

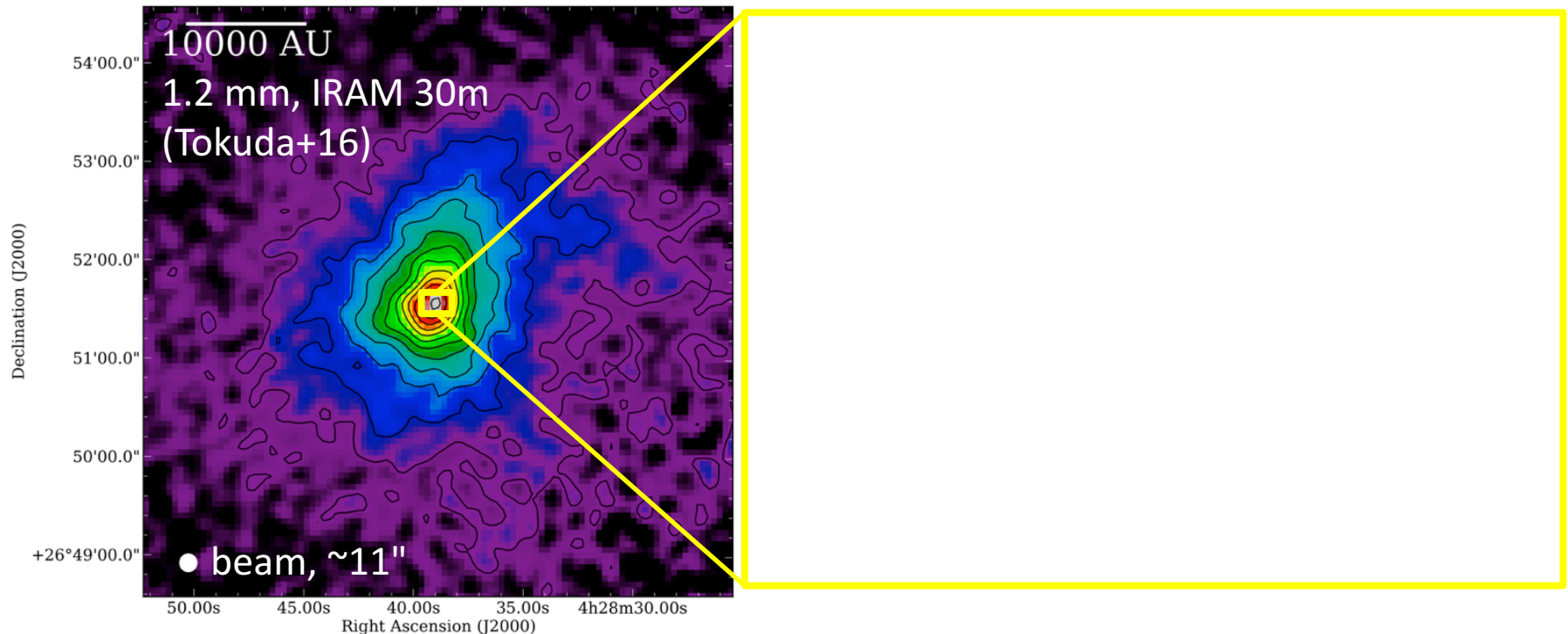
ALMAによる近傍星形成領域における 高密度分子雲コアの観測

Tokuda+14, ApJL, 789, L4 Tokuda+18a, ApJ submitted

Tokuda+16, ApJ, 826, 26 Tokuda+18b, in prep.

Tokuda+17, ApJ, 849, 101

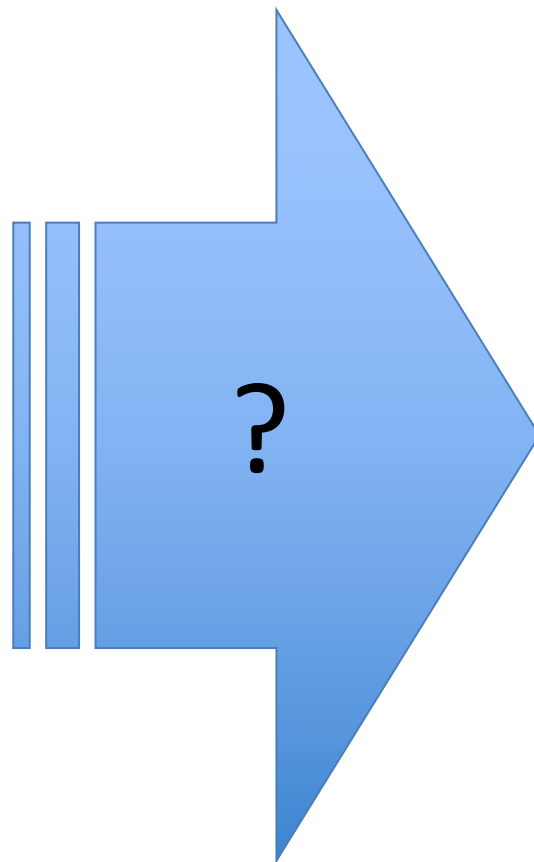
徳田一起 (大阪府立大学/NAOJ) 他



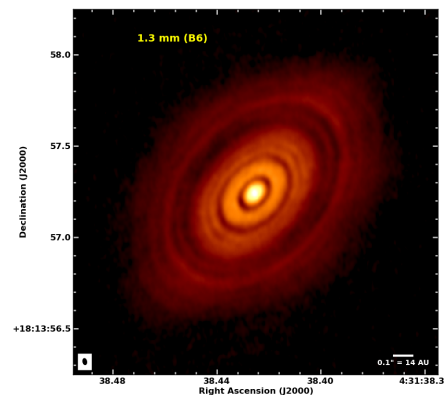
20AU分解能で見た分子雲コア (Tokuda+18a submitted)

(ALMAを使った) 星形成研究の最終目標

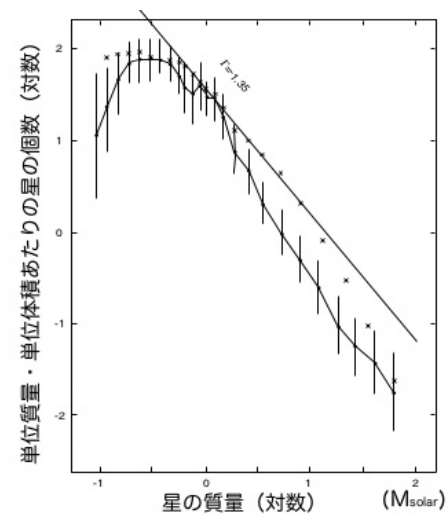
分子雲 (コア)



この段階を理解



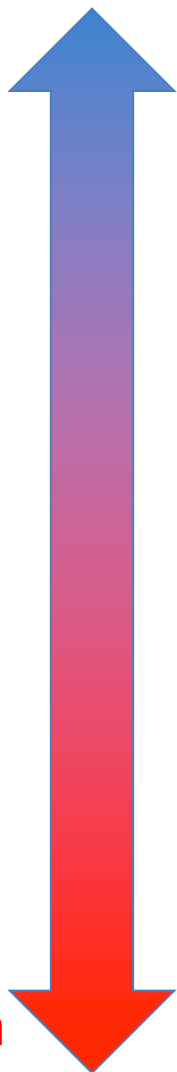
(多様な)原始星+円盤



多様な星質量

ALMAによる様々な空間スケールの研究 太陽系近傍の分子雲コア

Low



空間
周波数

1. ACA stand alone モード
高密度分子雲コアサーベイ

日本が作った
モリタアレイ



ACA 7m array

2. 高分解能+広空間周波数

星形成分野全般に
重要な観測モード



Main array (12m array)

3. $\sim 0.''1$ (~ 20 AU) 分解能

分子輝線の実質的な
最高分解能

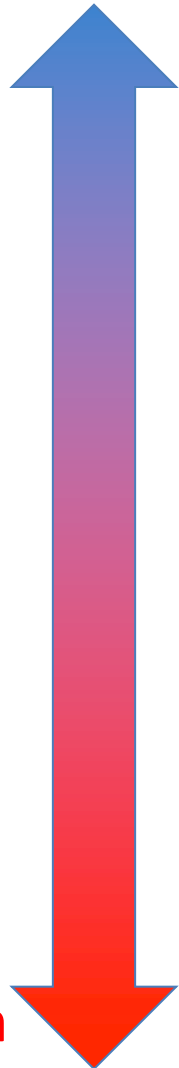
- Future work

$0.''03$ (~ 4 AU) 分解能 (ALMA Cycle 5 program, Grade A)

High

ALMAによる様々な空間スケールの研究 太陽系近傍の分子雲コア

Low



空間
周波数

1. ACA stand alone モード
高密度分子雲コアサーベイ

日本が作った
モリタアレイ



ACA 7m array

2. 高分解能+広空間周波数

星形成分野全般に
重要な観測モード

3. $\sim 0.''1$ (~ 20 AU) 分解能

分子輝線の実質的な
最高分解能



Main array (12m array)

- Future work

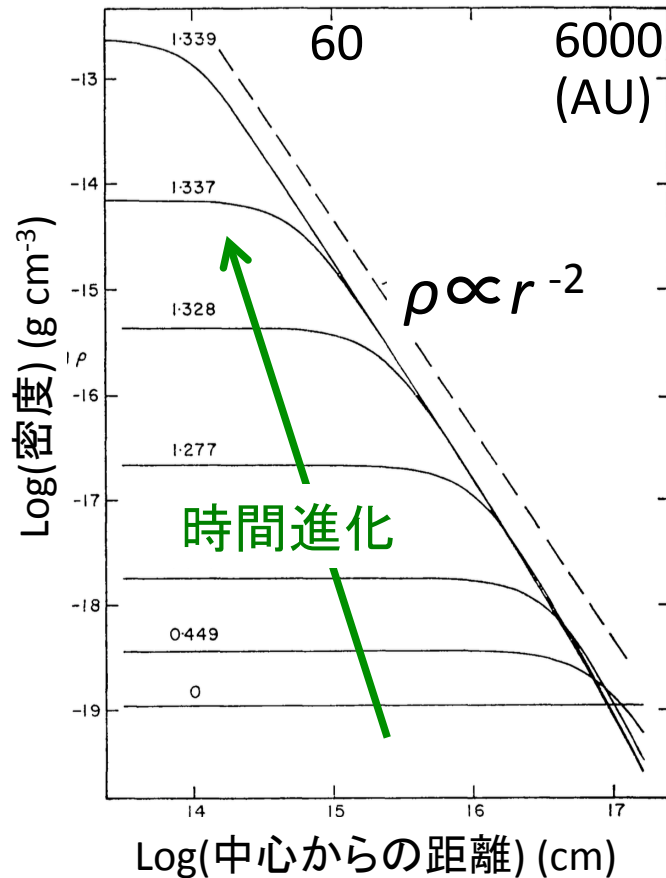
$0.''03$ (~ 4 AU) 分解能 (ALMA Cycle 5 program, Grade A)

High

分子雲コアの進化

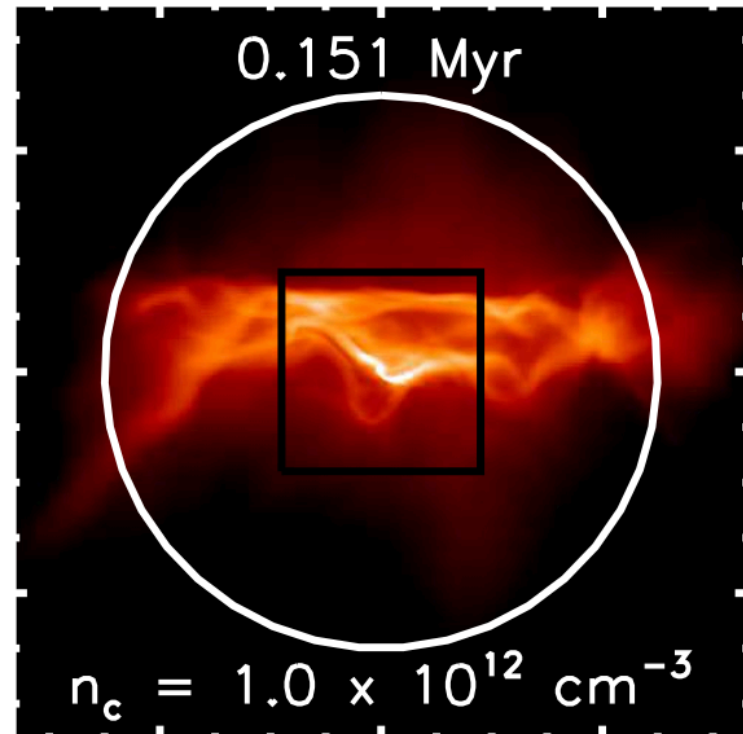
星形成直前の分子雲コアを求めて

Simulationの密度分布(sink挿入直前)



e.g., Larson 1969, Masunaga & Inutsuka 1998

一様密度球の進化

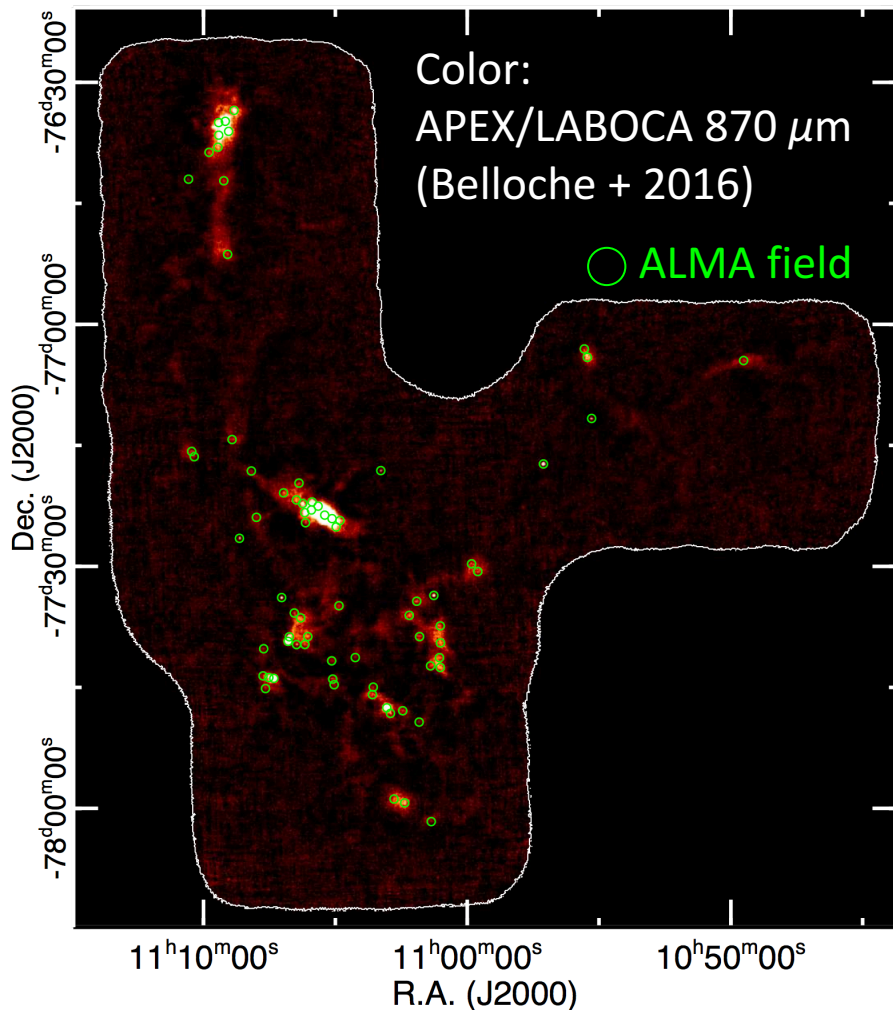


-3000 0 3000
X Offset (AU) Dunham+16

Turbulent fragmentation

c.f., Padoan & Nordlund+02; Offner+10

Dense core survey in Chamaeleon I



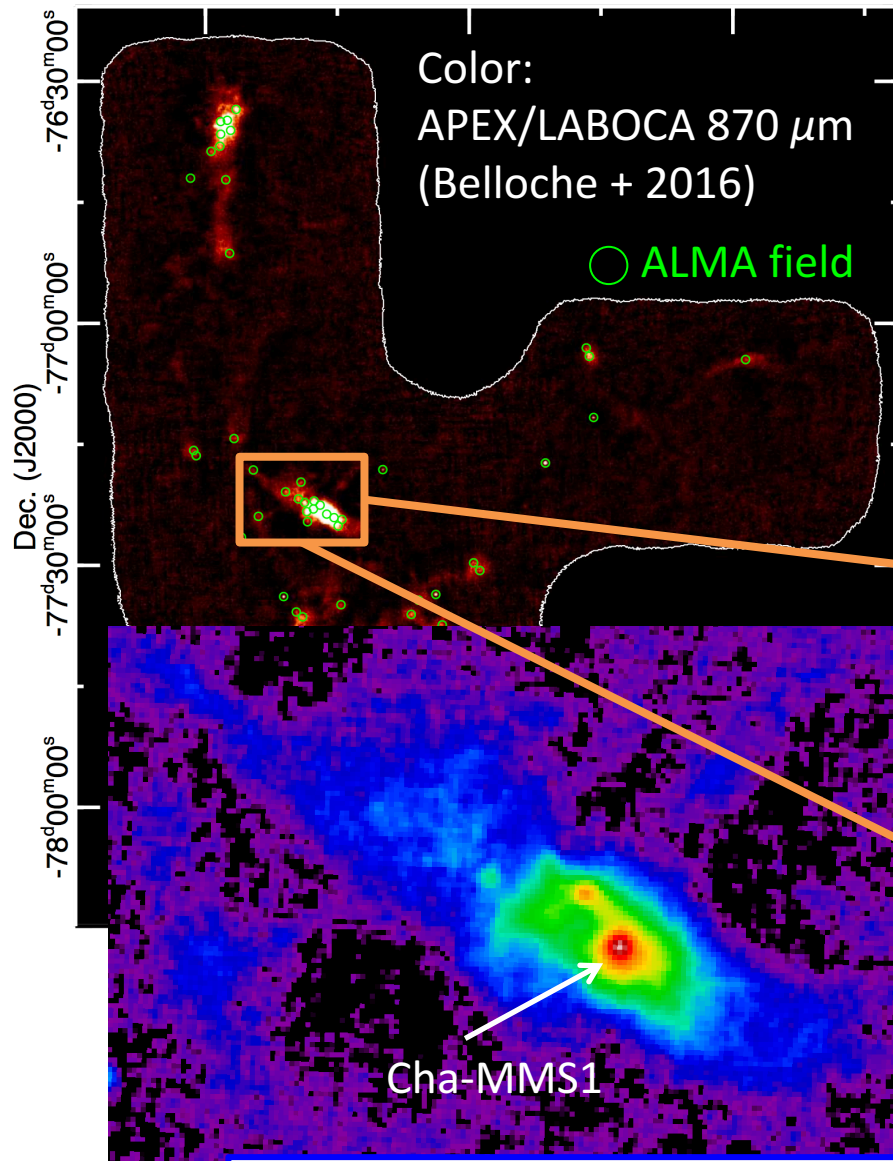
The 56 starless cores should have yielded at least two detections, assuming the following:

- Turbulent fragmentation
- Star formation is continuous, and all of starless cores are collapsing
- Timescales are proportional to the free-fall

None detected in all starless cores

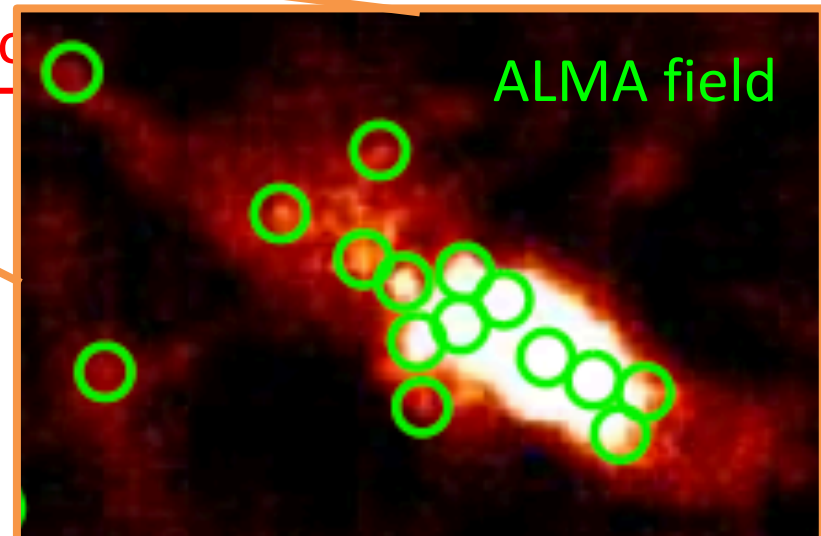
(Dunham et al. 2016)

Dense core survey in Chamaeleon I



The 56 starless cores should have yielded at least two detections, assuming the following:

- Turbulent fragmentation
- Star formation is continuous, and all of starless cores are collapsing
- Timescales are proportional to the free-fall

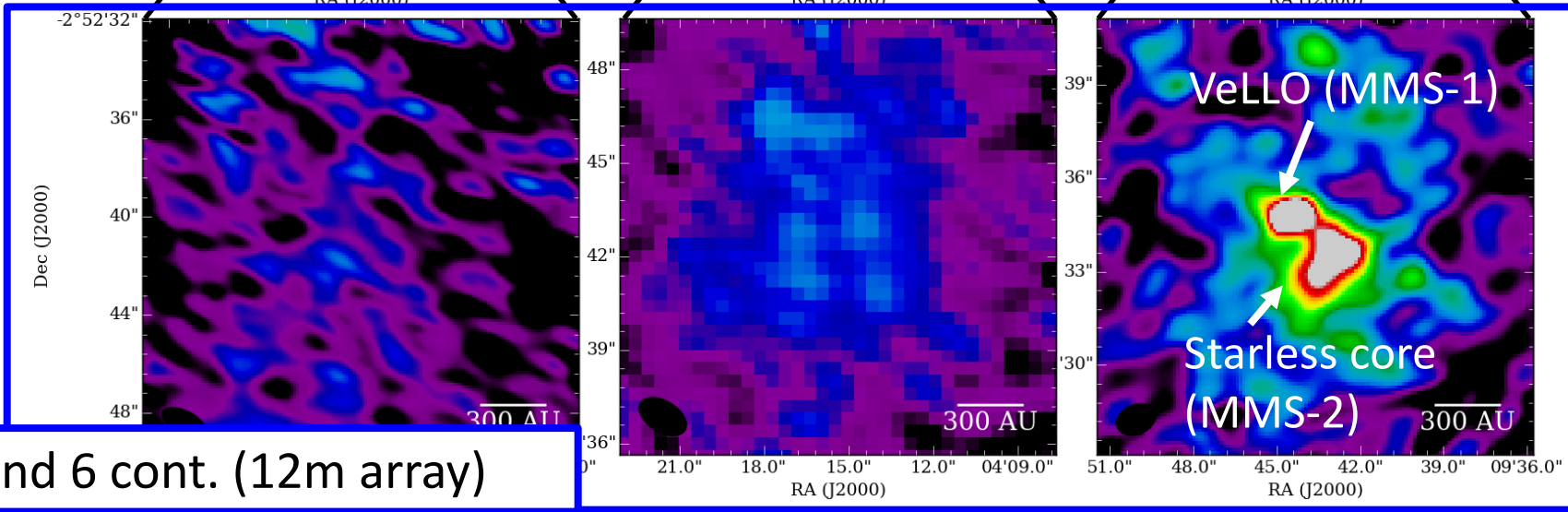
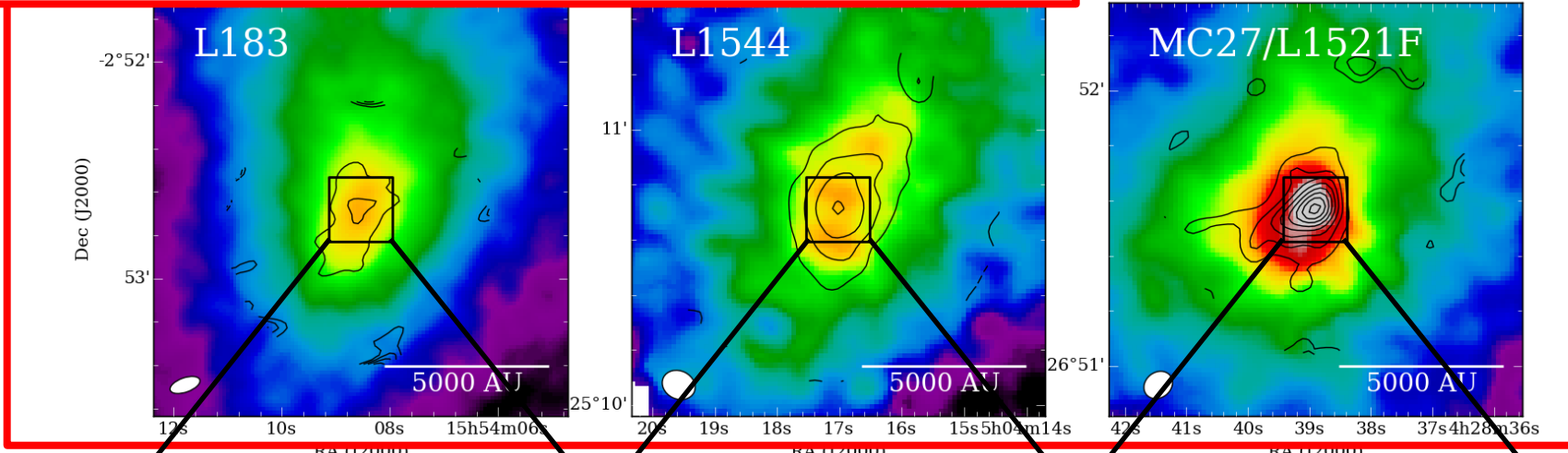


The observed point also includes the local peaks of the cores

Archival studies of dense cores

L183 (P.I. Bernard), L1544(P.I. Caselli)
MC27/L1521F (Tokuda+16)

Color: JCMT/SCUBA, Contour: Band6 cont. (ACA)



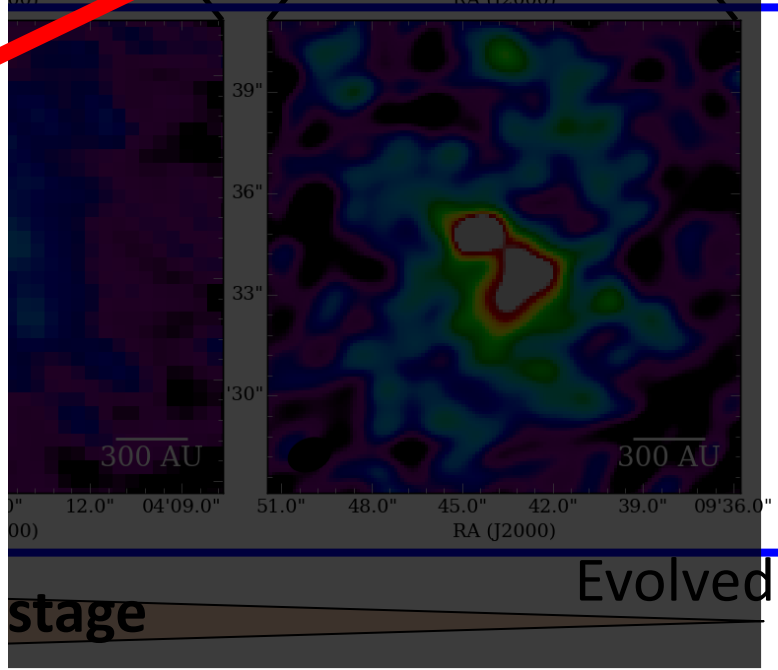
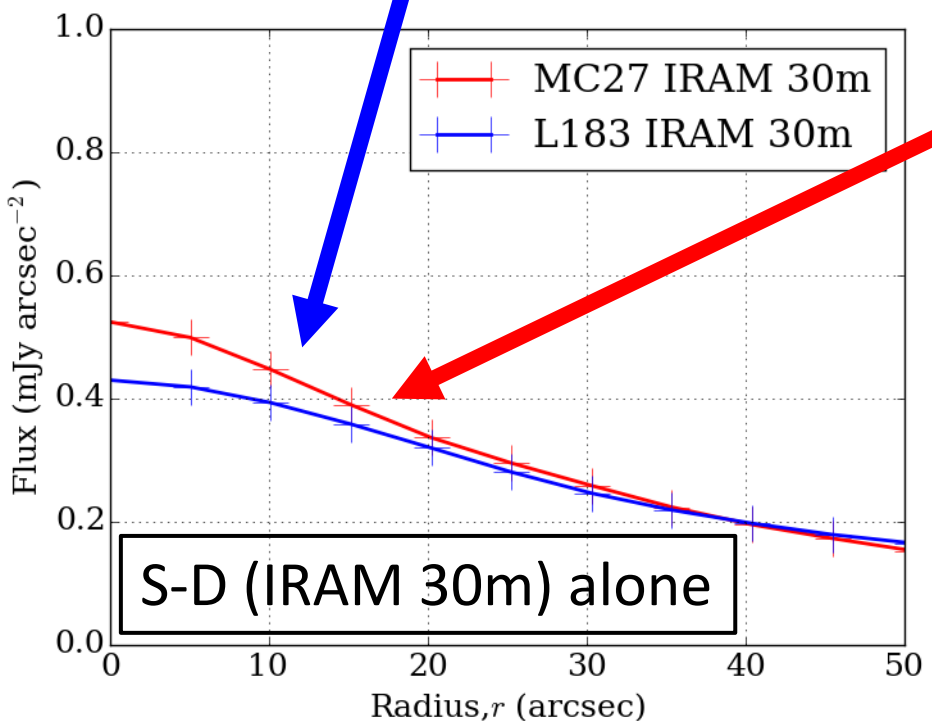
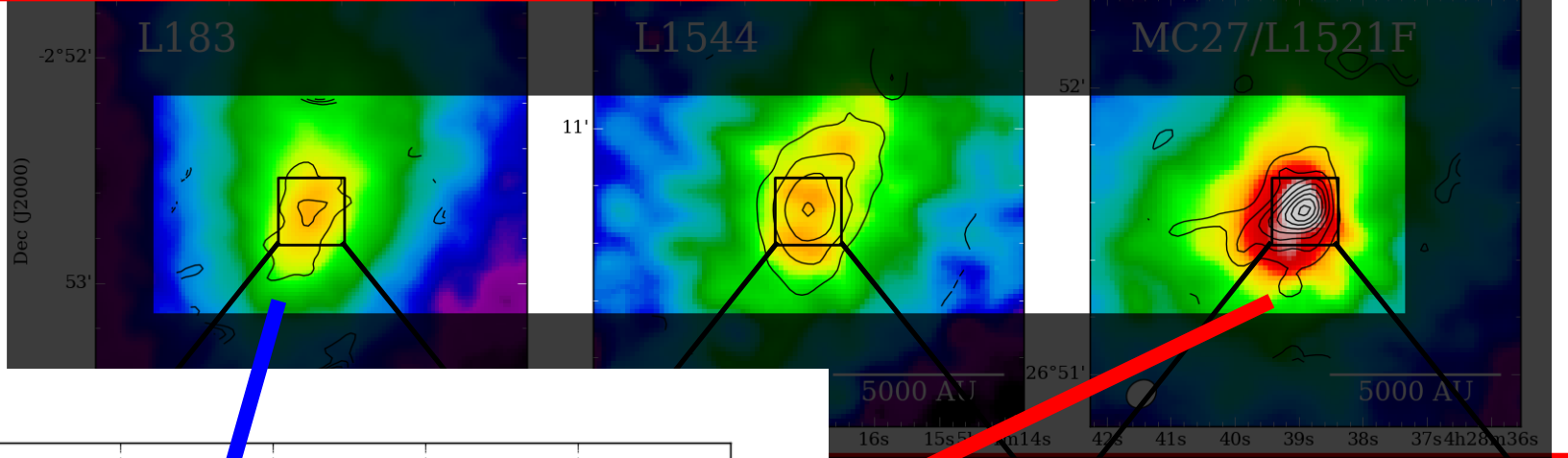
Band 6 cont. (12m array)



Archival studies of dense cores

L183 (P.I. Bernard), L1544(P.I. Caselli)
MC27/L1521F (Tokuda+16)

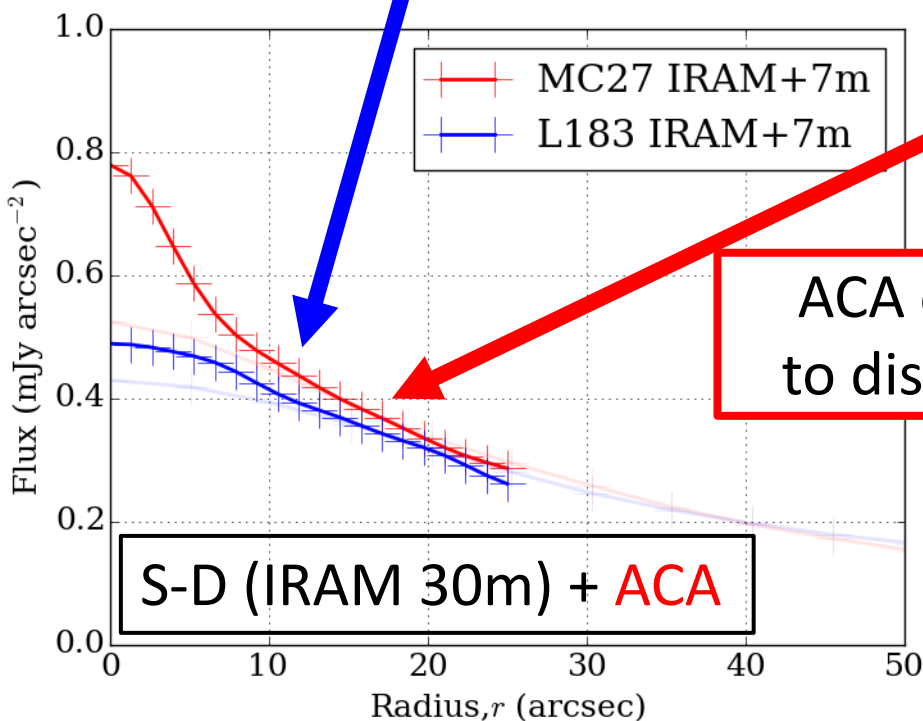
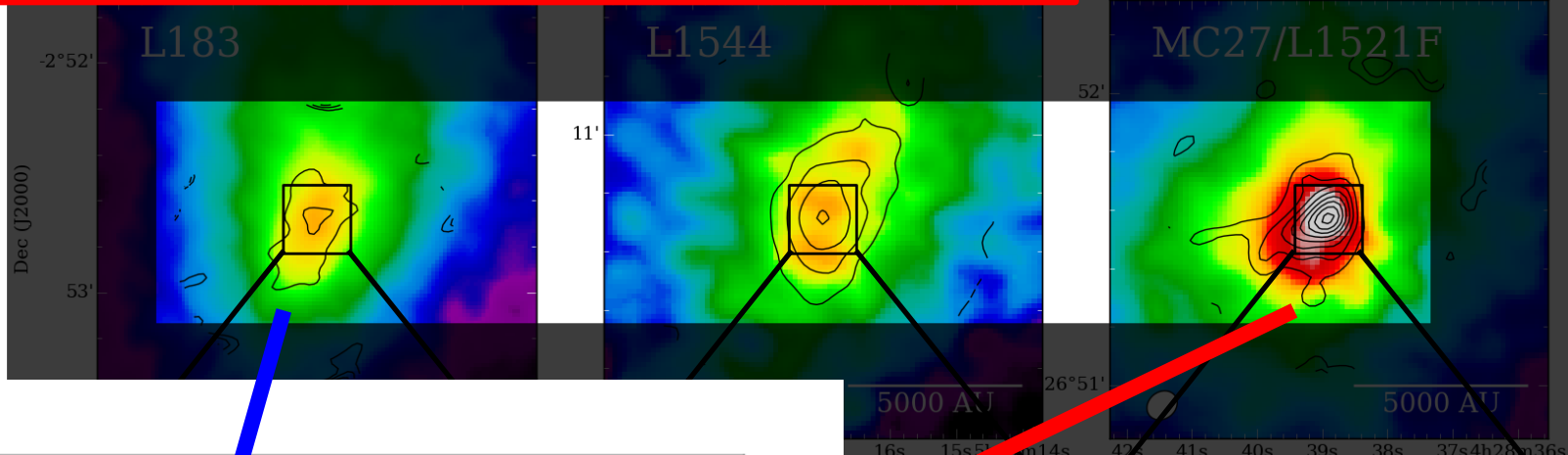
Color: JCMT/SCUBA, Contour: Band6 cont. (ACA)



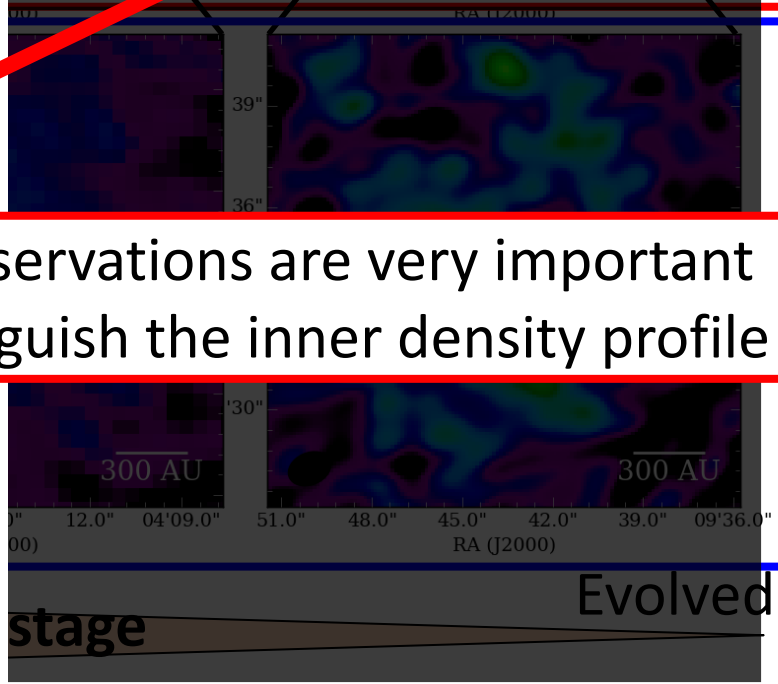
Archival studies of dense cores

L183 (P.I. Bernard), L1544(P.I. Caselli)
MC27/L1521F (Tokuda+16)

Color: JCMT/SCUBA, Contour: Band6 cont. (ACA)



ACA observations are very important to distinguish the inner density profile

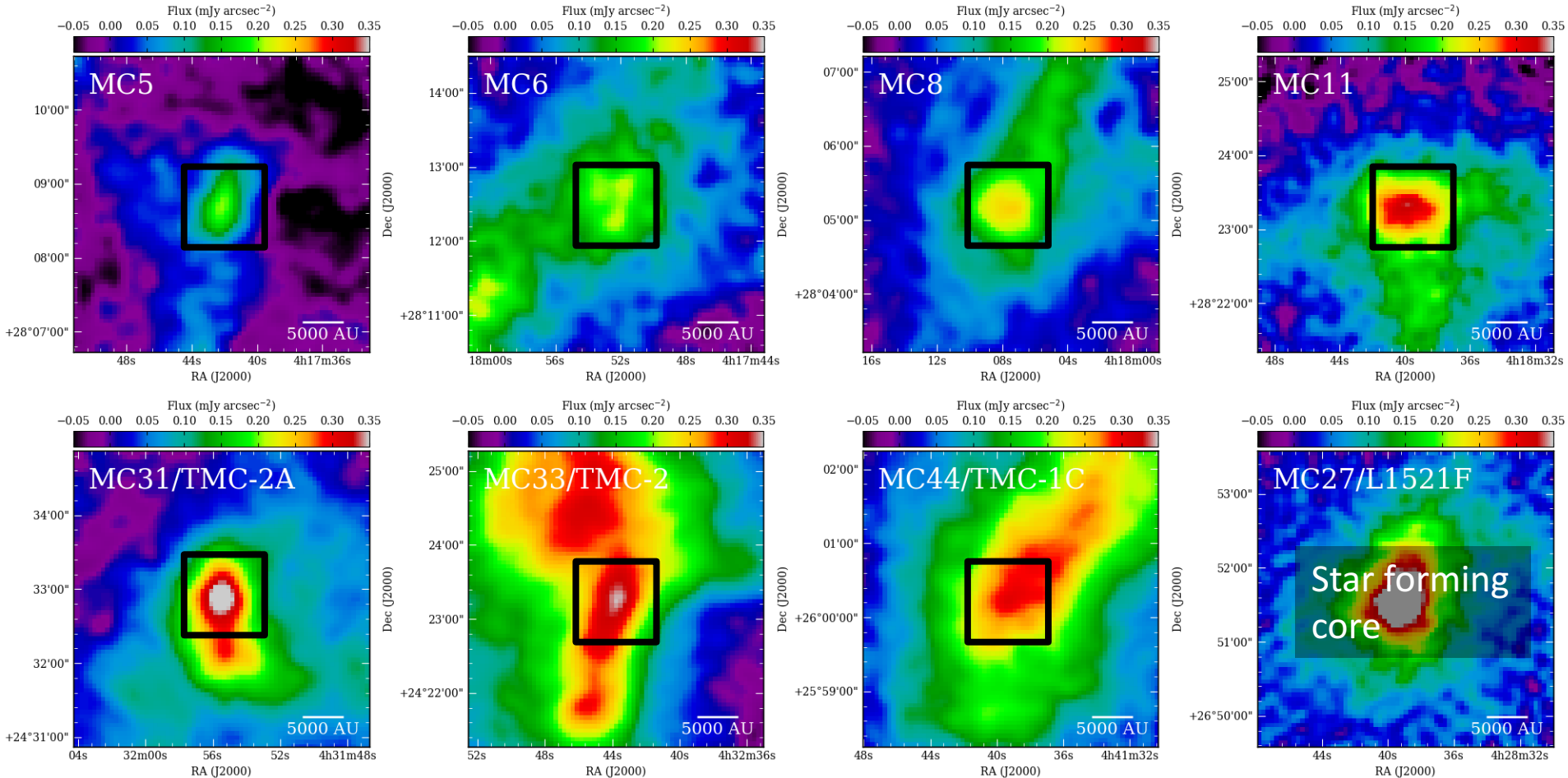


stage Evolved

ACA stand-alone mode survey toward starless cores

(Cycle 4 program, P.I., K. Tachihara)

Evolved starless cores in Taurus



 ACA field

1.2 mm dust continuum (IRAM 30-m)

ACA stand-alone mode survey toward starless cores

(Cycle 4 program, P.I., K. Tachihara)

Evolved starless cores in Taurus

Non-detection

Non-detection

Non-detection

Star forming
core

1.2 mm dust continuum (ACA 7m array)

High-density cores with (possible) substructures are revealed with ACA

Features of MC5

Star formation	No infrared point source
Column density, $N(\text{H}_2)$	$\sim 10^{22} \text{ cm}^{-2}$
Total mass	$\sim 0.2 M_{\odot}$
Velocity dispersion, σ_{v_obs}	$\sim 0.13 \text{ km/s}$
Column density profile	Steep ($\propto r^{-0.5-1}$)
Chemical properties	$N(\text{N}_2\text{D}^+)/N(\text{N}_2\text{H}^+) \sim 0.25$

→ Possible formation site of
brown dwarf/very low-mass star(?)

1.2 mm continuum (ACA)

One of the most evolved low-mass prestellar core in Taurus?

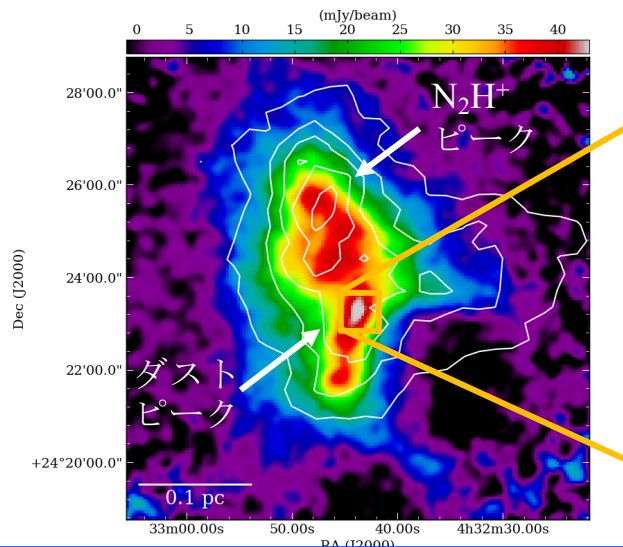
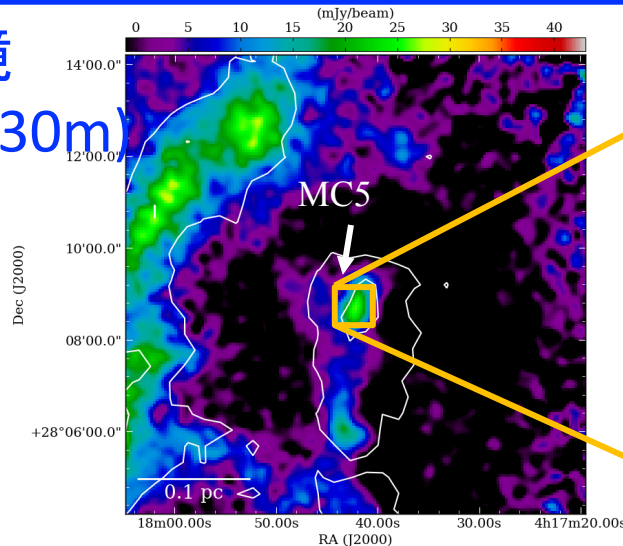
NRO 45m observations toward MC5 with T70 receiver

One of the most evolved low-mass prestellar core in Taurus?

星なし分子雲コアのsubstructure

単一鏡

(IRAM 30m)



うねうねした分布

ALMA

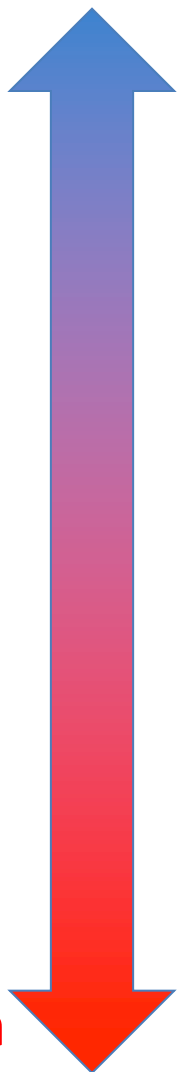
7m array

複数のピーク

Substructure の起源 : 重力不安定による分裂 (c.f. Ohashi+18)かそれとも乱流か？ **単純な球/軸対称なコアばかりではない。**

ALMAによる様々な空間スケールの研究 太陽系近傍の分子雲コア

Low



空間
周波数

1. ACA stand alone モード
高密度分子雲コアサーベイ

日本が作った
モリタアレイ



ACA 7m array

2. 高分解能+広空間周波数

星形成分野全般に
重要な観測モード

3. $\sim 0.''1$ (~ 20 AU) 分解能

分子輝線の実質的な
最高分解能



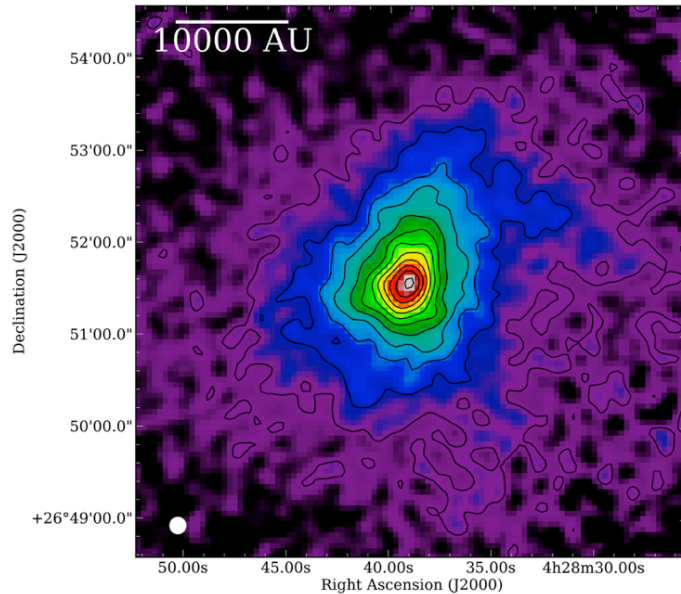
Main array (12m array)

- Future work

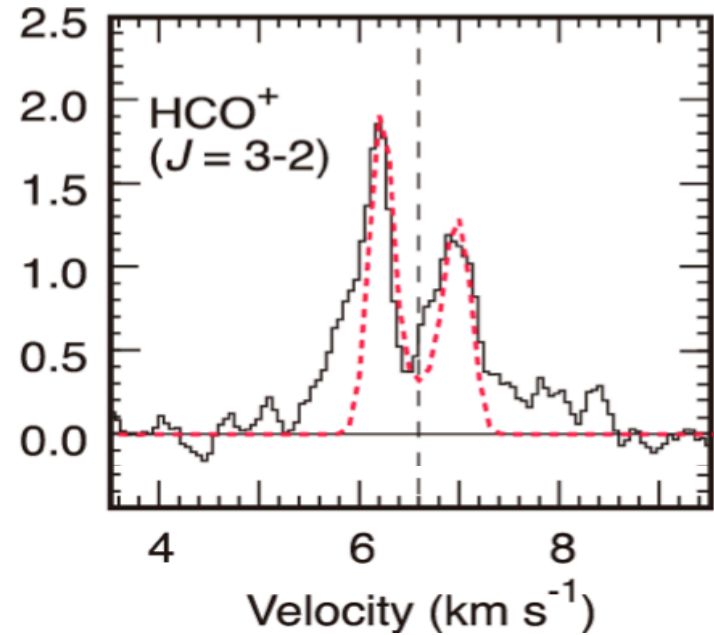
$0.''03$ (~ 4 AU) 分解能 (ALMA Cycle 5 program, Grade A)

High

Introduction MC27/L1521Fとは何者か？



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



Onishi+ 1999

▪ Features

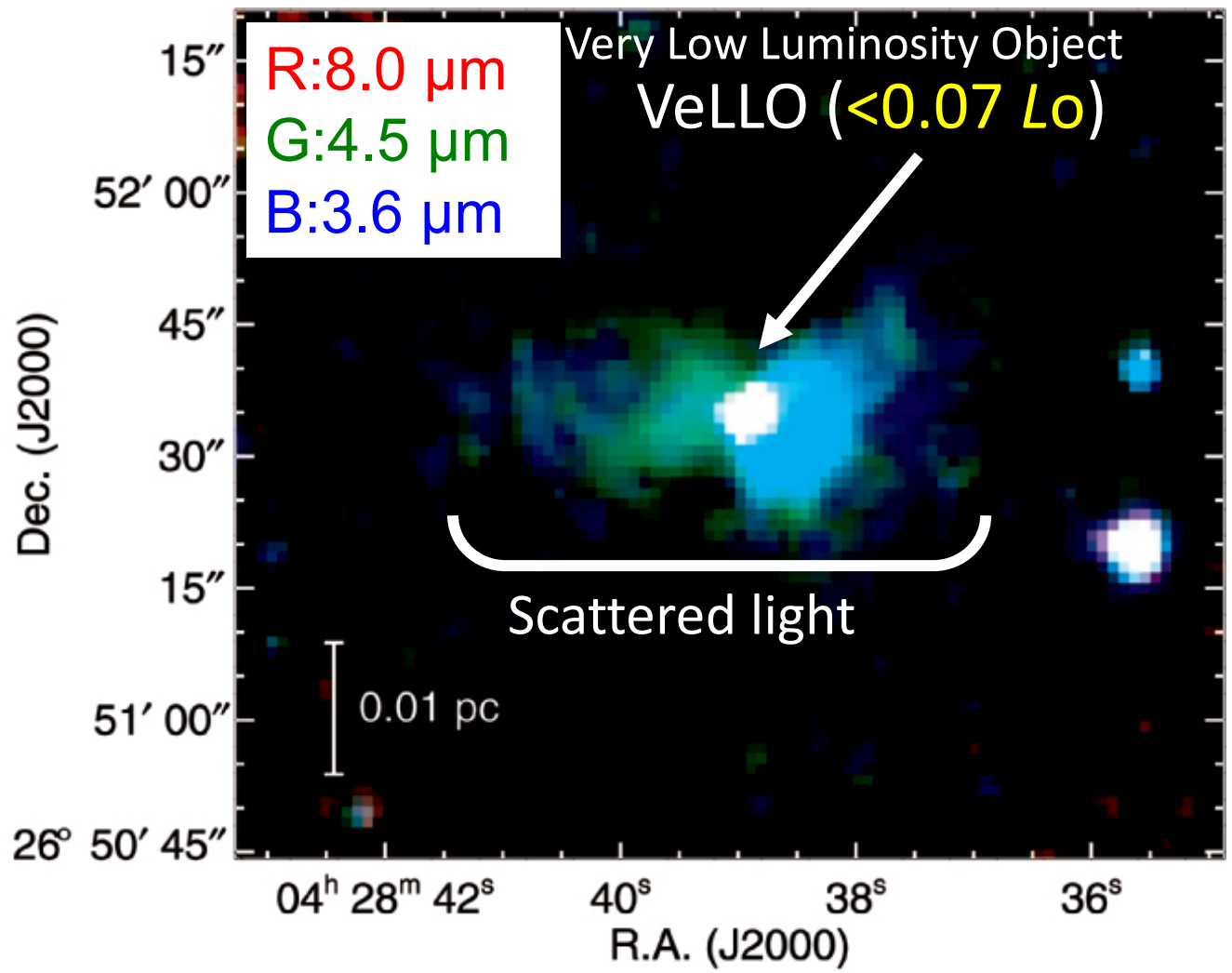
1. 近傍小質量星形成領域の中では最も密度が高い分子雲コアの一つ (e.g. Onishi+99,02, Crapsi+04)
2. 中心でインフォールとアウトフローの兆候か？ (e.g. Onishi+99)

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

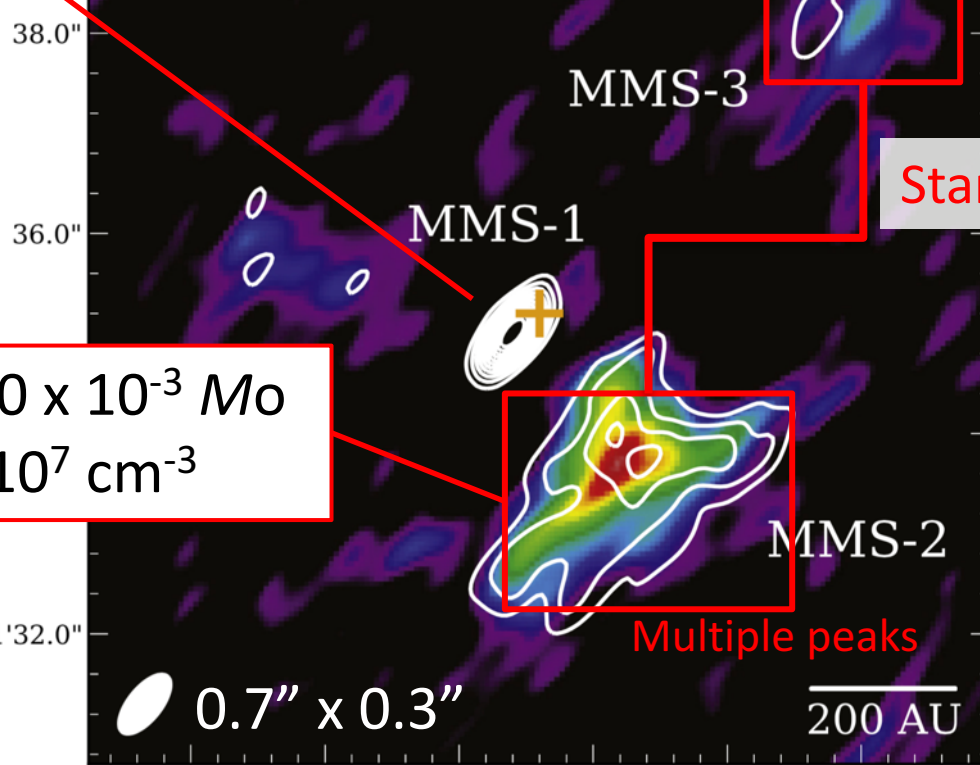
Protostar and condensations at the center of the core

(Tokuda+14,16)

MMS-1 (Point source)
without gas association

Integrated Intensity (Jy/beam km/s)
0.03 0.04 0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.10

Color : $\text{H}^{13}\text{CO}^+ (J = 4-3)$



Starless Condensations

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

Multiple peaks

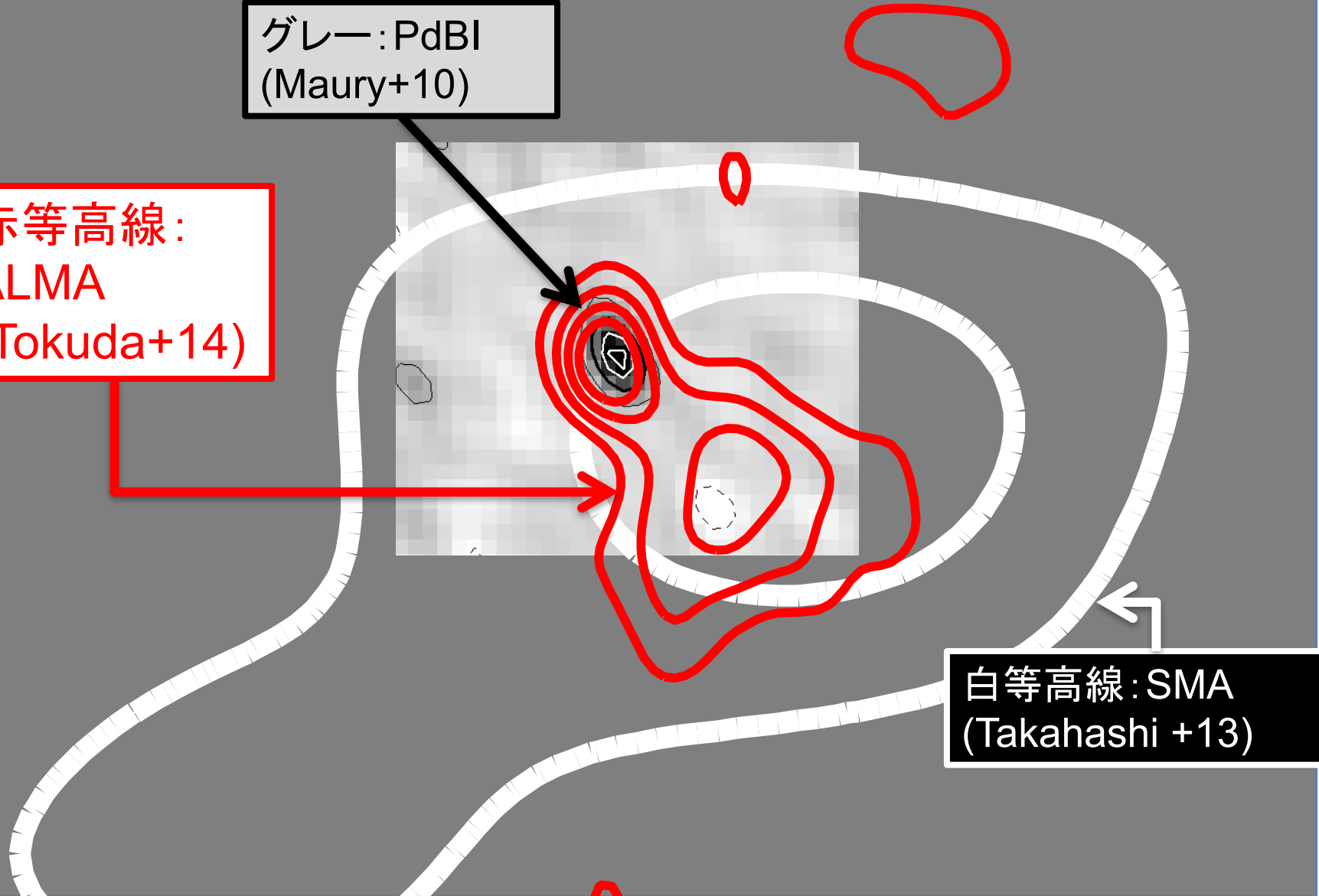
Color : $\text{H}^{13}\text{CO}^+ (4-3)$
Contour : 0.87 mm Cont.

高分解能+広い空間周波数coverageの威力

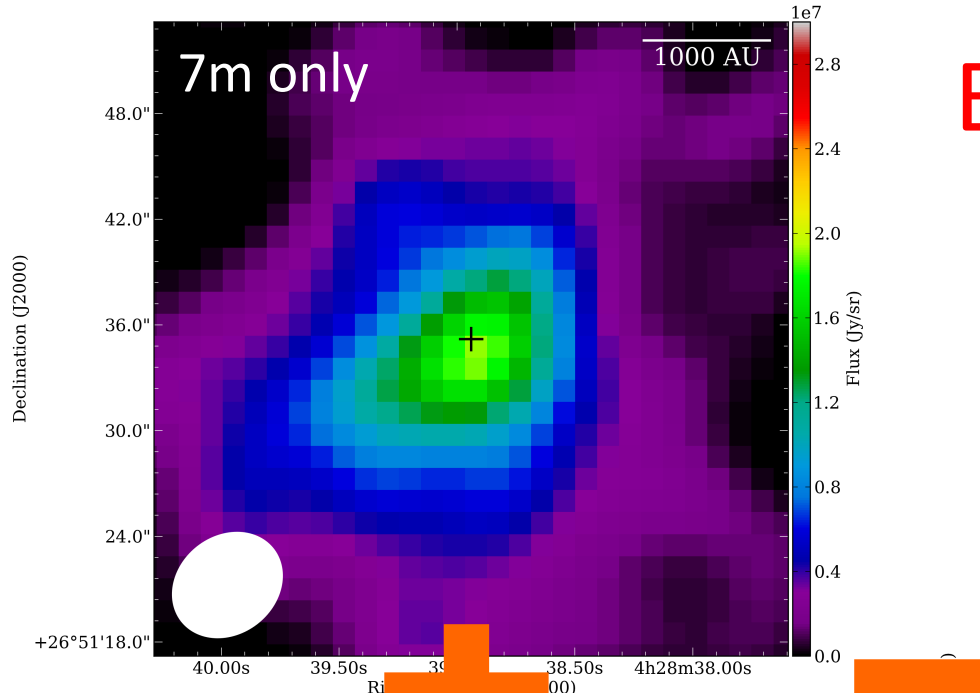
グレー: PdBI
(Maury+10)

赤等高線:
ALMA
(Tokuda+14)

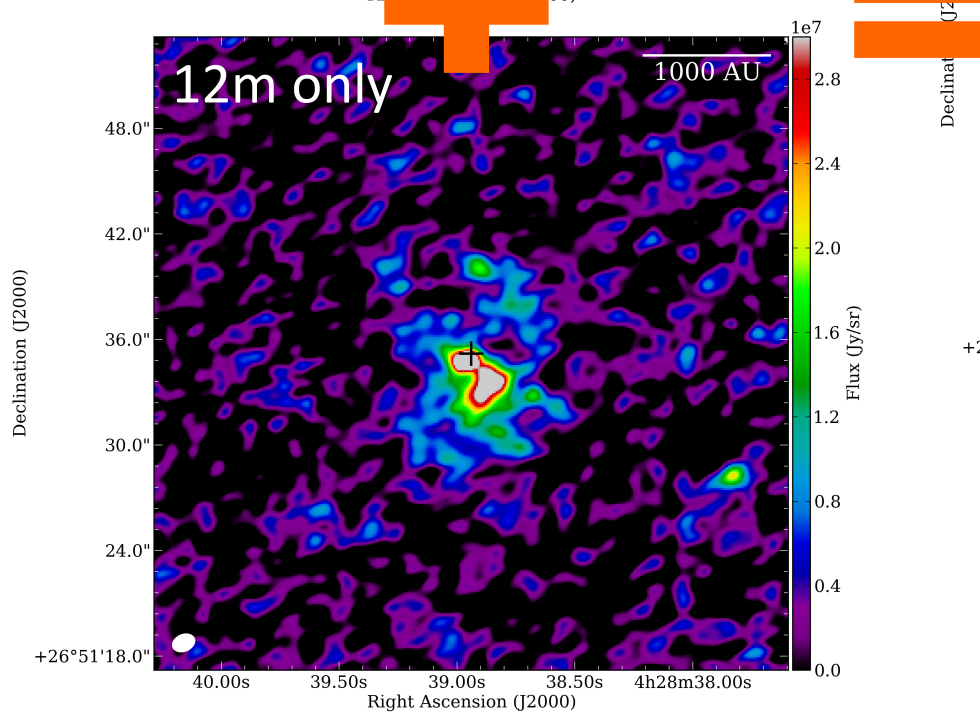
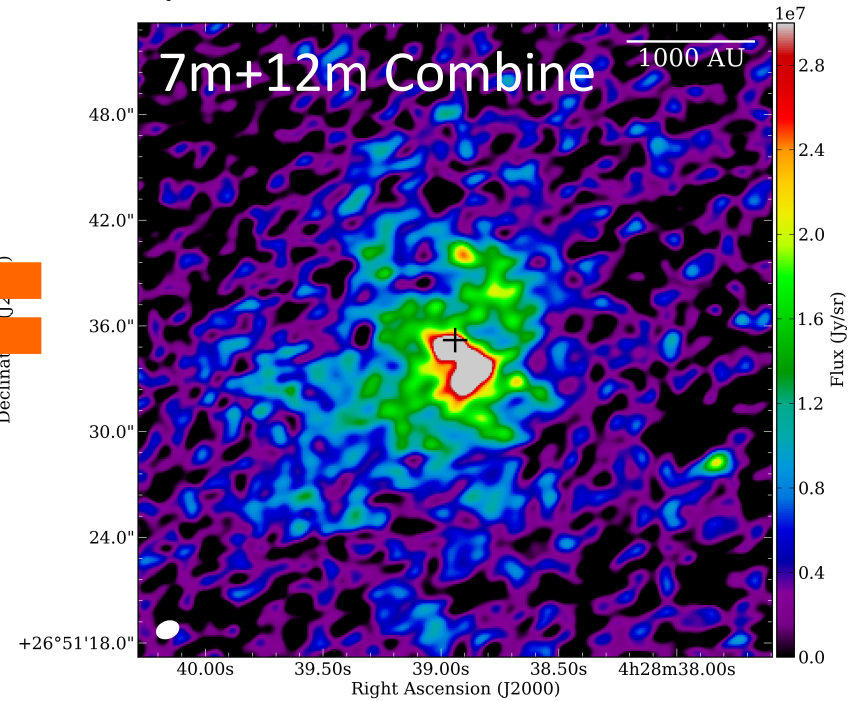
白等高線: SMA
(Takahashi +13)



Band6 (260 GHz) Continuum



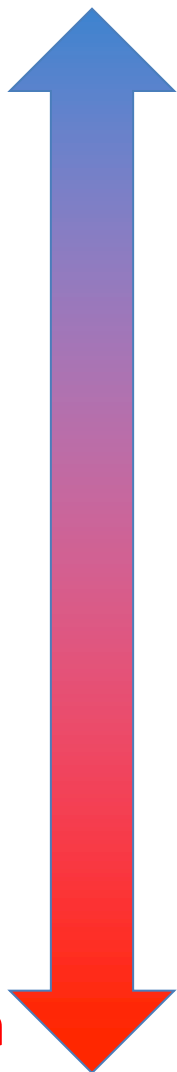
36"



総質量: $\sim 5 \times 10^{-2} \text{ Mo}$

ALMAによる様々な空間スケールの研究 太陽系近傍の分子雲コア

Low



空間
周波数

1. ACA stand alone モード
高密度分子雲コアサーベイ

日本が作った
モリタアレイ



ACA 7m array

2. 高分解能+広空間周波数

星形成分野全般に
重要な観測モード



Main array (12m array)

3. $\sim 0.''1$ (~ 20 AU) 分解能

分子輝線の実質的な
最高分解能

- Future work

$0.''03$ (~ 4 AU) 分解能 (ALMA Cycle 5 program, Grade A)

High

ALMA Cycle 3 Observations

Table: Specifications

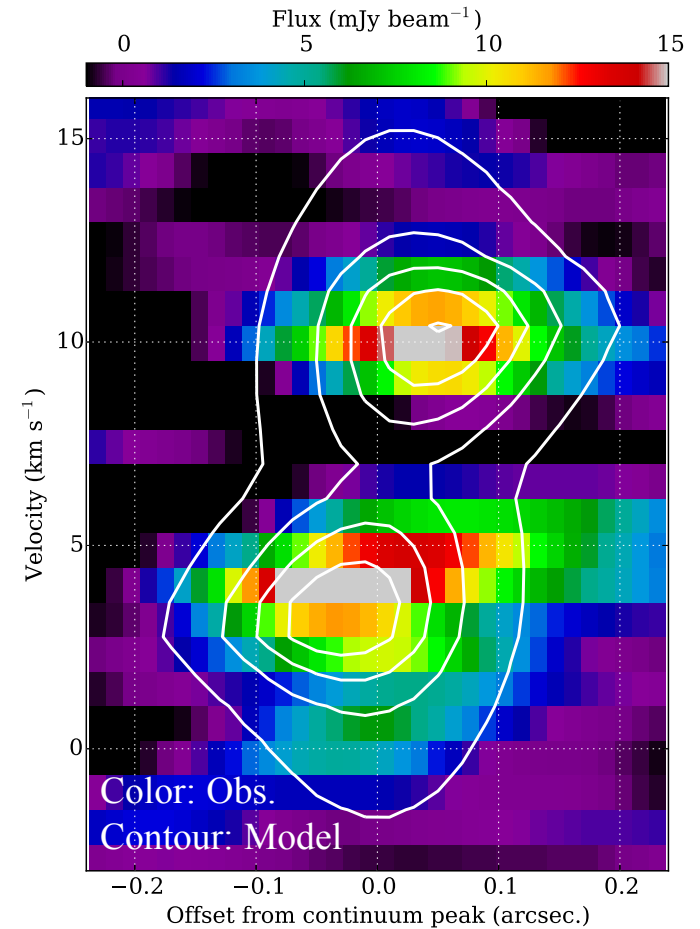
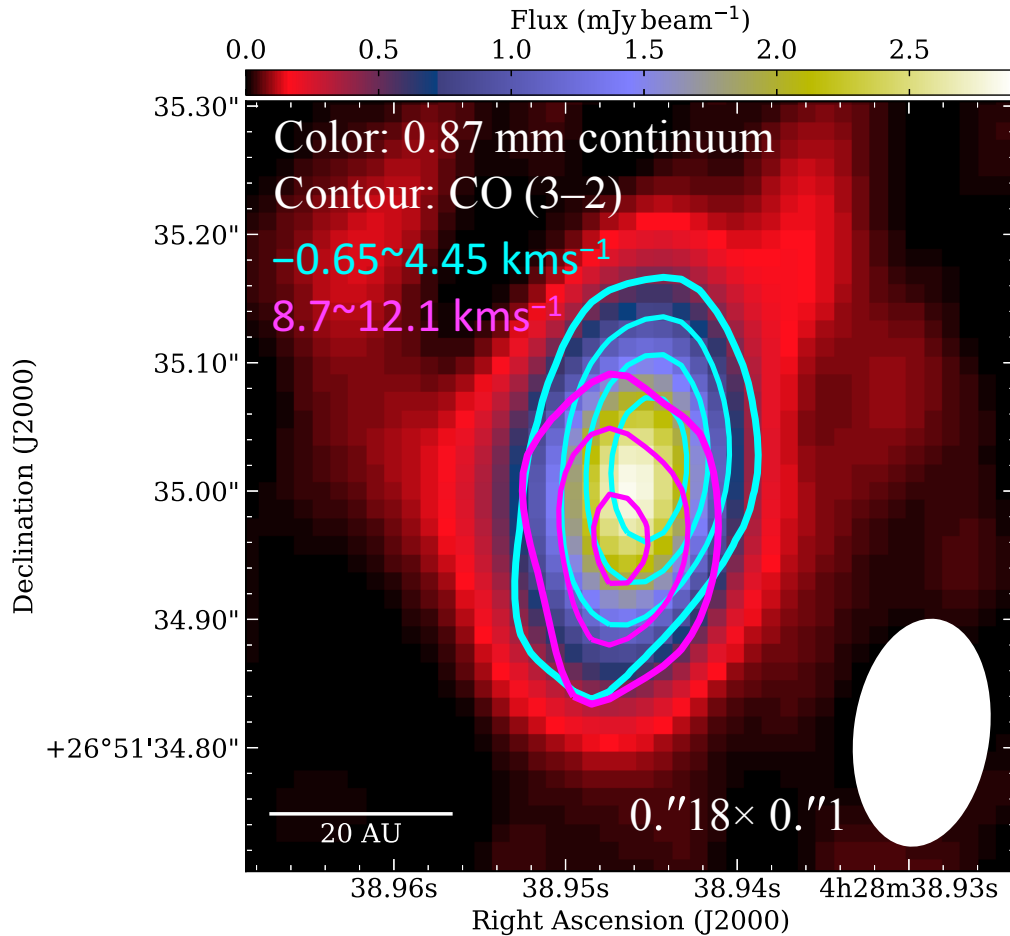
Period	ALMA Cycle 3
Target	MC27(=L1521F)
Beam size	0."18 x 0".1 (25 x 14 AU)
Velocity resolution	0.85 km/s
Lines	CO(3-2), H ¹³ CO ⁺ (4-3), C ¹⁷ O(3-2), 0.87 mm continuum

*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. The ¹²CO (3-2) observations revealed
 - warm (>50 K) gas, very thin filaments, and tiny CO clumps (Tokuda+18a, submitted)

A rotationally supported disk around the protostar



Constrained physical properties from simulated observations ¹²CO 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、円盤を通した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

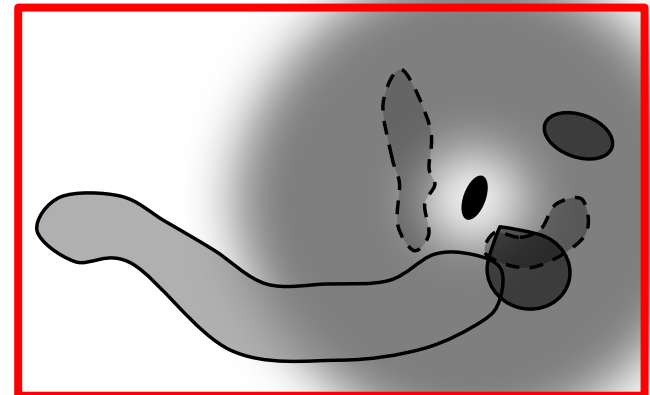
議論:

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 ($<0.07 L_{\odot}$)・ 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

Warm CO filamentary gas generated by possible turbulent shocks

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

White contour : HCO^+ (3-2)

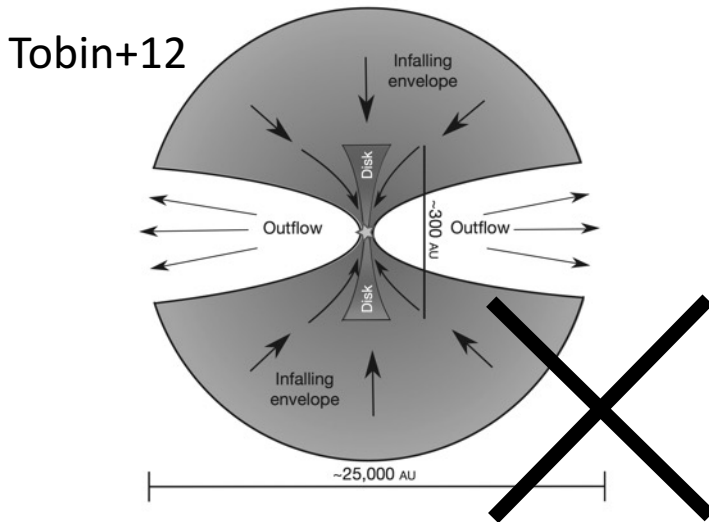
Cyan contour: 0.87mm continuum

Possible interpretations:

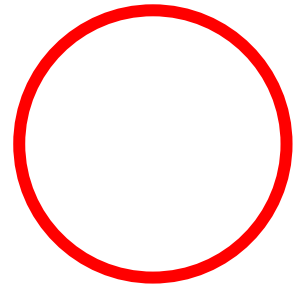
- Warm gas formed by shock heating
- Thermal instability (Koyama+00, Aota+13)

MC27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



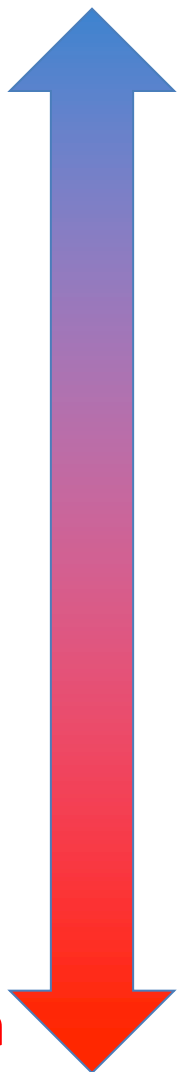
VeLLO + dense cores + arc-like gas
+ CO filaments + tiny clumps

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
(アーカイブの独自調査より)

ALMAによる様々な空間スケールの研究 太陽系近傍の分子雲コア

Low



空間
周波数

1. ACA stand alone モード
高密度分子雲コアサーベイ

日本が作った
モリタアレイ



ACA 7m array

2. 高分解能+広空間周波数

星形成分野全般に
重要な観測モード



Main array (12m array)

3. $\sim 0.''1$ (~ 20 AU) 分解能

分子輝線の実質的な
最高分解能

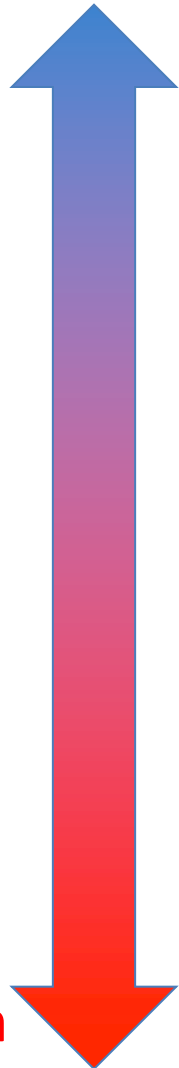
- Future work

$0.''03$ (~ 4 AU) 分解能 (ALMA Cycle 5 program, Grade A)

High

ALMAによる様々な空間スケールの研究 太陽系近傍の分子雲コア

Low



空間
周波数

1. ACA stand alone モード
高密度分子雲コアサーベイ

- 進化した高密度コアを同定
- 星なし分子雲コアのsubstructure

2. 高分解能+広空間周波数

- 連星系形成の兆候
- 10,000AU~100 AU (2桁以上)の精密な密度分布

3. ~0."1(~20 AU)分解能

- ~10 AU コンパクトdisk/超低輝度原始星の性質
- 高温でfilamentary/clumpy な構造

- Future work

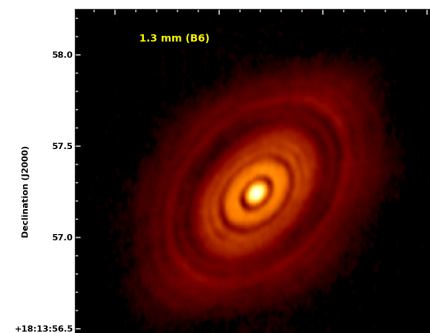
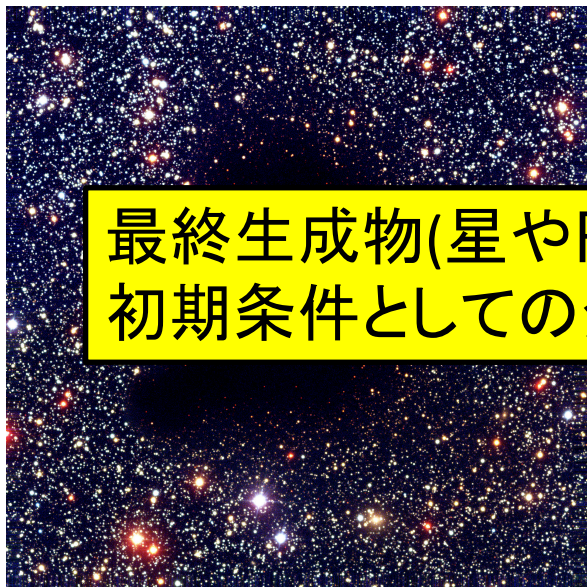
0."03 (~4 AU)分解能 (ALMA Cycle 5 program, Grade A)

High

最後に...

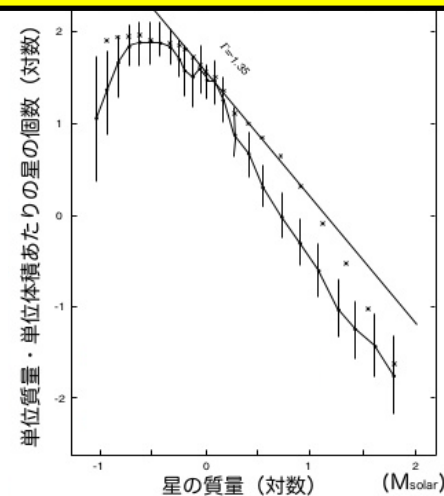
(ALMAを使った) 星形成研究の最終目標

分子雲 (コア)



最終生成物(星や円盤, 惑星)の
初期条件としての分子雲コアの多様性を理解することが重要

盤



多様な星質量