

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、米倉覚則、杉山孝一郎、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。

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) $I(N_2H^+)/I(HCO^+) \leq 1$: 151/1669 天体
- (d) HCO^+ のみ検出 : 54/1312 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 日から 2015 年 5 月 27 日にかけて 8 回の観測を実施した。観測方法については下記の通りである。

- ・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 $3-5\sigma$ 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) から茨城大学がメ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。

・メーザーが検出された BGPS 天体についても既知のメ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 天体がそのメ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メ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。

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 メタノールメーザーが対象となっている。22GHz 水メーザーと 44GHz クラス I メタノールメーザーについては、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。

3 結果

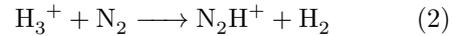
296 天体中 53 天体からの放射が確認され、検出率は約 18% となった。そのうちメーザー源が付随している (メーザー源と BGPS 天体との離角が 0.5 arcmin 以内) と思われる天体は 53 天体中 26 天体であり、新検出と思われる天体は 53 天体中 3 天体であった。新検出天体の 1 つである G019.309+00.065 のスペクトルは以下の通りである。(図 3 を参照)

4 考察と今後の展望

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 4 の結果が得られた。さらに今回の観測結果から各カテゴリごとの検出率を算出したところ、以下の結果が得られた。

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

今回の観測では $N_2H^+(3-2)HCO^+(3-2)$ の強度比が大きい天体で 6.7GHz メタノールメーザーの検出が多いことが読み取れる。



標準的な CO の存在量 ($[CO/H_2] \sim 10^{-4}$) では、式 (1) によって H_3^+ 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 H_3^+ 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 N_2H^+ は減少する。(Jørgensen et al. 2004) これらから 6.7GHz メタノールメーザーは CO ガスがダストに凍りついている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、水メーザー、クラス I メタノールメーザーとの比較も行っていく予定である。

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

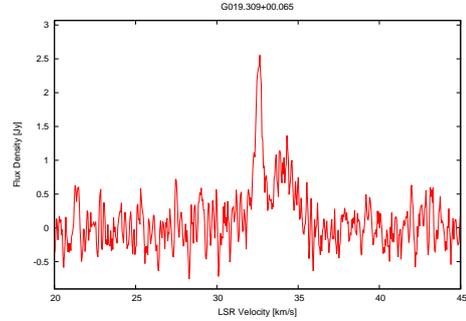


図3 G019.309+00.065 のスペクトル. スペクトルの横軸は LSR Velocity [km/s] (視線速度), 縦軸はフラックス密度 [Jy] である.



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

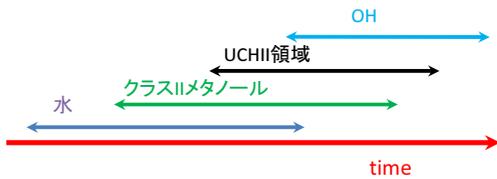


図2 メーザーの出現時期の例 2 (Reid 2007, IAU Symp. 242 を参考). こちらではクラスIメタノールメーザーの出現時期に関しては理解が不十分であると述べられている.

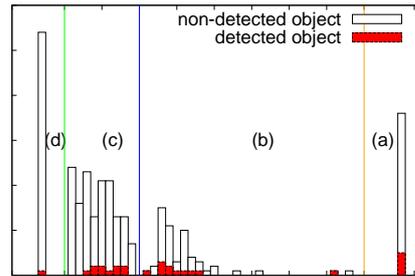


図4 2成分の強度比とメーザー検出の有無. 緑、橙の線が描かれている所はそれぞれ天体区分 (d), (a) の天体で、青線の左が区分 (c), 右側が区分 (b) の天体である. メーザーが付随している天体は赤く色付けし、未検出の天体は無色でプロットしている.