

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

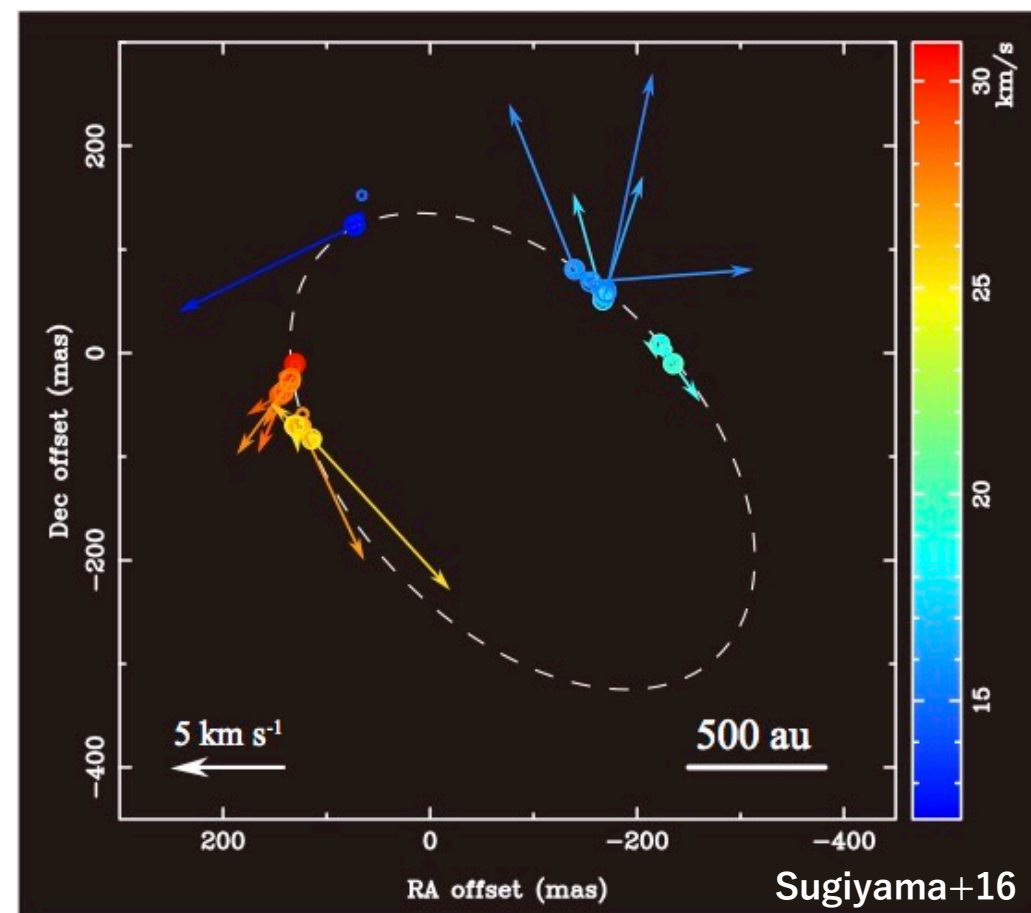
- 全天で 1000 個以上が発見されている（南半球は無バイアス観測済み。北半球はまだ）
- ほぼ 100 % が大質量原始星に付随（中質量の binary に付随するものも数例あり）
- disk, outflow に付随していると考えられている
- 輝度が非常に高く, compact



- 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

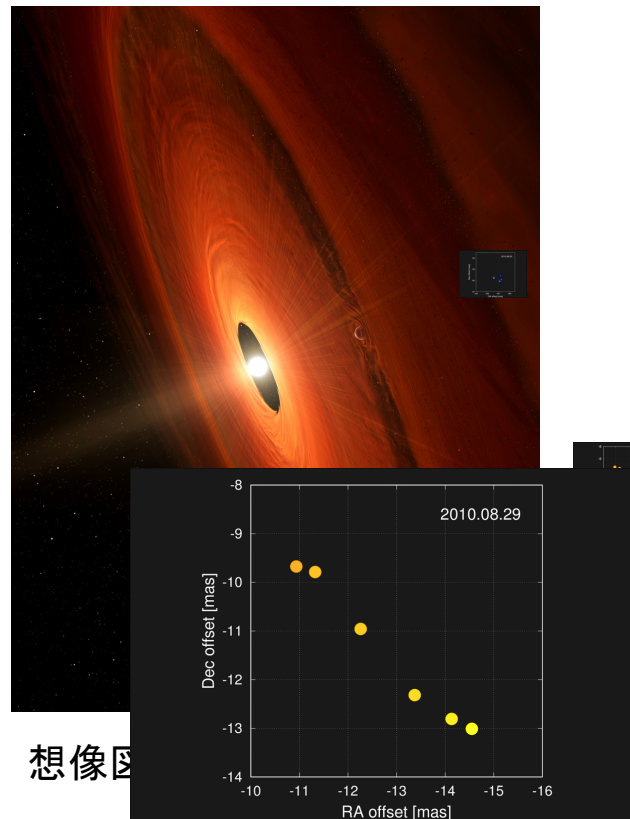
- 国内 VLBI 観測網で ≤ 0.01 秒角 @ 6.7 GHz
- ALMA でも観測が難しい大質量原始星近傍の情報が得られる
- モニター観測
- 固有運動導出が可能 (disk, outflow, ... の切り分け可能)
- メーザー spot の強度変動の同期／不同期から、変動メカニズムの解明が可能



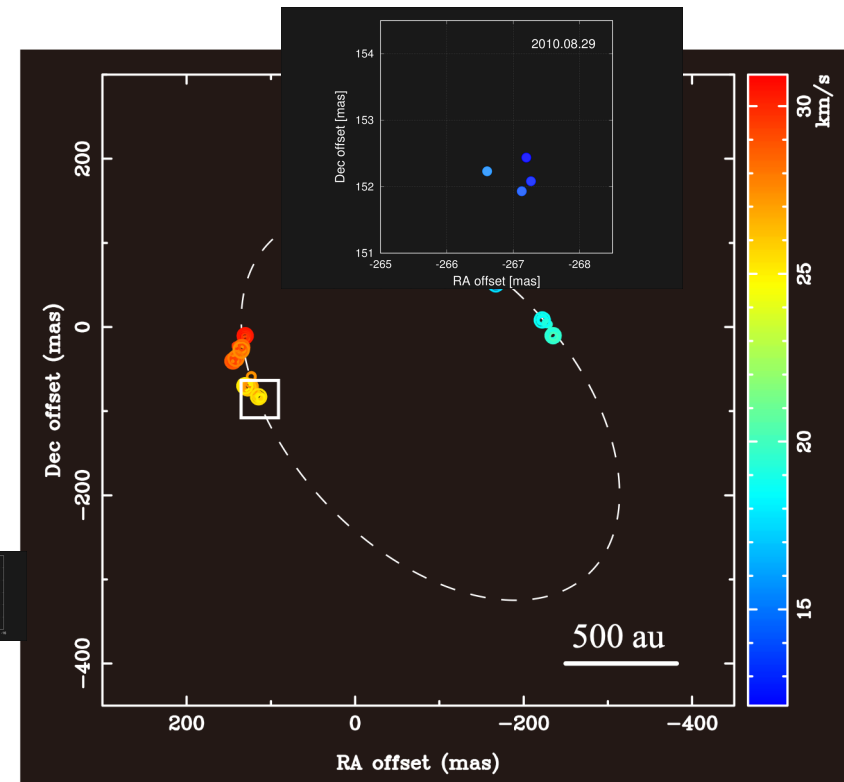
固有運動導出の例 (年 1 回の観測 x 3 年)³ @ EAVN

(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

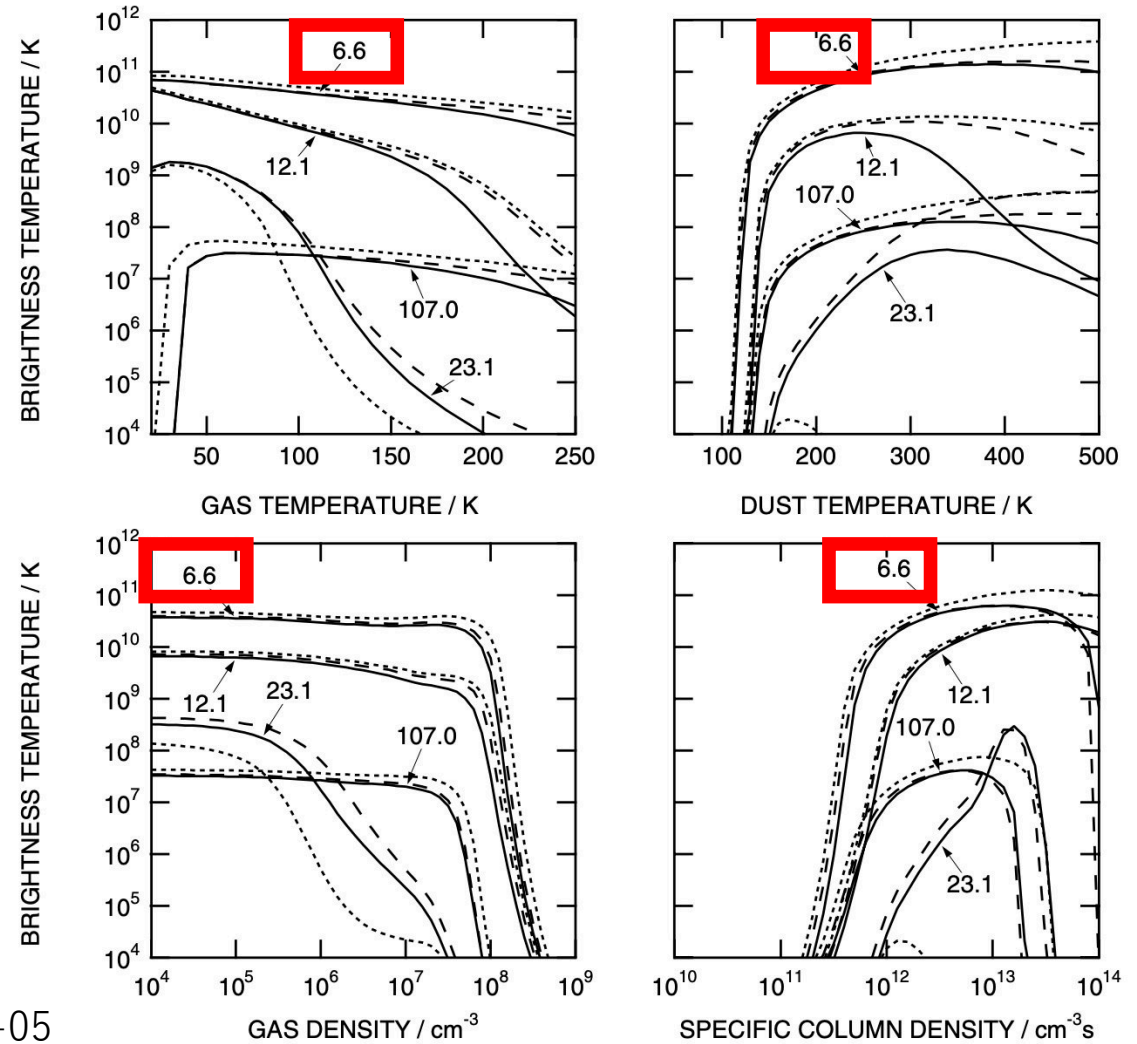


東アジア VLBI 観測網による観測結果

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 $v_{\text{CO}}=1$, 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 $N_M/\Delta V = 10^{12.2}$ $\text{cm}^{-3} \text{s}$, 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、 $<300\text{ K}$, $10^{(4-8)}\text{ cm}^{-3}$
- $> 5000\text{ Jy}$
- 12.178 GHz は、 $<150\text{ K}$, $10^{(4-8)}\text{ cm}^{-3}$...



- 星周の特定の位置しか見えない

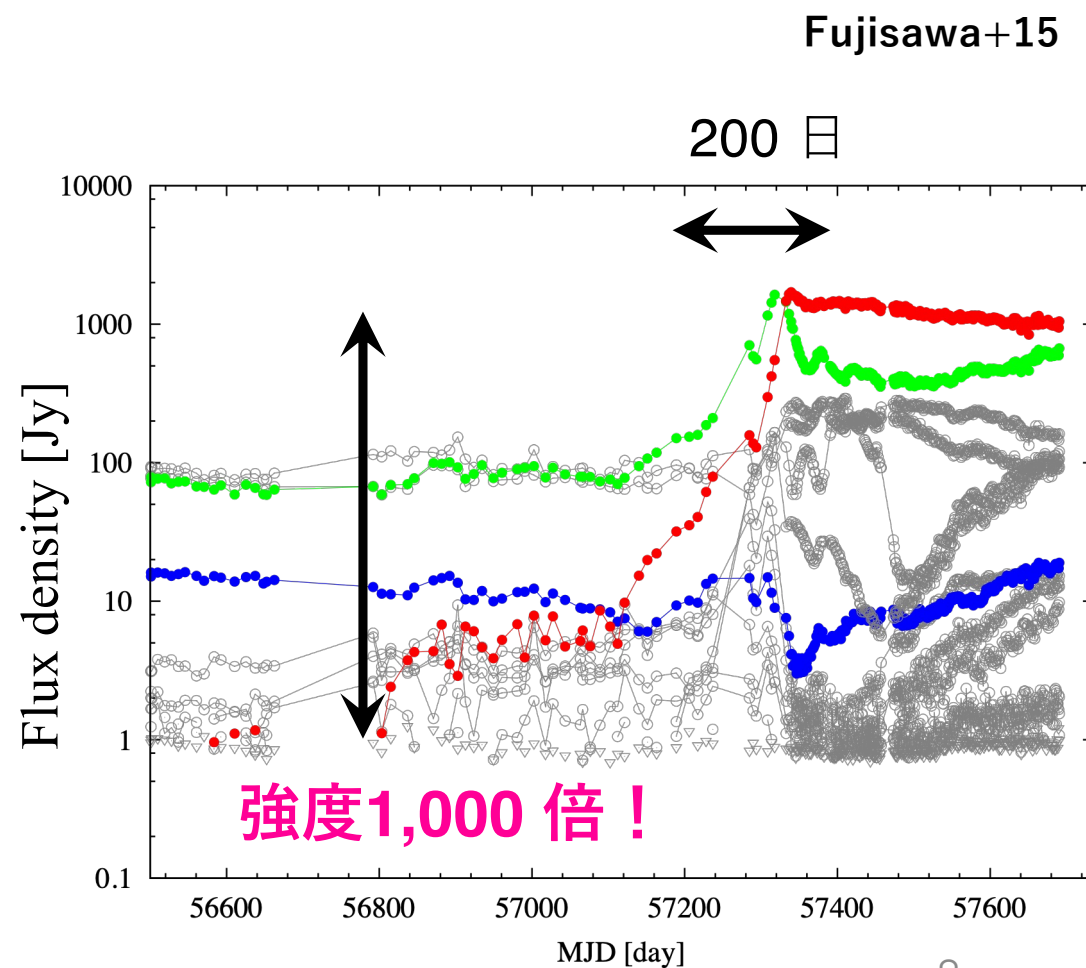
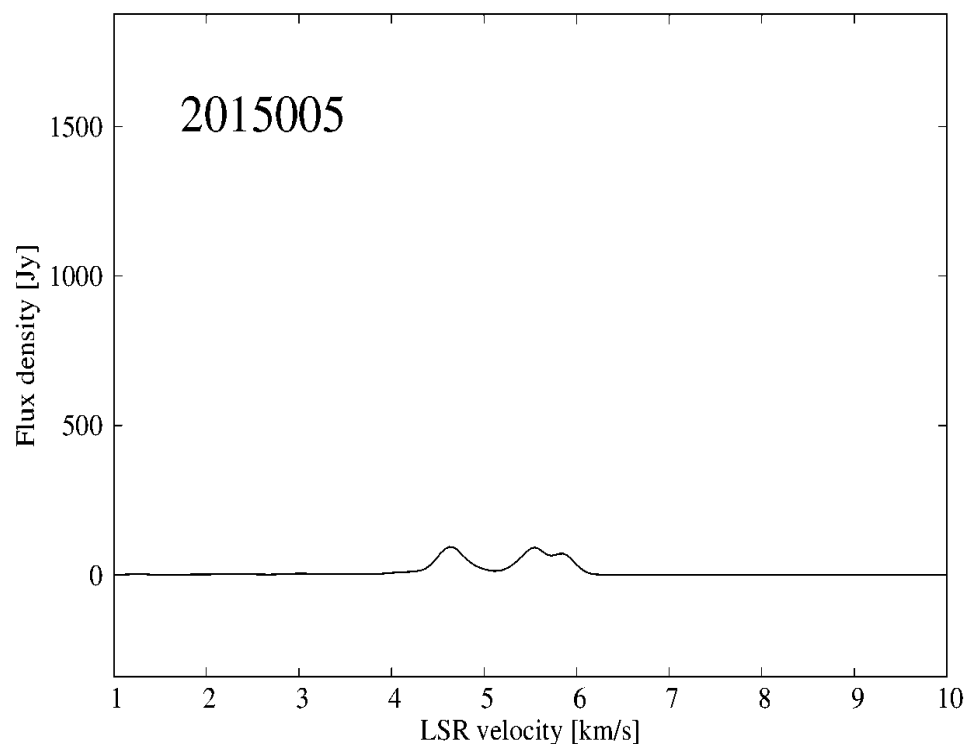
ところが！

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



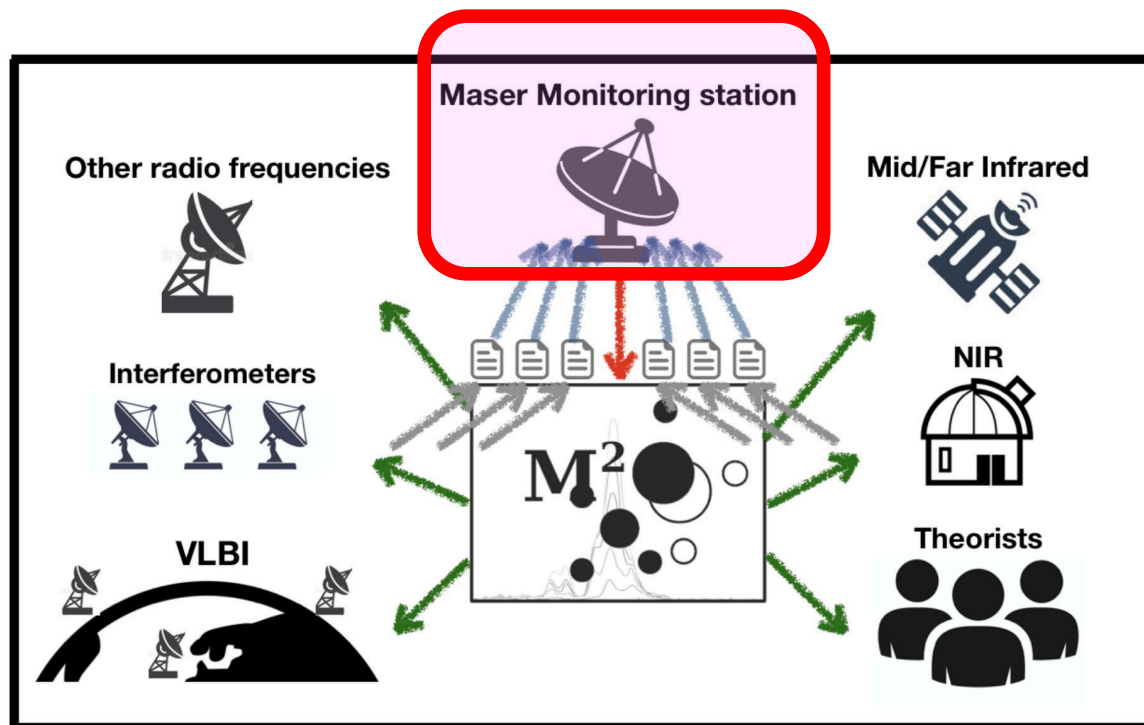
* 日立32-mで取得されたモニターデータ

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



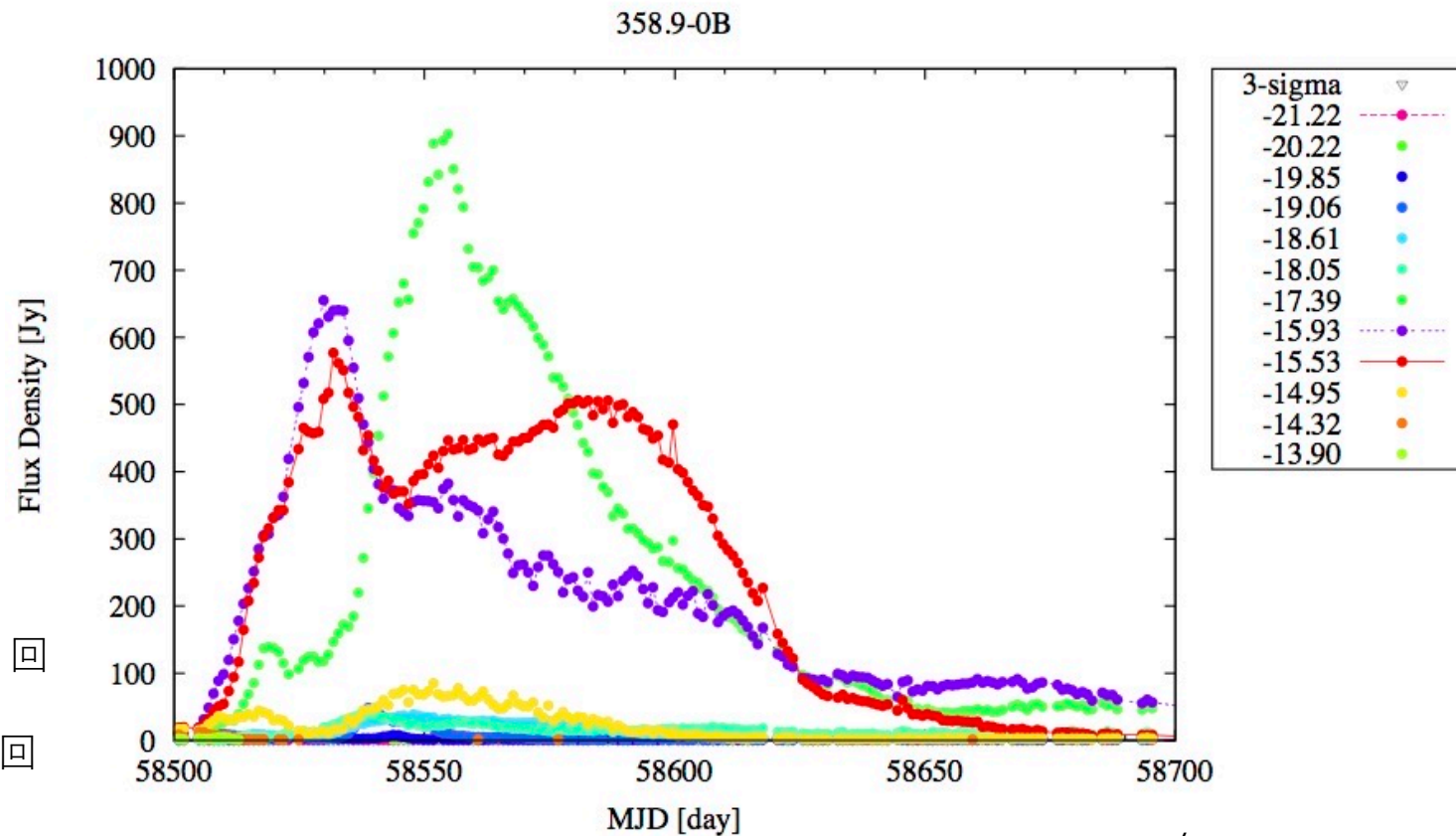
The fundamental flow of M2O operations is as follows:

- 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 assess 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 light curve



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

2019/1/17

4/27

8/5

Sugiyama+19

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

- 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

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

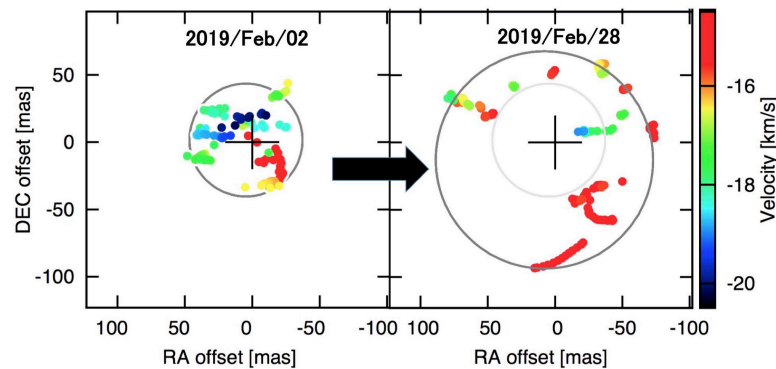
Refs.: 1. Muller et al. (2004), 2: <https://spec.jpl.nasa.gov/>, 3: Tsunekawa et al. (1995), 4: Pickett et al. (1998)

迅速な follow-up がもたらしたものの

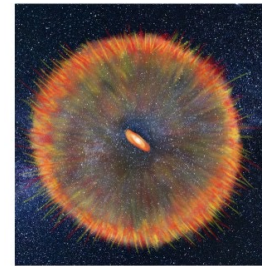
- メーザー放射位置が、時々刻々と変化していく
- （メーザーの移動ではなくて、放射に適した環境が移動していく）
- 降着物質が episodic に中心星に落下 -> 中心星の増光
- 星周の物理状態が急激に変化する
- 励起に適した場所が時々刻々と変化する
- --->
- 星周のいろんな場所が見えるようになる（トモグラフィーっぽい。
CT scan みたいに？）
- spiral 構造が見えた！

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)。

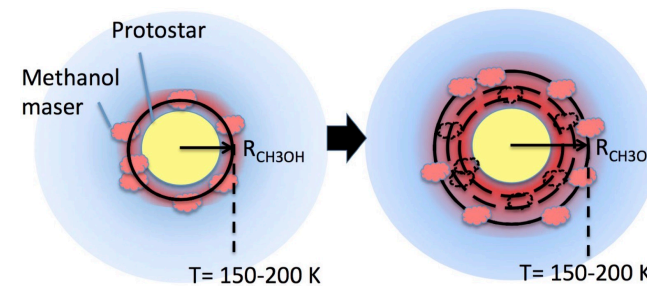


Maser "heat-wave" in an accreting high-mass protostar

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: Katherina 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モニタ一観測

spiral-arm 的に物（星の材料）が中心に落ちていく様
子を捉えた

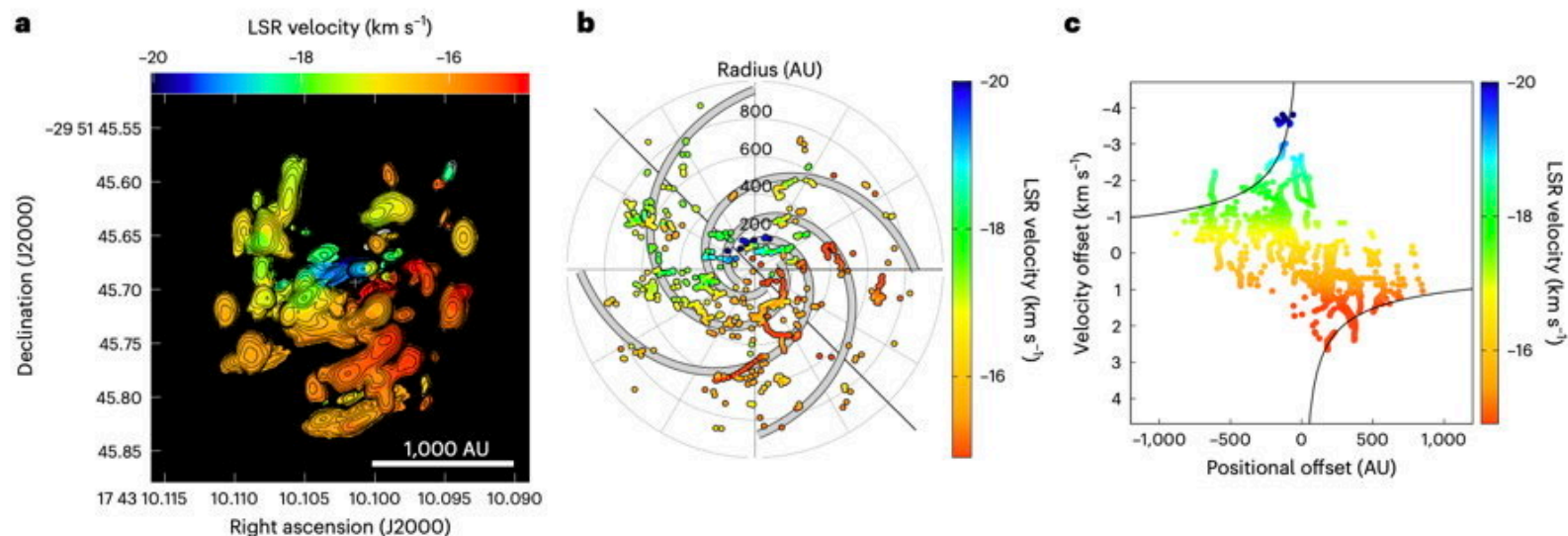


Fig. 2 | Methanol maser spatio-kinematics in G358-MM1. **a**, Zeroth (contours) and first (colours) moment maps of the 6.7 GHz methanol maser emission in G358-MM1 created by combining all six VLBI maps shown in Fig. 1, in which zeroth moments were summed and first moments were averaged. Contours begin 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 core²⁷. **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_⊙ enclosed mass (Methods) is shown as a black line.

他の VLBI 観測網では？

- EVN：原則として、年数回の限られた時期にしか観測しない（ToO は別かも。要調査）
- VLBA：あまりやられてないらしい（要調査）
- EAVN：月の半分、6/15-8/31 を除く。ToO 随時。
- Tianma の時間を確保しにくい（倍率高い。AGN 関係 @ K/Q band が大部分を占めている）[メーザーは高感度じゃなくてもできるから、という議論]
- スケジューリングがあまり迅速ではない。
- --> 機動性の高い network を！

EAVN 各アンテナの性能比較

- 中国Tianma65-m 冷却 $T_{rx} = 20$
 - ウルムチNanshan 26-m 冷却 $T_{rx} = 15$
 - (クンミン 40-m 冷却 $T_{rx} = 20$)
 - KVN 21m *1(Ulsan) 常温 $T_{rx} = 300$
 - VERA 20m * 4 常温 $T_{rx} = 80-100$
 - Hitachi 32m 冷却 $T_{rx} = 20$
 - Yamaguchi 32m 冷却 $T_{rx} = 18$
 - VERA 水沢 upgrade (新沼) 70K 冷却, 目標 $T_{sys} \sim 60$ K
-
- NRO45-m 冷却 $T_{rx} = 20$
 - (臼田 64-m 冷却 $T_{rx} = 20$)

を加える事により、機動性の高い VLBI 観測網を構築。

- 6.7 GHz だけでなく、他の繊維も！

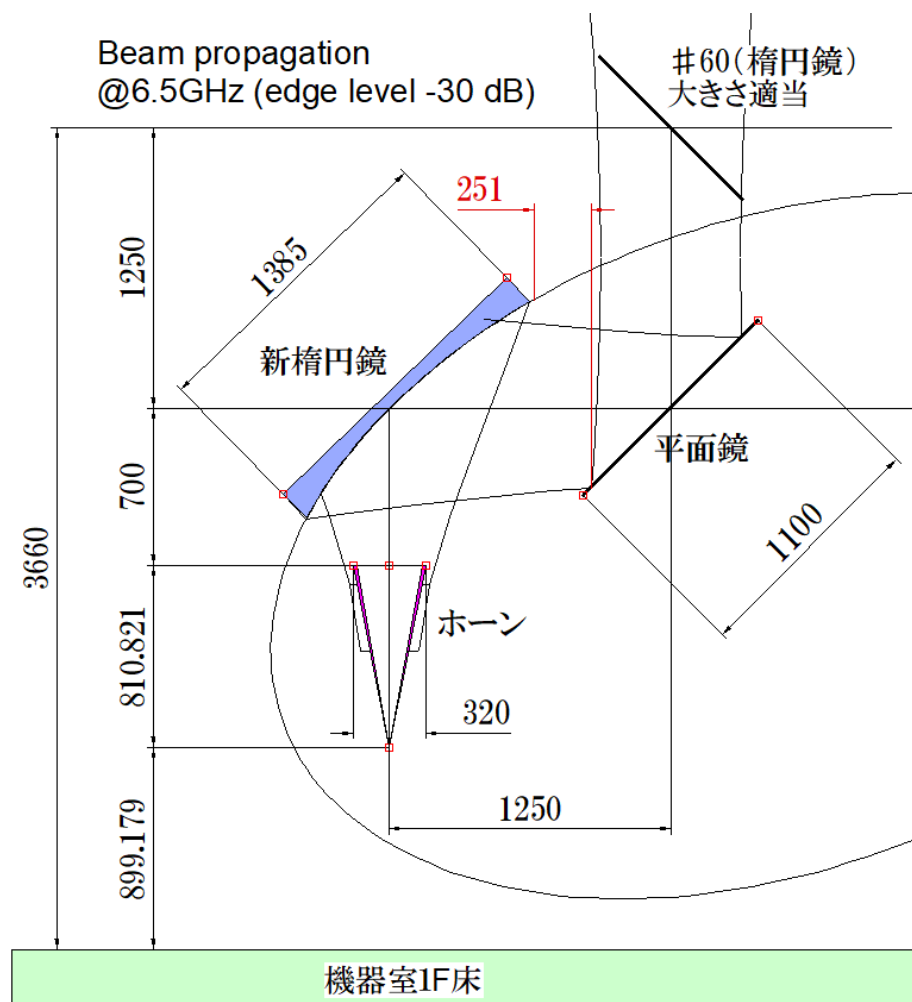


6.5-12.5 GHz 受信機の搭載案

- 受信機そのものは、茨城（日立32m）、山口32mの搭載済みで実績あり。
- 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、2 port使うか、FOREST 方向に出っ張るか

no. 3 の検討結果を紹介





2024/7時点の光学設計結果

設計条件

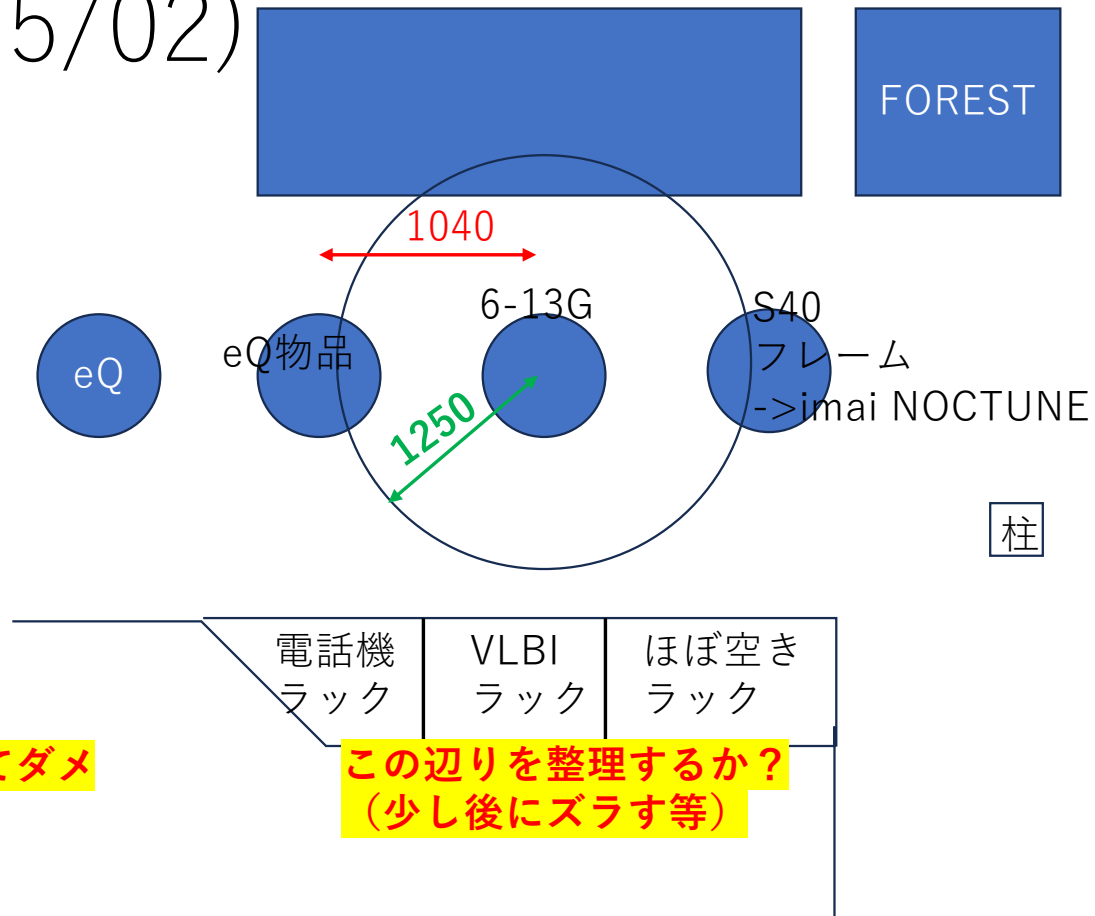
- 光学系サイズは、6.5GHzでedgelevel30dBのビームが通過する。
- 楕円鏡およびホーンの形状は8GHzで設計。
- ホーンは従来のコルゲートホーンを仮定
(フレア角約10deg)。
→QRAや縦型コルゲートだと、フレア角度を広げる必要がある。

結果(配置)

- 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)
- 冷却するには少し大変なホーンサイズ。
- Dewarが低い位置にくる。

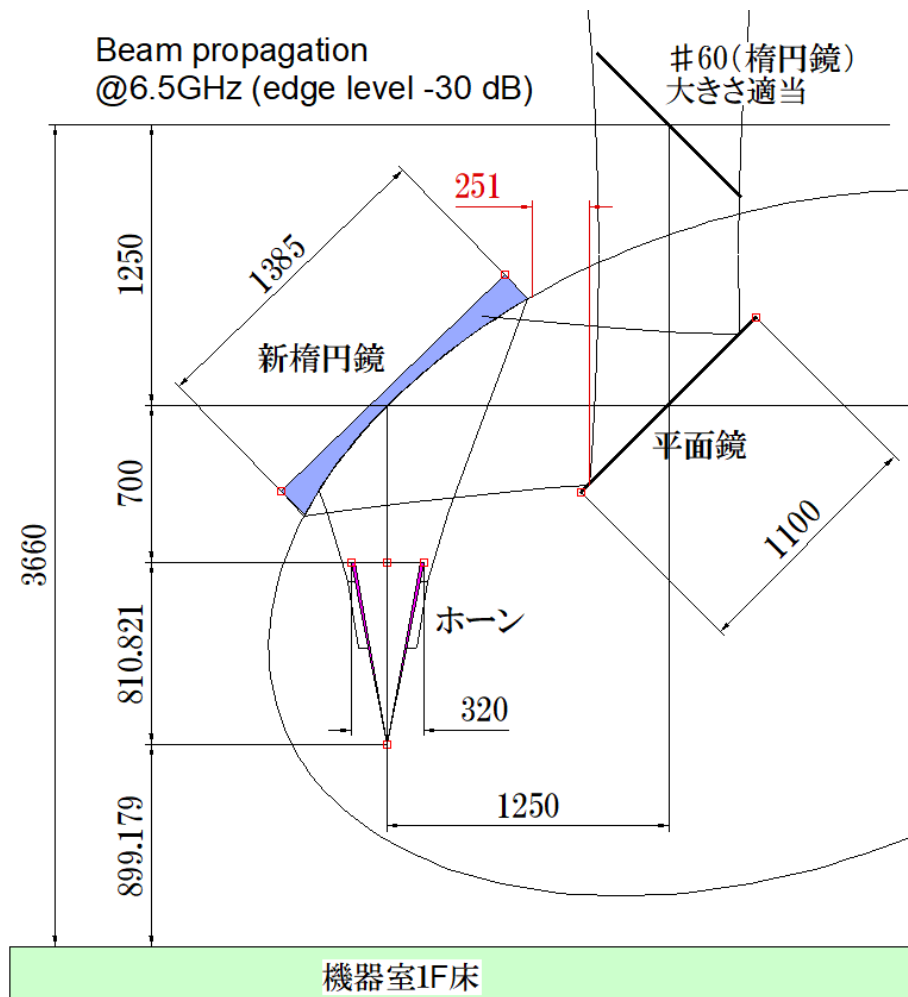
注) とりあえずの設計で、最適解ではない。
ただし、性能差はほとんど変化ないと思われるので、
設置性が最重要だと思われる。

原案 (2025/02)

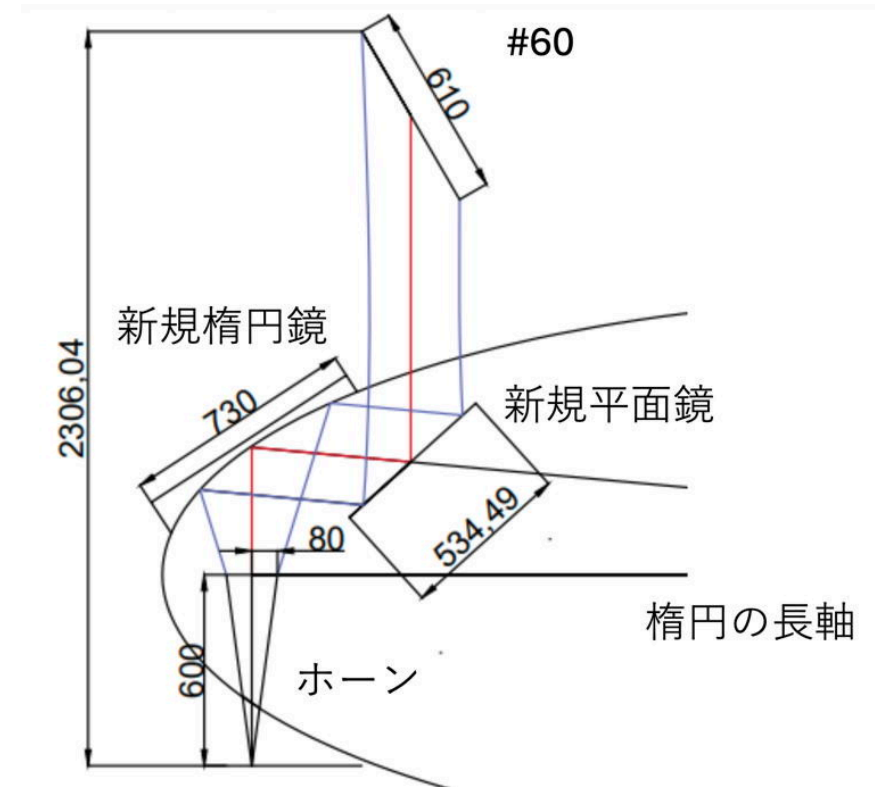


- 野辺山の現地調査結果

2024/7時点の光学設計結果



2025/2時点の光学設計結果 (野呂 [2025,茨城大学卒論])



人員体制とスケジュール

- 2025(令和7)開始の基盤研究(A)に申請予定 → 残念ながら。。。。
- 2026(令和8)開始の基盤研究(A)に再チャレ → 残念ながら。。。。
- 2027(令和9)開始の基盤研究(A)に再チャレンジ

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(Iba), ...

スケジュール

- | | |
|-----------------------|-----------------|
| • 2027：設計 | 2028：製作、実験室での評価 |
| • 2029：NRO-45m へ搭載、観測 | 2030：観測 |