

# 星WG中間報告 (VLBI将来計画WGのサブWG活動)

中川亜紀治 (鹿児島大学)

## 「星が担う物質の集積と離散の現場にVLBIで迫る」

### 【1】構成メンバー

7名のメンバーは内部でAGBとSFRの二班に分かれるが、議論は全員参加で実施。

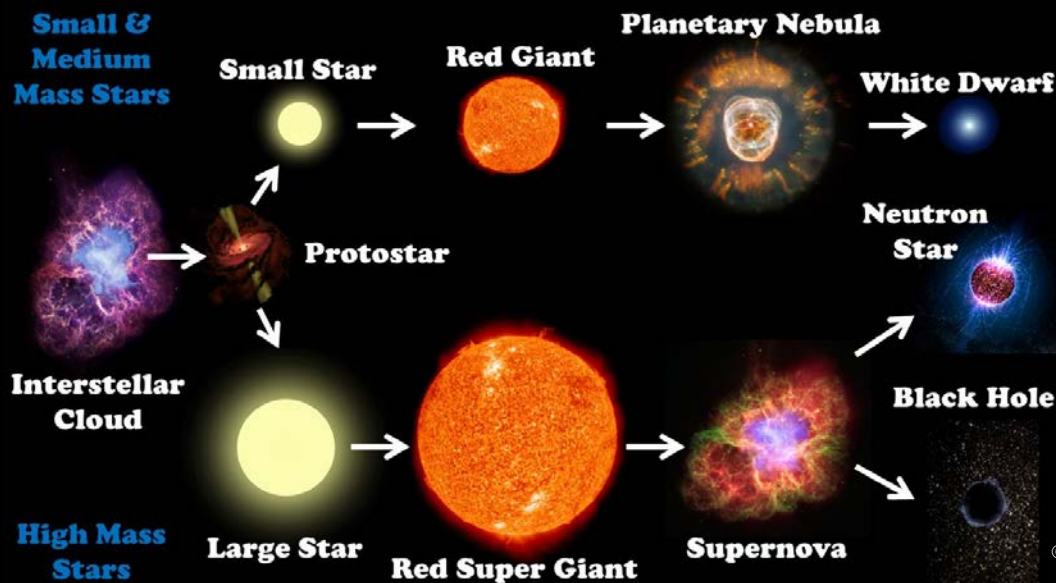
- ・ **AGB班** 中川亜紀治、今井裕 (鹿児島大学)、須藤広志 (岐阜大学)、
- ・ **SFR班** 杉山孝一郎 (NARIT, NAOJ)、廣田朋也 (NAOJ)、米倉覚則 (茨城大学)、元木業人 (山口大学)

### 【2】活動履歴

4月-9月、親WGにあたる「VLBI将来計画WG」日程に合わせて「星WG」を実施

### 【3】議論の方針

構成メンバーの関心に基づき既存観測装置などの制限に縛られず今後の展開と課題を議論。



# 星WG中間報告 (VLBI将来計画WGのサブWG活動)

中川亜紀治 (鹿児島大学)

「星が担う物質の集積と離散の現場にVLBIで迫る」

## 【1】構成メンバー

7名のメンバーは内部でAGBとSFRの二班に分かれるが、議論は全員参加で実施。

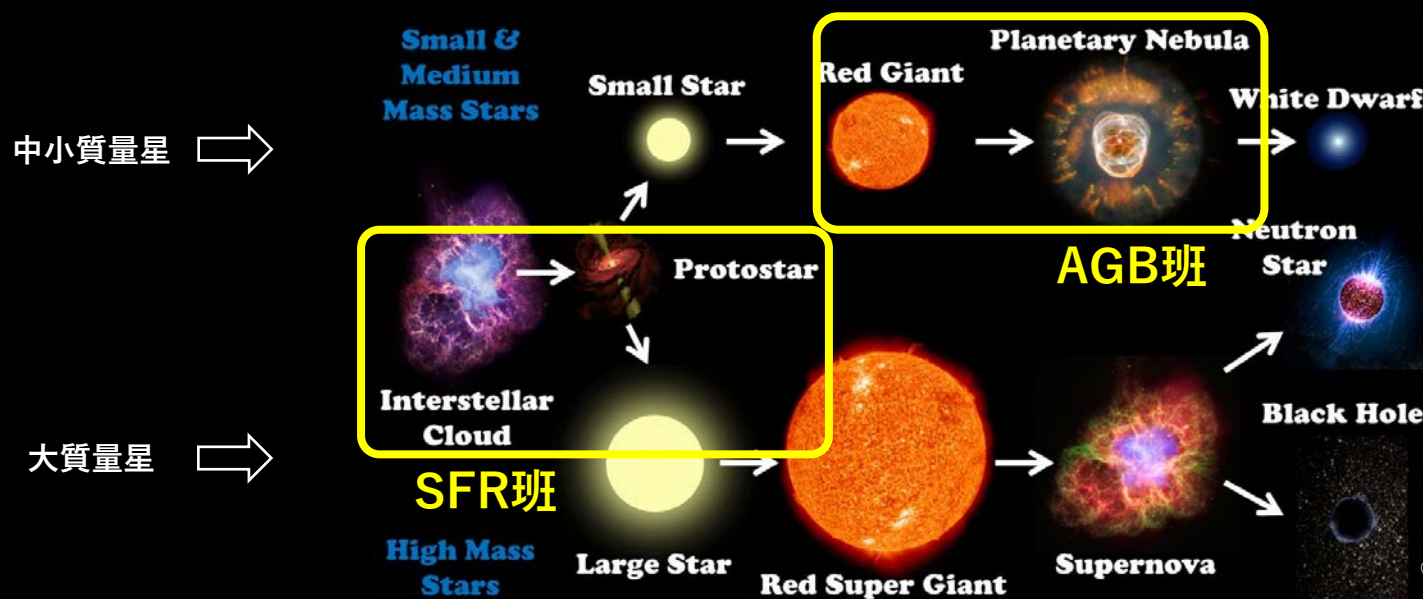
- ・ **AGB班** 中川亜紀治、今井裕 (鹿児島大学)、須藤広志 (岐阜大学)、
- ・ **SFR班** 杉山孝一郎 (NARIT, NAOJ)、廣田朋也 (NAOJ)、米倉覚則 (茨城大学)、元木業人 (山口大学)

## 【2】活動履歴

4月-9月、親WGにあたる「VLBI将来計画WG」日程に合わせて「星WG」を実施

## 【3】議論の方針

構成メンバーの関心に基づき既存観測装置などの制限に縛られず今後の展開と課題を議論。



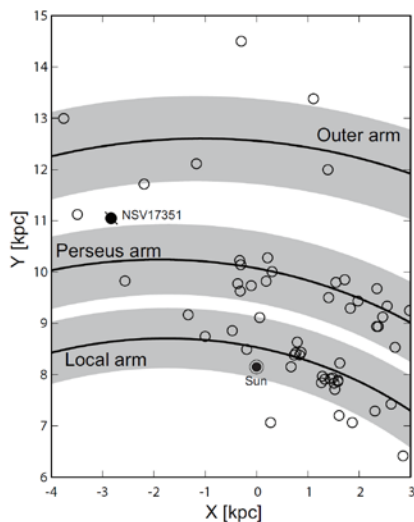
# AGB星研究の意義

脈動するAGB星は星間物質の主な供給源である。宇宙論的構造形成の数値シミュレーションではSNやAGB星による熱力学フィードバックや重元素供給がある程度モデル化されたうえで理解されてきている。それを踏まえると現在は更なる精密化の時期にあると考える。質量放出率の時間的変化と星の脈動変光現象とは密接に関係する。変光はやがて収まり非変光の時期を迎え、Post-AGBへ移る。質量が3-4M<sub>sun</sub>の重いAGB星はそうした時期の質量放出の詳細な観測に適する天体である。星間空間への物質供給が、銀河の場所(構造部位)にどう依存するかなど、今後の課題である。

## 2つの柱

### 1, 星間物質、特にダスト供給源としてのAGB星とその進化

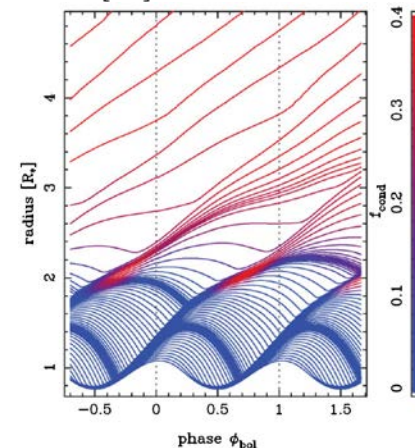
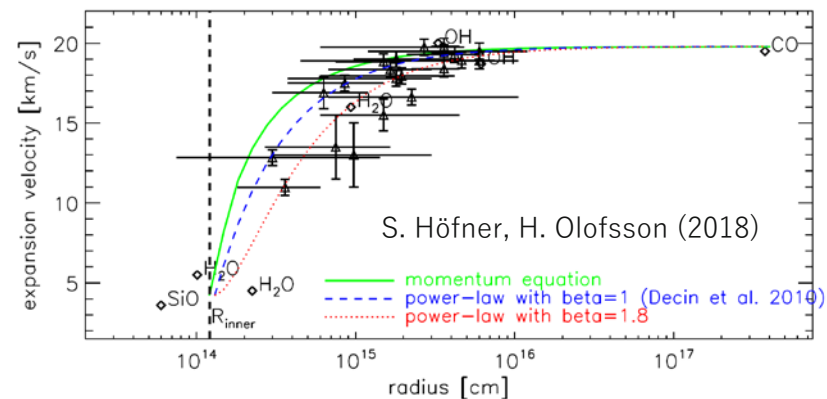
- ・ 脈動と星間物質(ガス/ダスト) 拡散の関連や加速機構の理解  
放射圧、磁気駆動
- ・ AGBからPost-AGB, PPNへ至る進化の理解  
Mira → OH/IR → 非変光OH/IR → PPN → PN  
連星系の影響、星周構造の空間的異方性との関係



### 2, AGB星を用いた天の川銀河の研究

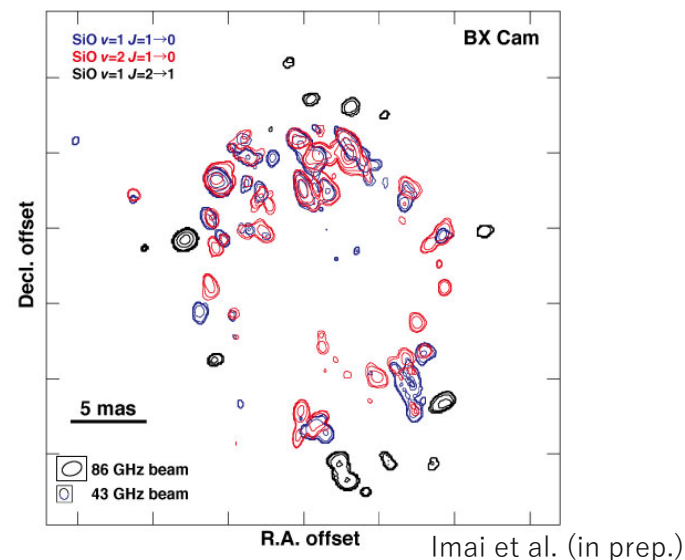
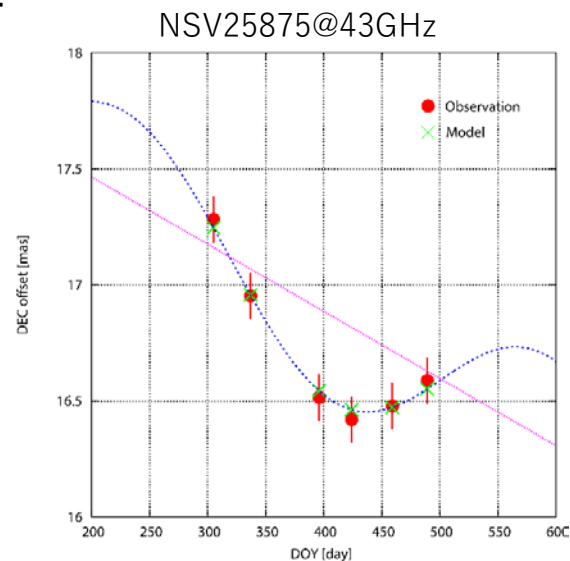
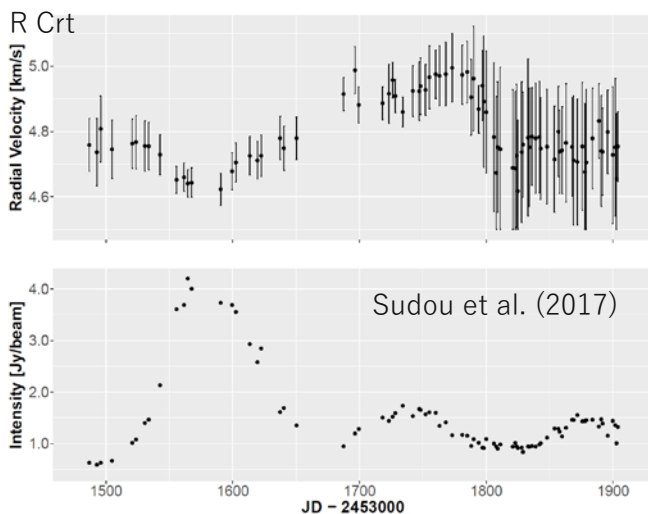
- ・ 渦状腕や銀河中心核バルジ/ディスクとの相関
- ・ 天の川銀河中心部の構造形成史と星形成史

Morita et al. (in prep.)



# 独自性, 優位性, 新規性

- 習熟した22GHz, 43GHz 位置天文の手法を活用
  - QSO準拠位相補償VLBIによる年周視差の計測
    - <近年の広帯域化改造による43GHz 年周視差計測の性能向上>
  - Self Calibrationによる星周物質の分布と運動の計測
  - 多周波間位相補償によるSiOメーザー重ね合わせ
- 様々な時間スケールの観測に挑む
  - VLBI観測: min, hr, day, week, month, yrを織り交ぜた観測
  - メーザー励起、星間シンチレーション、加速などに迫る
  - 単一鏡観測: 過去データとの結合で数十年の情報を活用
  - 準自前アレイによる機動性による突発現象への対応

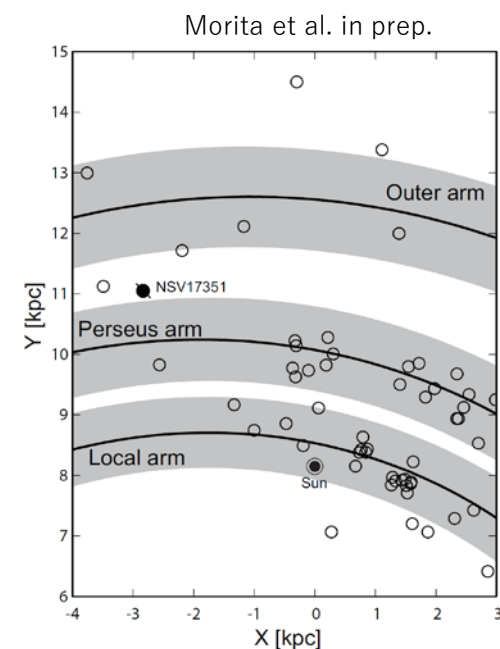


$v=1$   $J=1 \rightarrow 0$  peak flux = 53.7 Jy channel/beam Levs =  $0.54^\circ(1, 2.6, 6.6, 16.8, 43, 69)$   
 $v=2$   $J=1 \rightarrow 0$  peak flux = 87.4 Jy channel/beam Levs =  $0.88^\circ(1, 2.6, 6.6, 16.8, 43, 69)$   
 $v=1$   $J=2 \rightarrow 1$  peak flux = 56.4 Jy channel/beam Levs =  $0.60^\circ(1, 2.6, 6.6, 16.8, 43, 69)$

# 独自性, 優位性, 新規性

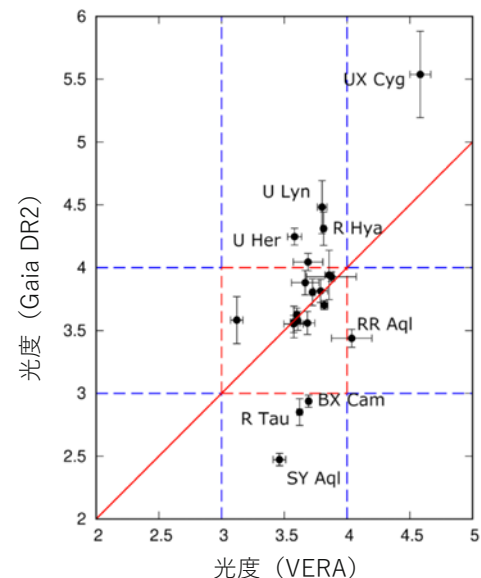
## AGB星を用いた天の川銀河の研究

- VLBIによるAGB星の計測量 ( $x, y, z, V_x, V_y, V_z$ ) を利用し、銀河系の進化を理解する。とくに渦状腕と中心核バルジおよび中心核ディスクを対象とした研究を立案する。
- 渦状腕との相関
  - 重いAGB星(Extreme-OH/IR星)を利用
  - 明るく時間的に高安定のメーザー(H<sub>2</sub>O, SiO)が付随
  - 年齢に1-2億年の制限がつく → 渦状腕/spurとの関係
  - 空間分布やI-V図による他の若い星との比較
- 中心核バルジと中心核ディスク(100-200pcスケール)
  - バルジのOH/IR星は大質量と考えられる  
(変光周期が長いほど高いSiOメーザーの検出率が知られる)
  - メーザー源を用いて運動を把握 → 銀河回転に順行逆行
  - 年齢制限と位置天文情報でバルジ領域の構造形成や星形成史の解明に寄与
  - 固有運動情報だけでも活用が可能
  - 感度向上に向けた環境整備が必要 (野辺山45mの活用)

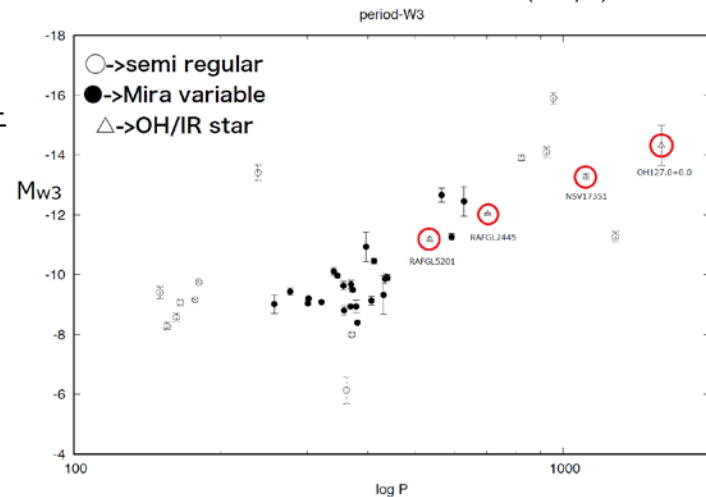


# 独自性, 優位性, 新規性

- 電波VLBIの優位性を再確認
  - auスケールの星周構造や運動の把握にはVLBIが不可欠
  - AGB星は厚いダストをまとい、可視光観測が困難
  - Gaia DR2 にも光学重心の揺らぎによる影響が残る  
< Gaiaとの棲み分けまたは協調の視点 >
- VLBIによるAGB星位置天文カタログとしては最大の規模をVERAで達成
  - 新たな周期光度関係の存在が示唆される
  - 重いAGB星(Extreme-OH/IR星)でもすでに準備研究(位置天文VLBI)が進む
- 脈動変光や表面化学組成は近/中間赤外領域で観測
  - 非変光星OH/IR星の発見と進化上の位置づけ
  - Long secondary period の理論研究で日本は先行
- 次世代赤外線位置天文計画との連携  
< Small-JASMINEを見据えた研究、理論グループとの協力 >
- AGB, Post-AGB星の磁場観測
  - 直線偏波, ゼーマン効果の検出に挑む



周期光度関係 @ WISE W3-band  
(11.6  $\mu\text{m}$ )



# 準備, 課題, 計画

## 準備, 課題

- 天体の選定：Mira, OH/IR, SR, PPNなど種別を代表する星を厳選してVLBI観測 → ESTEMAでBX Cam, NML Cyg, o Cet, S CrBなど数天体
- OH/IR星の新たな周期光度関係確立のため周期方向に散らして天体を選定 → VERAプロジェクトで進行中の星を含め数十の候補天体
- 銀河中心バルジAGBをいかにして探すか：AGB星メーザーの本質的強度不足や8kpcの距離による感度不足の克服
- 潜在的観測天体数は多く (10,000 H<sub>2</sub>O, SiO masers in the whole Galaxy)、単一鏡の対象対象AGB星はすでに数100–1000天体のリストあり
- 周波数：1.6GHz(OH), 22GHz(H<sub>2</sub>O), 43GHz(SiO), 86GHz(SiO), 88.6GHz(HCN)
- 観測装置、アレイ：VERA(2beam位相補償装置として), KAVA, EAVN, 臼田1.6GHz
- 開発項目：43GHz位置天文はVERA4局2ビーム位相補償以外に困難。代替手法の確立が必要。K/Q (22G/43GHz) 同時観測や86GHz受信機の導入。

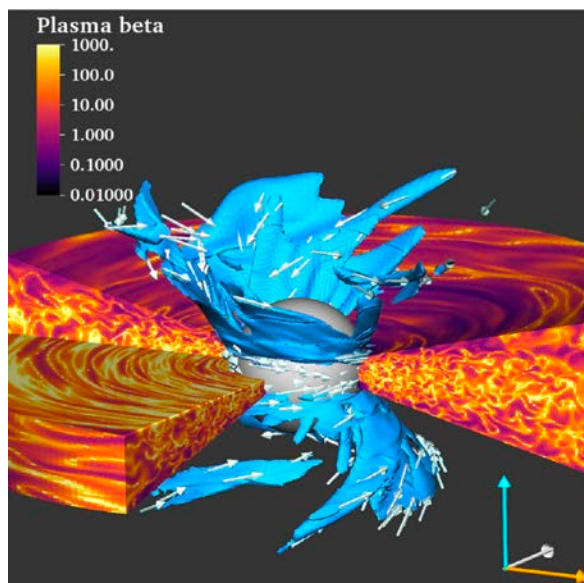
## 計画

- 2020年度の状況
  - VERAのAGB星位置天文プロジェクト進行中
  - ESTEMAによる代表的AGB星のVLBI観測
  - HINOTORI：野辺山45m鏡3バンド同時観測システムの構築
- 2022年3月までの研究
  - Extreme-OH/IR星の位置天文初期成果：星周メーザー分布、H<sub>2</sub>Oメーザーの終端速度近くまでの加速、OHメーザーとの類似性
  - 化学組成モデルとメーザー現象論の関連付け
  - ESTEMA第1期 (BX Cam, NML Cygモニター) 終了
  - 3バンド同時観測手法の確立、HCNメーザーのVLBI検出
- 2022年4月以降 (第4期中期計画~2027年度)
  - 偏波観測による磁場の検出？課題、開発項目は？
  - Post-VERAアレイによる43GHz位置天文手法の確立 → 銀河系中心バルジ/ディスクへ
  - 86GHz受信機の整備、HCNメーザーの検出
  - ESTEMA 第2期 (o Cet ほか, 3バンド同時観測)

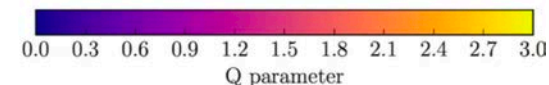
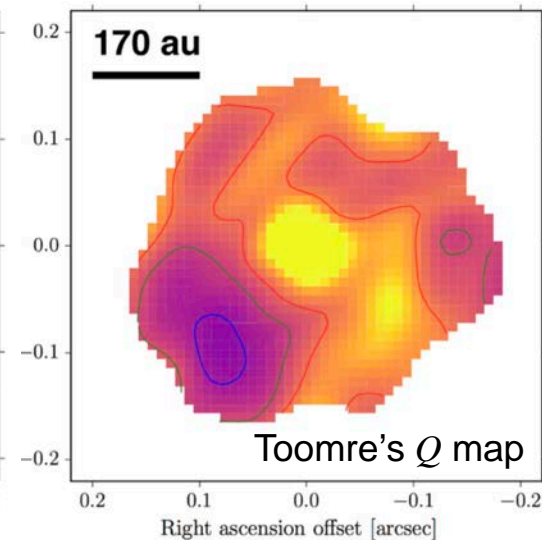
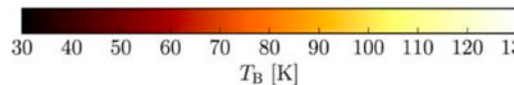
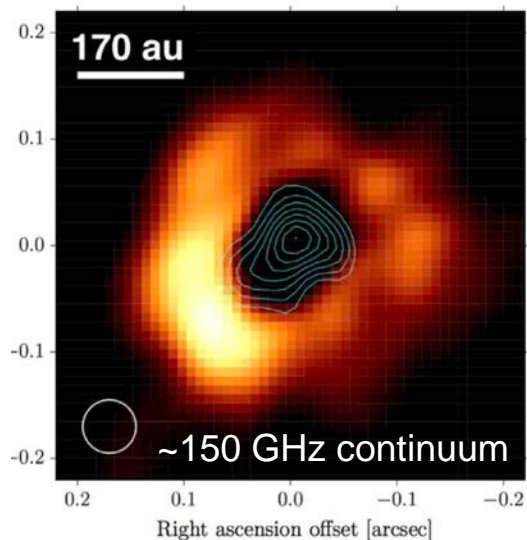
# 1. SFR研究の意義

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)



## 2.1 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

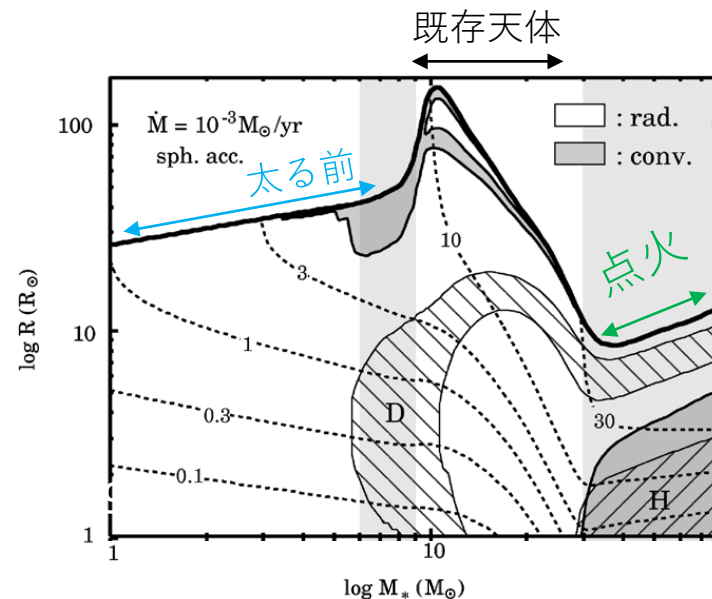
- 次世代干渉計(ngVLA/SKA)

による原始星大気の詳細撮像へ挑む

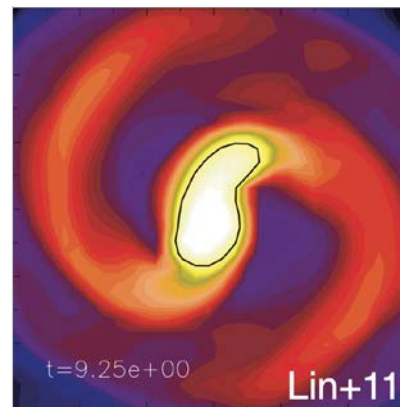
- 膨らんだ原始星大気 (0.2 - 2 mas @ 5 kpc)

→ 8 - 40 GHzで $1\sigma$ : 500 - 1000 K  
であれば解像可能

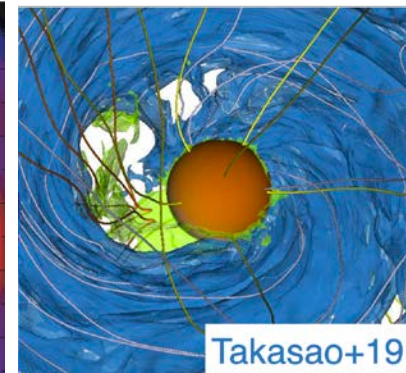
- 円盤から星表面への接続も見える?



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



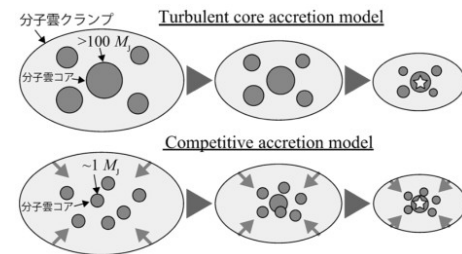
星表面への3D降着

# 2.2 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 は存在するのかわ？



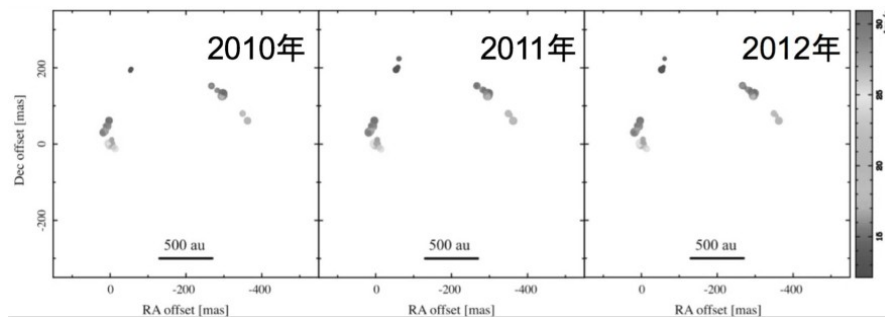
二つの大質量星形成モデルの模式図.

酒井剛2017

これまでの観測的

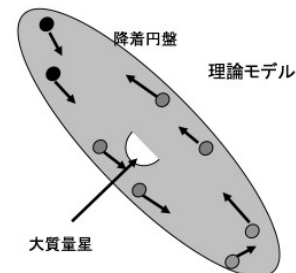
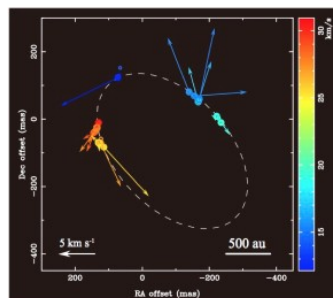
- VLBI イメージング観測（1 エポック）
  - 分布を元に分類：楕円、円弧、直線、ペア、複雑
- VLBI 動画取得（複数エポック観測）による固有運動導出が必要
  - 現在までに固有運動が測定された天体数 **xx**
  - 内訳：楕円(x天体)、円弧(x)、直線(x)、ペア(x)、複雑(x)
- 初期のEAVN (JVN+上海25m) (Fujisawa+14)
  - 年1回の頻度で、3-4回の観測（3-4コマの動画取得）
  - 頻度が少ない（メーザー雲[feature]内の同じ場所が光っている保証が無い => 位置の不定性）
  - 継続期間が短い（有意な運動を捕えづらい）

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回ではなく年4回など)
- より長期間な観測 (5-10年規模で継続)



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)

他波長装置：ALMA などによる dust 観測？

## 2.3 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

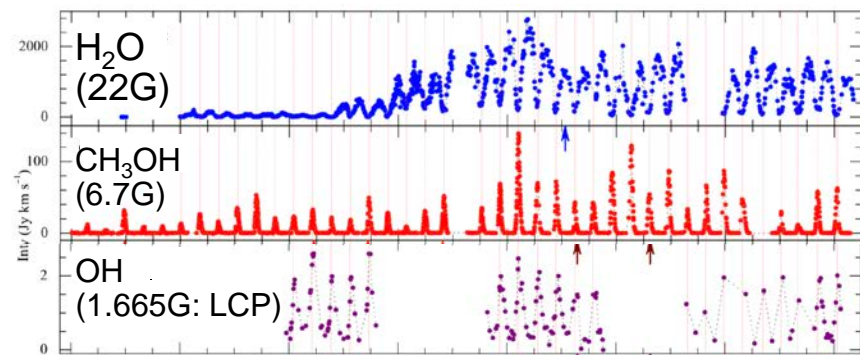
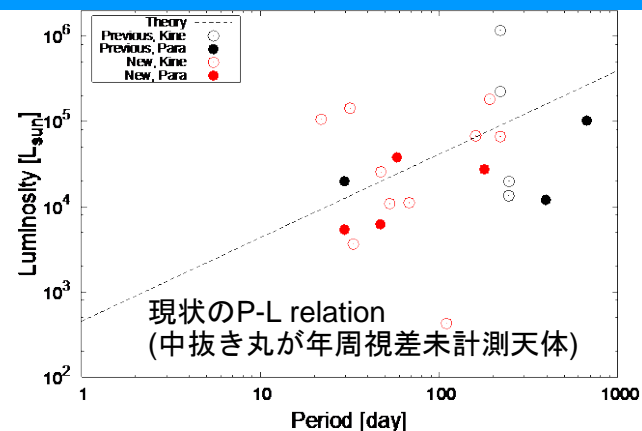
- 脈動変光、CWB、Circumbinary、etc
- 脈動モデルによる P-L relation に着目
- 原始星表面 (< 1 au) の物理パラへ迫る

### • その拡張

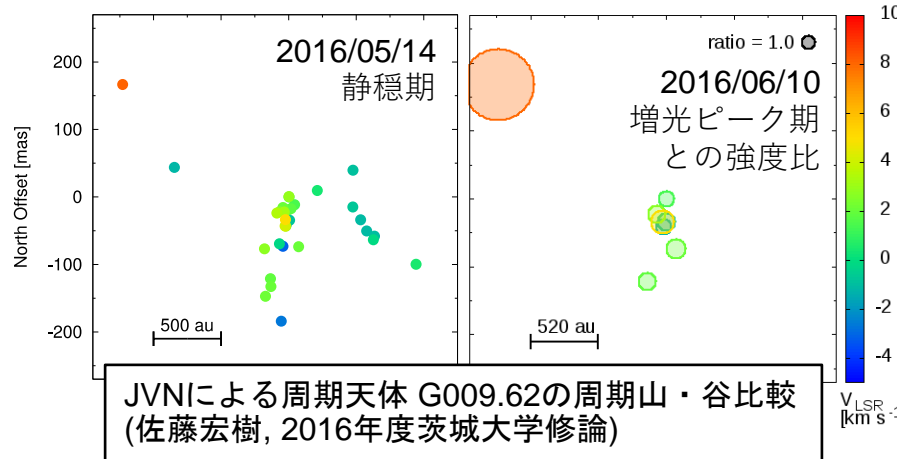
- 年周視差計測による P-L 縦軸: 光度の高精度な決定
- 周期の山・谷における空間分布比較を通じた周期変動成分の精密な同定  
(e.g., 佐藤宏樹, 2016年度茨城大学修論)
- 異なる分子、励起機構を有する多種メーザー OH/H<sub>2</sub>CO/CH<sub>3</sub>OH/H<sub>2</sub>O/SiO間の同期性調査  
(e.g., Szymczak+ 16; Olech+ 20) を通じた、周期モデルの切り分け

### • 対象: CH<sub>3</sub>OH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)



### 3 独自性, 優位性, 必要な性能

- 自前の望遠鏡とカタログを有する！
  - 若い進化段階IRDC 電波ジェット天体:  
Y1, Ibaraki-I
  - 降着バースト期：日立/高萩/M20
  - 膨張原始星、ZAMS直前：日立/高萩
  - 核融合直後のECHII天体：JVN短基線/J-VLA
  - HII領域：日立/高萩
- 十分なフォローアップ体制
  - M20などを通じた世界的ネットワークへの  
貢献とリターン
- 大質量星分野における幅広い理論家の存在
- 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  
( $\sim 0.3$ - $0.4$  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