6.7 GHz 帯受信機の搭載について

米倉　覚則（茨城大学）

国内 6.7, 7.6, 7.8, 12.1, 12.2 GHz 高感度 VLBI 観測網を構築し大質量星の形成過程に迫る

1. メタノールメーザーはどこで光っているか（disk, outflow, ...）？
   - VLBI モニター観測による固有運動の導出
2. メタノールメーザーの周期的な強度変動のメカニズムは？（中心星脈動, 連星系, 食, ...）
   - 強度周期変動メーザーの VLBI モニター観測
3. 中心星ごく近傍の disk 構造は？（spiral, 軸対称, ...）
   - 間欠的な質量降着 [episodic accretion] に伴う爆発的増光 [accretion burst] 時の迅速な VLBI follow-up 観測

Class II メタノールメーザー

- 全天で 1000 個以上が発見されている（南半球は無バイアス観測すみ。北半球はまだ）
- ほぼ 100 % が大質量原始星に付随（中質量の binary に付随するものも数例あり）
- disk, outflow に付随していると考えられている
- 輝度が非常に高く, compact

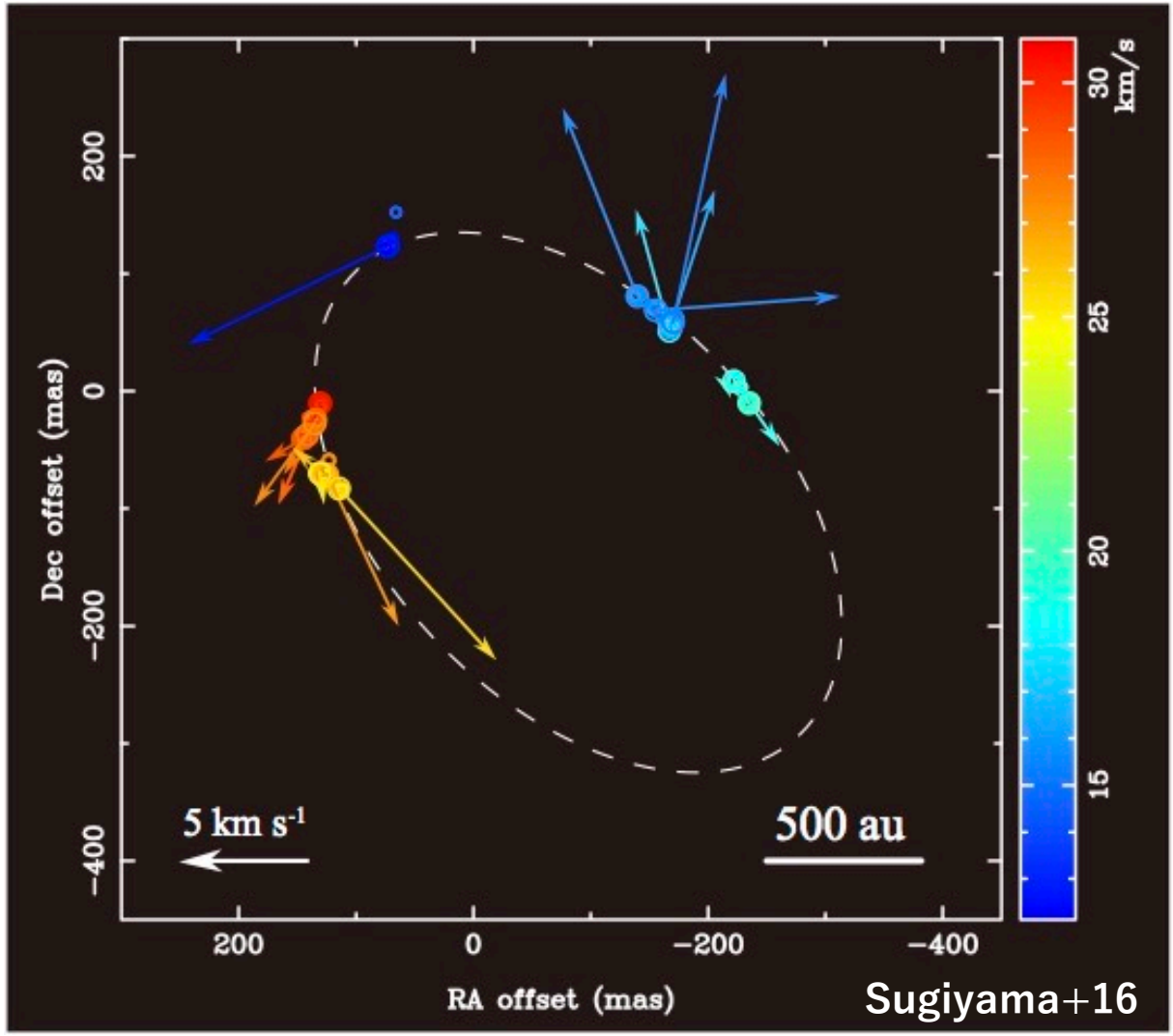
- VLBI 観測可能
- 高い空間分解能（位置精度）が得られる
- 国内 VLBI 観測網で ≤0.01 秒角 @ 6.7 GHz

VLBI（モニター）観測で分かる事

- 国内 VLBI 観測網で ≤0.01 秒角 @ 6.7 GHz
- ALMA でも観測が難しい大質量原始星近傍の情報が得られる

- モニター観測

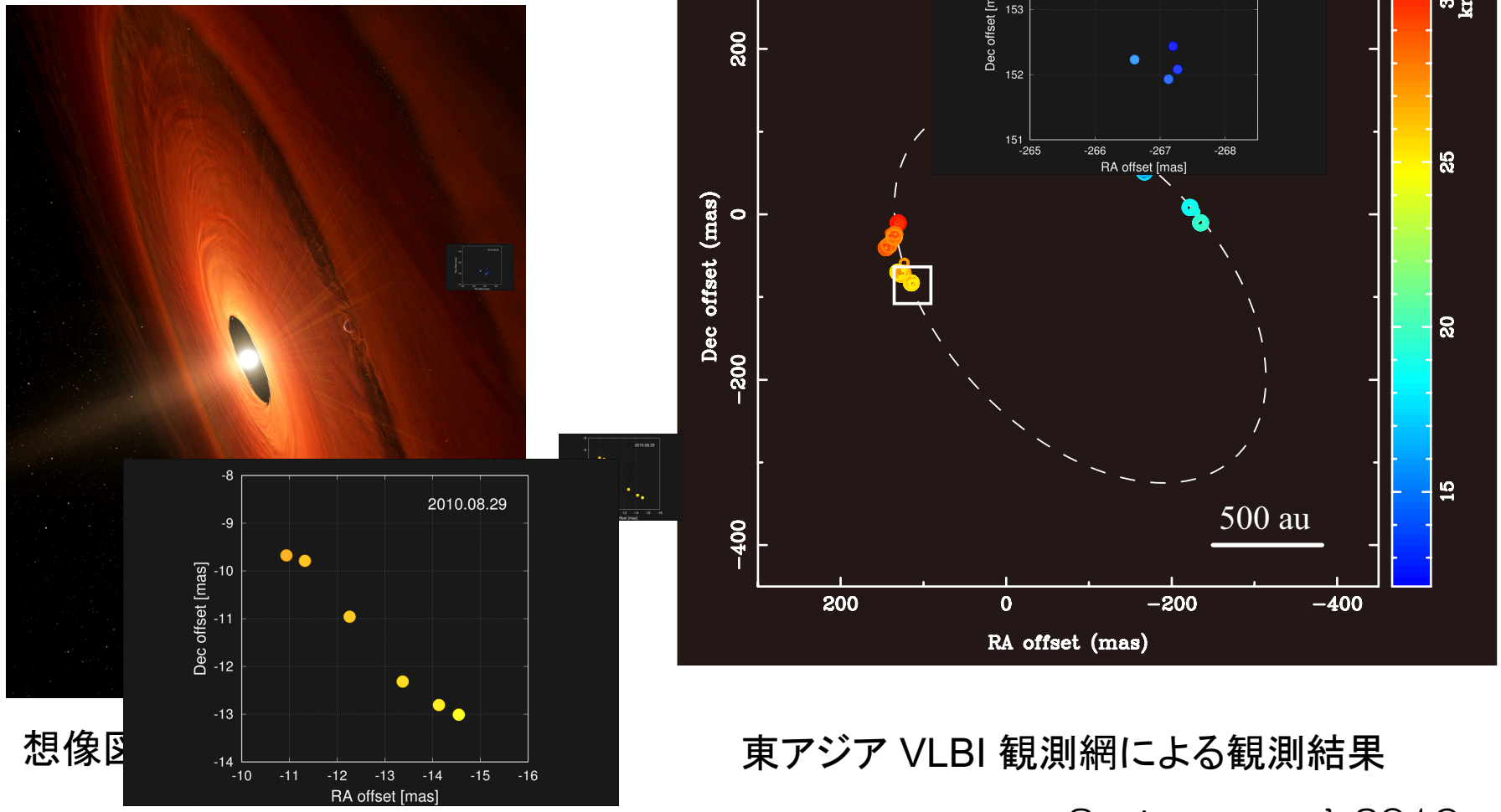
- 固有運動の導出が可能（disk, outflow, ... の切り分け可能）
- メーザー spot の強度変動の同期／不同期から、変動メカニズムの解明が可能



固有運動導出の例（年１回の観測 x ３年）@ EAVN

(b) 重い星の誕生現場の回転運動を検出

東アジア VLBI 観測網を用いた高解像度観測を、年１回、３年にわたって実施（2010-2012年）し、輝いている場所の運動を捉えた！



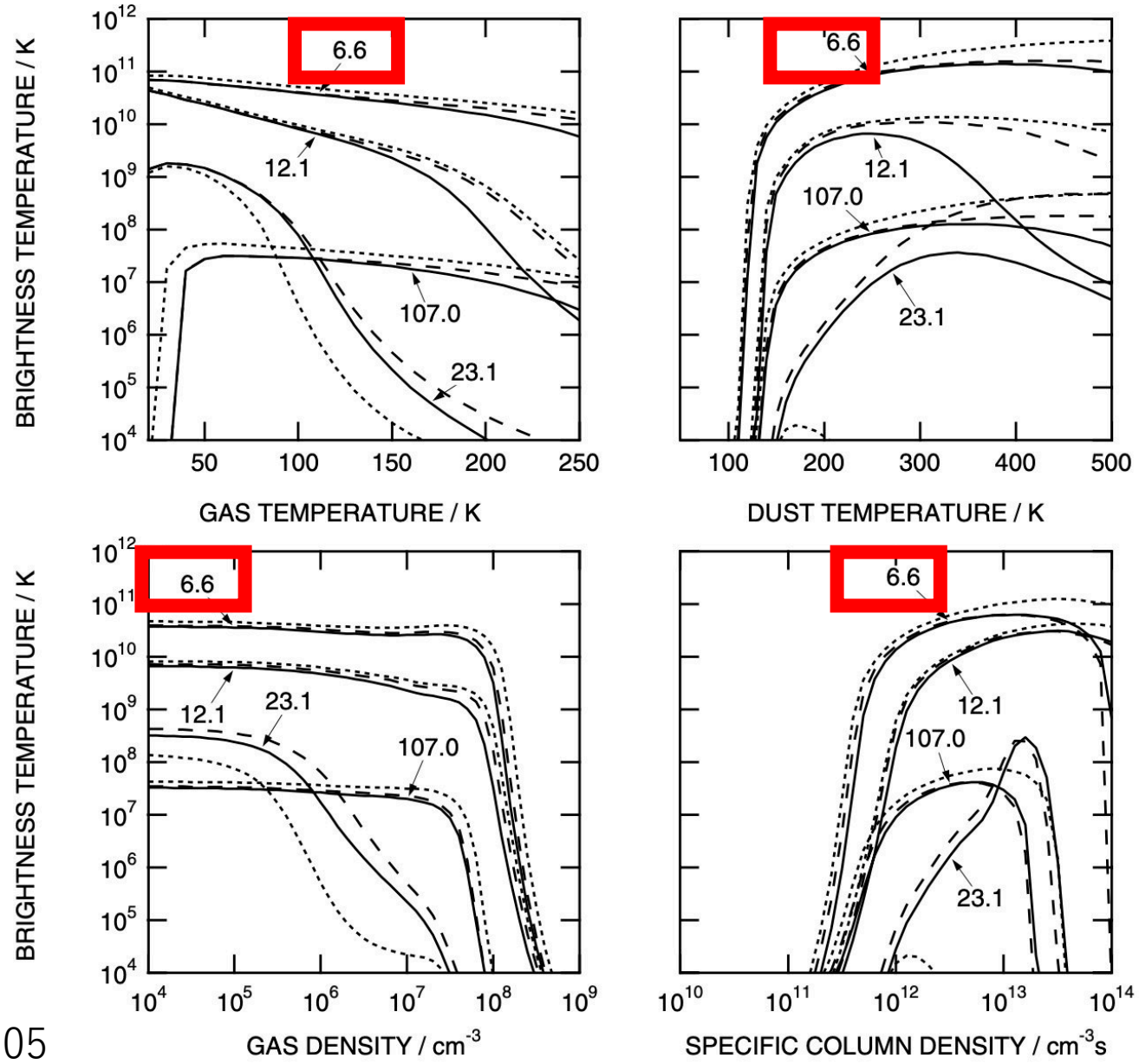
想像図

東アジア VLBI 観測網による観測結果

Sugiyama et al. 2016

なぜ 6.7 GHz？

- class II メタノールメーザーの中で最も強いのが 6.668 GHz
- ついで 12.178 GHz



Cragg+05

Figure 2. Effects of parameter variation on brightness temperatures for four masers, using three different data sets. Solid lines include $J = 0$–22 for $v_t = 0$–4 and $v_{CO} = 1$, dashed lines include $J = 0$–18 with $v_t = 0$–3, dotted lines include $J = 0$–18 with $v_t = 0$–2. Fixed parameters are $T_k = 150$ K, $T_d = 175$ K, $n_H = 10^7$ cm^{-3} and $N_M/\Delta V = 10^{12.2}$ cm^{-3} s, with no H II region background radiation, and using the new PFD collision data.

メーザーは特定の場所（メーザーが光っている場所）の情報しか導出できない

- メーザーが励起される物理量（ダスト温度、密度、...）は遷移によって異なる。

- 6.668 GHz は、<300 K, 10^(4-8) cm-3
- > 5000 Jy

- 12.178 GHz は、 <150 K, 10^(4-8) cm-3...

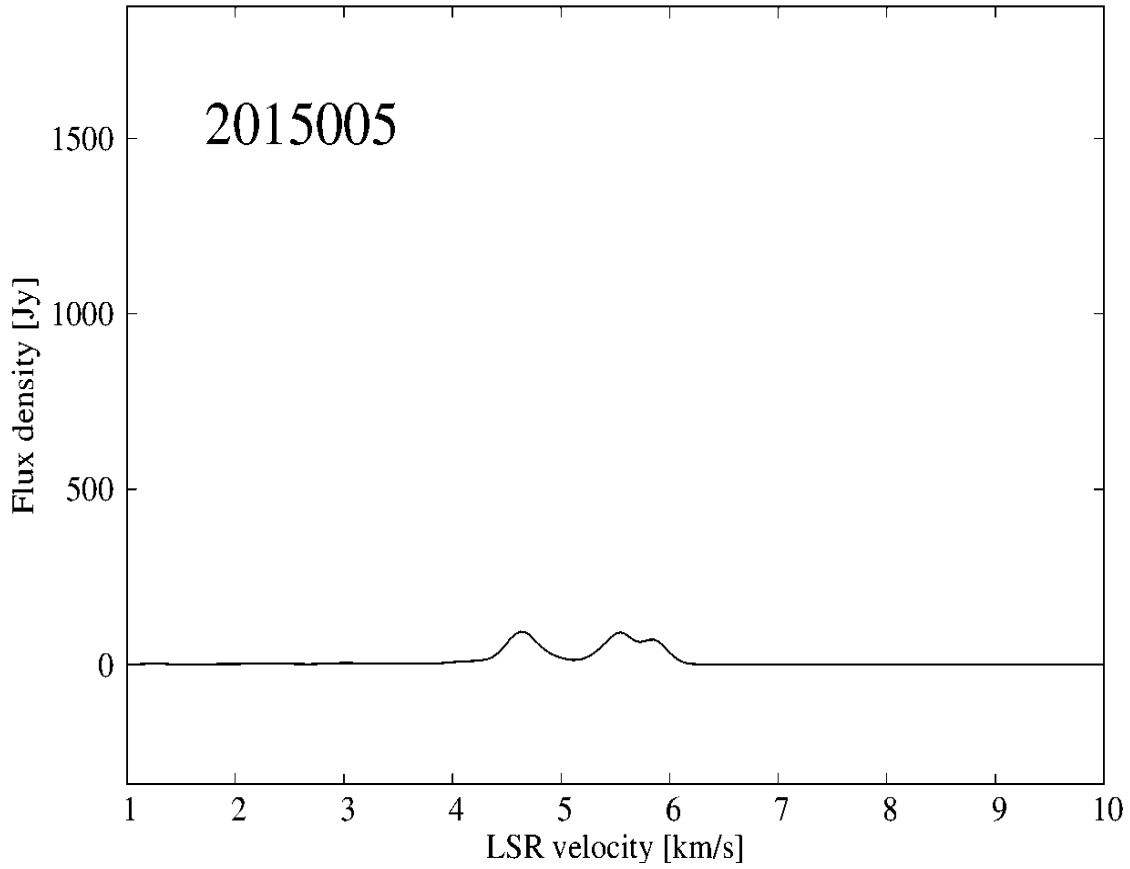
- 星周の特定の位置しか見えない

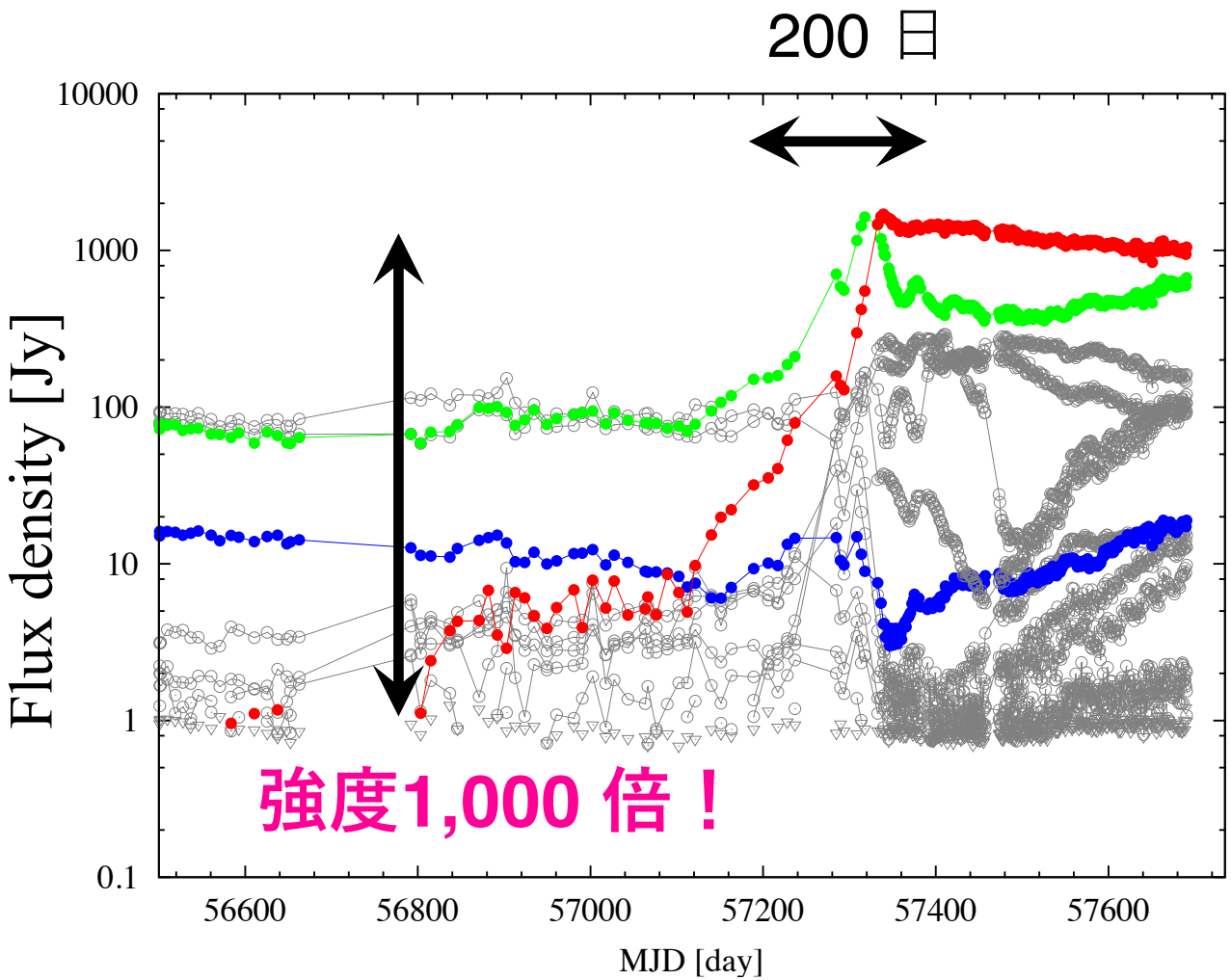
ところが！
バースト時のfollow-up 観測により
全貌を明らかにできる！

- 突発的な増光現象 (accretion burst) の発見！
- フラックスが ～100-1000倍になる！（Fujisawa+15 @ 山口 32-m）

突発的な変動の例
S255IR-NIRS3

Fujisawa+15





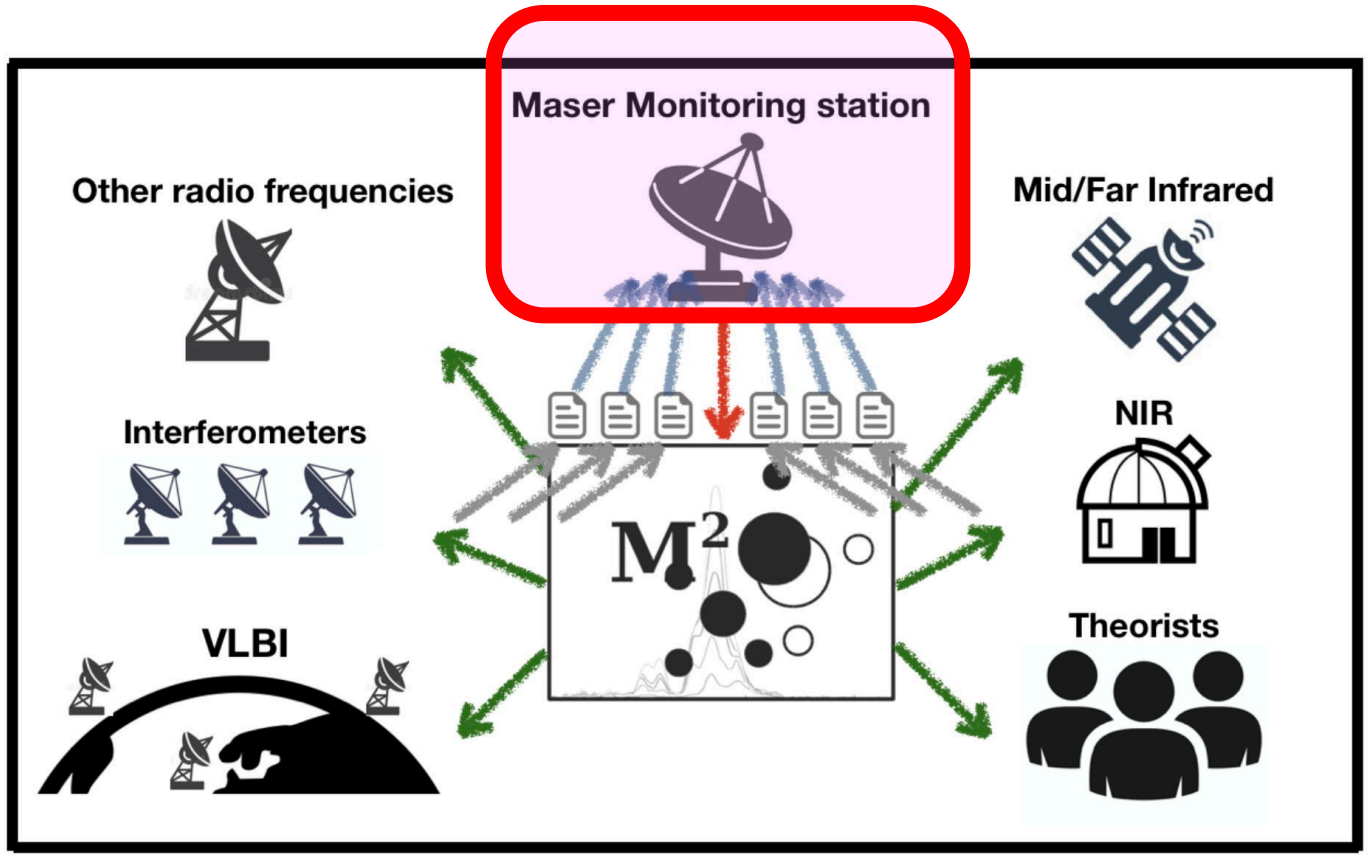
＊日立32-mで取得されたモニターデータ

バースト時のfollow-up 観測により全貌を明らかにできる！

- 突発的な増光現象 (accretion burst) の発見！
- フラックスが ～100-1000倍になる！（Fujisawa+15 @ 山口 32-m）
- ２例目は南天の天体（南アフリカで発見）
- **2017 年：世界的な follow-up 観測網の構築**
- ３例目、Sugiyama+19 @ 茨城（日立）32-m。

M2O (Maser Monitoring Organization)

茨城大学、国立天文台水沢、南ア、ポーランド、ラトビア、中国など
茨城大学は観測頻度、天体数で他観測所を凌駕しており、貢献は絶大



The fundamental flow of M2O operations is as follows:

1 A monitoring station reports a new maser flare to the M2O community.

2 Other radio observatories confirm the flare and search for flares of other masers.

3 Theorists asses these results and suggest other transitions which may be active.

4 VLBI and compact array observations are pursued of the detected lines.

5 Follow-up observations of a variety of facilities are pursued.

6 Data are shared and discussed in the M2O communications network.

7 The combined results are interpreted in their astrophysical contexts.

8 Iteration of the above steps until the event is over or the investigation is satisfied

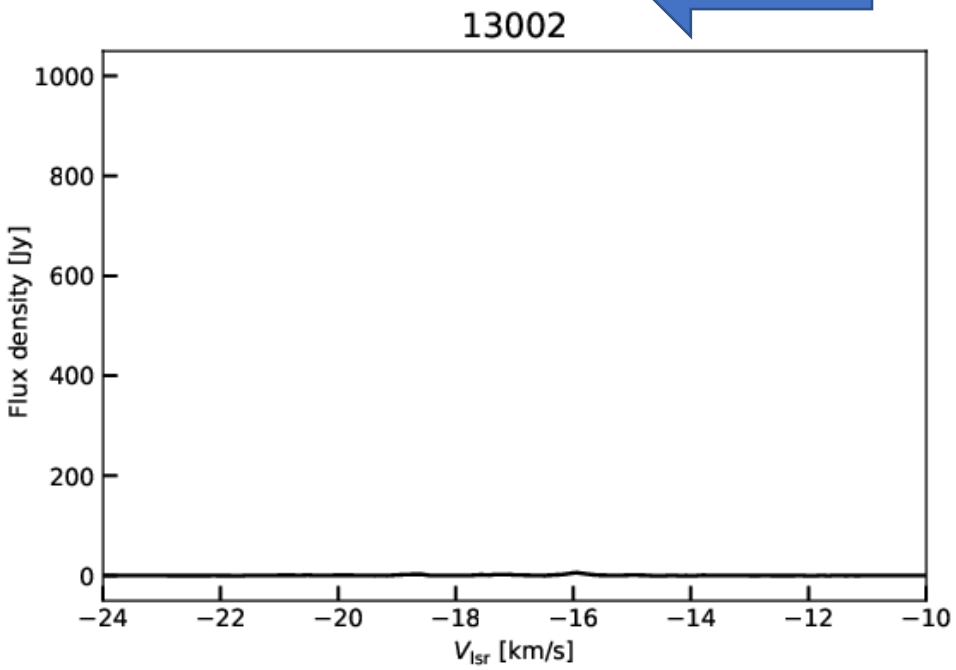
9 Publications based on these results are drafted; include co-authorship of the maser monitoring station which found the flare

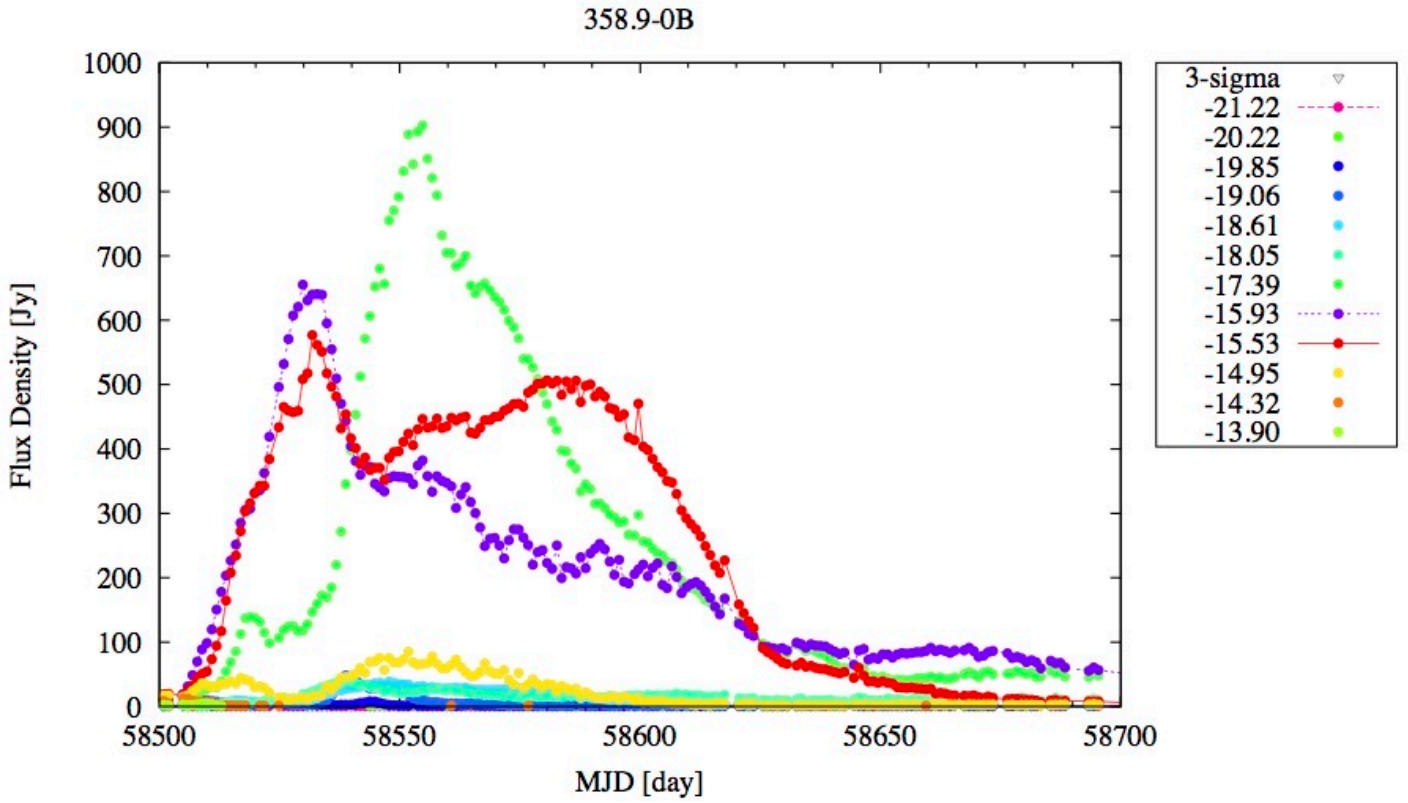
(Burns+22)

Figure 1: General flow of an M2O response to a new maser flare, coloured arrows match coloured text

突発的（accretion burst）強度変動天体 G358.931-0.030 の スペクトル動画

20YY/doy



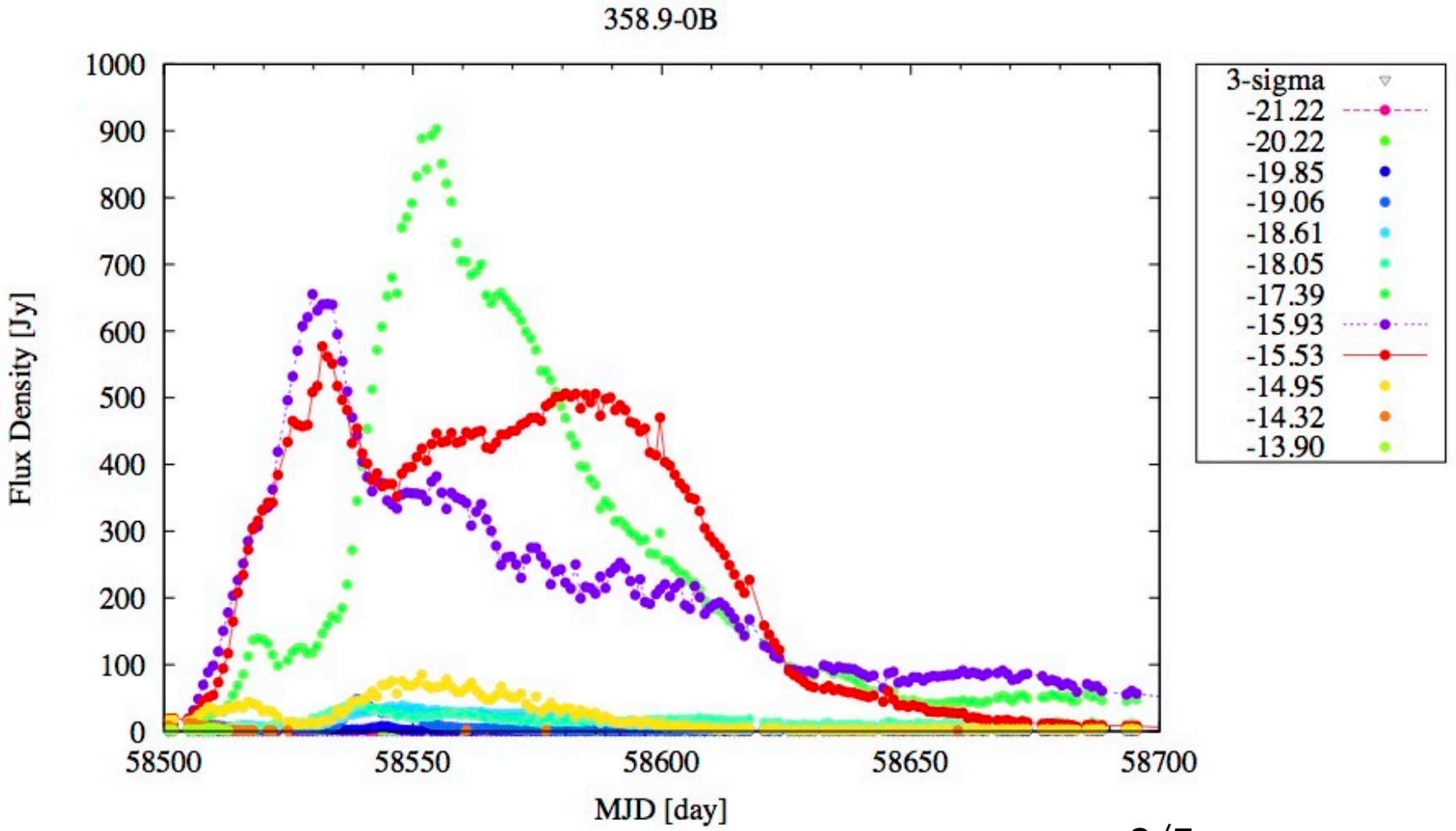


観測頻度

2013-2015 は 10 日に 1 回
2015-2017 は 観測なし
2017-2018 は 50日に 1 回
2019-2020 は 毎日

Sugiyama+19

突発的（accretion burst）強度変動天体 G358.931-0.030 の light curve



2019/1/17　4/27　8/5

バースト時のfollow-up 観測により全貌を明らかにできる！

- 突発的な増光現象 (accretion burst) の発見！
- フラックスが ～100-1000倍になる！（Fujisawa+15 @ 山口 32-m）
- ２例目は南天の天体（南アフリカで発見）
- 2017 年：世界的な follow-up 観測網の構築
- ３例目、Sugiyama+19 @ 茨城（日立）32-m。
- **迅速かつ精力的なfollow-up がなされた。**

迅速な follow-up がもたらしたもの(1)

- 多数のメーザー遷移が、天体からの信号として初検出

Rest Freq	Transition	E_L(K)	Comments	Ref.
6,181.128(21)	$17(-2) \rightarrow 18(-3)$ E $(v_t{=}1)$	718	new maser (B)	4
6,668.5192(8)	$5(1) \rightarrow 6(0)$ A^+	49		1
7,682.232(50)	$12(4) \rightarrow 13(3)$ A^-	261	new maser (B)	3
7,830.864(50)	$12(4) \rightarrow 13(3)$ A^+	261	new maser (B)	3
12,178.597(4)	$2(0) \rightarrow 3(-1)$ E	20	new detection(M)	1
12,229	$16(5) \rightarrow 17(4)$ E	451	new maser(M)	2
19,967.3961(2)	$2(1) \rightarrow 3(0)$ E	27		1
20,347	$17(6) \rightarrow 18(5)$ E	533	new maser(M)	2
20,970.651(50)	$10(1) \rightarrow 11(2)$ A^+ $(v_t{=}1)$	451	new maser (B)	3
23,121.0242(5)	$9(2) \rightarrow 10(1)$ A^+	141	new detection (*) (M)	1

new maser: first detection from celestial objects
new detection: new detection from G358.931-000.030
B: Breen et al. (2019), G: MacLeod et al. (2019), *: 4th object that shows this maser
Refs.: 1. Muller et al. (2004), 2: https://spec.jpl.nasa.gov/, 3: Tsunekawa et al. (1995), 4: Pickett et al. (1998)

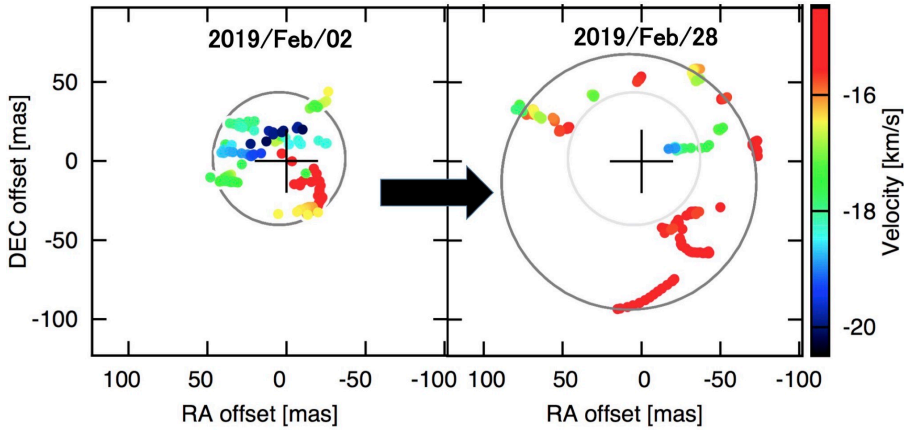
- acc. burst 時にしか励起されない（検出できない）遷移も多数検出された。
- 星に近い場所が見える！
- 通常でも検出できるもの：6.7, 12.178
- バースト時にのみ検出されるもの：7.6, 7.8, 12.229

迅速な follow-up がもたらしたもの

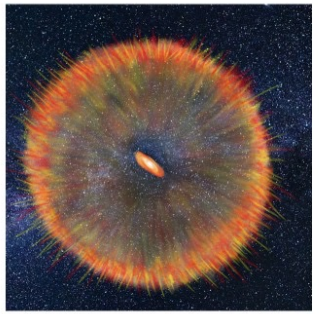
- メーザー放射位置が、時々刻々と変化していく
- （メーザーの移動ではなくて、放射に適した環境が移動していく）
- 降着物質が episodic に中心星に落下 -> 中心星の増光
- 星周の物理状態が急激に変化する
- 励起に適した場所が時々刻々と変化する
- --->
- 星周のいろんな場所が見えるようになる（トモグラフィーっぽい。CT scan みたいに？）
- spiral 構造が見えた！

G358.931-0.030 の VLBI モニター観測

熱波 (heat-wave) が外に伝搬する様子をとらえた



2019年2月2日および2月28日に
LBA+南ア で行われた
VLBI 観測結果 (Burns+20)。

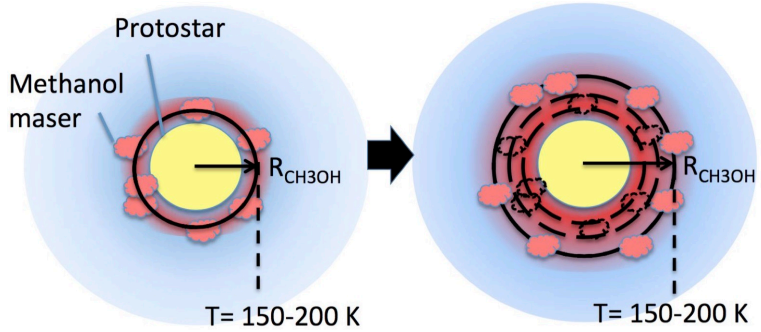


Maser “heat-wave” in an accreting high-mass protostar

Methanol masers trace the outward propagation of thermal energy in a high-mass protostar G358-MM1, following an accretion event. Multi-epoch data were observed with the Southern Hemisphere's Long Baseline Array.

LEARN MORE

Credit: Katharina Immer (Joint Institute for VLBI ERCI, The Netherlands)



円盤の温度変化と
メーザー放射場所のモデル (Burns+20)。

G358.931-0.030 の VLBIモニター観測

spiral-arm 的に物（星の材料）が中心に落ちていく様子を捉えた

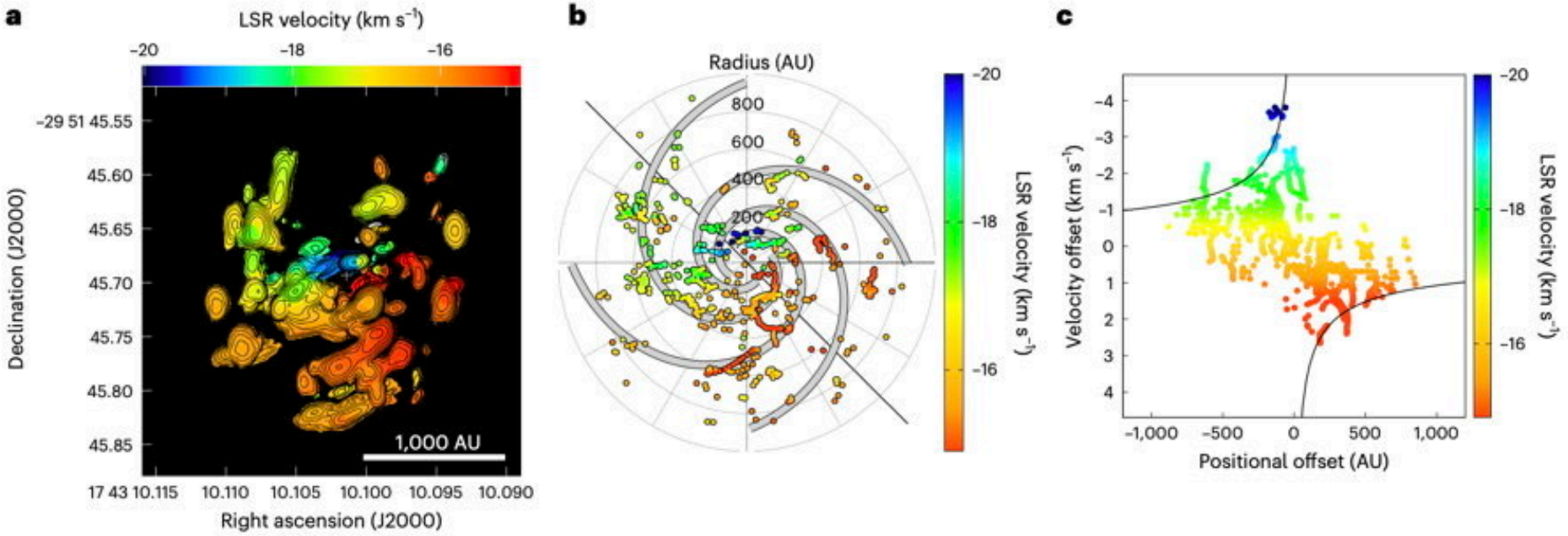


Fig. 2 | Methanol maser spatio-kinematics in G358-MM1. a, Zeroth (contours) and first (colours) moment maps of the 6.7 GHz methanol maser emission in G358-MM1 created by combining all six VLBI maps shown in Fig. 1, in which zeroth moments were summed and first moments were averaged. Contours begin at 1 Jy beam^{-1} m s^{-1} and increase in a geometric sequence (1, 2, 4, 8, 16, ...). The white cross indicates the position of the G358-MM1 millimetre core[27]. **b**, Spotmap of the combined six-epoch data sets centred on the G358-MM1 position. The black line indicates the direction of largest velocity gradient to which the position-velocity cut was taken. Spiral arms identified in this work (Methods) are plotted as thick grey lines. **c**, Position-velocity diagram of maser spots taken along the cut indicated in the central panel. The Keplerian function for an 11.5 $M_\odot$ enclosed mass (Methods) is shown as a black line.

Burns+22

EAVN 各アンテナの性能比較

- 中国Tianma65-m　　冷却 Trx = 20
- ウルムチNanshan 26-m　　冷却 Trx = 15
- （クンミン 40-m　　冷却 Trx = 20）
- KVN 21m *1(Ulsan)　　常温 Trx = 300
- VERA 20m * 4　　常温 Trx = 80-100
- Hitachi 32m　　冷却 Trx = 20
- Yamaguchi 32m　　冷却 Trx = 18
- VERA 水沢 upgrade (新沼) 70K 冷却, 目標 Tsys～60 K

- NRO45-m　　冷却 Trx = 20
- (臼田 64-m　　冷却 Trx = 20)

を加える事により、機動性の高い VLBI 観測網を構築。

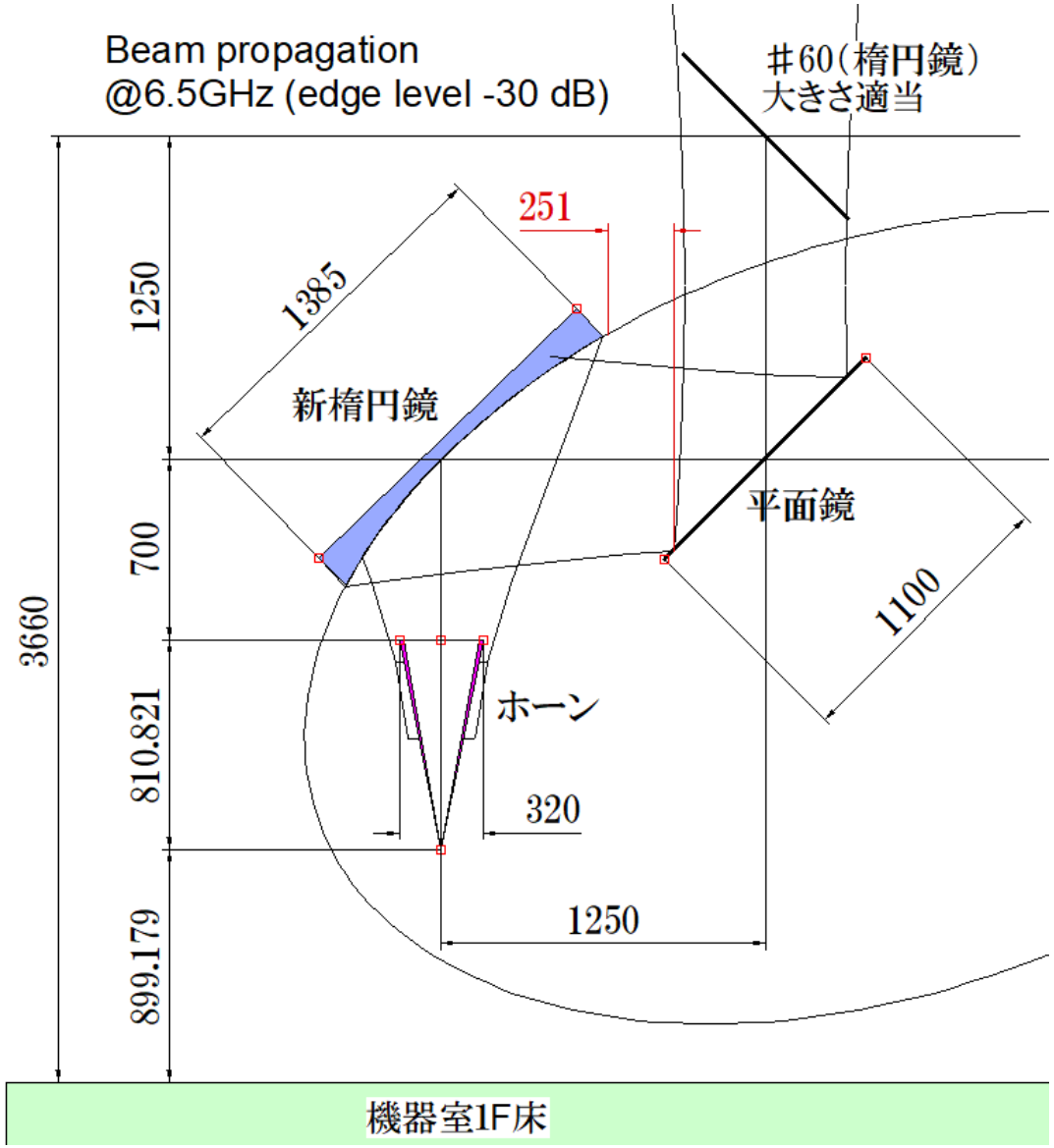
6.5-12.5 GHz 受信機の搭載案

- 受信機そのものは、茨城（日立32m）、山口32mの搭載すみで実績あり。
- 光学系をどうするか？　どこに設置するか？

1. 10 GHz 部分（つくばカメラと交代で？　10 GHz の遺物があるかも）
2. FOREST 部分（ふたを閉められないかも）-> 新ビーム系全滅
3. 新ビームのどこかに（ただし、ミラーが出っ張るので、２port使うか、FOREST 方向に出っ張るか

３の検討結果を紹介

光学設計

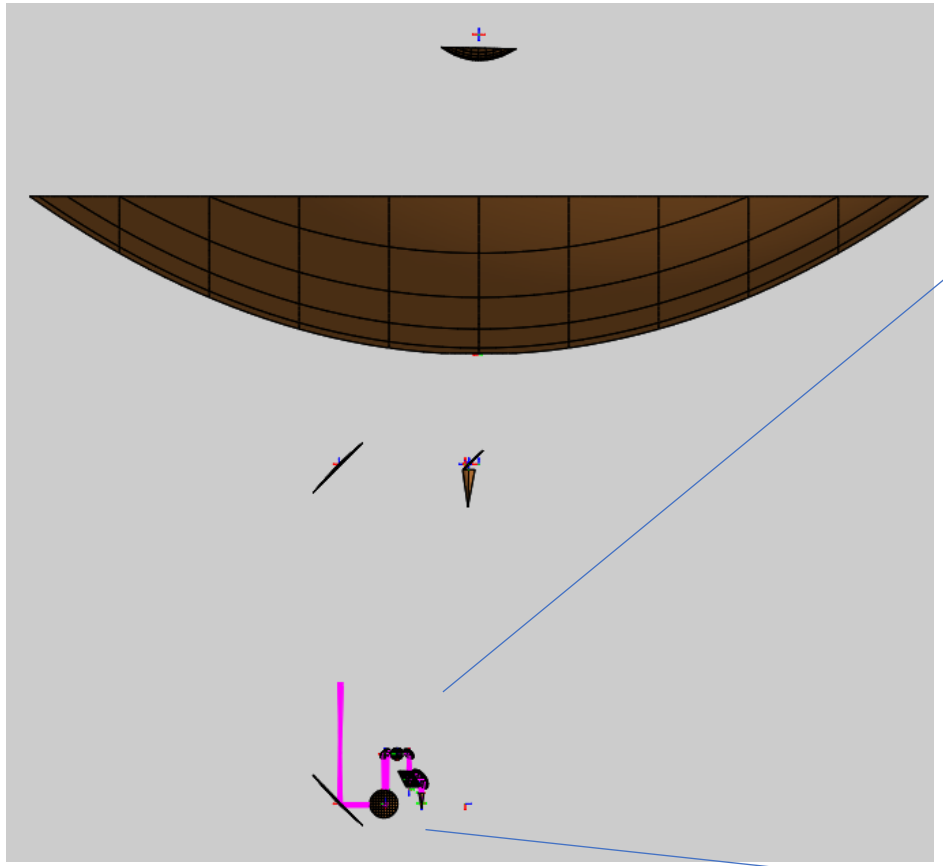


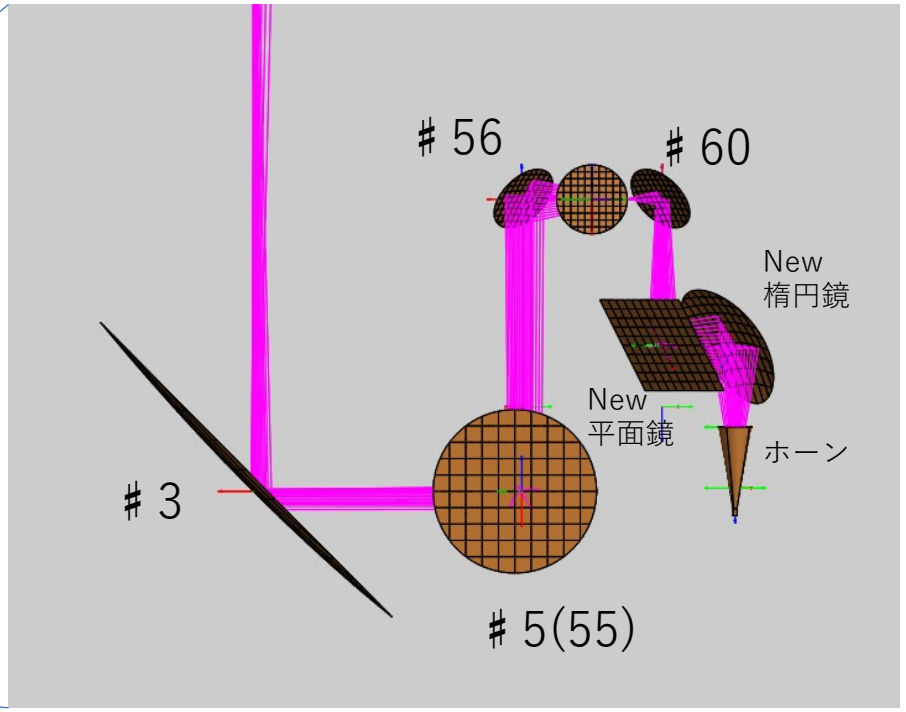
注）とりあえずの設計で、最適解ではない。
ただし、性能差はほとんど変化ないと思われるので、
設置性が最重要だと思われる。

設計条件
〇光学系サイズは、6.5GHzでedgelevel30dBの
ビームが通過する。
〇楕円鏡およびホーンの形状は8GHzで設計。
〇ホーンは従来のコルゲートホーンを仮定
(フレア角約10deg)。
→QRAや縦型コルゲートだと、フレア角度を広げる
必要がある。

結果(配置)
〇全体的にサイズがおおきく1ポート分では収まらない。
(受信機ポート間の距離は約1040mm)
〇冷却するには少し大変なホーンサイズ。
〇Dewarが低い位置にくる。

GRASP





人員体制とスケジュール

- 2025(令和7)開始の基盤研究に申請予定

人員体制

- 設計：山崎(OMU->NAOJ)、木村(JAXA)
- 製作：小川組（OMU, Iba, Yam)
- 立上：Iba mainで (+小川組)
- サイエンス：Iba, Yam, Ross(RIKEN), ...

スケジュール

- 2025：設計　　2026：製作、実験室での評価
- 2027：NRO-45m へ搭載、観測　2028,29：観測