

2020/9/24-25  
水沢UM2020  
(9/25)

# 次世代干渉計による 高分解能大質量原始星観測

山口大学  
元木業人

+

田中圭(NAOJ) and 共同研究者の皆様

# もくじ

- ALMAによる大質量原始星観測の近況
- 今後観測したいものは何か？
  - 円盤から原始星表面へ
  - 大質量星の着火はいつか？
- ngVLA/SKAで手が届くか？

# 大質量星形成

## 研究意義

- 星形成とはほぼ星団形成  
(含む低質量星/惑星)
- 元素合成 (核燃焼、SN、NS-NS merger)
- Energy Feedback

## 高分解能観測の役割

- 降着の質がIMF決定のラストピース  
円盤分裂と連星形成...IMFトップ側を直接支配  
アウトフロー...コア以下の星形成効率決定  
降着依存の原始星進化...フィードバックの進化

# ALMAによる大質量原始星観測の近況

# ALMA長基線による円盤観測例

- 高分解能観測はまだ数える程度  
→構造に対する解像度は日本人PIデータが高い

Name	Distance	Beam (mas)	Beam (au)	Radius (au)	Radius /Beam	ref
Source I	0.44	100	50	80	1.6	Hirota et al. 2017
G351.77-0.54	1.0/2.2	20	20/44	-	-	Beuther et al.2018
G353.273+0.641	1.7	50/23	85/40	250	6.3	Motogi et al. 2019
IRAS07299-1651	1.7	30	51	12	0.2	Zhang et al. 2019
HH80-81	1.7	40	68	300	4.4	Girart et al. 2018
G17.64+0.16	2.2	25	55	120	2.2	Maud et al. 2019
IRAS16547-4247	2.9	50	150	870	5.8	Zapata et al. 2019 Tanaka et al. 2020
AFGL4176 mm1	4.2	30	130	1000	7.7	Johnston et al. 2019 (Submitted to A&A)
G23.01-0.41	4.6	200	920	2500	2.7	Sanna et al. 2019

First unstable disk: G353.273+0.641

秘密

# どこまで見えているか？

- 10 – 30  $M_{\text{sun}}$ 星で降着円盤を撮像：～10天体
- 降着円盤(半径50 – 300 au)の空間分解  
substructure (渦状腕、分裂、連星)の検出：数天体  
→日本のグループが割とリードできている
- 今後は長基線でのイメージングサーベイが必要  
→個性/環境と進化の切り分け

今後観測したいものは何か？



# 1. 円盤から原始星表面へ

# 円盤/原始連星

- 円盤内縁の空間分解
  - cm波なら**ほどほどの**  $\tau$  で観測可能 (ダストの光学的厚み低下)
    - 円盤自体が遮蔽体にならずに奥まで見える
  - 現ALMA LBの分解能で十分な天体数をカバーしたい (up to 5 kpc)
    - 円盤/原始連星の統計データベース
    - 空間分解撮像 + 連続波スペクトル (ALMA + ngVLA/SKA2)

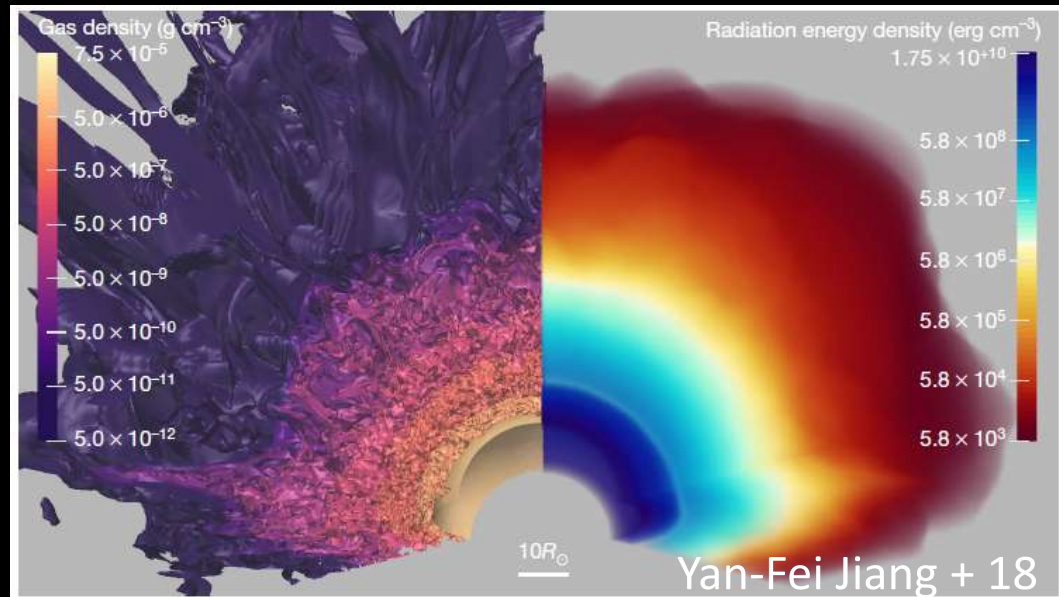
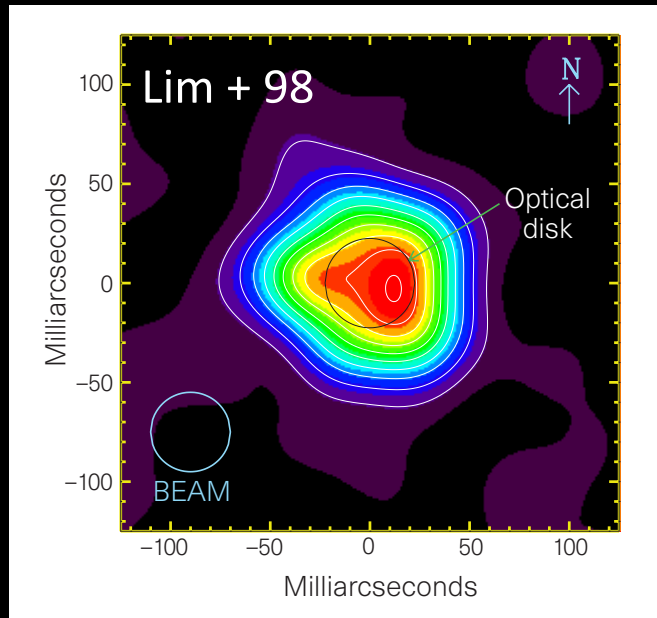
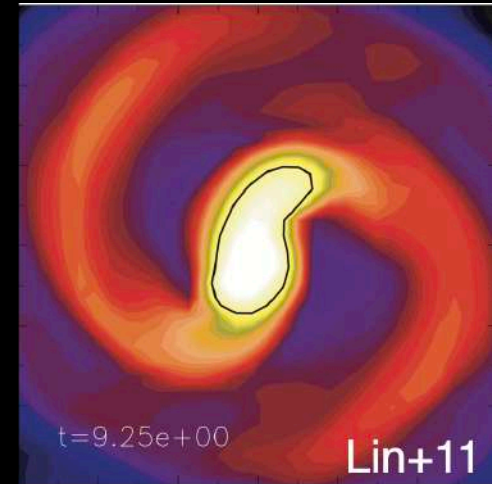
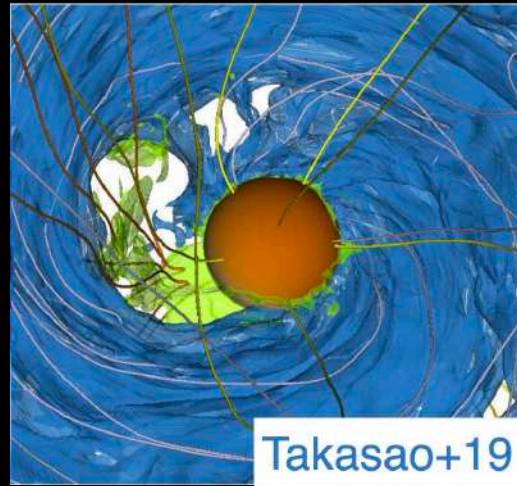
- 原始連星の軌道運動

$$T_{\text{orbit}} \simeq 7 \left( \frac{m}{20M_{\odot}} \right)^{1/2} \left( \frac{a}{10\text{au}} \right)^{3/2} \text{ yr}$$

- 1周回らなくても固有運動検出自体は可能
- 軌道のムービーが撮れるはず

# 円盤内縁～原始星の直接撮像？

- 表面への3D降着
- 回転による変形
- 超巨星に類似の膨張大気？



# 原始星大気の直接撮像

- 高い降着率で膨張した原始星大気  
    ~ 100 - 1000  $R_{\text{sun}}$   
    (Hosokawa & Omukai 09, Haemmerlé + 16)  
    → 最大視直径で2 - 10 mas @ 1 - 5 kpc  
    → サイズと距離によっては解像に手が届く
- 10 - 40 GHzで数千Kを検出できればよろしい
  - 原始星の電波光球の直接撮像
  - 円盤内縁から表面への物理的接続
  - 進化経路に多様性があるか？
- 周波数的には1 cm前後が良さそう (10 - 30 GHz)
  - ダストも近傍/前景のHII領域も邪魔にならない？

## 2. 大質量星の着火はいつか？

# 理論的に予想される星進化経路

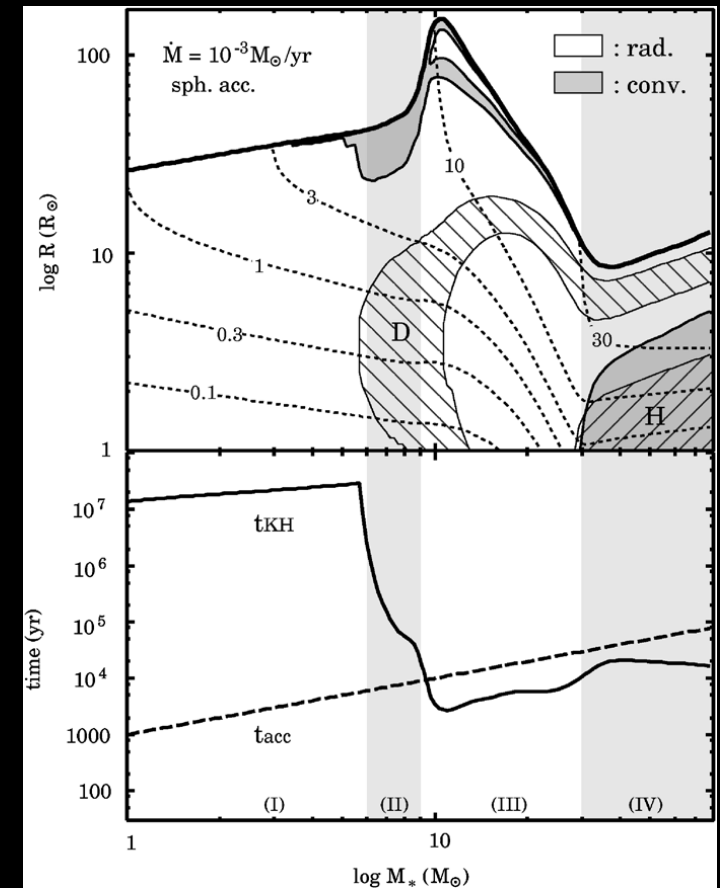
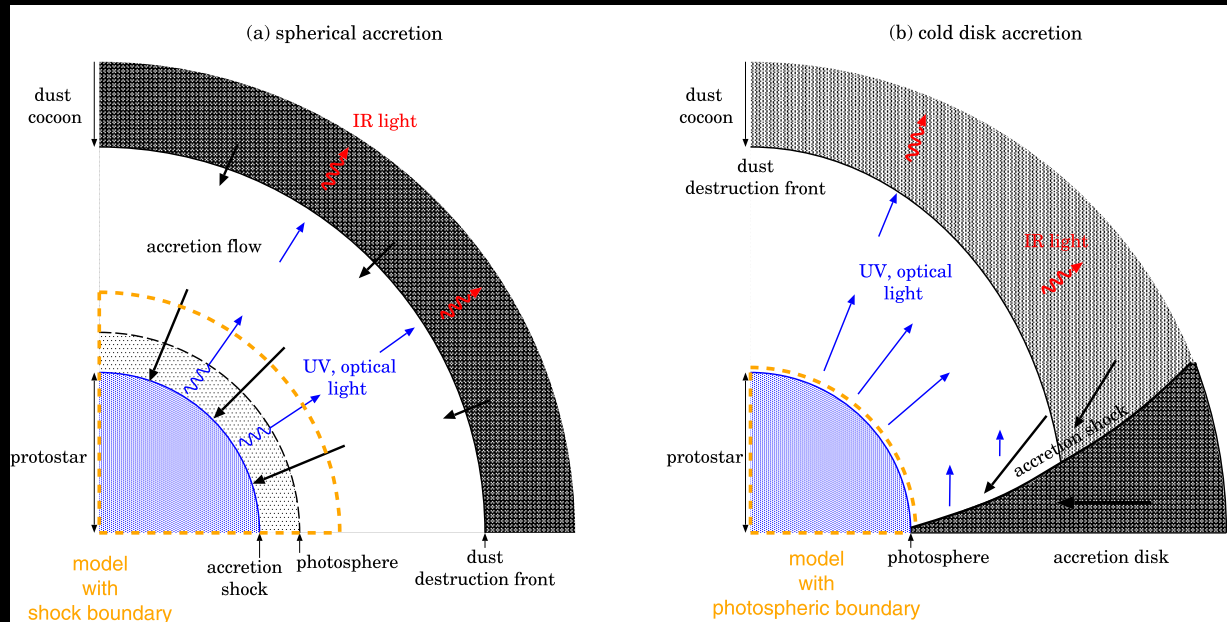
- 高降着率では**膨張** (Hosokawa+ 2009; 2010, Haemmerlé + 2016)

中心温度が上がらないため核燃焼開始時の質量が大きくなる

- 進化パスは加熱と冷却の仕方に依存

→円盤内縁からの降着の質と量

→着火質量は自明とは言えない



# ngVLA/SKAで進化経路に観測的制限を...

- 現状はモデルによって星の外半径がかなり可変
  - 降着による星の加熱と冷却のバランス
  - 降着率は手で与えている状況
  - 星の回転やwindは考慮したモデルまだ少ない
- 観測的制限が必要
  - 極小サイズのHII領域の付随と星質量の関係を調べれば着火質量から進化経路を制限可能
- 分解能次第では活動性/固有運動もみえる?
  - 3次元膨張/電離降着流
  - 紫外線量の変化による正味のサイズ変動
  - 固有運動がとれれば電波ジェットとの切り分けも容易

ngVLA/SKAで手が届くか？



# 予想される輝度温度感度(ngVLA)

- ALMAと同程度～VLBI分解能で熱放射が見える

連続波輝度温度感度 1hr (7 $\sigma$ )					
分解能 (")	8 GHz	16 GHz	27 GHz	41 GHz	93 GHz
1	4.5E-02	1.2E-02	4.9E-03	2.8E-03	2.1E-03
0.1	3.9E+00	9.1E-01	3.5E-01	2.1E-01	1.4E-01
0.01	3.5E+02	8.7E+01	3.2E+01	1.9E+01	9.5E+00
0.001	2.8E+06	1.0E+04	2.5E+03	1.4E+03	8.8E+02
0.0001					2.1E+06

連続波は

1 - 10 mas間に谷

↑  
ダスト可

←HII領域(+星大気?)は可

mas分解能を想定すると...

- ngVLAの場合:
  - 星大気は > 27 GHzなら観測可
  - HII領域は > 16 GHzでOK
- SKA2の場合: 1-5 mas/500 K (7 $\sigma$ ): SKA1の10倍想定
  - 感度的にはngVLAより有望?、分解能は>15 GHzでギリ?

# 連続波は非常に有望

- 円盤/原始連星/星表面

- 円盤/原始連星の解像が十分可能
- 星表面についてもギリギリ感度は足りそう
- ~あとは1mas分解能さえ達成すれば星大気に手が届く

- 極小HII region

- 1 mas、 $> 10$  GHz ( $T_b < 10^4$  K,  $7\sigma$ ) でHII領域の有無を制限  
→10 - 100 au で光学的に厚いHII領域なら  
1 - 10 mas 分解能で銀河系外縁までカバー可能
- 降着量/紫外線量の変化によるサイズ変動などもみえる？

2つ合わせて高降着率下での原始星構造

と進化の多様性を明らかにできる可能性大

# より直近SKA1の場合

SKA1			7 $\sigma$ Sensitivity/hr						
Freq	Beam		Cont		Line (30 km/s)		FoV		
GHz	mas	AU @ 5kpc	$\mu$ Jy/b	Tb (K)	$\mu$ Jy/b	Tb (K)	arcmin	pc @ 1kpc	pc @ 5 kpc
8.5	50	250	9.1	60	630	4154	12.5	3.8	18.8
15.3	30	150	8.4	50	595	3542	6.7	2.0	10.1
25 (仮定)	16	80	8.4	65	595	4604	4	1.2	6.0

- 円盤を見るには感度不足
- 円盤中心～星の解像には分解能不足  
→SKA2なら感度、分解能10倍でOK (LineはNG?)
- 極小HII領域に対する感度と分解能がちょうど良い  
(JVN: 100 masで探査、感度ギリギリ)
- 星形成領域1つを1回の観測でカバー可能
- 5 kpc程度まで大質量星形成領域を根こそぎ探査可能

# まとめ

- ALMA LBで大質量星形成におけるPrototypicalな円盤の空間分解撮像が進む。今後は数を揃えて多様性を調べる必要あり
- ngVLA/SKA2の感度ではVLBIの分解能(1–10 mas)で熱放射に手が届く予定
- 円盤の観測では、光学的に厚くなるのを避けて円盤内を観測可能
- 原始連星の軌道を直接測定できる可能性が高い
- 膨らんだ大質量原始星のサイズ次第では直接分解撮像が可能になると期待 (ngVLA > 27 GHz, SKA2 > 15 GHz)
- 1 – 100 masの分解能で極小HII領域の付随をしらべることで、原始星の核燃焼開始質量に制限 (探査はSKA1でかなりいけそう)
- これらのデータから原始星進化に観測的な制限を期待