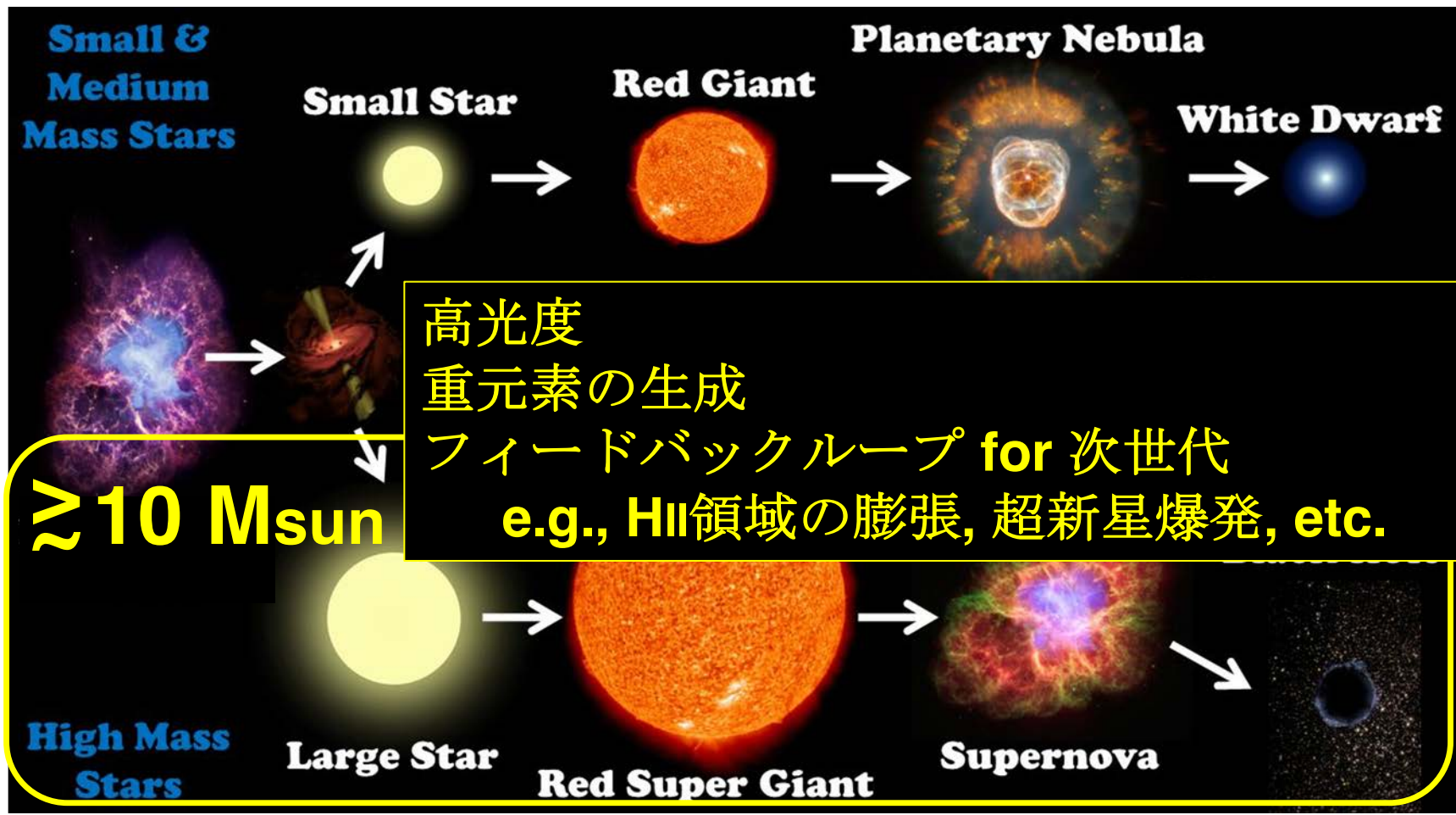


廣田朋也, 杉山孝一郎, 米倉寛則, 元木業人

星WG. SFR班: 中間報告

1. 研究の意義: 大質量星研究の重要性



1. 研究の意義: 現状の大質量星形成の“モード”理解

1. 動的な圧縮による高密度クランプ形成 (分子雲/フィラメント衝突、乱流衝突)
→Jeans不安定の成長より早く圧縮

2. 高密度クランプからの分岐 (初期条件依存、どちらかである必要はない)

A: massive virialized Coreの形成

～最大で60 Msun (e.g., Tan +13) → Collapse後はある程度分裂

～強い乱流/磁場による支えで密度構造形成?

B: less-massive virialized Coreへの分裂 (10 – 30 Msun)

+ sub-virial clump/ filamentからの追加降着でCoreを太らせる
(e.g., Global Collapse/Competitive Accretion)

3. 重力収縮の開始

- 密度構造が中心集中しているほど中心で早期に大質量星が形成

- sub-virialな場合も結局ポテンシャル底の星が質量獲得して重くなる

- いずれもフィラメント/クランプ - コア - 回転降着エンベロップ - 円盤の階層構造

4. 円盤降着と連星形成

中心星が軽い and/or 円盤への降着率が大きいと円盤は不安定化 (e.g, Motogi +19)

→分裂によって原始連星を形成し、IMFのTop側を決定

→角運動量輸送効率(= 磁場環境)で円盤サイズや分裂の程度が分岐?

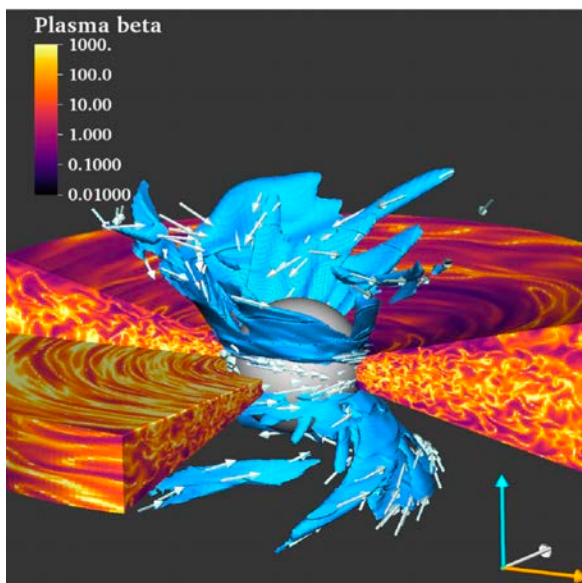
1. 研究の意義

究極の課題：(大質量) 星の質量はどう決まるのか？

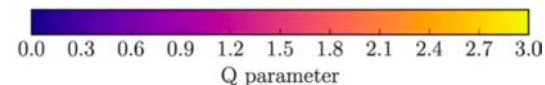
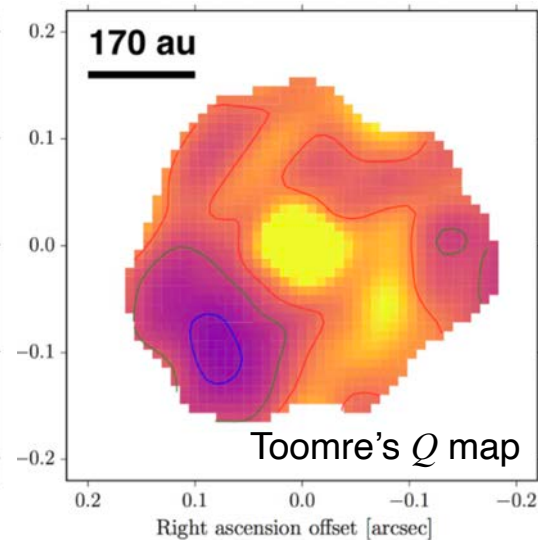
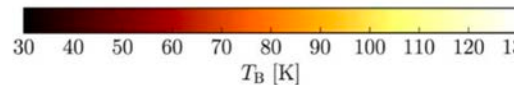
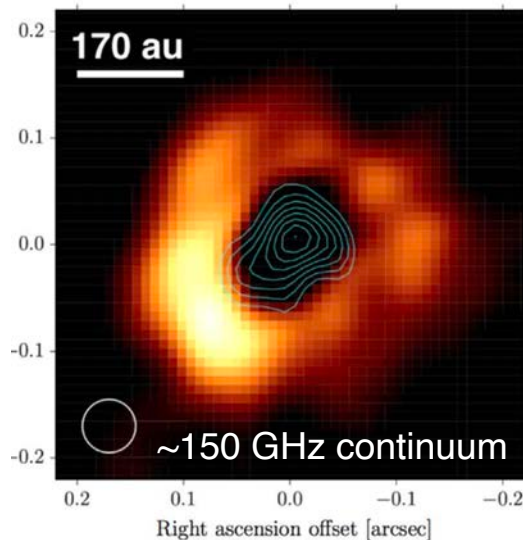
□ 初期条件

□ 初期質量関数

□ 質量降着過程： 円盤分裂, 星形成効率, 連星形成過程

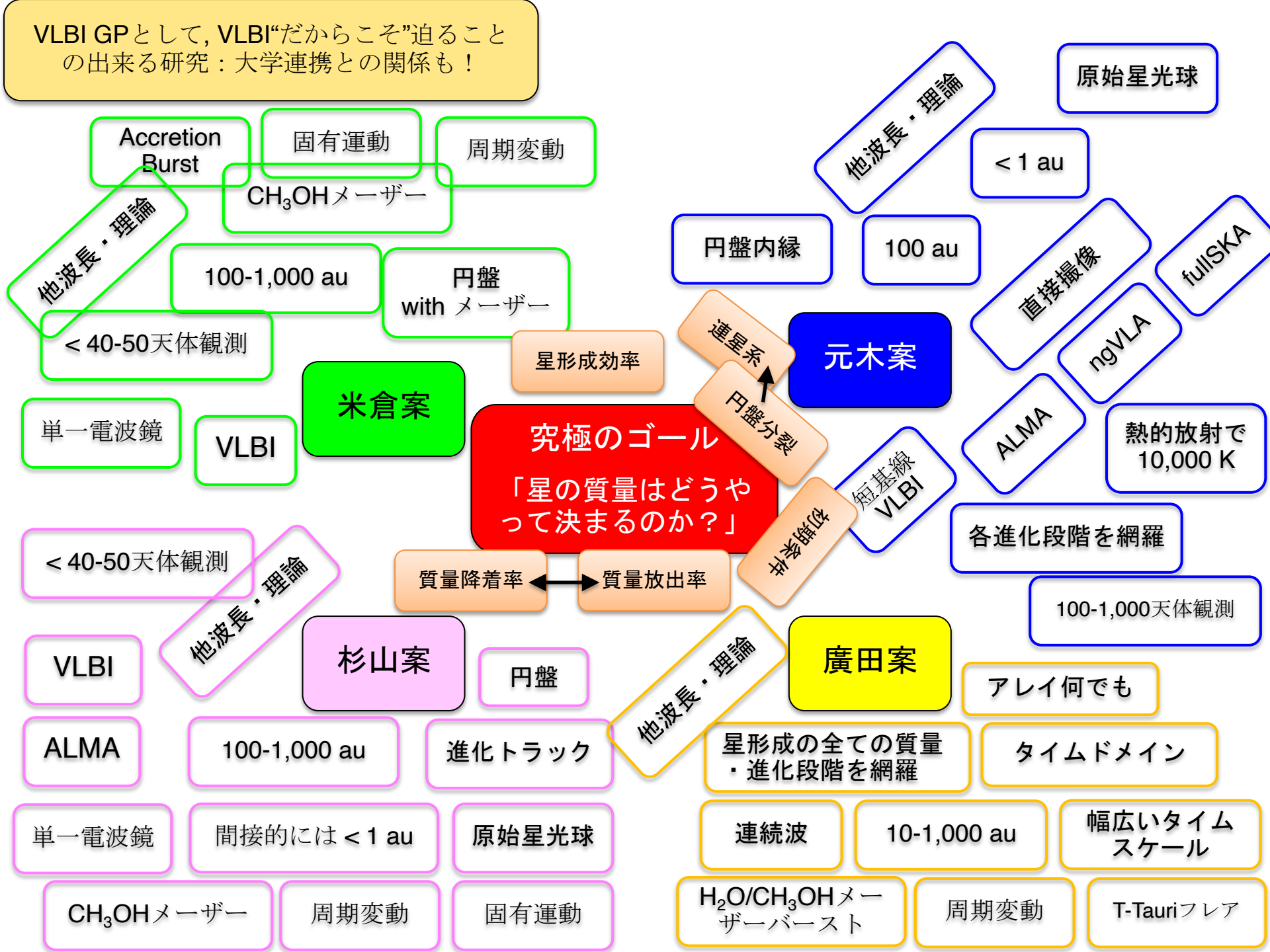


3-D MHD simulation of a magnetized accretion disk (Takasao+ 18)



Face-on instability disk around high-mass PS G 353.273+0.641 (Motogi+ 19)

VLBI GPとして、VLBI“だからこそ”迫ること
の出来る研究：大学連携との関係も！



2. 具体案（新規性含む）

1. **元木**：いくつかの異なる特徴的進化段階の大質量原始星に対する、円盤スケールから原始星へ至る降着流の直接撮像と、理論比較による形成過程に対する諸々の統計的研究
2. **米倉**：降着円盤の空間分布および3次元速度構造の直接検出を目指したメタノールメーザーの固有運動検出サーベイと、それを通じた大質量星形成機構モードの理解
3. **米倉、杉山、廣田、元木**：強度変動現象を通じた微小領域における物理量の導出と、その時間的振舞い（継続性、再帰性、など）
 - a) **杉山、米倉、元木**：周期変動を通じた原始星パラメータ導出
 - b) **米倉、杉山、廣田**：降着バーストを通じた爆発的な質量降着現象の直接的導出と、その時間的振る舞いの統計的調査
 - c) **廣田**：水メーザーバースト、SiO周期変動、T-Tauri磁気リコネクションフレア、連続波、etc. を通じた質量降着現象に伴う様々な時間スケールの現象に迫る

2.1. (PI:元木) 大質量原始星観測

□ 大学望遠鏡による「進化」方向のターゲットリスト拡張

– 太る前の中小質量原始星ジェット

→ 山口/茨城干渉計による探査

– 核燃焼点火直後の大質量星

→ JVN短基線による探査

□ 次世代干渉計(ngVLA/SKA)

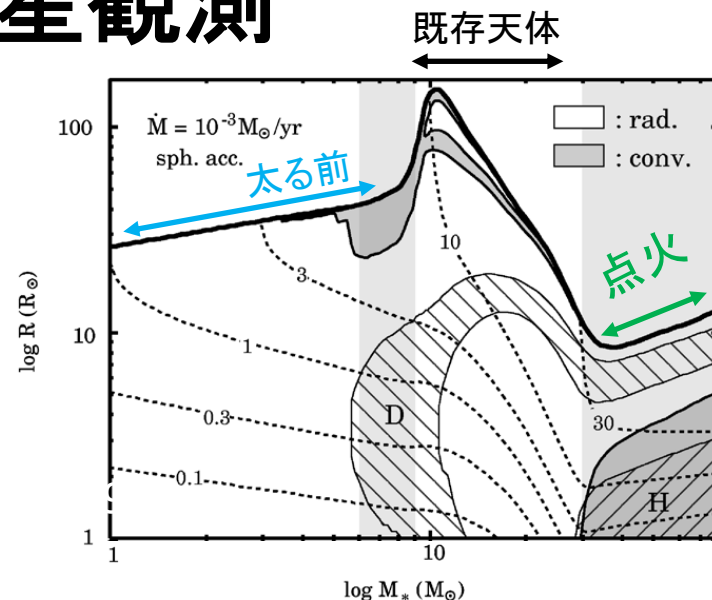
による原始星大気の直接撮像へ挑む

– 膨らんだ原始星大気

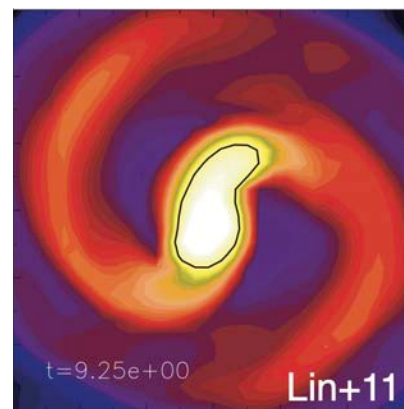
(0.2 – 2 mas @ 5 kpc)

→ 8 – 40 GHzで 1σ : 500 – 1000 K
であれば解像可能

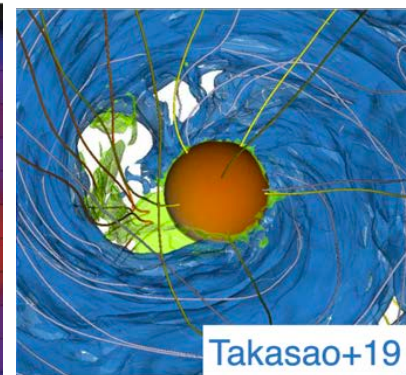
– 円盤から星表面への接続も見える？



高降着率下での原始星進化
(Hosokawa & Omukai 09)



回転でひしゃげる原始星



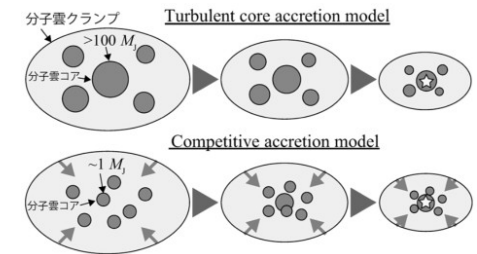
星表面への3D降着

2.2. (PI: 米倉) 大質量星形成機構モードの解明

2つのモードの、どちらが支配的か、初期条件や環境に依存するか？

大質量形成機構の2つのモード

- core accretion
 - 初期の大質量コアが収縮 (初期コア質量を超える事は無い)
 - 秩序だった収縮 => disk が1つ存在する
- competitive accretion
 - 初期の小質量コアが、収縮過程でコア周囲の質量を獲得して大質量に成長 (初期コア質量を超える事が可能)
 - disk は存在するのか？



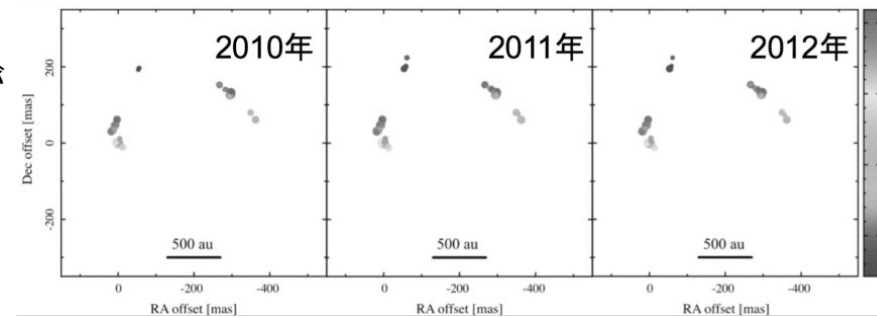
二つの大質量星形成モデルの模式図。

酒井剛2017

これまでの観測的

- VLBI イメージング観測 (1エポック)
 - 分布を元に分類: 楕円、円弧、直線、ペア、複雑
- VLBI 動画取得 (複数エポック観測) による固有運動導出が必要
 - 現在までに固有運動が測定された天体数 xx
 - 内訳: 楕円 (x天体)、円弧 (x)、直線 (x)、ペア (x)、複雑 (x)
- 初期のEAVN (JVN+上海25m) (Fujisawa+14)
 - 年1回の頻度で、3-4回の観測 (3-4コマの 動画取得)
 - 頻度が少ない (メーザー雲 [feature] 内の同じ場所が光っている保証が無い => 位置の不定性)、
 - 継続期間が短い (有意な運動を捕えづらい)

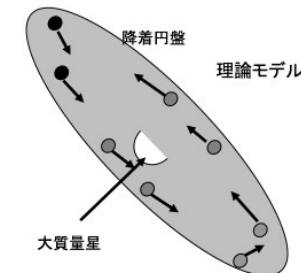
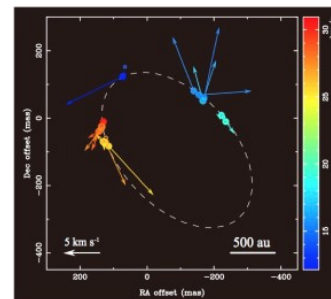
Fujisawa+14 の図(snapshot)を入れる？



EAVN を用いた固有運動測定計画

- 天体数を増やす
- 感度良い観測
 - 大口径アンテナ + 冷却受信機 [VERA20mの冷却化]
- 空間分解能高い観測
 - Nanshan, SouthEast [タイ、インドネシアなど] の参加
- より高頻度な観測 (年1回ではなくて、年4回、など)
- より長期間な観測 (5-10年規模で継続)

他波長装置: ALMA などによる dust 観測？



黒、濃灰色、薄灰色の小さい丸印: メーザー源

(上) 2010から2012に年1回EAVNで行われた観測で取得されたメーザースポットの分布
(左) 3回の観測から導出されたメーザースポットの運動およびその解釈

(Sugiyama+ 16)

2.3-a. (PI:杉山、米倉、元木)

周期変動を通じ原始星 パラメータへ迫る

□ 様々なメーザー & NIRによる周期的な強度変動の研究

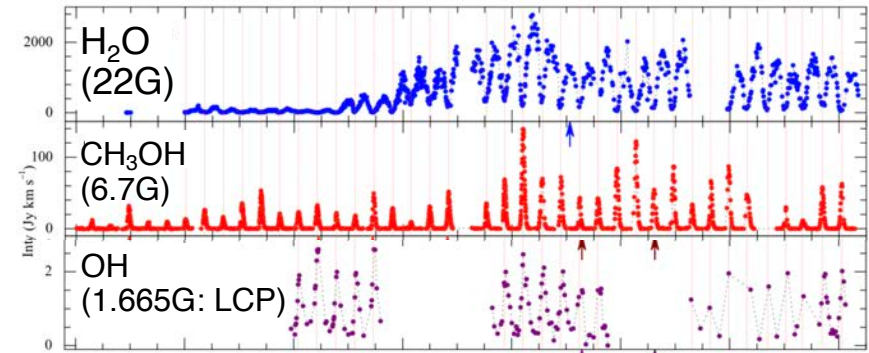
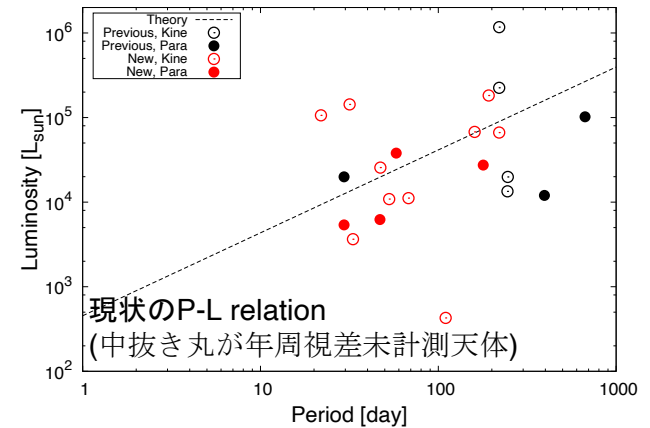
- ・ 脈動変光、CWB、Circumbinary、etc
- ・ 脈動モデルによる P-L relation に着目
- ・ 原始星表面 (< 1 au) の物理パラへ迫る

□ その拡張

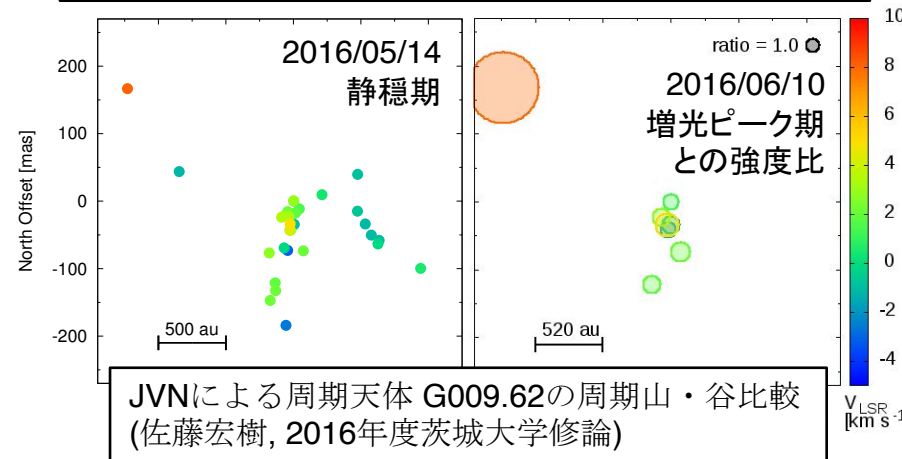
- ・ 年周視差計測による P-L 縦軸: 光度の高精度な決定
- ・ 周期の山・谷における空間分布比較を通じた周期変動成分の精密な同定
(e.g., 佐藤宏樹, 2016年度茨城大学修論)
- ・ 異なる分子、励起機構を有する多種メーザーOH/H₂CO/CH₃OH/H₂O/SiO間の同期性調査 (e.g., Szymczak+ 16; Olech+ 20) を通じた、周期モデルの切り分け

□ 対象: CH₃OH周期リスト

(e.g., Goedhart+ 04; Yonekura+ 16; Sugiyama+ 17, 18)



G107.298における多種メーザーの同期した周期変動
(周期~34 d) (Olech+ 20)



JVNによる周期天体 G009.62の周期山・谷比較
(佐藤宏樹, 2016年度茨城大学修論)

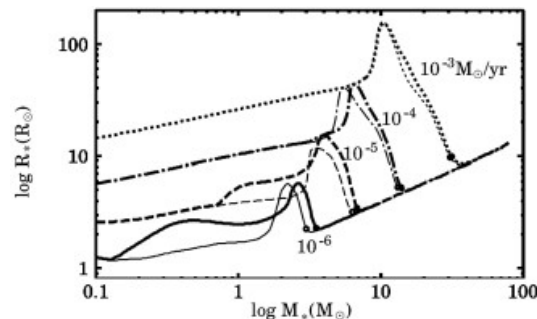
2.3-b. (PI: 米倉、杉山、廣田)

大質量星形成時の質量降着は、どれほどdramaticか？

～ 6.7 GHz メタノールメーザーの単一鏡高頻度モニター観測 および即時フォローアップで迫る accretion burst ～

大質量星の進化を決定づけるパラメーター：質量と質量降着率

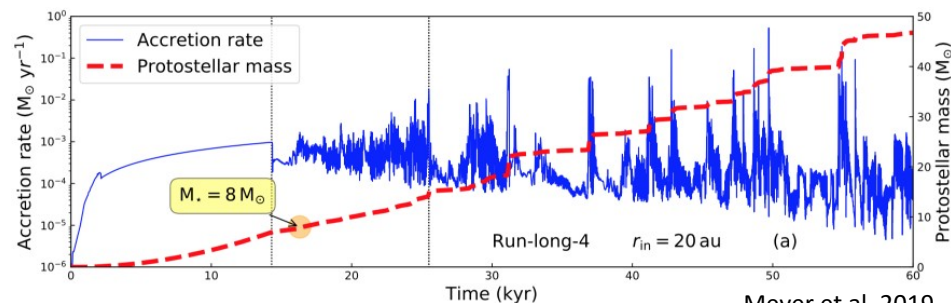
- 定常的な質量降着率 (10^{-5} – 10^{-3} $M_{\odot}/\text{yr}$ 程度) を想定した理論モデルが多い (Hosokawa&Omukai09など)
- 非定常な質量降着率を用いた理論モデルの登場 (Meyer+19など)
短期的には $\sim 1 M_{\odot}/\text{yr}$ 程度に達する



Hosokawa & Omukai 2009

観測例：非定常な質量降着率に伴う中心星光度上昇「accretion burst」

- 中小質量星形成時：
 - ✓ episodicな質量降着率の増加 (FUor / EXor など多数)
- 大質量星形成時
 - ✓ 2015年の発見以来3例のみ
 - ✓ 各天体1回のみの検出



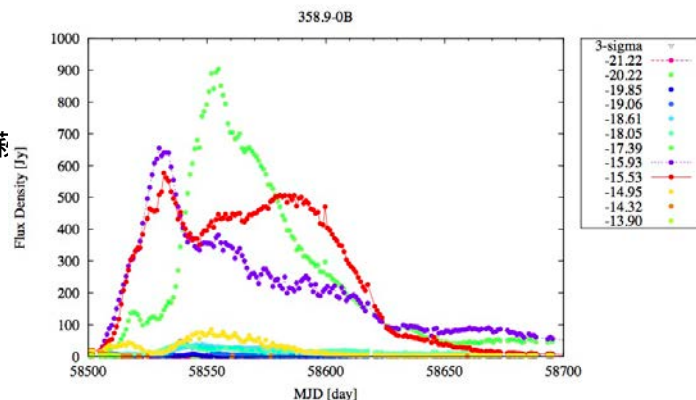
Meyer et al. 2019

大質量星形成時の質量降着の未解明な点

- 質量降着率は定常的か、非定常（時間変化する）か？
- 質量降着率増大期における降着率はどの程度増加するのか？
- 増大期の継続期間は？
- 繰り返し発生するのか？頻度は？
- どの天体も非定常なのか？

手法

- 6.7 GHz メタノールメーザーの単一鏡高頻度モニター観測@日立32m、高素
32m、...
- メーザー増光検出後、すみやかな フォローアップ観測 (opt/IR)
- 定常期の中心星光度をあらかじめ求めておく事が肝要 (opt/IR)



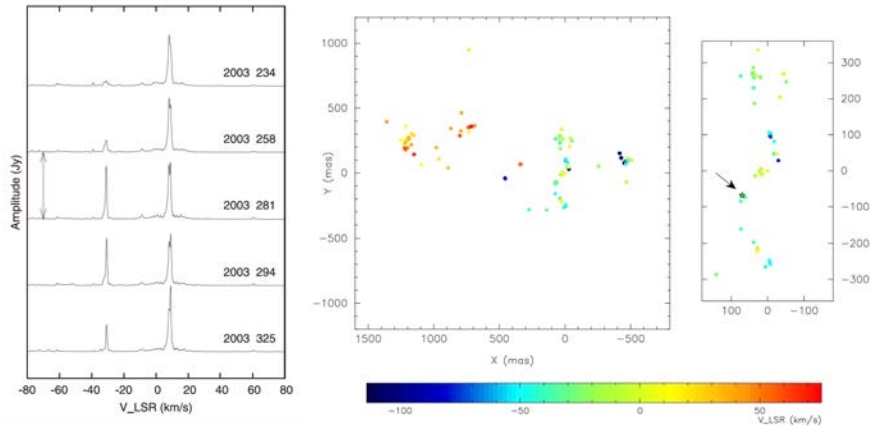
日立32mで検出された3例目の accretion burst

2.3-c. (PI: 廣田) 様々なバースト増光現象に対するToO体制(TBD)

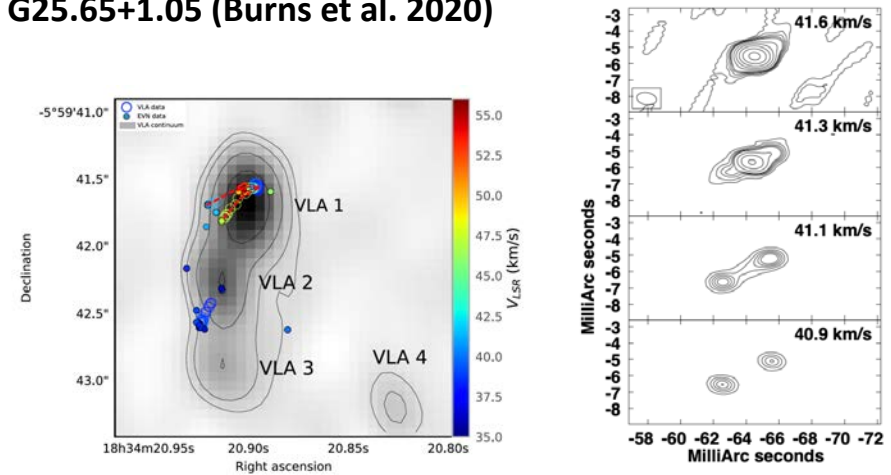
- 科学目標: 星形成領域のメーザーバーストの正体を解明
星形成領域での質量降着現象に伴う様々な時間スケールの現象にタイムドメインという観点で迫る
 - ✓ メタノールとアクリションバーストの関係は米倉さん参照
 - ✓ 周期変動(OH, SiOも含めて欲しい)は杉山さん参照
- 水メーザーバーストに絞ると
 - ✓ Orion KLならば1972, 1979–1985, 1998–1999, 2011–2012, **2024: 次期中期計画中?**
(Omodaka et al. 1999, Shimoikura et al. 2005, Hirota et al. 2011/2014)
 - ✓ W49N(Honma et al. 2003, Asanok et al. in prep)
 - ✓ G25.65+1.06(Burns et al. 2020)
 - ✓ NGC6334I (Brogan et al. 2018)
 - ✓ 上記のような数例あるが、系統的な研究はなく、解釈はいまだ確定しない
 - ✓ 起源はOverlapping のようなgeometry (Shimoikura et al. 2005 , Burns et al. 2020)?
メタノール同様の降着現象起源? CWBやリコネクション(Fujisawa et al. 2014)?
 - ✓ 上記であれば、T-Tauri型星のように非熱的連続波も観測可能?
 - ✓ 円盤回転、質量降着・放出、磁気圏などと星形成の関係についての知見
- 必要な要素
 - ✓ 定常モニター(M2Oや大学連携との共同研究など)とToOの即時体制の構築が第一
 - ✓ もしあれば広帯域による位置天文+連続波観測システム

これまでの例

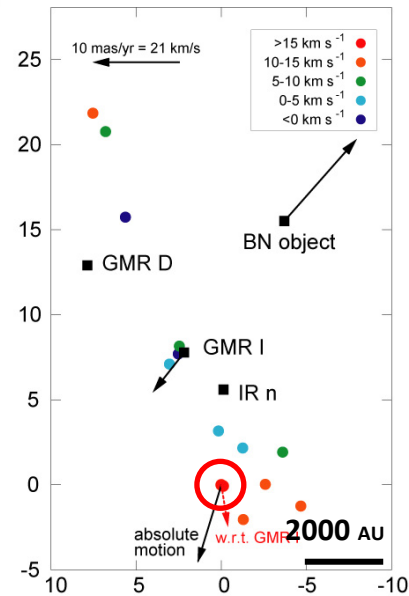
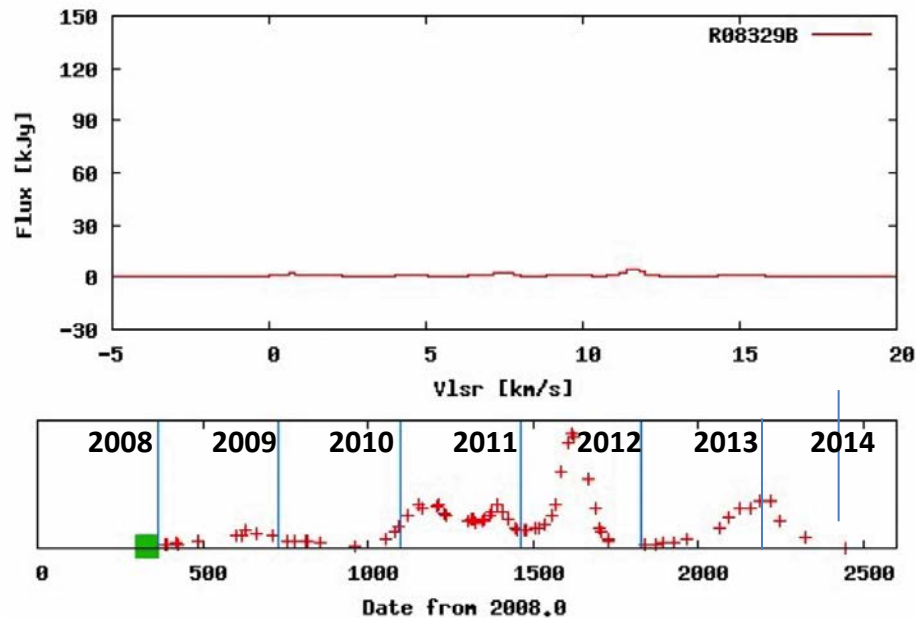
W49N(Honma et al. 2004)



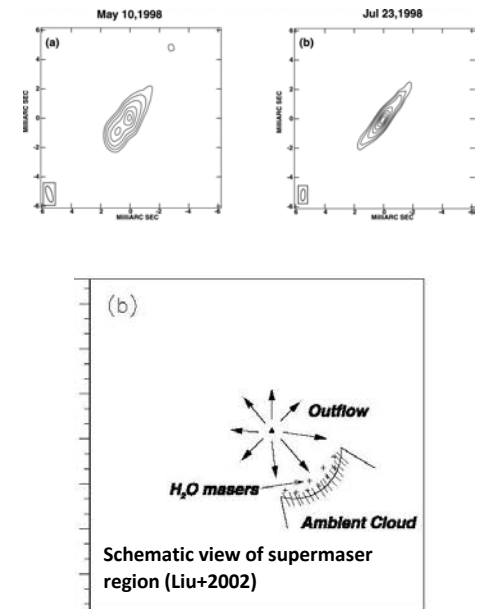
G25.65+1.05 (Burns et al. 2020)



Orion KL (Hirota et al. 2007, 2011, 2014)



Shimoikura et al. (2005)



2. 新規性：サイエンスインパクト，幅広く網羅

～予想される大質量星形成の流れ～

進化段階	分子雲形成	高密度ガス (コア/クランプ)形成	星無しコア /クランプ	Collapse開始期	降着期前半	膨張期	降着期後半	降着末期
赤外線観測	赤外線暗黒期 (FIR dark: no point source)				MIR dark ?	NIR dark ?	NIR dark → bright	NIR bright
原始星				誕生	< 10 Msun	~ 10 Msun	up to 20-30 Msun ?	ZAMS
タイムスケール (yr)	> 10 ⁷	10 ⁶ - 10 ⁷	< 10 ⁶	10 ⁴ - 10 ⁵ ?	~ 10 ⁴ ?	~ 10 ⁴ ?	< 10 ⁵	10 ⁵ - 10 ⁶
キー物理など		動的圧縮	乱流/磁場	ビリアル平衡 → Monolithic Collapse 非平衡 → Global Collapse 円盤形成	重力不安定 円盤の分裂 Binary /multiple formation	原始星脈動?	質量上限の決定 H燃焼開始	HCHII - UCHII 円盤散逸

逆算推定

案1. (PI:元木)

~10% in 100-1,000 天体

案2. (PI:米倉)

~50天体

案3-a. (PI:米/杉/元)

~20

~20

案3-b. (PI:米/杉/廣)

~10 & ToO次第でmore

案3-c. (PI: 廣田)

ToOでの即時フォローアップ観測メイン

3. 日本の(VLBIの) 独自性・優位性

□ 自前の望遠鏡による、自前のカタログを有している！

- 若い進化段階IRDC の電波ジェット天体: 元木 with YI, Ibaraki-I
- 降着バースト期: 米倉/杉山/廣田 with 日立/高萩/M2O in the world
- 膨張原始星、ZAMS直前: 米倉/杉山/元木 with 日立/高萩
- 核融合直後のECHII天体: 元木 with JVN短基線/J-VLA
- HII領域: 米倉/杉山/元木 with 日立/高萩

□ 十分なフォローアップ体制

- M2Oなどを通じた世界的なネットワークへの貢献 & リターン双方

□ 大質量星分野における幅広い理論家の存在

4. 必要な性能: マトリックス表 for our array

	案 1	案 2	案 3-a	案 3-b	案 3-c
周波数					
基線感度	○		○	○	○
イメージ感度	○	○	○		
空間分解能	○	○	○	○	○
時間分解能		○	○	○	○
周波数分解能					
広視野					
多視野	△	△	△	△	△

4. 必要な性能： 成功 (達成) 基準と要求性能

□ 単一鏡/干渉計の安定運用

- 装置保守/更新/データ記録媒体の在庫/やりくり
- 解析・較正手法の洗練/ルーチン化/パイプライン化
- リモート観測システム？

□ 新規の短基線整備

- 熱放射 10^4 K が受かる感度を目標 ($\sim 0.3\text{-}0.4$ mJy@100 km)
- コストに見合うかは要検討
- 長期滞在可能な人員 (専門の研究者)

□ JVN局の EAVN共同利用への参加時間の増加

□ ToO体制の強化：光結合・リアルタイム相関処理の導入

- 広帯域ではなく、即応性という観点

5. 推進計画

第4期中期計画

	2021		2022		2023		2024		2025		2026		2027															
	H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2														
案 1	IRDC 電波ジェットサーベイ						ECHII / 電波ジェットイメージング with VLA/ALMA and/or VLBI (熱的放射へ)																					
案 2	準備期間																											
案 3-a															40-50天体に対する長期・高頻度な CH ₃ OH VLBIモニター													
案 3-b															20-30天体に対する周期の半分程度頻度でのVLBIマルチエポック & 周期天体に対する年周視差計測													
案 3-c															VLBIによるToO体制強化 単一鏡による継続的なモニターと、M2Oを通じた情報共有、およびそれに即応出来るToO体制を活かした迅速なVLBIモニターによる空間分布の詳細な時間変動の獲得.													

5.1 超短期：2021年4月 – 2022年3月

天体リスト作成 via 探査をコンプリート or 継続

1. 若いIRDCジェット天体

✓ PI:元木; 装置:YI, Ibaraki-I

2. 核融合直後のECHII天体

✓ PI:元木; 装置:JVN短・中基線, J-VLA

3. 周期変動天体 (特に脈動候補)

✓ PI:米倉, 杉山; 装置:日立32m

4. 降着バースト天体

✓ PI:米倉, 杉山; 装置:日立32m、高萩32m

5. ToOへの迅速な対応 と 体制強化

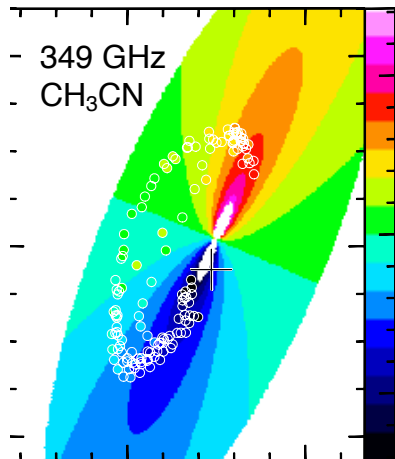
✓ PI:廣田; 装置:VERA/JVN/KaVA/EAVN, etc. via M2O

*** 以降は予備です**

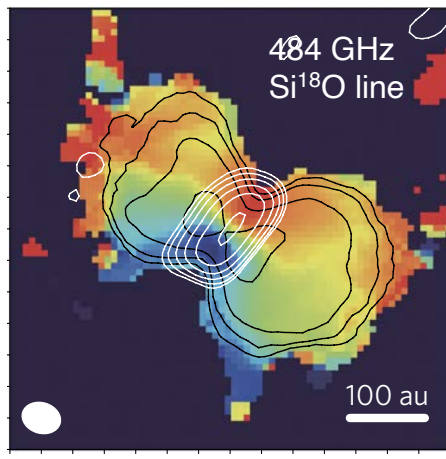
2022年4月以降の計画

- タイトル ？？
- 科学目標（明らかにしたい物理的事象と得られる知見）
 - ・ 星近傍における降着流の3次元構造
 - ・ 円盤分裂/連星系/アウトフローの進化と多様性
- 観測計画
 - ・ 円盤/連星系の直接撮像 with ALMA/ngVLA/Full-SKA
 - ・ メーザーをプローブとした周期/降着バースト天体モニター
 - ✓ 大学連携、特にVLBIでのアプローチはココ？ 単一鏡と並行して
- ターゲット天体：**モロに大学VLBI連携としてのアプローチ**
 - ・ 各進化段階を網羅した独自天体リスト (周期天体含む)
 - ・ 総数としては100-1,000天体規模だが、観測対象はその内の~10%?
 - * 降着バーストの観測対象は、茨城単一鏡で高頻度にモニターしている全メタノールメーザー源 ~450天体
- 必要な開発や整備
 - ・ 安定運用可能な人員とデータ記録媒体
 - ・ 熱放射 10^4K 感度を達成する短基線整備 and/or 広帯域化
- 研究協力者とその所属
 - ・ JVN星形成研究メンバー, High-mass SFR有志：観測家＋理論家
 - ・ M2Oチーム

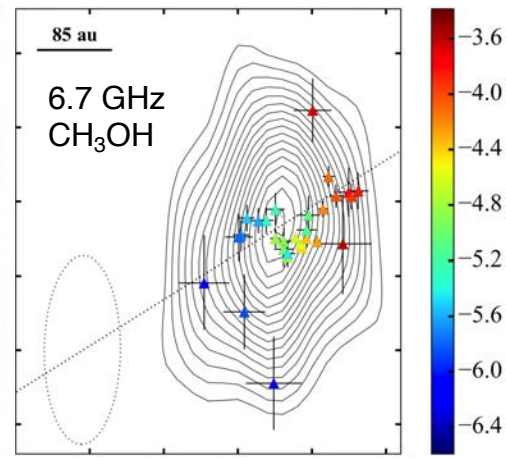
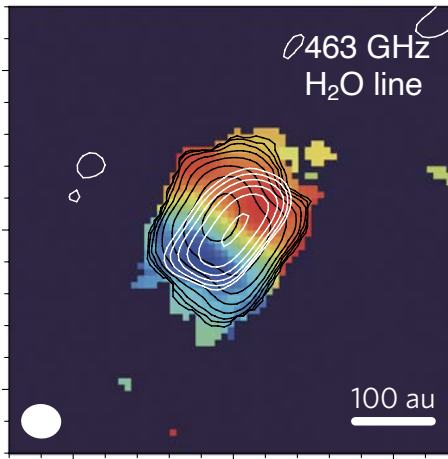
1. 研究の意義: 回転・降着円盤の検出



Disk in G 35.20-0.74N
(Sanchez-Monge+ 13)



Disk-driven rotating bipolar outflow in Orion-KL Source I
(Hirota+ 17)



Accretion from 100 au scale disk
in G 353.273+0.641 (Motogi+ 17)

小質量星形成の **スケールアップバージョン** と言って過言では無い

- B/O型(原始)星周囲の円盤検出 (e.g., Sanchez-Monge+ 13; Cesaroni+ 17)
- 円盤-アウトフローシステム (e.g., Hirota+17)
- 円盤からの降着流 (e.g., Beltran+ 06; Hosokawa+ 10; Sugiyama+ 14; Motogi+ 17)
- 砂時計型の磁場構造 (e.g., Girart+ 09; Tang+ 09)
- 最近の降着バースト現象の検出 (e.g., Fujisawa+ 15; Caratti o Garatti+ 17; Sugiyama+19; Burns+ 20)