

野辺山 45m 電波望遠鏡による大質量星形成領域における

Class II CH₃OH メーザー源の分子輝線観測

石川果奈*、百瀬宗武*、塚越崇*、米倉覚則*、杉山孝一郎*

* 茨城大学 ★ 国立天文台



図 1: 日立 32m 電波望遠鏡

概要

本発表では来年野辺山 45m 電波望遠鏡での観測が決定しているプロポーザルの概要と先日行われた観測の現状を紹介する。大質量星形成領域中の Hot molecular core (HMCs) と呼ばれる領域で観測される class II CH₃OH メーザー (6.7 GHz) は早期段階の大質量原始星との相関が高いと言われている。これまでの観測研究の結果、そのうち 10% 弱のメーザー源は周期的な強度変動を示すが、その変動機構は明らかではない。一方、これら CH₃OH メーザー源の一部では、CH₃CN 分子輝線による星周ガスの探査が行われている^[4] が、周期性の有無と輝線から求められる星周ガスの物理状態との関係は明らかになっていない。CH₃CN 分子輝線は、Population Diagram によって温度と柱密度を正確に求められる。我々は日立 32m 電波望遠鏡で観測された Class II CH₃OH メーザー源を周期性の有無により分類し、野辺山 45m 電波望遠鏡により観測を行う。観測分子輝線は C¹⁸O (1-0)、¹³CO (1-0)、N₂H⁺ (1-0)、CH₃CN (5-4) を使用する。

大質量星に付随する Class II CH₃OH メーザーの周期変動の有無による星周物質の違いを探ることが本観測の目的である。

導入

大質量星 (>8 M_⊙) の形成

- 進化が早い観測可能サンプルが少ない
- 高密度なガスに埋もれており観測が難しい
- 中・低質量星に比べ形成段階が確立されていない

小・中質量星の進化

- 小・中質量原始星はその進化段階が確立
- 周囲の物質の分布は大質量星の進化に応用可

SED: Spectral Energy Distribution

赤外 - 電波領域での放射エネルギー分布概形の違いから原始星の進化段階を分類。^[1]

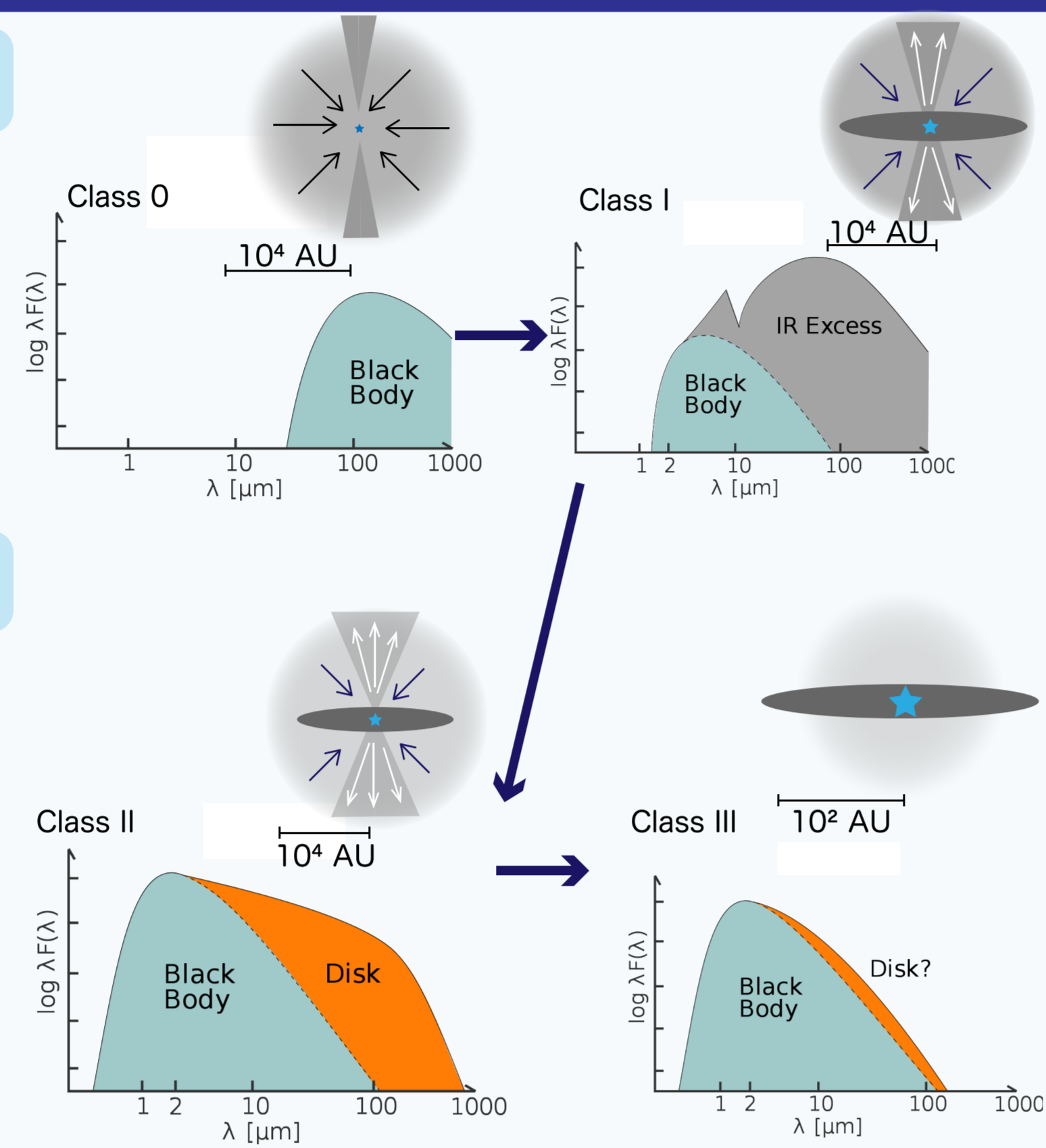


図 2: SED 概形による原始星の進化段階分類

Class II CH₃OH メーザー (6.7 GHz) の周期変動と日立局での観測

Class II CH₃OH メーザー

- 寿命: 10⁴-10⁵ yr
- 極めて高い輝度温度 (10¹⁰ K)、非熱的放射
- 大質量星との位置的相関が高い
- 周期的な強度変動を示すものもある^[6]

日立 32m 電波望遠鏡 (以下日立局)

Class II CH₃OH メーザーのモニター観測

Class II CH₃OH メーザーのサーベイ観測^{[2][5]}

Decl. -30 度以上の既知 CH₃OH メーザーに対し数十日以上の周期性を持つものを探査 → CH₃OH についてこれまでで最も完全なモニターサーベイ観測

表 1: 日立局観測パラメータ

観測望遠鏡	日立 32m 電波望遠鏡
観測輝線	CH ₃ OH 5(1,5)-6(0,6) A+
静止周波数	6.6685912 GHz
天体数	442 天体
観測日程	2012/12/30-2014/01/10(1st) 2014/05/07-2015/08/24(2nd) 2015/09/18-2017/03/07(3rd)
観測頻度	9-10 days ⁻¹ /source(1st,2nd) 4-5 days ⁻¹ /source(3rd)
ビームサイズ	4.6 arcmin(6.7 GHz)
受信周波数	6.664-6.672 GHz
システム雑音温度	30 K
速度分解能	0.044 kms ⁻¹
雑音 rms (1σ)	~0.3 Jy
Ch 数	8192
速度分解能	0.044 km/s

Class II CH₃OH メーザー変動周期動の要因

数時間 - 数百日単位で変動。

変動パターンから複数モデルが提唱

(i) Colliding Wind binary (CWB) モデル^[8]

励起源が連星であり、近接点で生じるショックにより種光子の強度変化が周期的に起こる。

(ii) 脈動不安定モデル^[9]

メーザーの周期的な変化が中心星の光度に起因すると考えるモデル。光度変化及びそれに伴う周囲のダスト温度の変化が連続的に起こる。

(iii) Spiral shock モデル^[10]

連星系を仮定、星周円盤からの降着物質によってショックが発生する → ショックが追加の熱源となるとメーザーを放射できる柱密度が増加、周期的な強度変化

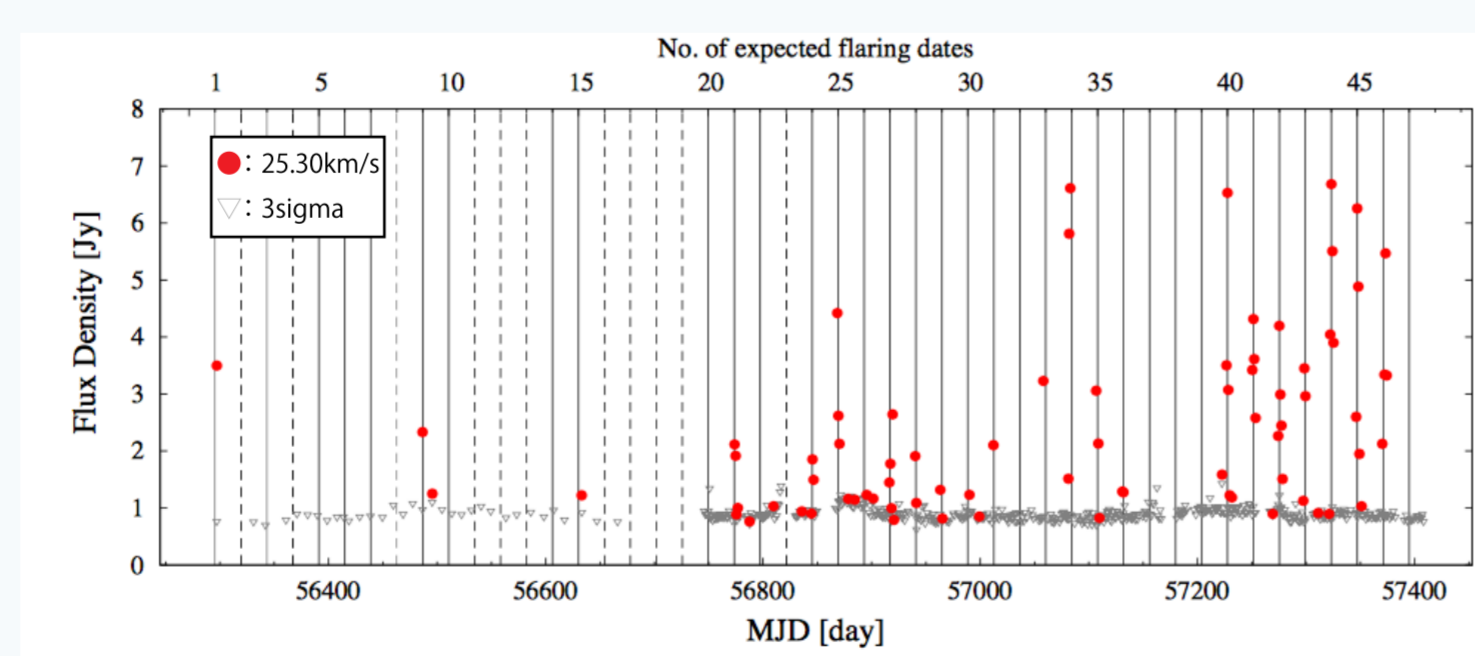


図 3: G014.23 の Class II CH₃OH の周期変動 (23.9 日周期・日立局での新検出)^[2]

Class II CH₃OH メーザーと熱的輝線放射

Purcell et al. 2006

観測天体: UCHII 領域と Class II CH₃OH

メーザー源計 83 天体

観測輝線: CH₃CN (5-4, 6-5), HCO⁺ (1-0)

結果

- CH₃CN を 70% (58 天体) で検出
- HCO⁺ を 99% (82 天体) で検出
- Rotation Diagram より CH₃CN の回転温度 T_{rot} を 28-166 K と同定

Araya et al. 2005

観測天体: UCHII 領域 17 天体

観測輝線: CH₃CN (J=5-4, 6-5, 8-7, 12-11)

結果

- UCHII 領域 4 天体を Hot molecular core (T_{rot} > 90 K) 候補天体とする。
- Population Diagram 法を用いた CH₃CN の温度と数密度の導出。

$$\ln\left(\frac{N_{JK}}{g_{JK}}\right) = \ln\left[\frac{N_{\text{CH}_3\text{CN}}}{Q_{\text{im}}(T_{\text{rot}})}\right] - \frac{E_{JK}}{kT_{\text{rot}}}$$

参考文献

- [1] Lada, C. J., & Wilking, B. A. 1984, ApJ, 287, 610 [2] Sugiyama et al. 2017, PASJ, "in press (arXiv:1704.02807)" [3] Purcell C.R. et al., 2006, MNRAS, 367, 553 [4] Araya et al., 2005, ApJS, 157, 279 [5] Sugiyama et al. in preparation [6] Goedhart et al. 2004, MNRAS, 355, 553 [7] Yonekura et al. 2016, PASJ, 68, 74 [8] van der Walt 2011, AJ, 141, 152 [9] Inayoshi et al. 2013, ApJ, 769, L20 [10] Parfenov and Sobolev 2014, MNRAS, 444, 620 [11] Keto E. & Rybicki G. 2010, ApJ, 1315, 1322

野辺山 45m 望遠鏡での観測概要

天体選定

- 日立局での観測により、周期的な強度変動を示すことが明らかになった Class II CH₃OH メーザー天体
- 周期変動のないメーザー源は周期変動天体の近傍かつ光度の累積頻度分布が K-S 検定により同一と見なせるよう選出

表 2: 観測天体情報^[5]

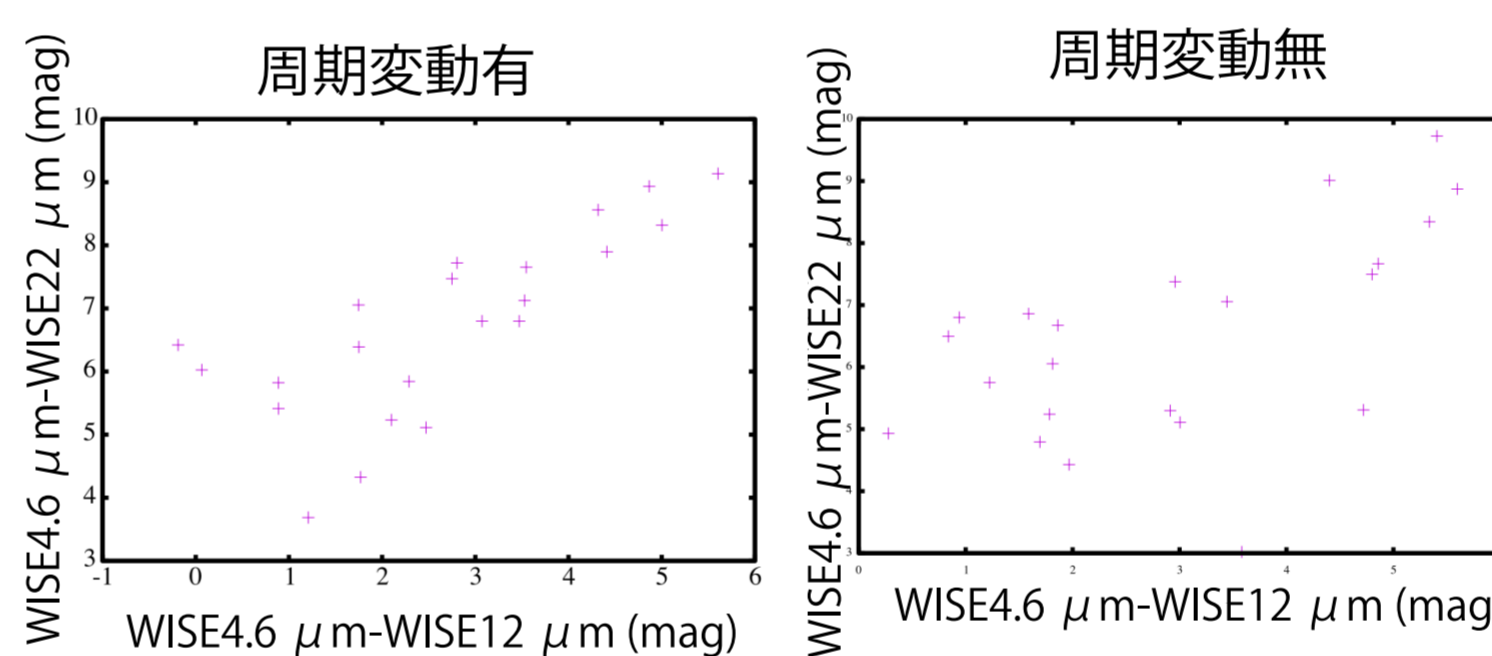
	周期変動あり	周期変動なし
天体数	23 天体	23 天体
距離	0.8-13.8 kpc	0.8-16.6 kpc
astrometric+photometric	12 +1 天体	13+0 天体
kinematic	10 天体	10 天体
CH ₃ OH の視線速度 (km/s)	-55.0~-119.8	-42.0~-96.3
周期 (day)	31.7-668	
モデル (不明確)	CMB: 2 脈動: 9 Spiral shock: 4	

観測天体の特徴

観測天体の SED・赤外線空間分布

結果

赤外領域カラーの統計的傾向は、メーザーの周期変動の有無で違いは見られない (図 4) → 熱的輝線放射の観測が必要



野辺山 45m 電波望遠鏡

Class II CH₃OH メーザーの熱的輝線放射の観測



図 5: 野辺山 45m 電波望遠鏡

表 3: 観測諸元

観測望遠鏡	野辺山 45m 電波望遠鏡
受信機	FOREST (USB-H, USB-L)
ビーム数	4
ビームサイズ (115 GHz)	5 arcsec (115 GHz)
ビーム間距離	51 arcsec
システム雑音温度	150-300 K
アンテナ効率 (110 GHz)	FOREST-H: 47±2 FOREST-V: 43±2
Ch separation	61.04 kHz
分光計	SAM45
観測輝線 / 周波数	CH ₃ CN (5-4) / 91.97994 GHz N ₂ H ⁺ (1-0) / 93.17348 GHz C ¹⁸ O (1-0) / 109.782192 GHz ¹³ CO (1-0) / 110.201353 GHz

観測分子

FOREST の受信可能帯域 (80-116 GHz) 内

C¹⁸O (1-0)・¹³CO (1-0)

低密度領域にも広く分布。ガスの全体量把握。

N₂H⁺ (1-0)

低温高密度領域に分布。CH₃CN との分布割合から進化段階を決定できる。

CH₃CN (5-4)

高温高密度領域に分布。

温度、柱密度の正確な同定。

結果

2017/12/11 に行われた観測では、1 天体の観測を行なった。(装置トラブルのため)

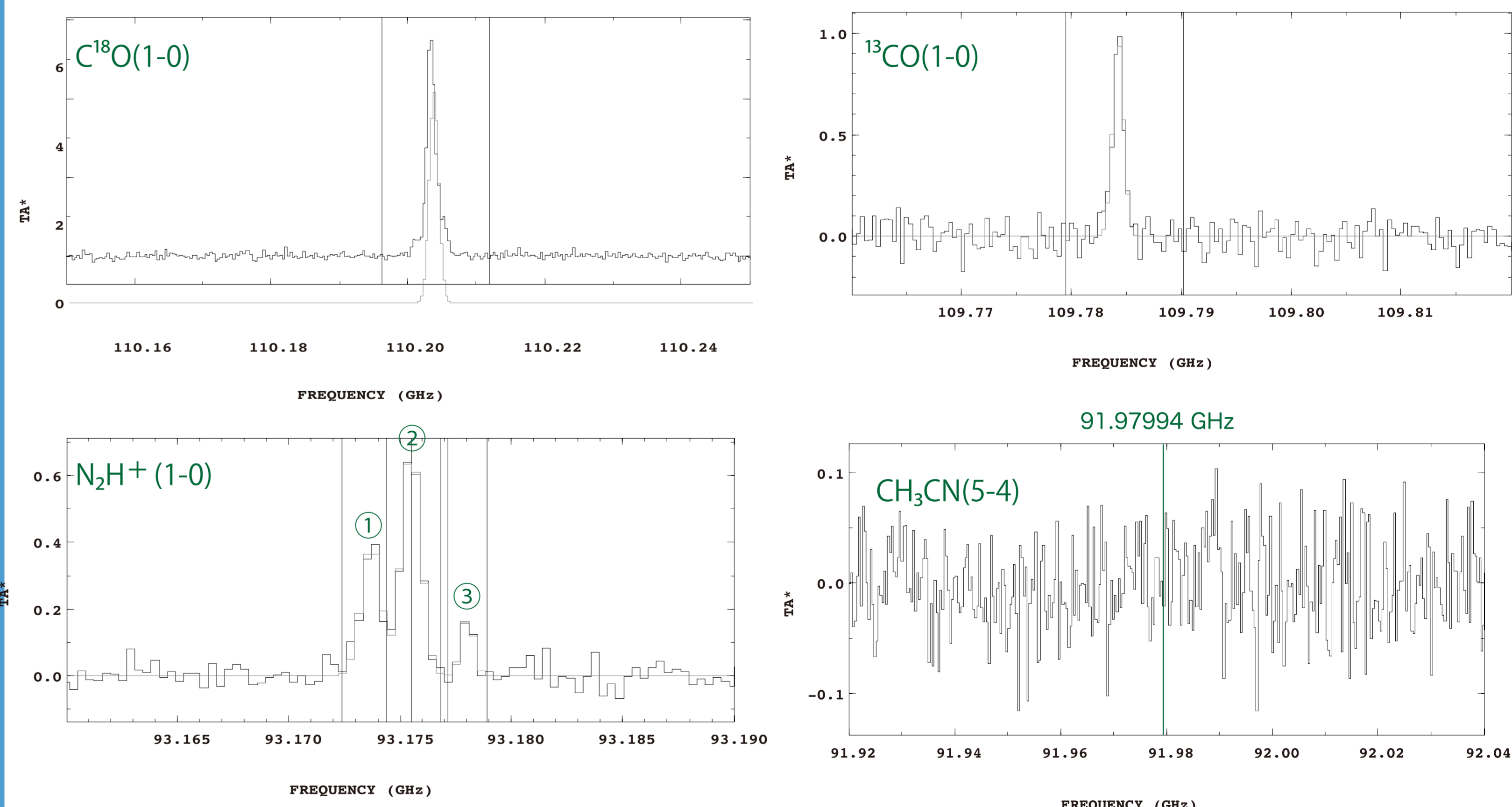


図 6: G045.47+00.13 (メーザーで間欠的変動) のスペクトル

N₂H⁺ の物理量

微細構造線の強度比^[11]から、物理量を導出 (LTE を仮定)

$$\frac{T_{A_2}}{T_{A_1}} = \frac{1 - e^{-\tau_2}}{1 - e^{-\tau_1}}$$

$$T_A = \eta^{-1} [T_{ex} - T_{bg}] (1 - e^{-\tau})$$

T_{bg}: 宇宙背景放射の温度
T_A: アンテナ温度

line label	相対強度	アンテナ温度 T _A	光学的厚み τ	励起温度 T _{ex} [K]
112-012 (輝線①)	3.00001	0.3955	0.954	2.857 ^{+0.001} _{-0.009}
123-012 (輝線②)	5.00000	0.6840	3.035	3.035 ^{+0.028} _{-0.026}
101-012 (輝線③)	1.00000	0.1805	2.890	2.890 ^{+0.014} _{-0.015}

今後の展望

大質量星形成領域に付随している Class II CH₃OH メーザーには、周期変動を示すものと示さないものがあるが、先行研究では変動の有無による進化段階の違いは確認できていない。先日行われた観測では、スペクトルの取得及び N₂H⁺ の物理量の導出を行うことが出来た。メーザー源周囲の分子輝線の観測を行うことで、周期強度変動天体が大質量星の進化のどの段階にあるかについての手がかりとなることが期待される。