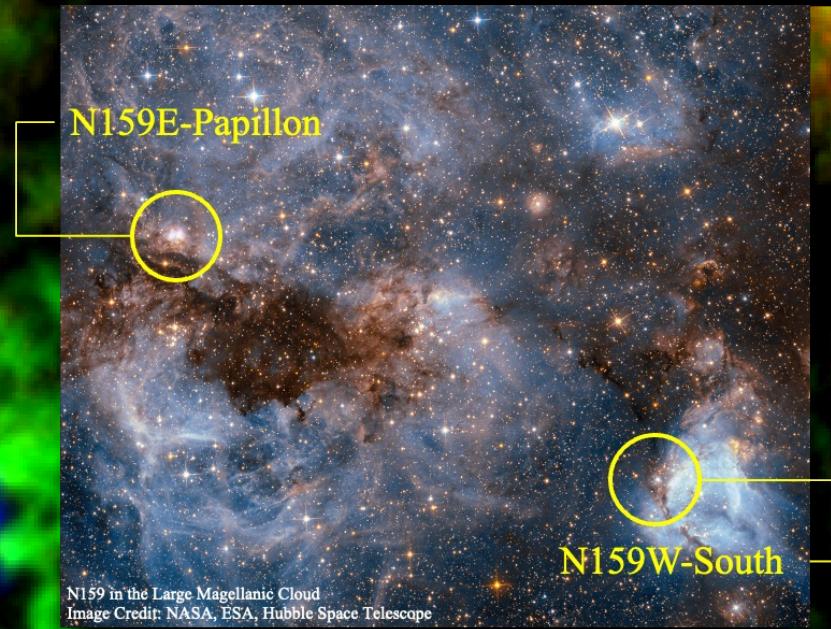


# 低金属量環境での星形成はどこまで普遍的か？ 大小マゼラン雲におけるALMAサブpcスケール 観測からの検証



Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/  
Fukui et al./NASA-ESA HST

徳田一起 (香川大学)

Topics

- 巨大分子雲と恐竜絶滅
- 大小マゼラン雲の原始星の誕生: アウトフロー
- 大小マゼラン雲のフィラメント状分子雲

# 恐竜絶滅・スノーボールアースについて



約6600万年前に起きた天体衝突の様子を描いた想像図(Credit: Chase Stone)



スノーボールアースの想像図(Wikipediaより)

=>共通して起こったこと

地球の寒冷化: 原因は何か? 実は研究者の間でも論争が絶えない

# 星雲遭遇による白亜紀末の大寒冷化と大量絶滅

二村 徳宏 ほか

〈日本スペースガード協会



二村

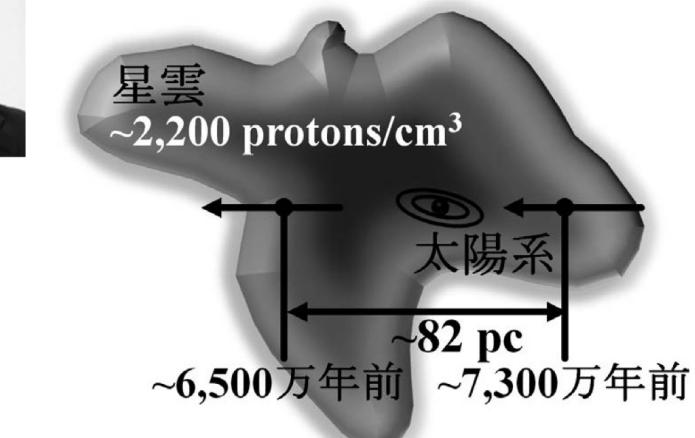
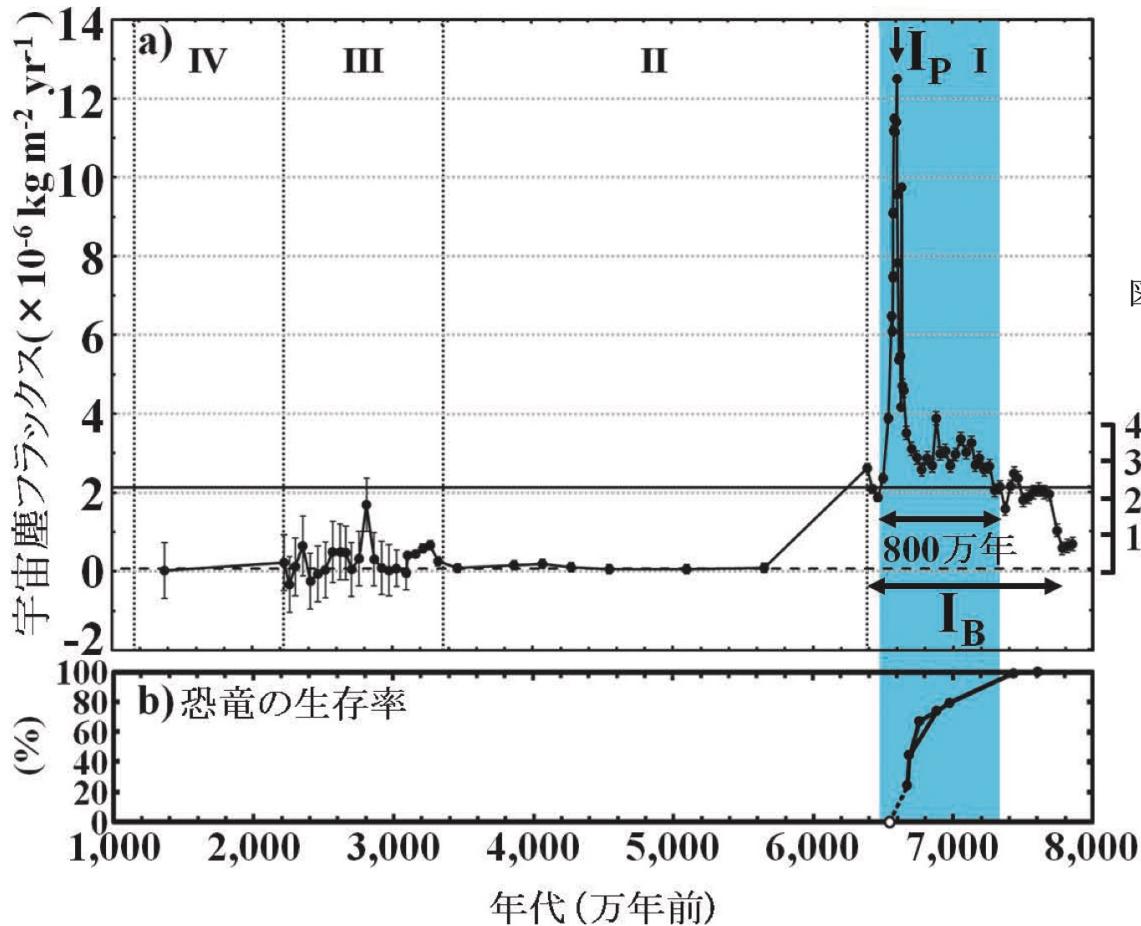
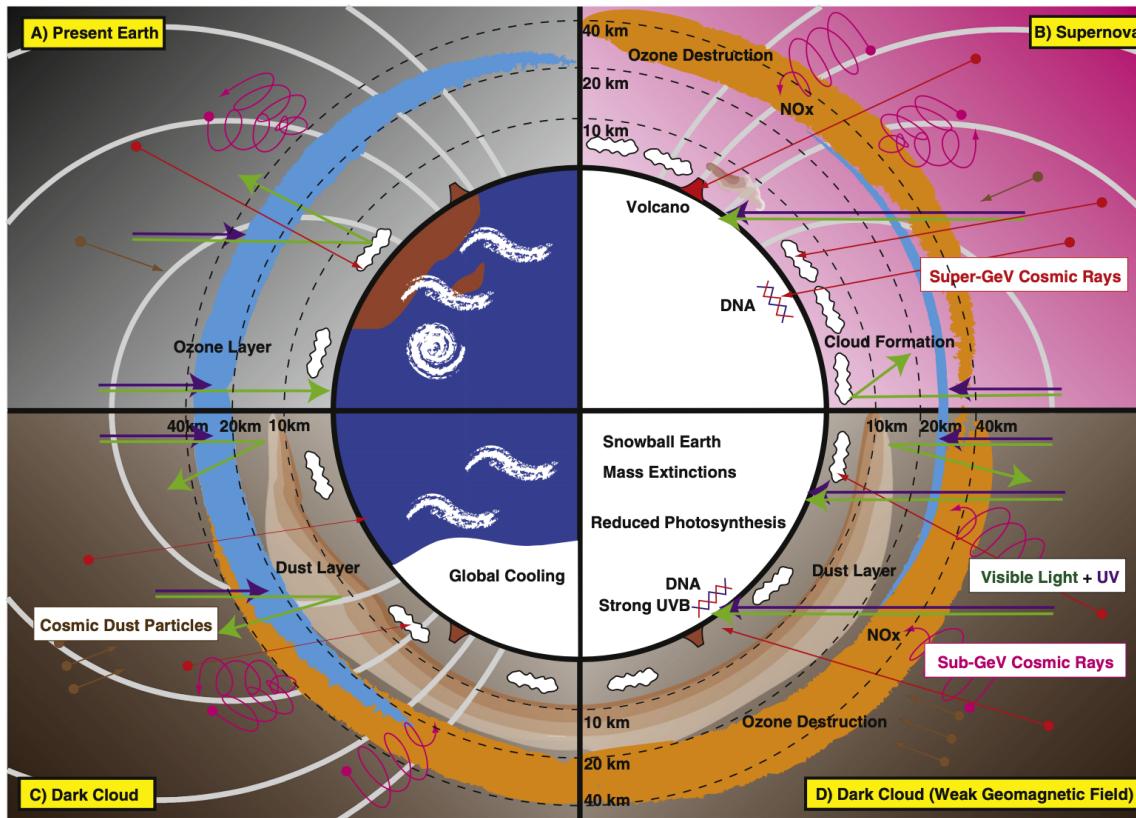


図6 星雲遭遇説の模式図。太陽系と星雲の大きさの比率は異なる。

天文月報2018年2月号より

# Snowball Earth events driven by starbursts of the Milky Way Galaxy

Ryuho Kataoka <sup>a</sup>  , Toshikazu Ebisuzaki <sup>b</sup>, Hiroko Miyahara <sup>c</sup>, Shigenori Maruyama <sup>a</sup>



Kataoka+13; 14

- ・爆発的星形成=>超新星爆発の多発=>銀河宇宙線の増加=>地球の雲の増加
- ・Dark cloudに突入するのでダスト量の増加

# 銀河系でもなく、遠方銀河でもなく、 なぜマゼラン雲なのか？

- ① 視線方向上の重なりと距離の不定性を最小限に抑える

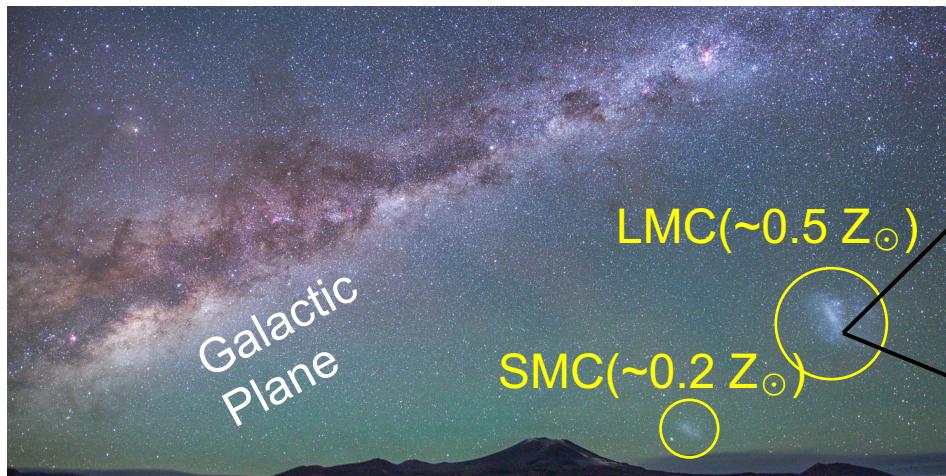
銀河系の観測

Edge-on view

Solar system



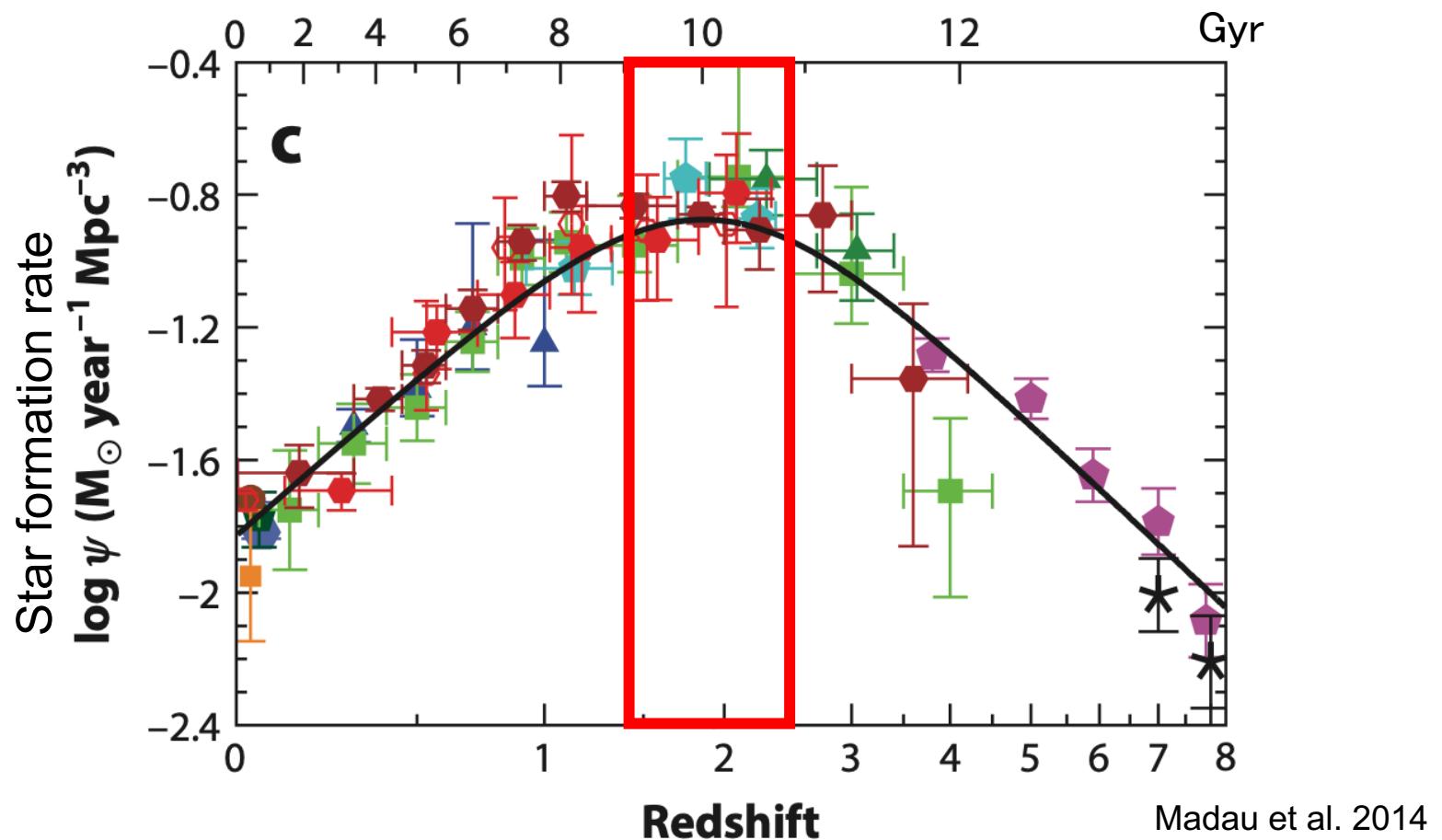
- ② 低金属量の実験場( $0.2\text{-}0.5Z_\odot$ )



- ③ スターバーストの起源

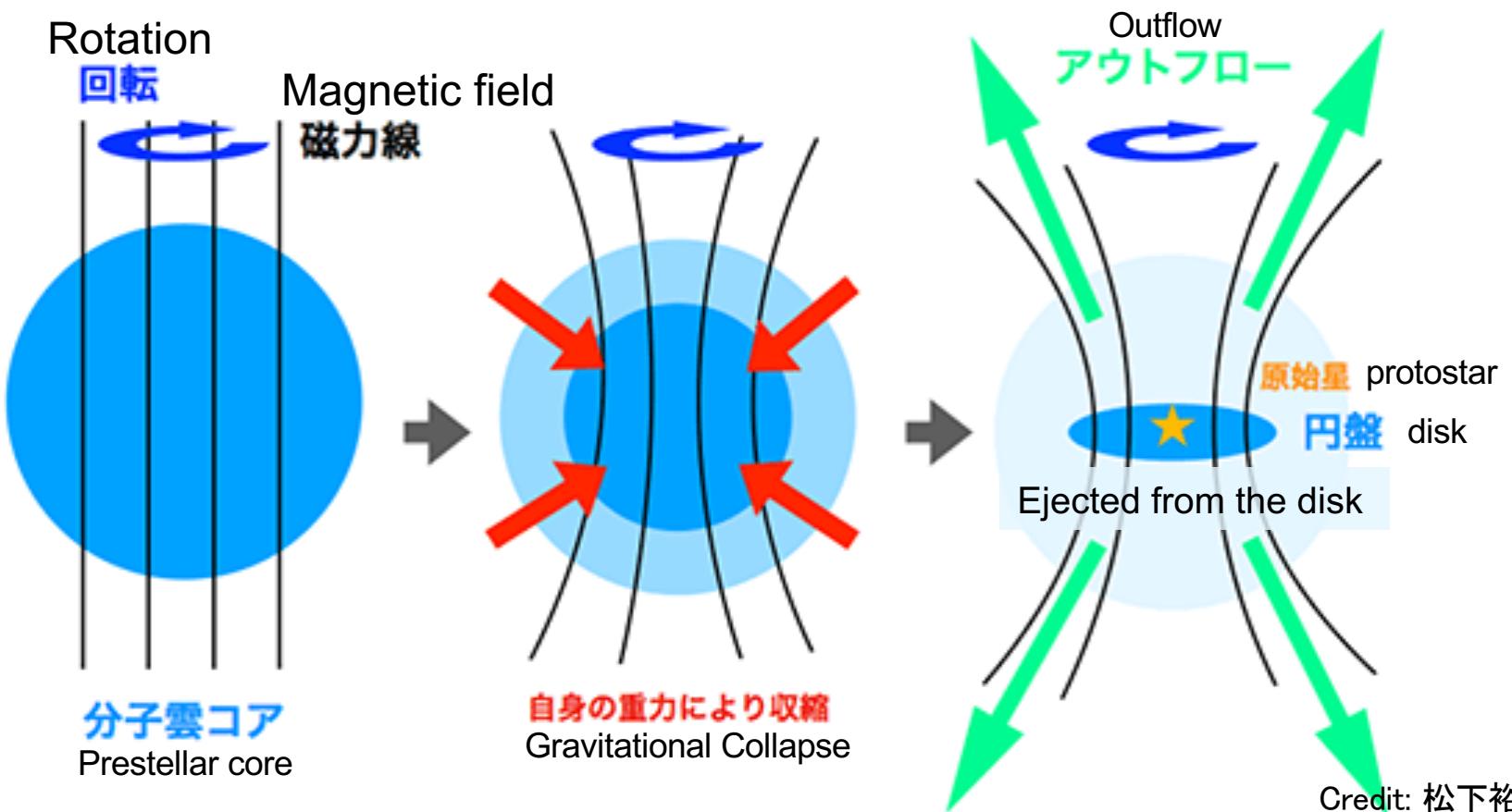


# The most active phase of star formation in cosmic history



- 小マゼラン雲の金属量( $Z \sim 0.2 Z_{\odot}$ )で約100億年前に相当(e.g., Pei+1999; Madau+2014)
- 水素分子形成が困難になりはじめる金属量 (c.f., Krumholz+09)

# 原始星アウトフロー: 分子雲コアから原始星への変遷

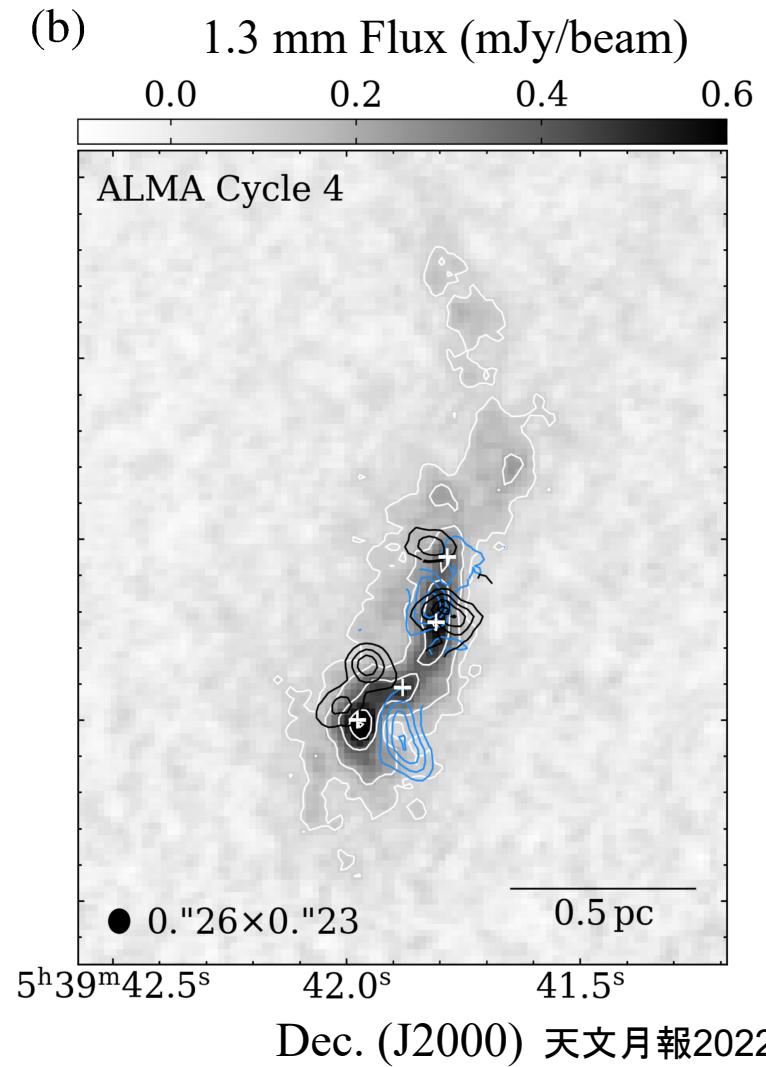
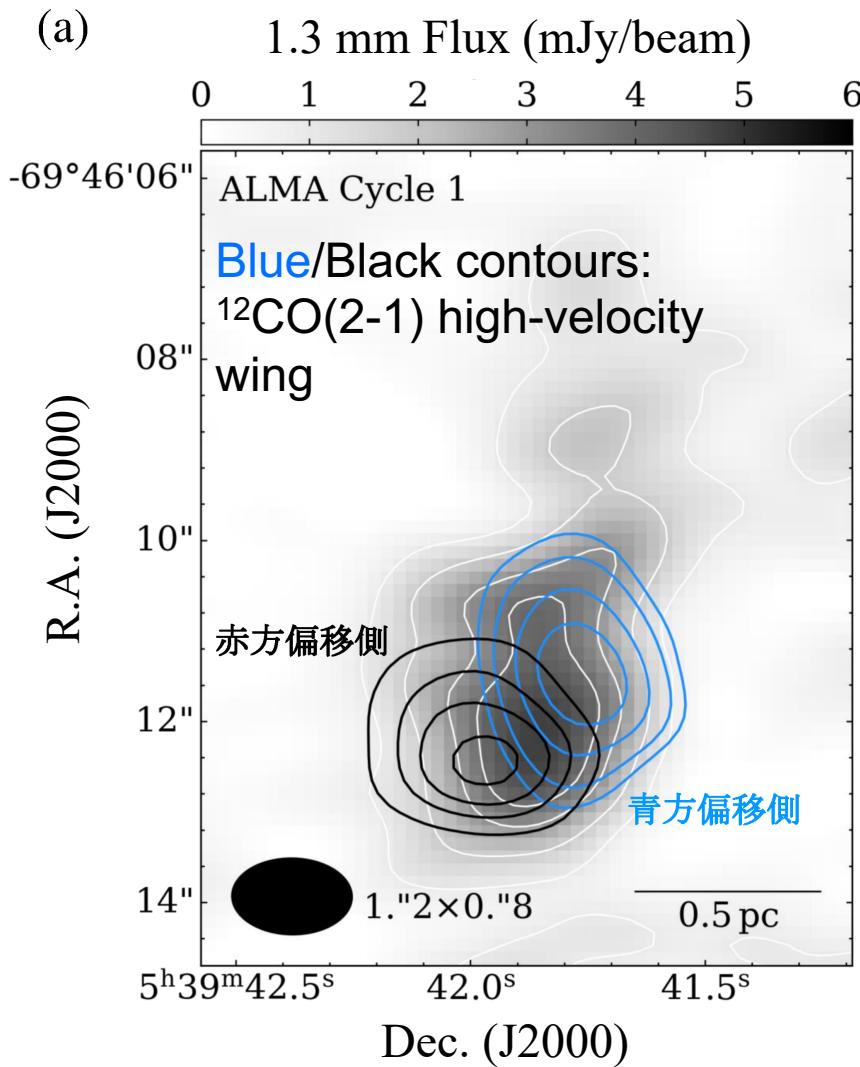


星形成における角運動量問題と磁束問題<sup>\*1</sup>

5桁以上の角運動量が星形成過程の間に除かれなければならない=>アウトフロー

\*1ちなみに真の意味で磁束問題は解決されていない(Tokuda+23, 関連講演=>村社さん)

# 大マゼラン雲、すなわち銀河系の外で初めての捉えた産声

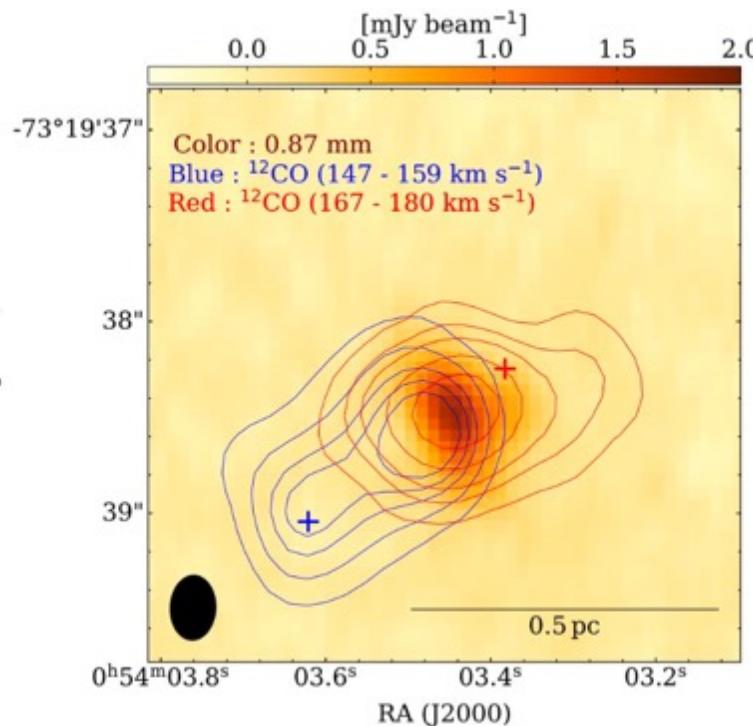


0.1 pcの解像度の観測=>複数原始星からのアウトフロー (Tokuda+19)

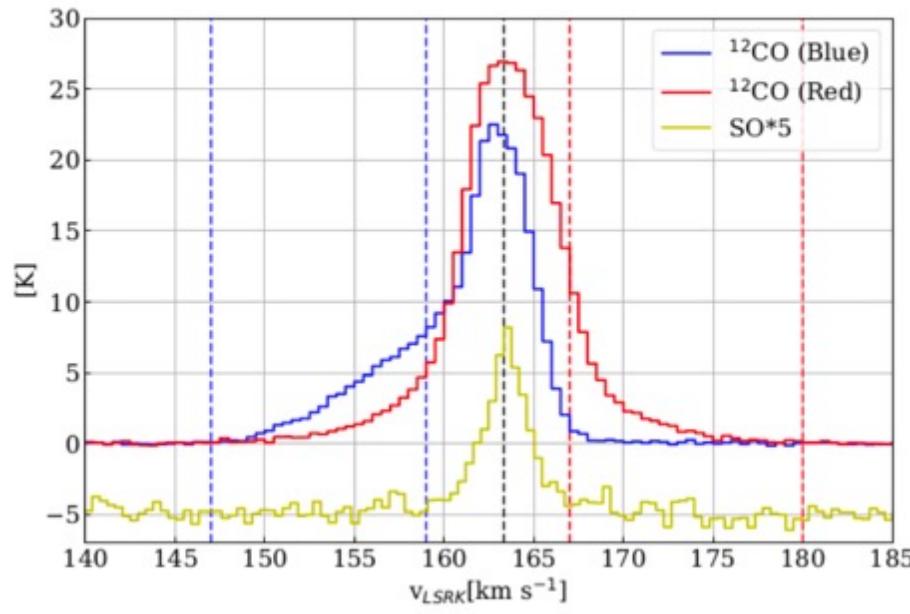
天文月報2022年12月

# 小マゼラン雲原始星アウトフローの初検出

(a)



(b)



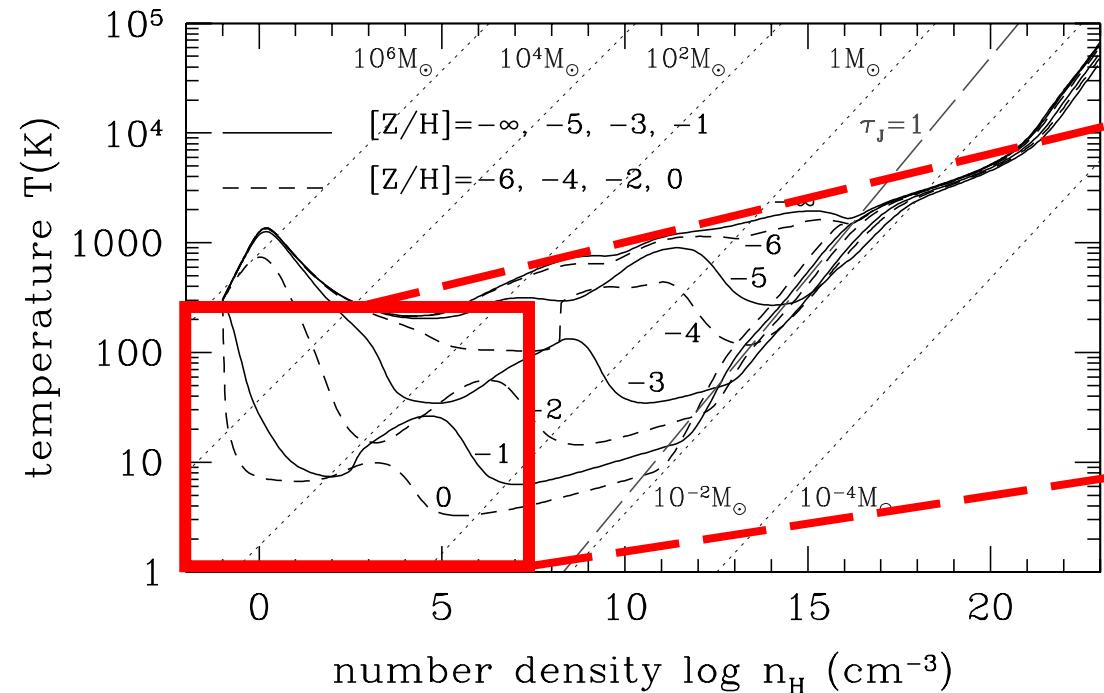
探すのに相当苦労しました(LMCでの発見より7年越しの成果)

- ALMAのレビューワーの評価が良くない(星間化学をやりたいというプロポーザルを通した)
- そもそも大質量原始星がLMCより少ない
- COの強度がだいぶ弱い
- 何ならSMCより10倍遠いM33の方が先にアウトフローが見つかった(Tokuda+20)
- Tokuda+22b以来、きちんとSMCの他の天体でも見つかる(Shimonishi+23; Tokuda+25)

分子雲コアから原始星が誕生するメカニズムは  
宇宙の歴史100億年(金属量 $0.2\text{-}1 Z_\odot$ )を通して普遍的

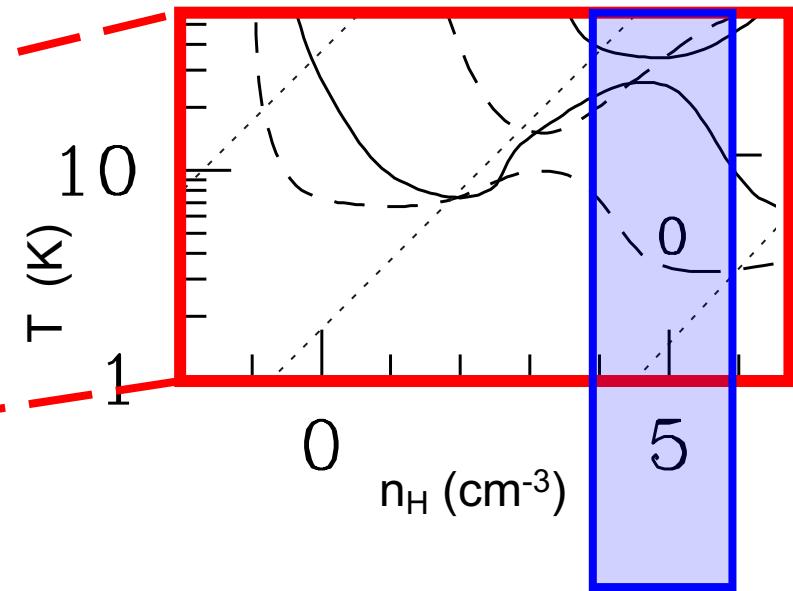
# 金属量によって変化する分子ガスの熱進化

Omukai et al. 2005



0: present day ( $Z \sim 1 Z_{\odot}$ )

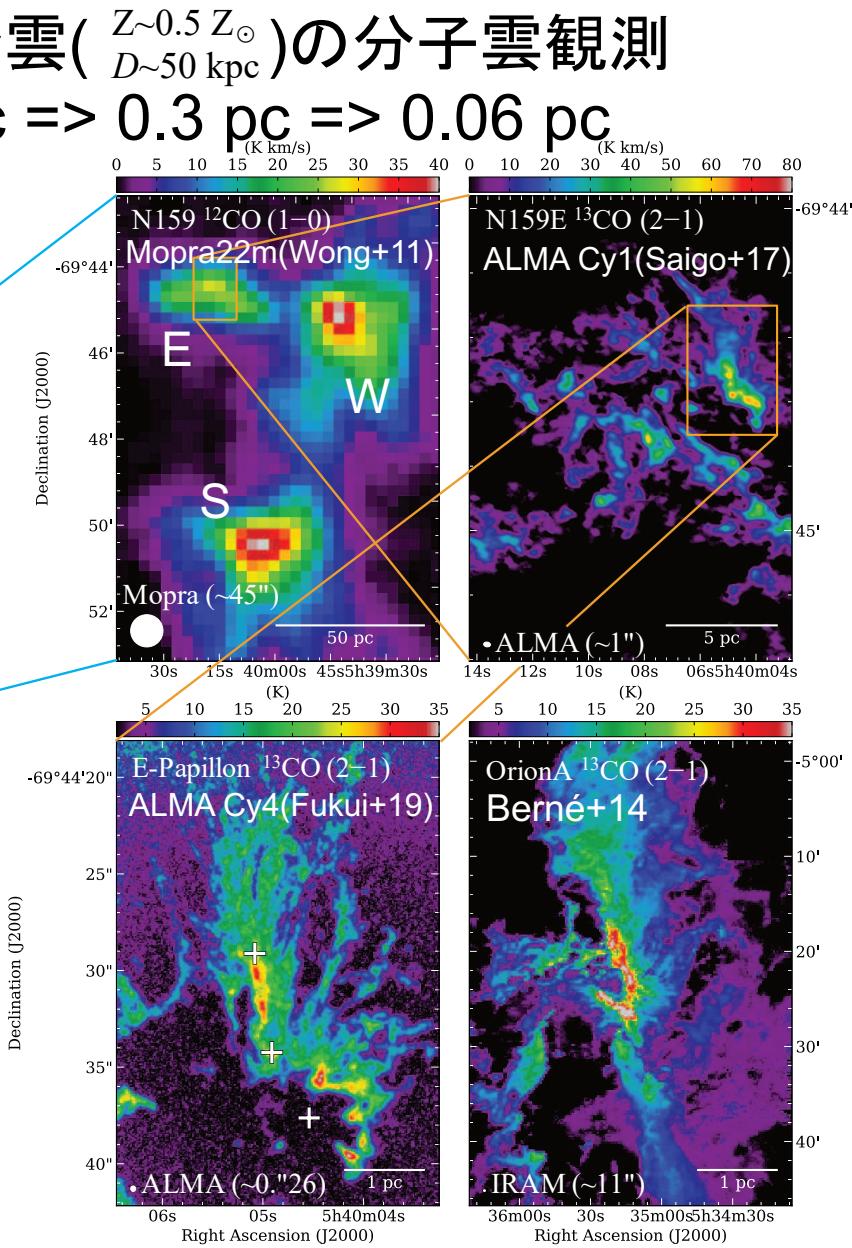
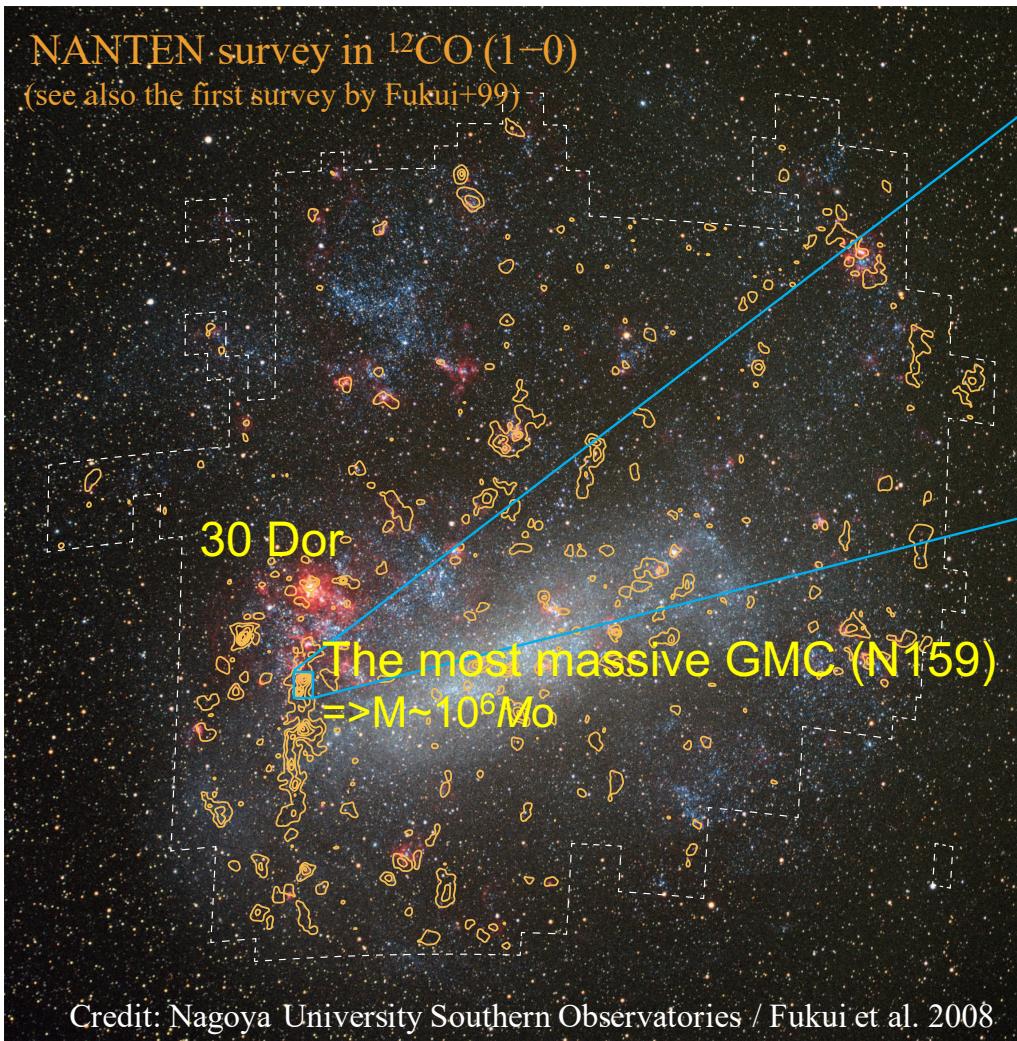
1: マゼラン雲の金属量に近い ( $Z \sim 0.1 Z_{\odot}$ )



## 分子雲コア・フィラメントの密度 この付近で熱的な 振る舞いが1桁異なる

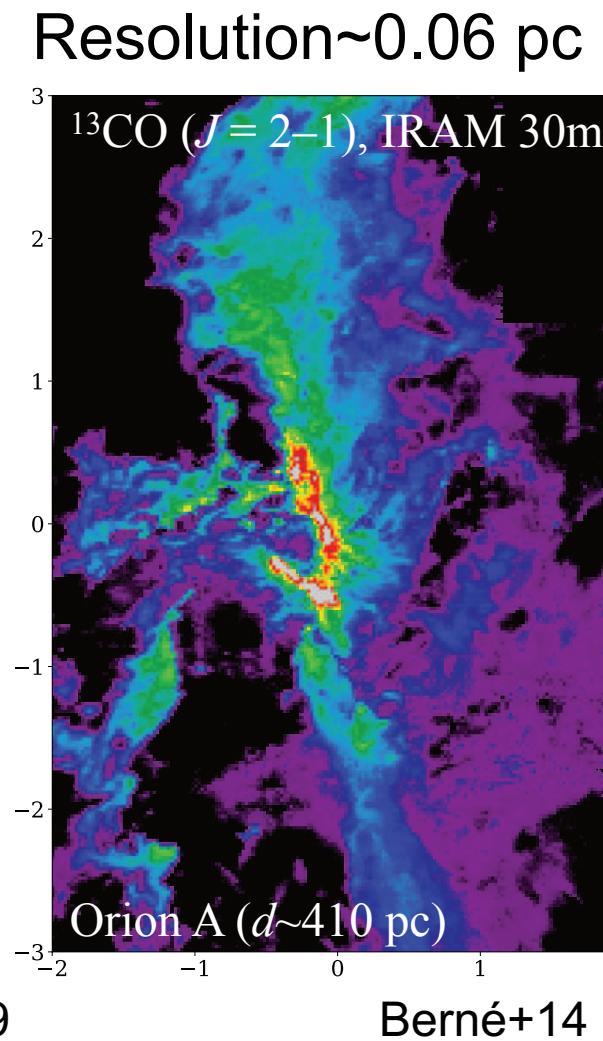
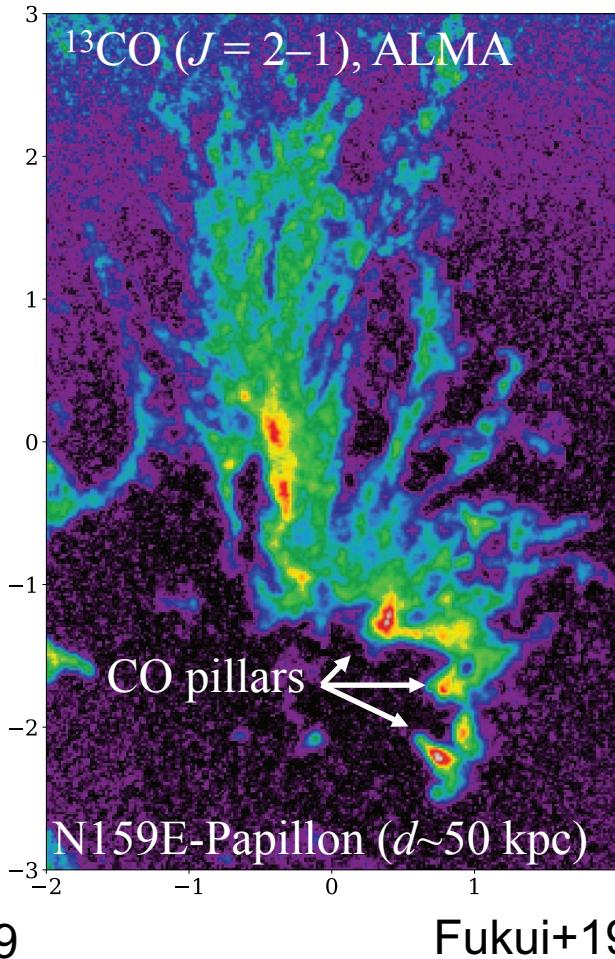
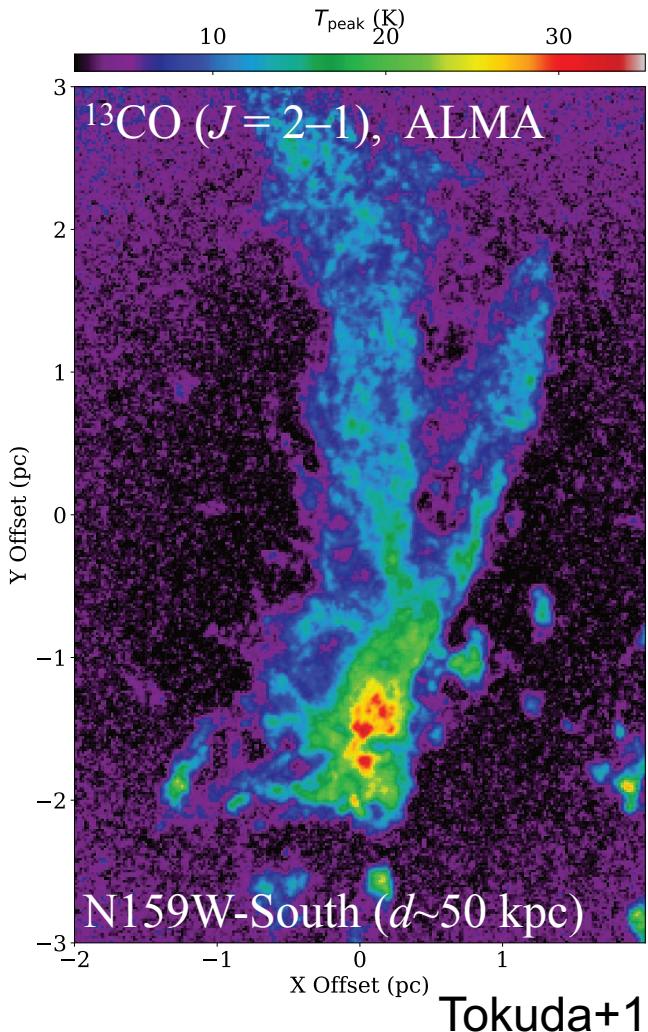
大小マゼラン雲は分子雲コア形成に至る前段階を観測的に検証できる

# 20年以上の歴史を持つ大マゼラン雲( $Z \sim 0.5 Z_{\odot}$ , $D \sim 50$ kpc)の分子雲観測 空間分解能 $40$ pc $\Rightarrow$ $10$ pc $\Rightarrow$ $0.3$ pc $\Rightarrow$ $0.06$ pc



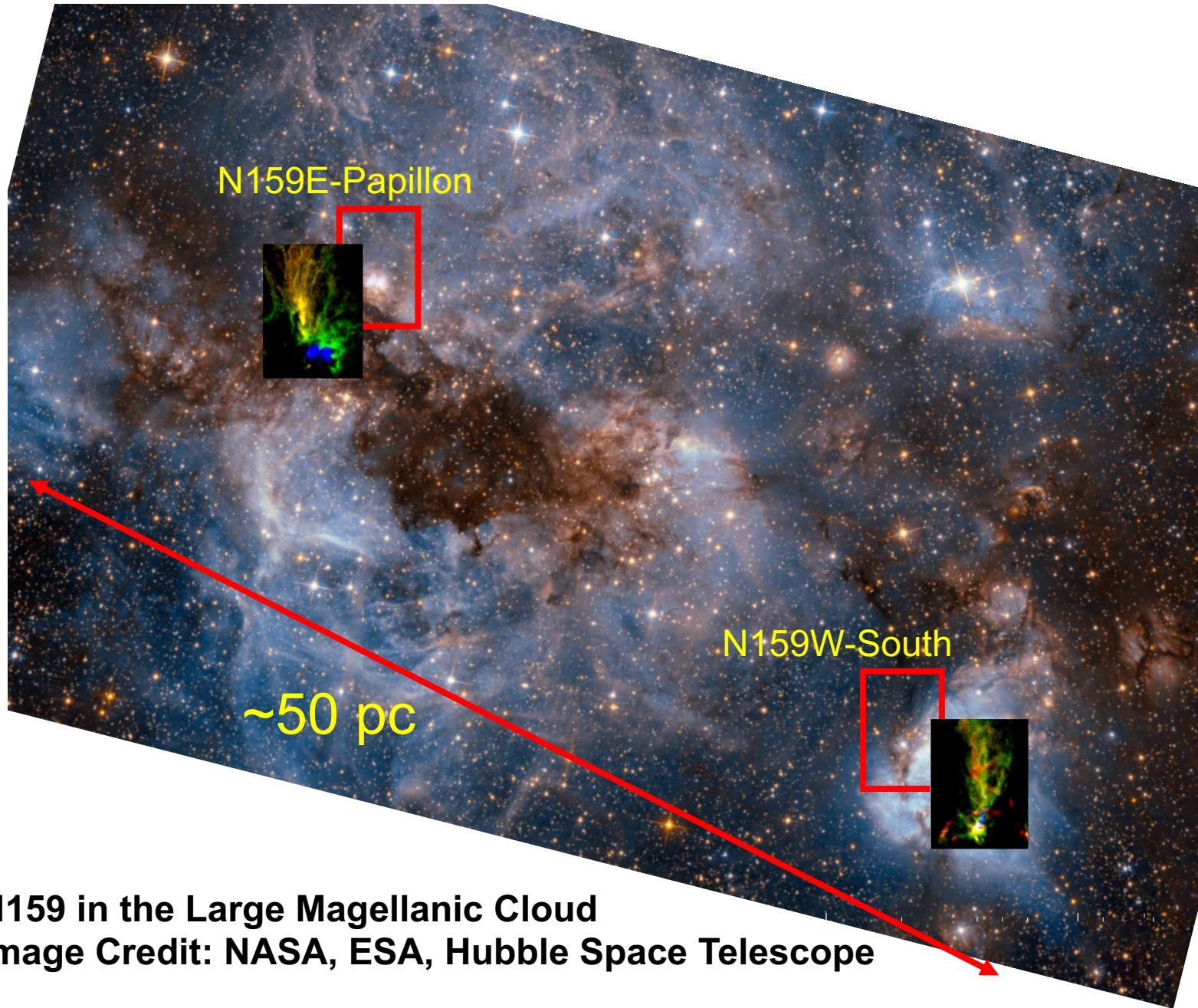
ALMAの分解能~銀河系の分子雲(e.g., Orion)を单一鏡で観測

# <0.1 pc resolution study in the LMC N159



Filamentary structures ( $M_{\text{line}} \sim 100\text{-}1000 M_{\odot} \text{ pc}^{-1}$ , width  $\sim 0.1 \text{ pc}$ )  
**-head-tail hub-filament**, pillar-like features

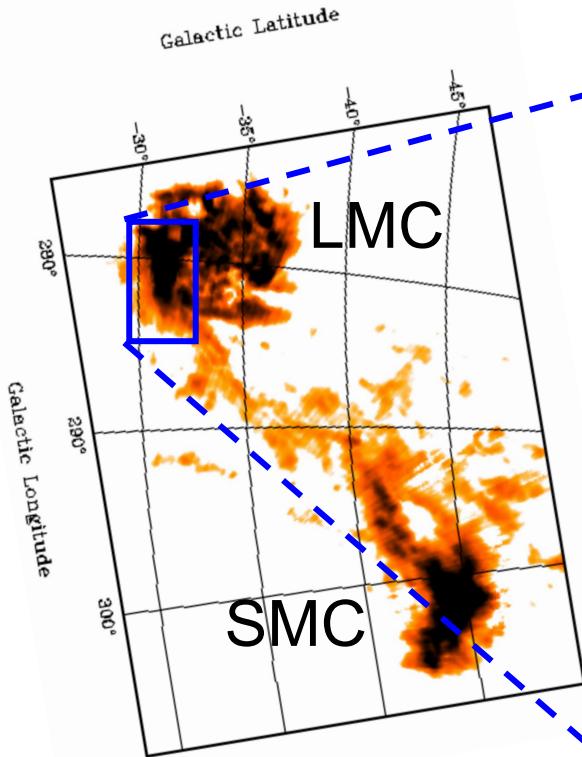
# 非常に大質量な双子分子雲の起源は？



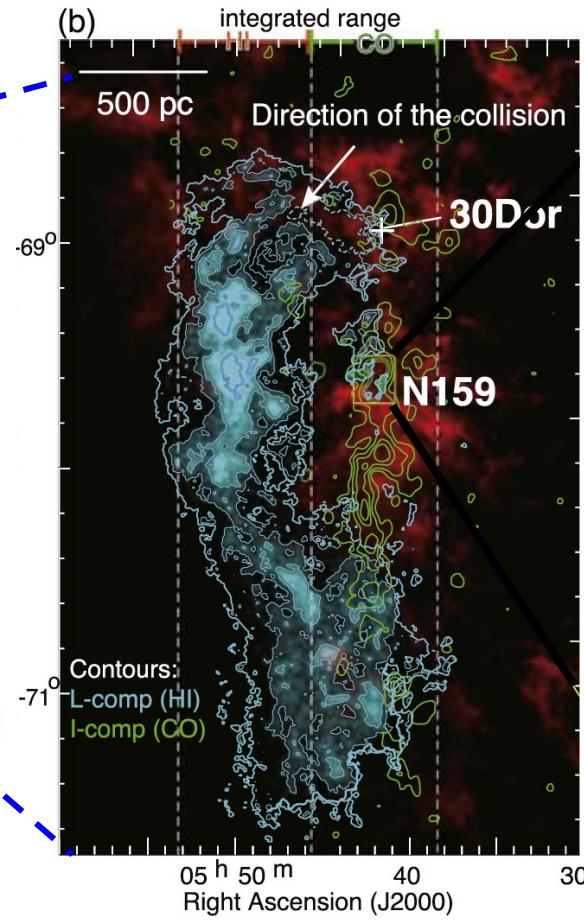
# 大マゼラン南東部(Molecular ridge)のHIガス衝突

e.g., Fujimoto & Noguchi 90; Fukui+17; Tsuge+19; 24

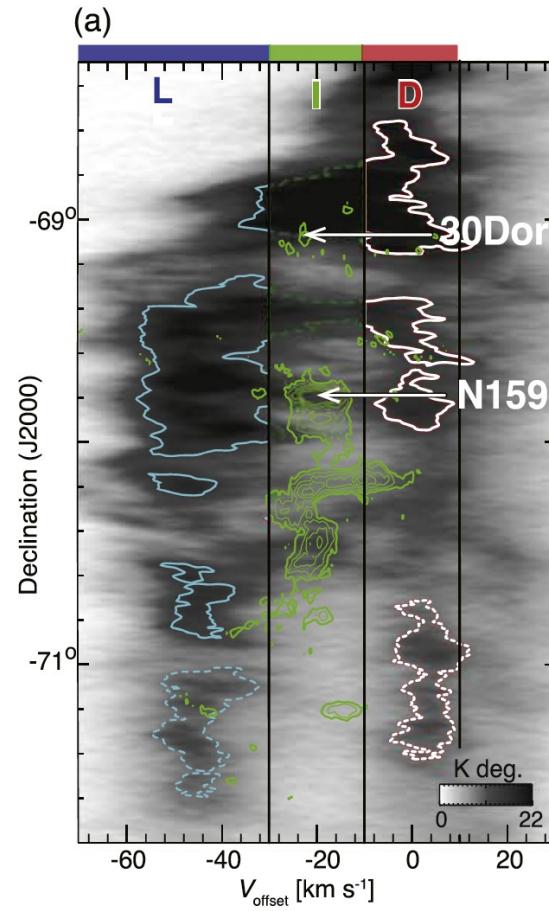
大小マゼラン雲の相互作用が銀河のガス分布を非対称にした



HI map  
(Putman+98)

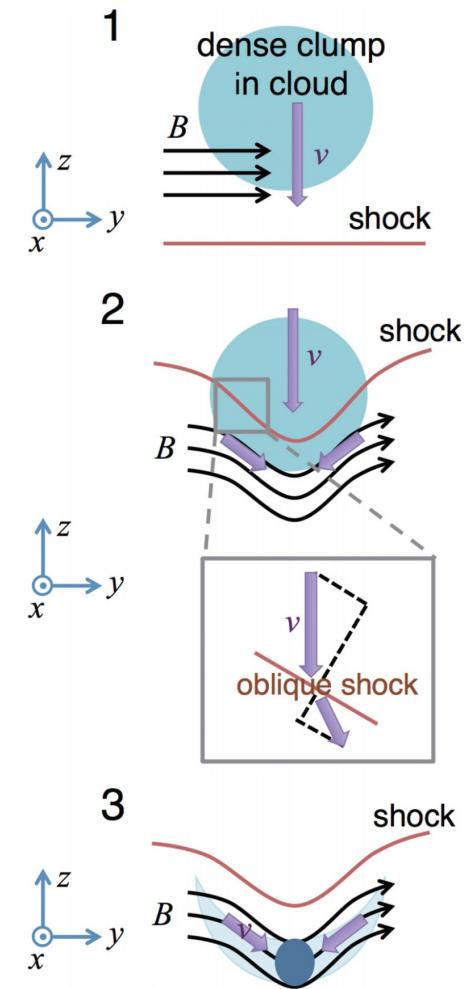
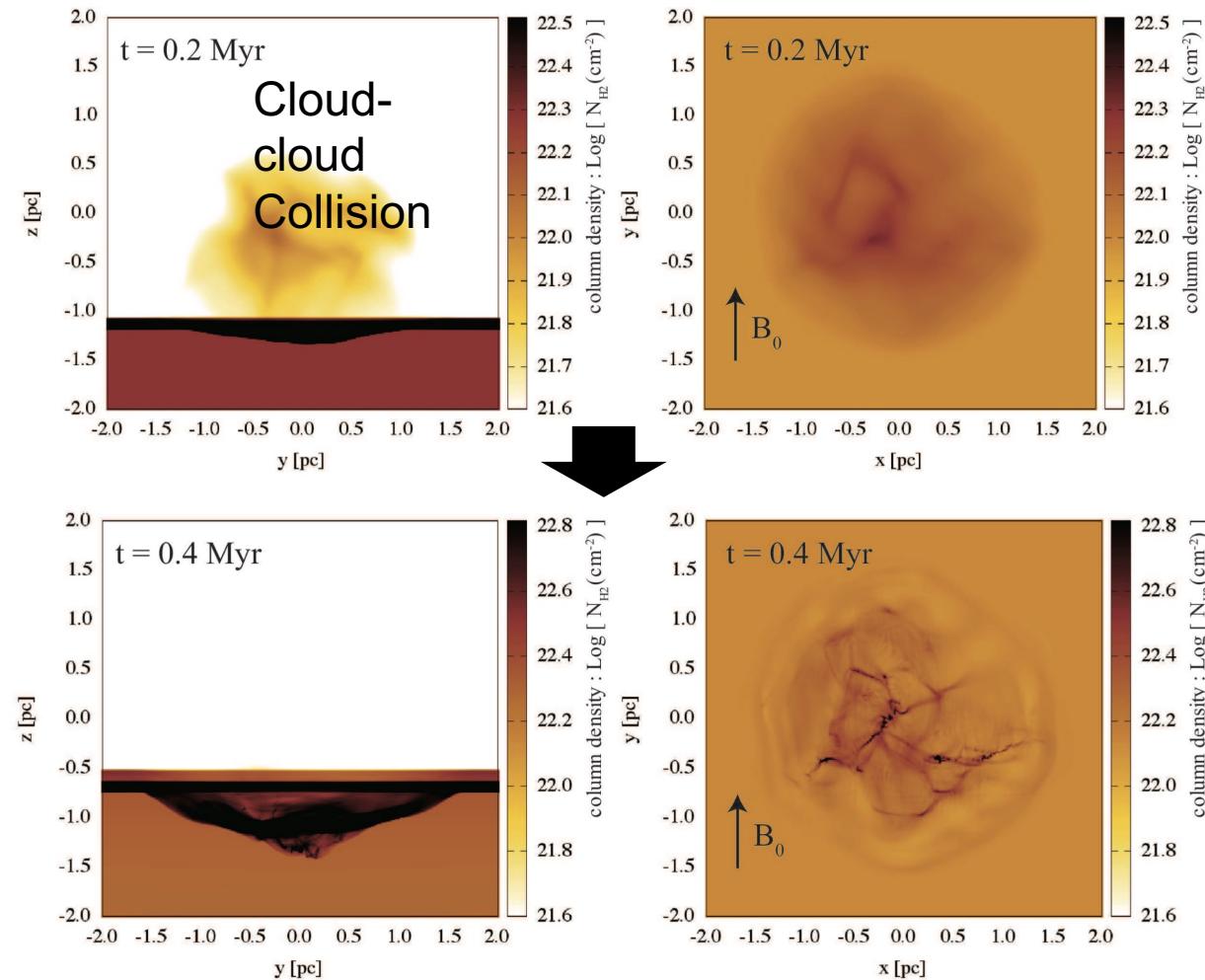


Fukui+19 (original paper from Fukui+17)



N159は空間的、速度的に最も圧縮を受けている場所に位置する

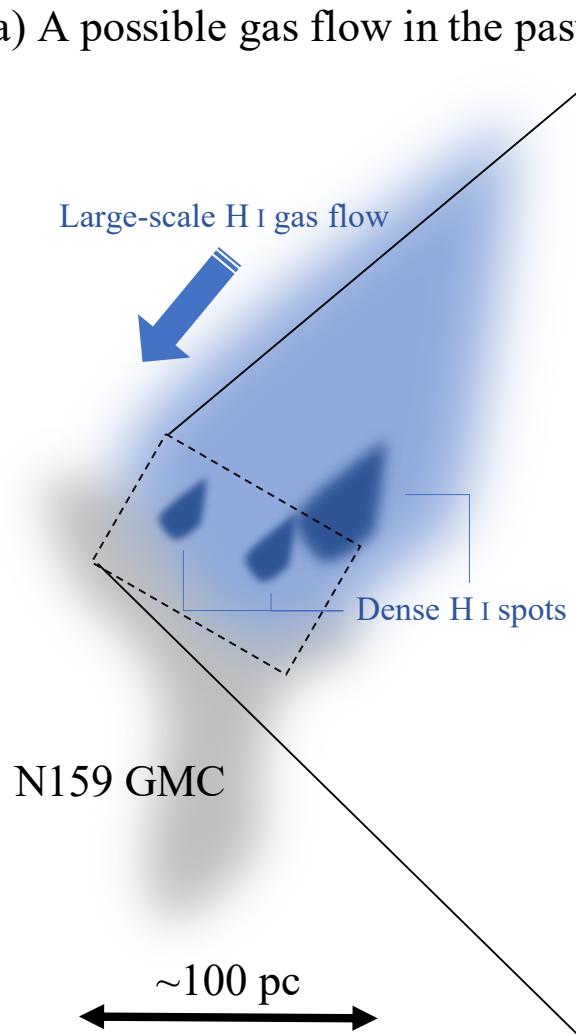
# MHD Simulations of colliding clouds (e.g., Inoue et al. 2018)



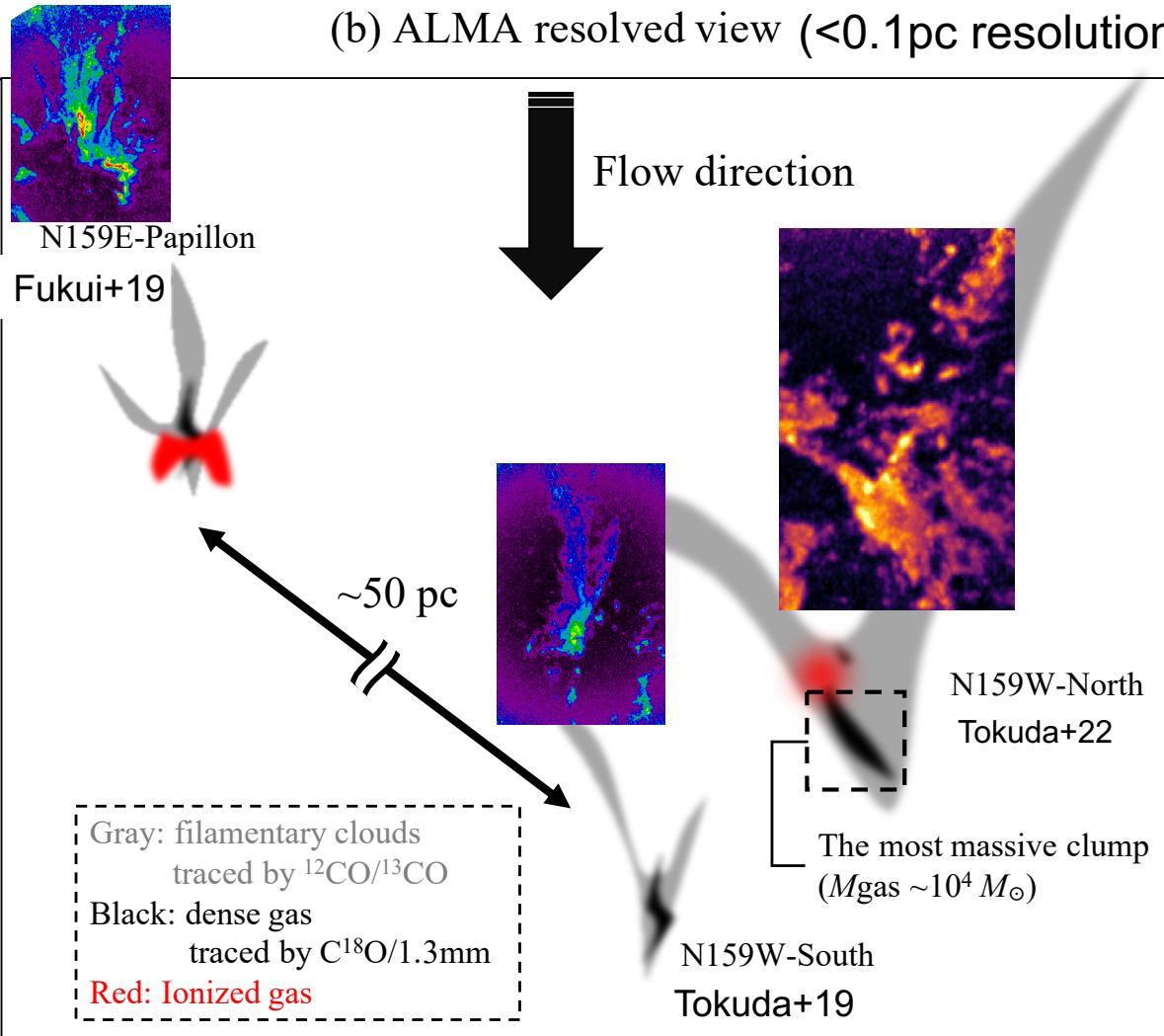
MHD shock likely induced massive (hub) filament formation

# Triggered filament/high-mass star formation by a large-scale HI gas flow around the N159 region (Fukui+19; Tokuda+19)=>**Teardrops inflow model** (Tokuda+22a)

(a) A possible gas flow in the past



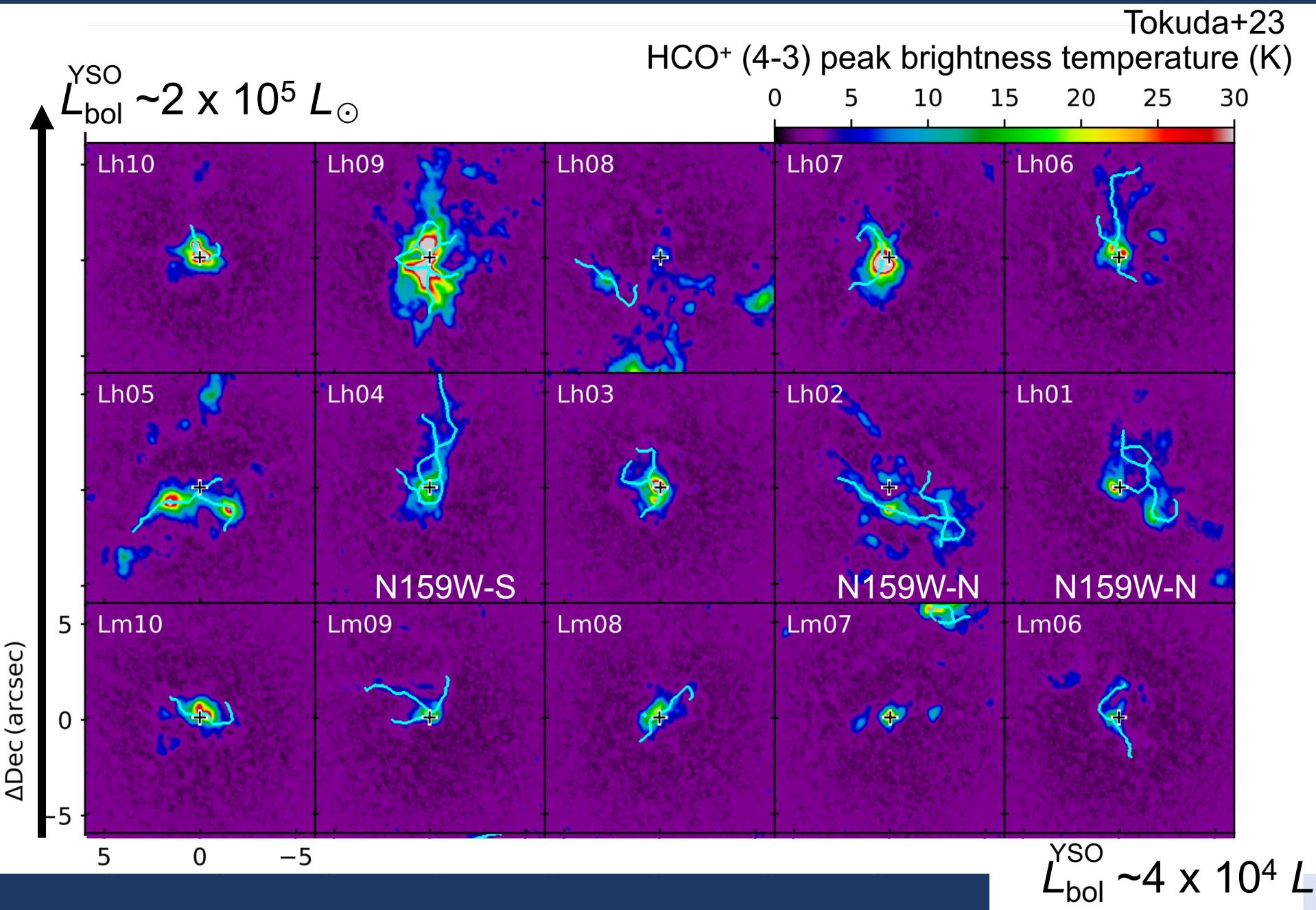
(b) ALMA resolved view (<0.1pc resolution)



密度ムラを持った大スケールの衝突流が  
ヘッドテイル構造を持った分子雲の形成を同時多発的に誘発

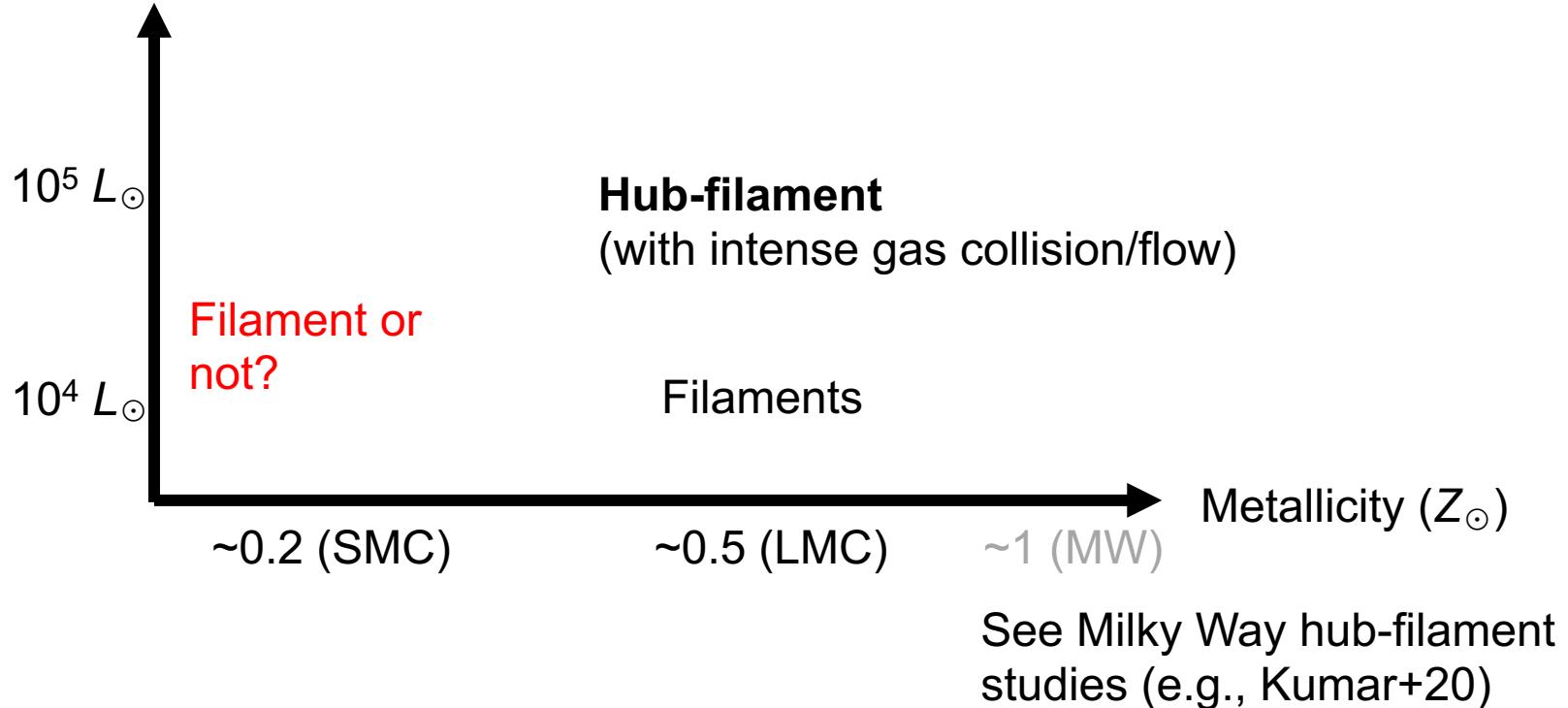
Tokuda+22a

# How is the dense gas around MYSO distributed throughout the LMC?



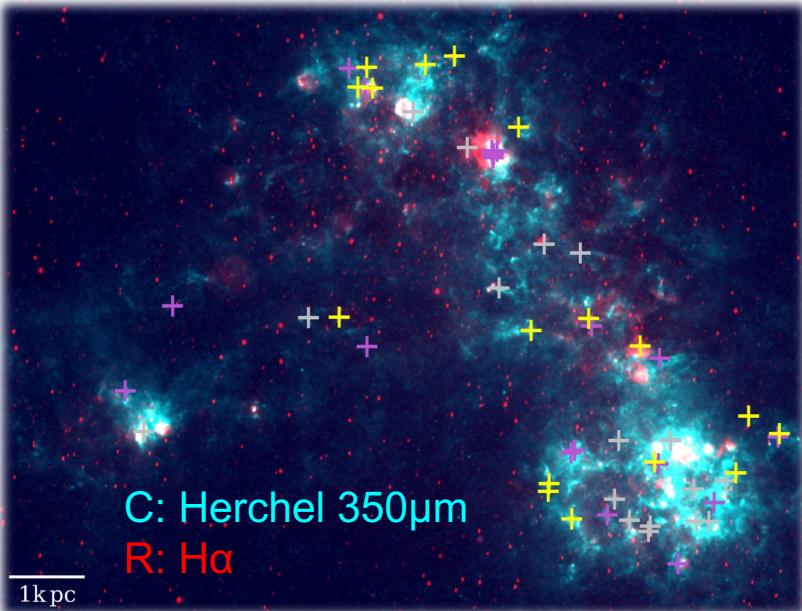
# Interim Summary

The most luminous star  
within a given cloud



# 小マゼラン雲( $Z \sim 0.2 Z_{\odot}$ , $D \sim 62$ kpc) の大質量原始星観測

| project code       | 2019.1.00534.S  | *MAGOS<br>2019.1.01770.S           | 2021.1.00518.S                     |
|--------------------|---|------------------------------------|------------------------------------|
| PI                 | Zahorecz, S.  | Tanaka, K.                         | Zahorecz, S.                       |
| Line               | <b><math>^{12}\text{CO}(J=3-2) \Rightarrow \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}</math> dense gas tracer in the SMC</b><br>(*Muraoka et al. 2017, Tokuda et al. 2021) |                                    |                                    |
| Array              | ALMA 12 m array   |                                    |                                    |
| Spatial resolution | <b><math>\sim 0.1 \text{ pc}</math></b>   |                                    |                                    |
| Beam size          | $0.^{\circ}45 \times 0.^{\circ}34$  | $0.^{\circ}44 \times 0.^{\circ}36$ | $0.^{\circ}32 \times 0.^{\circ}25$ |
| rms noise levels   | $\sim 0.3 \text{ K}$  | $\sim 0.5 \text{ K}$               | $\sim 0.4 \text{ K}$               |

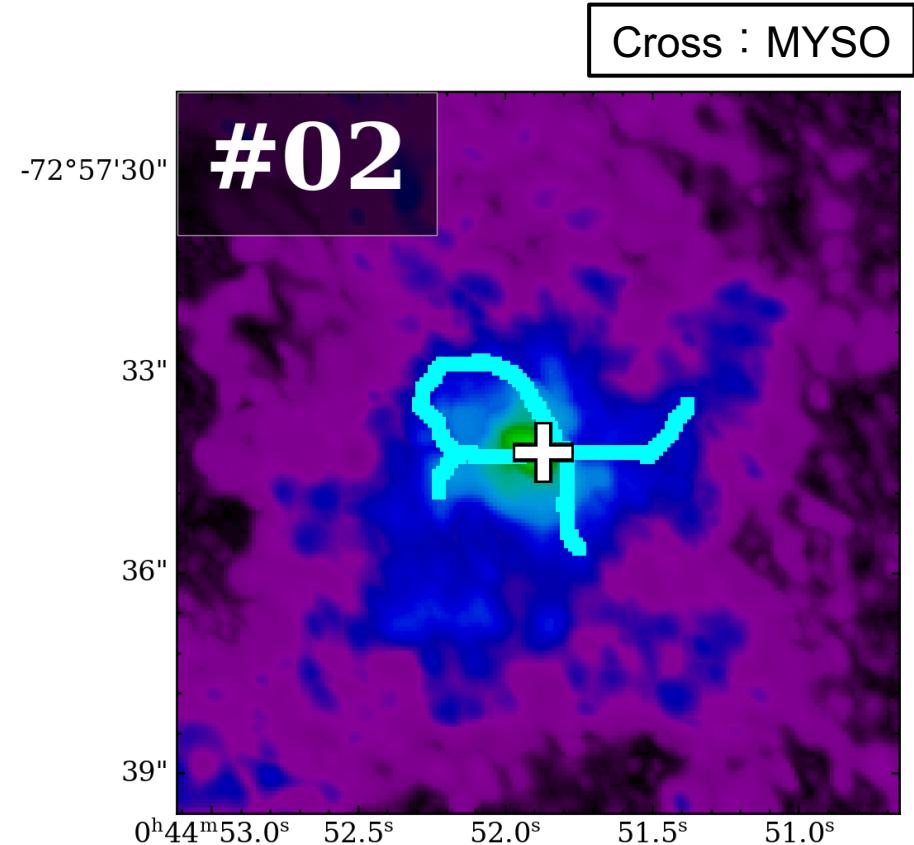
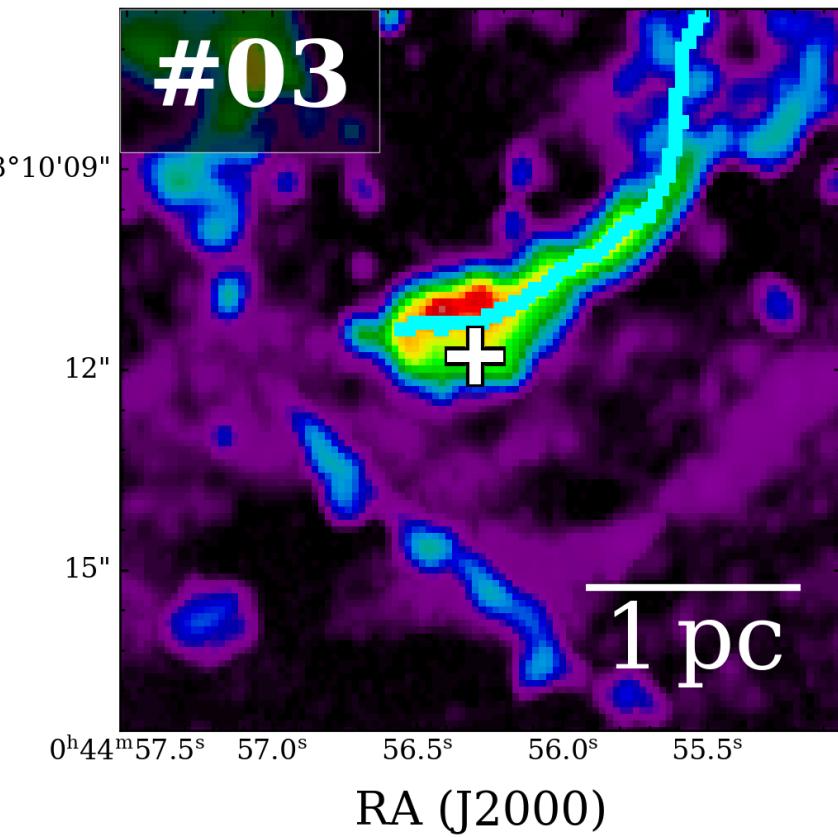


17 YSO fields in total  
- 30% of the confirmed MYSOs in the SMC  
- Luminosity:  $\sim 10^4 L_{\odot}$  ( $M_* \sim 20 M_{\odot}$ )

+: ALMA observed YSO (Oliveira+13 )  
+: YSO (Oliveira+13)  
+: YSO (Ruffle+15)

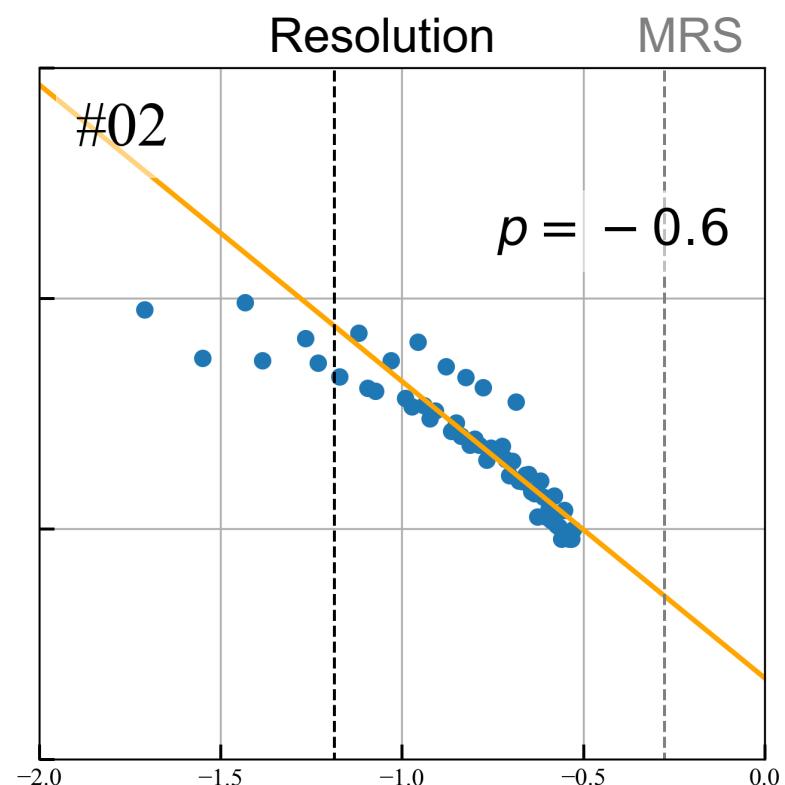
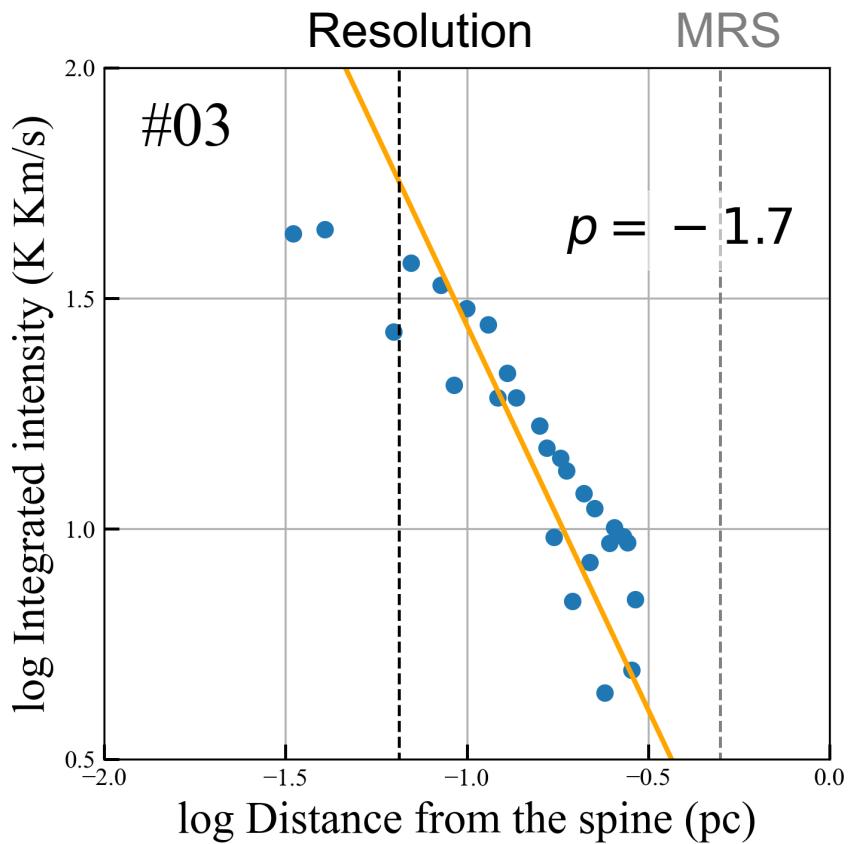
# Filament (elongated structure) finding

Dec (J2000)



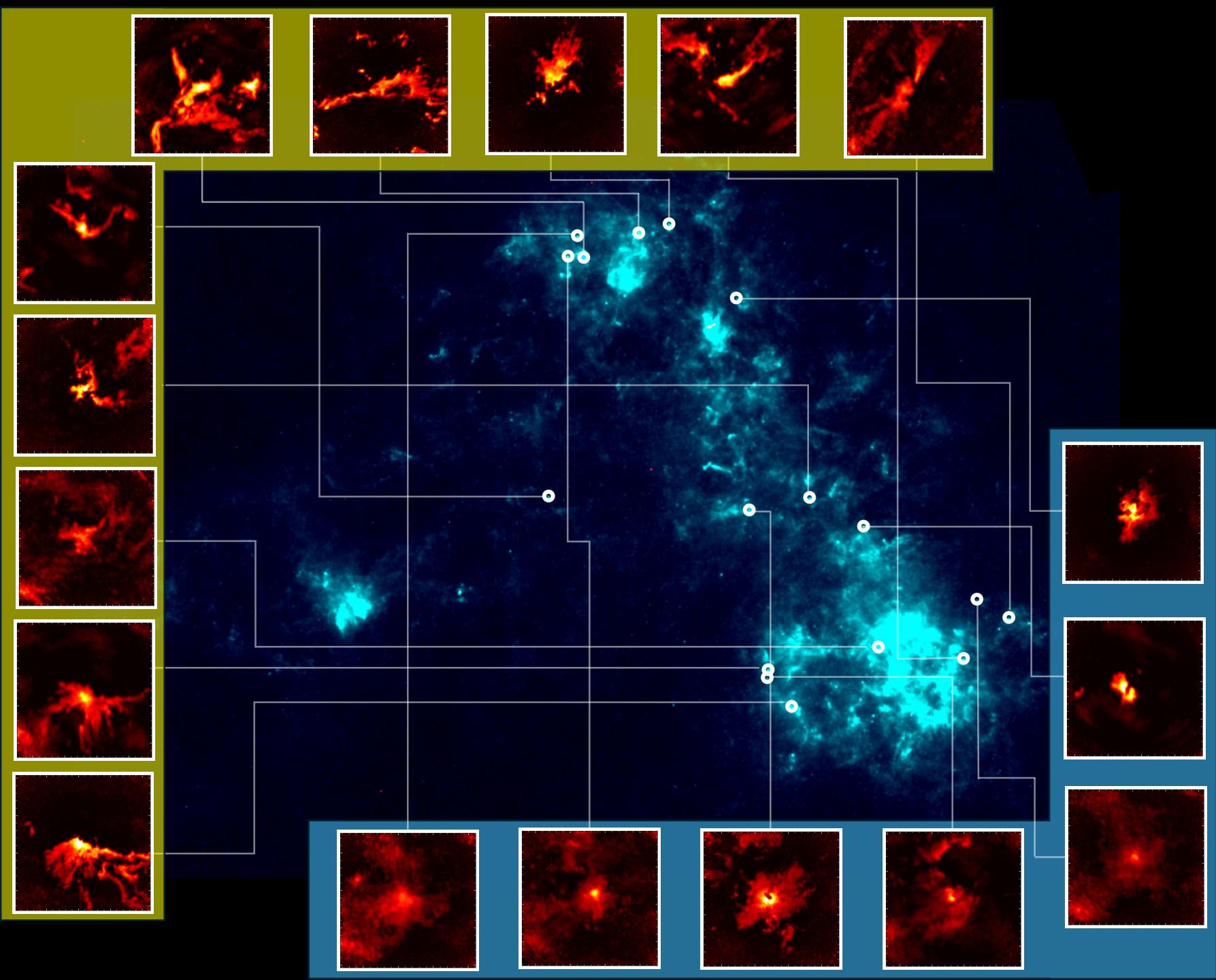
FilFinder(Koch & Rosolowsky 2015) on  $^{12}\text{CO}(J=3-2)$  image

# Radial intensity profile on the Spine

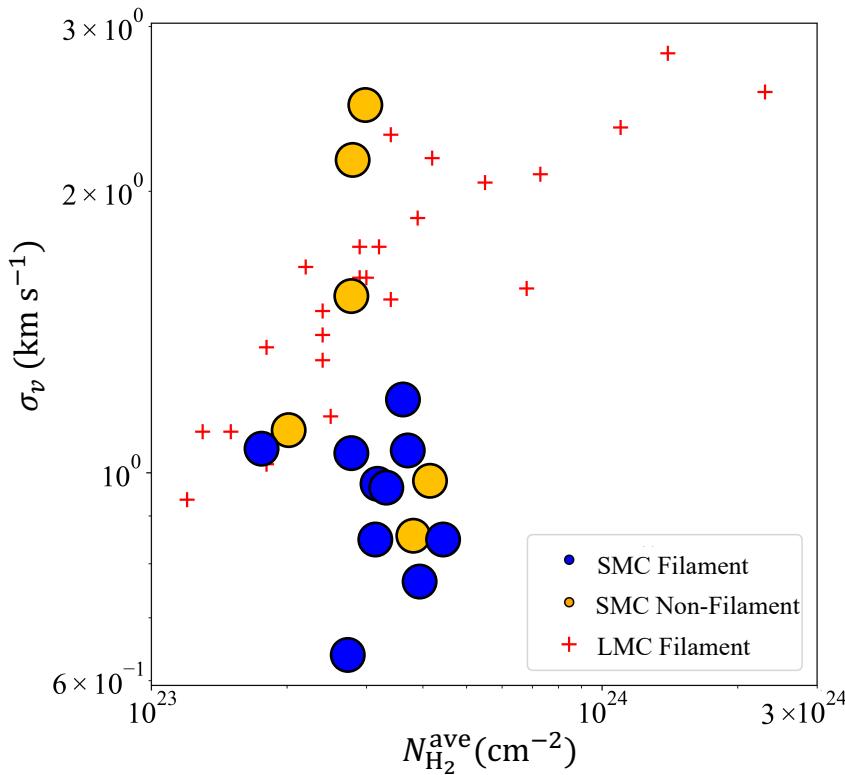


冪指数が-1より急勾配のものはフィラメントとする

(e.g., Arzoumanian et al. 2011; Palmeirim et al. 2013)



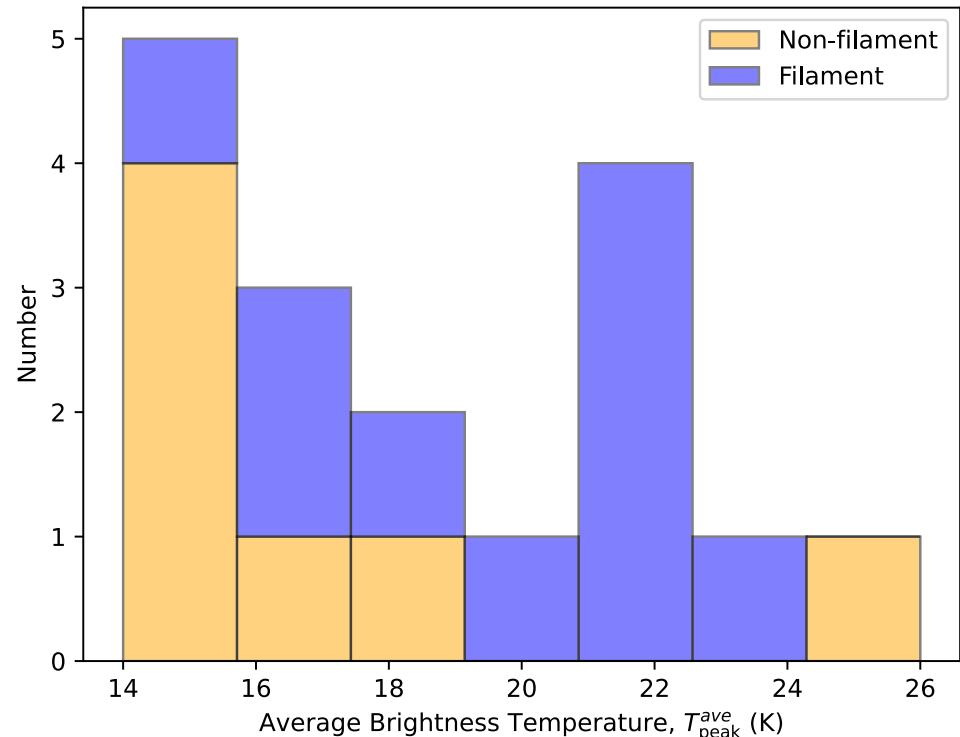
# フィラメントと非フィラメント間の物理量の違い



速度線幅で比べると、

- SMC: フィラメント < 非フィラメント

- SMC フィラメント < LMC フィラメント



(輝度)温度

=>概ね温度分布を反映

- SMC: フィラメント > 非フィラメント

SMCのフィラメント分子雲は温度が高く線幅が細い

# 小マゼラン雲( $\sim 0.2 Z_{\odot}$ ) の分子雲構造の形成と時間発展

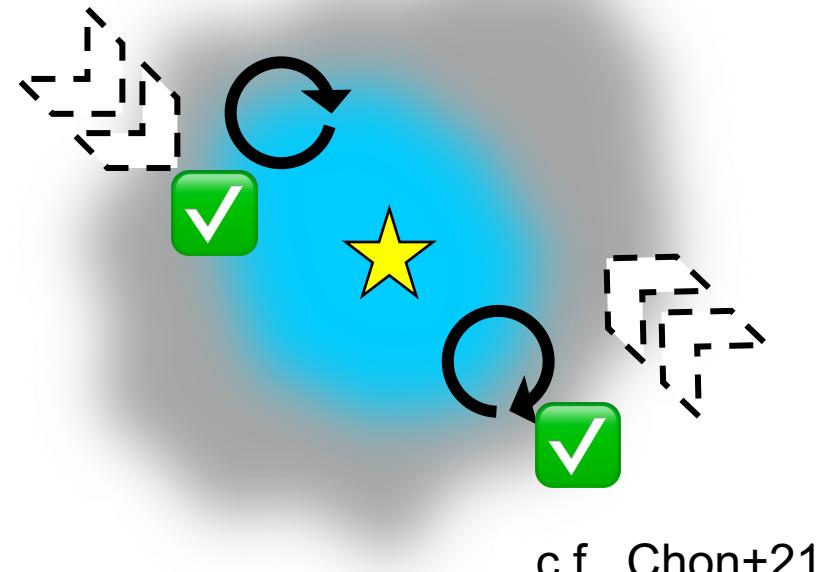
Step1: ショック加熱と共にフィラメント形成(Inoue & Fukui13; Inoue+18)し、十分に冷えないため、高温状態が維持される



熱圧が乱流の発生を抑制  
(see Kobayashi+23)

Step2: 温度の低下

Step3: 乱流が増加しフィラメント構造を消失(ふわふわ)にさせる



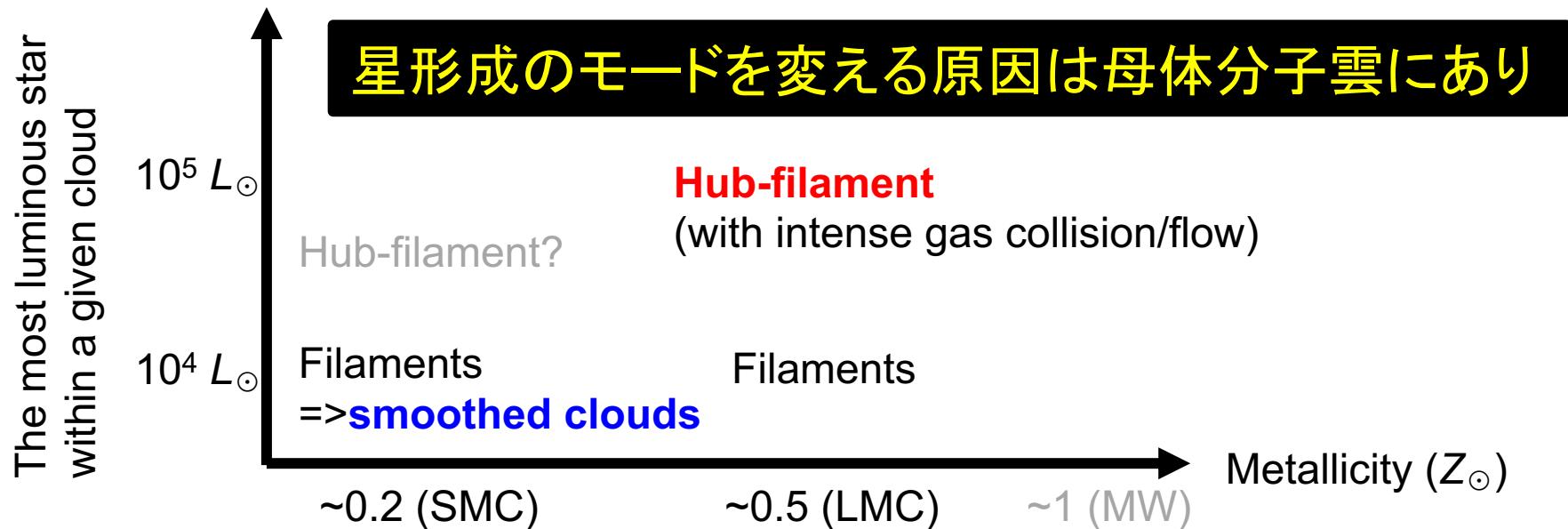
$t \sim 10^5$  yr, ( $t_0$  = 星形成の瞬間)

## ふわふわな分子雲の意義

- フィラメント分裂による小質量コア形成の抑制
- bottom-light IMFが実現される? ( $\Rightarrow$ JWST等の研究が進めば検証可能?)

# まとめ: 低金属量環境での星形成はどこまで普遍的か?

## (1) 原始星アウトフローは普遍的: 100億年通した共通の星形成



## (2) 大マゼランの分子雲研究 (Fukui+15, 19; Saigo+17; Tokuda+19, 22b, 23)

- 銀河間相互作用が駆動するフィラメント形成=>大質量星形成  
(ハブ)フィラメント形成は大質量原始星では普遍的に起こる

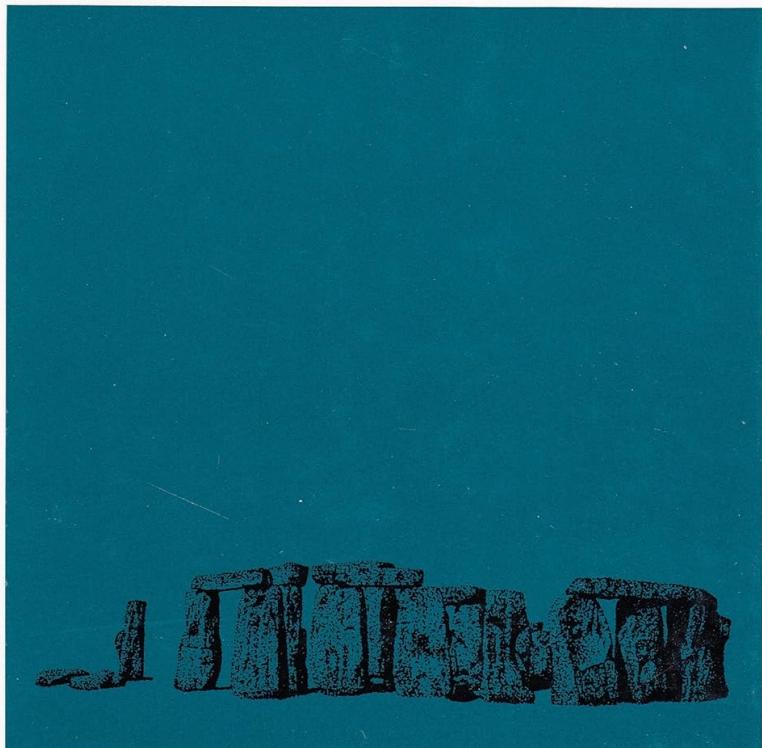
## (3) 小マゼランの分子雲研究 (Tokuda+25)

- フィラメントを示さない(ふわふわな)分子雲も存在する  
熱的振る舞いや分子雲形成過程が関連か?

# 宇宙と気候変動についてその他参考になる図書

## 巨大分子雲と恐竜絶滅

藪下信

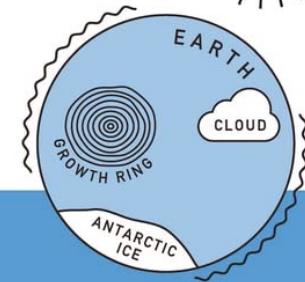


地人選書 36

宮原ひろ子

地球の変動は  
どこまで宇宙で  
解明できるか

太陽活動から読み解く  
地球の過去・現在・未来



宇宙とのつながりから  
気候変動を理解する

〈第31回講談社科学出版賞受賞作〉

