

分子雲の構造進化の理解に向けた シミュレーションと観測データの解析

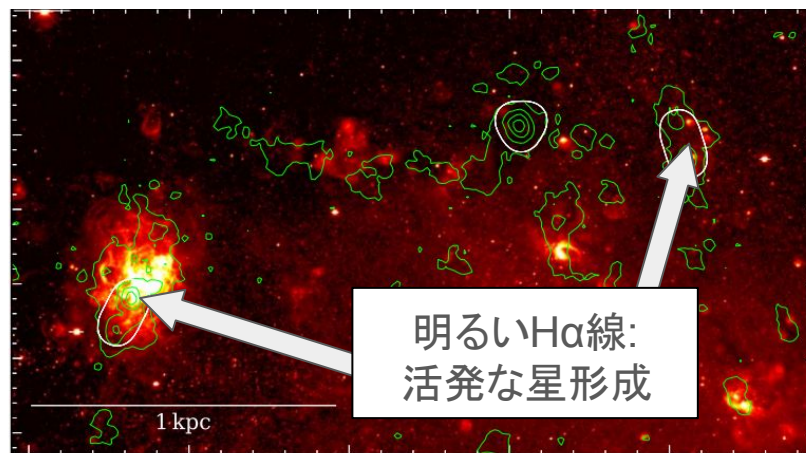
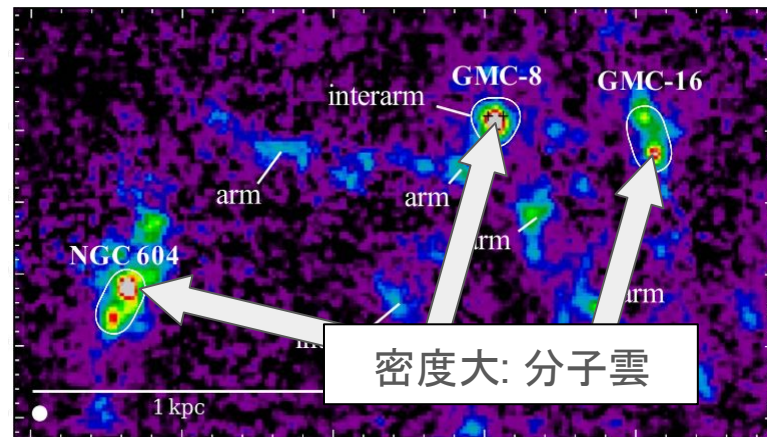
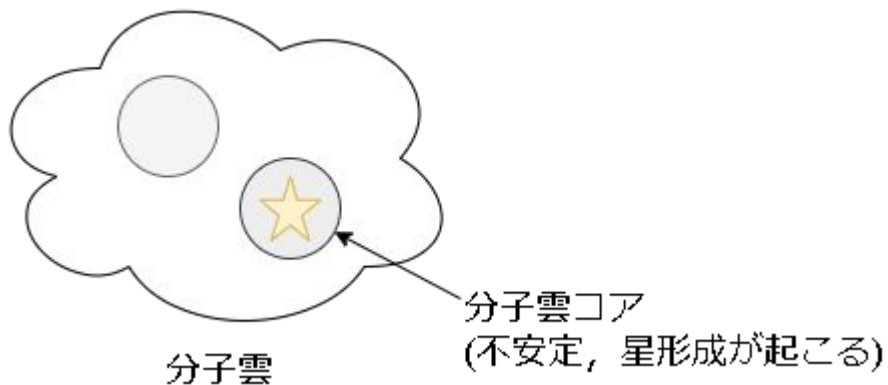
筑波大学大学院 M1 佐々木 誇虎

1. 研究背景: 分子雲と星形成

星間物質のうち,最も密度が高いガス: 分子雲

特に密度が大きい分子雲コアは重力的に不安定
→ 星形成が行われる

分子雲はどのような構造を経て星形成へ至る?

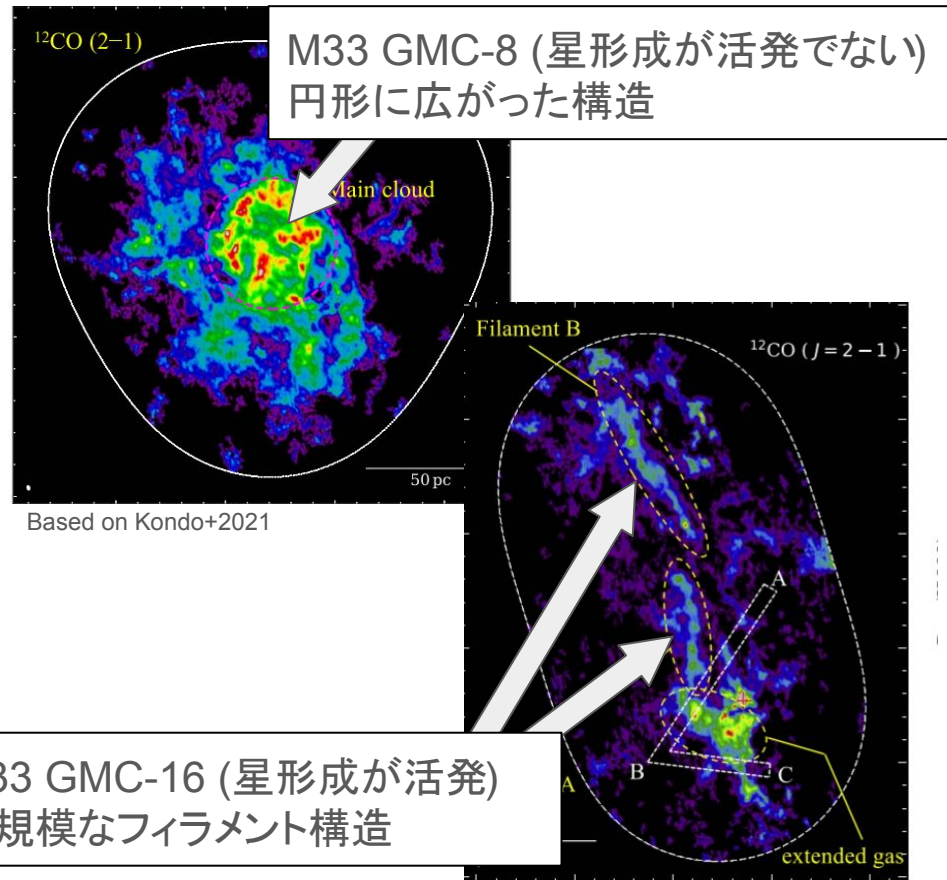


1. 研究背景: 星形成の研究手法

- 観測: 複数の分子雲の構造などを比較して進化段階を相対的に評価
→ 単一分子雲のデータからでは構造進化の理解は困難
- シミュレーション: 観測データを再現するための様々な流体モデルから、星形成機構を研究

観測を再現したシミュレーションで自己重力流体の時間発展を解析し、観測データと比較

→ 分子雲の構造進化を研究することが容易に



1. 研究目的

分子雲進化の詳細な理解のため、 自己重力流体シミュレーションを解析し、観測データと比較する

- 時間発展に伴い、流体の構造はどのように変化するか注目
- 観測で用いられる構造解析の手法をシミュレーションに適用
→ シミュレーションと実際の観測データとの比較が容易に
- 得られた解析結果から分子雲進化のシナリオを推定
- 観測データを解析し、シミュレーションの解析結果と比較
→ 推定したシナリオを検証

2. シミュレーション解析: 対象データ

磁場のない一様な分子雲を想定した一様流体球が自己重力により変化

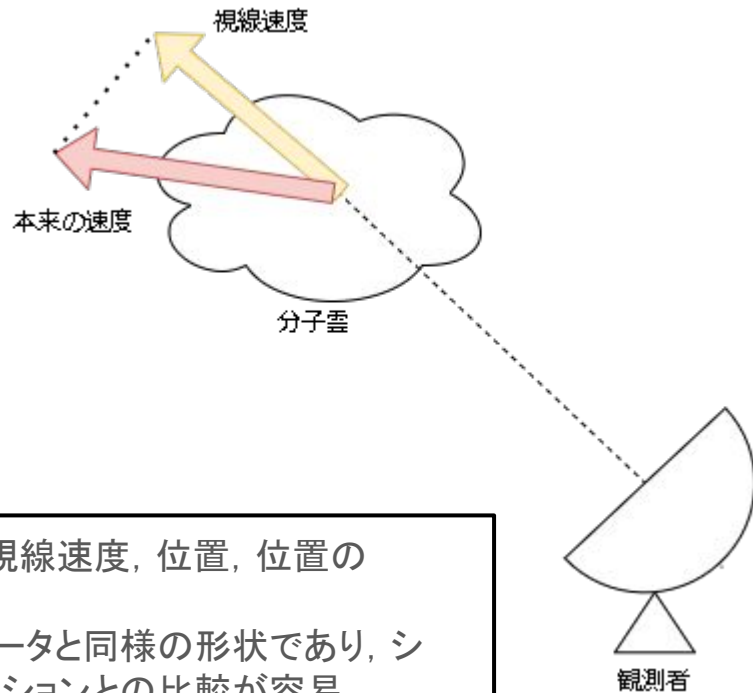
質量 [M_{solar}]	10e6
半径 [pc]	30
面密度 [$M_{\text{solar}} / \text{pc}^2$]	350

- 0.57 Myr
- 1.1 Myr
- 1.7 Myr
- 2.2 Myr

の時点での質量データを取得

- 視線速度に沿った積分強度図
- 三次元空間上にプロットした散布図

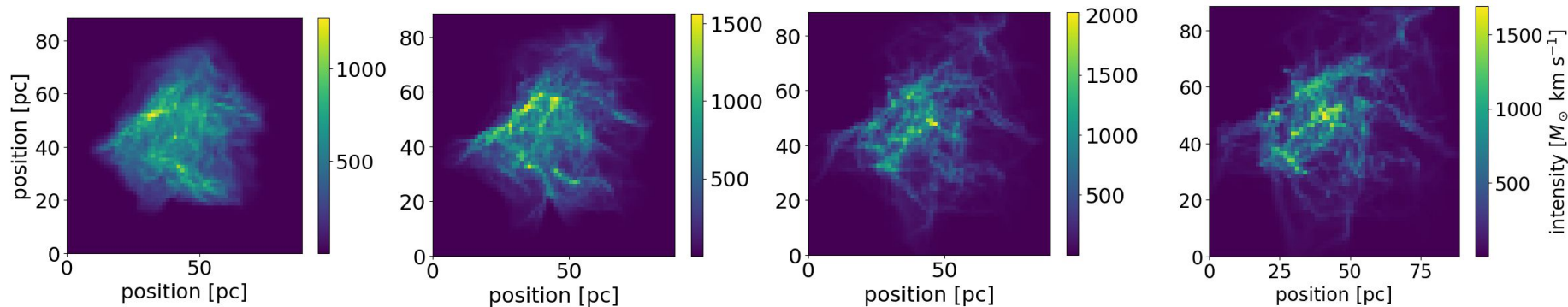
の二種類の図を作成, 解析の対象とした



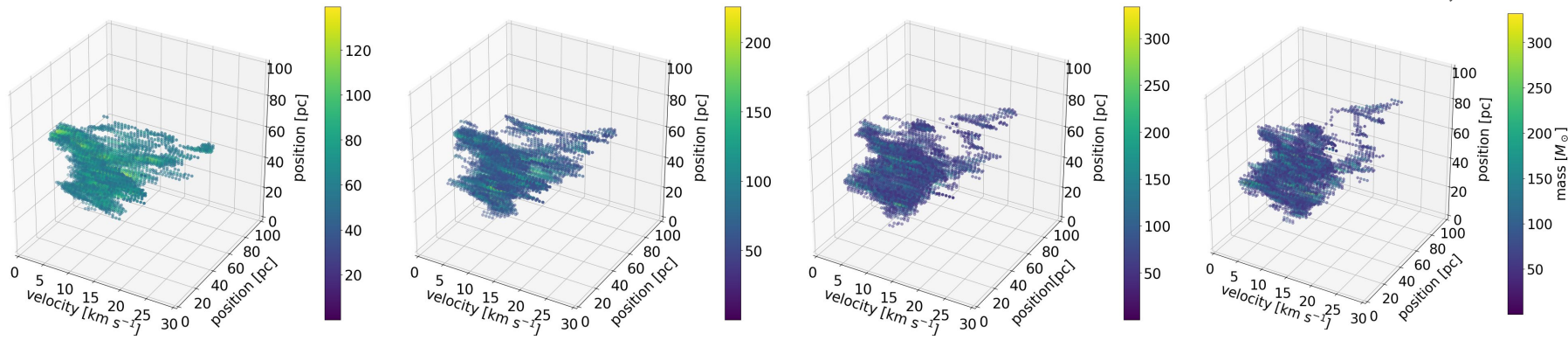
質量データ: 視線速度, 位置, 位置の
三次元アレイ

→ 観測データと同様の形状であり, シ
ミュレーションとの比較が容易

2. シミュレーション解析: 対象データ



積分強度図



三次元散布図($>40 M_{\odot}$)

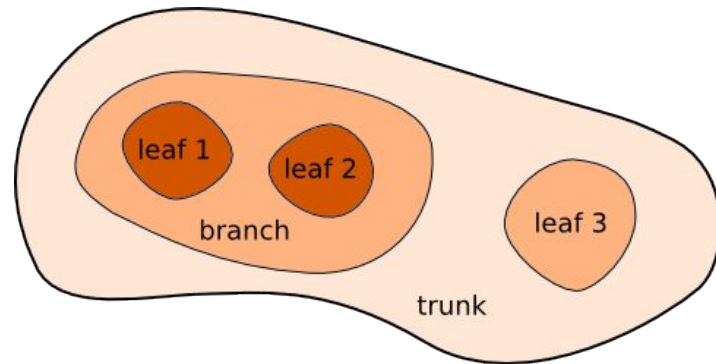
2. シミュレーション解析: 解析手法

Dendrogramを用いた解析

多次元のデータセットにおける階層構造を分類する
アルゴリズム

- 内部構造を持たない最小構造: リーフ
- 内部構造を包含する構造: ブランチ
- 最外部の構造: トランク

得られた構造それぞれのサイズ, 質量, ビリアルパラメータを求めて
考察する



Dendrogramによる階層構造

<https://dendrograms.readthedocs.io/en/stable/>

ビリアルパラメータ:

構造の重力ポテンシャルと運動エネルギーとの比, 重力的にどの程度束縛されているか評価

$$\alpha_{\text{Gvir}} = \frac{5\sigma^2 R}{3GM}$$

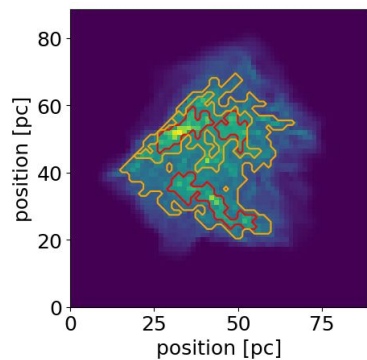
σ : 三次元速度分散

R : 分子雲の半径

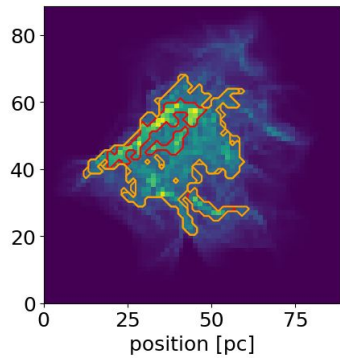
G : 万有引力定数

M : 分子雲の質量

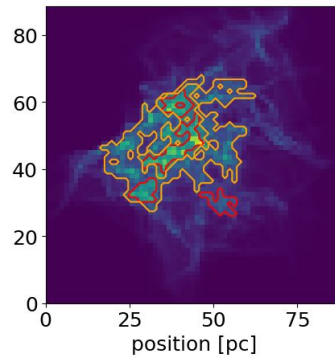
2. シミュレーション解析: 解析結果



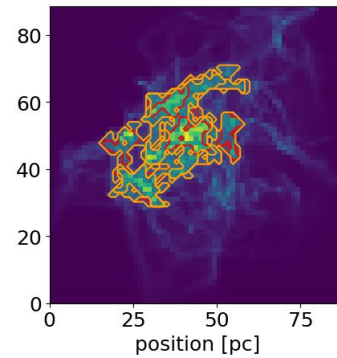
0.57 Myr



1.1 Myr

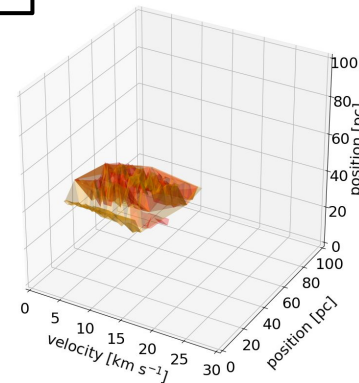
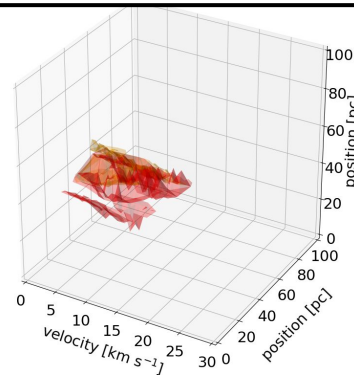
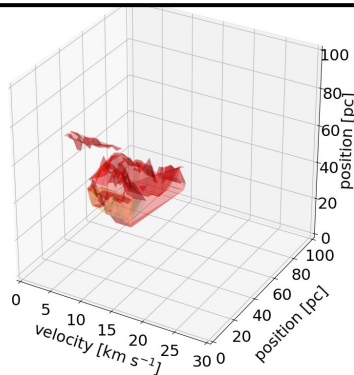
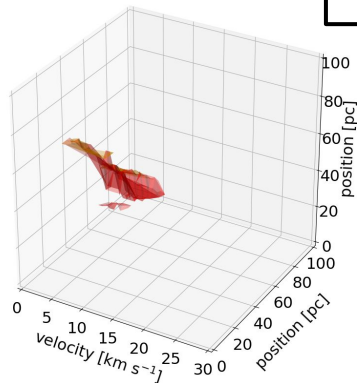


1.7 Myr



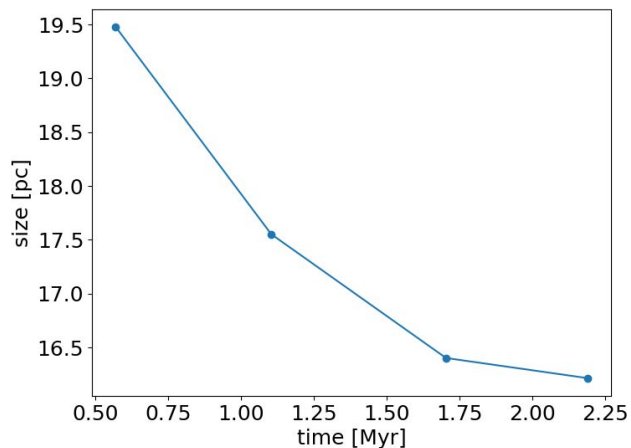
2.2 Myr

ガスの質量が大きい部分ほどより多くの内部構造を持つ

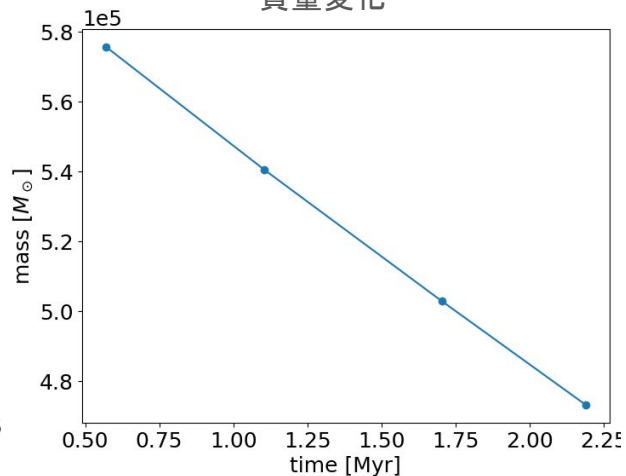


2. シミュレーション解析: 全体構造(トランク)の変化

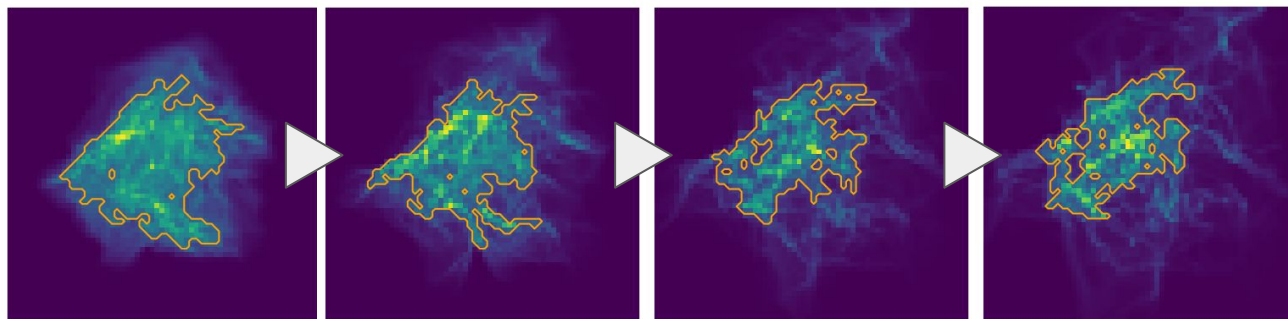
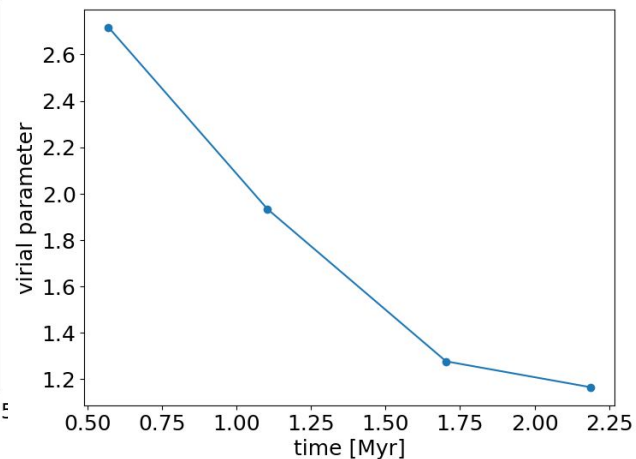
サイズ変化



質量変化



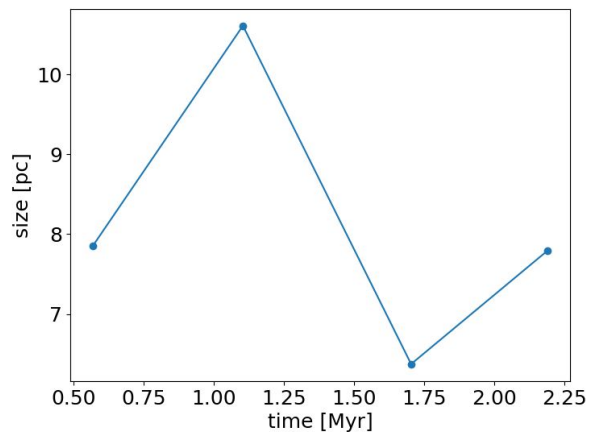
ビリアルパラメータ変化



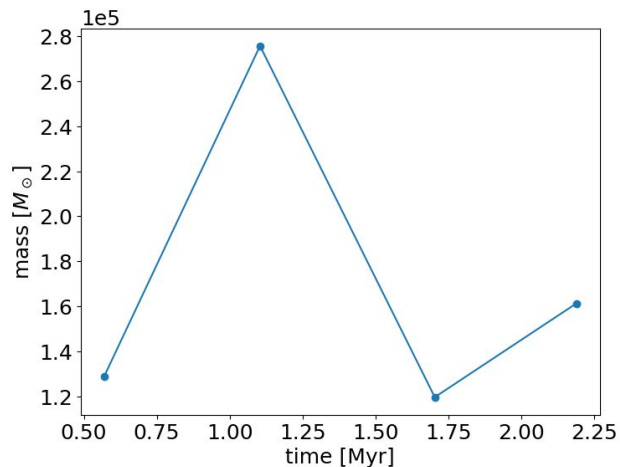
分子雲全体の変化に対応
全て減少している

2. シミュレーション解析: 内部構造の変化

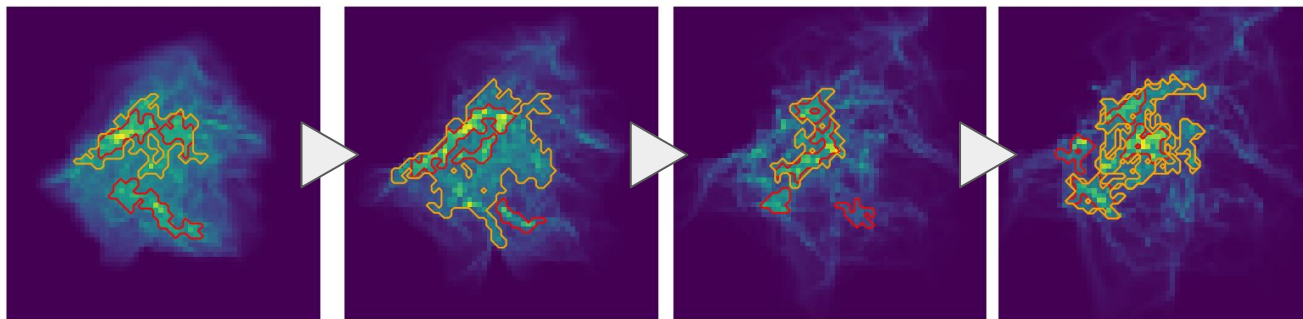
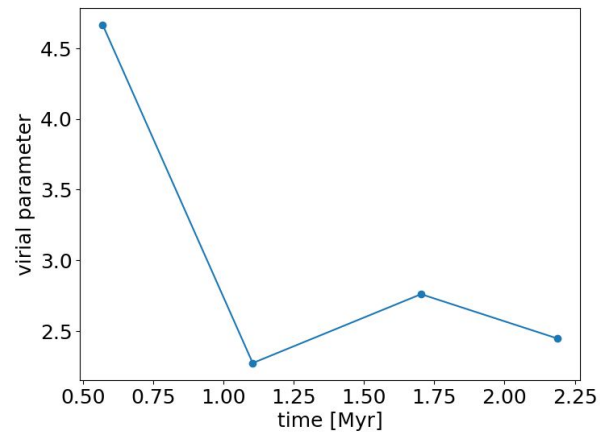
サイズの平均値変化



質量の平均値変化



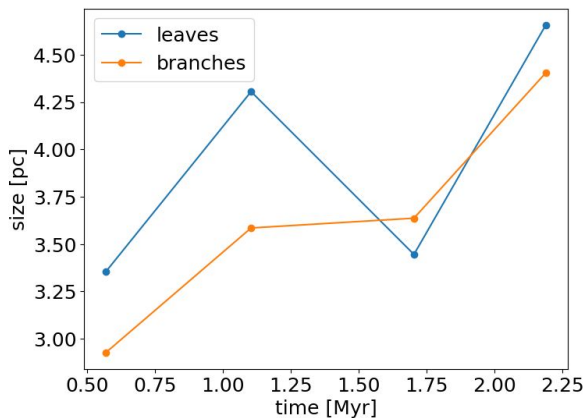
ビリアルパラメータの平均値変化



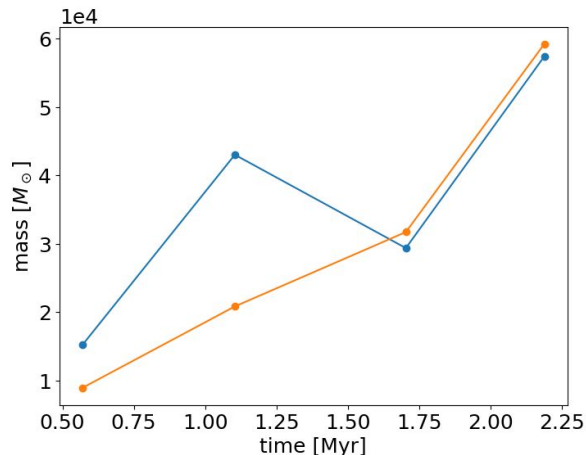
分子雲の内部構造に対応
全て増減を繰り返している

2. シミュレーション解析: 三次元散布図上の構造変化

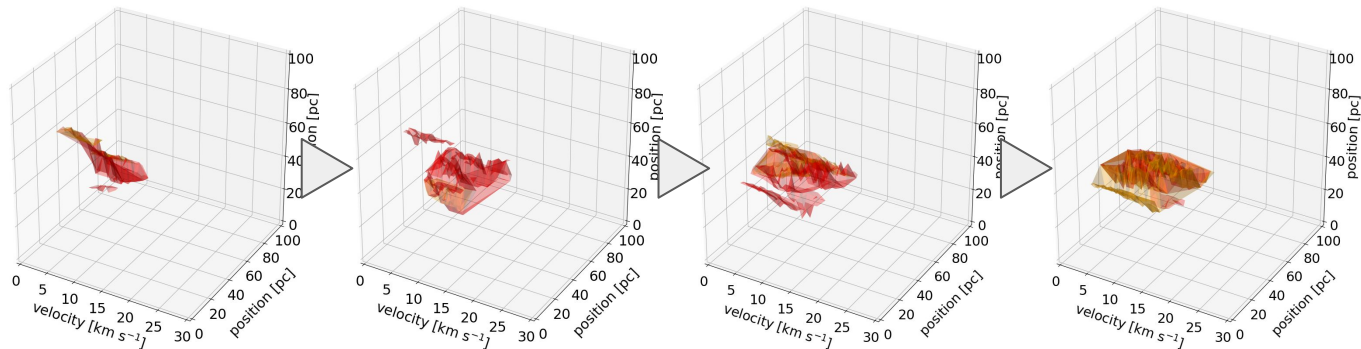
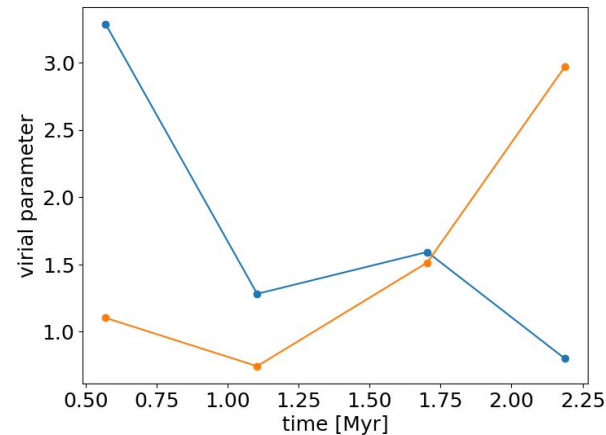
サイズの平均値変化



質量の平均値変化



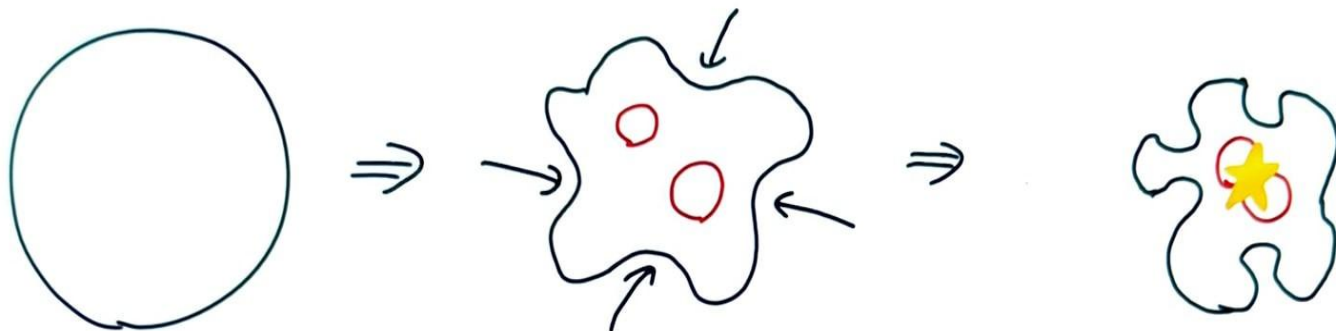
ビリアルパラメータの平均値変化



内部構造をより詳細に考察
増減を繰り返しながら成長

2. シミュレーション解析: 分子雲の進化シナリオ

- 全体として徐々に収縮
- 内部構造はサイズと質量の増減を繰り返す
→ 全体としては収縮しつつ、内部構造が分裂や合体を繰り返すことにより成長して星形成へ？



分子雲進化シナリオの模式図

3. 観測データ解析: 概要

FUGIN Project: 野辺山45m鏡によるCO輝線強度マップ作成プロジェクト

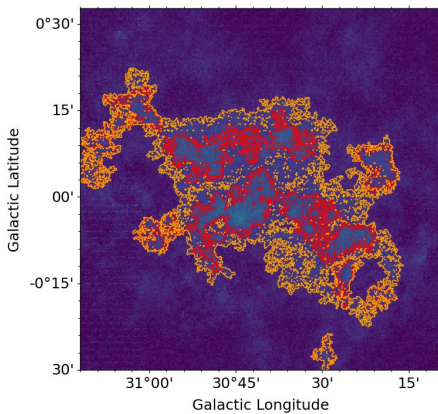
13CO輝線強度のFITSファイルから積分強度図を制作し、デンドログラムで解析
シミュレーションの積分強度図と比較する

	W43 Main	W49A	W51A, B	M16	M17
距離 [kpc]	5.5	11	5.4	1.7	2.0
全質量 [M_solar]	7.7e7	7.1e7	1.0e7	9.9e6	1.1e6
Class II / I 比率	4.58	2.1	2.50		
Class II III / 0 I 比率				1.4	1.7

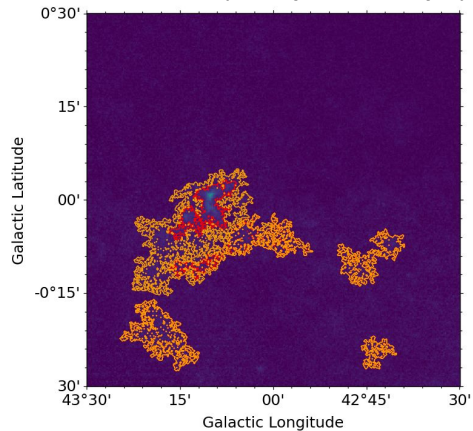
Class II / I 比率、Class II III / 0 I 比率 : 星団(分子雲)の星形成段階の指標の一つ
分子雲の年齢と考えると, M16 < M17 < W49A < W51A, B < W43 Main

3. 観測データ解析: 結果

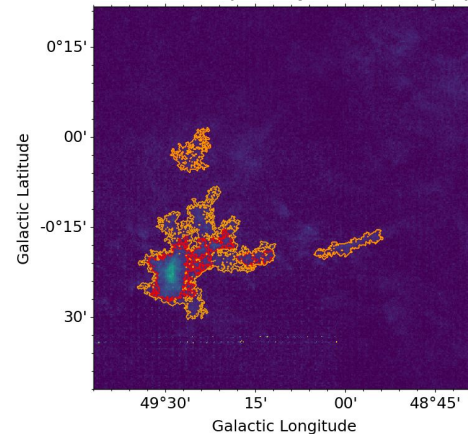
W43付近 (100 pc × 100 pc)



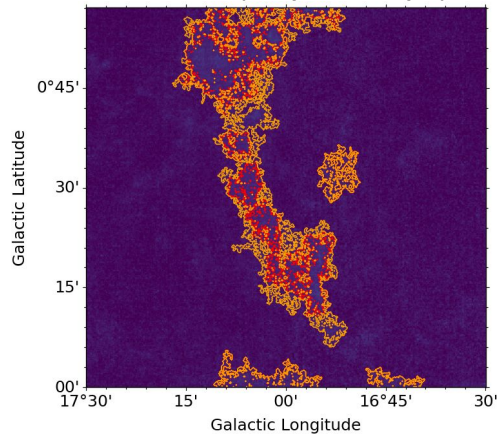
W49付近 (100 pc × 100 pc)



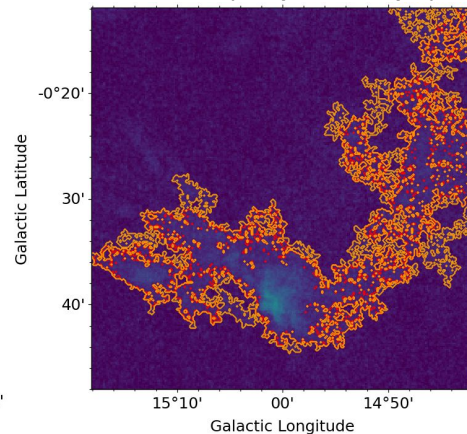
W51付近 (100 pc × 100 pc)



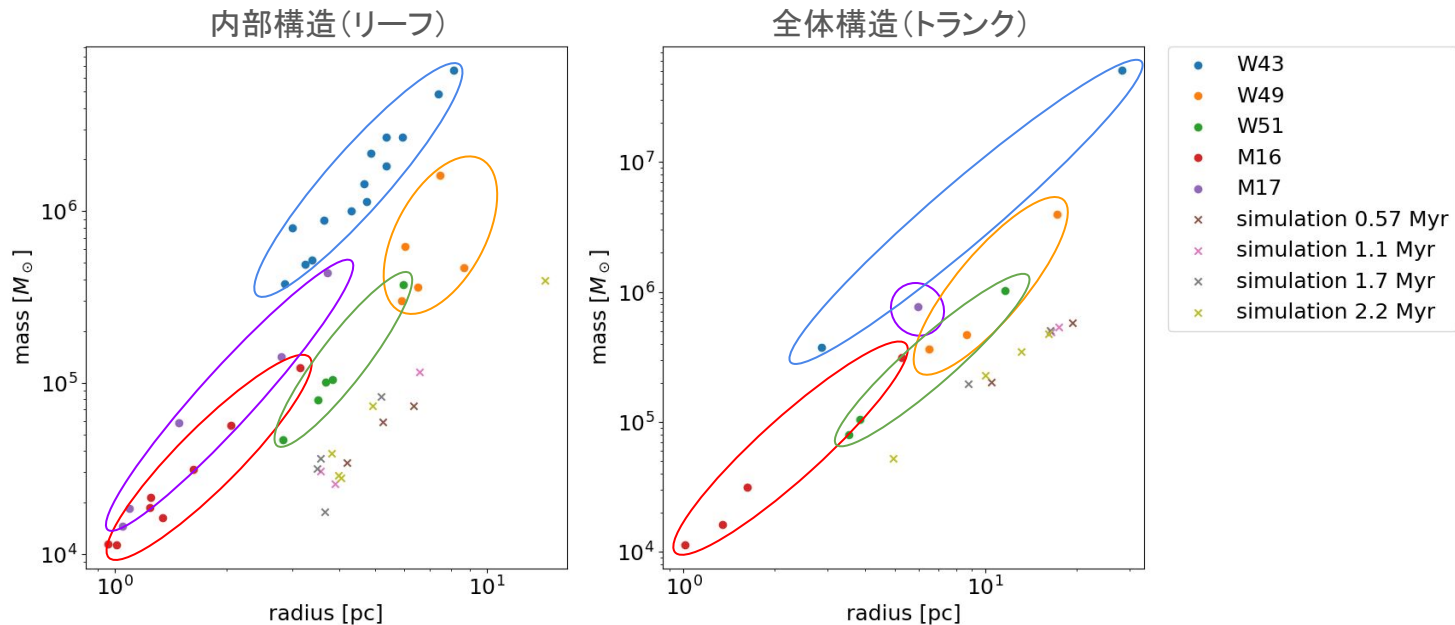
M16付近 (30 pc × 30 pc)



M17付近 (21 pc × 21 pc)

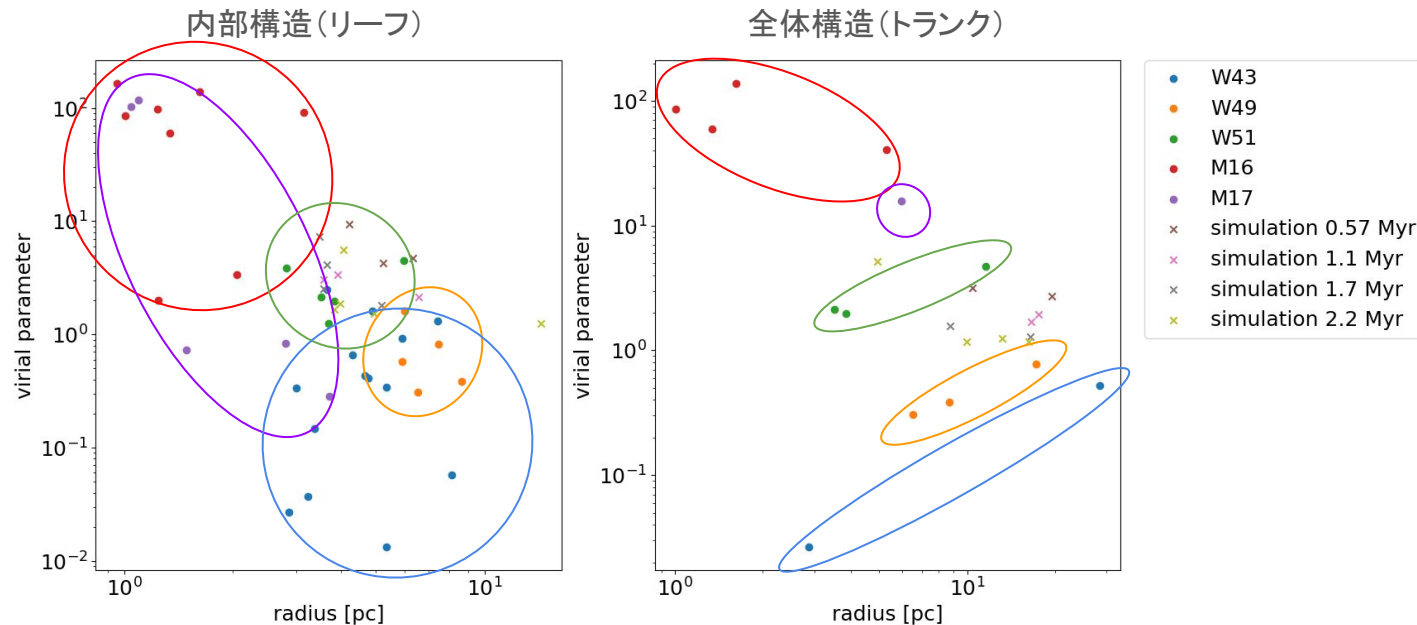


3. 観測データ解析: サイズ vs 質量



- ・内部構造はシミュレーション, 観測データともに正の相関の上で増減
- ・外部構造は
 - ・シミュレーションは減少
 - ・観測データは減少 → 増加

3. 観測データ解析: サイズ vs ビリアルパラメータ



・内部構造は負の相関の上で増減

シミュレーションも観測データも同じ動きをしているが、シミュレーションの方がスケールが大きい

・外部構造の動きも同様

(特に内部構造について) 分裂と合体を交互に繰り返す様子が観測データからも確認できたと考えられる
全体構造についてはさらに大きいスケールで解析する必要がある?

5. まとめ

自己重力流体シミュレーションをデンドログラムで解析した

- ・全体としては自己重力により収縮していることがわかった
- ・内部構造がサイズや質量、ビリアルパラメータを増減させながら成長していることがわかった
(合体や分裂によるもの?)

FUGINの輝線データから積分強度図を作成し、デンドログラムで解析してシミュレーションと比較した

- ・特に内部構造について、合体と分裂を繰り返す様子がシミュレーションと同様に確認できた
- ・全体構造についてはさらなる解析が必要

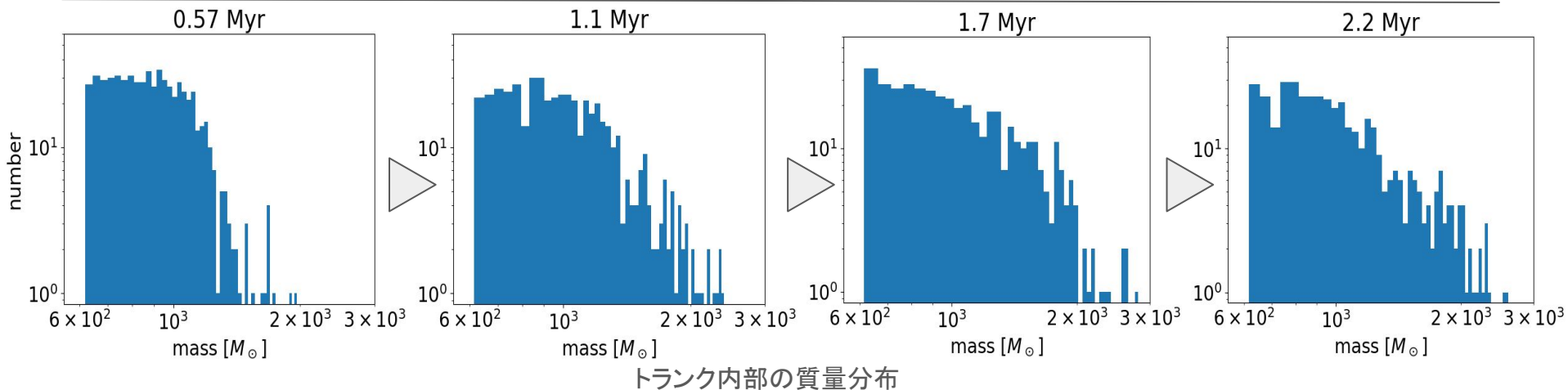
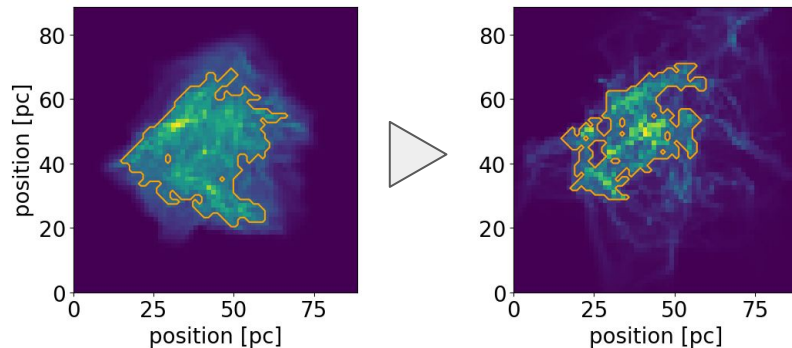
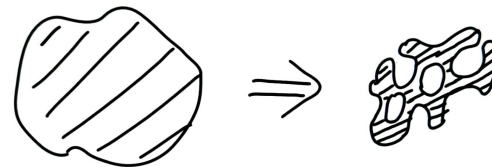
今後

- ・新規シミュレーションの実行
 - ・パラメータや初期条件を調整し、構造の性質を観測データに近づける
- ・さらなる観測データの解析

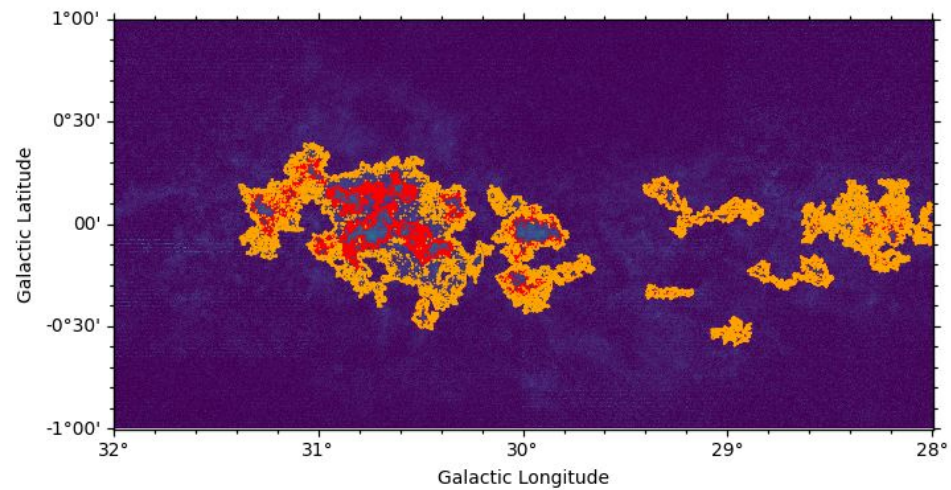
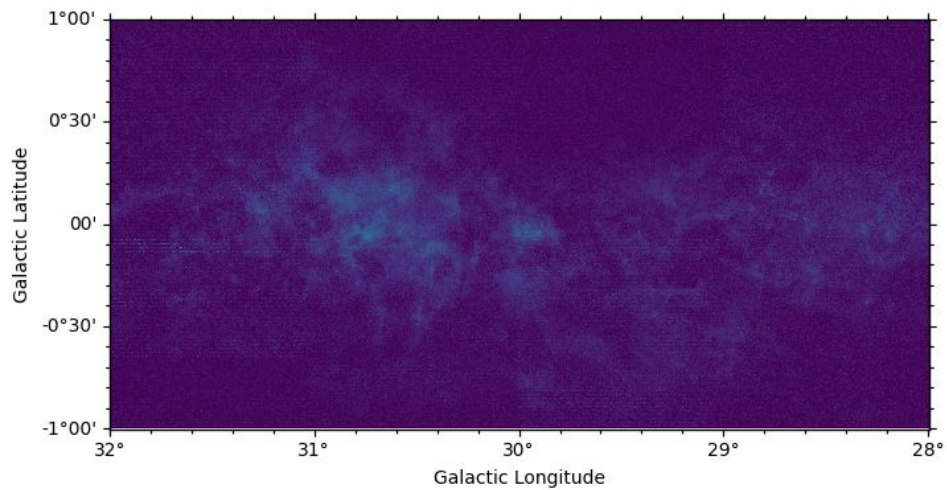
Appendix: シミュレーション解析 フィラメントの発達

トランク内部の質量のばらつきが増大
=フィラメント構造の発達

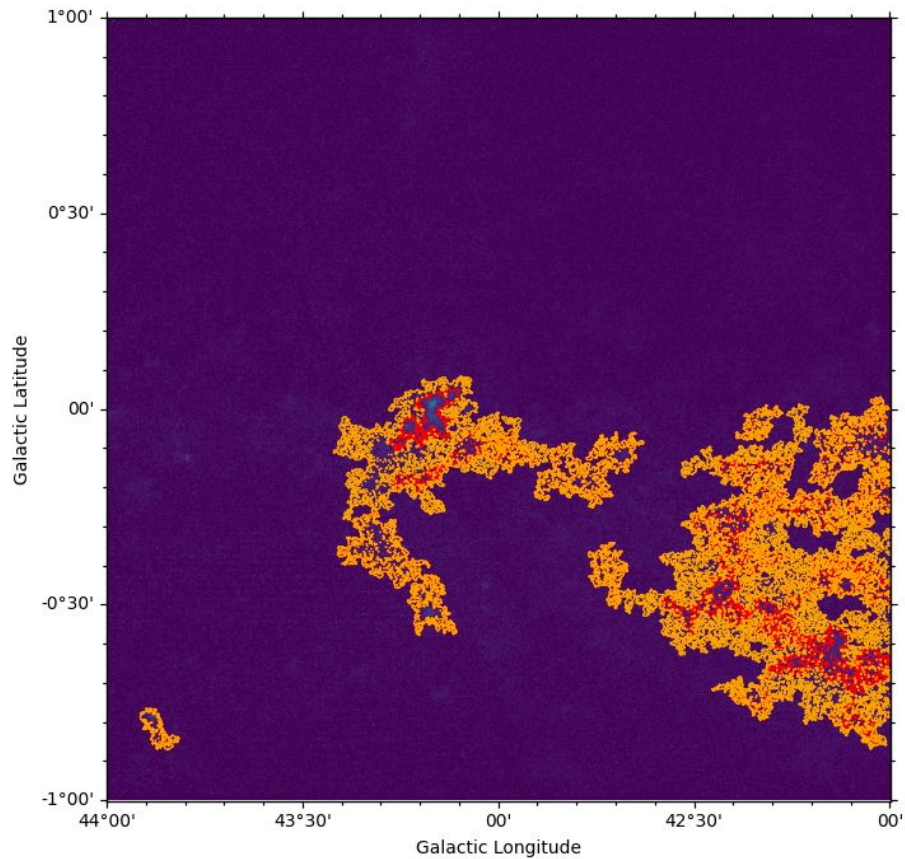
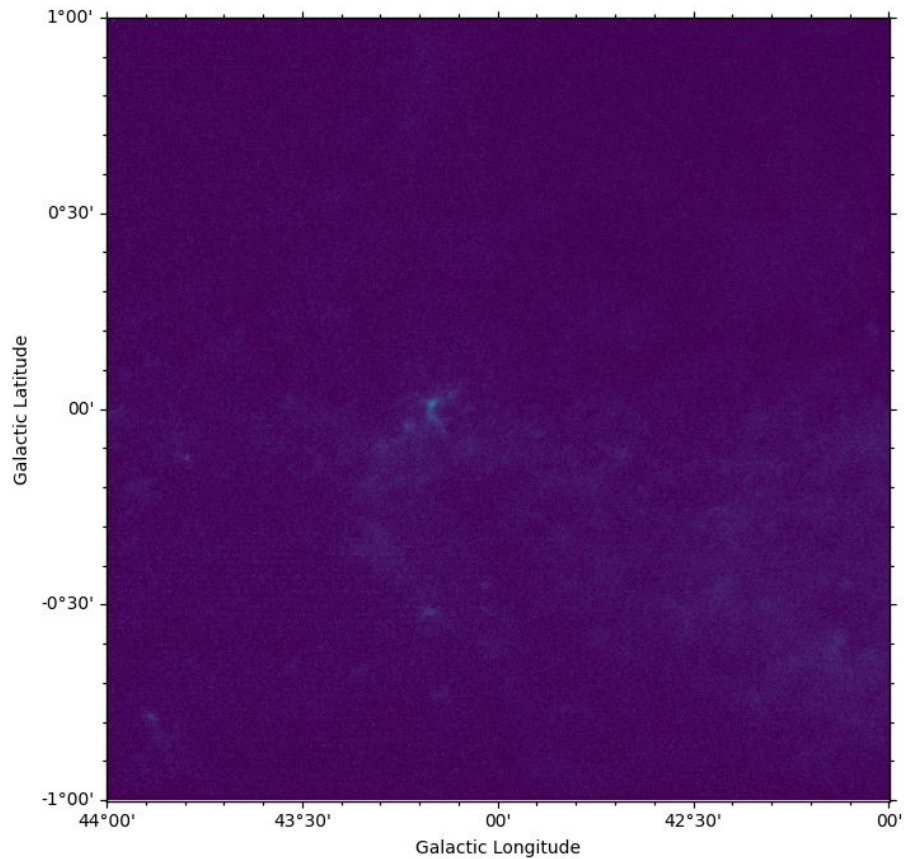
サイズの減少+フィラメント構造の発達によりトランク内部の質量が線形に減少



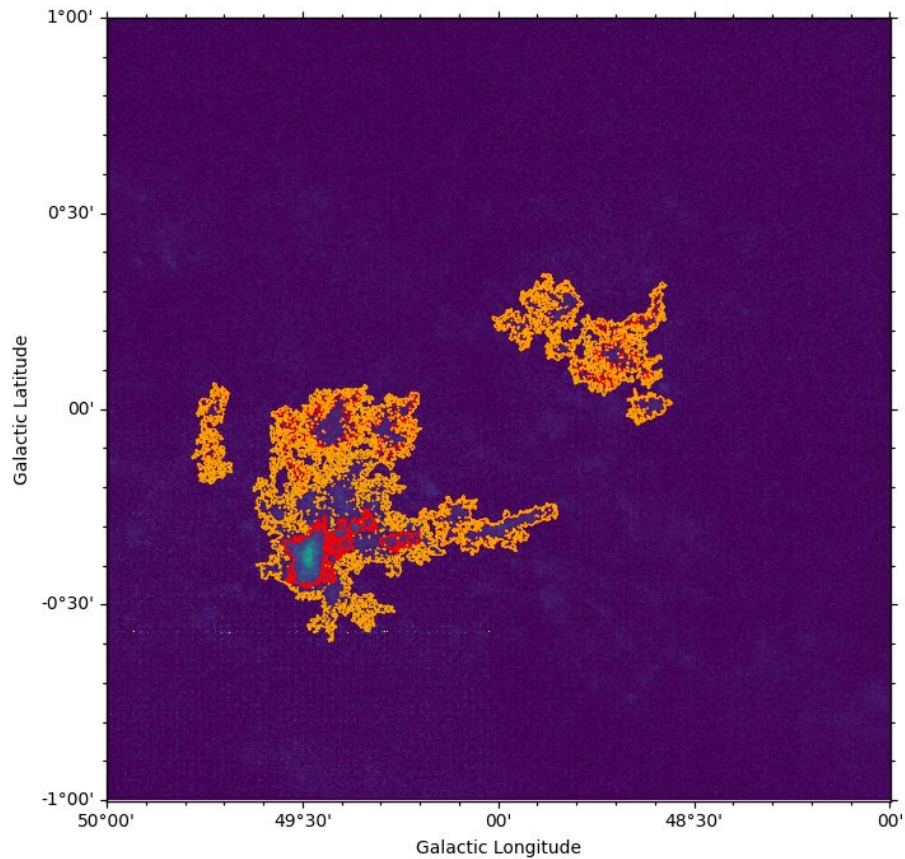
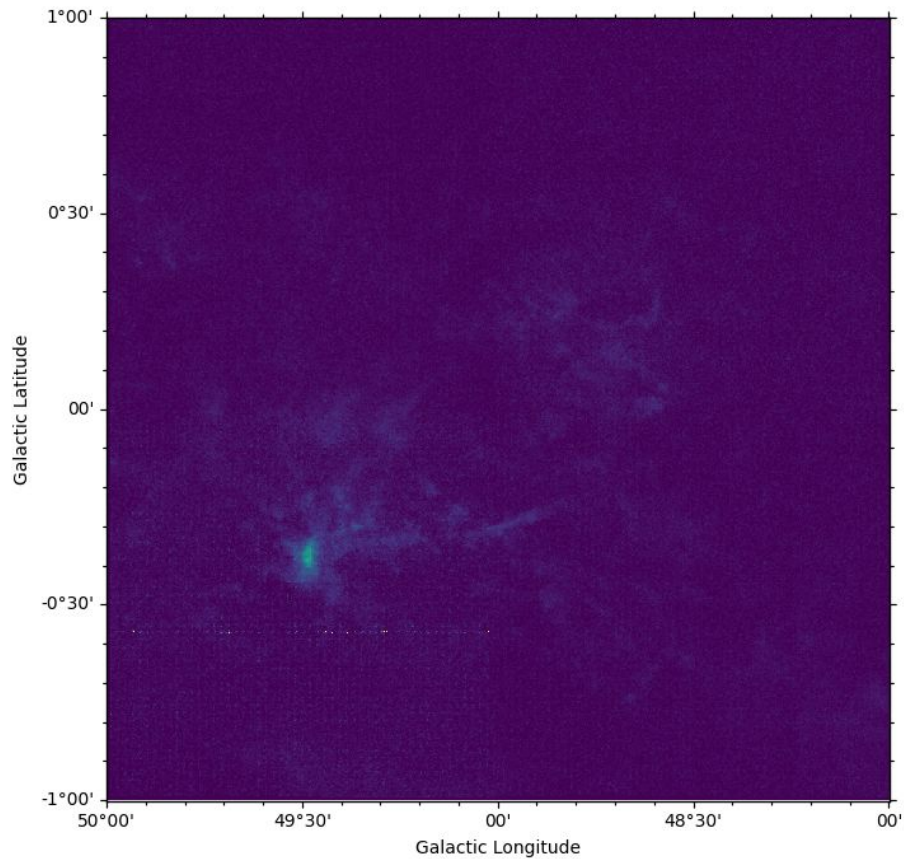
Appendix: W43解析



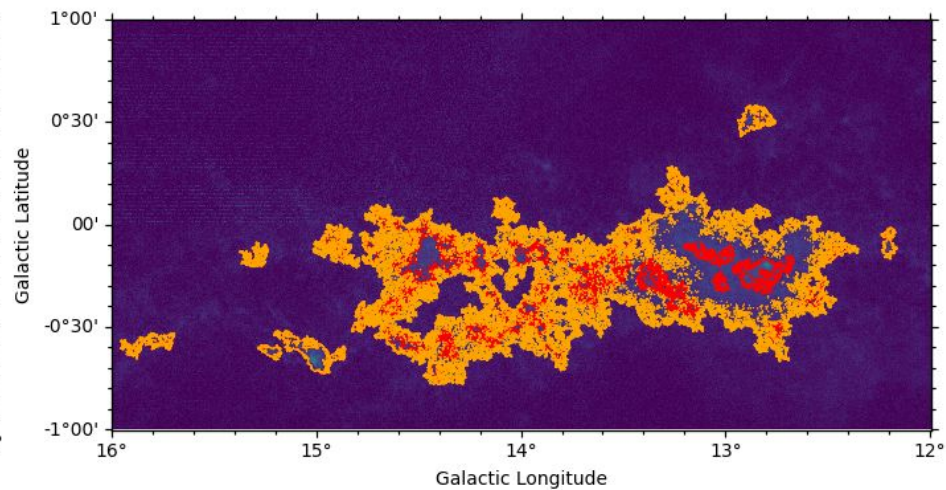
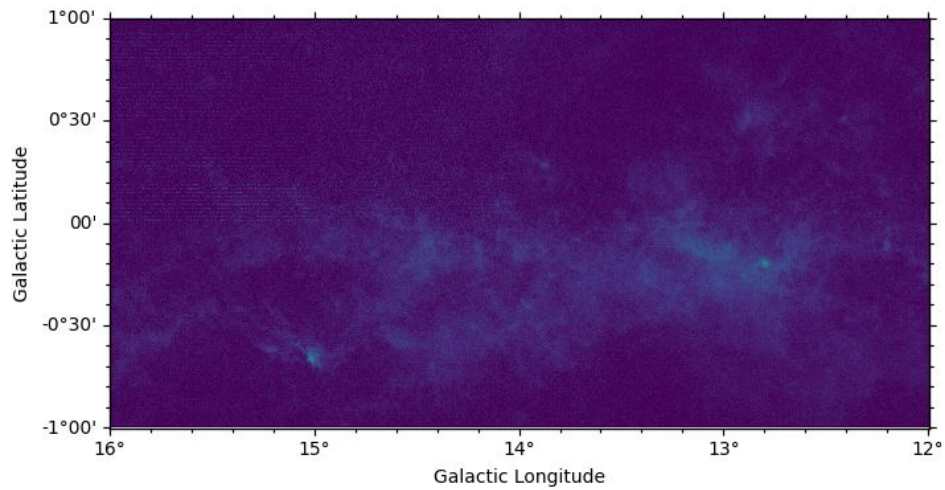
Appendix: W49解析



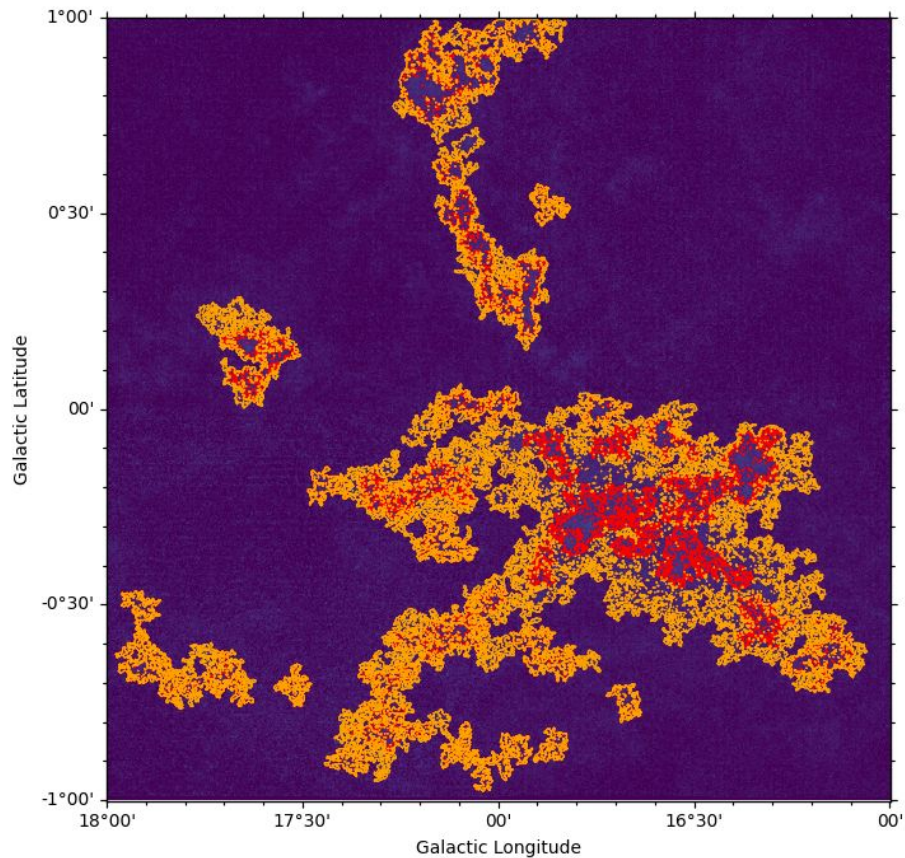
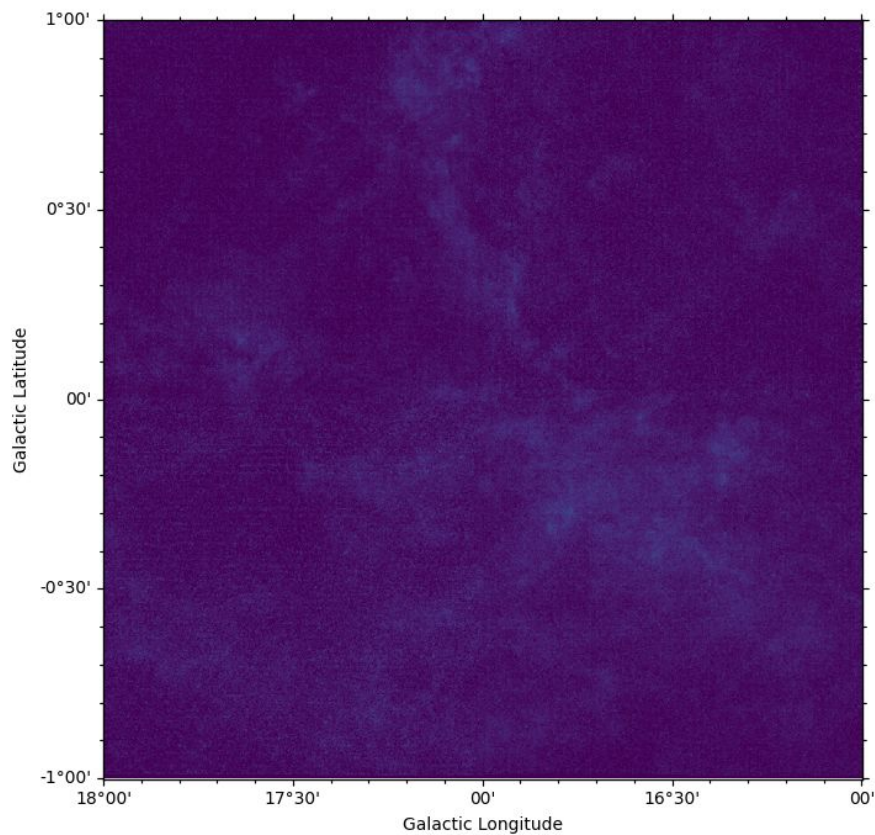
Appendix: W51 解析



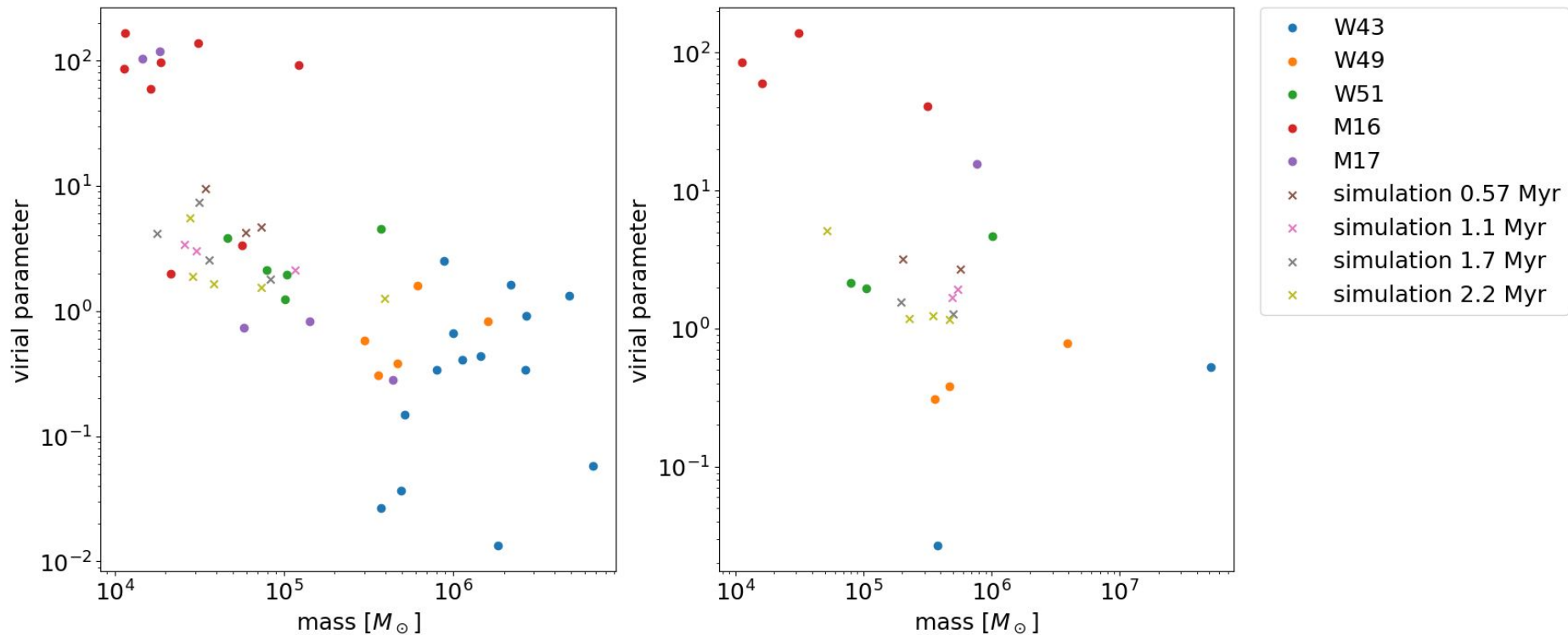
Appendix: M17解析



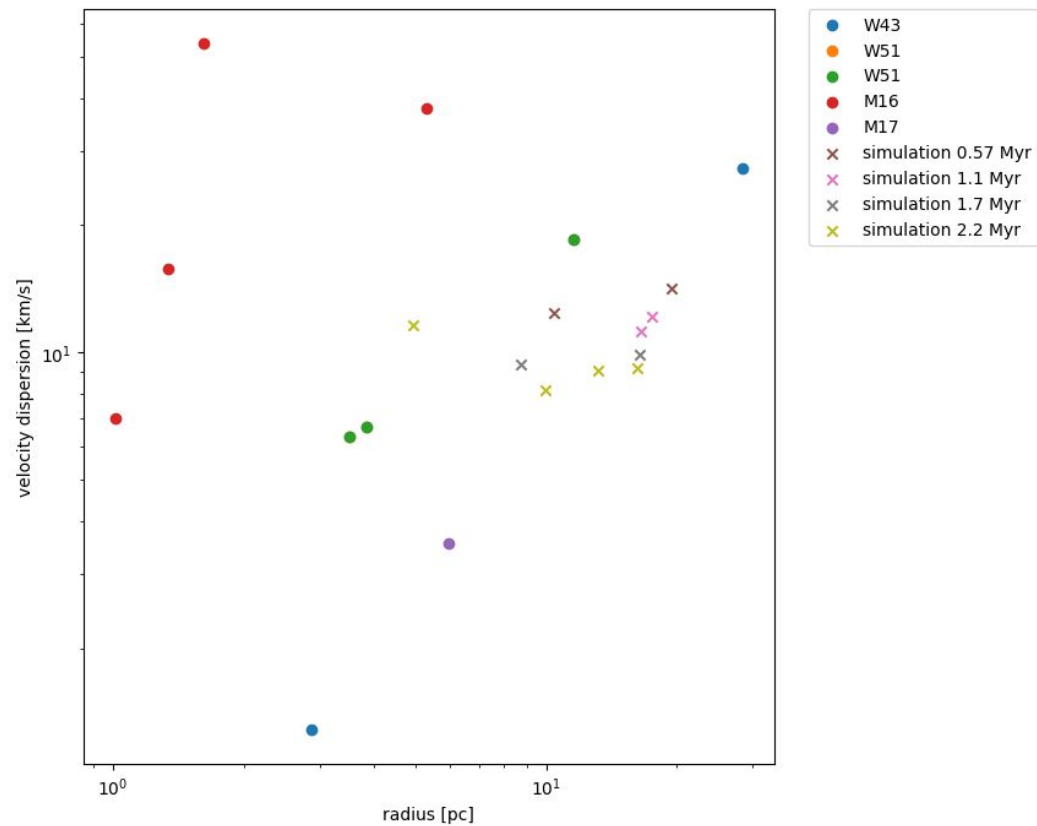
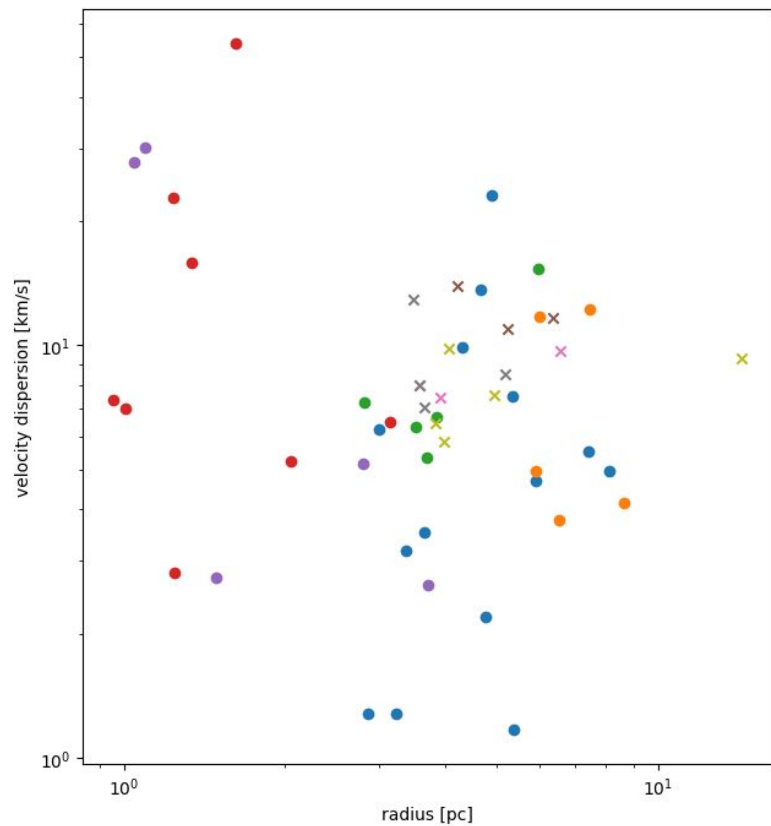
Appendix: M16解析



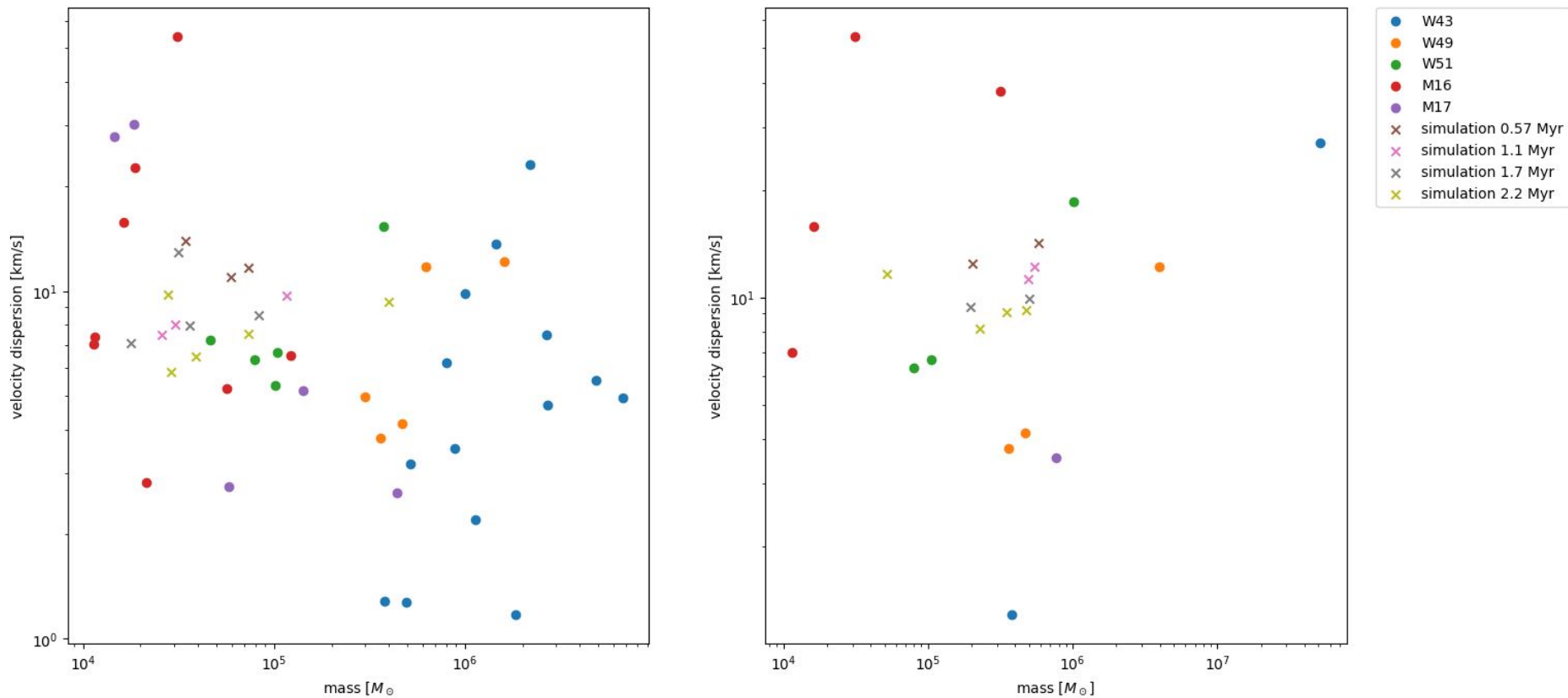
Appendix: 観測データ解析 質量 vs ビリアルパラメータ



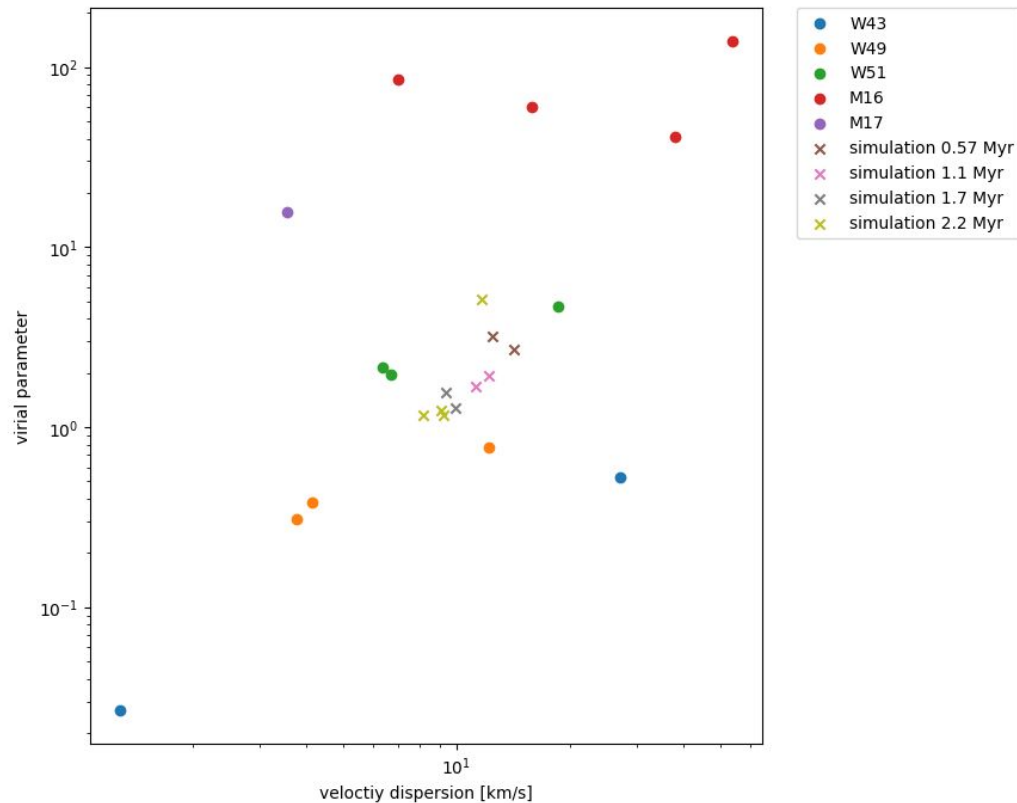
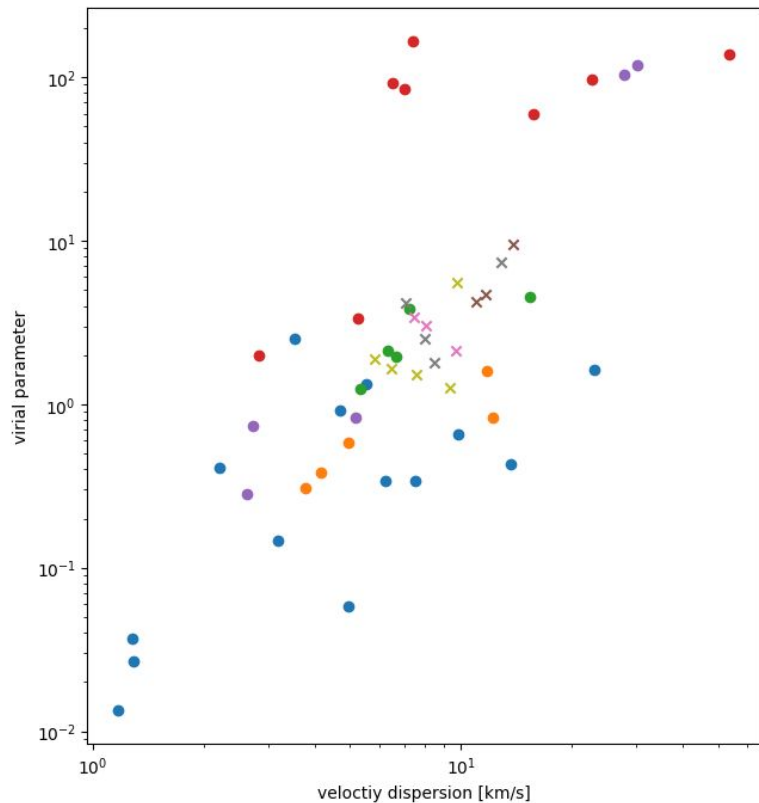
Appendix: 観測データ解析 サイズ vs 速度分散



Appendix: 観測データ解析 質量 vs 速度分散



Appendix: 観測データ解析 速度分散 vs ビリアルパラメータ



Appendix: シミュレーションと観測データのずれ

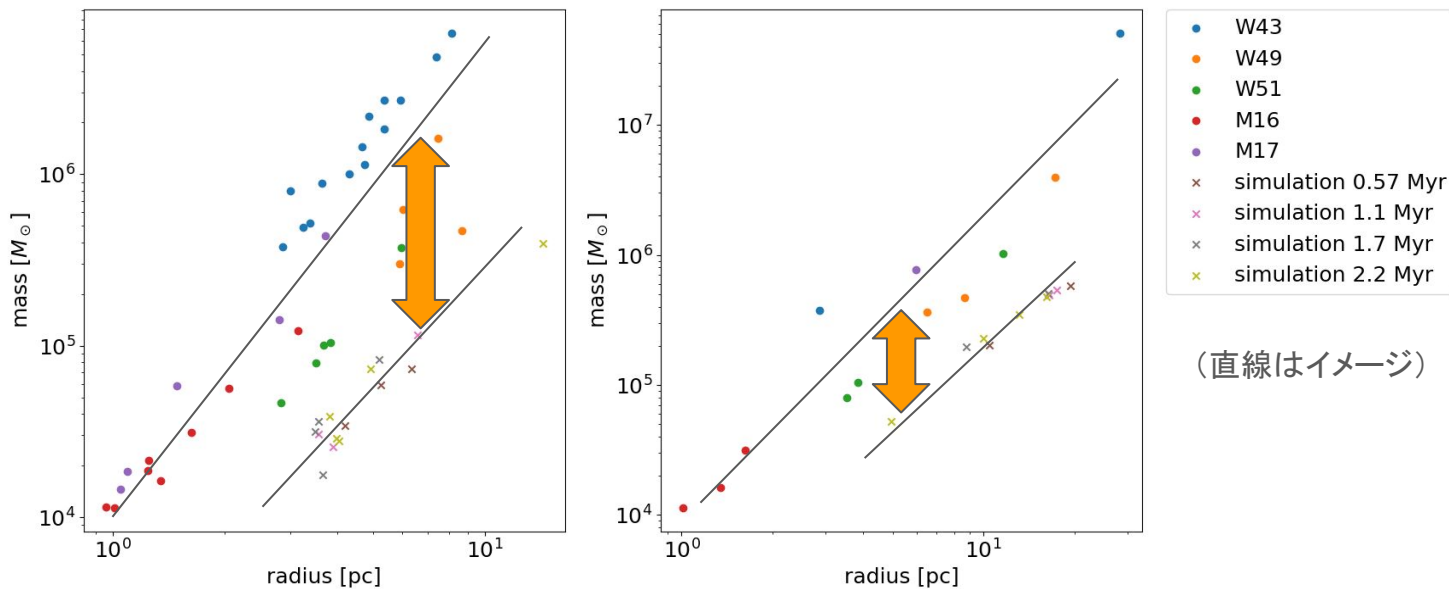
シミュレーションと観測データとの間にはずれ

→ パラメータを変更してずれを直すことでより正確な比較が可能

どのパラメータを直せばいいか = 実際の星形成に重要なパラメータ?

グラフでは、シミュレーションに比べ観測データは上にある = 構造当たりの質量が大きい

自己重力だけでない、質量をより強く圧縮する仕組みが実際の分子雲には存在する? (磁場など)

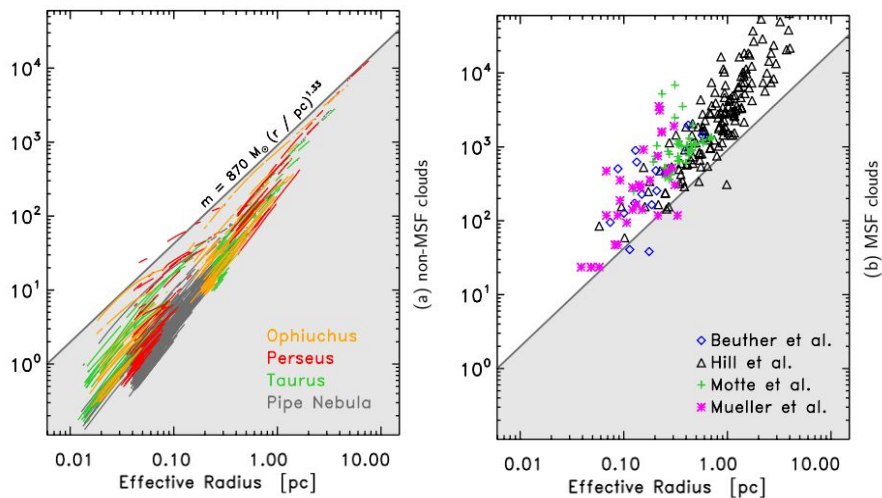


Appendix: 新規シミュレーションの実施

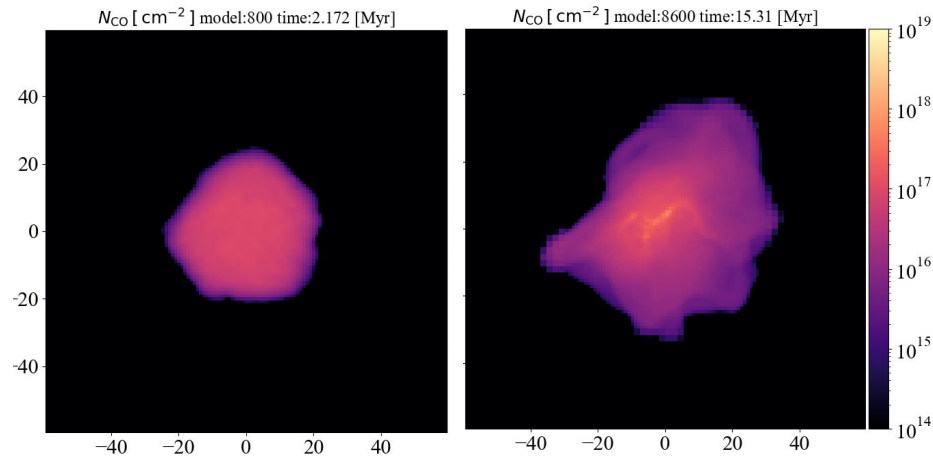
質量の大きい分子雲でしか大質量星形成が起こらない (Kauffman+2010)

様々な質量でシミュレーションを実施して解析

→ 大質量星形成の条件をデンドログラムの視点から説明できるか？



Based on Kauffman+2010



質量 $1.0e4 M_{\odot}$ の流体シミュレーションの様子, 図はCO柱密度
質量が小さいと進化速度が遅い？