

分子雲コア中心部に埋もれた $\sim 0.2 M_{\odot}$ 原始星に付随する ~ 10 AU円盤のALMA長基線観測

徳田一起 (大阪府立大学/国立天文台)

ALMA Cycle 5 Obs.

(P.I. Tokuda)

1.3 mm continuum

$0.''024 \times 0.''017$

(~ 3.3 AU \times 2.4 AU)

References

- Tokuda+14, ApJL, 789, L4, ▪ Tokuda+16, ApJ, 826, 26,
- Tokuda+17, ApJ, 849, 101, ▪ Tokuda+18, ApJ, 862, 8, ▪ Tokuda+19 in prep.

分子雲コア中心部に埋もれた $\sim 0.2 M_{\odot}$ 原始星に付随する $\sim 10 \text{ AU}$ 円盤のALMA長基線観測

徳田一起 (大阪府立大学/国立天文台)

Collaborators:

大西利和 (大阪府大), 西合一矢, 河村晶子 (NAOJ),
井上剛志, 犬塚修一郎, 福井康雄, 立原研悟 (名古屋大),
松本倫明 (法政大), 町田正博 (九州大), 細川隆史 (京都大),
國友正信 (東京大), 富田賢吾 (大阪大)

Contents:

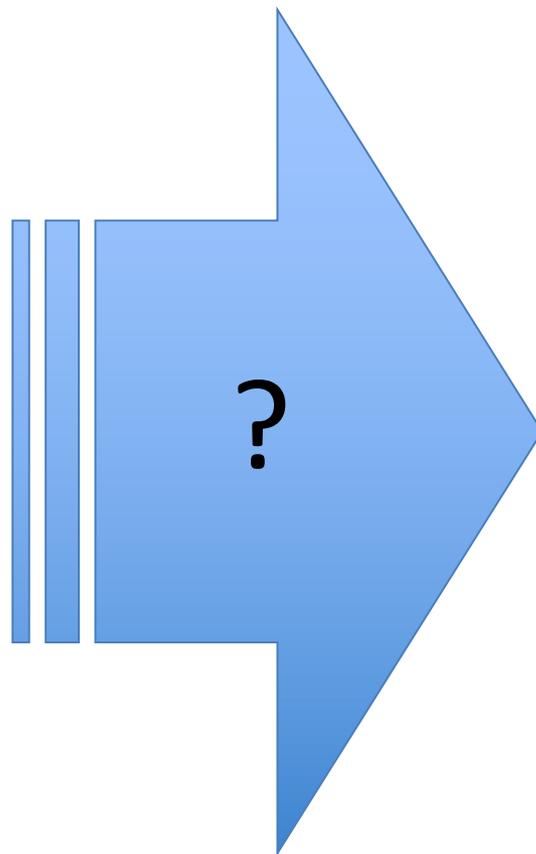
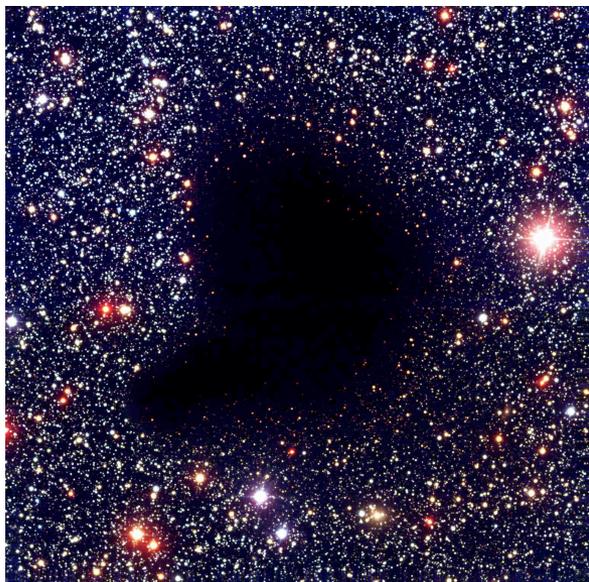
- Introduction \sim What is MC27/L1521F? \sim
- ALMA Cycle 0,1 Obs. (Tokuda+14,16)
- ALMA Cycle 3 Obs. (Tokuda+17,18)
- Summary
- **ALMA Cycle 5 Obs. & Discussion**

References

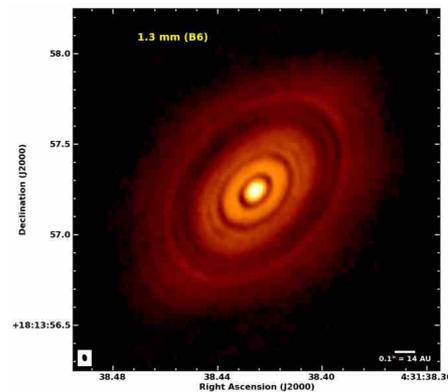
- Tokuda+14, ApJL, 789, L4, ▪ Tokuda+16, ApJ, 826, 26,
- Tokuda+17, ApJ, 849, 101, ▪ Tokuda+18, ApJ, 862, 8, ▪ **Tokuda+19 in prep.**

(ALMAを使った) 星形成研究の最終目標

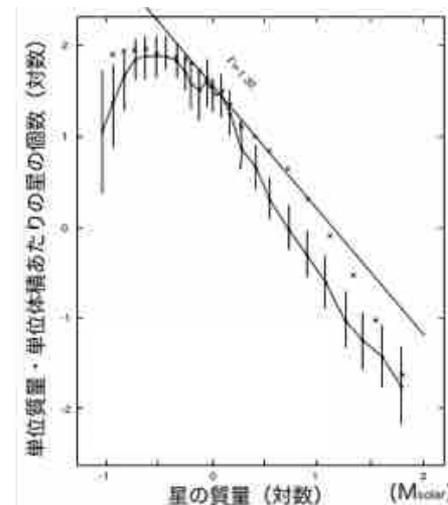
分子雲 (コア)



この段階を理解

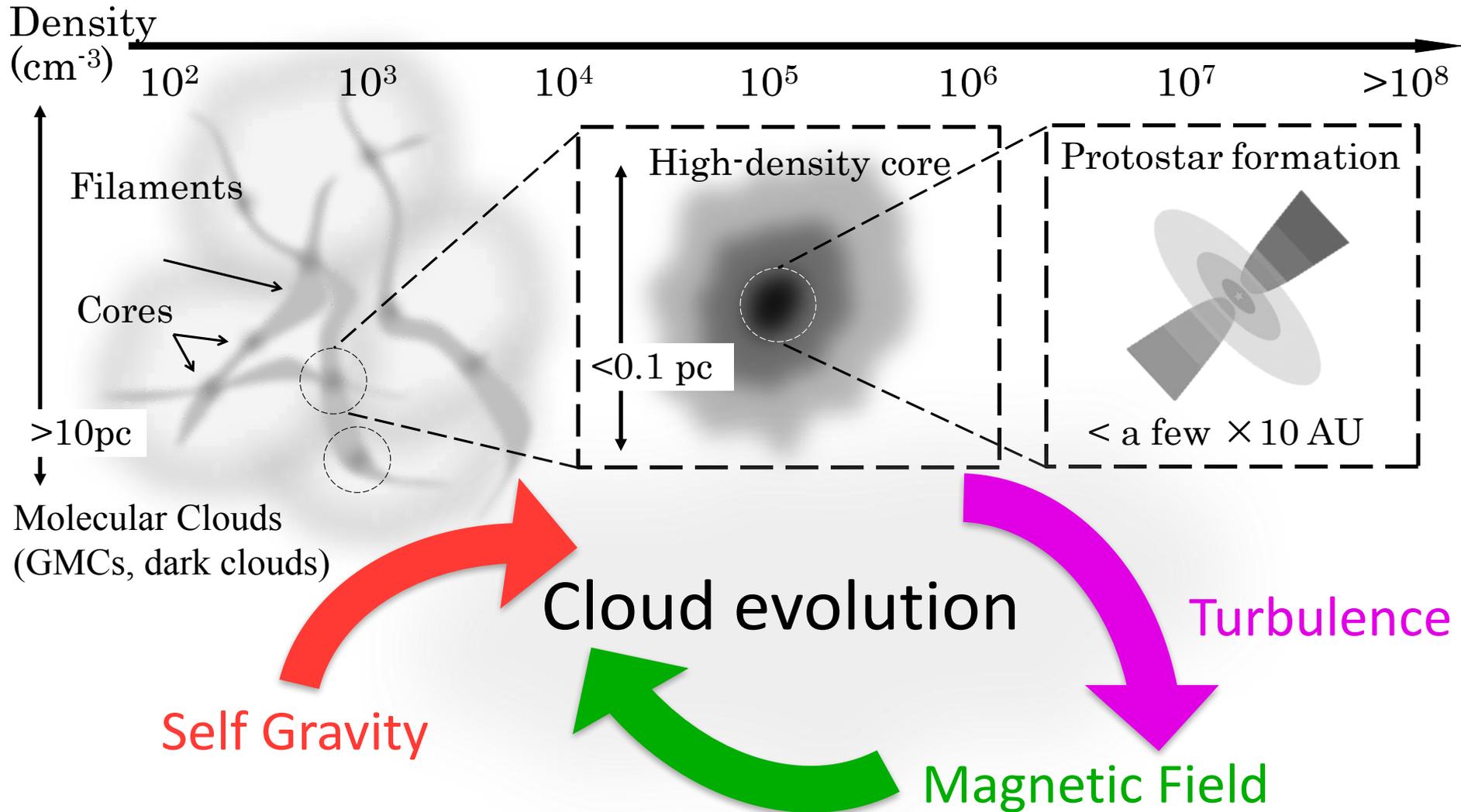


(多様な)原始星+円盤



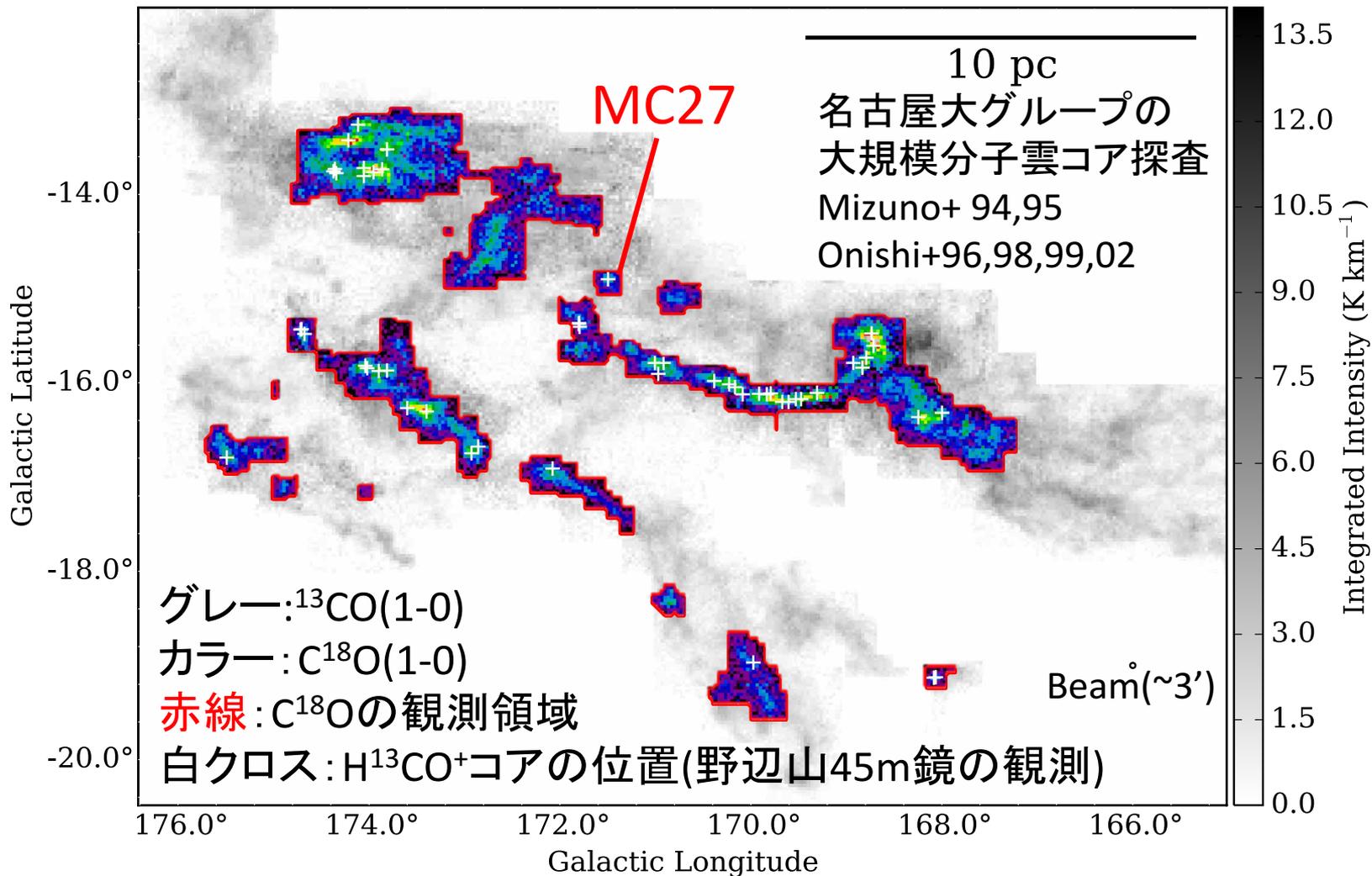
多様な星質量

Evolution of molecular clouds to protostars



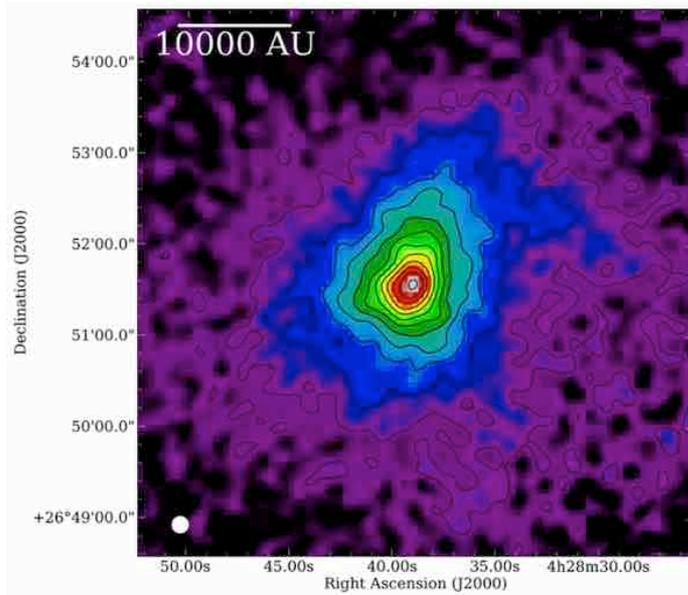
- ・複数の物理過程が絡み合う現象
- ・サイズと密度が進化に応じて数桁変化する

Introduction ~Dense cores in Taurus~

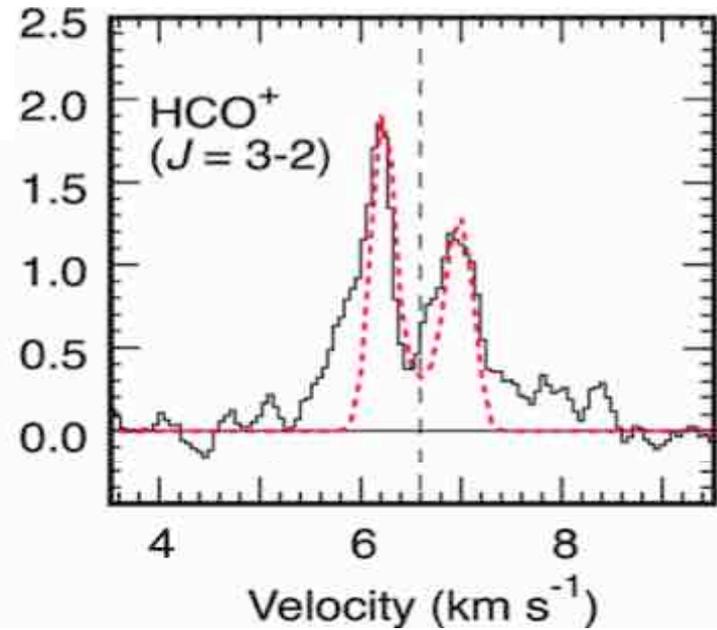


比較的光学的に厚い輝線から薄い輝線への戦略的な観測領域の絞り込み
=>~50個の分子雲コア(H_2 個数密度 $\sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$)を同定し、MC27が
最も進化した(高密度な)分子雲コアであることを突き止める

Introduction MC27/L1521Fとは何者か？



IRAM 30m:1.3 mm dust
(Kauffmann+ 2008)



Onishi+ 1999

▪ Features

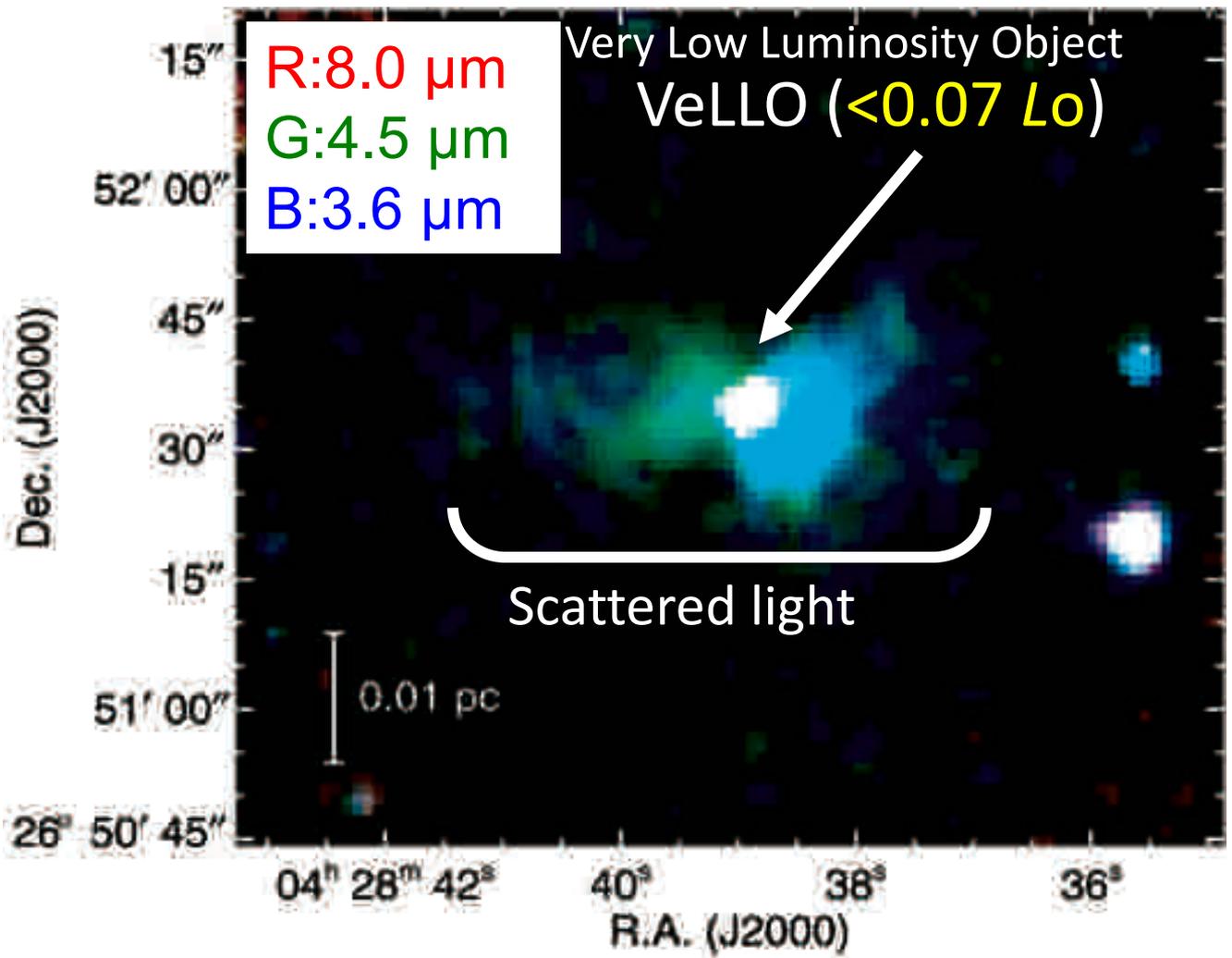
1. 近傍小質量星形成領域の中では最も密度が高い分子雲コアの一つ (e.g. Onishi+99,02, Crapsi+04)
2. 中心でインフォールとアウトフローの兆候か？ (e.g. Onishi+99)

コア全体の質量 $\sim 4 M_{\odot}$, 中心密度 $\sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$, 温度 $\sim 10 \text{ K}$

など

Introduction what is MC27/L1521F?

I.R. observations with *Spitzer* space telescope



Bourke+ 2006, Tereby+ 2009

Introduction

- **VeLLOs (Very Low Luminosity Objects) とは？**
 - Low luminosity object in “starless” cores (Young+2004)
 - Def: Internal luminosity $< 0.1 L_{\text{sun}}$ (Di Francesco+ 2007)
- VeLLOとは何者か？
 1. 非常に若い原始星
 2. Proto-brown dwarf
 3. ある程度成長した原始星 (光度が低いため)

} *実際はこれらの複合も考えられる

星/褐色矮星形成の初期段階を探る上で重要な天体の一つ

- 最近の理論研究では...
 - ほとんどのVeLLOはClass I phase (Vorobyov+ 16)
 - (降着時に持ち込むエントロピーが小さい場合)

Interim summary of MC27/L1521F

Before ALMA obs. v.s. After ALMA obs.

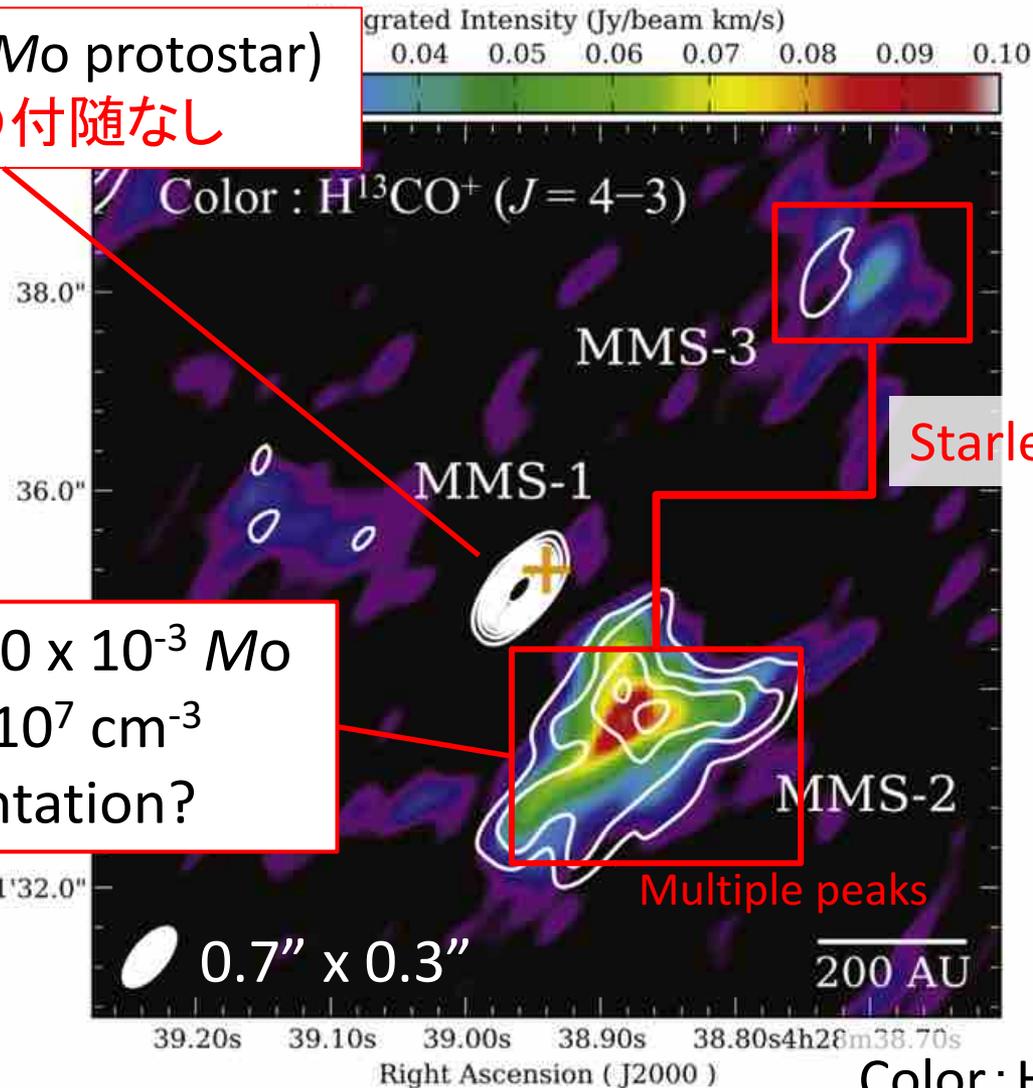
	Single-dish Obs.	ALMA Obs.
Shape	(Nearly) spherical	Complex structures
Central Density	$\sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$	$10^6\text{-}10^7 \text{ cm}^{-3}$ (MMS2,3)
Single or Multiple?	Single (VeLLO)	(Possible) Multiple
Outflow evidence	Scattered light	Compact molecular outflow?
Protostellar mass	$< 0.1 M_{\odot}$?	$\sim 0.2 M_{\odot}$
Accretion rate	$10^{-5}\text{-}10^{-6} M_{\odot}/\text{yr}$?	$< 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr}$
Disk size	Large ($> 100 \text{ AU}$) ?	$R \sim 10 \text{ AU}$
Temperature	$\sim 10 \text{ K}$	Warm CO gas, 15-60 K

Is it a typical protostellar core in an early stage of star formation ?

Protostar and condensations at the center of the core

(Tokuda+14,16)

MMS-1 ($\sim 0.2 M_{\odot}$ protostar)
高密度ガスの付随なし



Starless Condensations

Mass $\sim 3.0 \times 10^{-3} M_{\odot}$
density $\sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$
+Fragmentation?

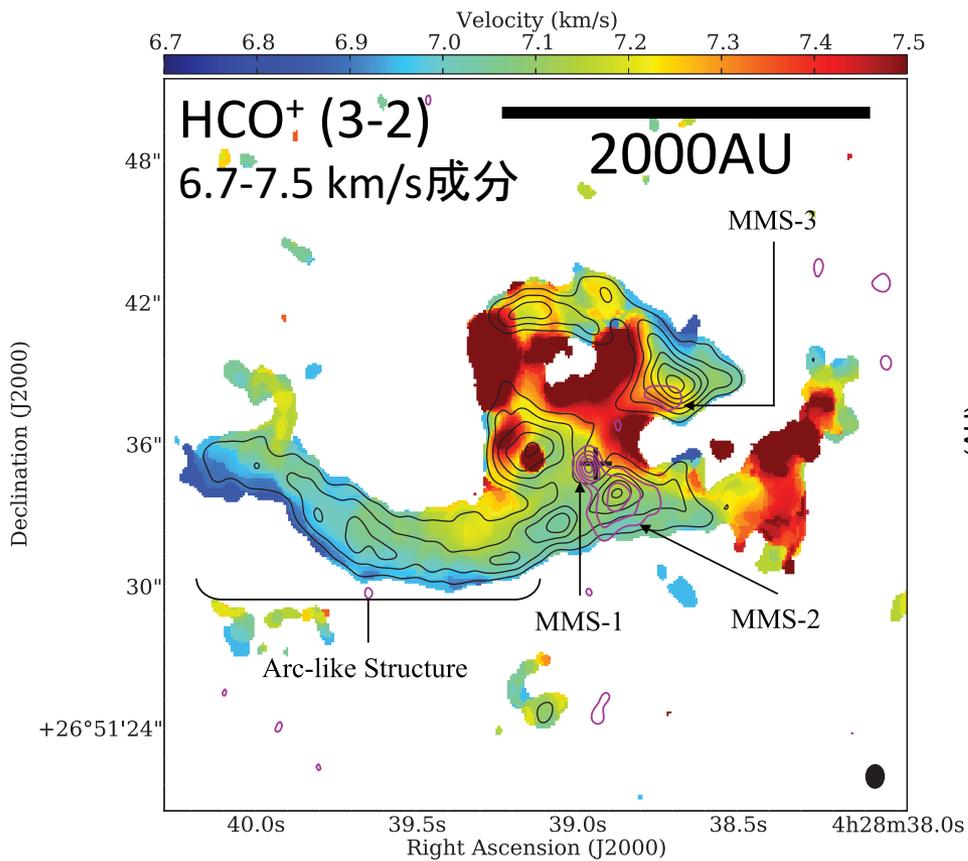
Multiple peaks

Color : $H^{13}CO^+$ (4-3)
Contour : 0.87 mm Cont.

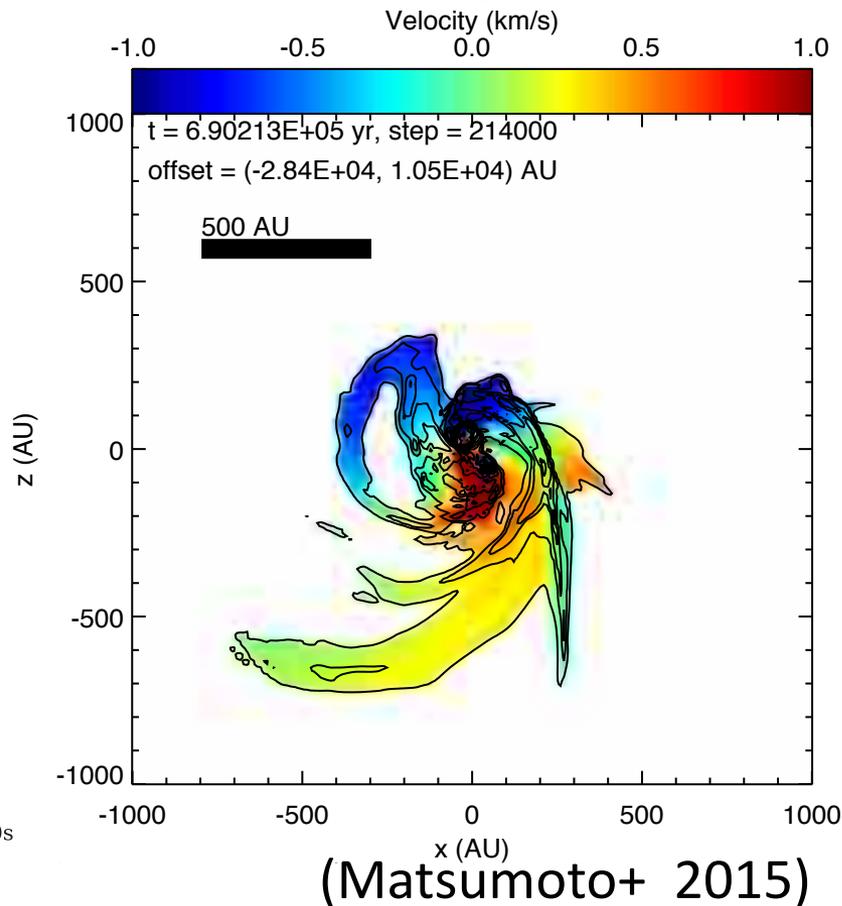
Arc-like structure

2000AUスケールのアーク構造(原始星+周囲の相互作用か?)

観測結果



シミュレーション



Interim summary of MC27/L1521F

Before ALMA obs. v.s. After ALMA obs.

	Single-dish Obs.	ALMA Obs.
Shape	(Nearly) spherical	Complex structures
Central Density	$\sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$	$10^6\text{-}10^7 \text{ cm}^{-3}$ (MMS2,3)
Single or Multiple?	Single (VeLLO)	(Possible) Multiple
Outflow evidence	Scattered light	Compact molecular outflow?
Protostellar mass	$< 0.1 M_{\odot}$?	$\sim 0.2 M_{\odot}$
Accretion rate	$10^{-5}\text{-}10^{-6} M_{\odot}/\text{yr}$?	$< 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr}$
Disk size	Large ($> 100 \text{ AU}$) ?	$R \sim 10 \text{ AU}$
Temperature	$\sim 10 \text{ K}$	Warm CO gas, 15-60 K

A highly dynamical protostellar core?

ALMA Cycle 3 Observations

Table: Specifications

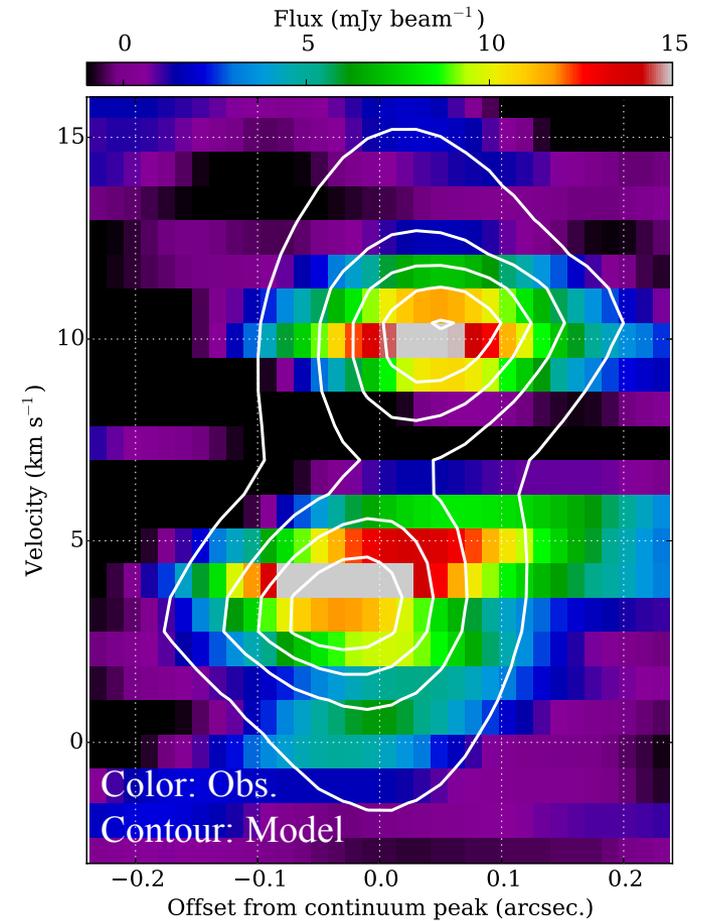
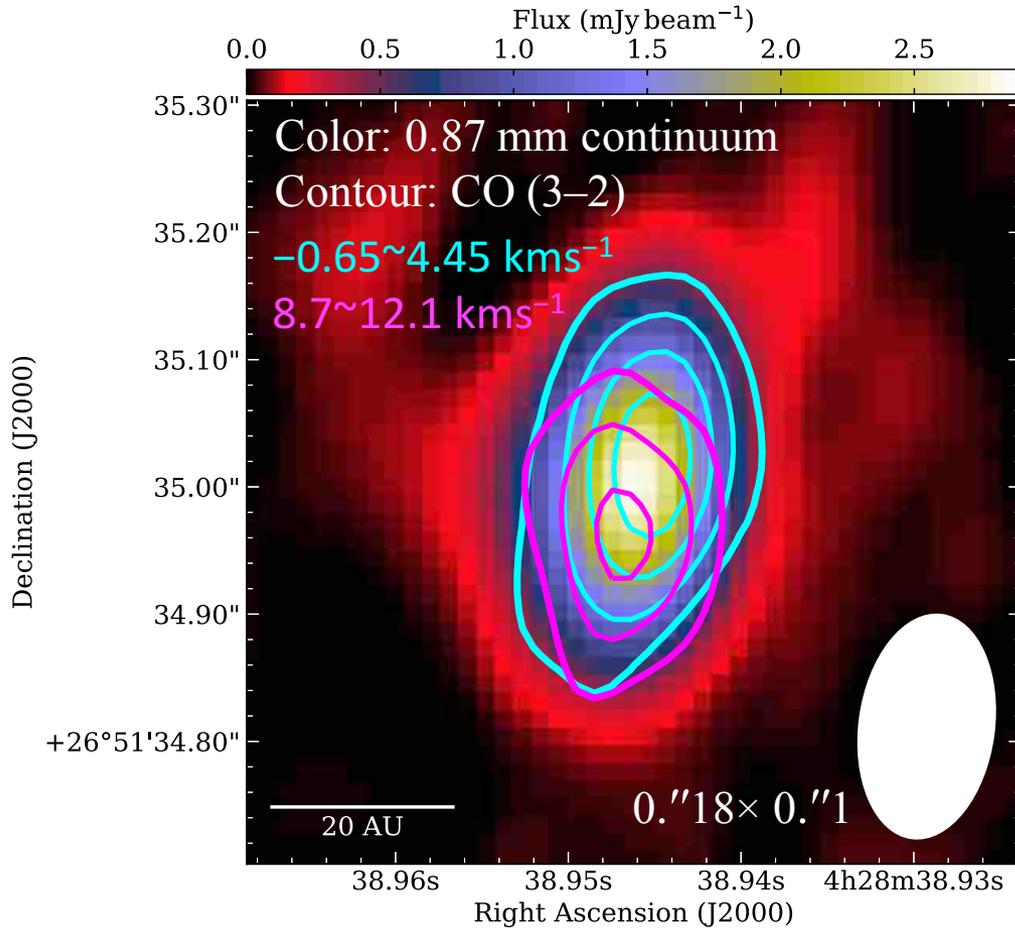
Period	ALMA Cycle 3
Target	MC27(=L1521F)
Beam size	0."18 x 0."1 (25 x 14 AU)
Velocity resolution	0.85 km/s
Lines	CO(3-2), H ¹³ CO ⁺ (4-3), C ¹⁷ O(3-2), 0.87 mm continuum

*ALMA 12m array alone (7m, TP observations in Cycle 1)

Main Results

1. $R \sim 10$ AU disk around $\sim 0.2 M_{\odot}$ protostar (Tokuda+17)
2. Warm CO gas generated by possible turbulent shocks (Tokuda+18)
 - warm (15–50 K) gas, very thin filaments, and compact clumps

A possible Keplerien disk around the VeLLO ?



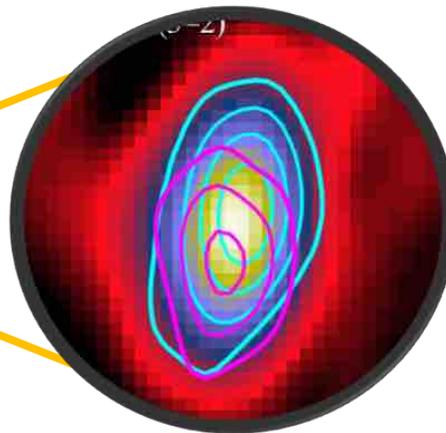
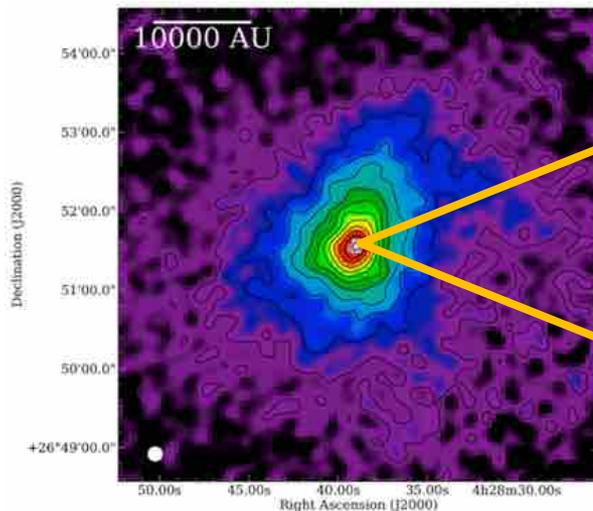
Constrained physical properties from simulated observations ^{12}CO and 0.87mm

M_*	M_{disk}	R_{disk}
$0.18 \pm 0.05 M_{\odot}$	$\sim 10^{-4} M_{\odot}$	$\sim 10 \text{ AU}$

議論:

最終的な星の質量が決まりつつある段階？

観測的特徴	得られる示唆
<ul style="list-style-type: none">▪ Low-luminosity ($<0.07 L_{\odot}$)▪ あったとしても小規模なoutflow	現在のAccretion rate は極小 ($<2e-8 M_{\odot}/yr$)
<ul style="list-style-type: none">▪ Spitzer で見られる散乱光	▪ 過去の大規模なaccretion の名残
<ul style="list-style-type: none">▪ 柱密度のプロファイル (折れ曲りの位置 3000 AU)	▪ 降着率 $2e-6 M_{\odot}/yr$ で $7e4 yr$ 成長すると $\sim 0.1 M_{\odot}$ の星となる
<ul style="list-style-type: none">▪ 高密度ガストレーサーが未検出▪ $\sim 10 AU$ のdisk半径	円盤が高密度環境から孤立しており、円盤を通じたaccretion は続かない？



分子雲コア中心の高密度環境から孤立した円盤のイメージ

議論:

最終的な星の質量が決まりつつある段階？

観測的特徴	得られる示唆
<ul style="list-style-type: none">・ Low-luminosity ($<0.07 L_{\odot}$)*¹・ あったとしても小規模なoutflow	現在のAccretion rate は極小 ($<2e-8 M_{\odot}/yr$)
<ul style="list-style-type: none">・ Spitzer で見られる散乱光	・ 過去の大規模なaccretion の名残
<ul style="list-style-type: none">・ 柱密度のプロファイル (折れ曲りの位置 3000 AU)	・ 降着率 $2e-6 M_{\odot}/yr$ で $7e4 yr$ 成長すると $\sim 0.1 M_{\odot}$ の星となる
<ul style="list-style-type: none">・ 高密度ガストレーサーが未検出・ $\sim 10 AU$ のdisk半径	円盤が高密度環境から孤立しており、円盤を通したaccretion は続かない？

*1

Cold accretion* (エントロピーを持ち込まない降着)
でないと説明できない(初期半径 $\sim 0.65 R_{\odot}$)

* References: e.g., Hartmann+97, Hosokawa+11, Baraffe+12, Vorobyov+17, Kunitomo+17

分子雲コア中心の高密度環境から
孤立した円盤のイメージ

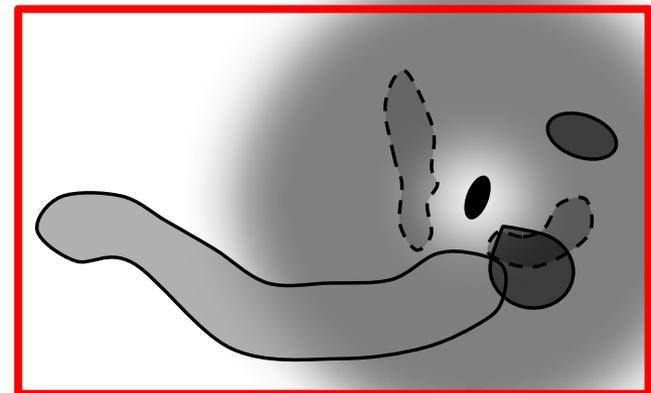
議論:

最終的な星の質量が決まりつつある段階？

観測的特徴	得られる示唆
<ul style="list-style-type: none">・ Low-luminosity ($<0.07 L_{\odot}$)・ あったとしても小規模なoutflow	現在のAccretion rate は極小 ($<2e-8 M_{\odot}/yr$)
<ul style="list-style-type: none">・ Spitzer で見られる散乱光	・ 過去の大規模なaccretion の名残
<ul style="list-style-type: none">・ 柱密度のプロファイル (折れ曲りの位置 3000 AU)	・ 降着率 $2e-6 M_{\odot}/yr$ で $7e4 yr$ 成長すると $\sim 0.1 M_{\odot}$ の星となる
<ul style="list-style-type: none">・ 高密度ガストレーサーが未検出・ $\sim 10 AU$ のdisk半径	円盤が高密度環境から孤立しており、円盤を通じたaccretion は続かない？

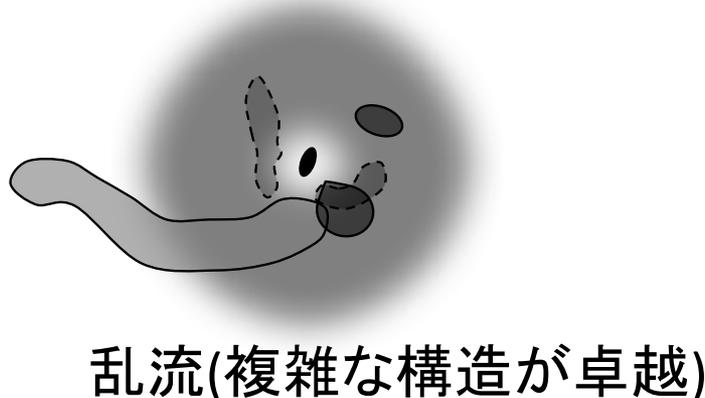
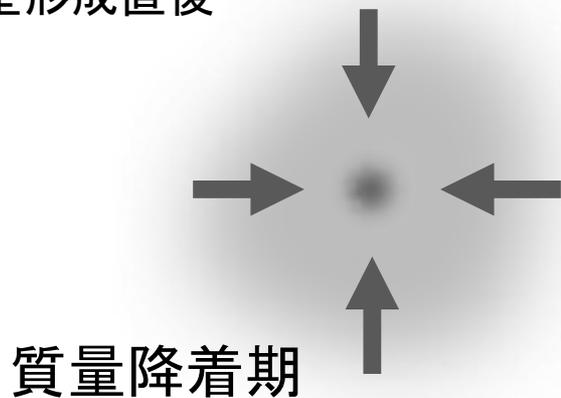
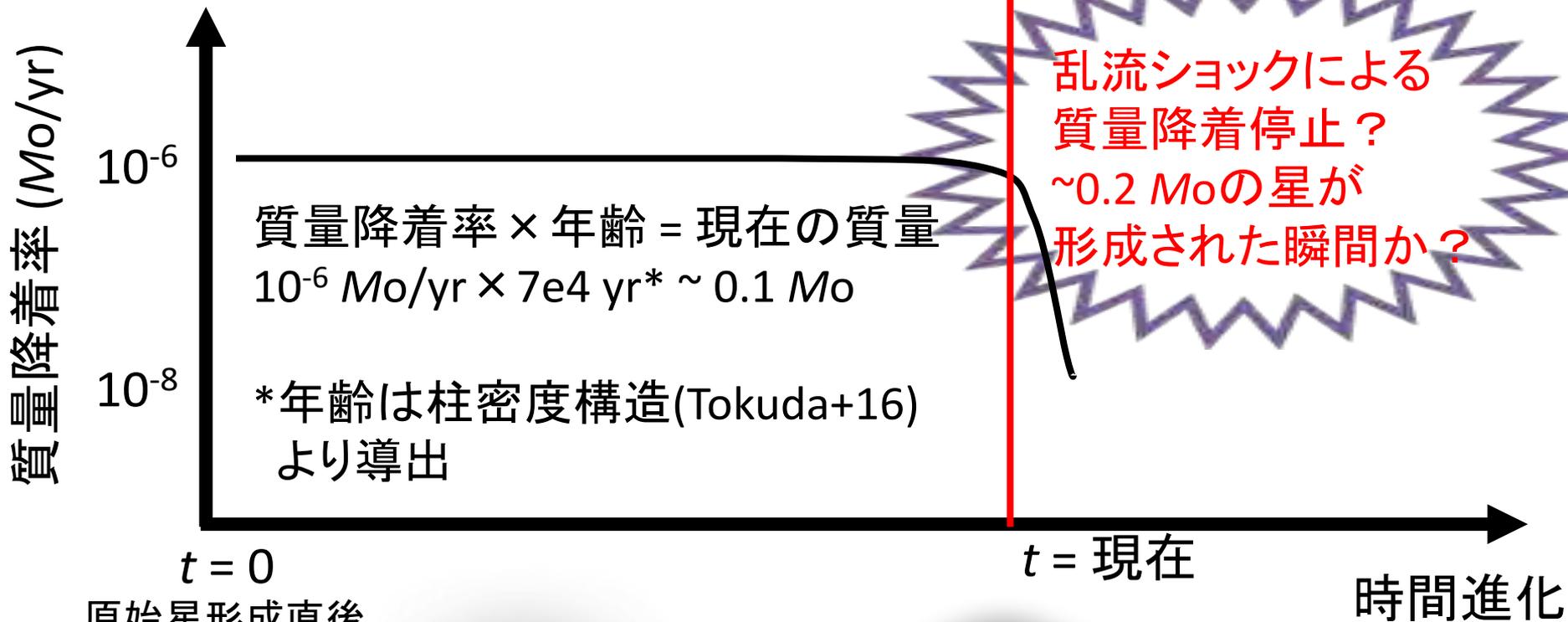
可能性

乱流状態にあるガスが円盤のエンベロープを剥ぎ取ってしまったか？

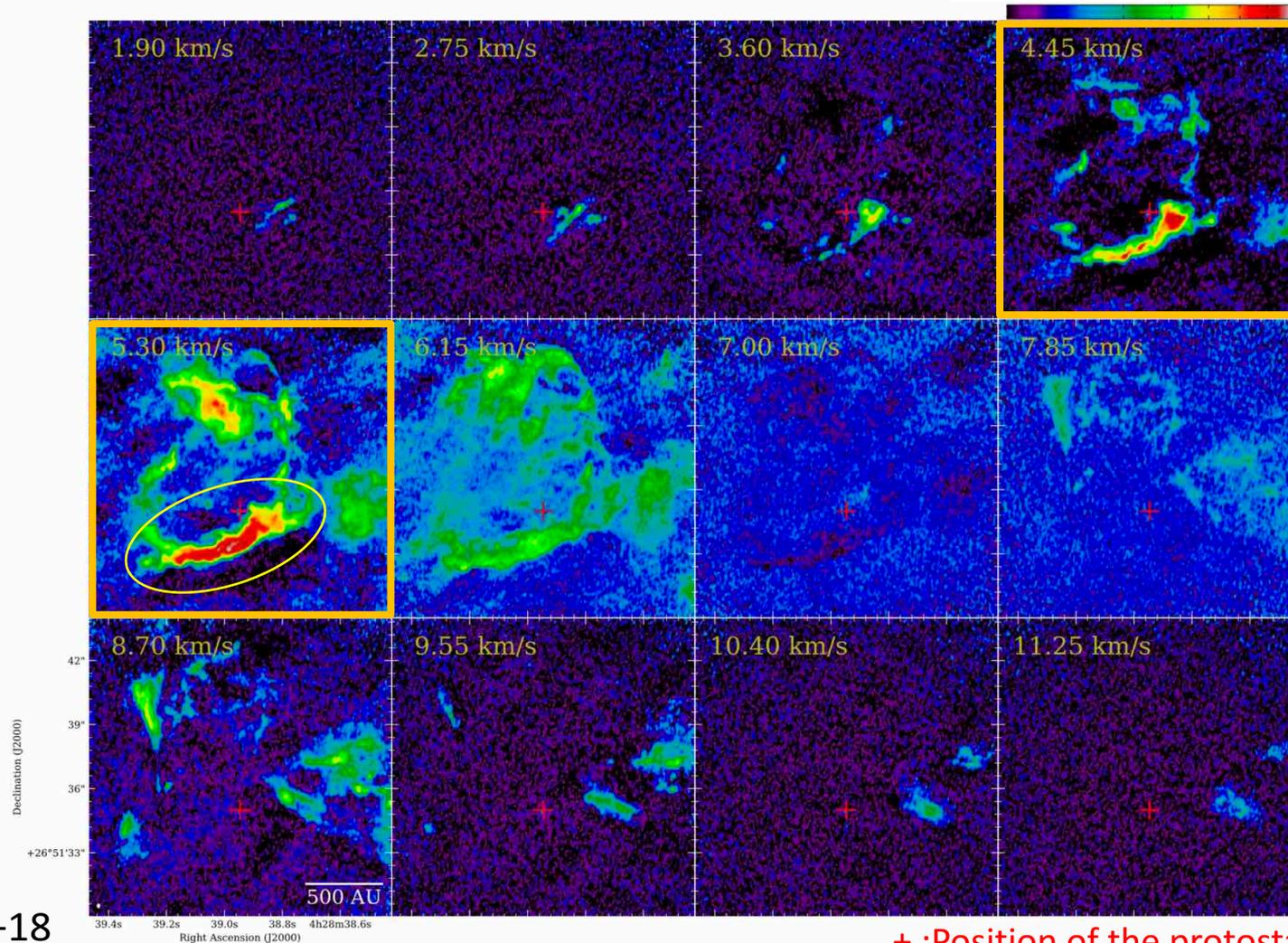


孤立円盤と周囲の複雑なガスの分布

議論:MC27/L1521Fの時間進化のイメージ



^{12}CO (3–2) channel map (12m+7m+TP) 0 10 30 60 (K)

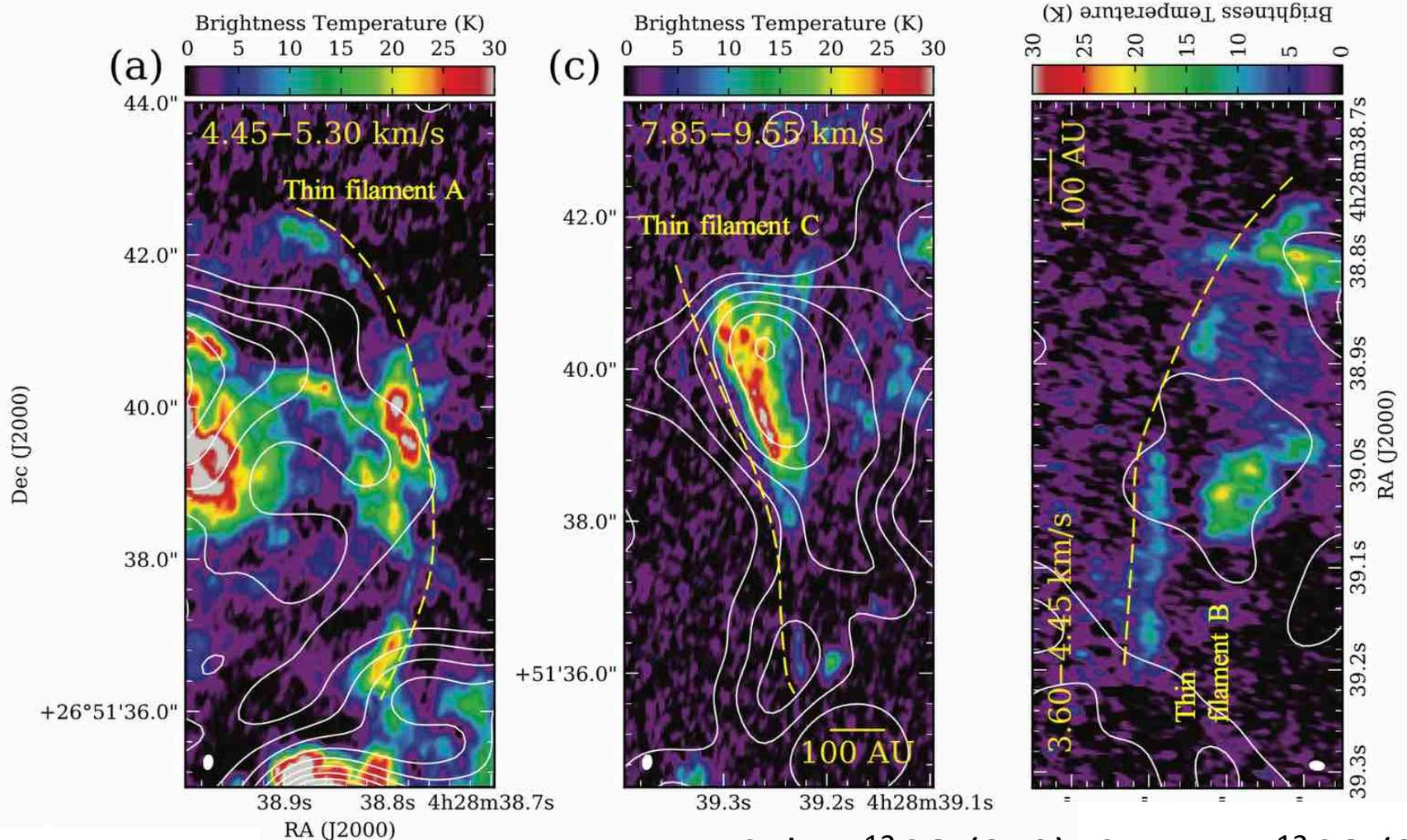


Tokuda+18

+ :Position of the protostar (MMS-1)

- Many **filamentary/clumpy** structures
- Warm CO gas (~ 60 K) around 4-5 km/s velocity range
=> Heating from the protostar? => Unlikely

Thin filaments in MC27 with the width scale of a few tens AU

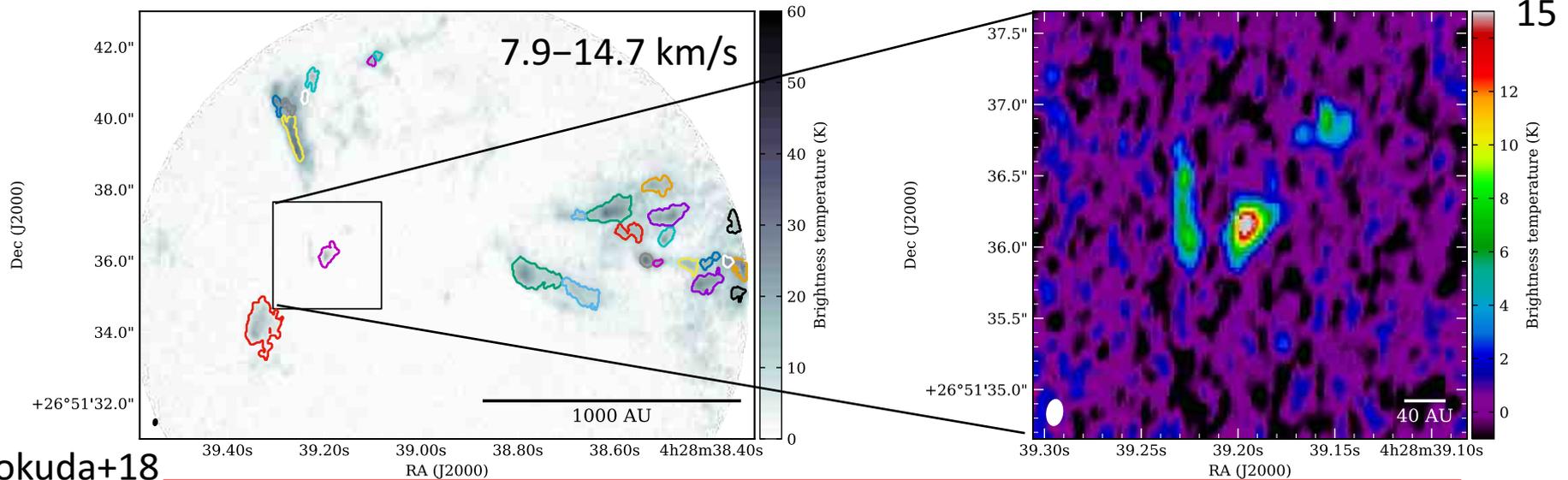
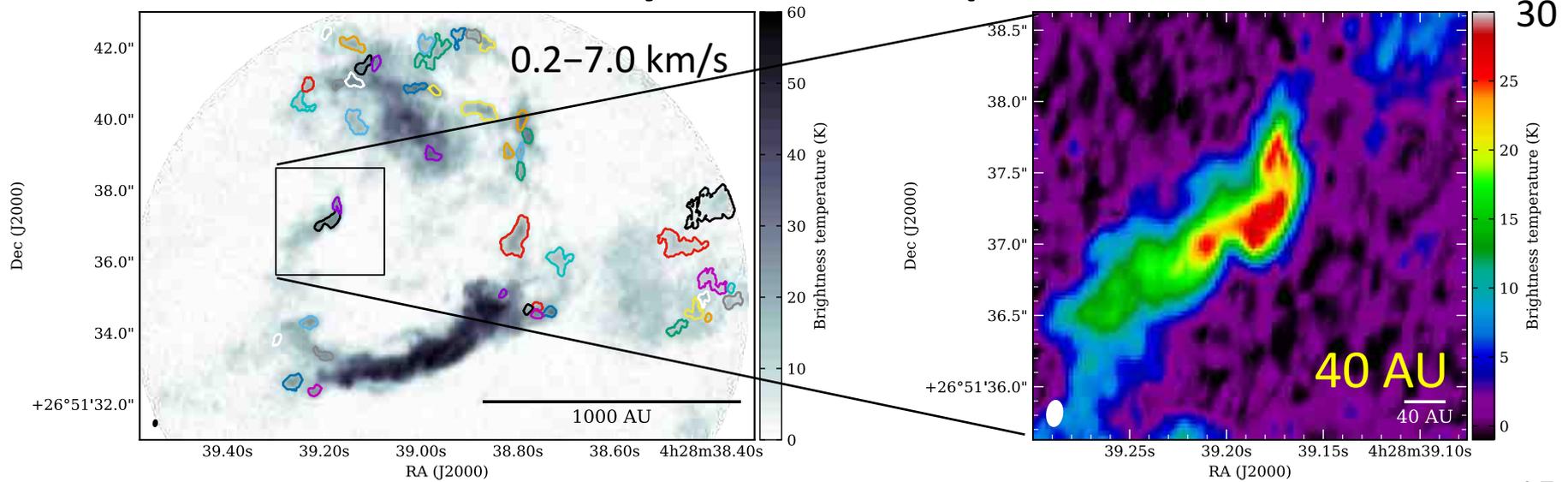


Tokuda+18

Color: ^{12}CO (3–2), Contour: ^{13}CO (2–1)

Several very thin filamentary gas => shocked layers ?

Tiny CO clumps



Tokuda+18

Two orders of magnitude smaller than Jeans length with the gas density of the parental core ($\sim 10^5\text{--}10^6\text{ cm}^{-3}$).

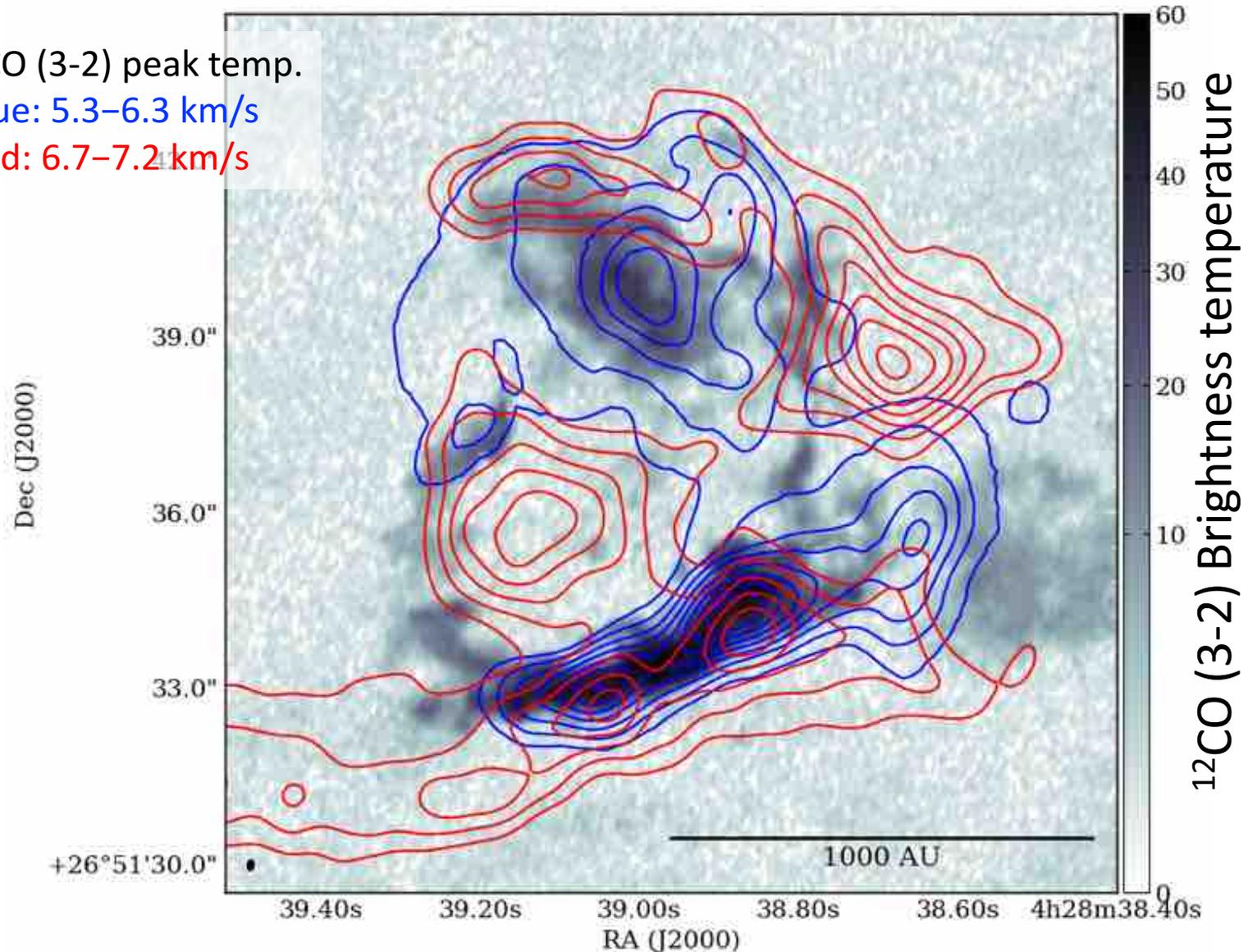
Discussion

Warm gas and filamentary gas delineate **interface layer** of two velocity components

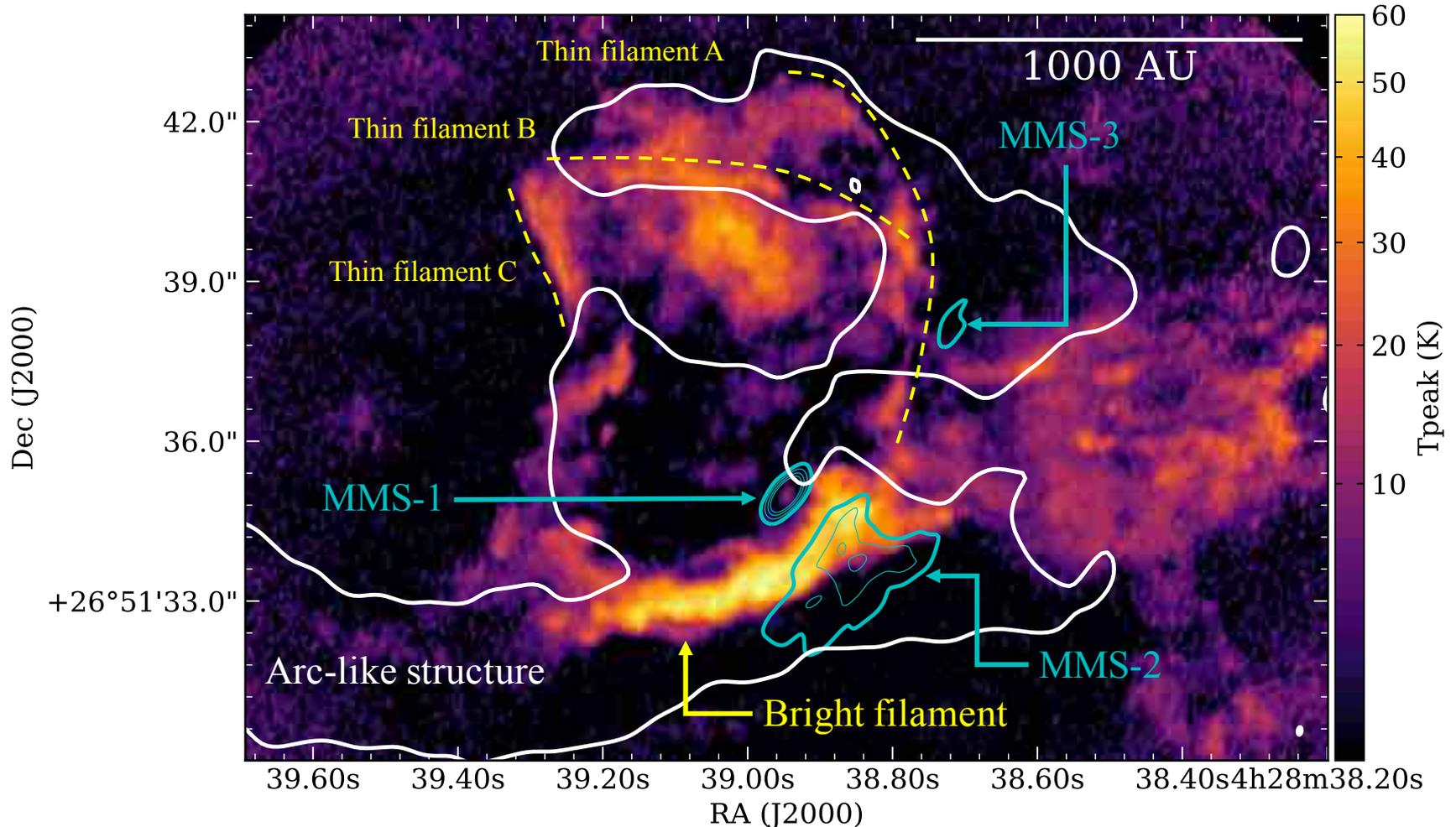
Gray: ^{12}CO (3-2) peak temp.

HCO+ Blue: 5.3–6.3 km/s

HCO+ Red: 6.7–7.2 km/s



Warm CO filamentary gas generated by possible turbulent shocks



Color: ^{12}CO (3-2)

White contour : HCO^+ (3-2)

Cyan contour: 0.87mm continuum

Tokuda+18

Possible interpretations:

- Warm gas formed by shock heating
- Thermal instability (Koyama+00, Aota+13)

Summary of MC27/L1521F

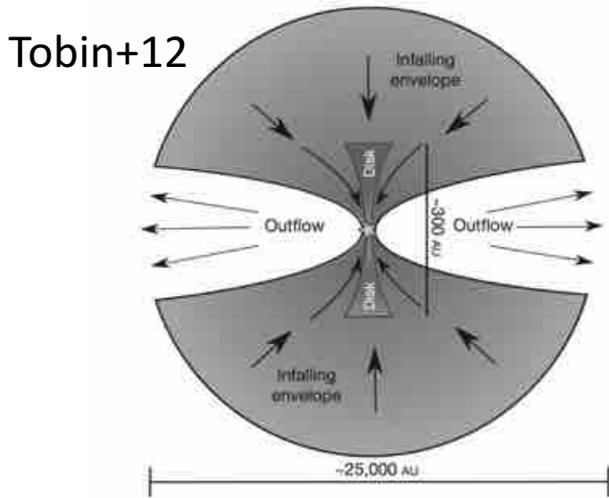
Before ALMA obs. v.s. After ALMA obs.

	Single-dish Obs.	ALMA Obs.
Shape	(Nearly) spherical	Complex structures
Central Density	$\sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$	$10^6\text{-}10^7 \text{ cm}^{-3}$ (MMS2,3)
Single or Multiple?	Single (VeLLO)	(Possible) Multiple
Outflow evidence	Scattered light	Compact molecular outflow?
Protostellar mass	$< 0.1 M_{\odot}$?	$\sim 0.2 M_{\odot}$
Accretion rate	$10^{-5}\text{-}10^{-6} M_{\odot}/\text{yr}$?	$< 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr}$
Disk size	Large ($> 100 \text{ AU}$) ?	$R \sim 10 \text{ AU}$
Temperature	$\sim 10 \text{ K}$	Warm CO gas, 15-60 K

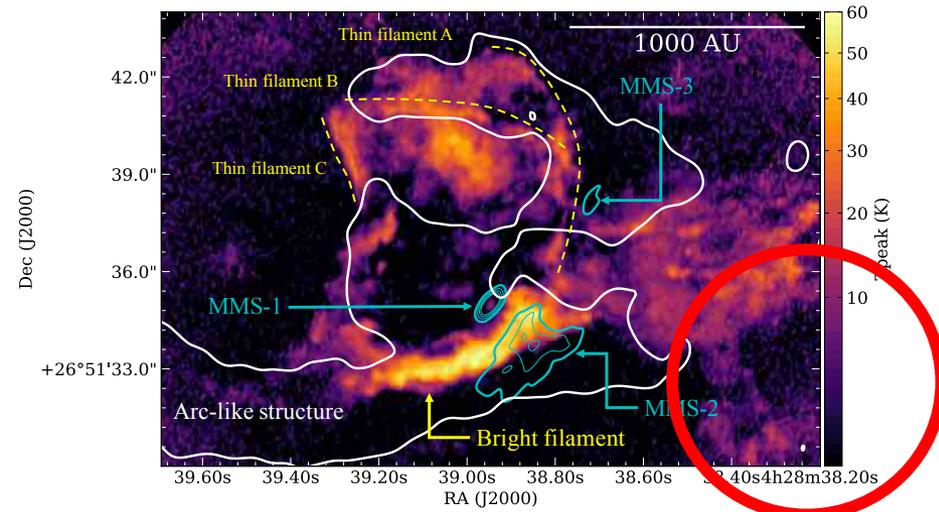
Possible origin: Dynamical (turbulent) motion in this system?

MC27のここまでのまとめ

ALMA View of A Dense Core, MC27/L1521F, with ~ 20 AU Resolution



教科書的な原始星コア



VeLLO + dense cores + arc-like gas
+ Warm CO gas + tiny clumps

その他原始星コアのALMA観測の現状

1. 定性的には教科書的な描像の天体も存在(L1527, B335など)
2. MC27のように複雑な分布を持った原始星コアも少なからずありそう
3. VeLLO の正体について=>実はsub-solar massまで育った原始星?
(see also Lee et al. 2018, ただし、著者らは信じていなさそう)

ALMA Cycle 5 Observations

Table: Specifications

Period	ALMA Cycle 5 (P.I., Tokuda, Grade A)
Target	MC27(=L1521F)
Beam size	0."038 x 0".024 (5 x 3 AU) =>ALMAの現状の限界
Velocity resolution	~1 km/s
Lines	1.3 mm continuum, CO(2-1), ¹³ CO(2-1), C ¹⁸ O(2-1)

結果

1. 1.1mm 連続波でdiskを空間分解し、クランプ状構造を発見
2. ¹²COの速度構造 (はあまり良い追加情報なし...)

Discussion

Any comments are welcome!!

・MC27の特徴まとめ

- 多重星形成の兆候, アーク構造
- 中心集中した密度プロファイル
- コンパクトdisk <10 AU
- 質量~0.2 Moの中心星 (降着活動の終焉を見ているか?)
- 暖かい(15–60 K) COガス: 乱流による衝撃波加熱?

動的な星形成現場

- ・その中心で見た非対称なdisk 構造の起源/特徴について
 - 周囲の小質量クランプが降り積もっている?

=>例えば、Cycle 7でどのような観測を行えば良いか？

- 分解能はもうこれ以上稼げない
- もう一回同じ設定で観測もあり？
- 例えば、[CI]などはこの天体で役に立ちそうかどうか？