

降着円盤大研究会2015
6/21 – 22 @京都大学

星形成における 降着構造観測の現状

元木 業人
国立天文台
水沢VLBI観測所

背景: 田沢湖東岸

自己紹介

- 元木 業人(Motogi Kazuhito)
- Birth date...1983/5/25 (age: 32)
- Birthplace...Tochigi-ken, Oyama-si
- Hobby...Bicycle trip、Theatrical performance
- Research Interests ...HMSFR、Radio Interferometer (VLBI + non-VLBI)

- Education ▪ Job history

Apr. 2003 ~	Hokkaido University (department of physics)
Apr. 2006 ~	Astrophysical Lab (SV: Kazuo Sorai)
Apr. 2010 ~	JSPS Research Fellow DC
Dec. 2011 ~	Ph.D. @ Hokkaido University
Jan. 2012 ~	JSPS Research Fellow DC → PD
Apr. 2012 ~	JSPS Research Fellow PD @ Yamaguchi University
Apr. 2015 ~	NAOJ Mizusawa VLBI Observatory



目次

- 星形成における降着研究の意義
- ALMA時代の円盤観測
- 低質量星形成
- 大質量星形成

1. 星形成における降着研究の意義

星形成における降着円盤

“ガス→星”への遷移の現場

- 余剰角運動量・磁束の除去 (～5桁の差)
- ジェット/アウトフロー駆動 → 星形成効率決定

低質量星

- 連星/惑星形成

大質量星

- 降着率に応じた原始星進化
- 星団形成 (降着エンベロープ) → IMFの理解

星形成における降着円盤

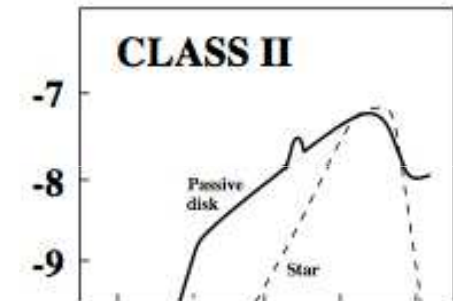
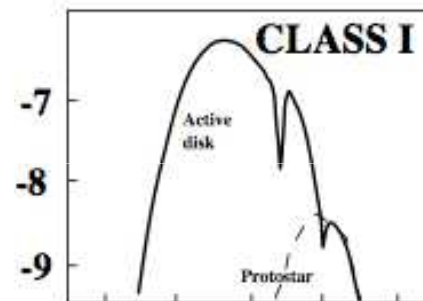
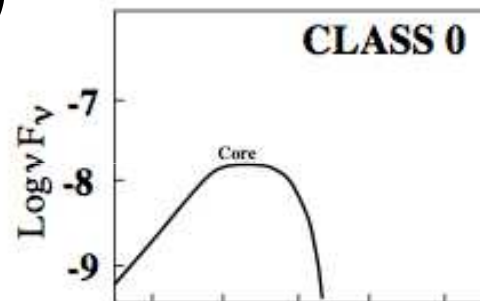
観測から理解すべきことは何か？

- 温度・面密度構造
 - 重力的な安定性、分裂の有無
 - 上限質量への理解
- 速度場
 - 角運動量輸送への理解
 - 降着率の直接測定
- ダストの分布/性質
 - ダスト成長/惑星形成への示唆

いずれの場合も
直接的な
空間分解が必須

典型的円盤サイズ(低質量星)

Phase	Class 0	Class I	Class II (T-tauri)
半径	100 AU	300AU	< 1000 AU
角サイズ (@ 140 pc)	0".7	2"	< 7"



Main accretion phase
主力は電波観測

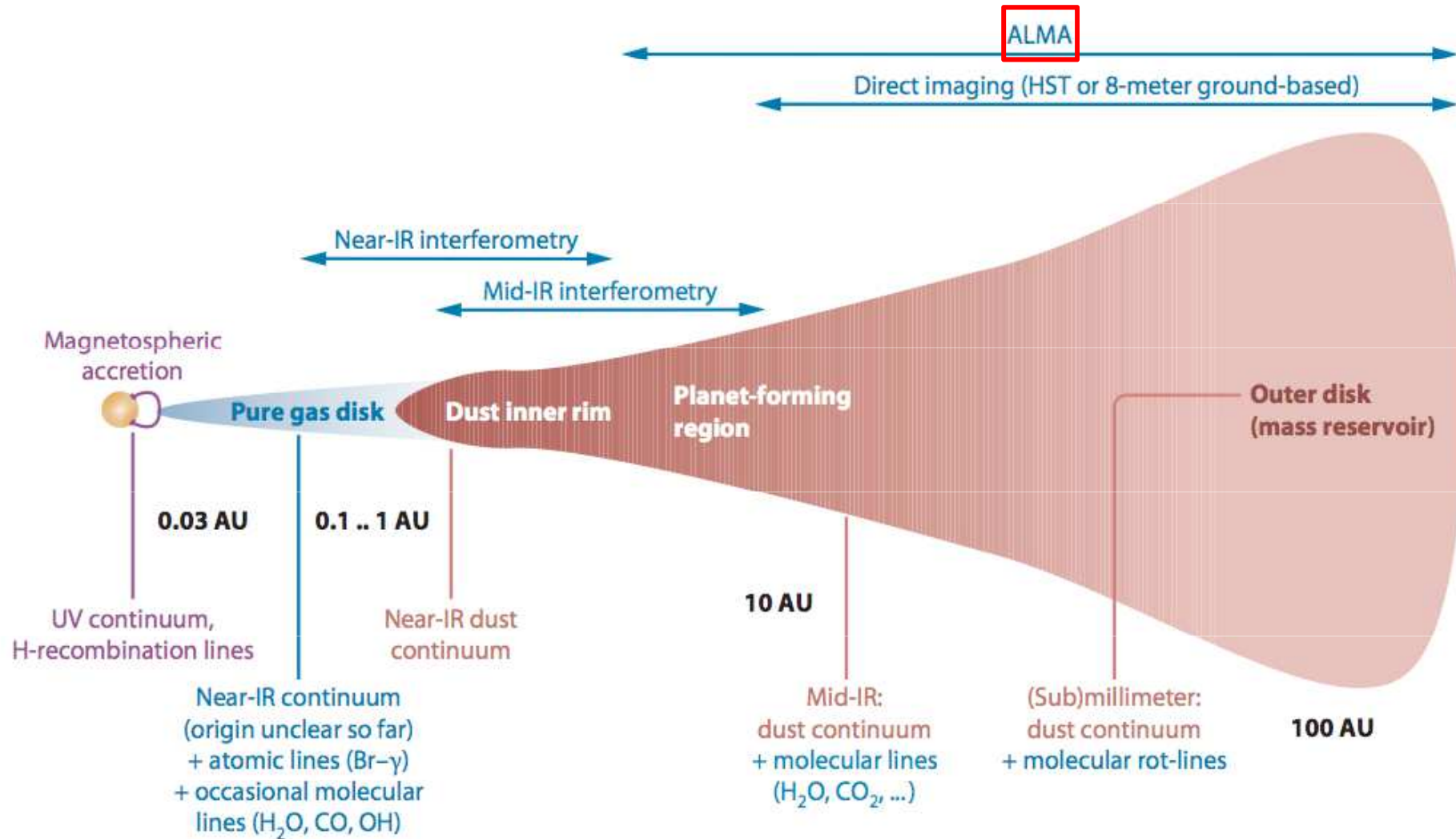


惑星形成
赤外・可視

ALMA時代の円盤観測



観測装置の分解能



いよいよALMA 長基線が実装

初期科学運用開始 2012 -

0.5 km基線: 0".5

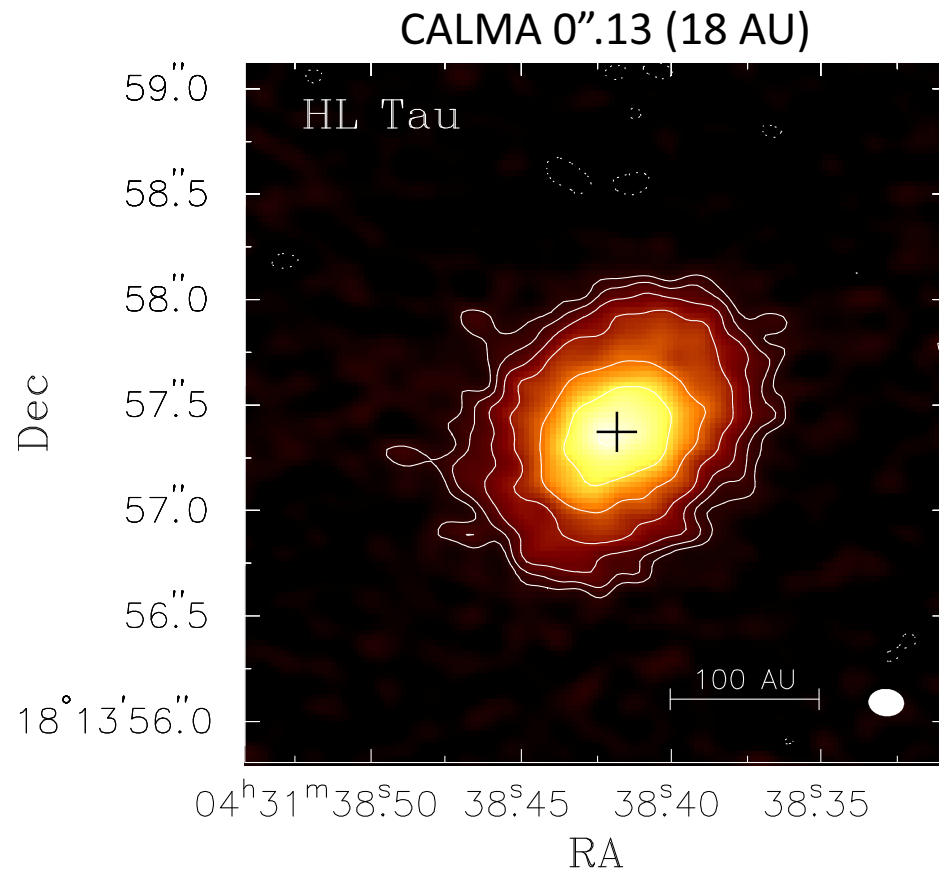
Cycle 3 2015 -

10 km 基線: 0".03

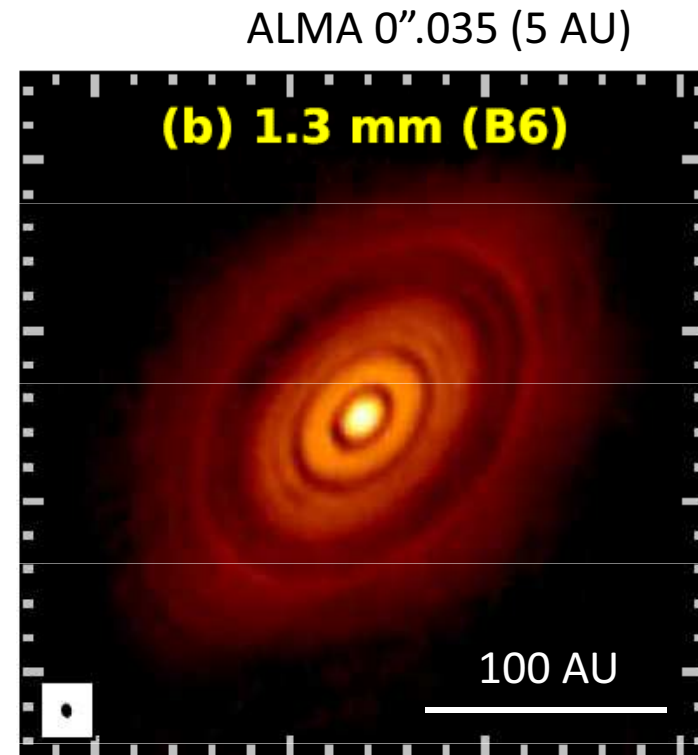
この3年で1桁のブレークスルー

最終的には0".01 – 0".005に到達 (?)

衝撃のHL-tau (Class I/II)



Kwon et al. 2011



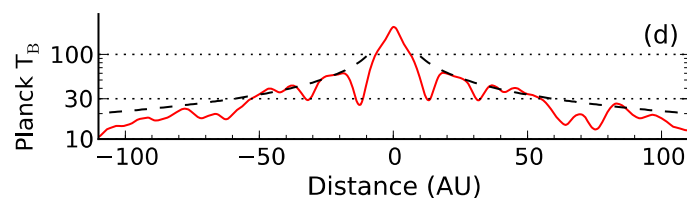
ALMA Partnership et al. 2015

現状の星形成における
降着円盤観測データの最高峰

衝撃のHL-tau (Class I/II)

- 合計7組の明暗線
明線 スペクトル指数 ~ 2
暗線 ~ 3
→暗線部分で柱密度減少
- 温度勾配 $T \propto r^{-0.65}$
- 各リングは共鳴軌道に相当
→未検出惑星との重力相互作用
- Dust opacity index
外側 0.3 – 内側 0.8

→中心部分に向けてダスト成長
- 速度場は複雑
→単純回転ではなくinfall成分も?



ALMA時代の円盤観測

まさしくこれから詳細な観測が始る段階...

- 100 AUスケールを空間分解可能な時代
→Class0天体の降着過程を直接分解撮像可能

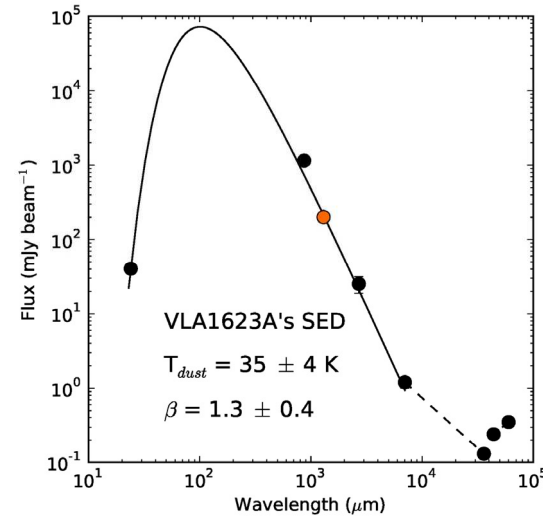
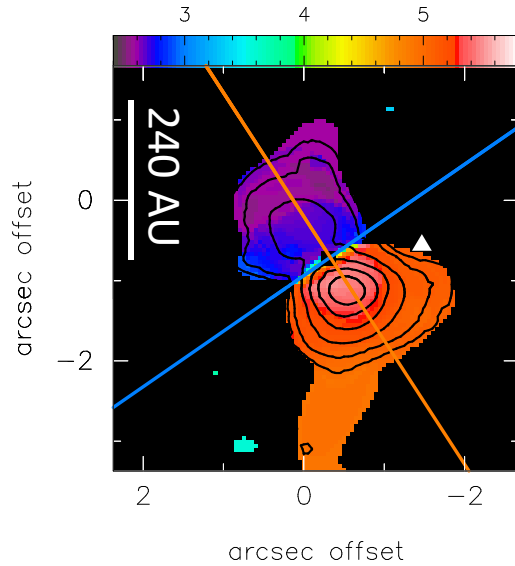
ただし課題もチラホラ...

- **プロポーザル倍率、必要時間**ともに至難
→現状ではスナップショット観測しか不可能
→天体数の増加にはしばらくかかる?
- ライン観測に関しては感度低下
→速度場に関する情報は不十分になりがち?
- 光学的厚みの問題
→ダスト連続波でも $\tau \gg 1$ になりうる
→面密度分布の見積もりに支障

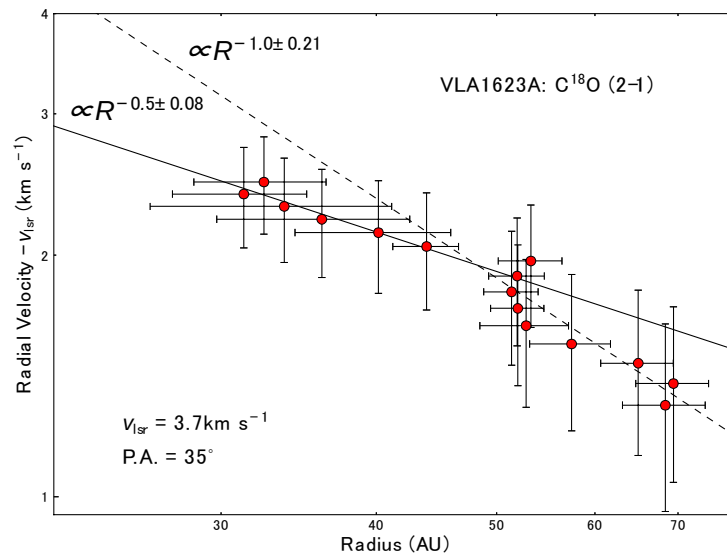
3. 低質量星形成

ALMA初期科学運用($\sim 0''.5$)による Class 0/I 天体の観測例

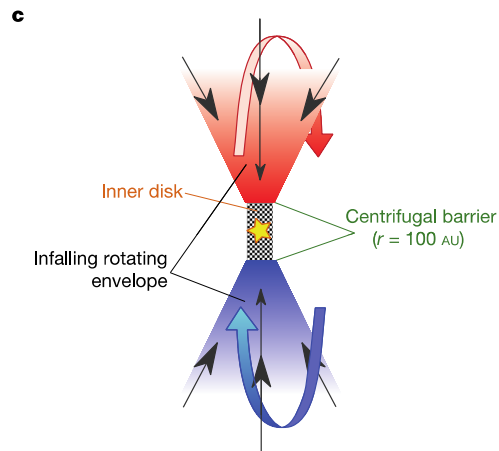
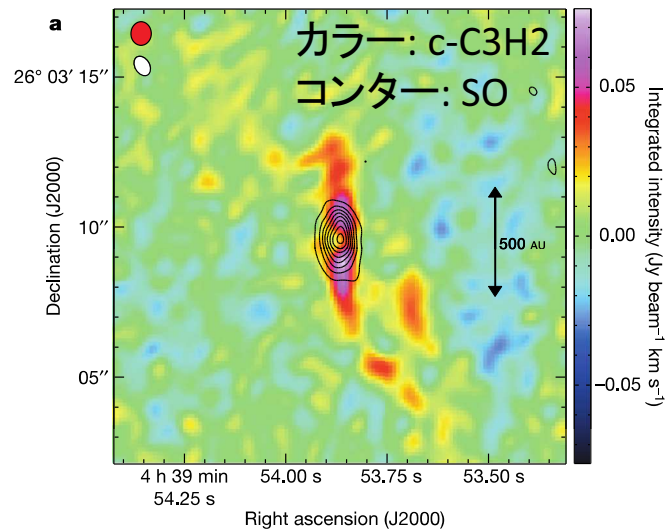
例1: VLA1623 (Murillo+ 2013)



- $R \sim 50$ AUで
- $V_{rot} \propto r^{-1} \rightarrow r^{-0.5}$
- 角運動量保存
→ 回転平衡へ



例2: L1527 IRS



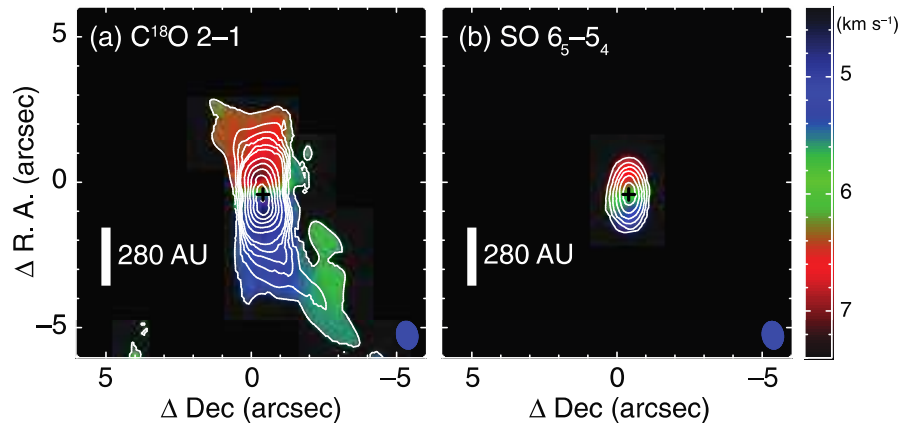
(Sakai + 2014)

- 遠心カバリア領域
にSOのリング
→ダストからの叩き出
し?
(Sakai +2014)

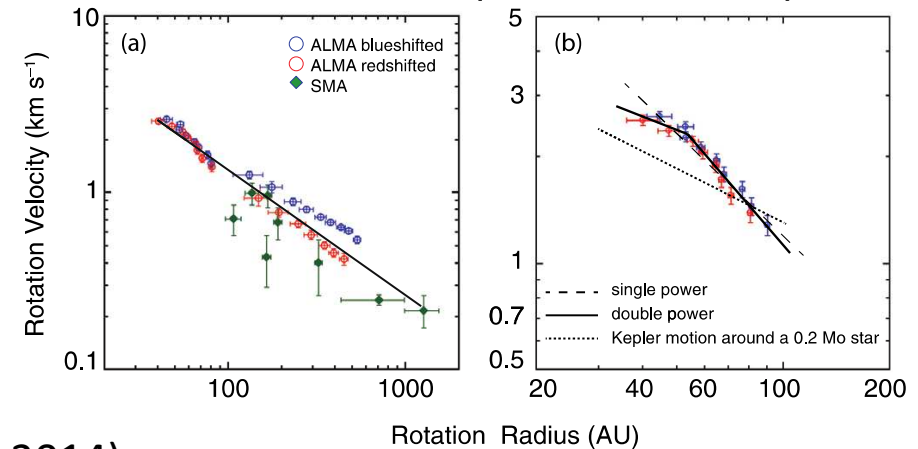
- R ~ 50 - 100 AUで

$$v_{rot} \propto r^{-1} \rightarrow r^{-0.5}$$

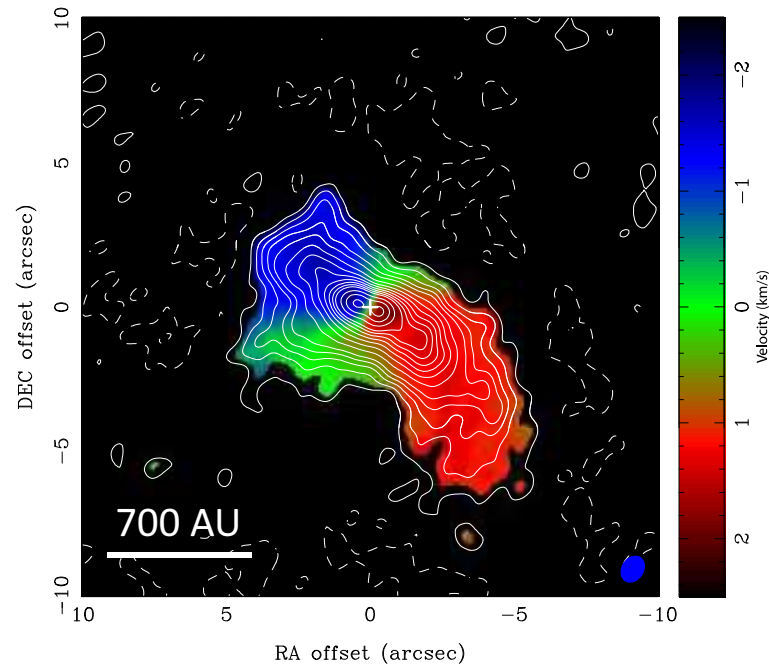
(Ohashi +2014)



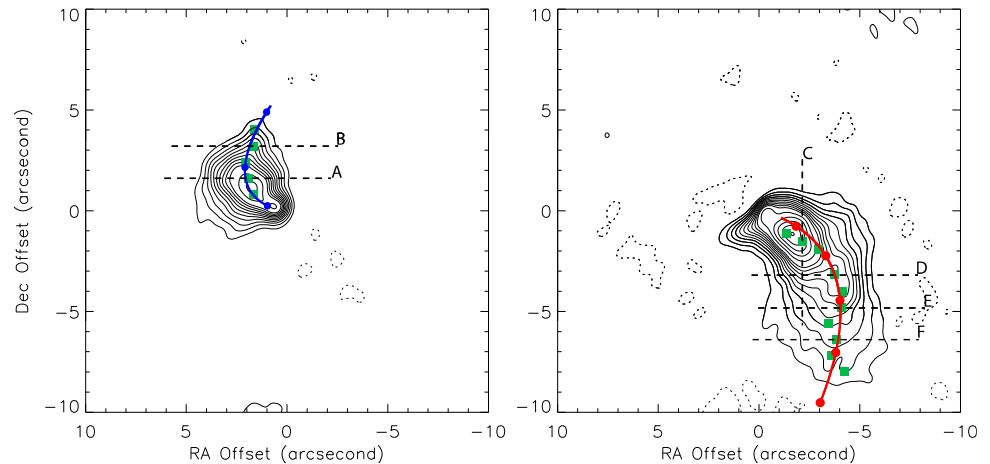
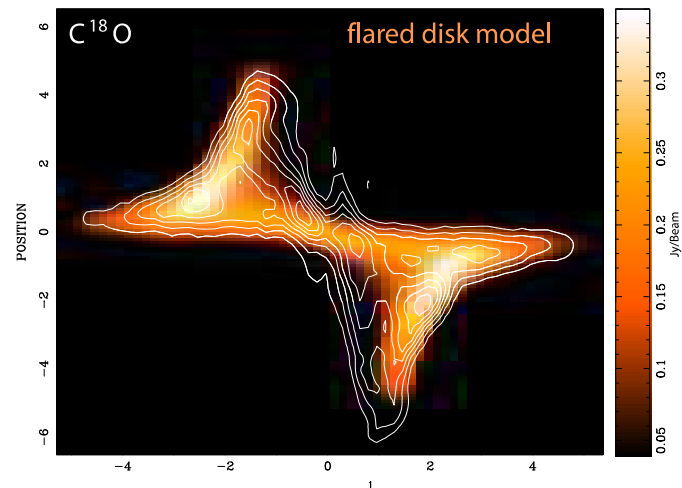
(Ohashi + 2014)



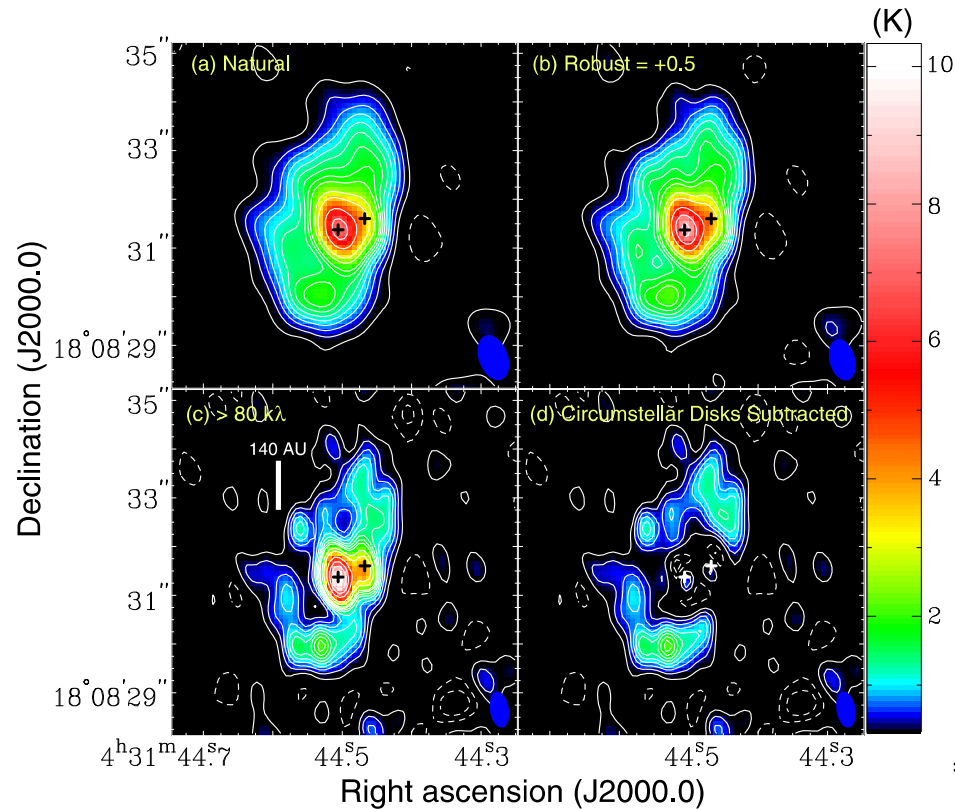
例3: L1489IRS (Yen + 2014)



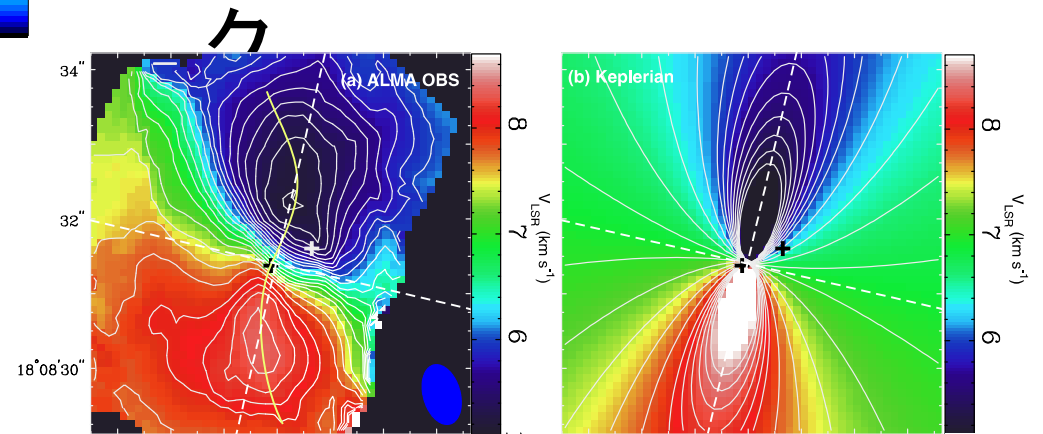
- ケプラー円盤
($R \sim 700$ AU)
+ infall streams
- 接続半径(300 AU)
にSOリング



例4:L1551NE (Takakuwa+ 2013)



- 周連星円盤
+ 渦状腕
($R \sim 300 \text{ AU}$)
- ケプラー回転
+ 重力トルク



物理量の特徴もろもろ

- 比角運動量 $\sim 10^{20} - 10^{21} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
→ Class 0における
遠心力半径は大凡50 – 100 AU ?
- 質量比 : $M_* \gg M_{\text{disk}}$
→ $M_* < M_{\text{disk}}$ の最初期天体は未発見
- 温度勾配 ($T \propto r^\alpha$)

HL-tau	(Class II)	-0.65
L1489	(Class I)	-0.3
L1551NE	(Class I)	-0.2

→ 若い天体では輻射平衡(-0.5)よりフラット?

低質量星形成の現状

- ALMA初期科学運用の時点でClass 0天体における円盤構造が分解され始めており、天体毎の個性も見え始めている
- 最長基線の実装によりHL-tauのような詳細な動径構造が明らかになると期待される
- 今後の研究進捗はALMAの運用状況に依存する可能性がある (e.g., 長時間積分の実行)
- 光学的厚みや輝線感度の不足はALMA時代でも問題になりうる

4. 大質量星形成

低質量星との違いは何か？

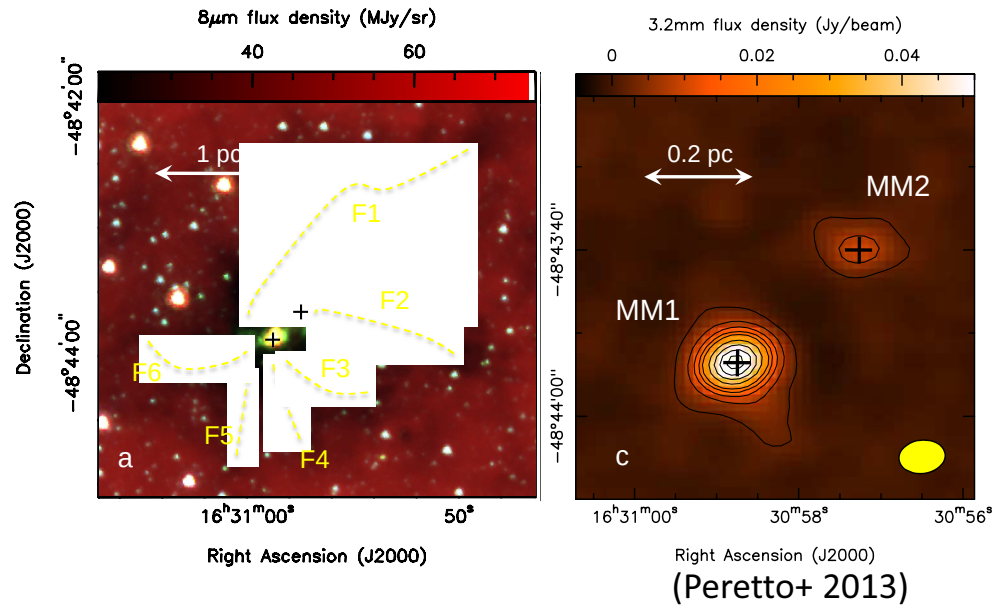
- 極めてDynamicalなコア/クランプ形成
(e.g., 分子雲衝突、乱流衝突)
→ 大降着流の実現(輻射圧問題の回避)
- クランプからの質量供給 (e.g., Wang + 2010)
円盤 + エンベロープ + 周星団クランプ

低質量星と同様の
Core collapse

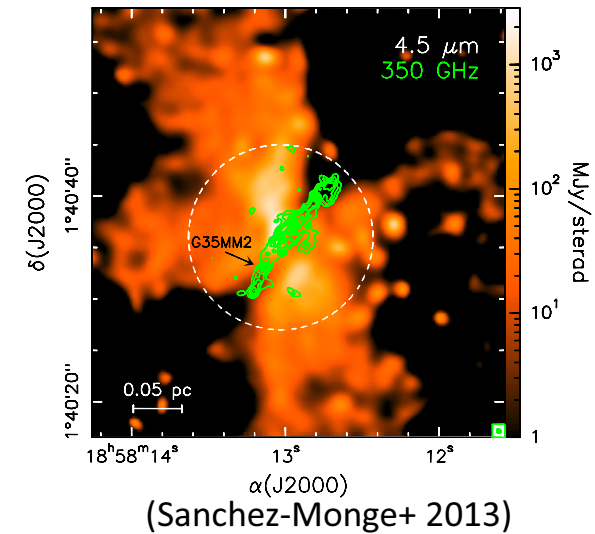
大質量星のみ

大質量星周囲の階層的降着構造

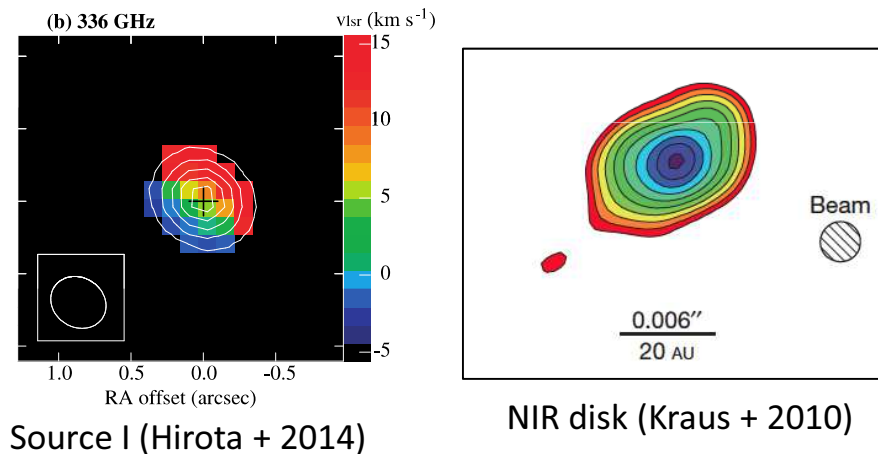
1: Cluster forming clump(~ 1 pc) / core(~ 0.1 pc)



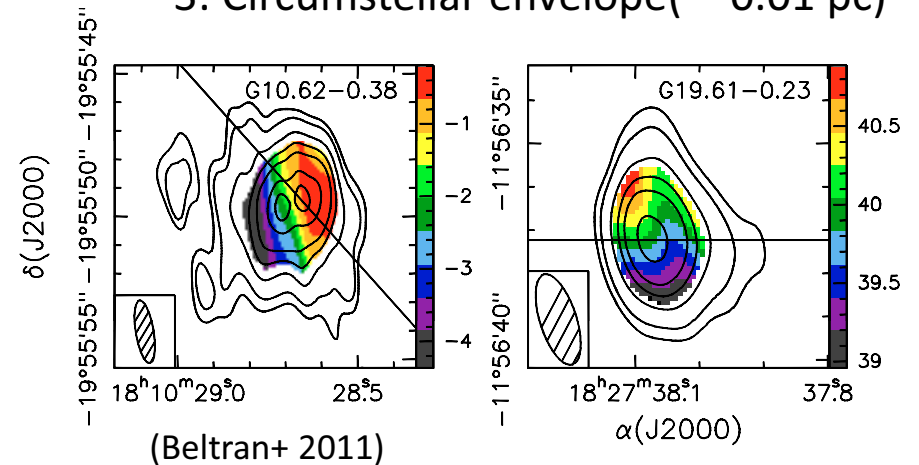
2: Circum-cluster envelope(< 0.1 pc)



4: Individual Disks (< 100 AU)



3: Circumstellar envelope(~ 0.01 pc)



これまでに発見された回転構造の例

天体名	半径	分類
W51N	～ 8000 AU	周星団
IRAS18360-0537	～ 5700 AU	周星団
W33A	～ 4000 AU	星周？
IRAS 20126+4104	～ 1000 AU	星周
G35.20 -0.74	～ 1000 AU	周連星？
CepA HW2	～ 700 AU	星周
Orion KL	～ 50 AU	星周

青字: 回転 + infall

赤字: ケプラー回転 (と主張されているもの)

→低質量星に比べてやや大きい傾向
(初期角運動量の大きさを反映? or Selection Bias ?)

ALMAによる観測例

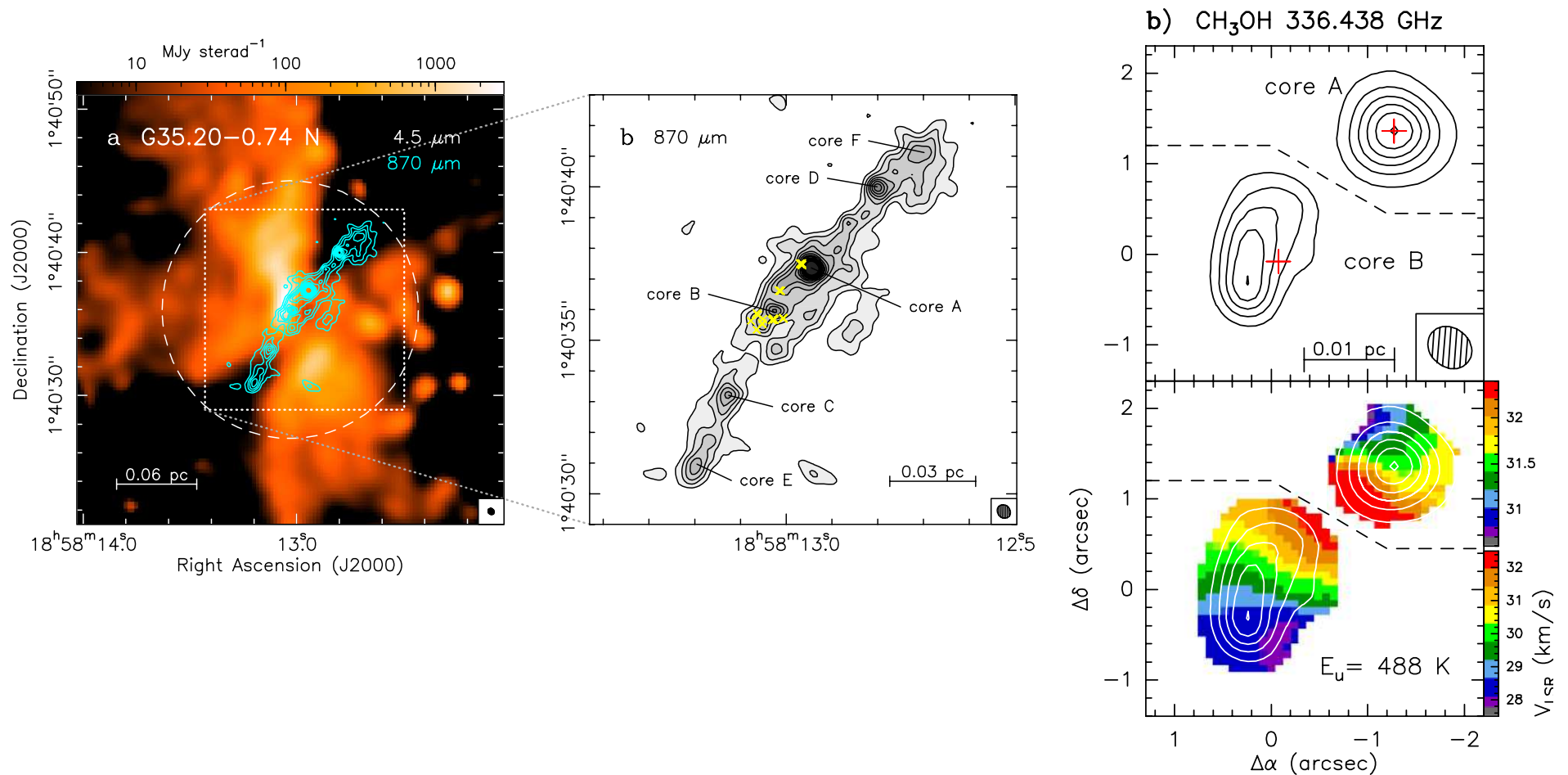
Orion source

- 現状で最も確実な
大質量原始星周囲の降着円盤候補天体

詳しくは廣田さんの講演で...

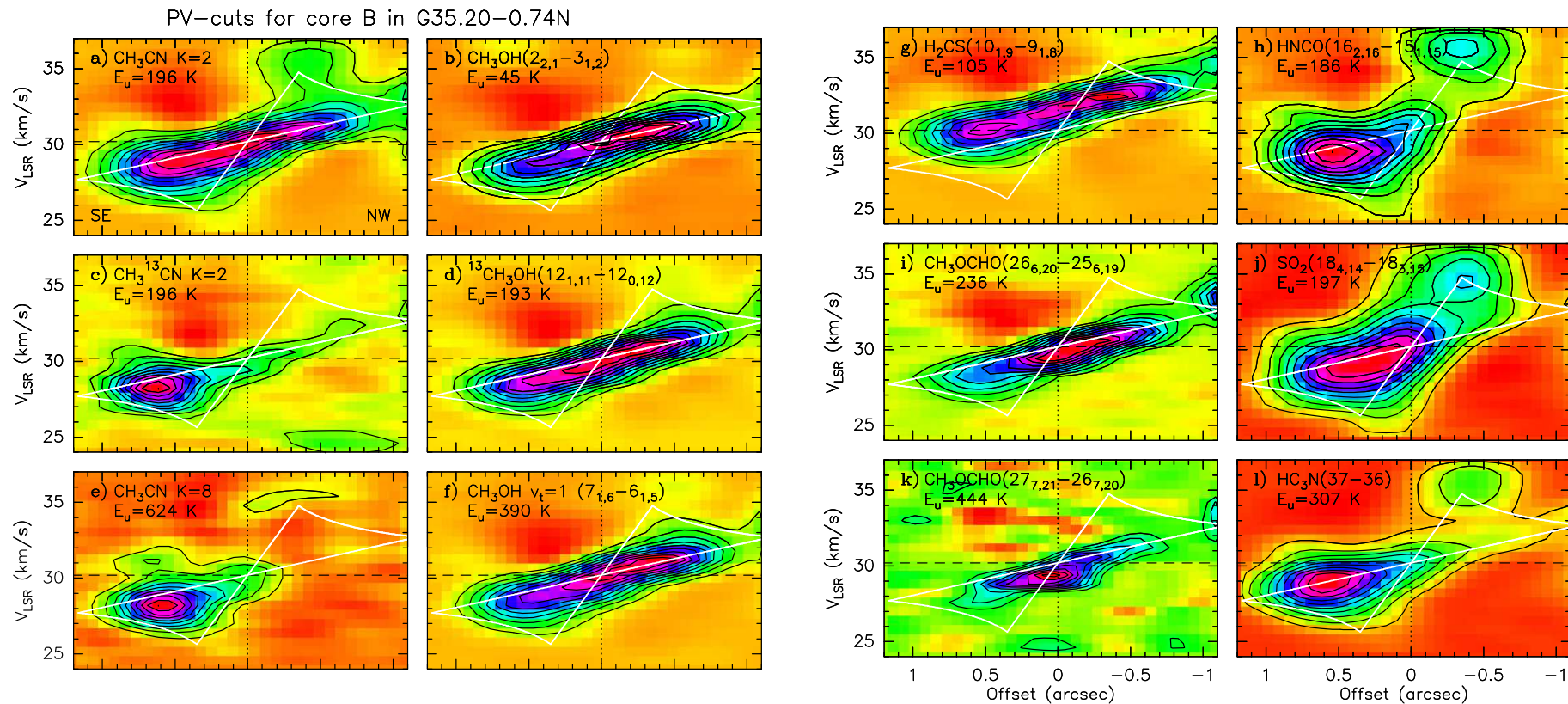
G35.20-0.74N

- Two submillimeter cores show a velocity gradient



G35.20-0.74N

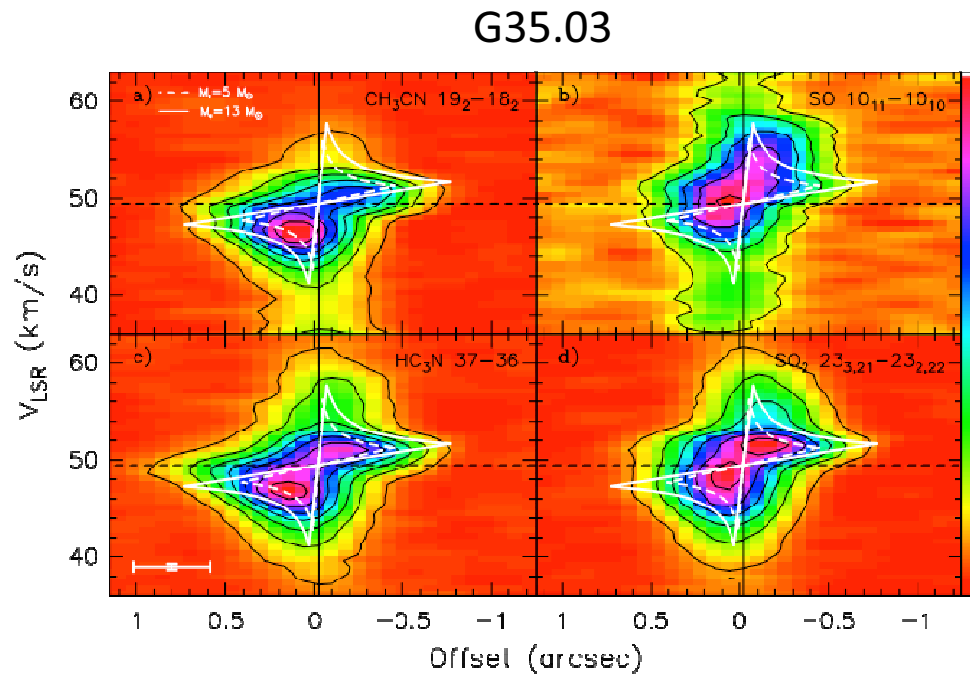
- PV-diagram for multiple molecules and transitions



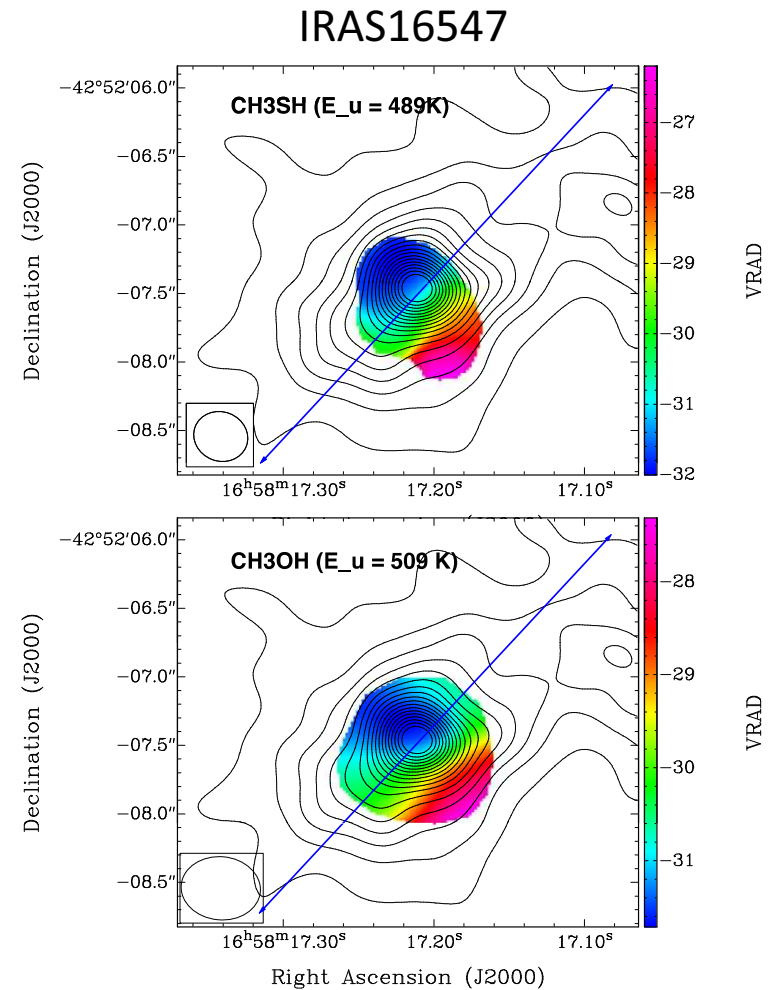
→ Non-radialに物理化学環境が変化？

Others

- Kepler-likeな回転は普遍的に見え始めている

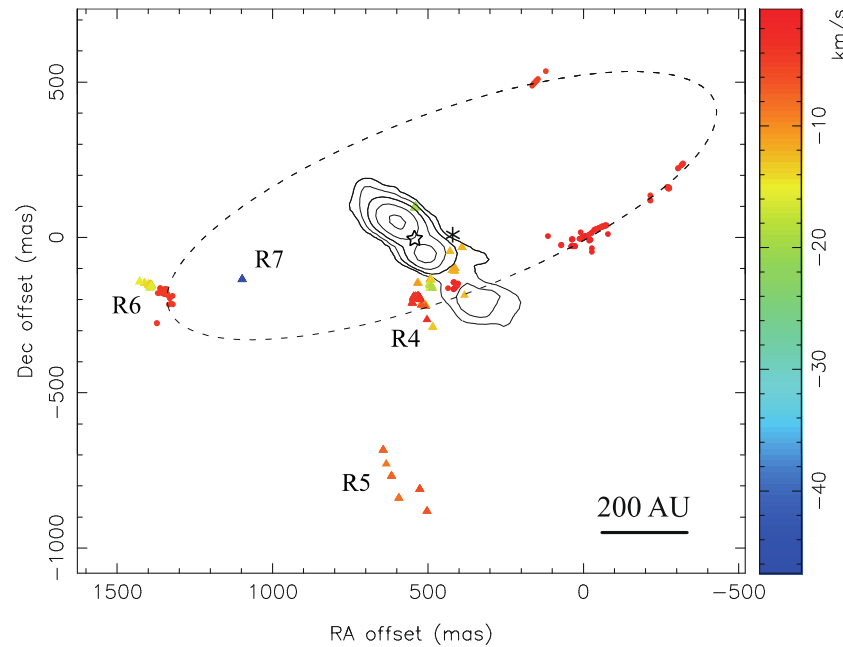


- ほとんどの天体が未だ
“colored-potato”の状況
→ALMAの長基線データが必須

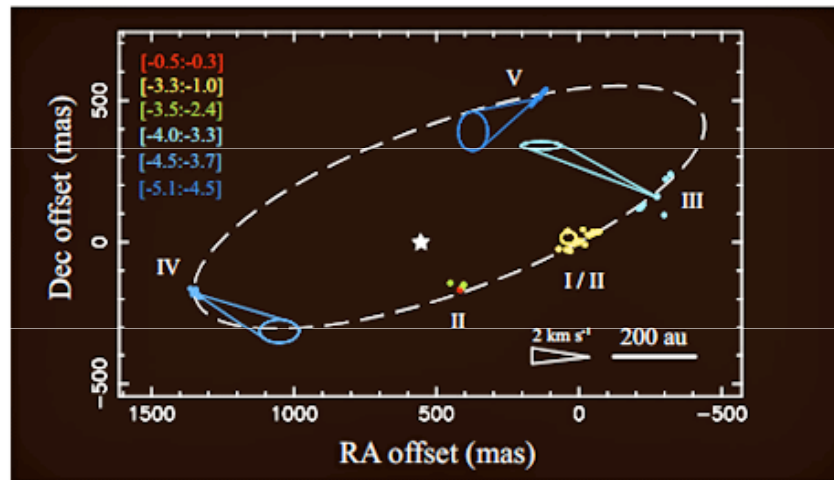


VLBIによるメーザー観測 ～3次元運動の直接計測～

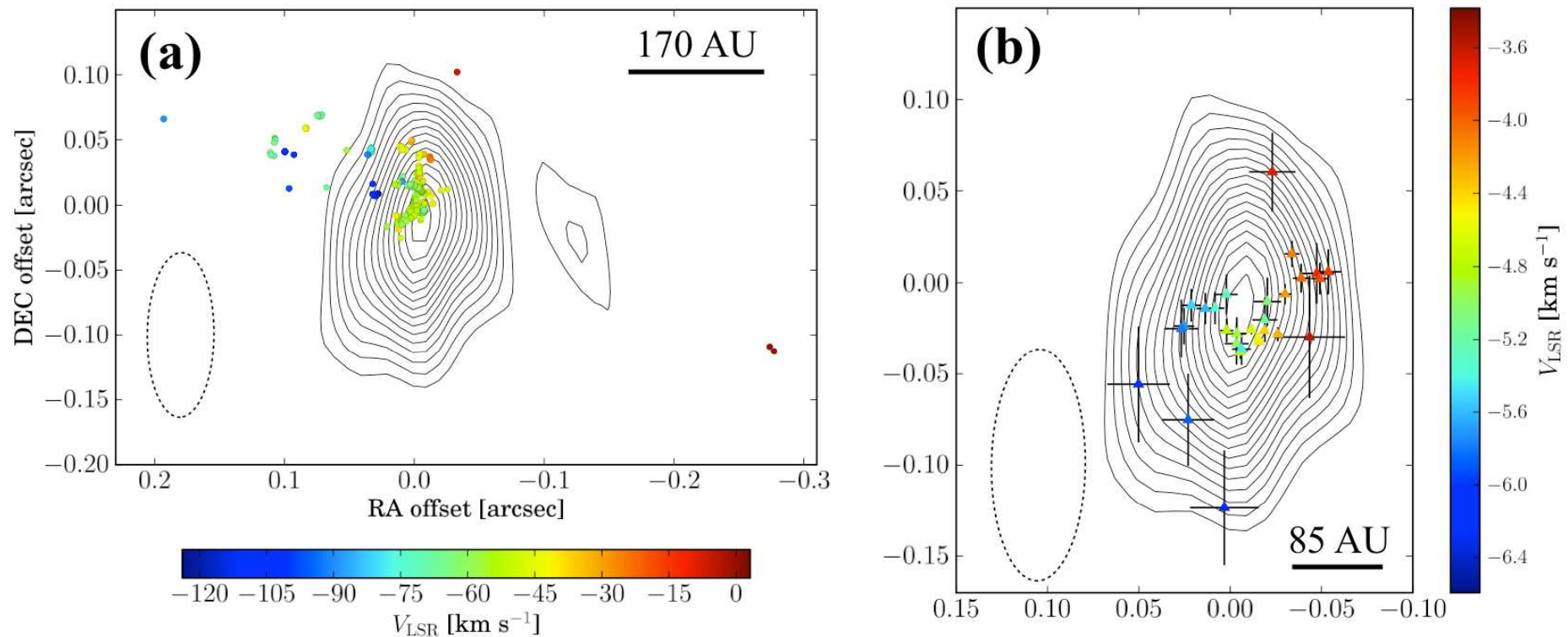
CepA HW2 (Sugiyama+2014)



- 既知のケプラー円盤に付随するCH₃OHメーザ源の3次元運動を測定
- 回転 + Infall運動を検出
- 残念ながらALMAからは観測不可 (赤緯 > +60)



G353.273+0.641 (Motogi + 2015 in prep)

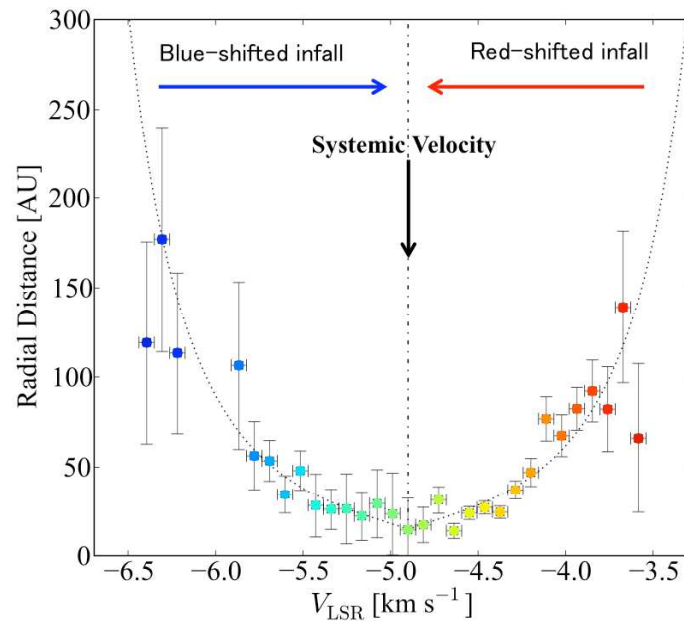
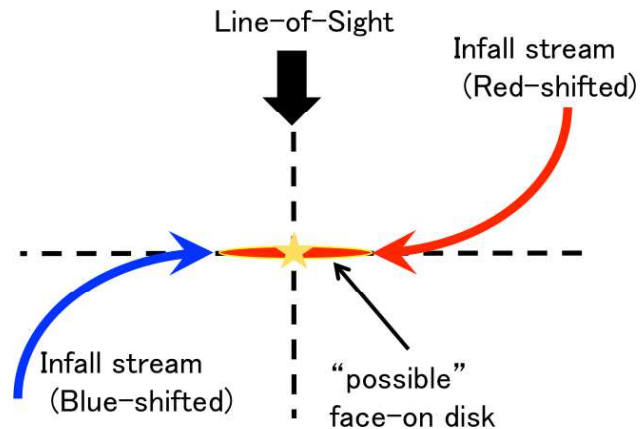


(左): ダスト連続波(J-VLA) + H₂Oメーザージェット (VERA)

(右): 6.7 GHz CH₃OH メーザ (ATCA & VLBA)

、半径100 AUの改善を1-14倍

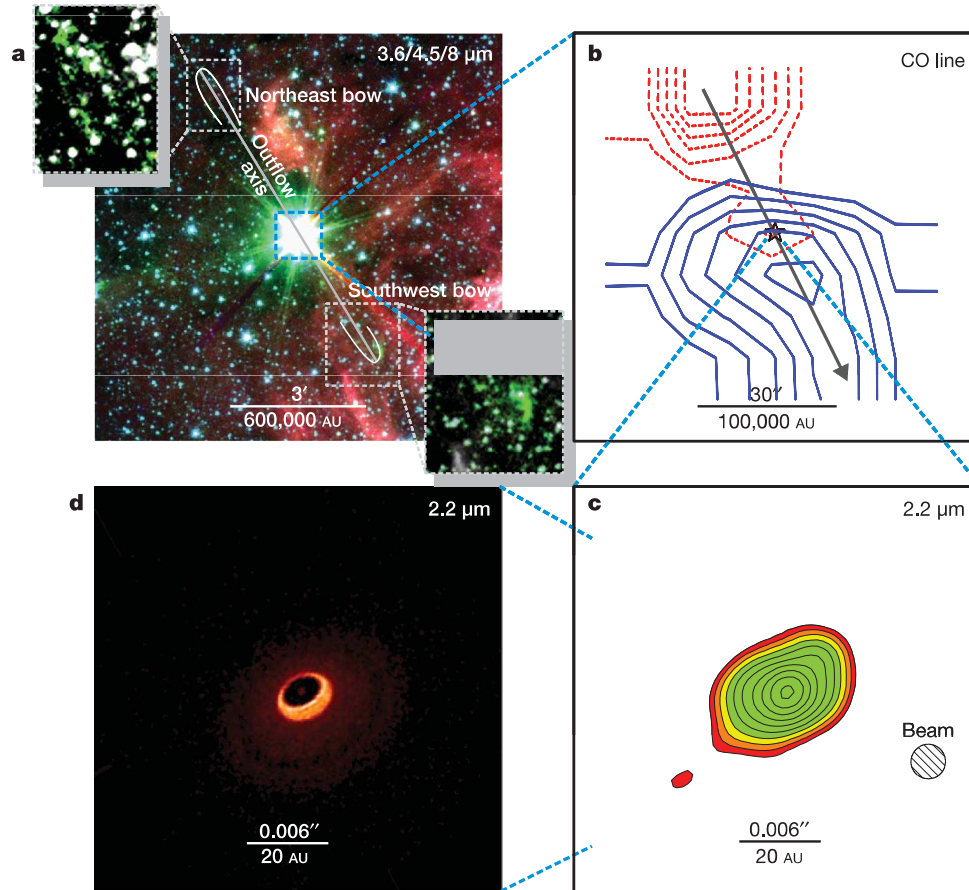
非軸対称降着流



- L1489でみられたような非軸対称降着流で速度勾配を説明可能
- ほぼFace-onのため中心付近ではSystemic Velocityに乗る
- $R \sim 15$ AUまでinfallが継続
→円盤サイズ < 15 AU ?
or
→角運動量の小さいガスを
選択的にトレース？
- 現在VLBAによる3次元運動測定を実施中

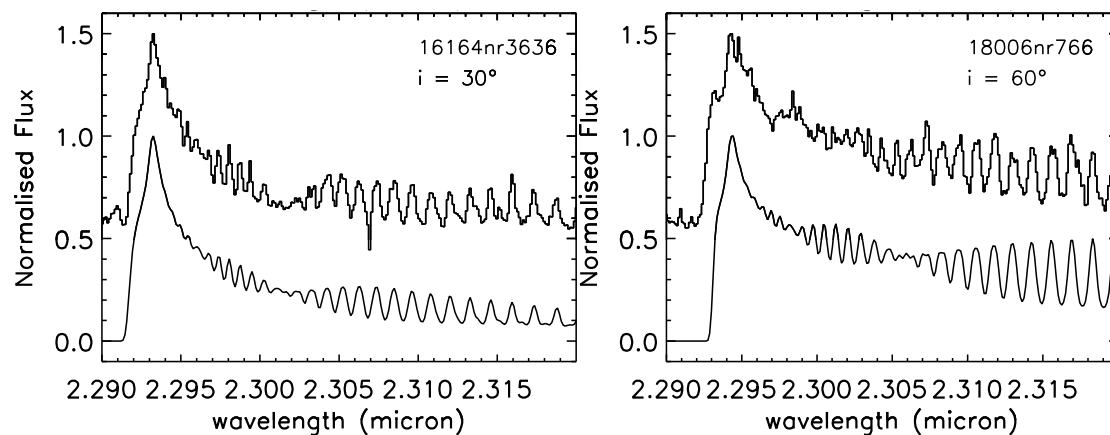
近赤外による観測例

IRAS13481-6124 (Kraus+2010)



- IRAS13481-6124
→ 降着末期、 $20 M_{\text{sun}}$
- VLTi (赤外線干渉計)による $0''.003$ 分解能の撮像
- $R \sim 20 \text{ AU}$ のダスト円盤を空間分解 (唯一の例)
- RTモデルから予想されるダスト蒸発半径 $\sim 6 \text{ AU}$

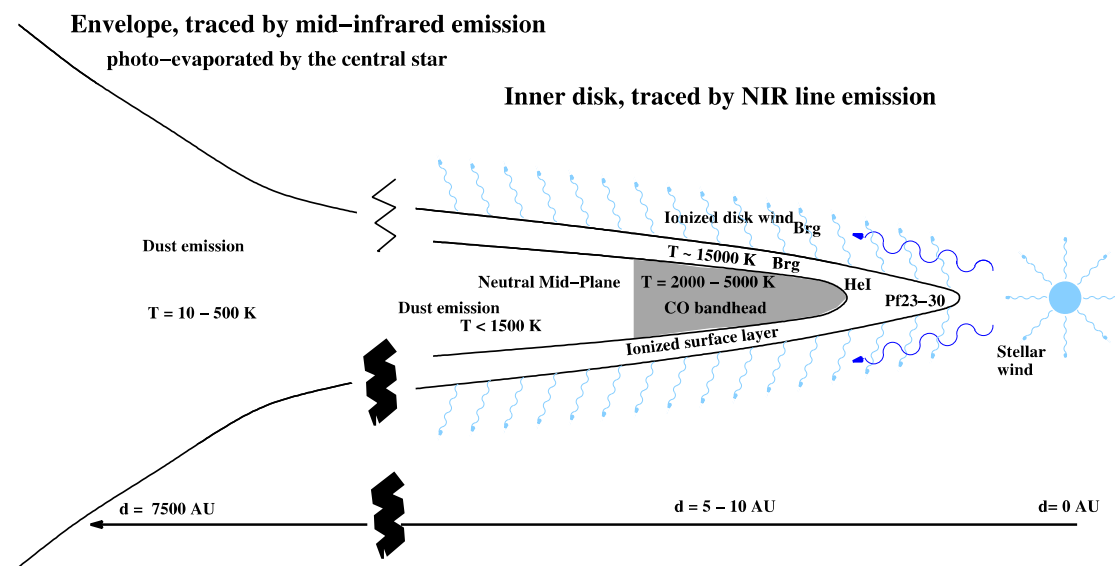
さらに内奥へ... (e.g., Bik+ 2008)



- CO-bandhead輝線
($T_k \sim 3000$ K)
 $\rightarrow R < 10$ AU

- スペクトル形状はケプラー円盤で再現可能

- 空間的には未分解
 $\rightarrow$ TMT + AOでもきつい？



大質量星形成の現状

- はっきりと円盤を空間分解できた例は僅か1天体 (ただし近赤外かつ連続波)
- 星周エンベロープの回転は複数天体で見えている(一部はケプラー円盤？)
- 遠心力半径は～1000 AU以下程度
 - Class 0/I 天体に比べるとやや大きい
 - 初期角運動量が大きい？
- 物理化学環境に非一様性が見え始めている

まとめ

- 低/大質量ともに星形成過程におけるCriticalな問題を探る上では降着円盤の空間分解が必須である
- ALMA長基線の実装により円盤観測は大きな転換期に差し掛かっている
- 低質量星の場合、主質量降着期における円盤の物理化学構造・速度場の詳細/個性がすでに見え始めている
- 大質量星の場合、現状で空間分解された円盤は僅か1天体。ALMA最長基線の実現が待たれる