

日立 32-m 電波望遠鏡を用いた大規模な 6.7 GHz メタノール・メーザー モニターサーベイ：1-2 ヶ月周期天体の探査

○杉山孝一郎、米倉覚則、齋藤悠、佐藤宏樹、宮本祐輔、青木健悟、山口貴大、百瀬宗武（茨城大学）、元木業人、本間希樹、内山瑞穂、蜂須賀一也（国立天文台）、藤沢健太（山口大学）、稲吉恒平（コロンビア大学）、田中圭（フロリダ大学）、細川隆史（東京大学）

概要

大質量星周囲のみ検出される 6.7 GHz メタノールメーザーは、しばしば周期的な強度変動現象を生じる。その変動周期は 10-100 日オーダーであり、大部分の天体で全速度成分に共通した変動が見られていることから、共通の励起源、特に数 au、もしくはそれよりも微小な領域における変動現象が大局的に影響を及ぼしている可能性が示唆される。このメタノールメーザーの周期的な強度変動現象を観測的に研究することで、およそ将来の extended-ALMA ですら空間分解不可能な微小領域における星本体の振舞いや物理パラメータを導出可能となることが期待される。

我々は、周期変動天体サンプルの増加を目指し、2012 年 12 月 30 日から、日立 32-m 電波望遠鏡を用いた大規模な長期モニターを開始している。2015 年 9 月 18 日（一部は 8 月 9 日）からは、第 3 期モニターとして、変動の激しい計 161 天体に観測対象を絞り、5 日に 1 度のより高頻度なモニターを開始している。今回は、2016 年 6 月 8 日時点で検出された周期変動 18 天体（周期：20-75 日）、及び内 8 天体からの新検出と、既知 3 天体に対する新周期の検出を報告する。これより、1-2 ヶ月と短い周期変動を示す天体の検出率は 11% である。本講演では、それを含めた周期 - 光度関係の最新結果も紹介する。



図 1. 日立・高萩 32-m 電波望遠鏡 2 台（茨城大学宇宙科学教育センターホームページから抜粋）

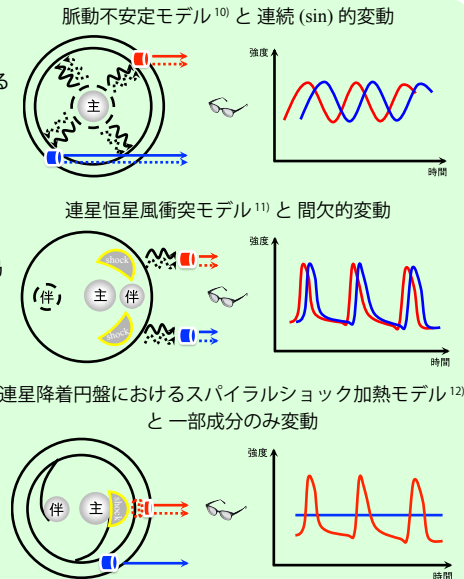
背景

- ◆ 6.7 GHz メタノールメーザーに見られる周期的な強度変動¹⁾⁻⁹⁾
 - ・大質量星周囲では初検出
 - ・既知 20 天体（周期：30-668 日）
 - ・変動傾向：連続的/間欠的
 - ・大部分で全速度成分に共通した変動
- ⇒ 共通の励起源、特に数 au、もしくはそれよりも微小な領域における大局的な変動現象に起因？

◆ 説明可能な理論モデル

- ・大質量原始星の脈動不安定成長¹⁰⁾（右図上）
 - ⇒ 連続 (sin) 的な変動を説明可能？
- ・連星の恒星風衝突による種光子の周期的な強度変動¹¹⁾（右図中）
 - ⇒ 間欠的な変動を説明可能？
- ・連星降着円盤における周期的なスパイラルショック加熱¹²⁾（右図下）
 - ⇒ 一部の成分のみの変動を説明可能？

いずれの理論モデルも、原始星本体もしくは近接連星システムにより周期変動を引き起こすため、メタノールメーザーの周期強度変動を観測研究することで、およそ将来の extended-ALMA ですら空間分解不可能な微小領域 (sub-au スケール) の物理パラメータ導出が可能となり得る！



日立 32-m 第 3 期モニター

◆ 研究目的

- ・周期変動天体 **サンプルの増加**
 - 母数 1000 天体以上¹³⁾ に対し、周期調査に適切な期間・頻度で実施されたのは、200 天体未満、でかつ、フラックス密度に制限アリ (> 5 Jy)
- ・周期と“変動傾向”（連続/間欠的）に相関性が有るのか？、またその特徴は理論モデルを区別する一助となるかを明らかに
- ・特に脈動不安定モデルに着目し、そこから予想されている **周期 - 光度関係の観測的確立**を目指す

◆ 日立 32-m 大規模モニタープロジェクト

- ・期間：2012 年 12 月 30 日から開始（表 1 の様に 3 期に分けて実施中）
- ・対象：
 - 第 1, 2 期：Dec > -30° の全 441 天体
 - 第 3 期：1.2 期から変動の激しい 161 天体を抽出 (標準偏差 / [平均値] ≥ 0.3)
- ・頻度：
 - 第 1, 2 期：各天体辺り 9-10 日に 1 度
 - 第 3 期：各天体辺り 5 日に 1 度
 - 内 10 天体は毎日モニター中
- ⇒ 第 1, 2 期の 2 年半に亘る長期モニターにより、14 天体から新たな周期変動を検出済み（周期：24-220 日）¹⁴⁾

表 1. 日立モニター時の観測パラメータ

観測期間	1 期：2012/12-2014/01 2 期：2014/05-2015/08 3 期：2015/09 --
ビームサイズ	~4.6 arcmin
周波数	6664-6672 MHz
記録偏波	LHCP
チャンネル分解能	0.044 km s ⁻¹
積分時間	5 min/source
検出感度 (3σ)	~0.9 Jy

◆ 第 3 期モニター

- ・目的：1-2 ヶ月未満の短周期な強度変動天体のサンプル数増加
- ・期間：2015 年 09 月 18 日から
- ・10 天体は 2015 年 08 月 09 日から
- ・頻度：基本的には各天体 5 日に 1 度
- ・10 天体は毎日モニター
- ・留意点：今回は、2016 年 06 月 08 日時点における解析結果を報告
- 既知の天体 G 012.88+00.48 (周期 29.5 日²⁾) の周期を、Lomb-Scargle 法を用いた周期解析（後述）で検出出来たため、今回の 5 日に 1 度頻度のモニターデータは、1 ヶ月程度の短周期変動天体の検出に適していると判断出来る

第 3 期モニター観測結果

◆ 周期解析 by Lomb-Scargle (L-S) 法^{15),16)}

- ・不等間隔で離散的なデータに対する代表的な周期解析方法
- ・1 成分でも以下の条件を満たした場合に“周期変動天体”として同定
 - False-alarm probability (FaP) < 0.001：99.9% の確率で真の信号検出と見なせる
 - 観測期間 264 日で、3 周期以上カバー出来る周期変動（図 2 Bottom に垂直線及び“3 周期以上”と表記）⇒ 88 日周期まで

⇒ 18 天体から周期変動を検出：

内、8 天体が新検出 & 既知 3 天体で新周期を検出！

◆ 新検出された周期変動天体（一例は図 2 参照）

- ・周期：20-75 日 (20-30 日：2 天体、40-50 日：1 天体、50-60 日：3 天体、70-日：2 天体)

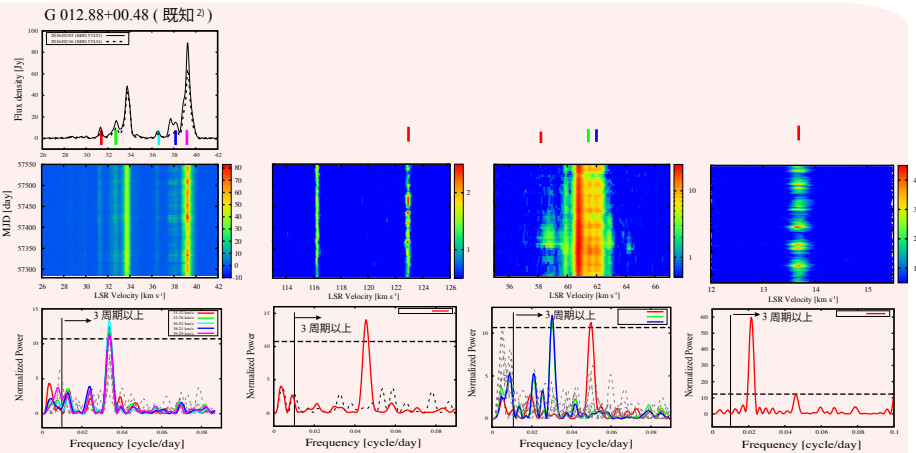


図 2. 第 3 期モニターで検出された周期変動天体の一例。Upper: スペクトル (実線：極大値、破線：極小値)。各色は Periodogram の色に対応。Middle: ダイナミックスペクトル。カラーはフラックス密度に相当。Bottom: L-S 法による Periodogram。水平の破線は FaP=0.001 の (ノイズレベル) に相当。

考察

① 周期変動の出現期間

- ・1-2 ヶ月の短周期天体サンプルの増加に成功
- ・検出率
 - 3 期 161 天体のみ：18/161 天体 ~11%
 - 1, 2 期を併せた 441 天体：(24+8)/441 天体 ~ 7%
 - 既知を併せた累計 ~600 天体：(20+14+8)/600 天体 ~ 7%
- ⇒ メタノールメーザーの寿命 ~20,000 年¹⁷⁾ を考慮すると ...
- 出現期間：~1,400-2,200 年を推定
- 脈動期間 ~1,000 年と factor ~2 で一致

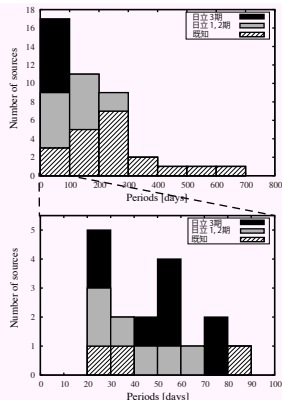


図 3. 周期天体ヒストグラム (斜線：既知、灰色：日立 1, 2 期、黒：日立 3 期。下パネルは周期 100 日までの拡大図。)

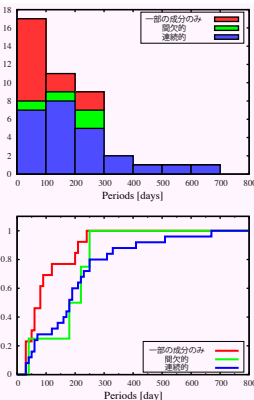


図 4. 同ヒストグラムを変動傾向毎に色分け (青：連続、緑：間欠、赤：一部の成分のみ)。下パネルはその累積頻度分布。

② 周期 vs 変動傾向

- ・100 日未満の短周期に“一部の成分のみ変動”天体が偏っている？ (図 4)
- ・K-S 検定を実施
 - 連続 vs 間欠
 - 間欠 vs 一部の成分のみ
 - 連続 vs 一部の成分のみの 3 パターン
- ⇒ いずれも有意水準 5% を満たさず、分布の相違は見られない、即ち“周期日数と変動傾向に明確な相関性は無さそう”と言える

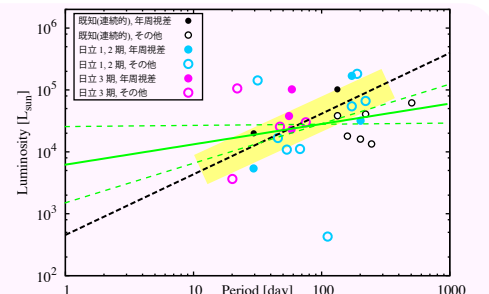


図 5. 最新の周期 - 光度関係 (暫定)。緑の実線が今回得られた観測面からの周期 - 光度関係線であり、破線はそれぞれエラーを考慮した線に相当。

③ 最新の周期 - 光度関係 (暫定)

- ・②より、各変動傾向間で明確な違いが見られないため、今回は“一部の成分のみ変動”を含む連続的な天体を使用
- ⇒ 図中の緑実線が最新の周期 - 光度関係 (破線は誤差) 理論側の誤差込み不安定帯 (黄色長方形) と概ね一致

Reference

- 1) Goedhart, S., et al. 2004, MNRAS, 355, 553
- 2) Goedhart, S., et al. 2009, MNRAS, 398, 995
- 3) Araya, E. D., et al. 2010, ApJ, 717, L133
- 4) Szymczak, M., et al. 2011, A&A, 531, L3
- 5) Fujisawa, K., et al. 2014, PASJ, 66, 78
- 6) Szymczak, M., et al. 2014, MNRAS, 439, 407
- 7) Szymczak, M., et al. 2015, MNRAS, 448, 2284
- 8) Maswanganye, J. P., et al.
2015, MNRAS, 446, 2730
- 9) Maswanganye, J. P., et al.
2016, MNRAS, 456, 4335
- 10) Inayoshi, K., et al. 2013, ApJ, 769, L20
- 11) van der Walt, D. J. 2011, AJ, 141, 152
- 12) Parfenov, S. Y., & Sobolev, A. M.
2014, MNRAS, 444, 620
- 13) Breen, S. L., et al. 2015, MNRAS, 450, 4109
- 14) 杉山孝一郎 他, 2015年9月, 秋季年会, P135a
- 15) Lomb, N. R. 1976, Ap&SS, 39, 447
- 16) Scargle, J. D. 1982, ApJ, 263, 835
- 17) van der Walt, J. 2005, MNRAS, 360, 153