

BGPSダストコアを対象とした6.7GHzメタノールレーザー探査

大橋拓人、柴田裕輝、杉山孝一郎、米倉覚則、百瀬宗武(茨城大学)

砂田和良、坂井伸行(国立天文台)

【1 研究背景・目的】

天の川銀河には大質量星と呼ばれる、太陽質量の8倍以上の質量を持つ恒星が存在する。大質量星はアウトフローの形成や超新星爆発を起こし、銀河内のエネルギー放出の約15%を担っており、次世代の星形成に寄与していることは知られているが(Ellingsen et al. 2011)、大質量星の形成過程は未だ謎に包まれているものが多い。宇宙物理学研究の電波領域では、レーザー(MASER: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)という特有の現象があり、星形成領域の3次元運動や変動現象を探る手掛かりとして有益とみなされている。現在のところ星形成領域で観測される代表的なレーザーはOH、水、クラス I・II メタノールレーザー(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種のレーザーの出現時期の関連性を述べた研究例は少なく、個別の天体を基に比較が行われているだけにすぎない。そのため、過去に議論されている水レーザーとメタノールレーザーの出現時期に関しては研究者間でも解釈が大きく分かれている。(図1、図2を参照)

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対象として、統合されたカタログ天体の6.7GHzクラス II メタノールレーザー、22GHz水レーザー、44GHzクラス I メタノールレーザーの観測を行い、それらの出現時期の指標を確立することを目的としている。

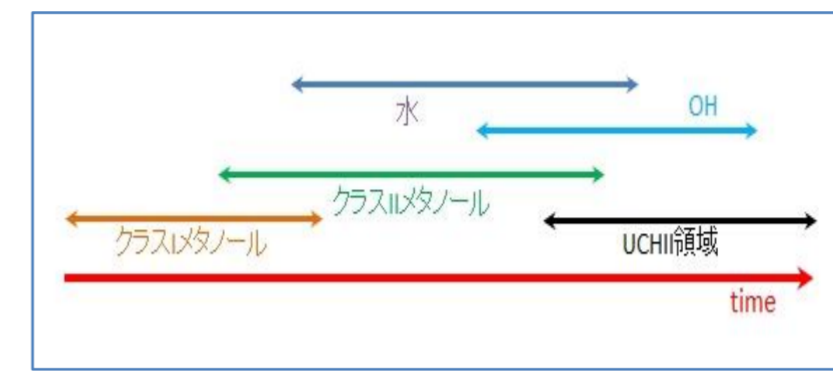


図1 レーザーの出現時期の例1(Ellingsen+ 2007, IAU Symp. 242 を参照)

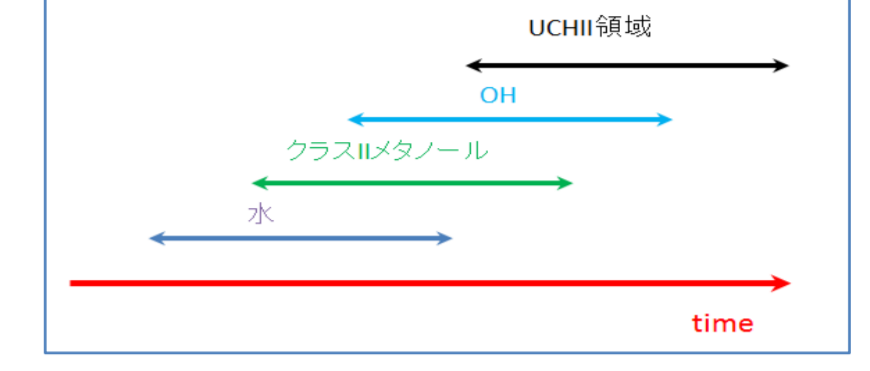


図2 レーザーの出現時期の例2(Reid 2007, IAU Symp. 242 を参照)。こちらはクラスIメタノールレーザーの出現時期に関しては理解が不十分であると述べられている。

【2 観測及び解析】

2.1 観測天体の選出

本研究の観測天体はハワイのカルテクサブミリ天文台で過去に行われた、1.1mm波長でのダスト連続波を用いたサーベイによって作成されたBGPSデータベース(Rosolowsky+ 2010)を使用した。Shirley+(2013)により、BGPSデータベースに対する分子輝線の観測によって系統速度が求められた天体について、分子コアレーザーである $N_2H^+(3-2)$ (280GHz)と $HCO^+(3-2)$ (268GHz)の有無と強度比の点から4つのカテゴリーに分類し、そこから各カテゴリーの強度順に296天体を選出した。

- (a) N_2H^+ のみ検出 : 36/36 天体
 - (b) $I(N_2H^+)/I(HCO^+) > 1$: 55/136 天体
 - (c) $I(N_2H^+)/I(HCO^+) < 1$: 151/1669 天体
 - (d) HCO^+ のみ検出 : 54/1312 天体
- 計: 296天体

2.2 観測

茨城県日立市・高萩市にある国立天文台が所有している日立32m電波望遠鏡を用いて、2014年11月3日~2015年5月27日にかけて8回の観測を実施した。観測パラメータは表1の通りである。観測方法については下記の通りである。

- ・on-off法(off点は赤経方向に+60もしくは-60arcmin離れた点)
 - ・スペクトルのピーク値 $> 5\sigma$ を達成したものを検出とみなした。
 - ・ピーク値が $3\sim 5\sigma$ の場合はマージナルディテクション(疑わしい検出)とみなした。
 - ・過去の論文(Caswell+ 2010, Cyganowski+ 2009, Green+ 2010, Green+ 2012, Pandian+ 2011, Xu+ 2009)から茨城大学がレーザー源について独自にまとめたカタログ(以下ではmaster catalogと呼ぶ)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。
 - ・レーザーが検出されたBGPS天体についても既知のレーザー源と位置比較を行い、0.5分角以内であればそのBGPS天体がそのレーザー源に付随してあるとみなした。
 - ・スペクトルを検出した領域で過去に観測例が見られない天体は9点法という方法で追観測を実施した。
- 9点法とは観測天体を中心に赤経赤緯方向に日立ビームの半値半幅ずつオフセットを入れて9点の観測を行い、観測天体の位置を正確に算出する測定法である。これによりBGPSダストコアの座標にレーザーが付随しているのかを明らかにすることができる。
- ・マージナルなレーザー放射及びマージナルで新検出と思われるレーザー放射は5分間積分を複数回数行うことで感度を向上させ、レーザー放射の有無の確認を行った。

また、現在日立局では6.7GHzの周波数帯の受信機を使用しているため、今回の観測では6.7GHzクラス II メタノールレーザーが対象となっている。22GHz水レーザーと44GHzクラス I メタノールレーザーについては、国立天文台VERA20m電波望遠鏡を用いて砂田和良氏が観測を実施している。

表1 日立アンテナの観測パラメータ

ビームサイズ	4.6分角
周波数	6664 – 6672 MHz
チャンネル数	8192
速度分解能	0.044 km/s
積分時間	5分間
rmsノイズレベル(1 σ)	~0.3 Jy

【3 解析結果】

296天体中53天体からの放射が確認され、検出率は約18%となった。そのうちレーザー源が付随している(レーザー源とBGPS天体との離角が0.5 arcmin以内)と思われる天体は53天体中26天体であり、新検出と思われる天体は53天体中3天体であった。

新検出天体の1つであるG019.309+00.065のスペクトルは以下の通りである。(図3を参照)

新検出の判断において、既知天体との位置関係を考慮している。茨城大学が独自にまとめたカタログに記載されている既知天体(青点)と観測天体(緑点)の位置関係は図4の通りである。最も近傍の既知天体であるG019.365-00.030のスペクトル(図5を参照)から、この天体の放射のサイドローブからの混入では無いことがわかる。

G19.309+00.065に対して9点法で追観測を実施したところ、図6の結果が得られた。中心のスペクトルのピークが最も強く見えていることから、レーザーがこの天体に付随しているであろうということがわかった。

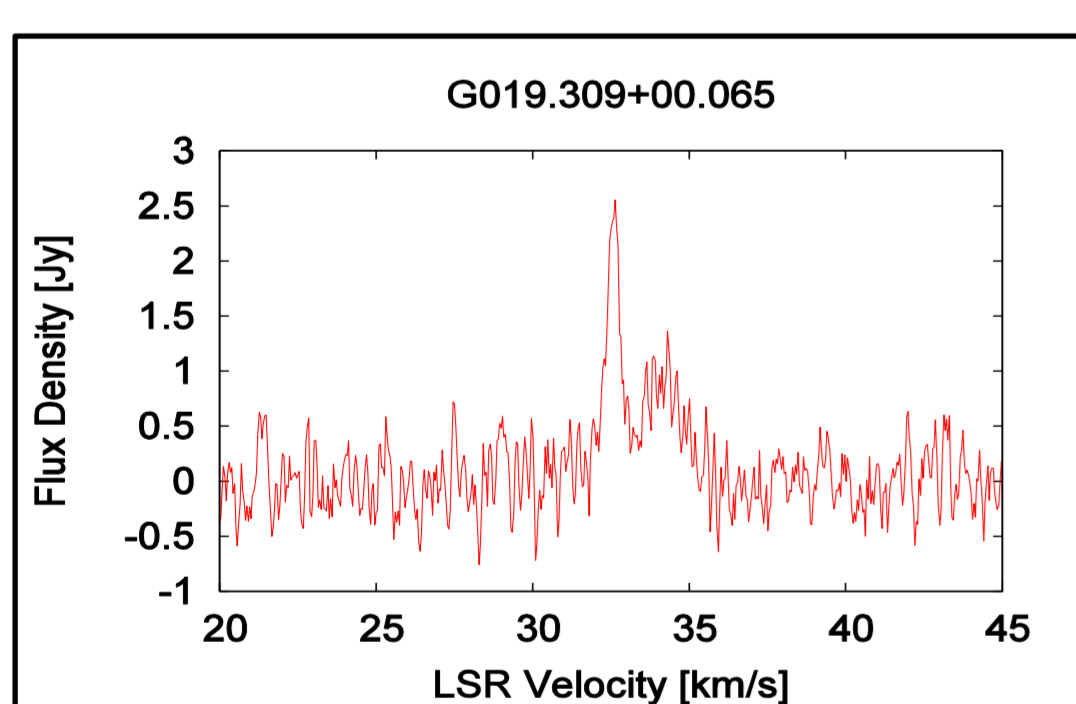


図3 G019.309+00.065のスペクトル。スペクトルの横軸はLSR Velocity[km/s](視線速度)、縦軸はフラックス密度[Jy]である。

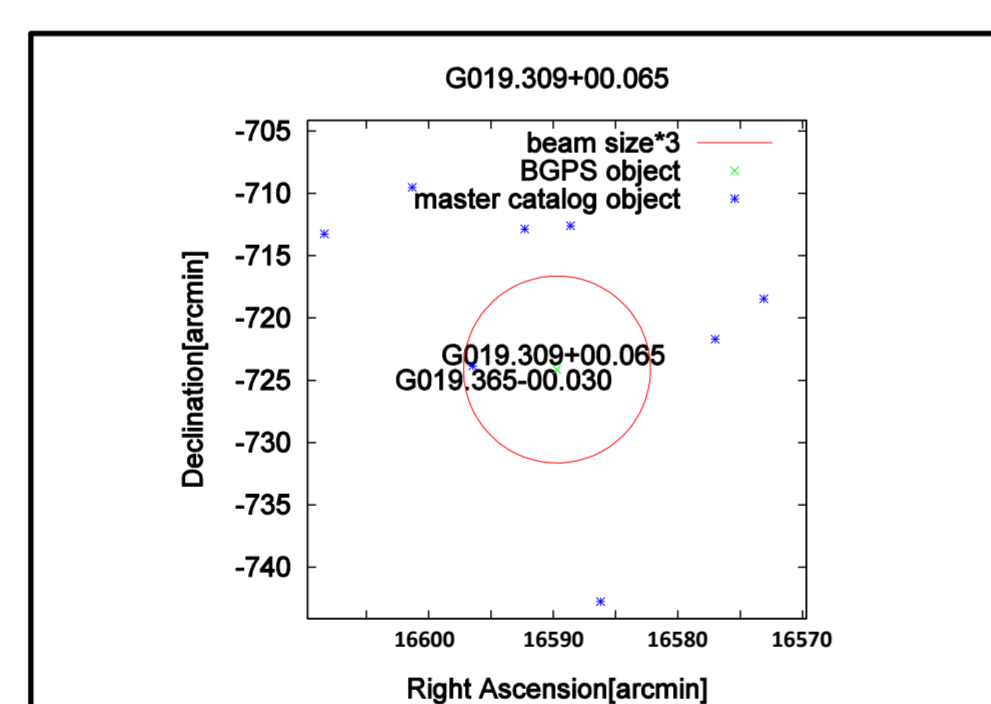


図4 G019.309+00.065の位置比較図。図中の赤い円の大きさは日立電波望遠鏡のビームサイズを3倍にしたもの(半径7.5arcmin)と等しい。

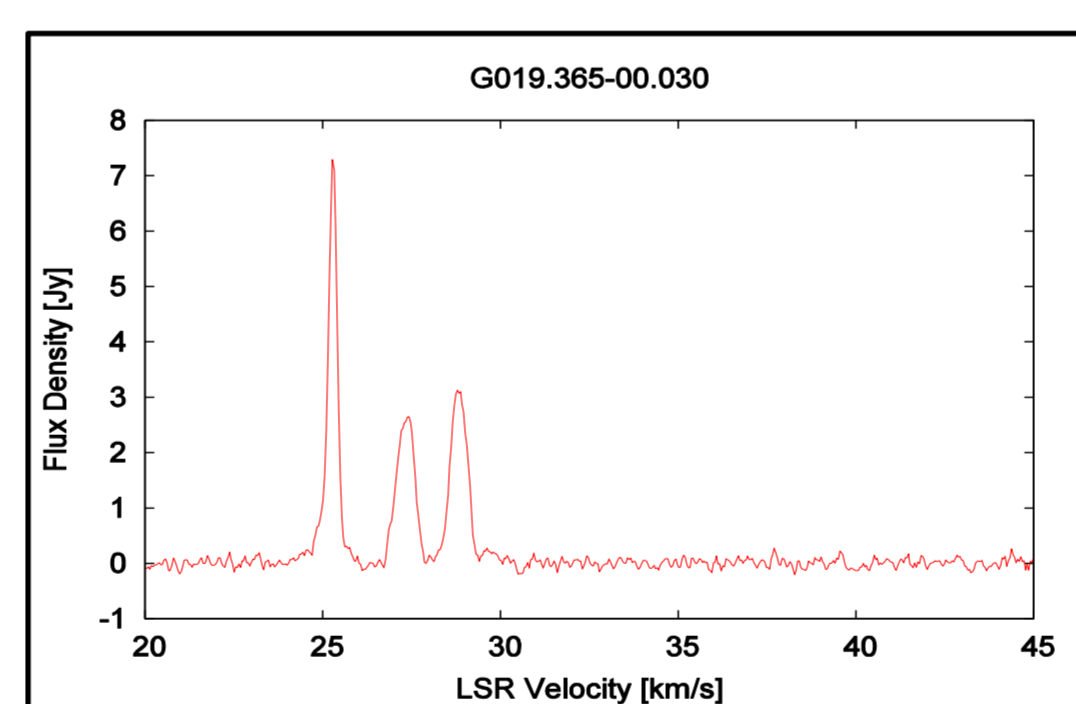


図5 G019.365-00.030のスペクトル。

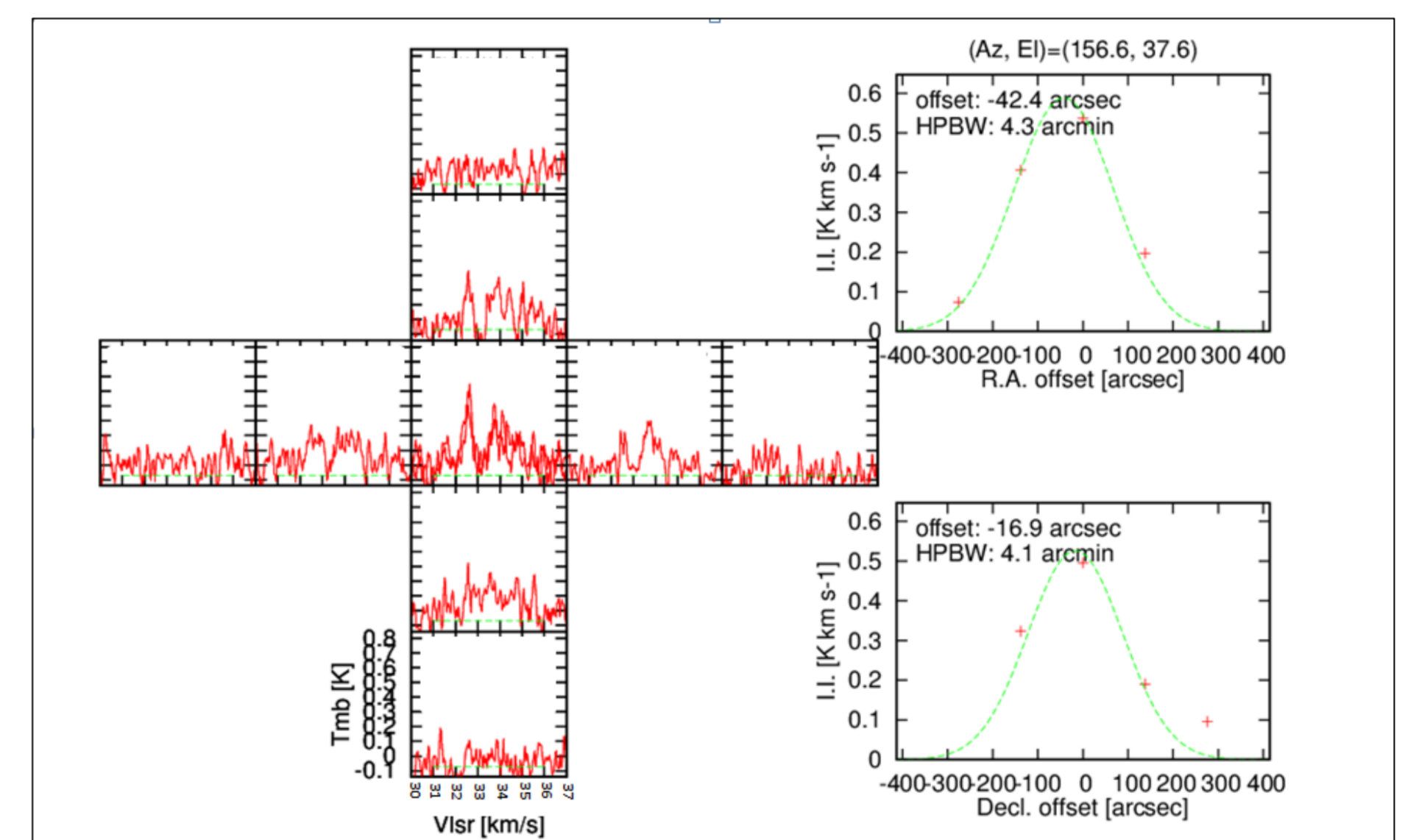
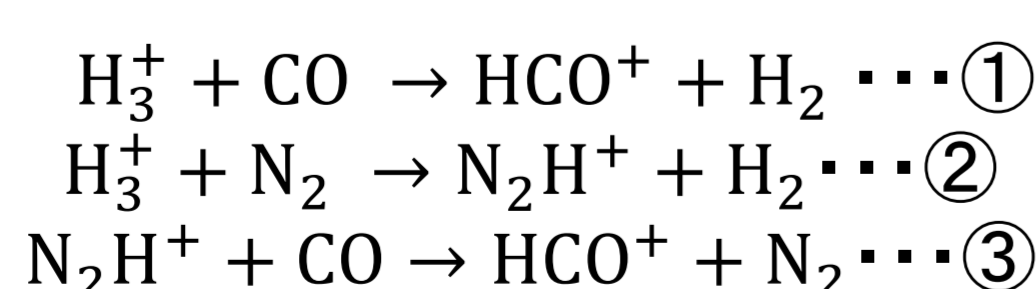


図6 9点法によって得られたG019.309+00.065のスペクトル。スペクトルの横軸はLSR Velocity[km/s](視線速度)、縦軸はアンテナ温度[K]で、日立アンテナでは1[K]~3.43[Jy]である。観測天体を中心に半値半幅ずつオフセットを入れて9点の観測を行っている。レーザー源が中心にある場合には、スペクトルのピーク値は同心円状に等しくなる。

【4 考察・今後の展望】

今回の観測結果を基に、 $N_2H^+(3-2)$ (280GHz)と $HCO^+(3-2)$ (268GHz)の強度比(Shirley et al. 2013)に対するヒストグラムを作成したところ図7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ーごとの検出率を算出したところ、表2の結果が得られた。今回の観測では $N_2H^+(3-2)/HCO^+(3-2)$ の強度比が大きい天体で6.7GHzメタノールレーザーの検出が多いことが読み取れる。



標準的なCOの存在量([CO/H₂] ~ 10⁻⁴)では、式①によってH₃⁺はHCO⁺の反応のために使われるが、COが凍りつくような低温の状態だと式①の反応は落ち込み、代わりにH₃⁺は式②に使われるようになる。COが溶け出してガスに戻ると、式③の反応が進むようになり式②で生成されたN₂H⁺は減少する。(Jørgensen et al. 2004) これらから6.7GHzメタノールレーザーはCOガスがダストに凍りついていような大質量星形成の初期段階に現れ始め、温度が上がってガスが溶け出すに連れて減少していくのではないかと考えられる。今後はIRDCs等の他の年齢トレーサーとなりうるデータとBGPS天体との比較をして、BGPS天体が星形成のどの進化段階にいるのかについての調査が必要であると考えられる。また、水レーザー、クラスIメタノールレーザーとの比較も行っていく予定である。

表2 天体区分ごとの検出率

カテゴリー	天体数	付随	割合
(a) N_2H^+ のみ検出	36	5	14%
(b) $I(N_2H^+)/I(HCO^+) > 1$	55	11	20%
(c) $I(N_2H^+)/I(HCO^+) \leq 1$	151	10	7%
(d) HCO^+ のみ検出	54	1	2%

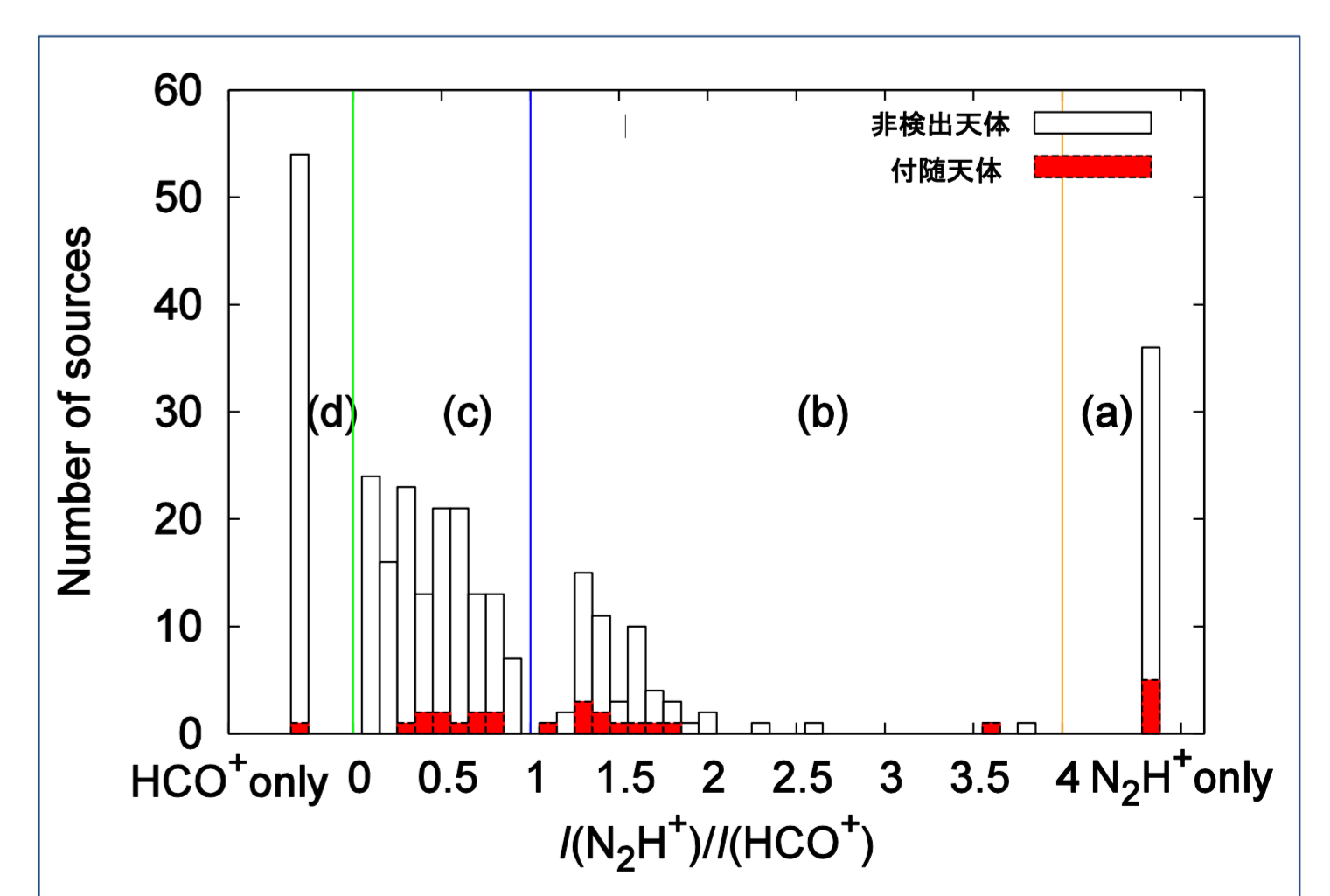


図7 2成分の強度比とレーザー検出の有無。緑、橙の線が描かれているのはそれぞれ天体区分(d),(a)の天体で、青線の左が区分(c)、右側が区分(b)の天体である。レーザーが検出された天体は赤色色付けし、未検出の天体は黒色でプロットしている。

参考文献

- [1] Caswell, J.L., et al. 2010, MNRAS, 404, 1029
- [2] Cragg, D.M., et al. 2005, MNRAS, 360, 533
- [3] Cyganowski, C.J., et al. 2009, ApJ, 702, 1615
- [4] Ellingsen, S.P., et al. 2007, IAU Symp. 242, 213
- [5] Ellingsen, S.P., et al. 2012, in proc. "Science with Parks @ 50 Years Young"
- [6] Green, J.A., et al. 2010, MNRAS 409 913
- [7] Green, J.A., et al. 2012, MNRAS 420 3108
- [8] Jørgensen, J.K., et al. 2004, A&A, 416, 616
- [9] Pandian, J.D., et al. 2011, ApJ 730 55
- [10] Reid, M.J. 2007, IAU Symp. 242, 526
- [11] Rosolowsky, E., et al. 2010, ApJS, 188, 123
- [12] Shirley, Y.L., et al. 2013, ApJS, 209, 2
- [13] Xu, Y., et al. 2009, A&A, 507, 1117