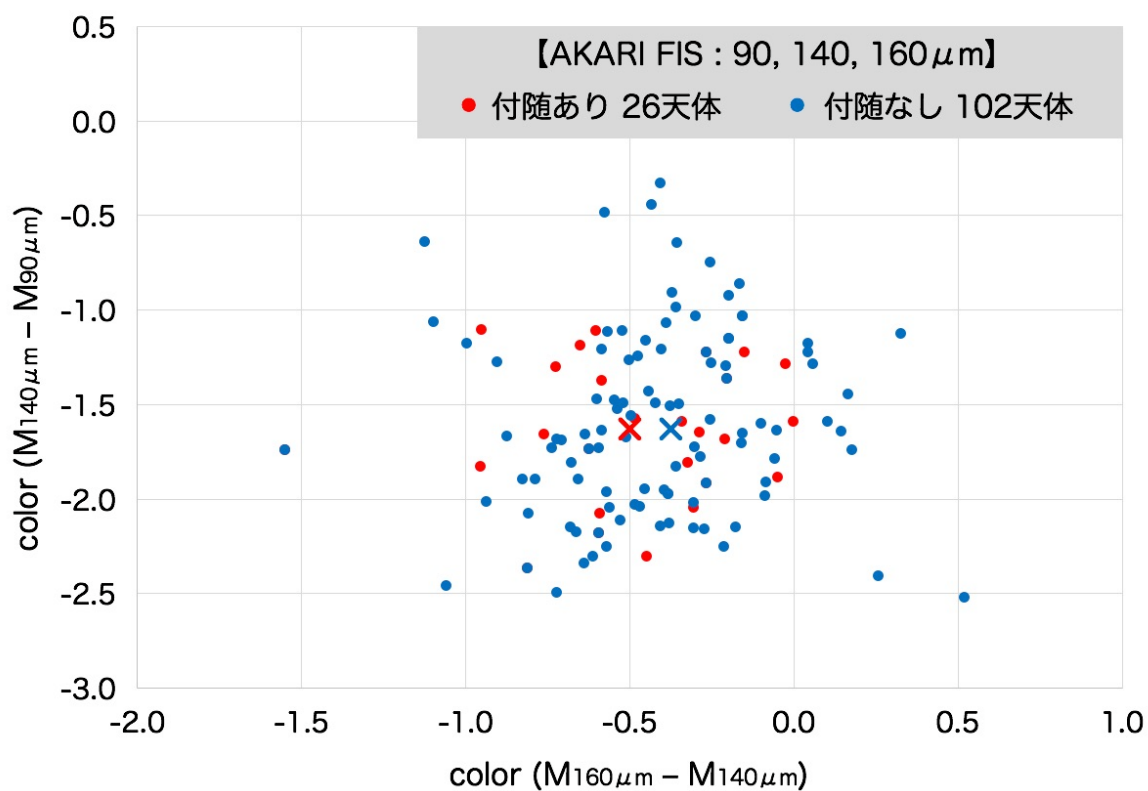


図 20 AKARI FIS 90, 140, 160 μm データによる 2 色図

【Spitzer IRAC】

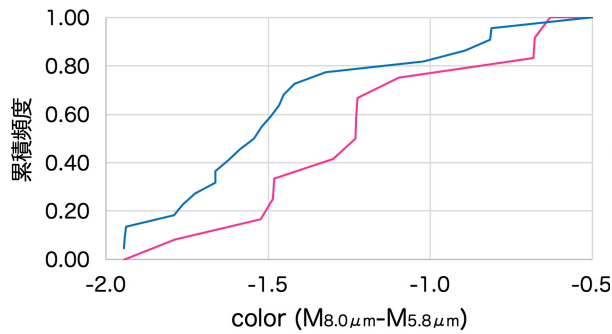


図 21 color ($M_{8.0\mu m} - M_{5.8\mu m}$) に対する天体数の累積頻度分布

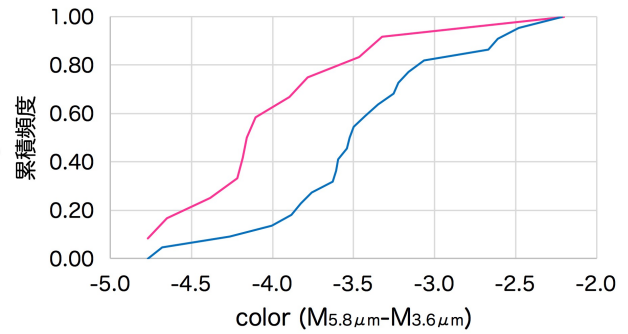


図 22 color ($M_{5.8\mu m} - M_{3.6\mu m}$) に対する天体数の累積頻度分布

【MSX】

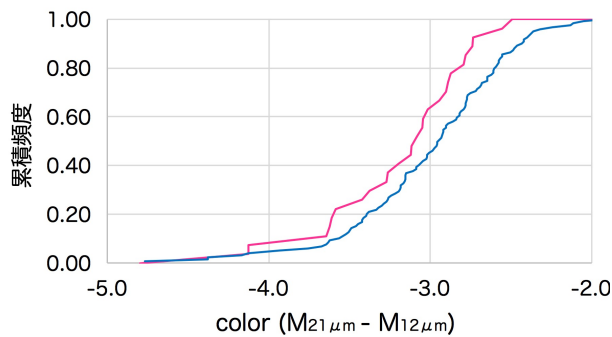


図 23 color ($M_{21\mu m} - M_{12\mu m}$) に対する天体数の累積頻度分布

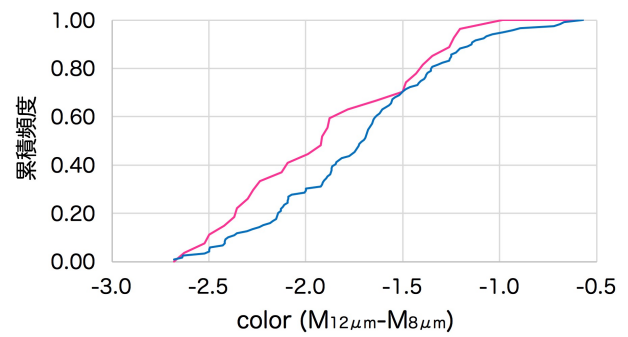


図 24 color ($M_{12\mu m} - M_{8\mu m}$) に対する天体数の累積頻度分布

【AKARI FIS】

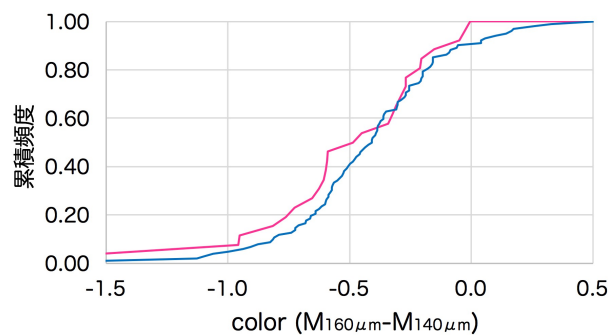


図 25 color ($M_{160\mu m} - M_{140\mu m}$) に対する天体数の累積頻度分布

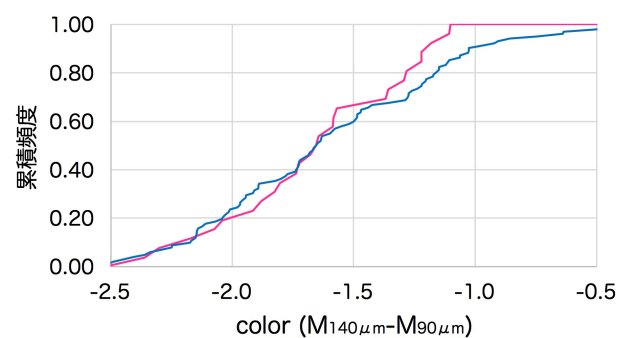


図 26 color ($M_{140\mu m} - M_{90\mu m}$) に対する天体数の累積頻度分布

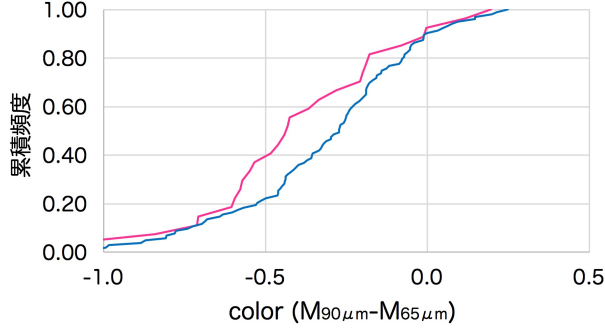


図 27 color ($M_{90\mu\text{m}} - M_{65\mu\text{m}}$) に対する天
体数の累積頻度分布

UCH_{II} 領域のサイズとダストによる赤化に焦点を当てて、6.7GHz メタノールメーザーの消失仮説を立てたが、どちらの仮説も真であるとは言い難い。先行研究では 6.7GHz メタノールメーザーは原始星段階で出現し、UCH_{II} 領域が成長すると消失するとされていた。しかし UCH_{II} 領域に限定して消失の要因を考えた場合、メタノールメーザーは UCH_{II} 領域内部の局所的な物理条件を反映している可能性がある。6.7GHz メタノールメーザーの励起環境の典型値として Cragg et al. (2005) では、ダスト温度 T_{dust} が 100-300 [K]、水素原子個数密度 n_{H} が $10^4 \leq n_{\text{H}} \leq 10^9 \text{ [cm}^{-3}]$ と推定している。したがって、UCH_{II} 領域内部で上記の環境を満たせなくなった際にメタノールメーザーが消失する可能性がある。

ただし、今回の解析では電離星の成長速度を考慮できていない。電離星の成長速度は質量に依存するため、スペクトルタイプが良い指標と考えられる。今後は、メタノールメーザーの付随有無と電離星のスペクトルタイプの相関調査を通じて、メタノールメーザーの消失要因の解明を目指す。

5 まとめ

UCH_{II} 領域と 6.7GHz メタノールメーザーの共存期間を導出するべく、日立 32m 電波望遠鏡を用いてメタノールメーザーの探査を実施した。観測は 2014 年 8 月–12 月の間の 6 日間で実施した。CORNISH survey に基づいて同定された 240 の UCH_{II} 領域のうち 35 天体 (15%) が付随関係にあり、共存期間は $6 \times 10^3 - 6 \times 10^4$ yr であることがわかった。

6.7GHz メタノールメーザーが消失する要因を探るべく、2 つの仮説を立てて検証を行った。

【UCH_{II} 領域のサイズとメタノールメーザー付随有無の相関】

進化早期段階を特徴付ける 6.7GHz メタノールメーザーが付随する UCH_{II} 領域は、メーザーが付随しない UCH_{II} 領域よりもサイズが小さい傾向があると仮説を立てた。

240 の UCH_{II} 領域のうち 187 天体のサイズを求め、メタノールメーザーの付随有無ごとに、サイズに対する天体数の累積頻度分布を作成した。Kolmogorov-Smirnov (K-S) 検定により有意水準 5% で検定を行なった結果、メーザーの付随有無により UCH_{II} 領域のサイズに相関があるとの仮説は棄却された。

【UCH_{II} 領域を取り巻くダストによる赤化とメタノールメーザーの付随有無の相関】

H_{II} 領域は制動放射による電波連続波と、ダストからの熱放射 (赤外線) が支配的である。6.7GHz メタノールメーザーが付随する UCH_{II} 領域は、ダストに深く埋もれているために 2 色図上で赤い (若い) 方へ偏った分布をすると仮説を立てた。

Spitzer IRAC, MSX, AKARI FIS の中間赤外線及び遠赤外線のフラックスから 2 色図を作成したところ、メーザーの付随有無により有意な相関は得られなかった。

先行研究では 6.7GHz メタノールメーザーは原始星段階で出現し、UCH_{II} 領域が成長すると消失するとされていた。しかし、UCH_{II} 領域に限定して消失の要因を考えた場合、メタノールメーザーは UCH_{II} 領域内部の局所的な物理条件を反映している可能性がある。

今回の解析では、UCH_{II} 領域の電離星の成長速度を考慮できていない。電離星の成長速度は質量に依存するため、今後はスペクトルタイプの相関調査を実施し、メタノールメーザーの消失要因の解明を目指す必要がある。

謝辞

本研究を遂行し修士論文を執筆するにあたり、多くの方々からご指導ご協力を賜りましたことを心より感謝申し上げます。

指導教官である百瀬宗武教授には、星形成の基礎から学会発表や論文執筆の作法に至るまで、終始あたたくご指導ご鞭撻を戴きました。特に先生が示す文章や提案は正確かつ明快であり、良き教訓となりました。心より感謝の意と敬意を表します。またアンテナの運用法に加え、データの解析法を具体的にご指導頂きました米倉覚則准教授に深謝致します。私 1 人では思案できない解析法を多数考案し、扶持して戴きました。宇宙科学教育研究センターの杉山孝一郎研究員には、研究の方針や発表の構成を細かく指導して戴きました。観測で問題が生じた際には、早朝にも関わらず解決策を教示してくださり、無事に観測ができました。塚越崇助教には発表練習やゼミで詳細にご指導を戴きました。誠にありがとうございました。

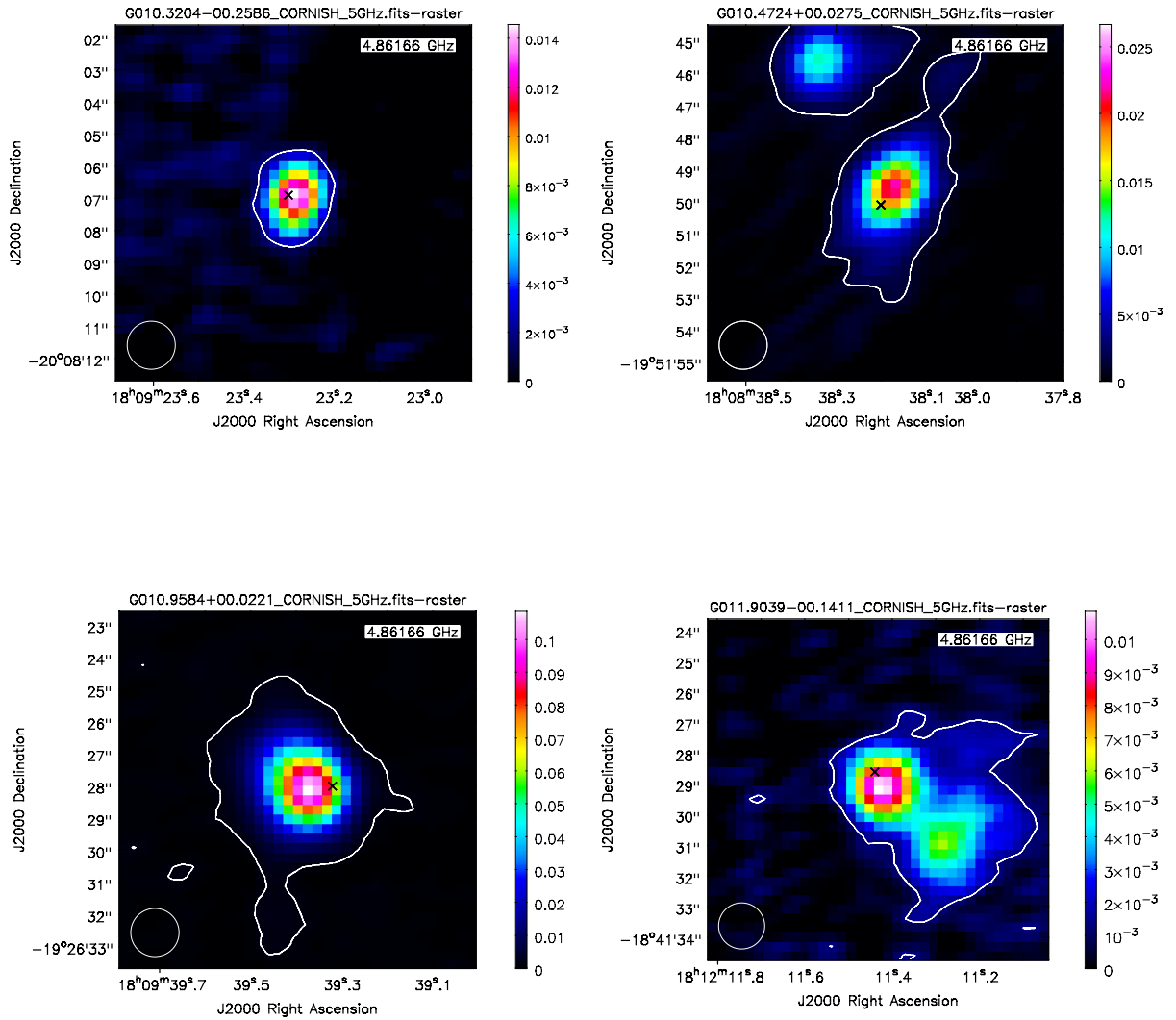
齋藤悠氏、Soon Kang Lou 氏、田辺義浩氏、また同期である足立弘氏、大橋拓人氏、佐藤宏樹氏、宮本祐輔氏は、唐突な質問に対しても丁寧に対応して下さいました。非常に有益なアドバイスを多数提示して戴き、大変感謝しております。後輩の皆様は私の研究生生活の大きな支えとなっていました。

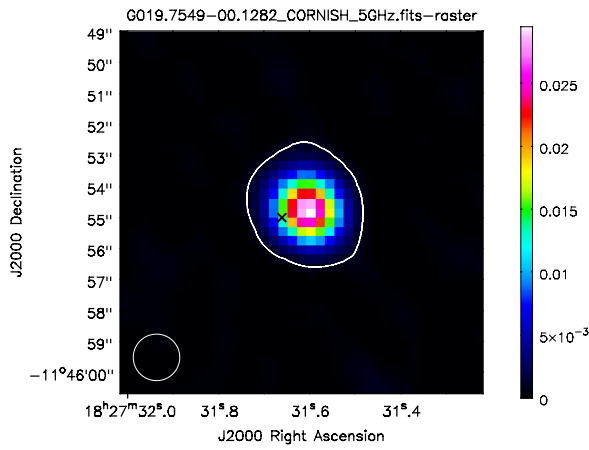
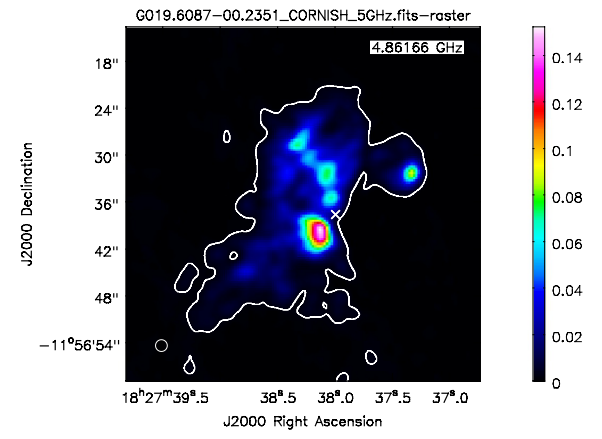
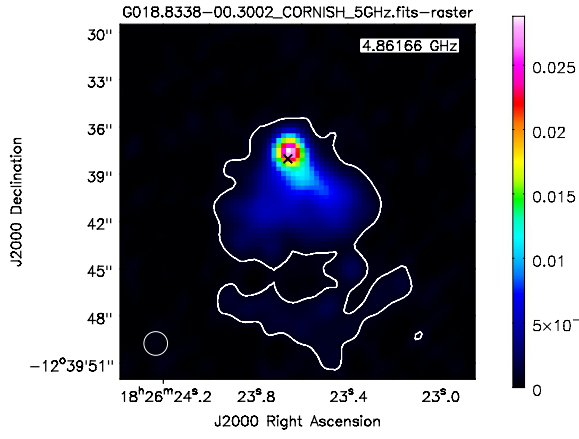
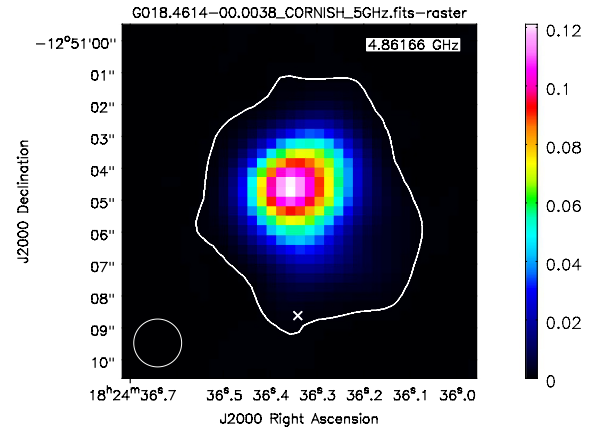
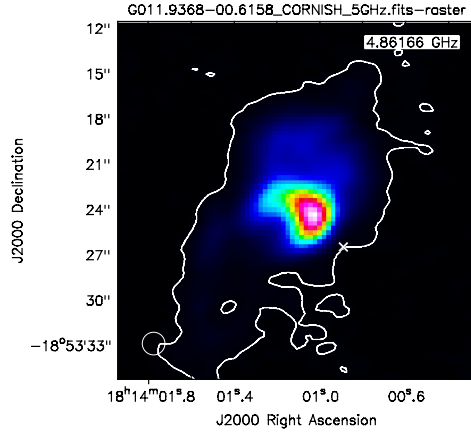
最後になりますが、改めて皆様に心より御礼を申し上げます。本当にありがとうございました。

付録 A CORNISH H_{II} 領域 と 6.7GHz メタノールメーザーの空間分布の比較

【銀経 $10^\circ \leq l \leq 20^\circ$ における観測除外天体】

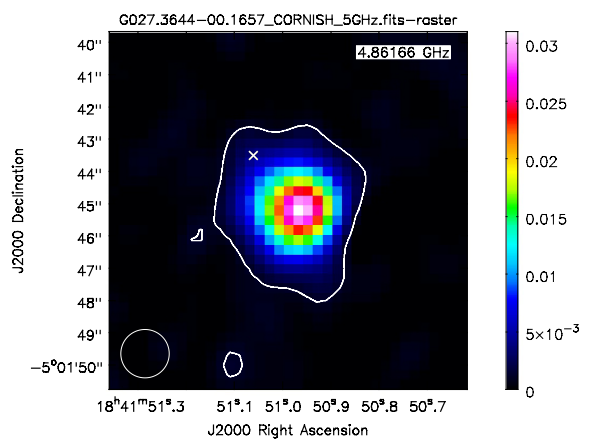
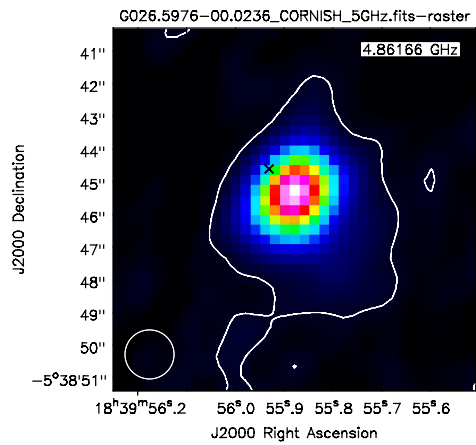
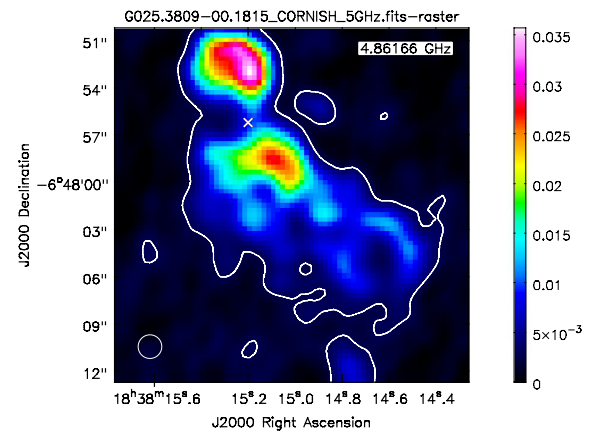
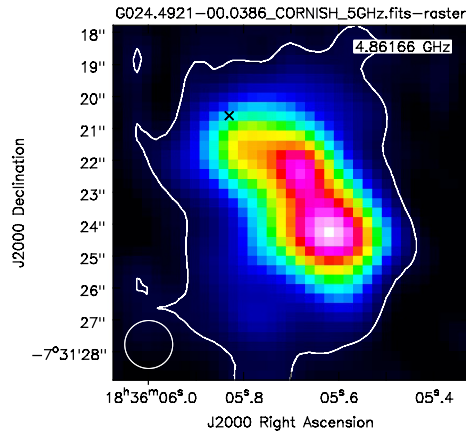
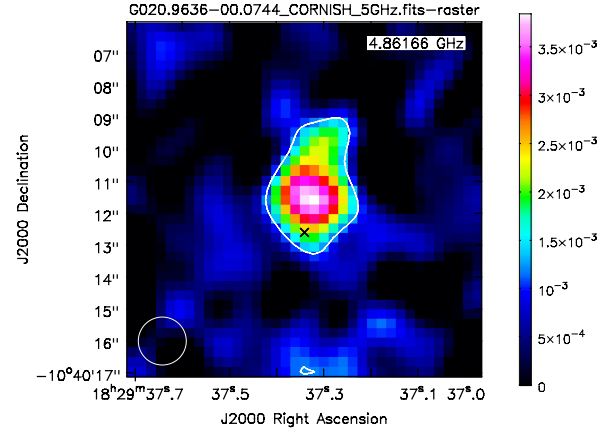
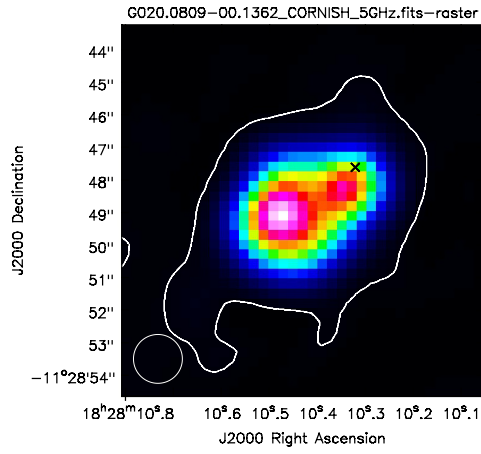
VLA による 5GHz 電波連続波のマップに、MMB survey で同定されたメタノールメーザーの位置を「×」で記した。図の左下の円は、VLA B-configuration のビームサイズ (1.5") を示す。図のカラーバーの単位は [Jy/beam] で記述した。白色のコントアはバックグラウンドに対し 7σ レベルで描写した。

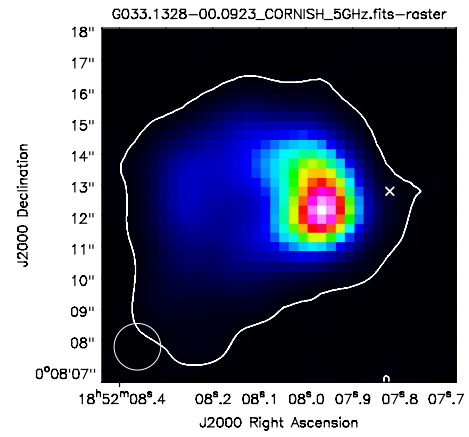
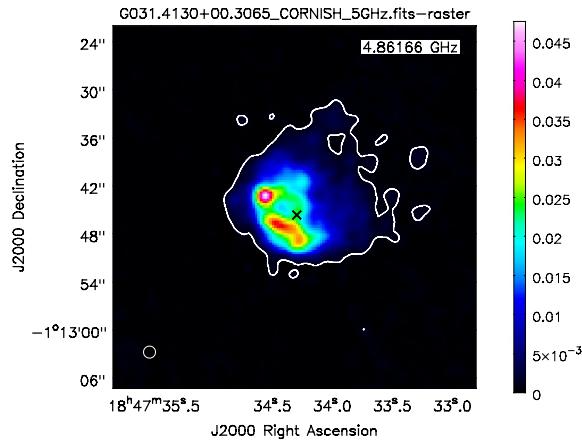
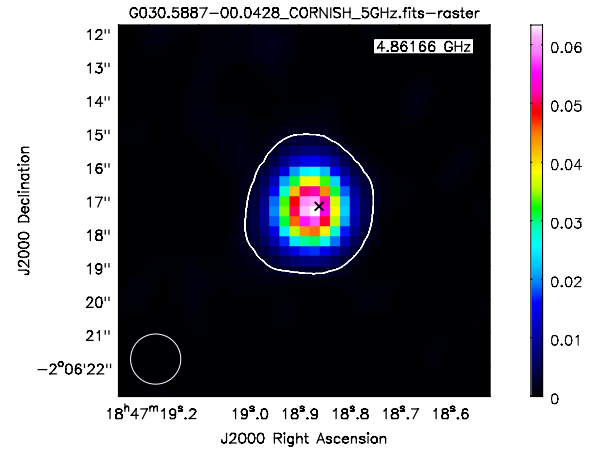
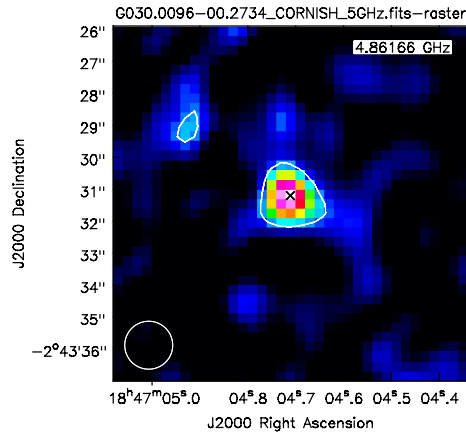
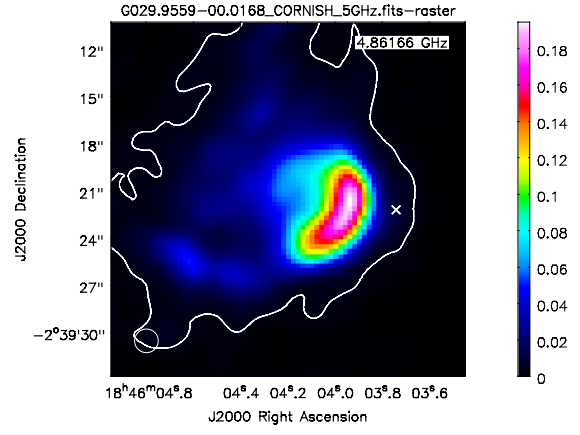
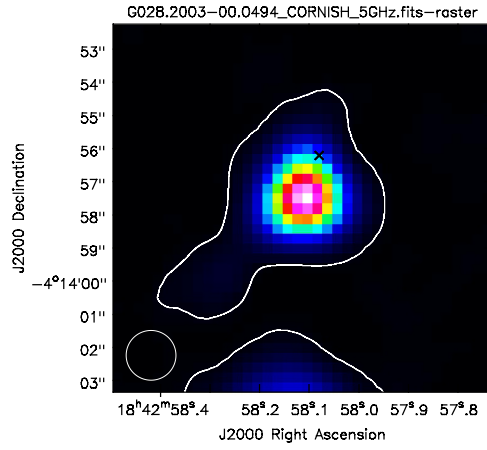


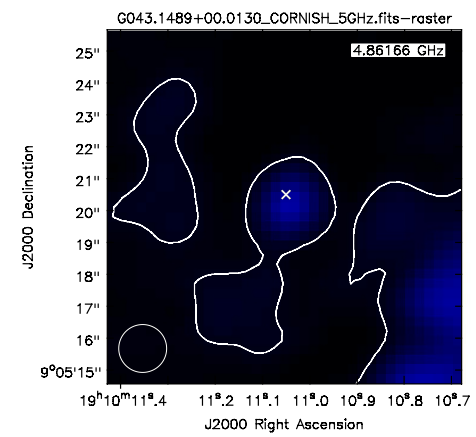
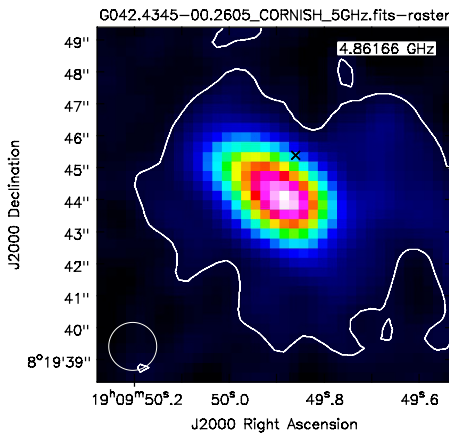
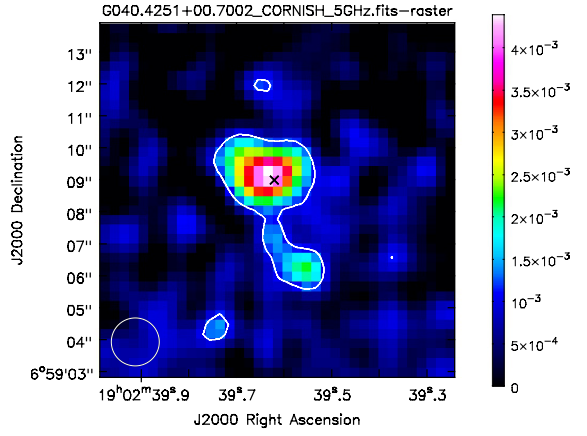
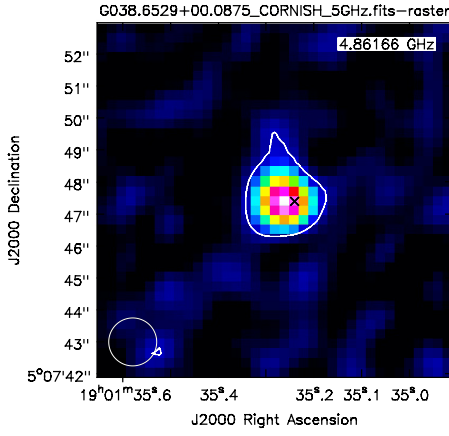
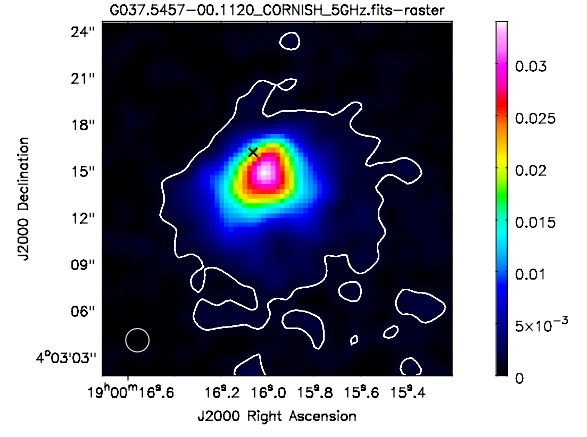
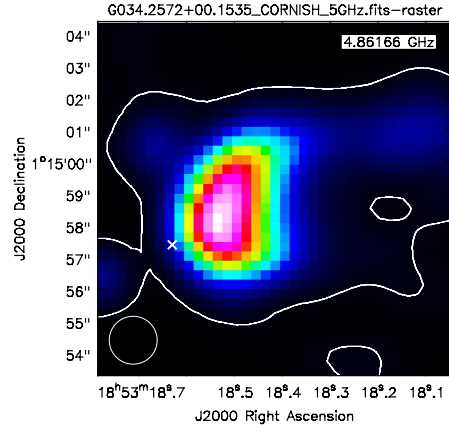


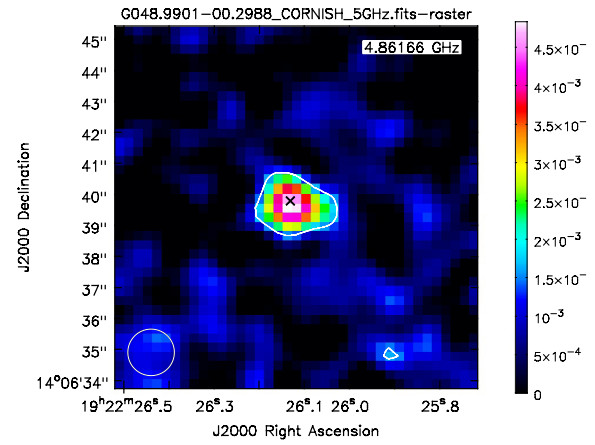
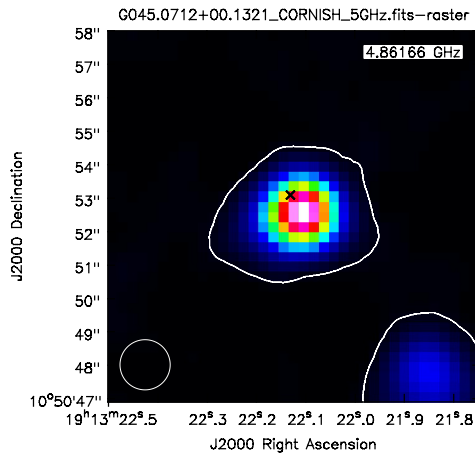
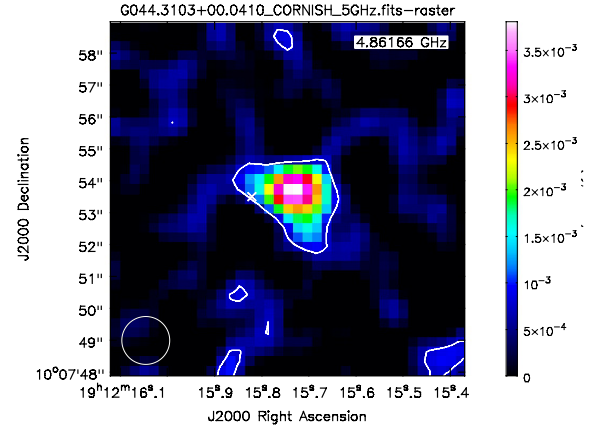
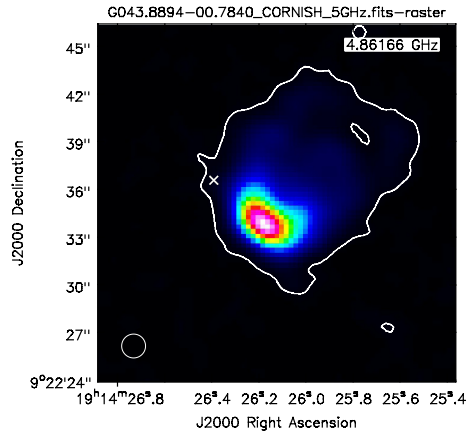
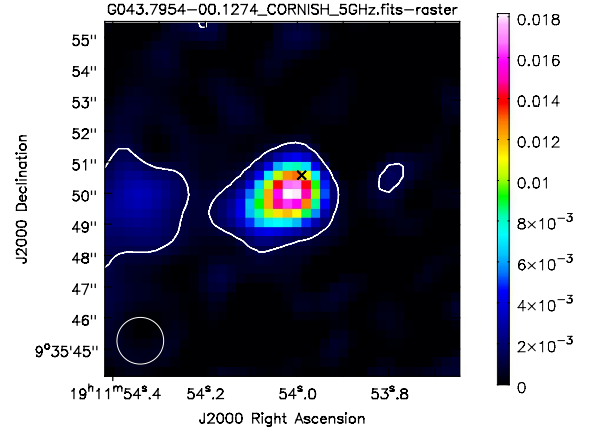
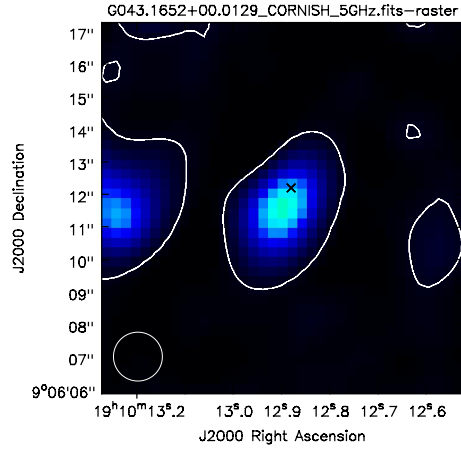
【銀経 $20^\circ \leq l \leq 65^\circ$ におけるメタノールメーザーが付随する UCH_{II} 領域】

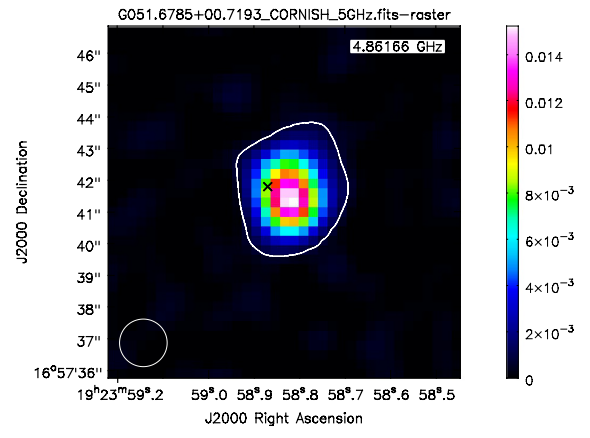
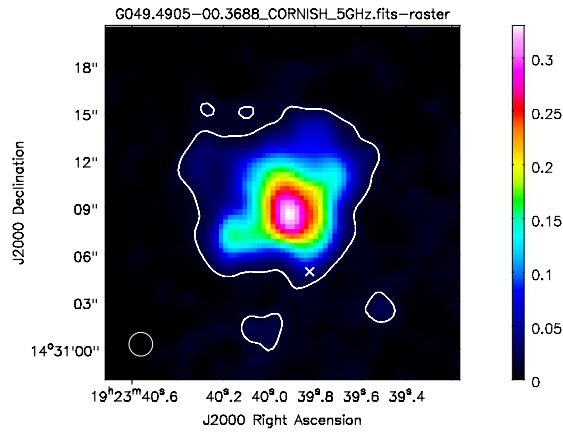
図のカラーバーの単位は $[\text{Jy}/\text{beam}]$ で記述した。







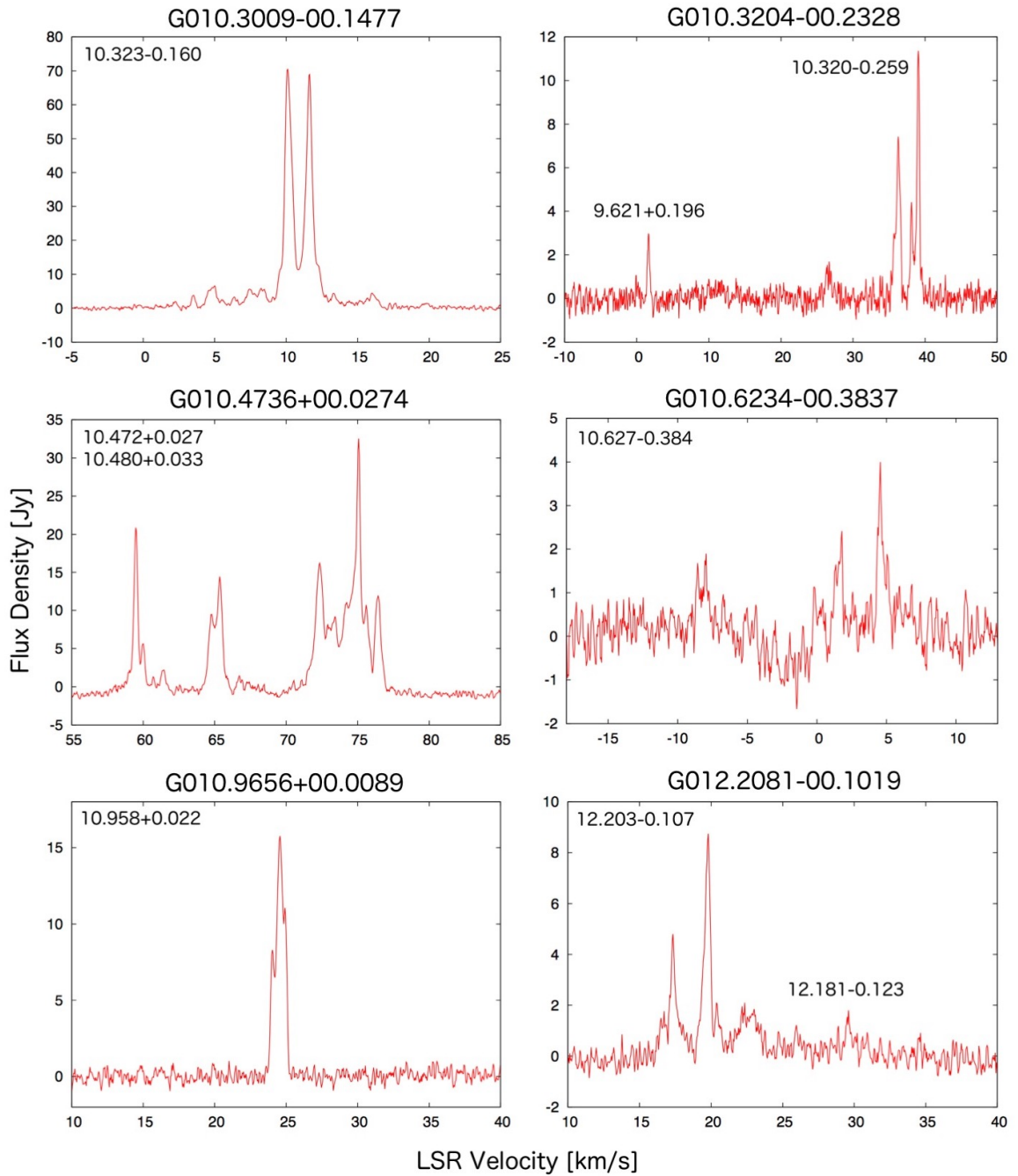


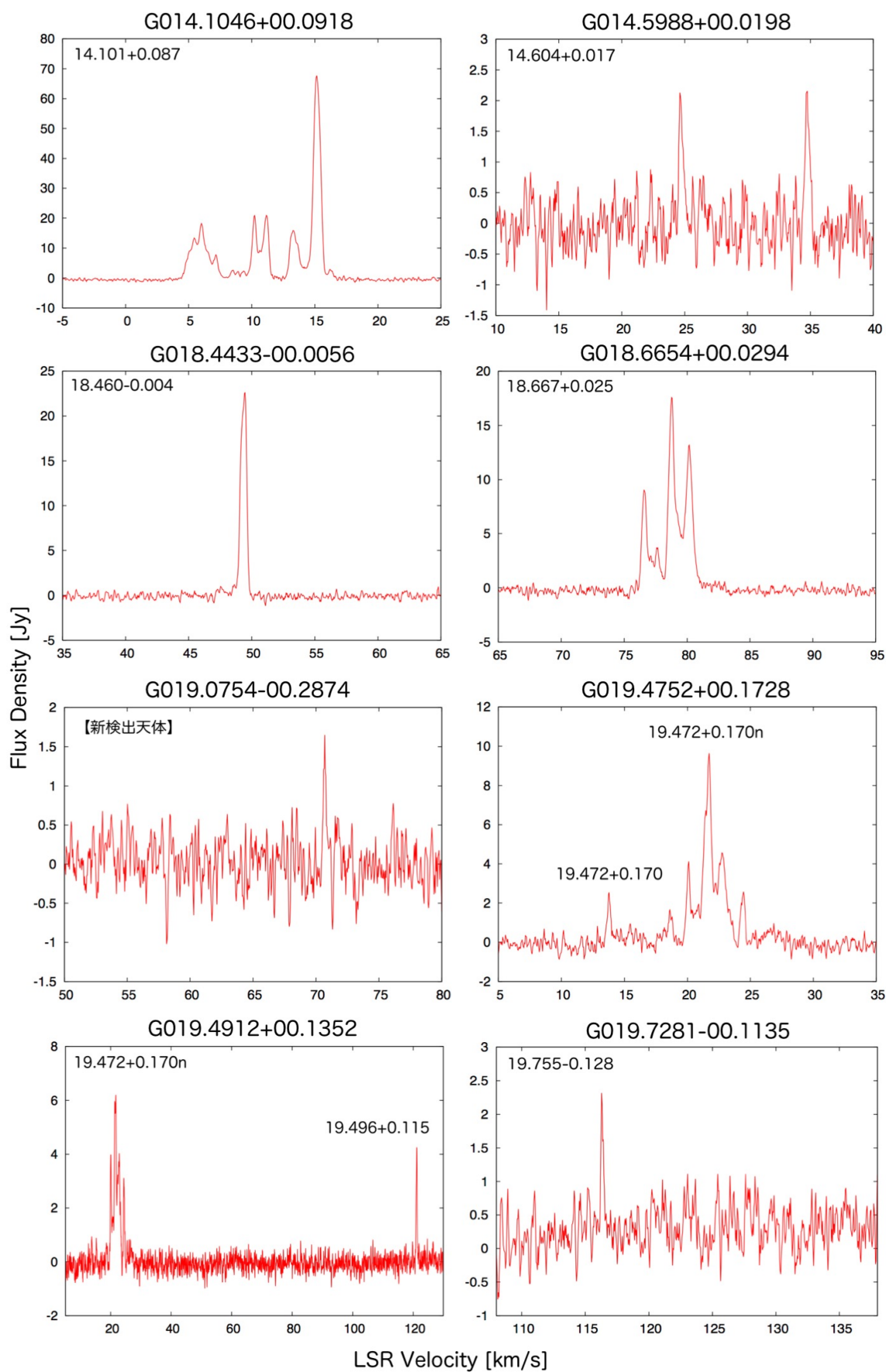


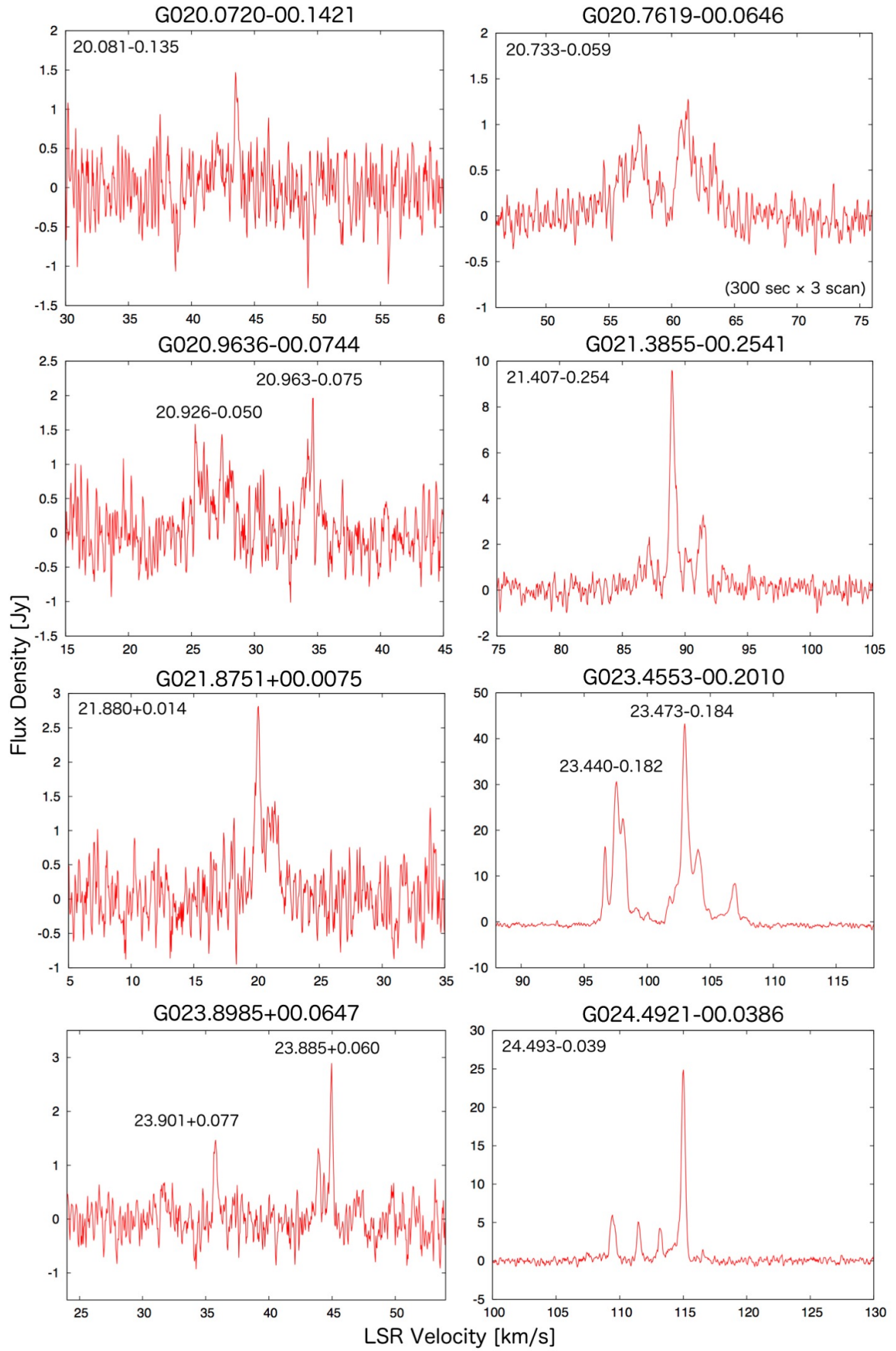
付録 B 観測スペクトル

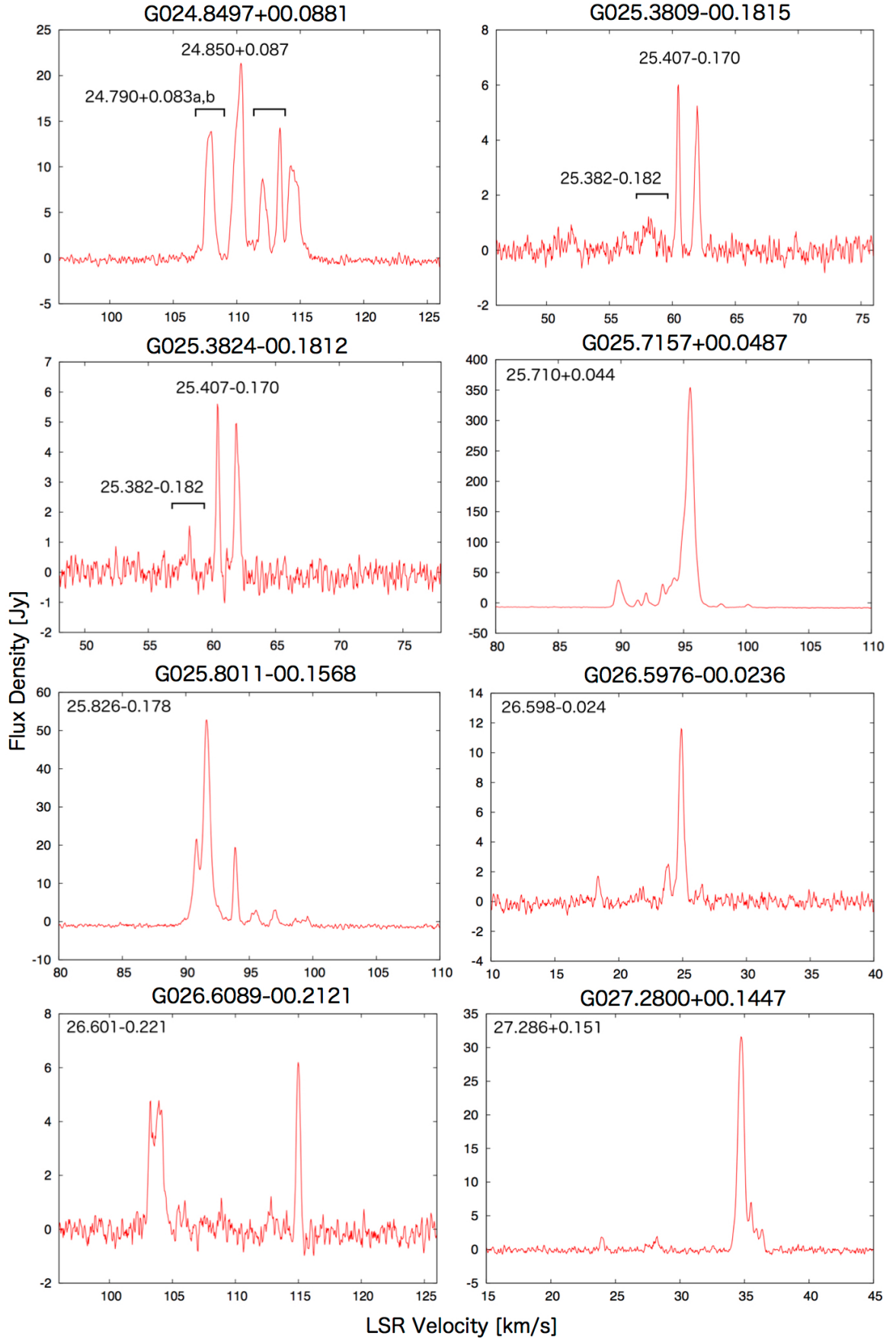
日立局で検出した 6.7GHz メタノールメーザーのスペクトルを以下に示す。スペクトル上部に記載した CORNISH 天体名が観測ポインティングの中心を示す。スペクトル図中に記述してある天体名は MMB survey (Green et al. 2010, Breen et al. 2015) によって同定された 6.7GHz メタノールメーザー源からの放射である。

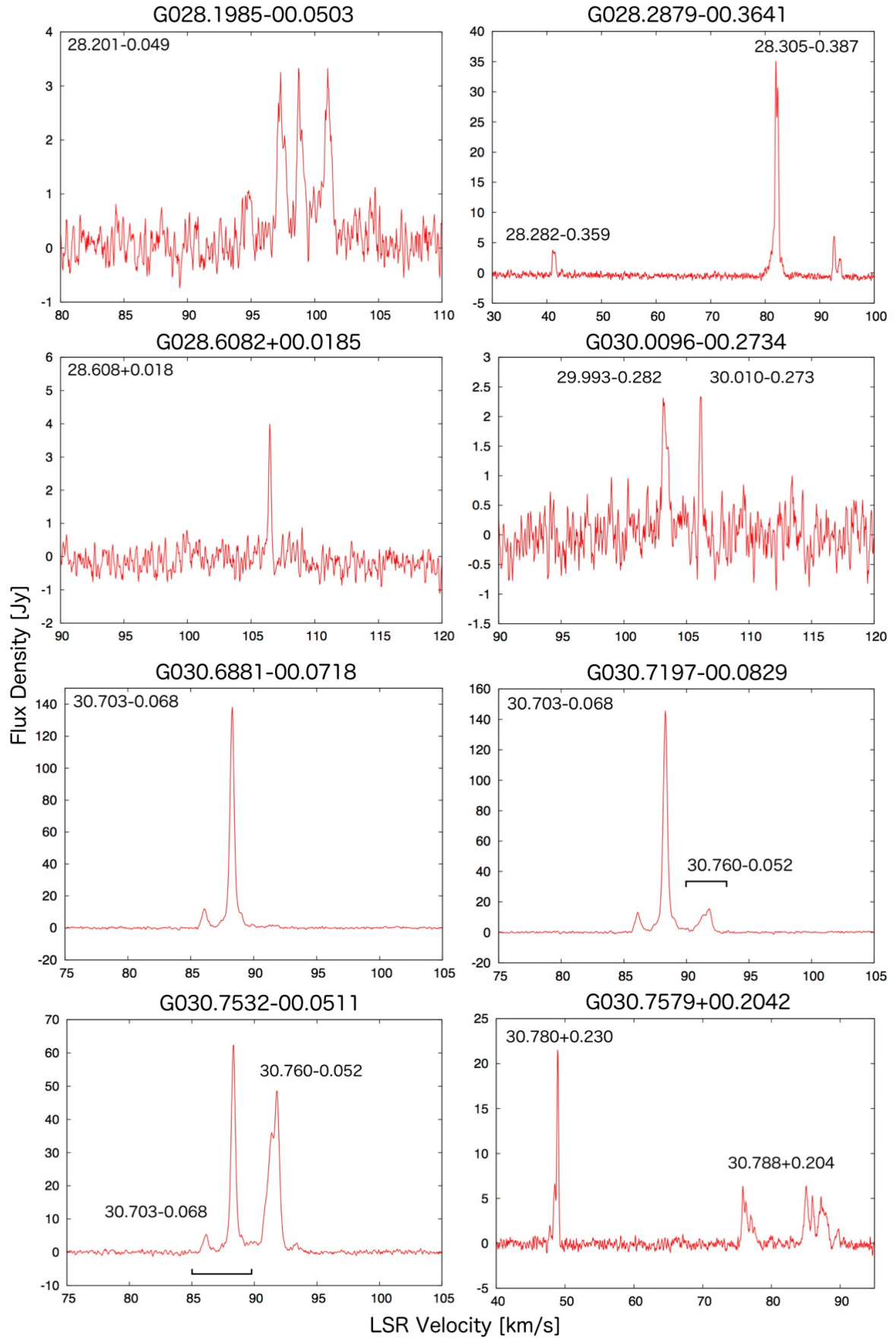
横軸が LSR Velocity [km/s]、縦軸がフラックス密度 [Jy] に相当する。

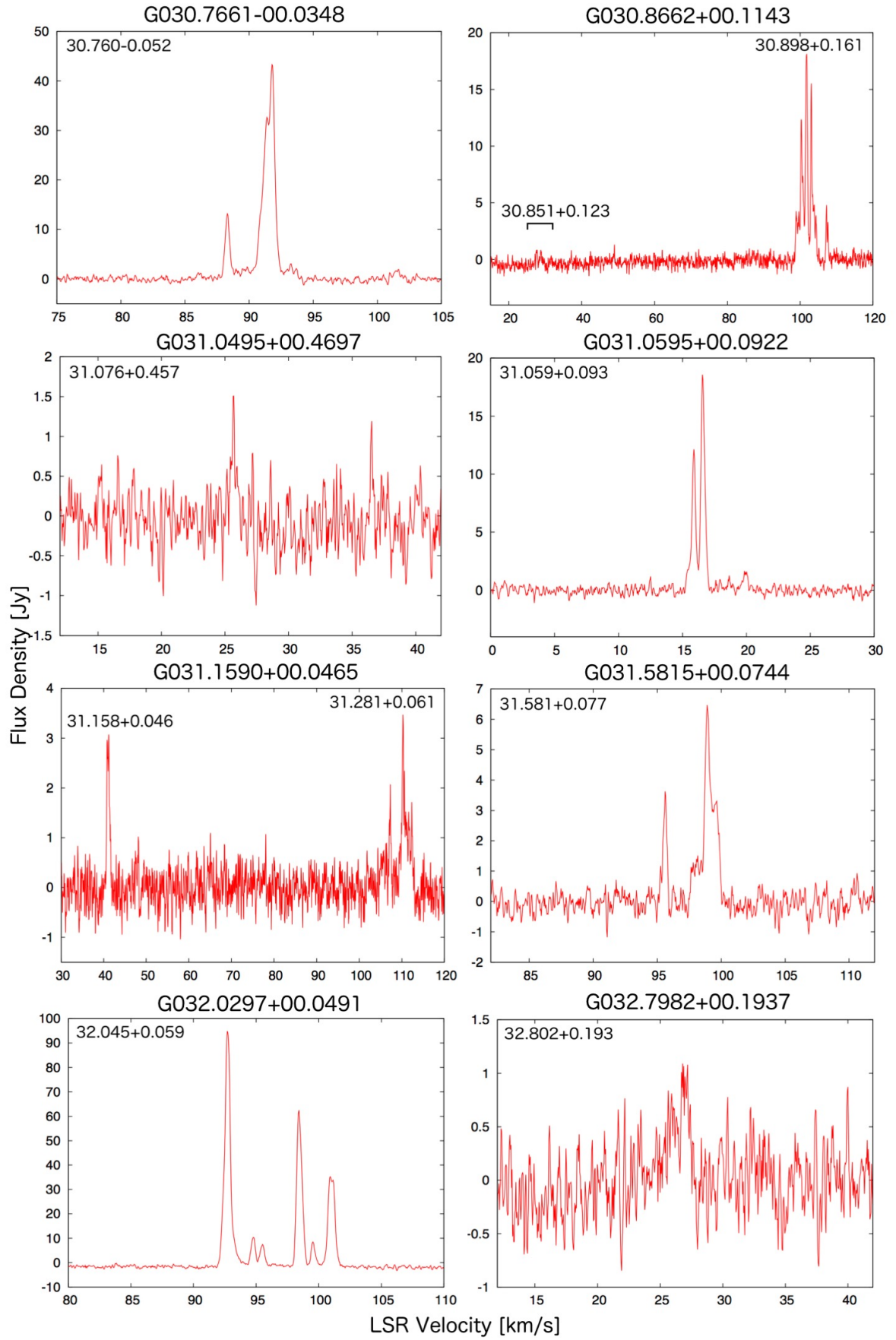


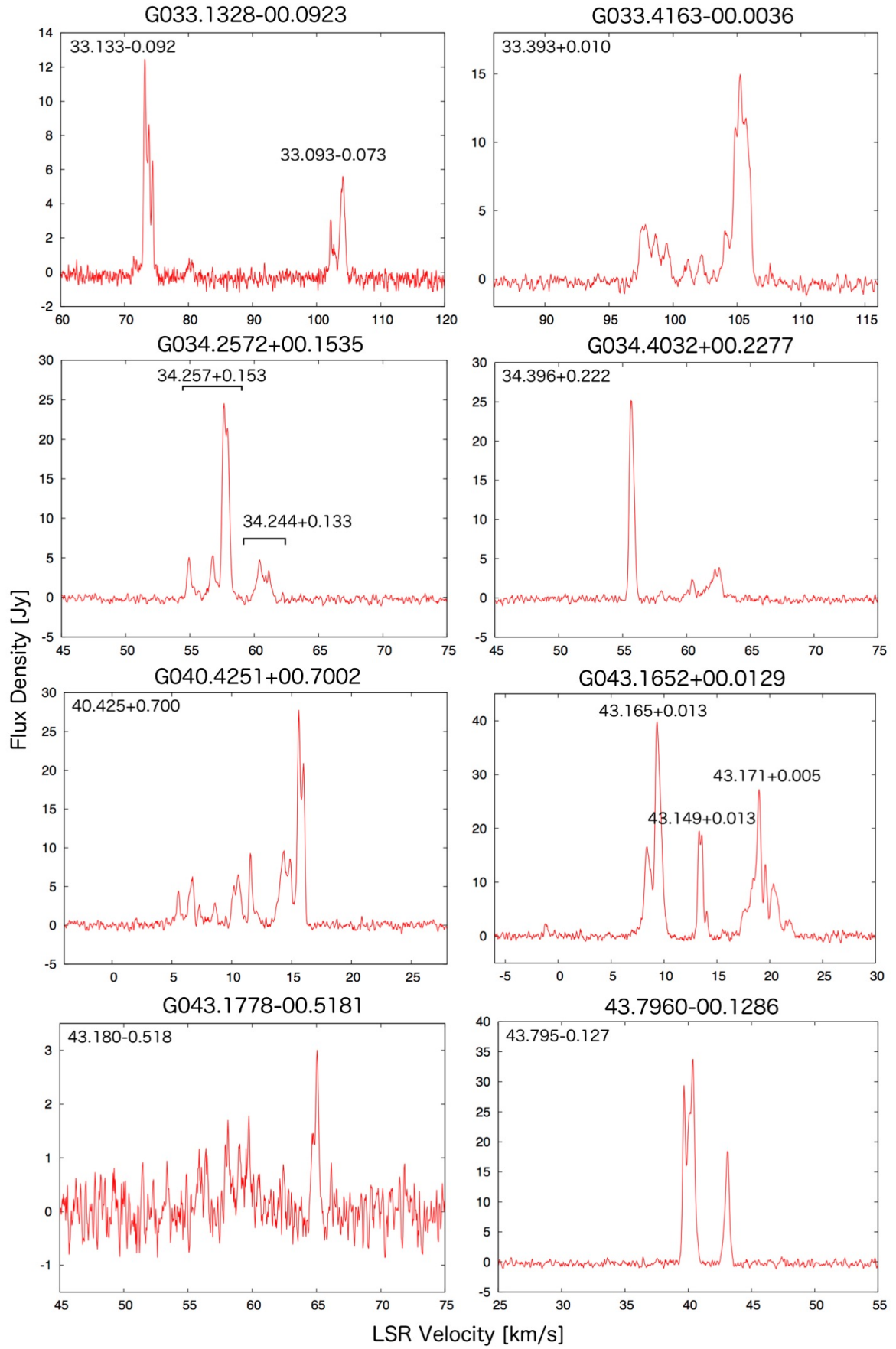


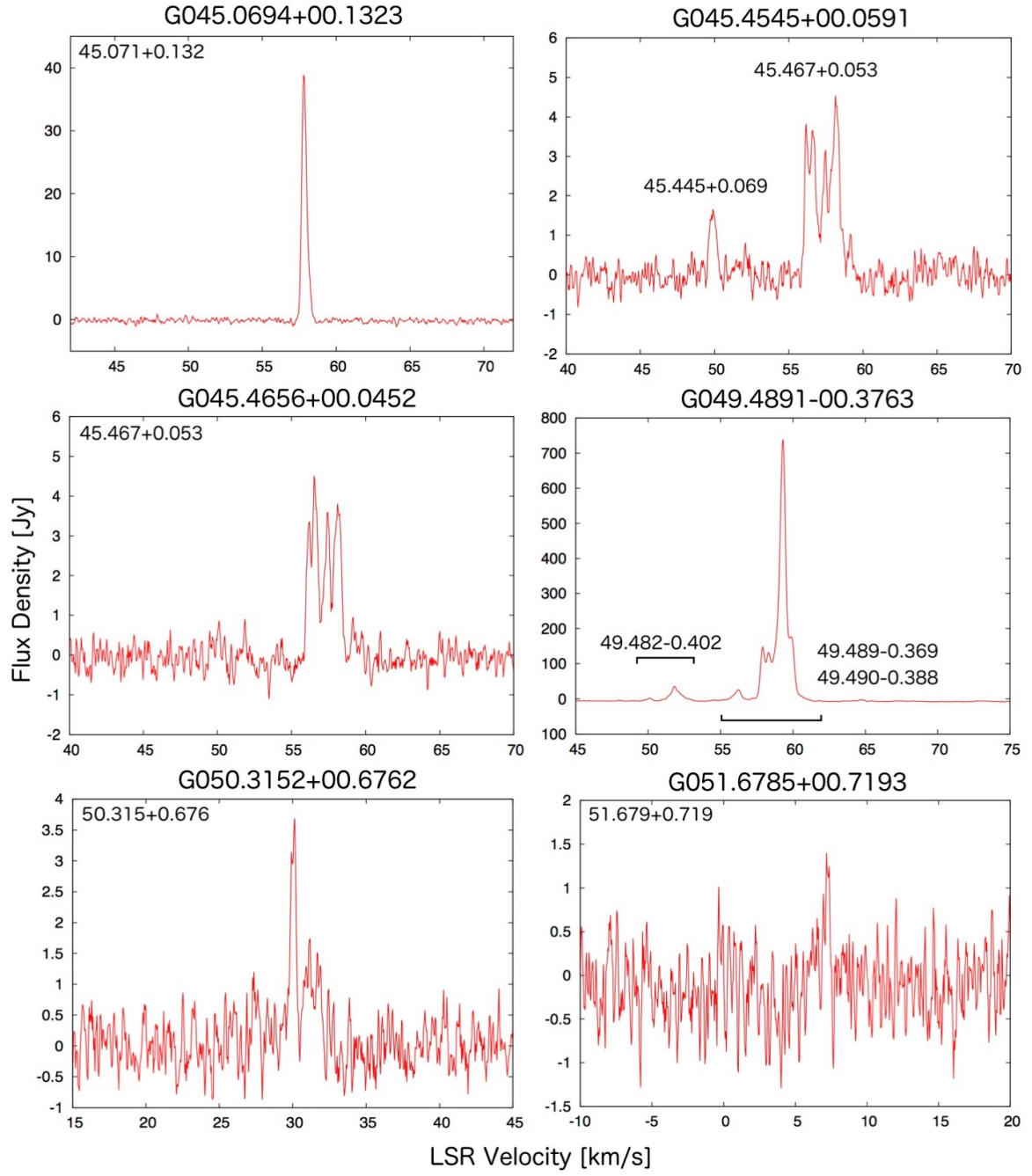












付録 C モニター観測スペクトル

新検出天体 G019.0754-00.2874 に対し、15 回のモニター観測で得られたスペクトルを表示する。横軸は LSR Velocity [km/s]、縦軸は Flux Density [Jy] である。スペクトルの右上に観測日、右下に rms ノイズレベル (1σ)、左上に 58.5km/s 成分の S/N 比を記載している。

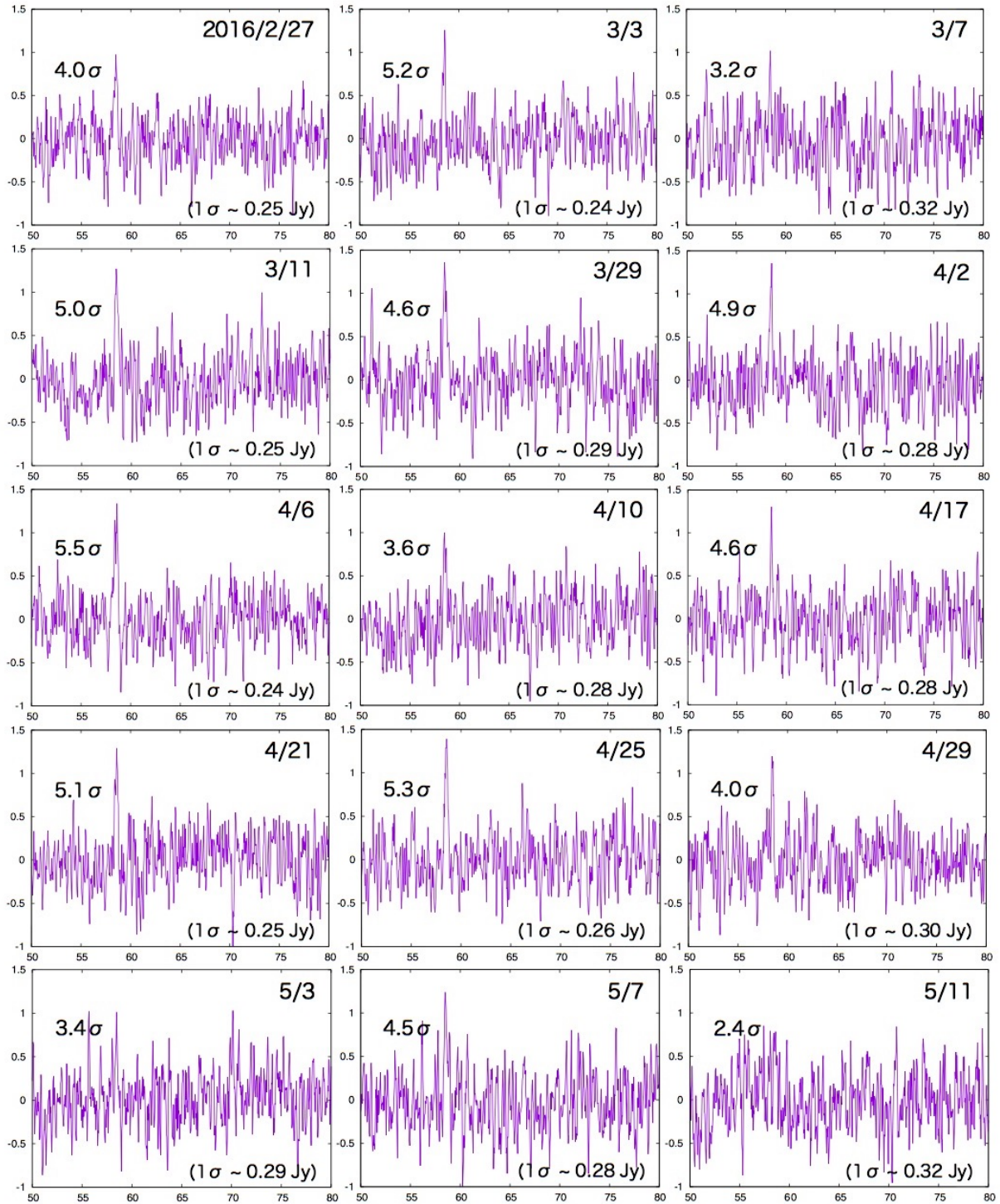


図 28 新検出天体 G019.0754-00.2874 のモニター観測スペクトル

付録 D kinematic distance 法

<< メーザー源が太陽円の内側に位置する場合 >> << メーザー源が太陽円の外側に位置する場合 >>

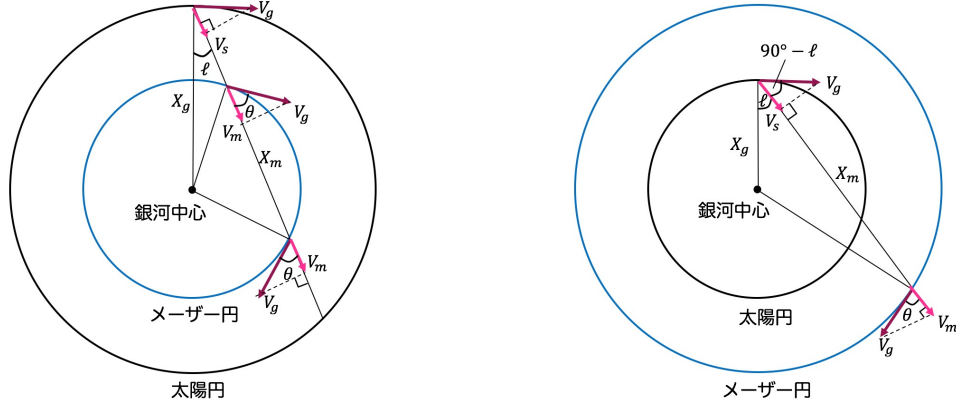


図 29 kinematic distance 法による距離の算出

天体までの距離を求める手法の 1 つに kinematic distance 法がある。この手法は銀河の回転速度が銀河中心からの距離によらず一定 (銀河中心から 1 kpc 以内では近似が成り立たないため、適用できない) という仮定のもと、太陽から天体までのおおよその距離をメーザーや分子輝線の視線速度を用いて求める方法である。距離を求めたいメーザー源の銀経を l とすると、視線方向における太陽の速度を V_s 、メーザー源の速度 V_m 、及び視線速度 V_{LSR} の間には、以下の関係がある。

$$V_{LSR} = V_m - V_s \quad (16)$$

$$V_s = V_g \sin l \quad (17)$$

$$V_m = V_g \cos \theta \quad (18)$$

ここで V_g は銀河回転定数である。 V_g と V_s のなす角 θ は

$$\cos \theta = \frac{V_{LSR} + V_g \sin l}{V_g} \quad (19)$$

と導かれる。さらに、銀河中心から太陽までの距離を X_g とすると、太陽からメーザー源までの距離 X_m は、

$$X_m = \begin{cases} \frac{X_g \cos(l+\theta)}{\cos \theta} & (X_g > X_m) \\ \frac{X_g \cos(l-\theta)}{\cos \theta} & (X_g < X_m) \end{cases}$$

と算出できる。

メーザー源が太陽軌道の内側に存在する場合は 2 通りの解が得られ、太陽に近い解を near side、遠い解を far side の解と呼ぶ。解を一意に求める際は、これらの切り分けを他のデータと比較する必要があり、一例として H_I Self-Absorption (H_I SA) の原理が挙げられる。一方でメーザー源が太陽軌道の外側に存在する場合は、一意に解が求まる。本研究の解析には、 $V_g = 246$ [km/s]、 $X_g = 8.4$ [kpc] を用いた (Green & Griffiths 2011)。

付録 E H_I Self-Absorption (H_I SA) による near/far の切り分け

太陽軌道の内側に位置するメーザー源に対して kinematic distance 法を用いた場合、near side と far side の 2 つの解が得られる。これらを切り分ける手段の一例に H_I SA の原理がある。

観測的に銀河中心から 4 - 16 kpc には中性水素 (H_I) ガスがほぼ一様に分布していることが確認されている。また H_I ガスは 21.1 cm の輝線を放射するが、銀河回転の影響により速度幅の広い放射をする。一方で、メーザーが生じる分子雲は周囲に比べて低温なため、背景の輝線放射に対して吸収線を示す。この 2 つの放射に生じる吸収の度合いにより near side と far side いずれからの放射であるかを判断する。

メタノールメーザー源が near side に位置する場合は、メーザー源の手前 (地球近傍) にメーザーと同じ速度の H_I ガスが無いため、吸収線が強く現れる。far side に位置する場合は、far side より手前にメーザーと同じ速度の H_I ガスが存在するため、near side に比べて吸収線が目立たないスペクトルを示す (図 30)。

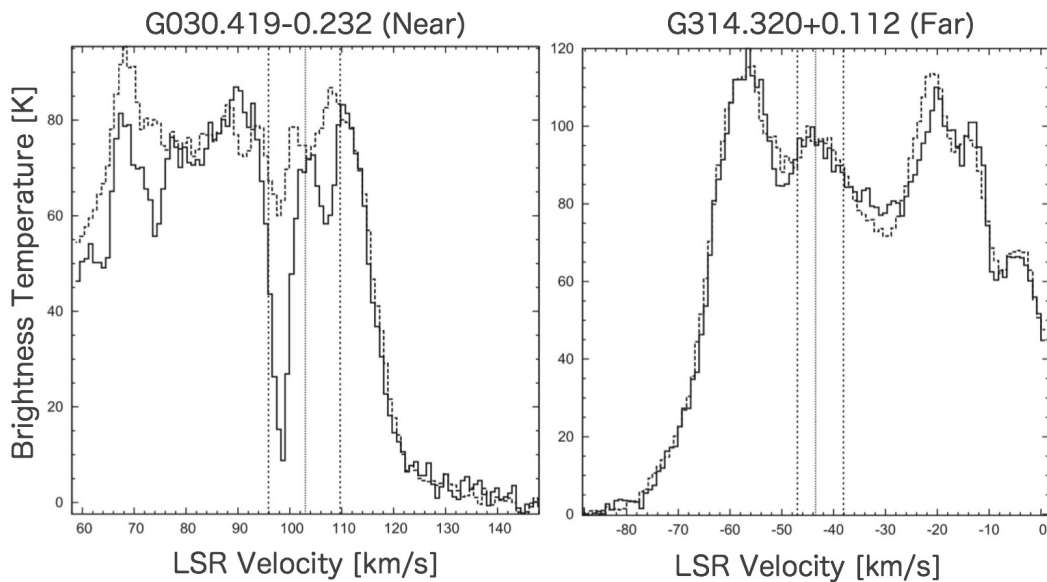


図 30 H_I SA のスペクトル例 (Green & Griffiths 2011). 速度幅の広い放射は H_I からの放射を示す. 実線はメーザー源が存在する視線方向から得られた H_I のスペクトルである. スペクトル中央部の 3 本の縦線のうち、中央がメタノールメーザーのピーク速度を示し、両端はメタノールメーザーの速度幅を示す. near side からの放射のみ吸収線が強く現れる.

付録 F Kolmogorov-Smirnov (K-S) 検定

分布の差異を定量的に示す検定法の 1 つに Kolmogorov-Smirnov (K-S) 検定がある。得られたデータが特定の分布に一致するかを検定する 1 標本 K-S 検定と、2 つの母集団の確率分布が一致するかを検定する 2 標本 K-S 検定に分けられる。検定を実施するにあたりサンプル数の制限があるものの、分布の種類を問わずに検定できる利点がある。以下にそれぞれの場合の検定方法を記述する。

【1 標本 K-S 検定】

標本 X が 1 独立変数の確率密度関数 $f(x)$ と一致するかを検定する。

ただし、標本数 n が $n > 20$ を満たす場合のみ検定可能。

- (1) 帰無仮説を「標本 X が確率密度関数 $f(x)$ から発生」とする
- (2) 標本 X の累積確率分布 $S_n(x)$ と確率密度関数 $f(x)$ の累積頻度分布 $F(x)$ を求める

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(y)dy$$

- (3) 2 つの累積頻度分布の差の絶対値の最大値 (K-S 統計量 D) を求める

$$D = \max |S_n(x) - F(x)|$$

- (4) 2 つの分布が等しいという仮定のもと、 D の有意確率 $D\sqrt{n}$ を算出する
有意水準 5% で検定する場合、 $D\sqrt{n}$ が 1.36 以上であれば帰無仮説は棄却され、「標本 X は確率密度関数 $f(x)$ に一致しない」と判断する。

【2 標本 K-S 検定】

標本 X 、標本 Y が同一の母集団の確率密度関数により生じるかを検定する。

ただし、標本数 n, m が $\frac{nm}{n+m} > 20$ を満たす場合のみ検定可能。

- (1) 帰無仮説を「標本 X と標本 Y が同一の確率密度関数から発生」とする
- (2) 標本 X と標本 Y それぞれの累積確率分布 $S_n(x)$, $S_m(x)$ を求める
- (3) 2 つの累積頻度分布の差の絶対値の最大値 (K-S 統計量 D) を求める

$$D = \max |S_n(x) - S_m(x)|$$

- (4) 2 つの分布が等しいという仮定のもと、 D の有意確率 $D\sqrt{\frac{nm}{n+m}}$ を算出する
有意水準 5% で検定する場合、 $D\sqrt{\frac{nm}{n+m}}$ が 1.36 以上であれば帰無仮説は棄却され、「標本 X と標本 Y の確率密度関数は一致しない」と判断する。

付録 G CORNISH データベース

CORNISH survey により同定された 240 の UCH_{II} 領域の座標、視直径、距離、サイズを以下に示す。なお、6.7GHz メタノールメーザーが付随する UCH_{II} 領域は、備考欄に「付随」と記した。また、本観測により新たに 6.7GHz メタノールメーザーが検出された UCH_{II} 領域は「新検出」と記した。

No.	CORNISH 天体名	RA (J2000)			Dec (J2000)			視直径	距離	サイズ	備考
	銀経 l $\pm$ 銀緯 b	h	m	s	d	m	s	arcsec	kpc	10^3 au	
1	G010.3009-00.1477	18	8	55.95	-20	5	55.34	5.5	-	-	付随 付随
2	G010.3204-00.2328	18	9	17.53	-20	7	23.07	3.2	3.8/12.8	12.2/41.3	
3	G010.3204-00.2586	18	9	23.28	-20	8	6.91	1.7	3.8/12.8	6.3/21.4	
4	G010.4724+00.0275	18	8	38.18	-19	51	49.77	2.2	8.6	19.3	
5	G010.4736+00.0274	18	8	38.32	-19	51	45.6	2.0	8.6	17.4	
6	G010.6218-00.3848	18	10	28.75	-19	55	56.46	2.3	4.9	11.2	
7	G010.6223-00.3788	18	10	27.54	-19	55	45.75	5.8	4.9	28.2	
8	G010.6234-00.3837	18	10	28.7	-19	55	49.13	4.6	4.9	22.7	
9	G010.6240-00.3813	18	10	28.19	-19	55	43.59	2.1	4.9	10.2	
10	G010.6297-00.3380	18	10	19.23	-19	54	10.52	3.5	4.9	16.9	
11	G010.8519-00.4407	18	11	9.53	-19	45	28.05	1.8	-	-	付随
12	G010.9584+00.0221	18	9	39.38	-19	26	27.98	2.2	13.7	30.2	
13	G010.9656+00.0089	18	9	43.06	-19	26	28.61	4.9	2.6	12.7	
14	G011.0328+00.0274	18	9	47.35	-19	22	24.32	1.9	-	-	
15	G011.1104-00.3985	18	11	31.99	-19	30	41.66	8.4	4.9	40.9	
16	G011.1712-00.0662	18	10	25.11	-19	17	47.46	10.7	13.6	146.2	
17	G011.9032-00.1407	18	12	11.26	-18	41	30.73	3.2	4.0	12.8	
18	G011.9039-00.1411	18	12	11.42	-18	41	29.03	1.8	4.0	7.4	
19	G011.9368-00.6158	18	14	1.1	-18	53	23.53	5.9	3.8	22.4	
20	G011.9446-00.0369	18	11	53.26	-18	36	17.46	14.6	12.5	183.0	
21	G011.9786-00.0973	18	12	10.78	-18	36	17.51	1.8	-	-	付随 付随
22	G012.1988-00.0345	18	12	23.61	-18	22	53.67	2.7	12.0	32.1	
23	G012.2081-00.1019	18	12	39.69	-18	24	21.33	2.8	2.3/6.5	14.1/40.1	
24	G012.4294-00.0479	18	12	54.57	-18	11	8.62	2.7	-	-	
25	G012.4317-01.1112	18	16	51.21	-18	41	28.23	4.4	3.9	17.2	
26	G012.8050-00.2007	18	14	13.96	-17	55	44.87	16.2	2.4	38.9	
27	G012.8131-00.1976	18	14	14.16	-17	55	15.78	5.4	2.4	13.0	
28	G012.9995-00.3583	18	15	12.18	-17	50	0.76	3.1	-	-	
29	G013.2099-00.1428	18	14	50.01	-17	32	44.49	8.3	-	-	
30	G013.3850+00.0684	18	14	24.6	-17	17	32.35	19.2	-	-	
31	G013.8726+00.2818	18	14	35.81	-16	45	37.19	15.4	-	-	付随
32	G014.1046+00.0918	18	15	45.1	-16	38	51.15	2.9	1.3/15.0	3.8/42.8	
33	G014.1741+00.0245	18	16	8.46	-16	37	5.77	6.9	-	-	
34	G014.2460-00.0728	18	16	38.3	-16	36	6.15	3.9	-	-	
35	G014.5988+00.0198	18	16	59.81	-16	14	49.42	1.8	2.8	5.2	
36	G014.7785-00.3328	18	18	38.7	-16	15	22.36	2.3	13.1	30.2	
37	G016.1448+00.0088	18	20	4.6	-14	53	25.94	1.6	12.4	19.8	
38	G016.3913-00.1383	18	21	5.51	-14	44	32.58	11.7	-	-	
39	G016.9445-00.0738	18	21	56.02	-14	13	26.13	3.5	16.5	57.1	
40	G017.0299-00.0696	18	22	5.05	-14	8	47.91	2.4	10.8	25.8	付随
41	G017.1141-00.1124	18	22	24.19	-14	5	32.7	2.8	10.6	30.1	
42	G017.5549+00.1654	18	22	14.78	-13	34	21.98	2.2	-	-	
43	G017.9850+00.1266	18	23	13.02	-13	12	40.26	3.6	-	-	
44	G018.1460-00.2839	18	25	0.77	-13	15	27.5	23.4	4.1	96.0	
45	G018.3024-00.3910	18	25	42.3	-13	10	19	14.6	2.8	41.0	
46	G018.4433-00.0056	18	24	34.66	-12	52	5.45	2.4	-	-	
47	G018.4614-00.0038	18	24	36.33	-12	51	4.77	2.8	12.1	33.4	
48	G018.6654+00.0294	18	24	52.62	-12	39	19.85	1.7	11.0	19.2	
49	G018.7106+00.0002	18	25	4.14	-12	37	44.97	2.0	2.5	5.1	
50	G018.7612+00.2630	18	24	12.86	-12	27	41.66	1.8	13.9	24.9	付随
51	G018.8250-00.4675	18	26	59.05	-12	44	46.17	2.5	4.5	11.4	
52	G018.8338-00.3002	18	26	23.61	-12	39	40.7	6.7	12.6	84.6	
53	G019.0035+00.1280	18	25	10.01	-12	18	37.84	2.8	-	-	
54	G019.0754-00.2874	18	26	48.43	-12	26	28.04	8.5	4.5	38.2	
55	G019.0767-00.2882	18	26	48.87	-12	26	23.46	2.5	4.5	11.4	
56	G019.4752+00.1728	18	25	54.31	-11	52	21.42	3.7	1.8	6.7	
57	G019.6087-00.2351	18	27	38.27	-11	56	36.07	13.1	12.6	165.2	
58	G019.6090-00.2313	18	27	37.4	-11	56	31.97	3.8	12.6	48.4	
59	G019.7281-00.1135	18	27	25.35	-11	46	56.32	3.4	4.1	13.8	付随
60	G019.7549-00.1282	18	27	31.6	-11	45	54.72	1.6	9.7	15.9	
61	G020.0720-00.1421	18	28	10.78	-11	29	26.84	5.4	12.5	67.3	
62	G020.0797-00.1337	18	28	9.81	-11	28	48.69	2.2	12.6	27.3	

63	G020.0809-00.1362	18	28	10.42	-11	28	48.88	3.0	12.6	37.5	付随
64	G020.3633-00.0136	18	28	16	-11	10	24.21	2.9	-	-	
65	G020.7619-00.0646	18	29	12.36	-10	50	38.41	2.5	11.8	29.1	
66	G020.9636-00.0744	18	29	37.32	-10	40	11.33	2.5	2.6/13.1	6.5/32.6	付随
67	G021.3571-00.1766	18	30	43.94	-10	22	6.63	1.9	10.5	20.1	
68	G021.3855-00.2541	18	31	3.92	-10	22	45.28	2.2	10.5	23.3	
69	G021.6034-00.1685	18	31	10	-10	8	46.59	3.7	-	-	
70	G021.8751+00.0075	18	31	2.48	-9	49	30.79	11.5	13.6	156.1	
71	G023.1974-00.0006	18	33	32.91	-8	39	18.4	2.3	-	-	
72	G023.2654+00.0765	18	33	23.91	-8	33	34.45	4.6	4.6	21.1	
73	G023.4553-00.2010	18	34	44.92	-8	31	7.11	1.7	-	-	
74	G023.4835+00.0964	18	33	44.04	-8	21	23.52	2.1	4.8/10.6	10.3/22.8	
75	G023.7110+00.1705	18	33	53.47	-8	7	13.69	4.7	7.7	36.1	
76	G023.8618-00.1250	18	35	13.95	-8	7	23.08	4.0	-	-	
77	G023.8985+00.0647	18	34	37.23	-8	0	10.29	4.1	12.5	51.3	
78	G023.9564+00.1493	18	34	25.2	-7	54	45.83	13.1	4.6	60.5	
79	G024.1839+00.1199	18	34	57.21	-7	43	26.58	1.7	7.7	13.0	
80	G024.4698+00.4954	18	34	8.43	-7	17	50.26	2.9	-	-	
81	G024.4721+00.4877	18	34	10.33	-7	17	56.03	3.9	-	-	
82	G024.4736+00.4950	18	34	8.89	-7	17	41.31	5.6	-	-	
83	G024.4921-00.0386	18	36	5.69	-7	31	23.26	4.4	5.7/9.6	25.3/42.6	付随
84	G024.5065-00.2224	18	36	46.81	-7	35	41.07	6.2	5.4	33.4	
85	G024.8497+00.0881	18	36	18.18	-7	8	51.31	3.7	7.7	28.3	
86	G025.3809-00.1815	18	38	15	-6	48	1.19	8.5	2.7	22.8	付随
87	G025.3824-00.1812	18	38	15.26	-6	47	52.6	3.4	2.7	9.3	
88	G025.3948+00.0332	18	37	30.58	-6	41	19.6	4.6	16.3	75.6	
89	G025.3970+00.5614	18	35	37.44	-6	26	38.34	2.0	13.8	28.1	
90	G025.3981-00.1411	18	38	8.27	-6	45	58.16	8.6	5.2	44.7	
91	G025.3983+00.5617	18	35	37.53	-6	26	33.6	2.5	13.8	34.6	
92	G025.3991-00.1366	18	38	7.42	-6	45	46.77	3.4	5.2	17.5	
93	G025.7157+00.0487	18	38	2.8	-6	23	47.04	2.4	9.8	23.1	
94	G025.8011-00.1568	18	38	56.36	-6	24	53.36	1.8	5.2	9.3	
95	G026.0083+00.1369	18	38	16.28	-6	5	45.56	1.8	-	-	
96	G026.0916-00.0565	18	39	6.99	-6	6	38.48	2.6	12.9	33.0	
97	G026.1094-00.0937	18	39	16.92	-6	6	43.01	1.6	13.1	20.7	
98	G026.5976-00.0236	18	39	55.87	-5	38	45.58	2.6	13.2	35.0	付随
99	G026.6089-00.2121	18	40	37.51	-5	43	20.1	6.5	7.5	48.9	
100	G026.8304-00.2067	18	41	0.84	-5	31	22.04	2.0	-	-	
101	G027.1859-00.0816	18	41	13.27	-5	8	57.88	2.0	13.0	26.4	
102	G027.2800+00.1447	18	40	35.17	-4	57	45.66	5.7	12.6	72.4	
103	G027.3644-00.1657	18	41	50.98	-5	1	45.15	2.3	5.1	11.5	付随
104	G027.5637+00.0845	18	41	19.39	-4	44	20.65	12.3	10.1	124.0	
105	G027.9352+00.2056	18	41	34.34	-4	21	6.41	1.6	12.0	19.2	
106	G028.1985-00.0503	18	42	58.14	-4	14	4.87	3.0	5.3	16.2	
107	G028.2003-00.0494	18	42	58.12	-4	13	57.51	2.2	5.3	11.6	付随
108	G028.2879-00.3641	18	44	15.1	-4	17	55.96	4.6	11.6	53.4	
109	G028.4518+00.0027	18	43	14.61	-3	59	6.6	2.3	-	-	
110	G028.5816+00.1447	18	42	58.46	-3	48	17.26	5.3	-	-	
111	G028.6082+00.0185	18	43	28.48	-3	50	19.16	3.6	7.4	26.8	
112	G028.6523+00.0273	18	43	31.41	-3	47	45.34	5.7	7.4	41.9	
113	G028.6869+00.1770	18	43	3.23	-3	41	45.79	5.3	10.0	52.8	
114	G029.7704+00.2189	18	44	53.16	-2	42	49.09	6.6	-	-	
115	G029.9559-00.0168	18	46	4.18	-2	39	21.28	9.6	4.9	47.1	付随
116	G030.0096-00.2734	18	47	4.71	-2	43	31.22	1.6	5.6/9.0	9.0/14.5	付随
117	G030.2527+00.0540	18	46	21.41	-2	21	35.31	5.8	10.3	59.8	
118	G030.5313+00.0205	18	46	59.18	-2	7	36.44	5.5	11.4	63.2	
119	G030.5353+00.0204	18	46	59.36	-2	7	24.69	6.3	11.4	71.8	
120	G030.5887-00.0428	18	47	18.88	-2	6	17.25	1.8	11.6	20.7	付随
121	G030.6881-00.0718	18	47	36.15	-2	1	50.78	10.8	4.9	52.9	
122	G030.7197-00.0829	18	47	41.79	-2	0	22.33	4.6	4.9	22.5	
123	G030.7532-00.0511	18	47	38.67	-1	57	44.25	3.23	4.8	15.8	
124	G030.7579+00.2042	18	46	44.53	-1	50	28.59	4.1	-	-	
125	G030.7661-00.0348	18	47	36.61	-1	56	35.88	3.3	4.9	16.0	
126	G030.8662+00.1143	18	47	15.7	-1	47	10.93	3.1	11.8	36.5	
127	G030.9581+00.0869	18	47	31.61	-1	43	1.47	3.2	11.7	37.5	
128	G031.0495+00.4697	18	46	19.86	-1	27	39.46	1.8	12.1	21.6	
129	G031.0595+00.0922	18	47	41.61	-1	37	27.39	2.0	13.0	26.2	
130	G031.1590+00.0465	18	48	2.27	-1	33	23.97	2.0	2.6	5.3	
131	G031.1596+00.0448	18	48	2.71	-1	33	24.83	1.7	2.6	4.4	
132	G031.2420-00.1106	18	48	44.69	-1	33	14.49	7.8	12.8	100.0	
133	G031.2435-00.1103	18	48	45.04	-1	33	10.6	2.7	12.8	34.4	
134	G031.2448-00.1132	18	48	45.76	-1	33	11.87	3.1	12.8	40.2	
135	G031.2801+00.0632	18	48	11.82	-1	26	31.01	9.3	4.9	45.7	
136	G031.3959-00.2570	18	49	33.26	-1	29	9.34	10.0	4.9	49.2	
137	G031.4130+00.3065	18	47	34.29	-1	12	44.54	9.4	4.9	45.9	付随

138	G031.5815+00.0744	18	48	42.57	-1	10	4.47	2.4	4.9	11.8	
139	G032.0297+00.0491	18	49	37.05	0	46	50.22	4.3	4.9	20.9	
140	G032.1502+00.1329	18	49	32.55	0	38	5.53	12.4	4.9	60.7	
141	G032.2730-00.2258	18	51	2.32	0	41	24.61	9.8	12.5	122.9	
142	G032.4727+00.2036	18	49	52.55	0	18	57.04	2.3	11.0	24.9	
143	G032.7398+00.1940	18	50	23.82	0	4	57.25	1.6	-	-	
144	G032.7492-00.0643	18	51	20.01	0	11	30.91	2.1	11.6	24.9	
145	G032.7966+00.1909	18	50	30.95	0	1	56.54	10.0	12.9	129.2	
146	G032.7982+00.1937	18	50	30.27	0	1	50.37	2.0	12.9	25.6	
147	G032.9273+00.6060	18	49	16.29	0	16	22.39	6.8	17.2	117.1	
148	G033.1328-00.0923	18	52	8.05	0	8	12.59	4.0	9.5	38.2	付随
149	G033.4163-00.0036	18	52	20.31	0	25	48.68	8.8	9.6	84.2	
150	G033.8100-00.1864	18	53	42.2	0	41	47.17	2.2	11.0	24.1	
151	G033.9145+00.1105	18	52	50.43	0	55	28.68	10.1	7.0	71.0	
152	G034.0901+00.4365	18	51	59.76	1	13	47	2.4	-	-	
153	G034.1978-00.5912	18	55	51.11	0	51	25.14	3.3	-	-	
154	G034.2544+00.1460	18	53	19.91	1	14	38.62	5.9	3.4	20.0	
155	G034.2571+00.1466	18	53	20.01	1	14	46.45	2.4	3.4	8.3	
156	G034.2572+00.1535	18	53	18.4	1	14	58.87	5.8	3.4	19.6	付随
157	G034.2573+00.1523	18	53	18.79	1	14	56.35	1.5	3.4	5.1	
158	G034.2581+00.1533	18	53	18.68	1	15	0.69	1.5	3.4	5.1	
159	G034.4032+00.2277	18	53	18.67	1	24	47.67	1.7	1.6	2.8	
160	G034.5920+00.2434	18	53	35.99	1	35	18.35	2.7	-	-	
161	G035.0242+00.3502	18	54	0.49	2	1	18.3	1.6	2.7	4.2	
162	G035.0524-00.5177	18	57	9.03	1	39	2.85	3.7	10.6	38.9	
163	G035.4570-00.1791	18	56	41.04	2	9	55.52	1.7	-	-	
164	G035.4669+00.1394	18	55	34.16	2	19	10.69	5.1	9.0	46.1	
165	G035.5781-00.0305	18	56	22.57	2	20	27.82	2.5	10.3	26.1	
166	G036.4057+00.0226	18	57	41.98	3	6	5.47	1.9	3.6	6.7	
167	G036.4062+00.0221	18	57	42.14	3	6	6.39	1.6	3.6	5.8	
168	G037.5457-00.1120	19	0	15.95	4	3	12.95	8.2	10.0	81.8	付随
169	G037.7347-00.1128	19	0	36.99	4	13	18.6	1.8	10.4	18.3	
170	G037.7562+00.5605	18	58	15.29	4	32	56.02	7.0	-	-	
171	G037.8197+00.4140	18	58	53.52	4	32	17.5	4.3	11.9	50.7	
172	G037.8209+00.4125	18	58	54.04	4	32	18.7	2.2	11.9	26.4	
173	G037.8683-00.6008	19	2	36.16	4	7	1.26	5.2	10.0	51.8	
174	G037.8731-00.3996	19	1	53.59	4	12	51.73	8.9	9.4	83.8	
175	G037.9723-00.0965	19	0	59.67	4	26	25.93	2.4	-	-	
176	G038.5493+00.1646	19	1	7.57	5	4	22.43	8.3	2.1	17.4	
177	G038.6465-00.2260	19	2	41.71	4	58	50.26	2.5	4.4	11.0	
178	G038.6529+00.0875	19	1	35.26	5	7	47.45	1.6	15.9	25.4	付随
179	G038.6934-00.4524	19	3	35.36	4	55	6.82	2.7	9.8	26.3	
180	G038.8756+00.3080	19	1	12.54	5	25	43.62	3.6	14.1	50.4	
181	G039.1956+00.2255	19	2	5.58	5	40	31.72	1.9	14.9	29.0	
182	G039.8824-00.3460	19	5	24.14	6	1	26.61	3.8	9.1	34.6	
183	G040.4251+00.7002	19	2	39.61	6	59	8.63	2.9	11.7	34.5	付随
184	G041.7419+00.0973	19	7	15.57	7	52	43.55	5.6	11.4	64.0	
185	G042.1090-00.4469	19	9	53.56	7	57	14.84	1.8	8.7	16.0	
186	G042.4345-00.2605	19	9	49.9	8	19	43.99	3.6	5.1	18.5	付随
187	G043.1460+00.0139	19	10	10.63	9	5	13.7	6.2	11.1	69.1	
188	G043.1489+00.0130	19	10	11.04	9	5	20.17	1.7	11.1	18.3	付随
189	G043.1520+00.0115	19	10	11.74	9	5	27.13	2.6	11.1	28.9	
190	G043.1651-00.0283	19	10	22.01	9	5	3.22	9.6	11.1	106.6	
191	G043.1652+00.0129	19	10	12.9	9	6	11.57	2.1	11.1	23.0	付随
192	G043.1657+00.0116	19	10	13.23	9	6	11.46	1.8	11.1	20.4	
193	G043.1665+00.0106	19	10	13.55	9	6	12.52	3.7	11.1	40.9	
194	G043.1674+00.0128	19	10	13.16	9	6	18.57	1.7	11.1	19.2	
195	G043.1677+00.0196	19	10	11.76	9	6	32.87	4.2	11.1	46.2	
196	G043.1684+00.0087	19	10	14.15	9	6	15.01	2.3	11.1	25.6	
197	G043.1684+00.0124	19	10	13.36	9	6	21.41	1.5	11.1	16.7	
198	G043.1699+00.0115	19	10	13.73	9	6	24.59	2.1	11.1	23.7	
199	G043.1701+00.0078	19	10	14.72	9	6	19.18	7.5	11.1	83.6	
200	G043.1706-00.0003	19	10	16.37	9	6	7.21	1.8	0.99/11.3	1.8/20.6	
201	G043.1716+00.0001	19	10	16.39	9	6	10.98	2.7	0.99/2.6	2.6/30.1	
202	G043.1720+00.0080	19	10	14.71	9	6	25.78	2.6	11.1	29.1	
203	G043.1763+00.0248	19	10	11.54	9	7	6.65	4.5	11.1	50.1	
204	G043.1778-00.5181	19	12	8.78	8	52	5.98	7.2	8.2	58.7	
205	G043.2371-00.0453	19	10	33.51	9	8	24.47	3.8	11.1	41.9	
206	G043.3064-00.2114	19	11	17.05	9	7	28.96	2.5	4.2	10.6	
207	G043.7954-00.1274	19	11	54.03	9	35	49.99	1.8	9.0	16.5	付随
208	G043.7960-00.1286	19	11	54.37	9	35	49.75	2.4	9.0	21.4	
209	G043.8894-00.7840	19	14	26.11	9	22	35.18	5.4	4.4	23.7	付随
210	G043.9675+00.9939	19	8	11.03	10	16	2.98	1.7	13.3	22.7	
211	G044.3103+00.0410	19	12	15.73	10	7	53.58	1.7	8.0	13.4	付随
212	G044.4228+00.5377	19	10	41	10	27	39.91	1.6	16.2	26.0	

213	G045.0694+00.1323	19	13	21.85	10	50	47.63	2.0	4.4	8.6	付随
214	G045.0712+00.1321	19	13	22.11	10	50	52.63	1.9	4.4	8.3	
215	G045.1223+00.1321	19	13	27.96	10	53	35.69	7.5	4.4	32.8	
216	G045.1242+00.1356	19	13	27.44	10	53	47.9	4.8	4.4	21.3	
217	G045.4545+00.0591	19	14	21.31	11	9	11.7	7.6	7.3	55.6	
218	G045.4559+00.0613	19	14	21.09	11	9	21.61	3.4	7.3	24.7	付随
219	G045.4656+00.0452	19	14	25.69	11	9	25.24	1.7	5.9	10.0	
220	G045.5431-00.0073	19	14	45.74	11	12	5.08	6.0	-	-	
221	G048.6099+00.0270	19	20	30.64	13	55	42.21	7.1	10.8	76.2	
222	G048.9296-00.2793	19	22	14.98	14	4	0.67	6.2	-	-	
223	G048.9901-00.2988	19	22	26.11	14	6	39.65	1.8	5.4	9.5	付随
224	G049.2679-00.3374	19	23	7	14	20	15.81	6.2	-	-	
225	G049.3666-00.3010	19	23	10.61	14	26	30.89	3.7	5.4	20.0	
226	G049.4640-00.3511	19	23	32.99	14	30	14.83	5.8	5.4	31.1	
227	G049.4891-00.3763	19	23	41.44	14	30	51.41	3.1	5.4	16.6	
228	G049.4905-00.3688	19	23	39.93	14	31	9.37	5.8	5.4	31.1	付随
229	G050.3152+00.6762	19	21	27.51	15	44	21.11	2.1	2.1	4.4	
230	G050.3157+00.6747	19	21	28.17	15	44	21.65	9.8	2.1	20.6	
231	G051.6785+00.7193	19	23	58.82	16	57	41.54	1.8	9.9	17.7	
232	G052.7533+00.3340	19	27	32.21	17	43	26.83	8.7	8.8	76.2	
233	G053.9589+00.0320	19	31	5.22	18	38	16.91	2.3	4.9	11.3	付随
234	G058.7739+00.6457	19	38	48.65	23	8	40.13	2.7	2.9	7.9	
235	G059.6027+00.9118	19	39	34.65	23	59	49.16	1.7	4.2	7.1	
236	G060.8842-00.1286	19	46	20.14	24	35	29.24	1.5	2.2	3.3	
237	G061.4763+00.0892	19	46	49.07	25	12	44	6.5	2.2	14.4	
238	G061.4770+00.0891	19	46	49.22	25	12	48.04	1.5	2.2	3.4	
239	G061.7207+00.8630	19	44	23.64	25	48	43.42	2.4	14.0	34.0	
240	G065.2462+00.3505	19	54	25.62	28	35	23.13	1.5	-	-	

参考文献

- [1] McKee C. F. & Tan J. C., 2003, *AJ*, 585, 850
- [2] Bonnell I. A., Bate M. R., & Zinnecker H., *MNRAS*, 298, 93
- [3] Purcell C. R., 2006, Ph.D. thesis, The university of New South Wales
- [4] Kurtz S., 2005, *IAU Symp* 225
- [5] Wood D. O. S. & Churchwell E., 1989, *ApJS*, 69, 831
- [6] Wood D. O. S. & Churchwell E., 1989, *ApJ*, 340, 265
- [7] Panagia N., 1973, *AJ*, 78, 9
- [8] Conti P. S. & Garmany C. D., 1983, *ApJ*, 274, 302
- [9] Barrett A. H., Schuwartz P. R., & Waters J. W., 1971, *ApJL*, 168, 101
- [10] Batrla W., Matthews H. E., Menten K. M., Walmsley C. M., 1987, *Nat*, 326, 49
- [11] Menten K. M., 1991, *ApJL*, 380, 75
- [12] Cyganowski C. J., Brogan C. L., Hunter T. R., & Churchwell E., 2009, *ApJ*, 702, 1615
- [13] Ellingsen S.P., 2005, *MNRAS*, 359, 1498
- [14] Churchwell E., 2002, *ARA&A*, 40, 27
- [15] Caswell J. L., 2009, *PASA*, 26, 454
- [16] Caswell J. L. & Breen S. L., 2010, *MNRAS*, 407, 2599
- [17] Sanna A., Moscadelli L., Casaroni R., Tarchi A., Furuya R. S., & Goddi C., 2010, *A&A*, 517, 78
- [18] Ellingsen S. P., Voronkov M. A., Cragg D. M., Sobolev A. M., Breen S. L., & Godfrey P. D., 2007, *IAU Symp.* 242
- [19] Reid M. J., 2007, *IAU Symp.* 242
- [20] Walsh A. J., Hyland A. R., Robinson G., & Burton M. G., 1997, *MNRAS*, 291, 261
- [21] Walsh A. J., Burton M. G., Hyland A. R., & Robinson G., 1998, *MNRAS*, 301, 640
- [22] Hoare M. G., Purcell C. R., Churchwell E. B., Diamond P., Cotton W. D., Chandler C. J., Smethurst S., Kurtz S. E., Mundy L. G., Dougherty S. M., Fender R. P., Fuller G. A., Jackson J. M., Garrington S. T., Gledhill T. R., Goldsmith P. F., Lumsden S. L., Martí J., Moore T. J. T., Muxlow T. W. B., Oudmaijer R. D., Pandian J. D., Paredes J. M., Shepherd D. S., Spencer R. E., Thompson M. A., Umana G., Urquhart J. S., Zijlstra A. A., 2012, *PASP*, 124, 939
- [23] Purcell C. R., Hoare M. G., Cotton W. D., Lumsden S. L., Urquhart J. S., Chandler C. J., Churchwell E. B., Diamond P., Dougherty S. M., Fender R. P., Fuller G., Garrington S. T., Gledhill T. M., Goldsmith P. F., Hindson L., Jackson J. M., Kurtz S. E., Martí J., Moore T. J. T., Mundy L. G., Muxlow T. W. B., Oudmaijer R. D., Pandian J. D., Paredes J. M., Shepherd D. S., Smethurst S., Spencer R. E., Thompson M. A., Umana G., Zijlstra A. A., 2013, *ApJS*, 205, 1

- [24] Benjamin R. A., Churchwell E., Babler B. L., Bania T. M., Clemens D. P., Cohen M., Dickey J. M., Indebetouw R., Jackson J. M., Kobulnicky H. A., Lazarian A., Marston A. P., Mathis J. S., Meade M. R., Seager S., Stolovy S. R., Eatson C., Whitney B. A., Wolff M. J., & Molfire M. G., 2003, *PASP*, 115, 953
- [25] Churchwell E., Babler B. L., Meade M. R., Whitenru B. A., Benjamin R., Indebetouw R., Cyganowski C., Robitaille T. P., Povich M., Watson C., & Bracker, A., 2009, *PASP*, 121, 213
- [26] Altenhoff W. J., Downes D., Pauls T., & Schraml J. 1979, *A&AS*, 35, 23
- [27] Haynes R. F., Caswell J. L., Simons L. W. J., 1978, *ApJS*, 45, 1
- [28] Gregory P. C., & Condon J. J., 1991, *ApJS*, 75, 1011
- [29] Griffith M. R., Wright A. E., Burke B. F., & Ekers R. D., 1994; *ApJS*, 90, 179
- [30] Becker R. H., White R. L., Helfand D. J., & Zoonematkermani S., 1994, *ApJS*, 91, 347
- [31] Giveon U., Becker R. H., Helfand D. J., & White, R. L., 2005, *AJ*, 129, 348
- [32] White R. L., Becker R. H., & Helfand D. J., 2005, *AJ*, 130, 586
- [33] Pestalozzi M. R., Minier V., & Booth R. S., *A&A*, 432, 737
- [34] Pandian J. D., Goldsmith P. F., & Deshpande A. A., 2007, *ApJ*, 656, 255
- [35] Xu Y., Voronkov M. A., Pandian J. D., Li J. J., Sobolev A. M., Brunthaler A., Ritter B., & Menten K. M., 2009, *A&A*, 507, 1117
- [36] Green J. A., Caswell J. L., Fuller G. A., Avison A., Breen S. L., Ellingsen S. P., Gray M. D., Pestalozzi M., Quinn L., Thompson M. A., & Voronkov M. A., 2010, *MNRAS*, 409, 913
- [37] Breen S. L., Fuller G. A., Caswell J. L., Green J. A., Avison A., Ellingsen S. P., Gray M. D., Pestalozzi M., Quinn L., Richards A. M. S., Thompson M. A., & Voronkov M. A., 2015, *MNRAS*, 450, 4109
- [38] Reid M. J., Menten K. M., Brunthaler A., Zheng X. W., Dame T. M., Xu Y., Wu Y., Zhang B., Sanna A., Sato M., Hachisuka K., Choi Y. K., Immer K., Moscadelli L., Rygl K. L. J., & Baetkiewicz A., 2014, *ApJ*, 783, 130
- [39] Green J. A., & Griffiths N. M. M., 2011, *MNRAS*, 417, 2500
- [40] Price S. D., Egan M. P., Carey S. J., Mizuno D. R., & Kuchar T., A., 2001, *AJ*, 121, 2819
- [41] Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R., Weinberg M. D., Schneider S., Carpenter J. M., Beichman C., Capps R., Chester P., Elias J., Huchra J., Liebert J., Lonsdale C., Monet D. G., Price S., Seitzer P., Jarrett T., Kirkpatrick J. D., Gizis J. E., Howard E., Evans T., Fowler J., Fullmer L., Hurt R., Light R., Kopan E. L., Marsh K. A., McCallon H. L., Tam R., Dyk S. V., & Wheelock S., 2006, *AJ*, 131, 1163
- [42] Lumsden S. L., Hoare M. G., Urquhart J. S., Oudmaijer R. D., Davies B., Mottram J. C., Cooper H. D. B., & Moore T. J. T., 2013, *ApJS*, 208, 11

- [43] Cragg D. M., Sobolev A. M., & Godfrey P. D., 2005, MNRAS, 360, 533
- [44] Meade M. R., Babler B. L., Whitney B. A., Benjamin R., Churchwell E., Indebetouw R., Robitaille T., Cohen M., 2015, Deep GLIMPSE Data Description Deep GLIMPSE: Exploring the Far Side of the Galaxy Version 1.1
- [45] 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) 2008, シリーズ現代の天文学 6 星間物質と星形成, 日本評論社
- [46] 家正則, 岩室史英, 舞原俊憲, 水本好彦, 吉田道利 (編) 2007, シリーズ現代の天文学 15 宇宙の観測 I - 光・赤外天文学, 日本評論社
- [47] 中井直正, 坪井昌人, 福井康雄 (編) 2009, シリーズ現代の天文学 16 宇宙の観測 II - 電波天文学, 日本評論社