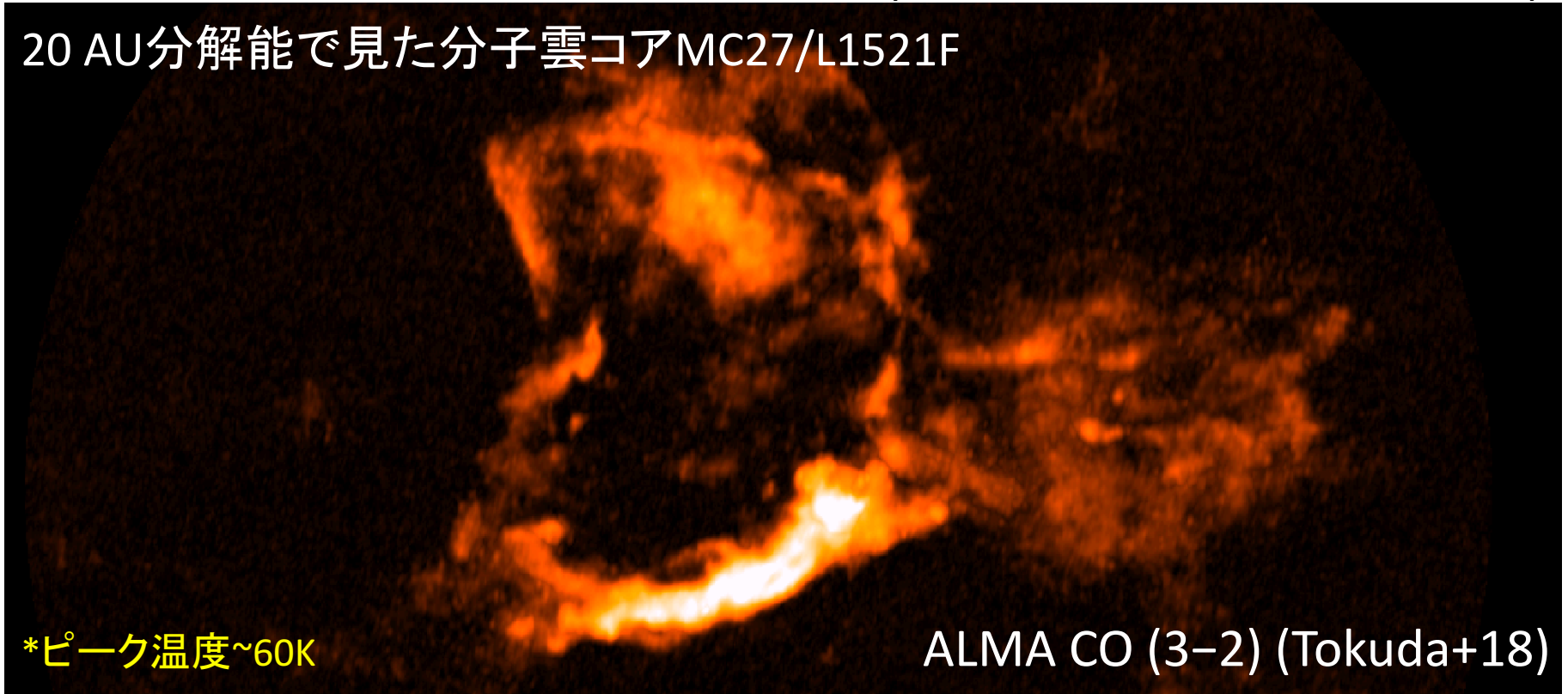


南極30m望遠鏡による

近傍星形成領域の乱流起源高温ガス+マゼラン雲の観測

徳田一起 (大阪府立大学/国立天文台)

20 AU分解能で見た分子雲コアMC27/L1521F



*ピーク温度~60K

ALMA CO (3-2) (Tokuda+18)

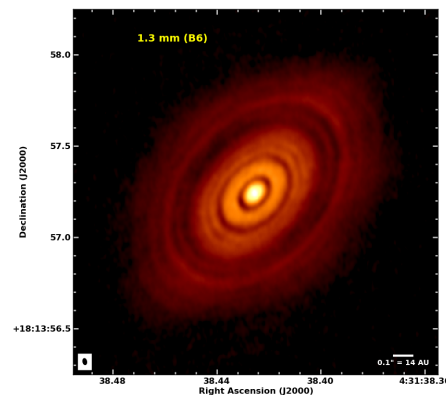
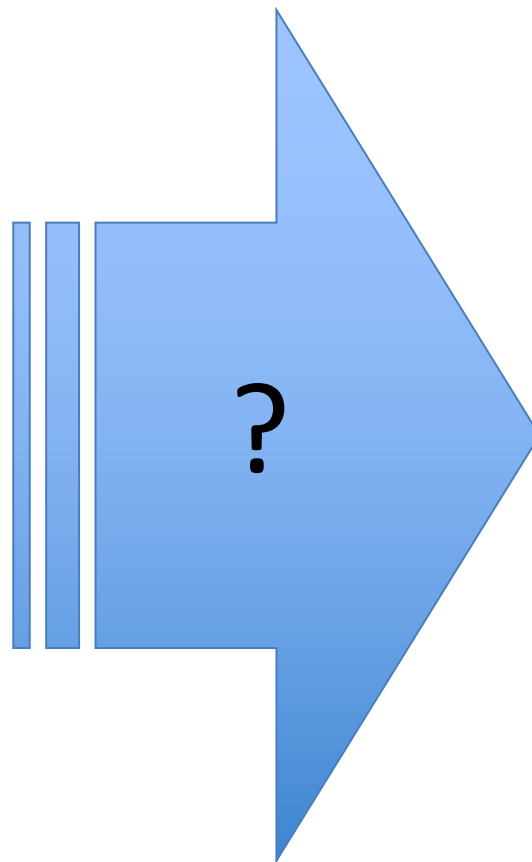
Contents

(前半) 近傍星形成領域 Warm CO ガスの観測 ~乱流衝撃波を探る~

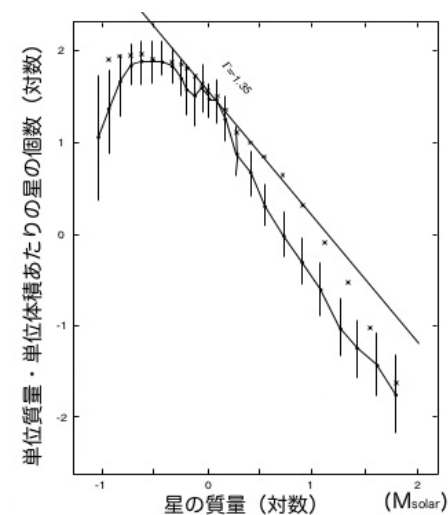
(後半) 1日中観測可能なマゼラン雲のダスト連続波や[CII]観測

星形成研究の最終目標

分子雲 (コア)



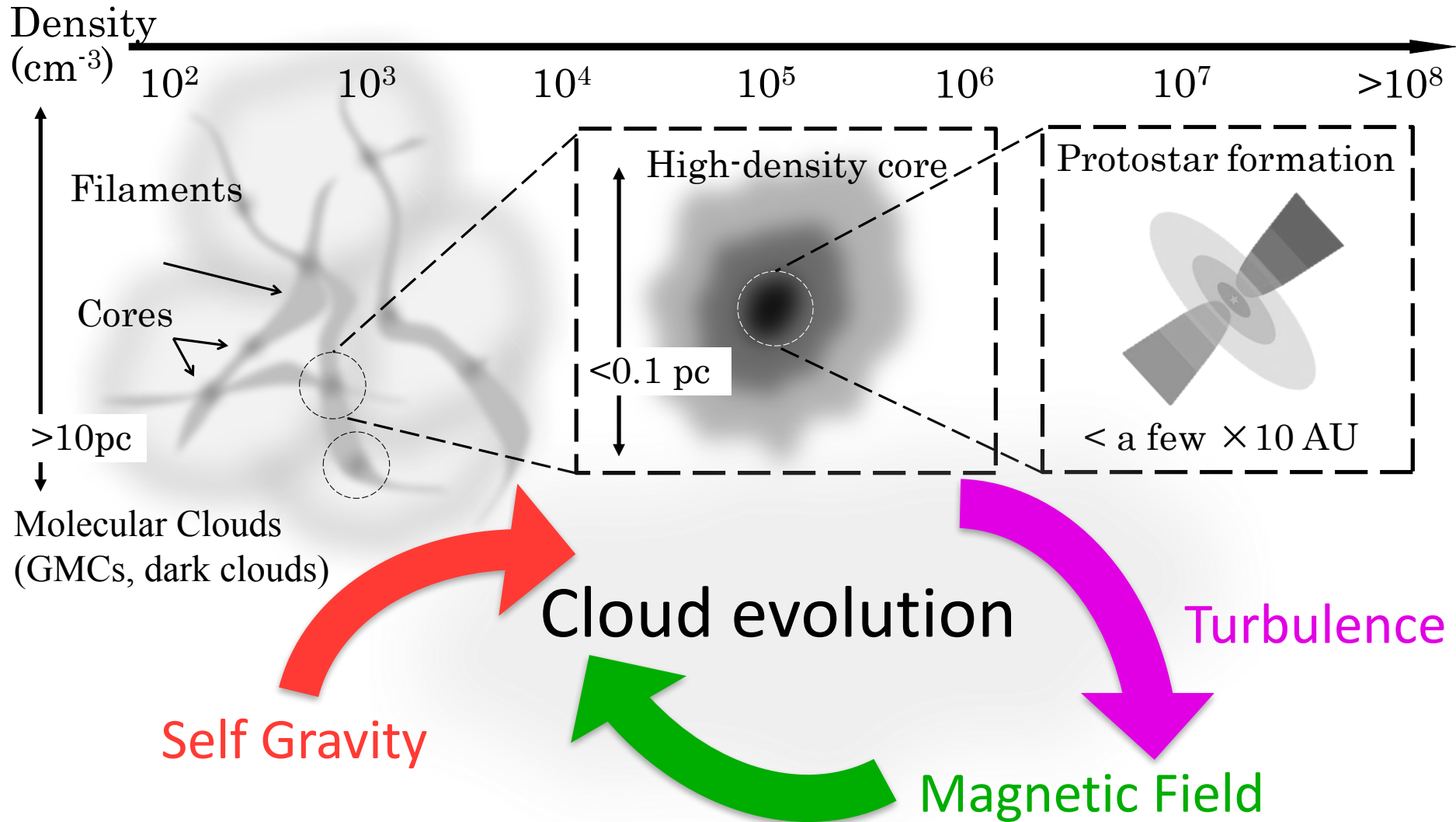
(多様な)原始星+円盤



この段階を理解

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

星形成と乱流の関係

乱流とは？: 観測的には熱的線幅よりも広い速度成分

- その実態は理解されていない
- 至る場所で**衝撃波**を生成

乱流起源は？

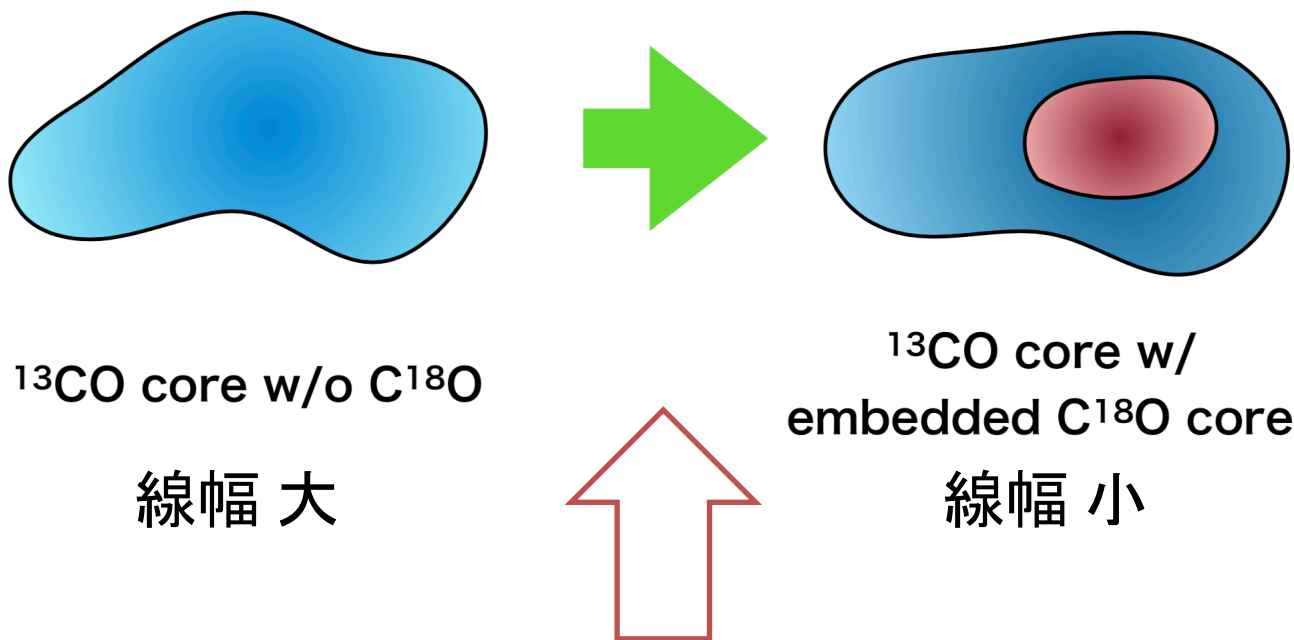
- WNMの衝撃波圧縮=>熱的不安定性による乱流状態のCNMの生成 (Koyama & Inutsuka 00, 02)
- 原始星からのfeedback(アウトフロー)による再生成 (e.g., Nakamura+11)

乱流の散逸機構

- 衝撃波加熱=>放射によってエネルギーを逃す

星形成と乱流の関係

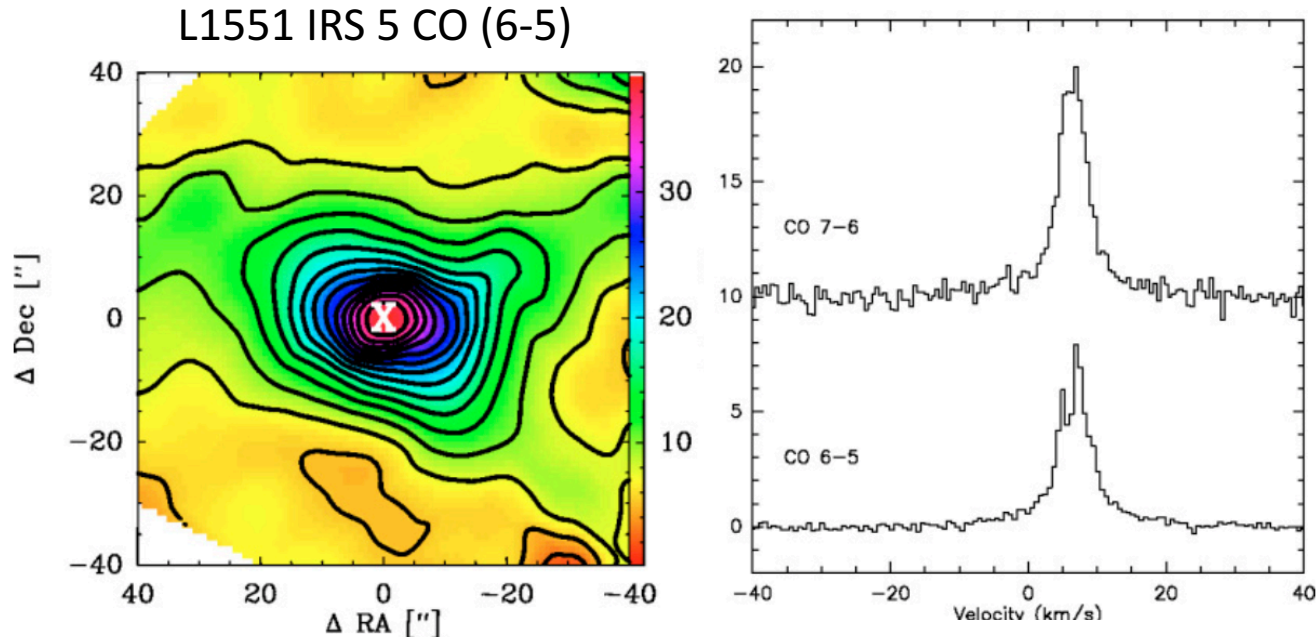
名古屋4m鏡によるOphiuchus領域の大規模CO観測 (Tacharata+00)



この過程で衝撃波が生じて乱流のエネルギーが散逸する
=> 加熱されたガスがCO高励起線 ($J=4-3$ など)観測で見えると予想

Warm gas in early phases of star formation

High-J CO lines as traces of warm gas



Single-dish observations with high-J CO lines toward protostellar sources (van Kempen+09b)

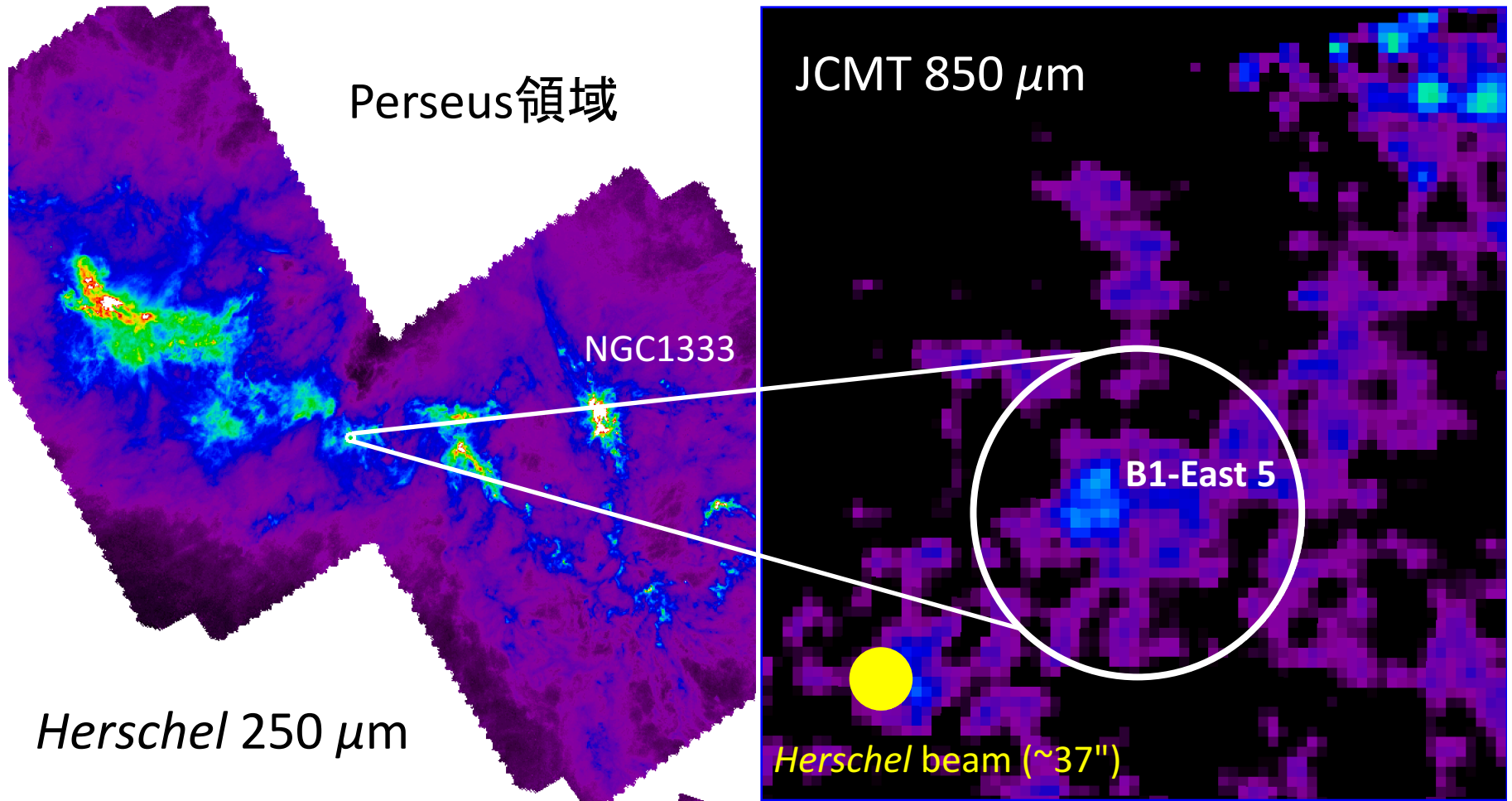
high-J CO ラインの起源について (van Kempen+09b)

- ・ 原始星からの加熱
- ・ アウトフローによるショック

etc...

このような高温ガスも重要だが、ある意味当たり前乱流起源の構造ではない？

星なし分子雲コアでのCO高励起起線の観測

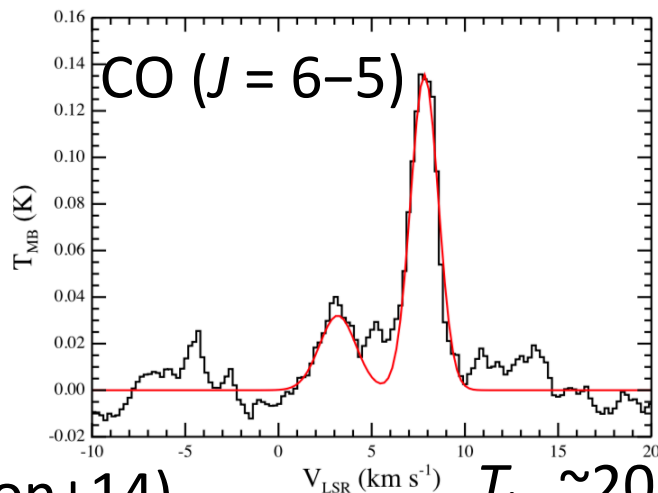
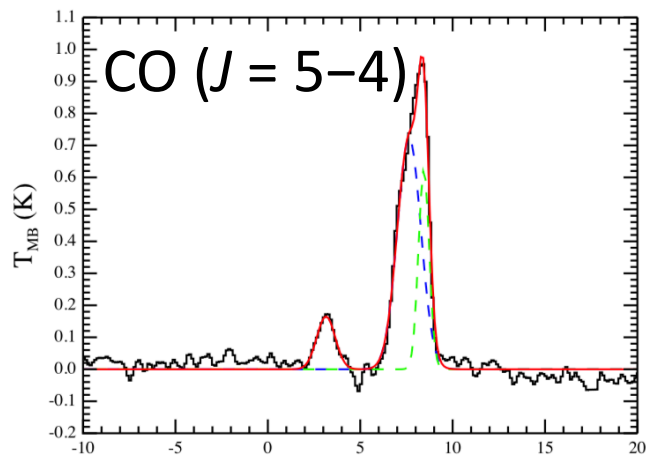


絵はアーカイブデータより徳田が作成

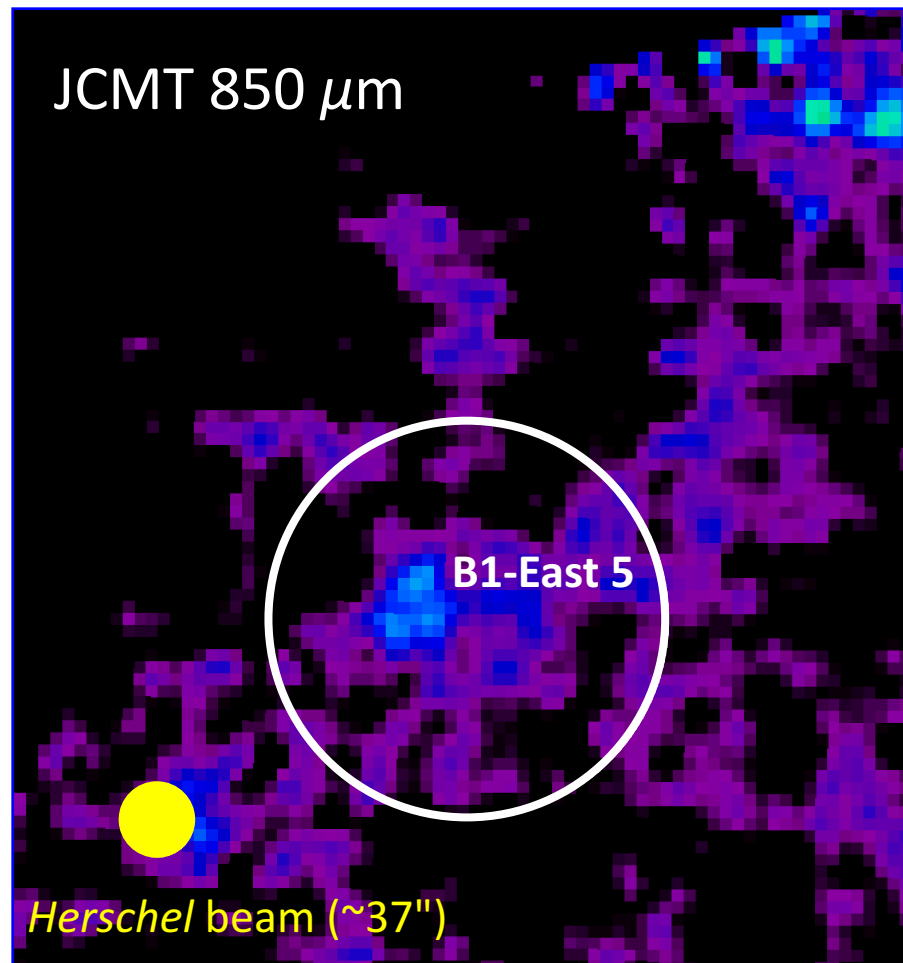
B1-E5の特徴 => いたって普通の分子雲コア

半径 ~ 0.05 pc, Mass 0.5–2 M_{\odot} , 平均密度 $2.4\text{--}9.1 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$, 温度 < 20 K
(Sadavoy+12)

星なし分子雲コアでのCO高励起線の観測



(Pon+14) $T_{kin} \sim 20$ K



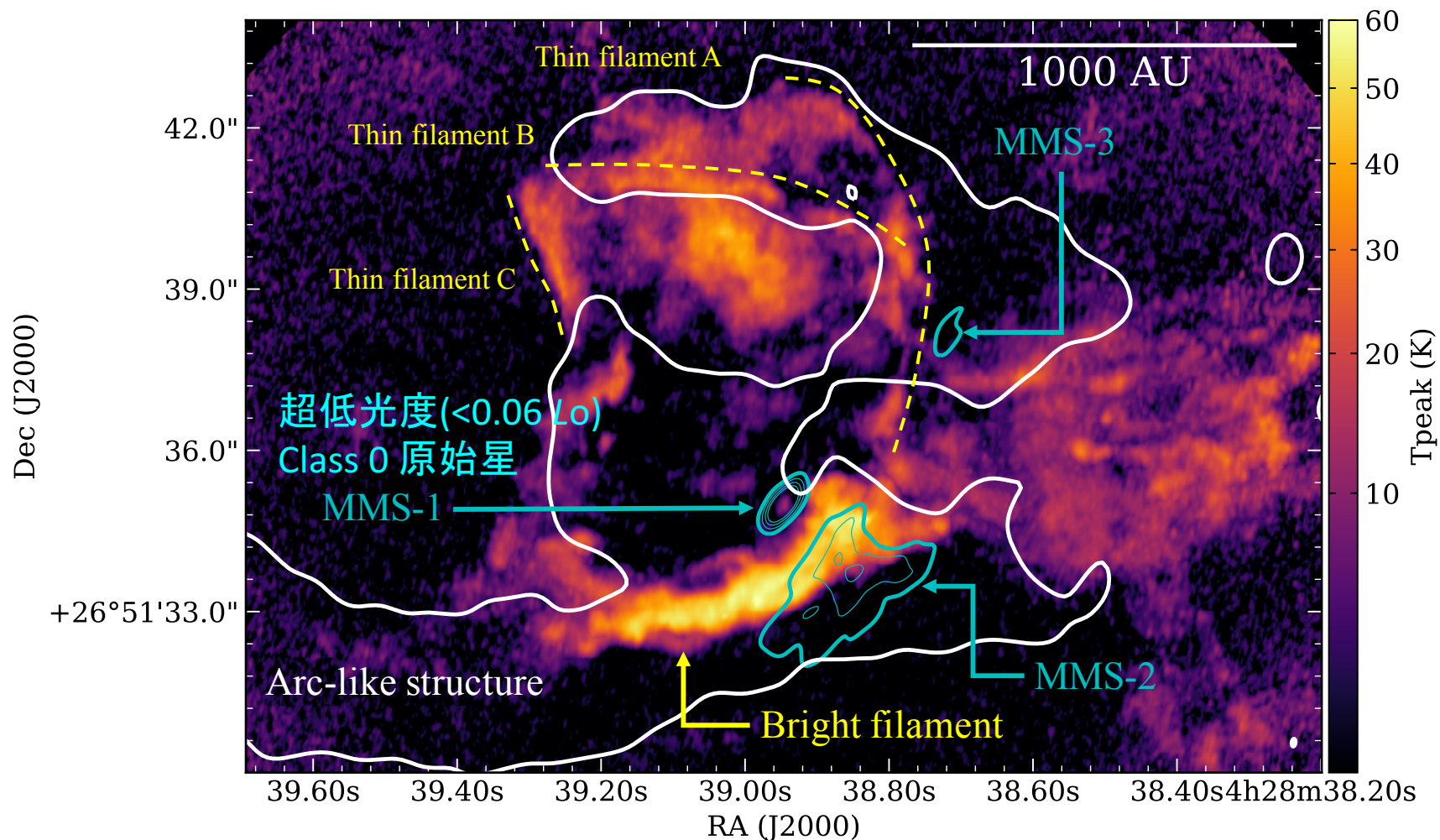
絵はアーカイブデータより徳田が作成

乱流衝撃波により加熱とされたと考えられる

乱流散逸時間はcrossing time の3倍程度 (Pon+14)

*1点観測であることに注意

乱流ショック起源と思われるWarm COガスの空間分解



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

White contour : HCO^+ (3-2)

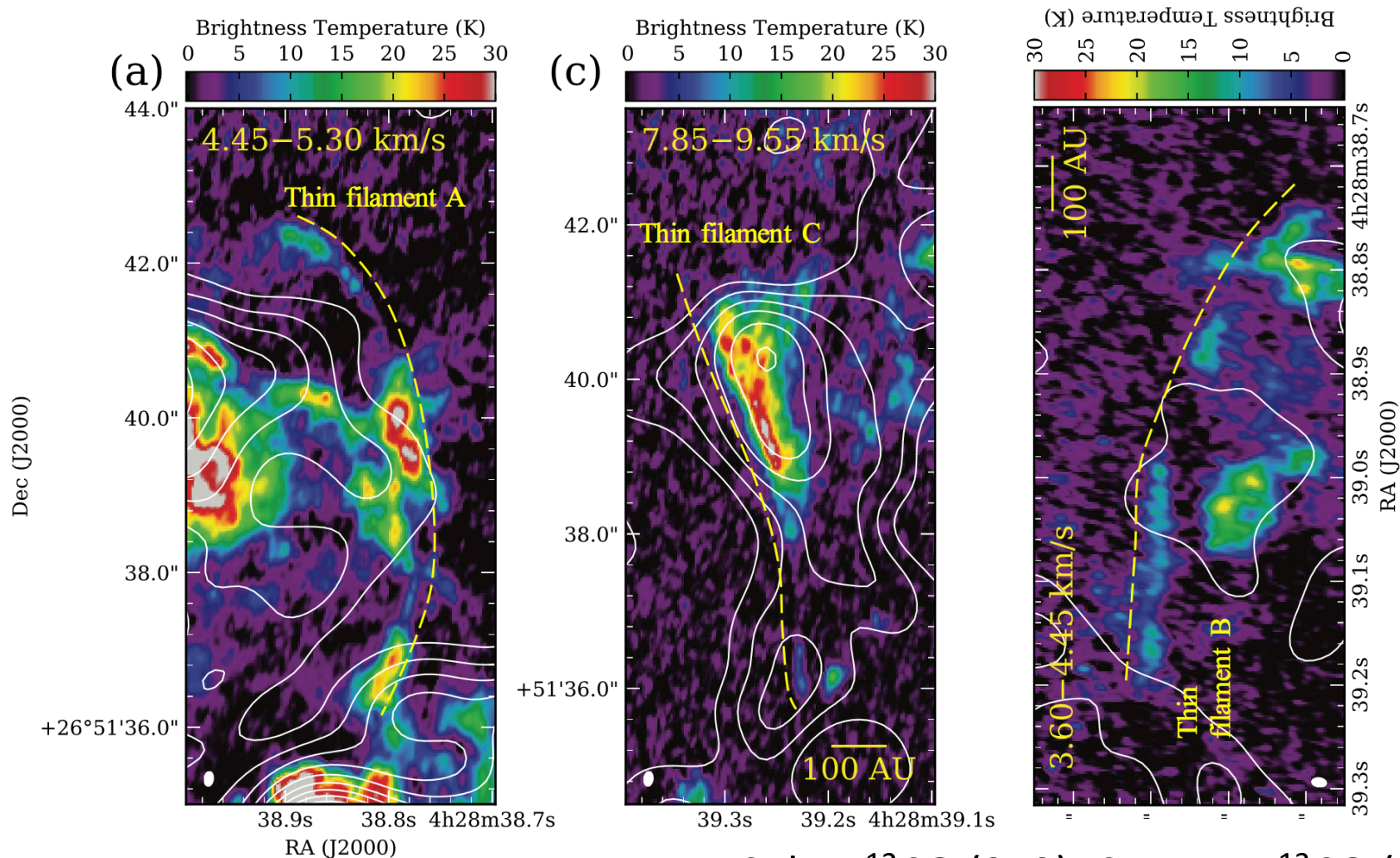
Cyan contour: 0.87mm continuum

Tokuda+18

Possible interpretations:

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

Thin filaments in MC27 with the width scale of ~ 20 AU



Tokuda+18

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

衝撃波面として非常に細い(~ 20 AU)フィラメント構造が見えている?

原始星円盤の多様性と乱流の関係

HL Tauとの大きさ比較 (同じ分解能/波長)

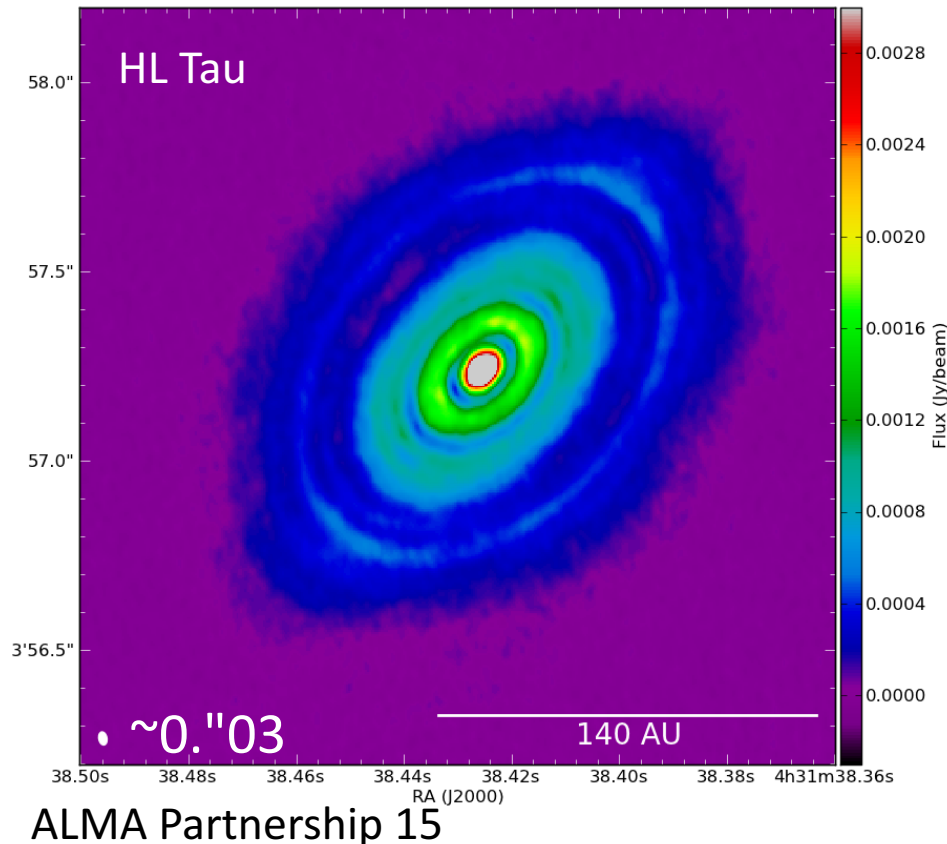
MC27/L1521F MMS-1

明るさはHLtau20分の1くらい

Diskはめっちゃコンパクト
半径 ~ 10 AU, 質量 $\sim 10^{-4} M_{\odot}$
(Tokuda+17)

$\sim 0.''03$

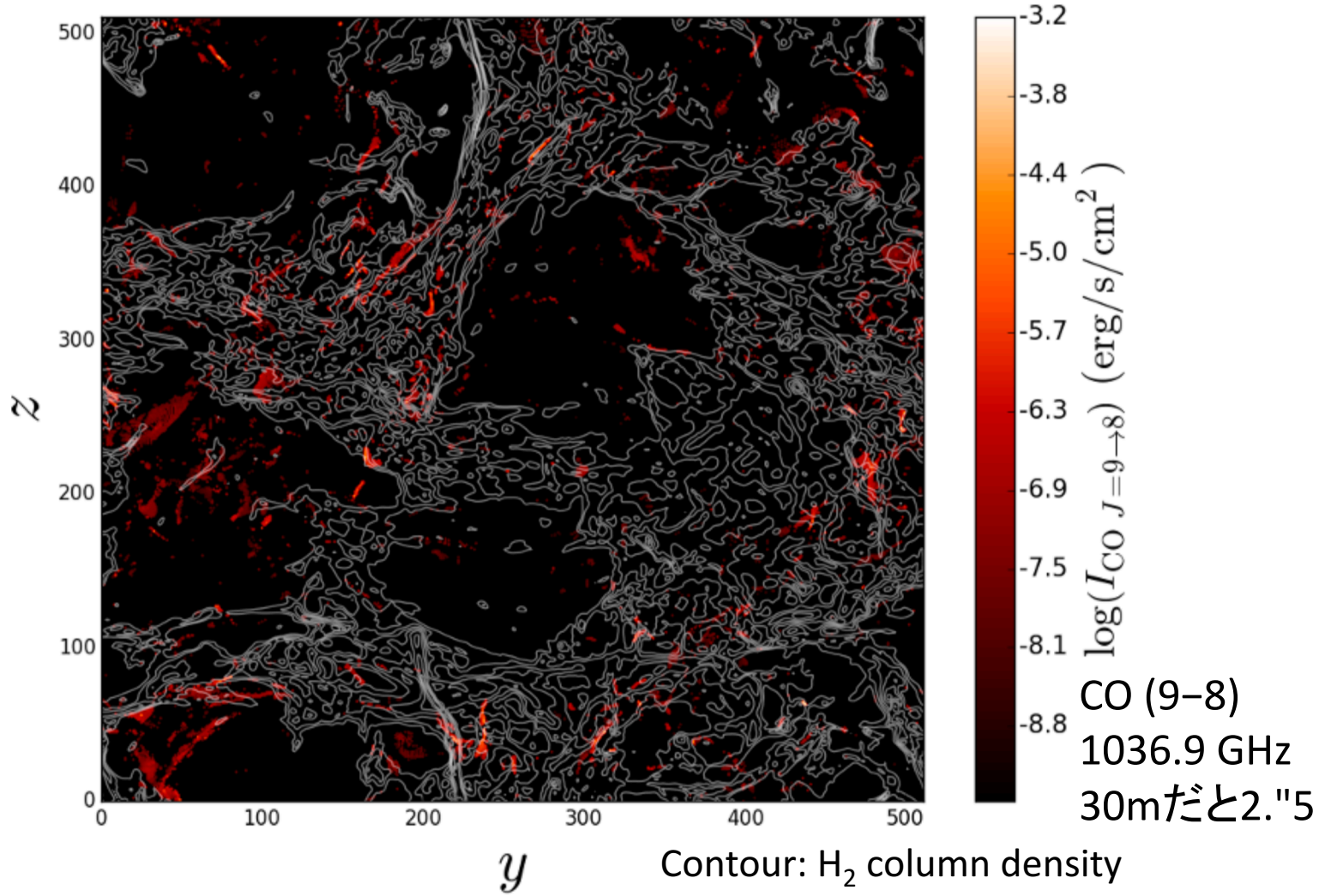
Tokuda+19 in prep.



Class 0/I source は多様な円盤(サイズ, 非対称性, ギャップの数)がいっぱい (観測事実)
分子雲コア内部の乱流がコンパクトdisk形成に影響を与えたか? (Tokuda+17,18)
(円盤の多様性の起源の1つとなりえるか?)

分子雲スケールの乱流ショックによるCO高励起線の観測予想

Lehmann+2016



分子雲の体積の0.03%は乱流ショックにより50 Kまで加熱されている

乱流ショックによる高温ガスの探査

- ・高温ガスの分布はlow-J CO の観測からは(現状)予想しづらい (広域観測)
- ・高温ガスのVolume filling factor は小さい (高分解能)



Herschelの視野

+



ALMAに匹敵する解像度

南極30m望遠鏡の必要性

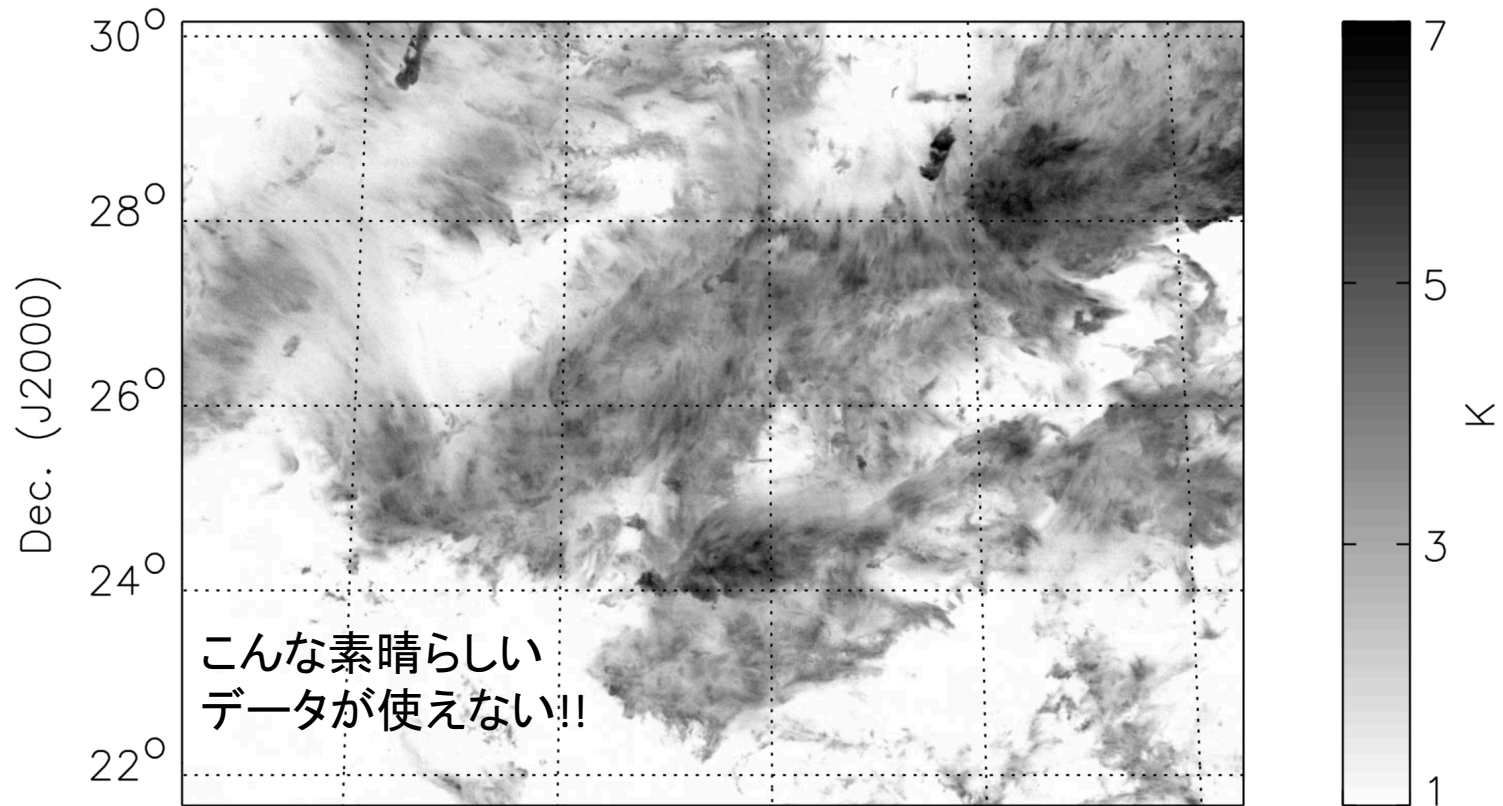
期待される成果の例

- 高温ガスの分布/強度よりエネルギーを計算 => 乱流散逸時間の見積もり
- 分子雲コア形成の理解: 衝撃波圧縮による高密度領域が作られたか?

南極望遠鏡完成までにすべきこと: その1

High- J COとの比較のためのLow- J COデータが必ず必要

要注意: Taurus, Orion, Perseus など現在データが豊富な有名領域は全て南極から観測不可



FCRAOによるおうし座領域 ^{12}CO (1-0)観測 (Goldsith+08)

南半球から観測可能な近傍星形成領域のlow- J CO広域観測の推進

e.g., Mopra, ASTE, NANTEN2, Osaka 1.85m, LMT, LST (?)

南極望遠鏡完成までにすべきこと: その2

ALMA を用いたMid-J, High-J CO 観測のケーススタディを推進

一般常識(?): 分子雲コアの観測にCOなんて使わない

理由: 光学的に厚い, ダスト粒子にdepletionするなど

=> これはこれで概ね正しい?

分子雲はどこでも10-20 Kという見積もりは

これまでの単一鏡ビームの平均でしかなかった。

南極望遠鏡完成までにすべきこと: その2

ALMA を用いたMid-J, High-J CO 観測のケーススタディを推進

一般常識(?): 分子雲コアの観測にCOなんて使わない

理由: 光学的に厚い, ダスト粒子にdepletionするなど

B59アーカイブデータの調査

(Saigo+ in prep.)

- ^{12}CO (2-1) でシェル状高温ガス
- 原始星とは全く関係のない位置

必要なALMAの観測設定

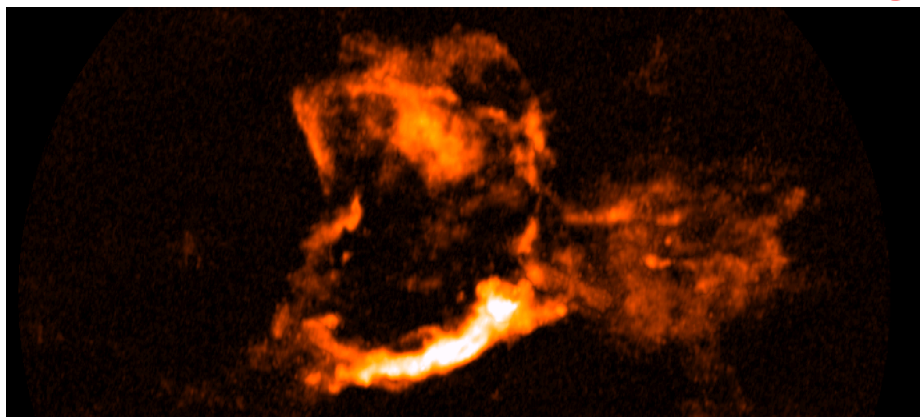
- 超高分解能(数十AU スケール)
 - $J=2-1$ や $3-2$ でもOK
- (ただし高速度成分のみ)

ALMAで知っておきたいこと

- 高温ガスのfilling factor はどうなっているか?
- どのような場所に分布するのか? (完全にランダムな可能性)

まとめ: 南極30m望遠鏡でできること

(前半) 近傍星形成領域 Warm CO ガスの観測 ~乱流衝撃波を探る~
-すでにALMA, *Herschel*などで乱流起源と思しきWarm gas の兆候が!!

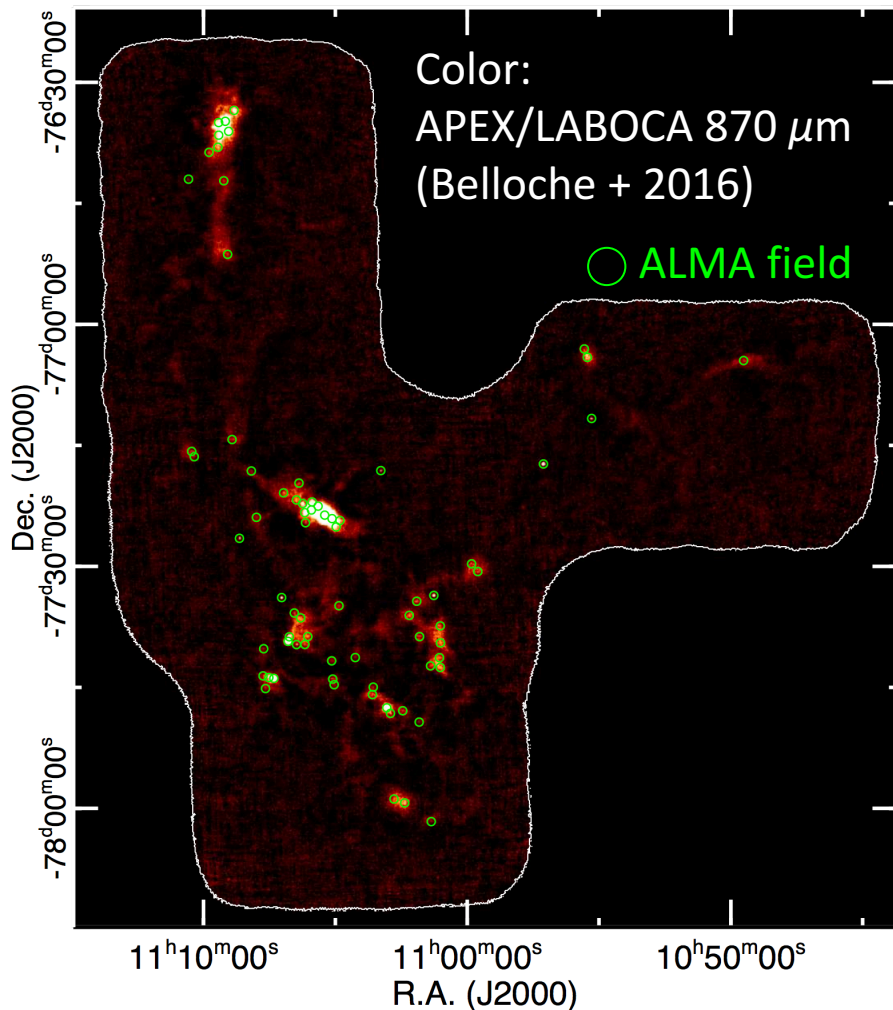


Tokuda+18

=> 広域高分解能観測による乱流の散逸過程や衝撃波圧縮過程を調査

(後半) 1日中観測可能なマゼラン雲のダスト連続波や[CI]観測

Dense core survey in Chamaeleon I



56個の星なしコアを観測

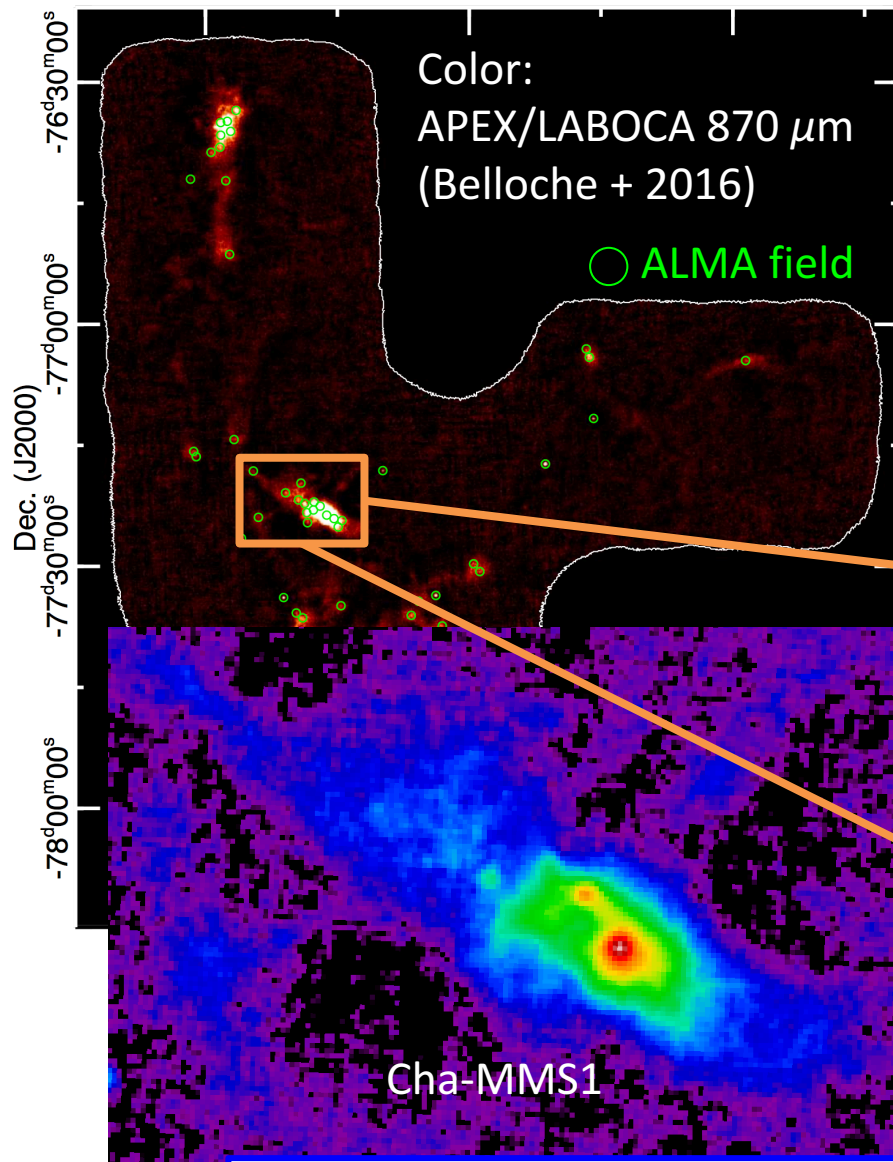
1つも検出できなかった

(Dunham et al. 2016)

ρ Ophiuchus 領域
でも1つだけ(Kirk+17)

この結果をみんな深刻に受け止めはじめた。。。
(ALMAでdense coreの研究は面白くない?)

Dense core survey in Chamaeleon I



56個の星なしコアを観測

1つも検出できなかった

(Dunham et al. 2016)

ρ Ophiuchus 領域
でも1つだけ(Kirk+17)

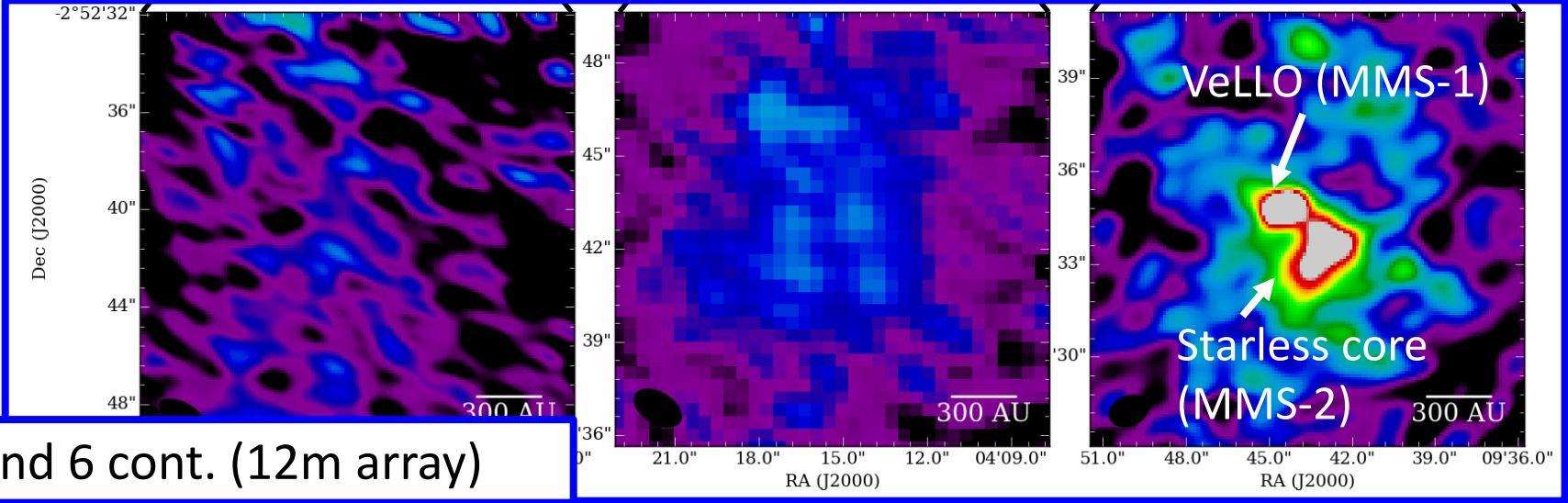
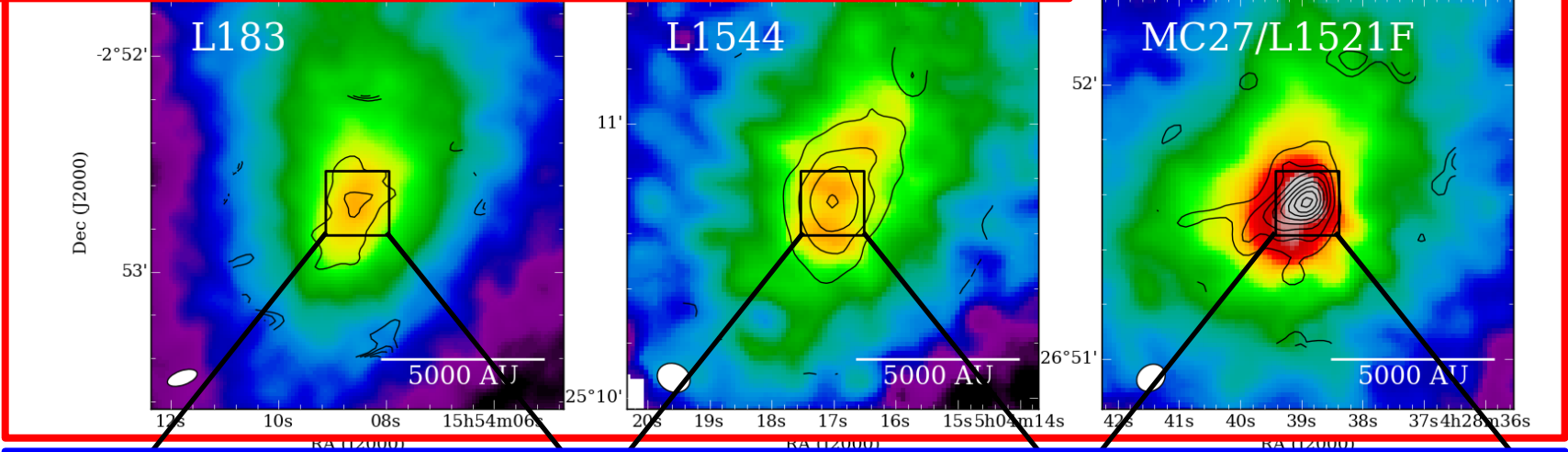
The observed point also includes the local peaks of the cores

Archival studies of dense cores

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

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

Flux (mJy/beam)
-50 0 50 100 150 200 250 300 350



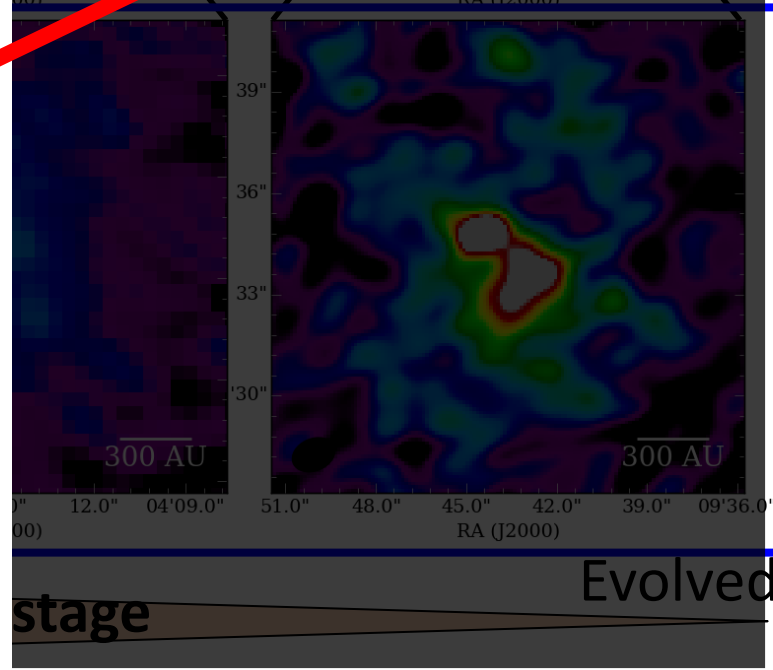
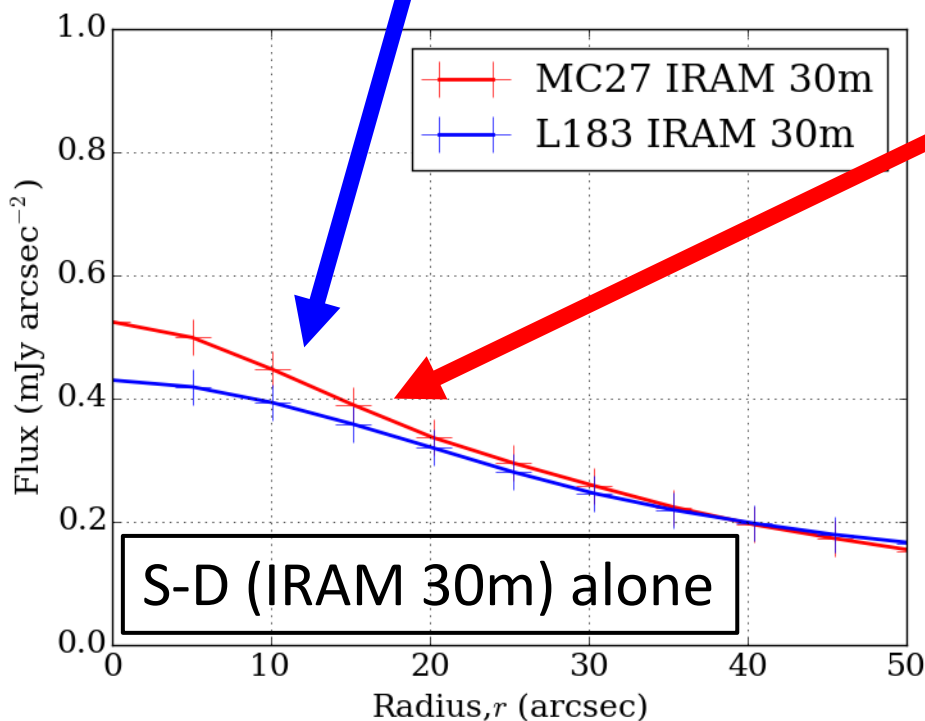
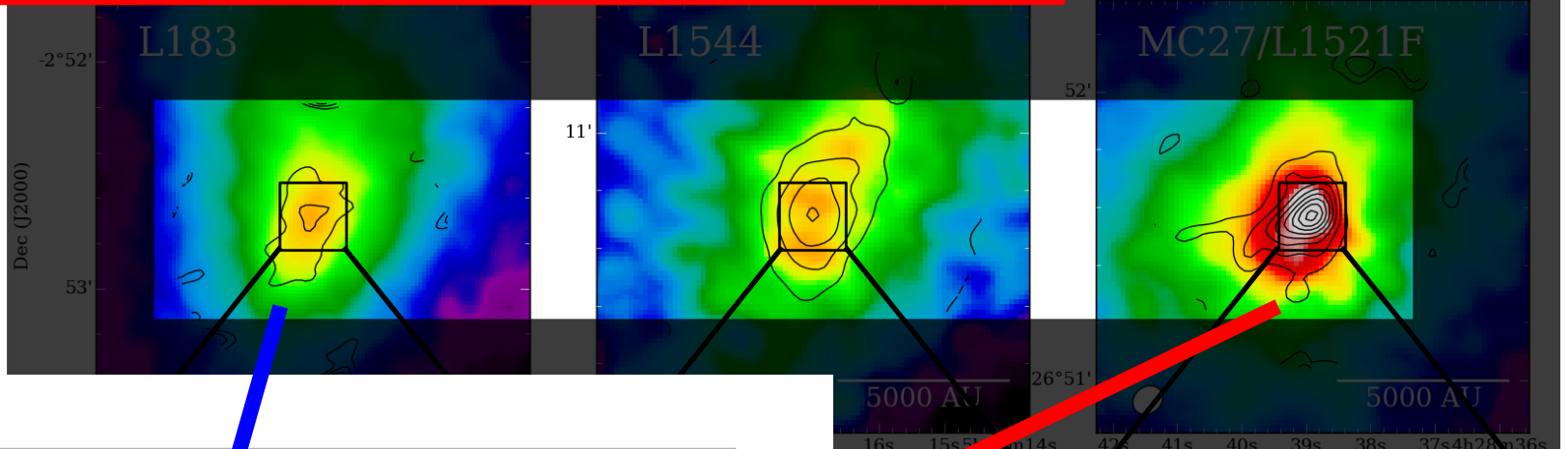
Band 6 cont. (12m array)



Archival studies of dense cores

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

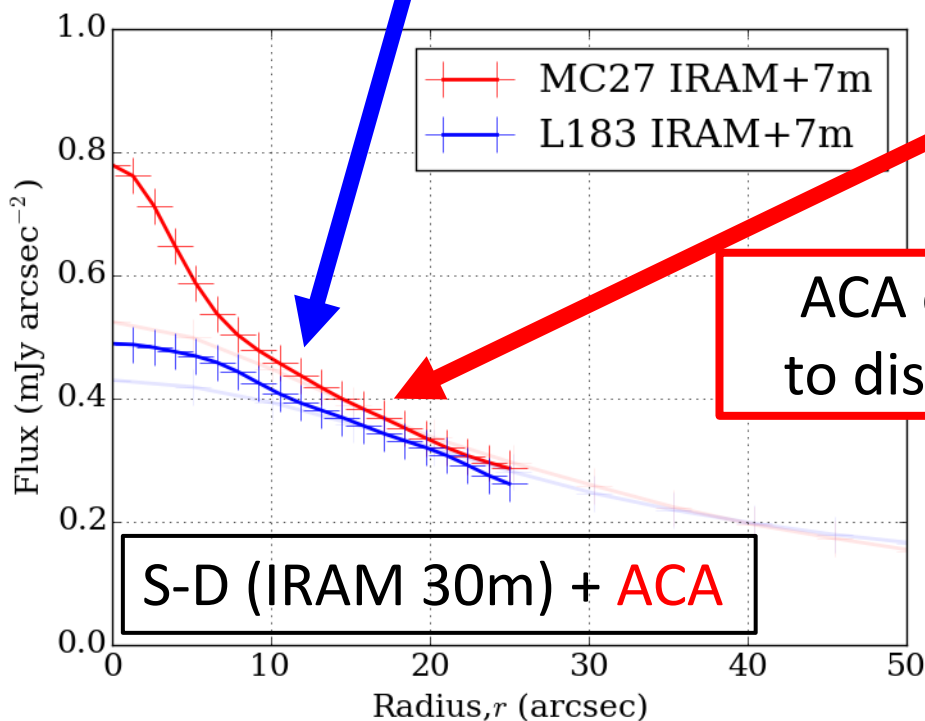
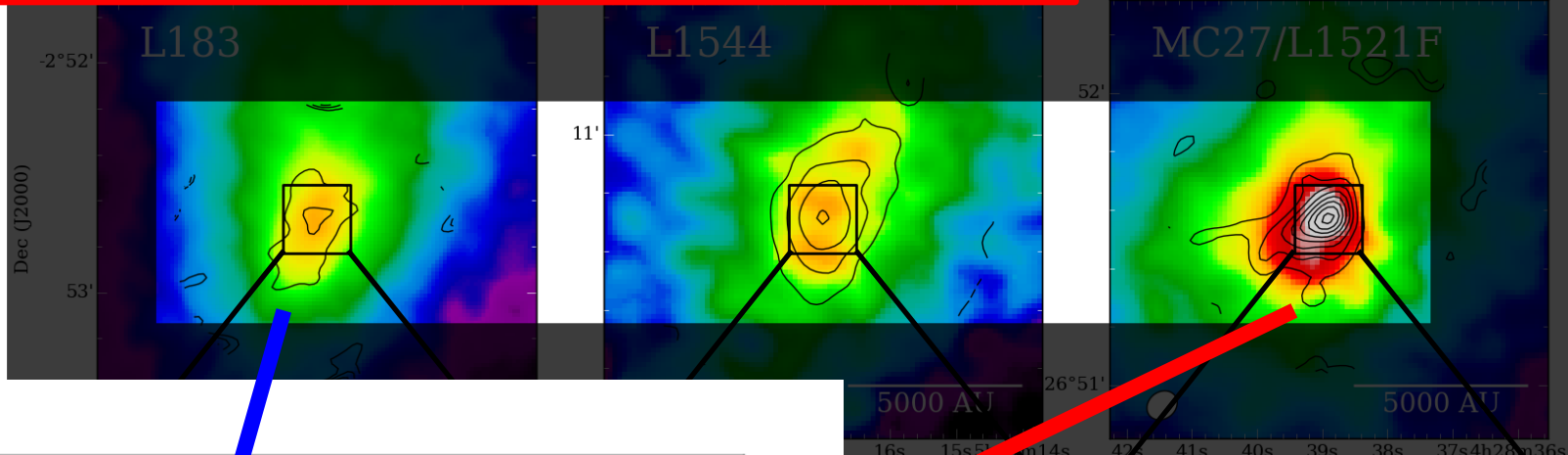
Color: JCMT/SCUBA, Contour: Band6 cont. (ACA)



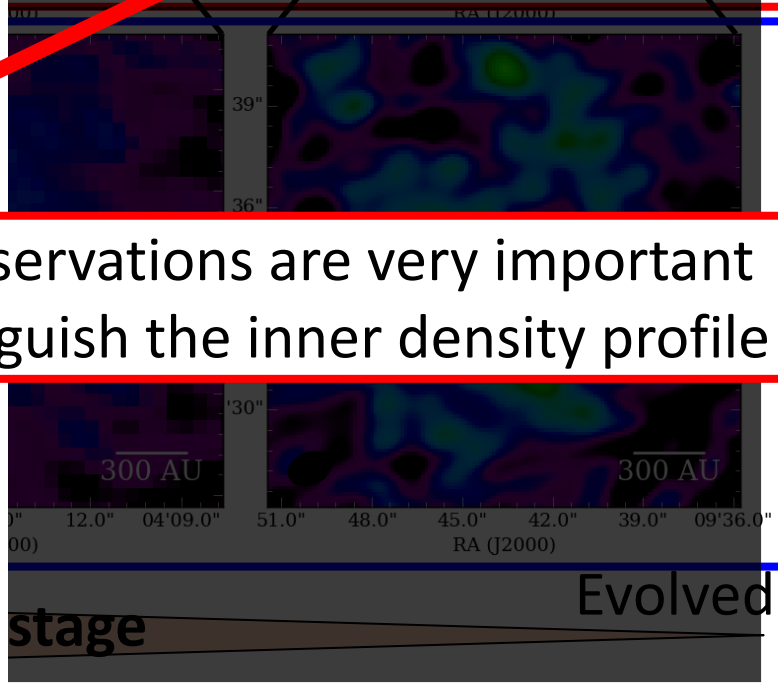
Archival studies of dense cores

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



観測対象：大小マゼラン雲

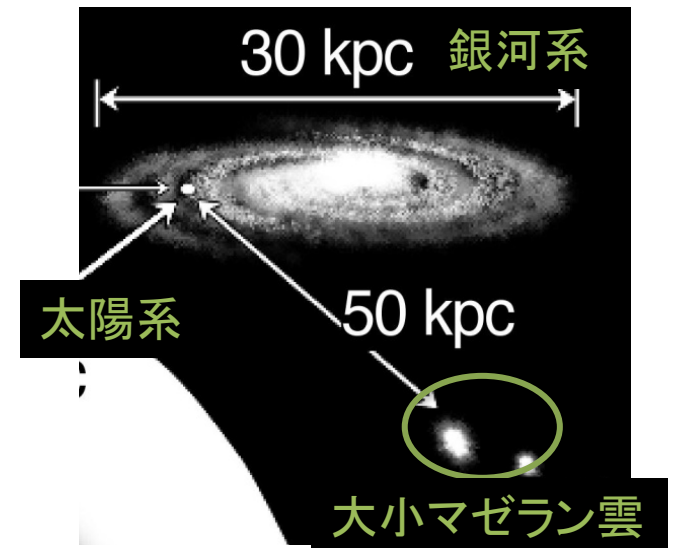
- 銀河全域の均質のサンプル
 - 高銀緯、正面向きの銀河
 - 視線方向の重なりが少ない
 - 距離の不定性がなく、近い
大マゼラン(~50 kpc) 小マゼラン (~60 kpc)
- 現在も活発な星形成



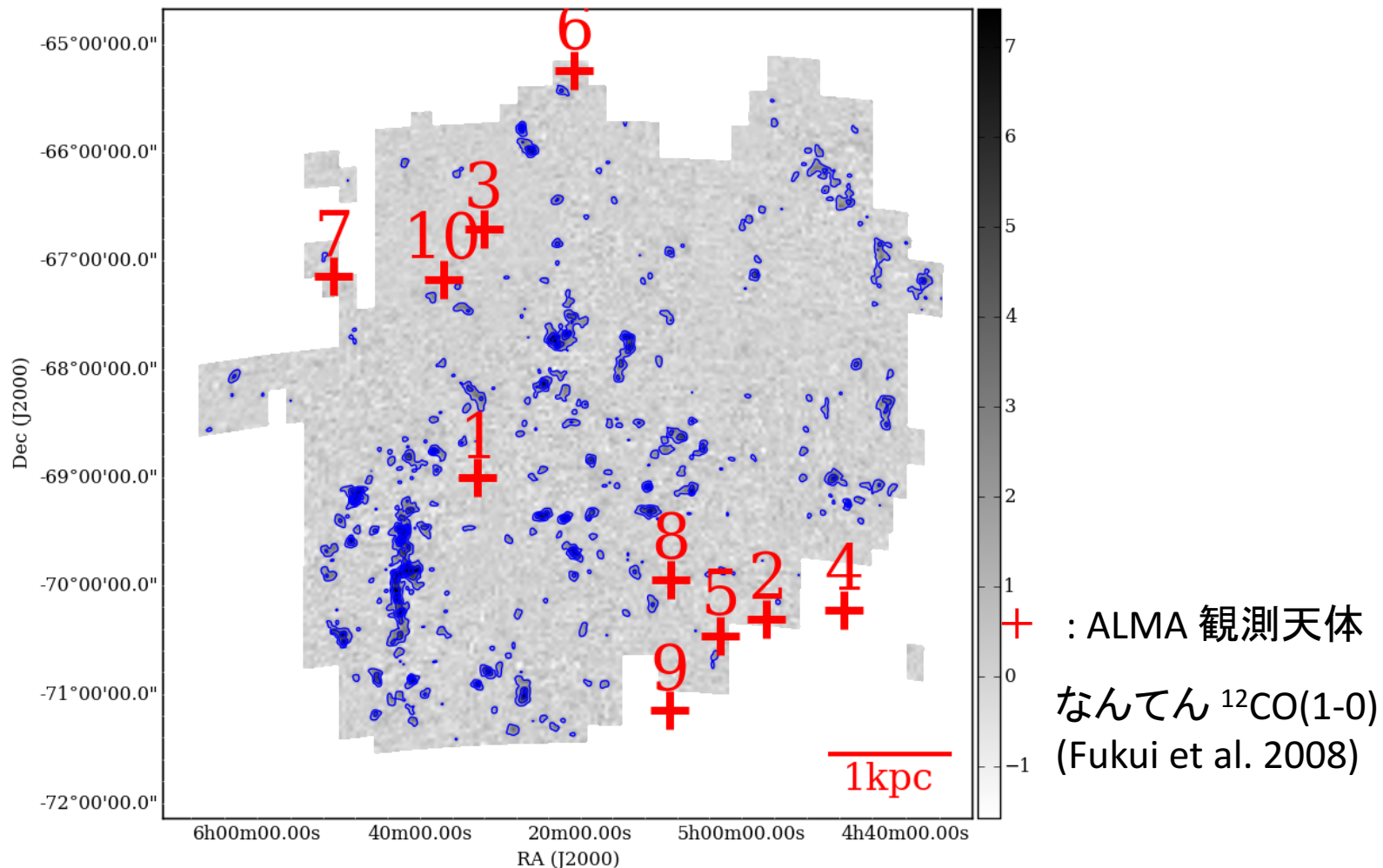
大質量星の形成を調べるには最適

とはいえ、分解能が足りない!!

=>高分解能望遠鏡の必要性



巨大分子雲から孤立した大質量星形成領域の観測

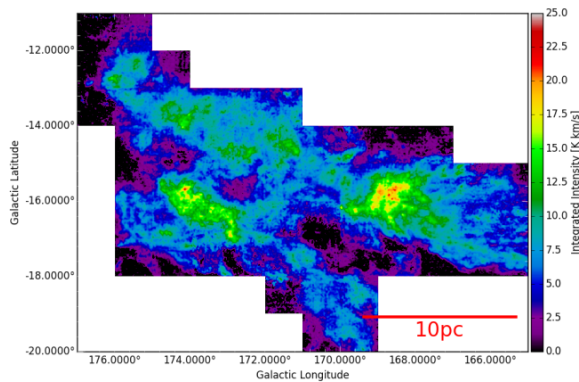


巨大分子雲から孤立して存在する大質量星原始星が存在

銀河系/他のLMC天体との比較

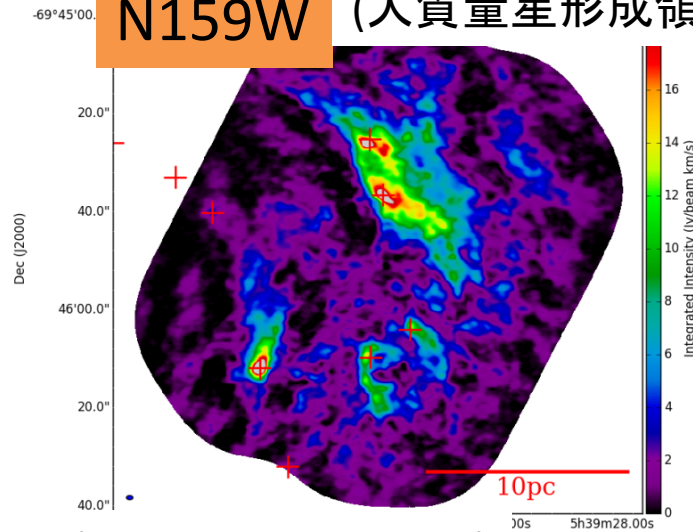
牡牛座分子雲

(小質量星形成領域)



(Osaka 1.85m, Tokuda+ in prep.)

N159W (大質量星形成領域)



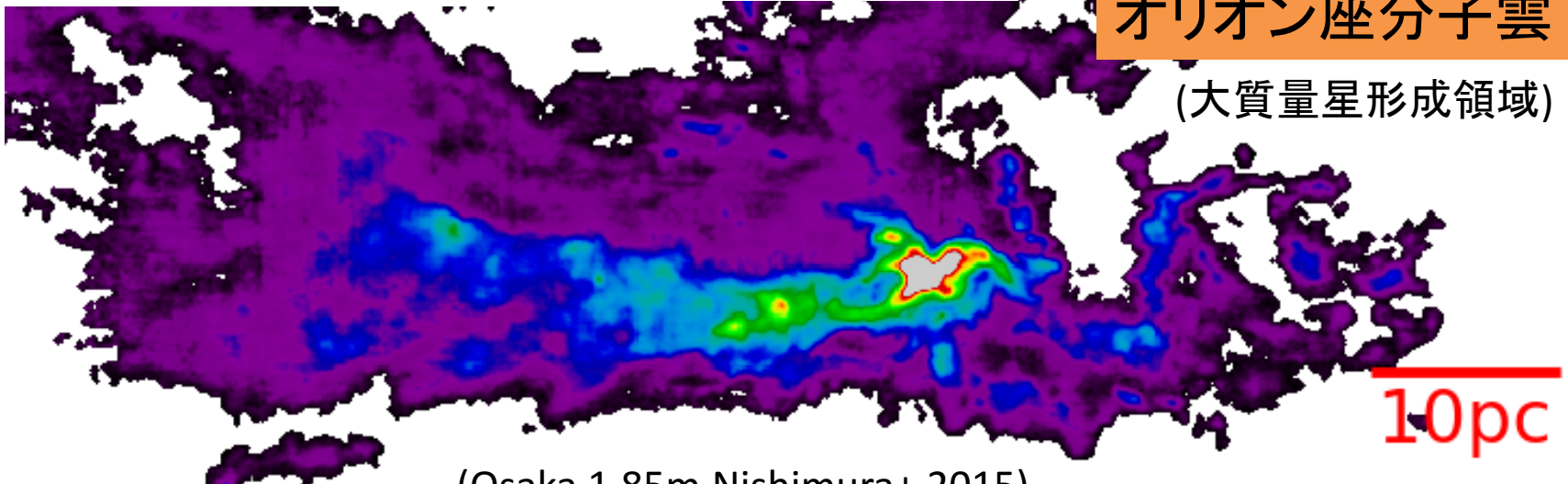
(ALMA, Fukui + 2015)

Target10

Harada+ in prep.

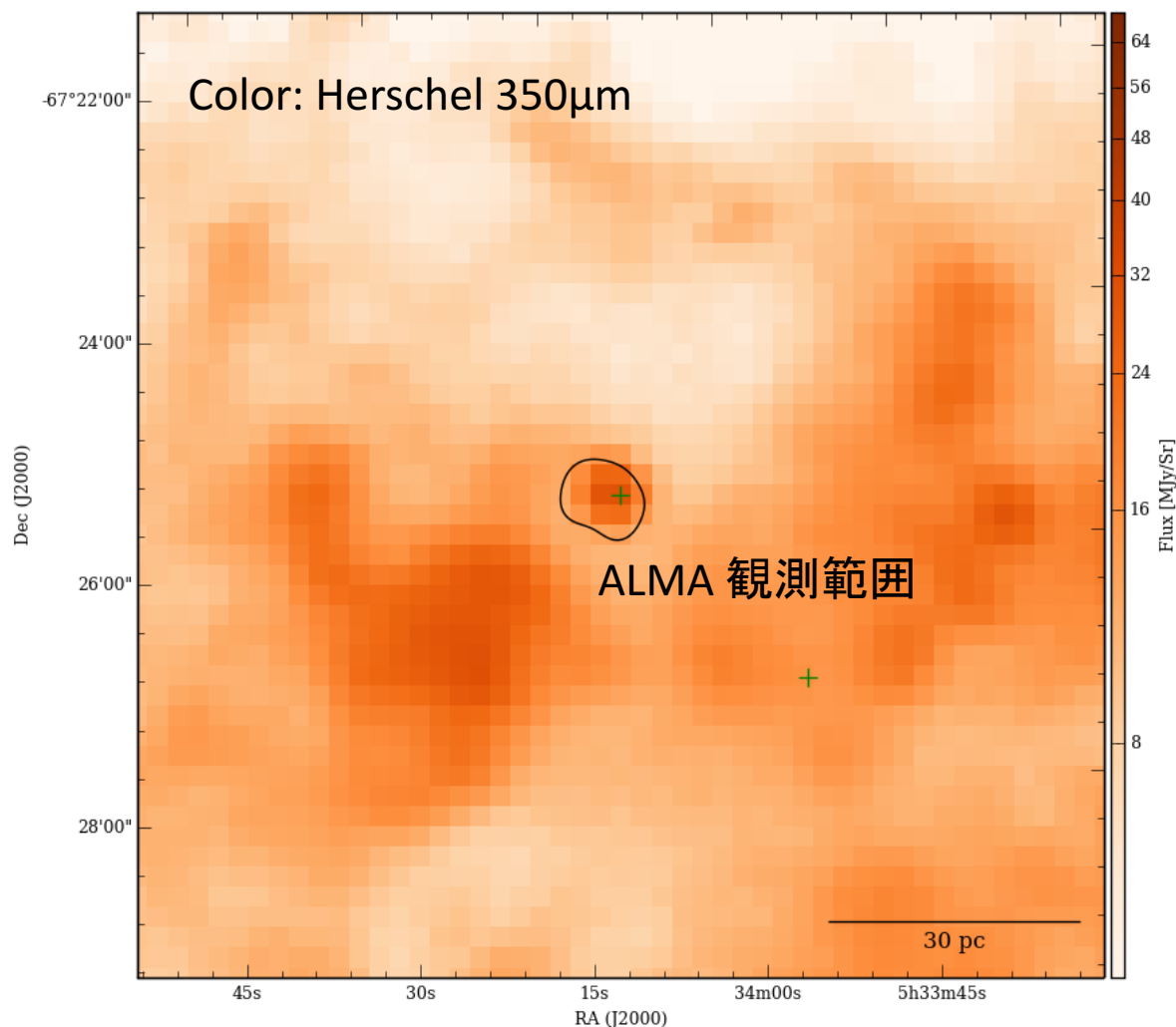
オリオン座分子雲

(大質量星形成領域)



(Osaka 1.85m, Nishimura+ 2015)

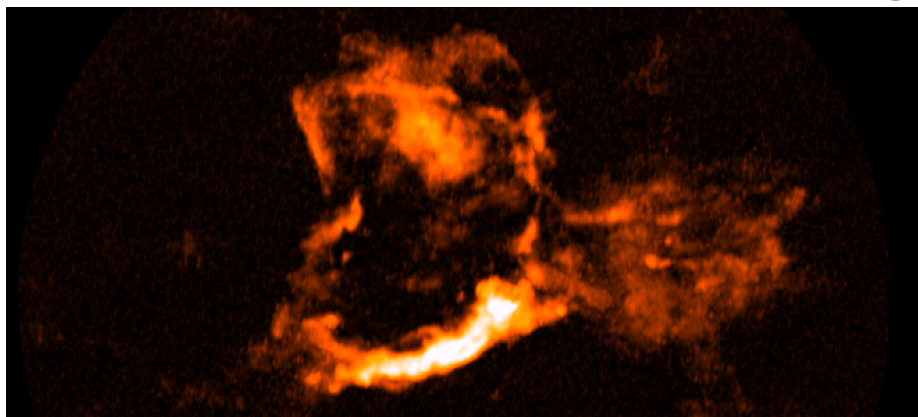
CO でコンパクトで非常にコンパクト ダスト連続波やHIで見ると巨大なガスの一部かもしれない



南極30m望遠鏡であれば、ダスト連続波 $\sim 1''$ 程度の分解能の研究ができる
=> フィラメント構造(sub-pcスケール)が見えてくるかも?

まとめ: 南極30m望遠鏡でできること

(前半) 近傍星形成領域 Warm CO ガスの観測 ~乱流衝撃波を探る~
-すでにALMA, *Herschel*などで乱流起源と思しきWarm gas の兆候が!!



Tokuda+18

=> 広域高分解能観測による乱流の散逸過程や衝撃波圧縮過程を調査

(後半) 1日中観測可能なマゼラン雲のダスト連続波や[CI]観測

低金属量環境下の大質量星形成に至る

薄いガスの調査及びトレーサーとしての振る舞いの調査

(COでトレースできる濃い部分はALMAでやる)