

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

佐々木 誇虎

目次

1. 研究背景、目的
2. 卒業研究の紹介
3. 観測データ解析
4. 新規シミュレーションの実施
5. まとめ

自己紹介

名前: 佐々木 誇虎

出身: 北海道札幌市

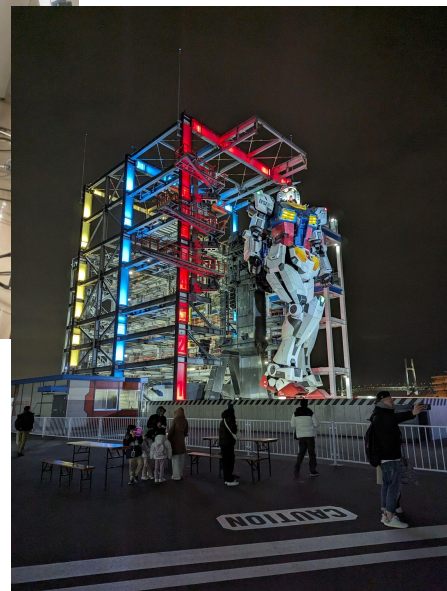
学歴: 平岡中央中学校

→ 札幌東高校

→ 筑波大学理工学群物理学類

→ 筑波大学大学院 宇宙観測研究室

趣味: 音楽、アニメや映画

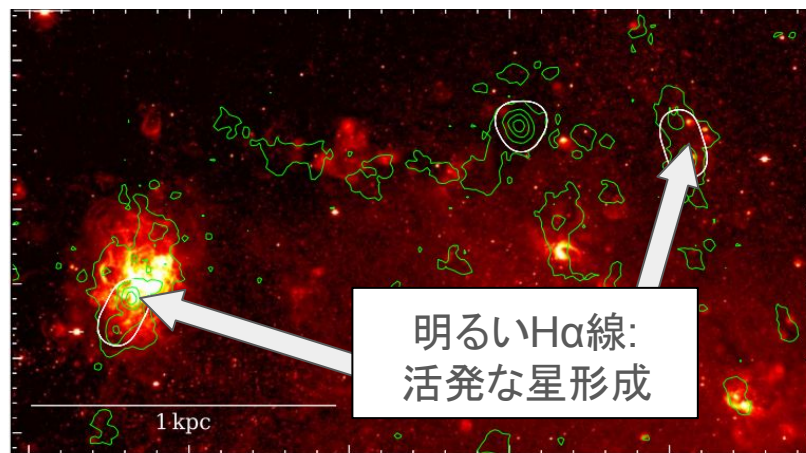
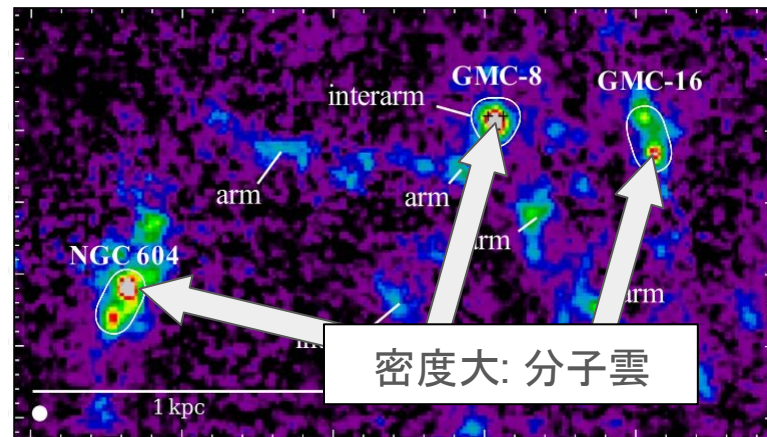
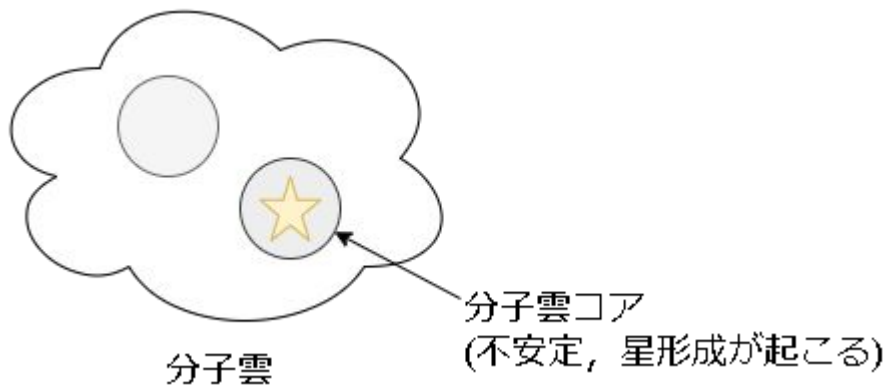


1. 研究背景: 分子雲と星形成

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？

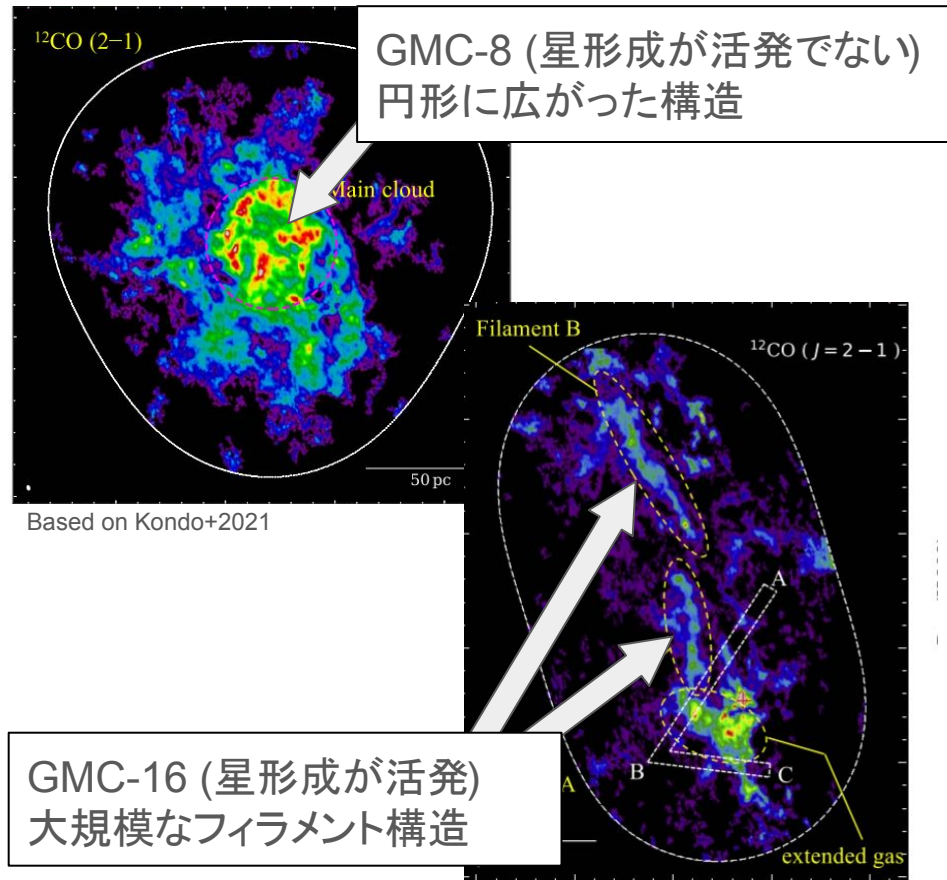


1. 研究背景: 星形成の研究手法

- 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

卒業研究

- 時間発展に伴い、流体の構造はどのように変化するかに注目
- 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

修士研究

- 観測データを解析し、卒業研究の解析結果と比較
→ 卒業研究で推定したシナリオを検証
- シミュレーションを新規に実施し、卒業研究と同様の手法で解析
→ 観測データと比較し、シミュレーションの妥当性を検討
→ シミュレーション同士で比較し、構造における大質量星形成の条件を探る

2. 卒業研究: 対象データ

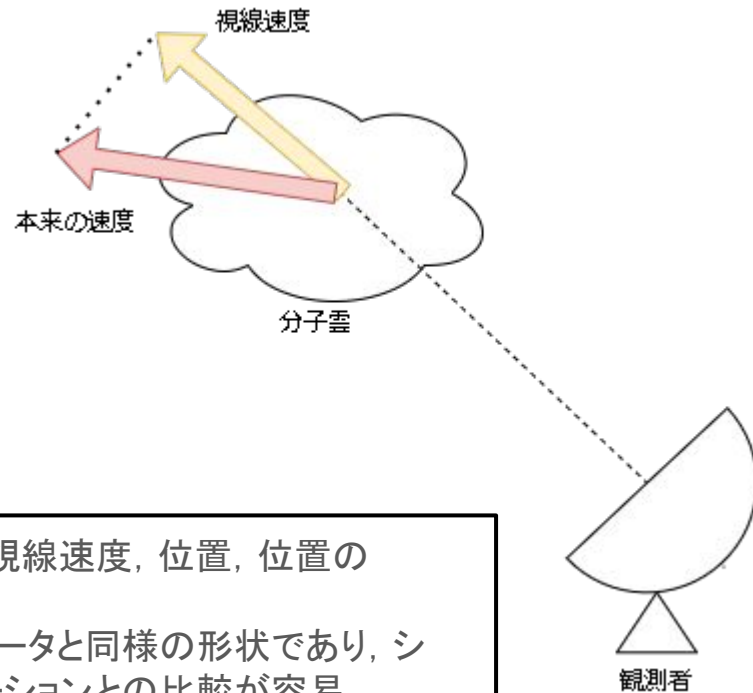
磁場のない一様な分子雲を想定し、質量 $10^6 M_{\odot}$ 、面密度 $350 M_{\odot} pc^{-2}$ 、半径 $30 pc$ の一様な流体が自己重力により変化する

- 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

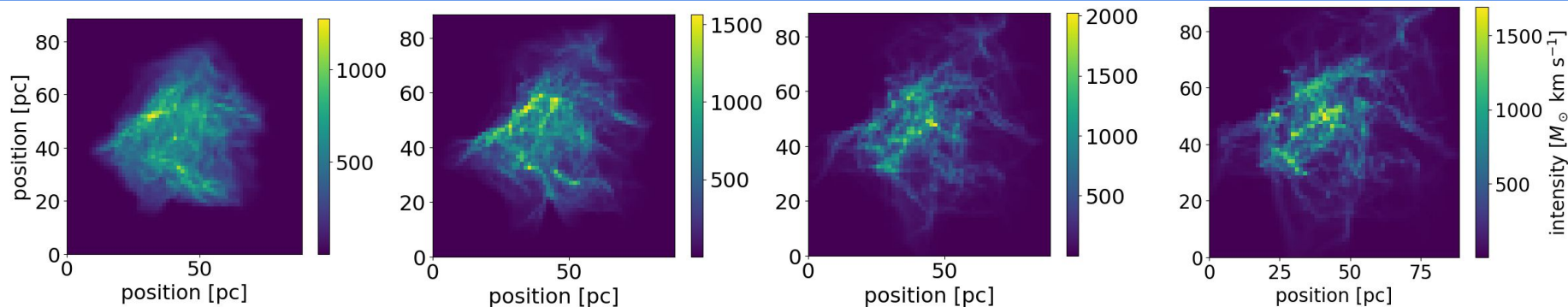
の二種類の図を作成、解析の対象とした



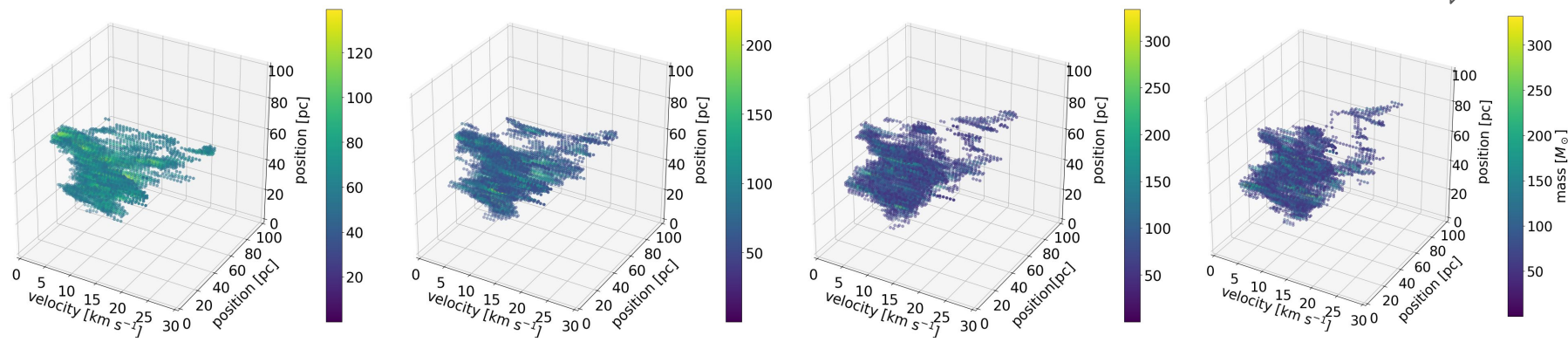
質量データ: 視線速度, 位置, 位置の三次元アレイ

→ 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. 卒業研究: 対象データ



積分強度図



三次元散布図($>40 M_{\odot}$)

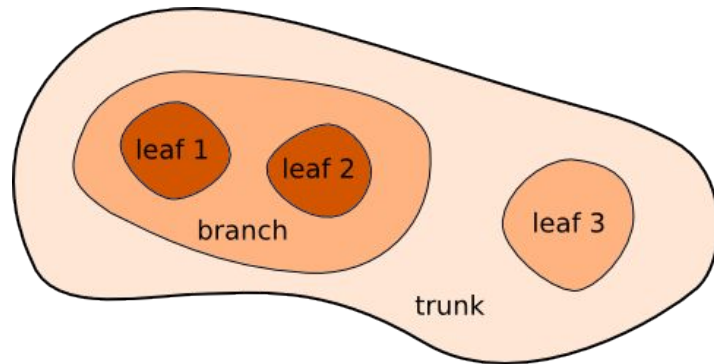
2. 卒業研究: 解析手法

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

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

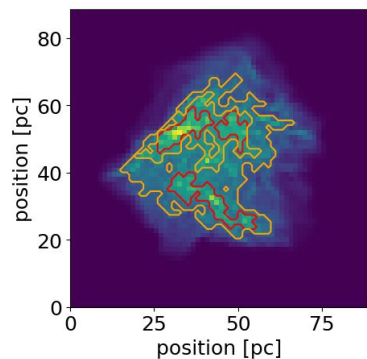
σ : 三次元速度分散

R : 分子雲の半径

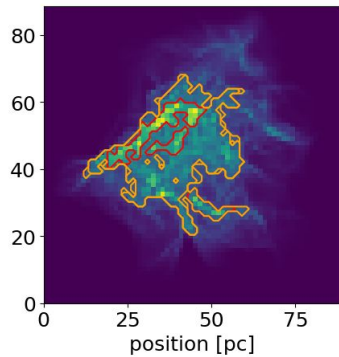
G : 万有引力定数

M : 分子雲の質量

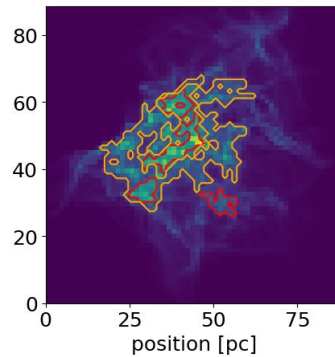
2. 卒業研究: 解析結果



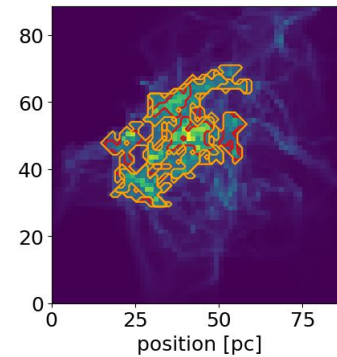
0.57 Myr



1.1 Myr

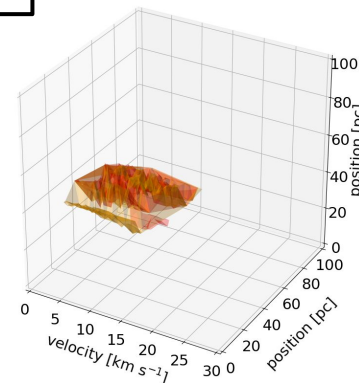
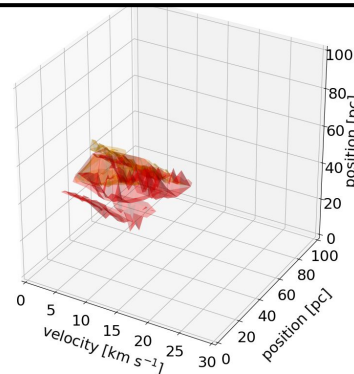
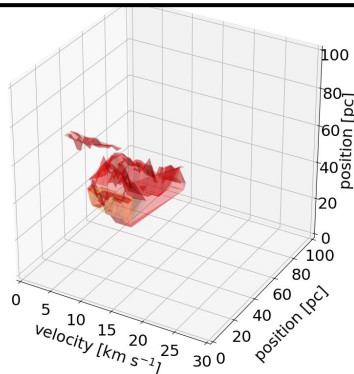
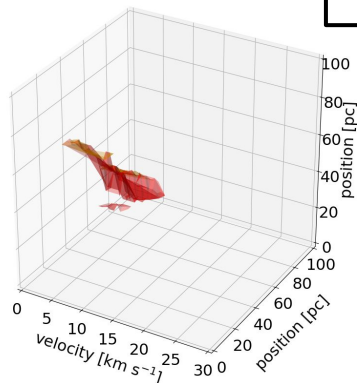


1.7 Myr



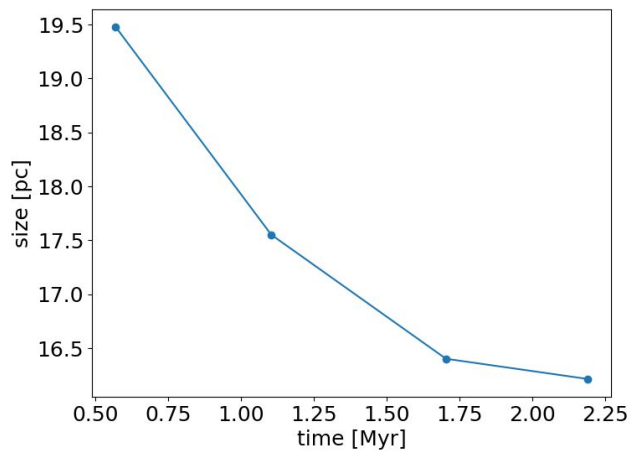
2.2 Myr

ガスの質量が大きい部分ほど多くの内部構造を持つ

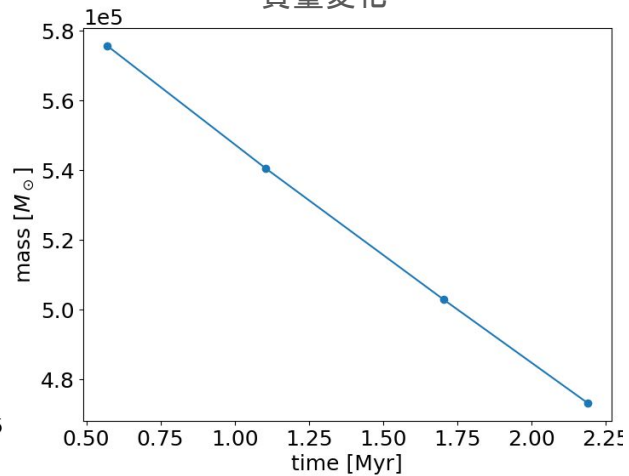


2. 卒業研究: 全体構造(トランク)の変化

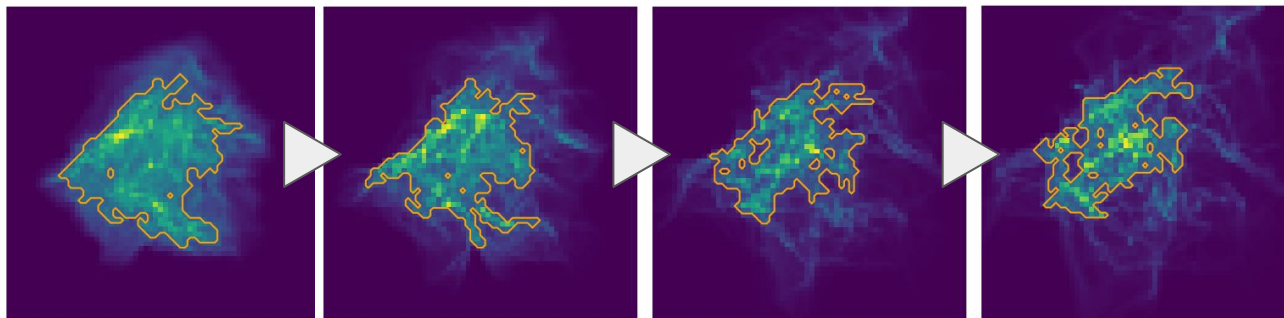
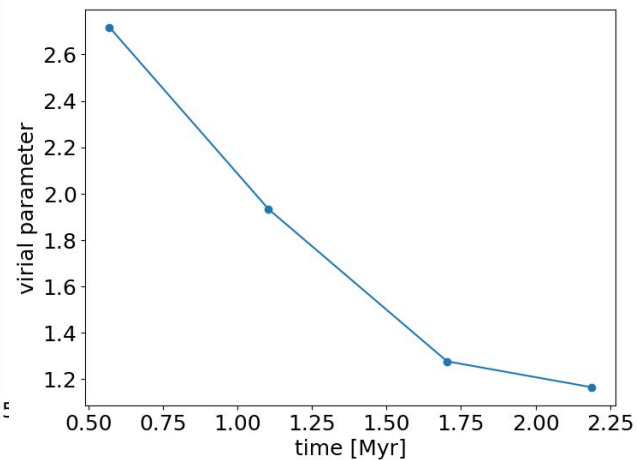
サイズ変化



質量変化

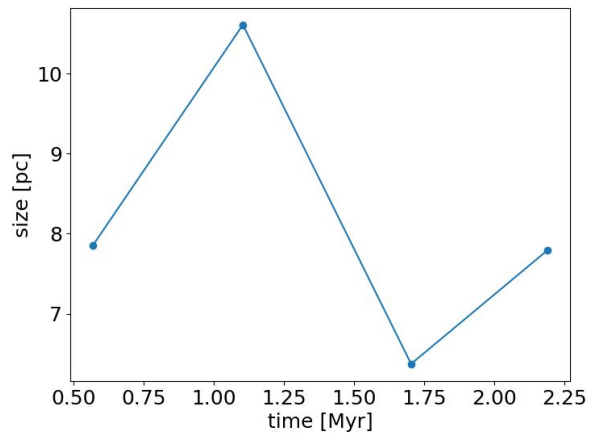


ビリアルパラメータ変化

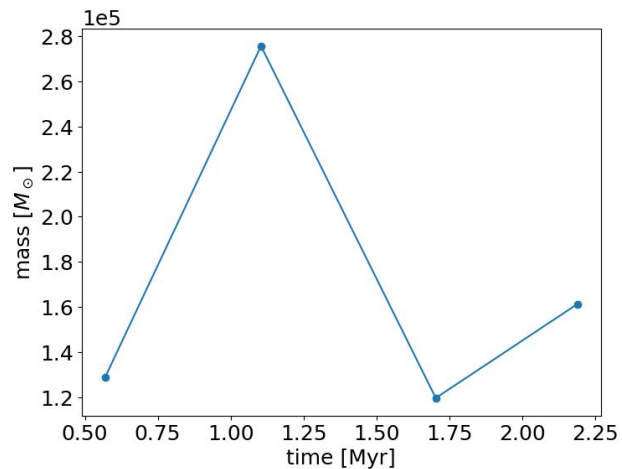


2. 卒業研究: 内部構造の変化

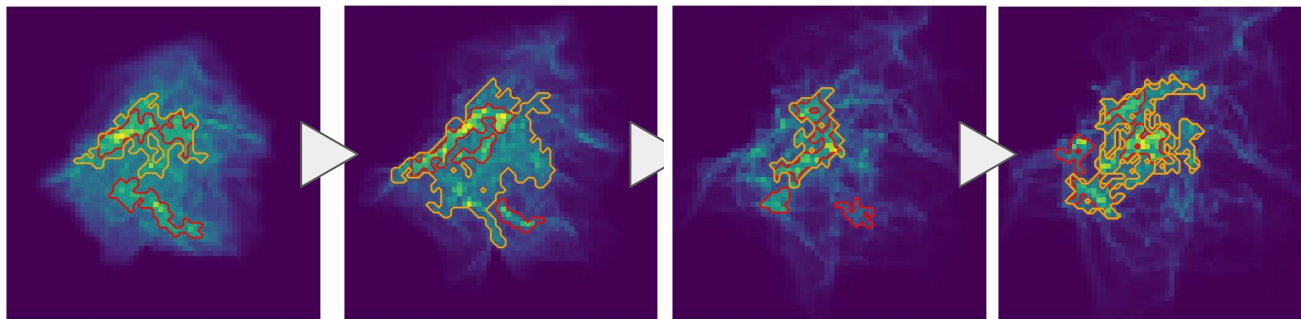
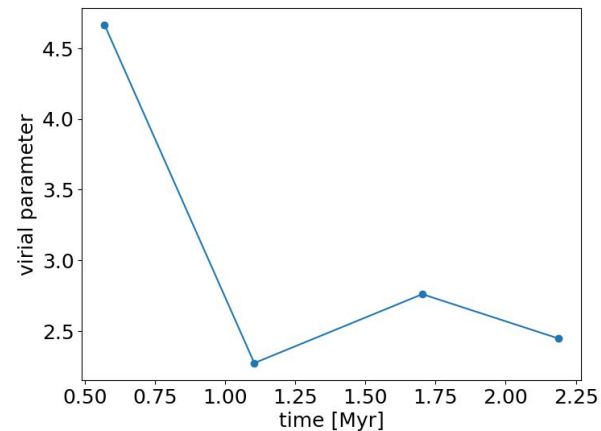
サイズの平均値変化



質量の平均値変化

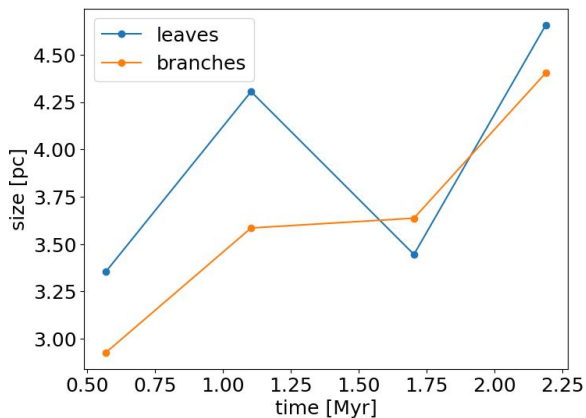


ビリアルパラメータの平均値変化

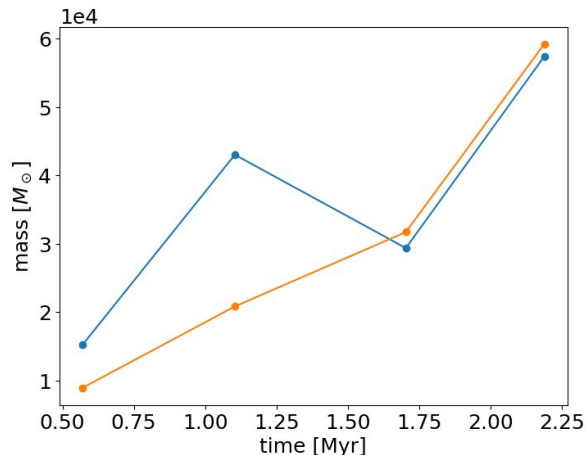


2. 卒業研究: 三次元散布図上の各構造の変化

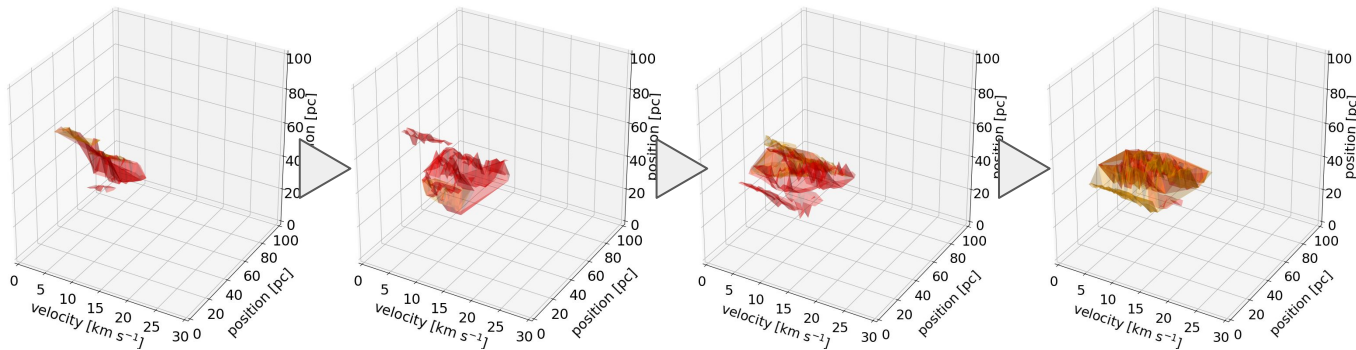
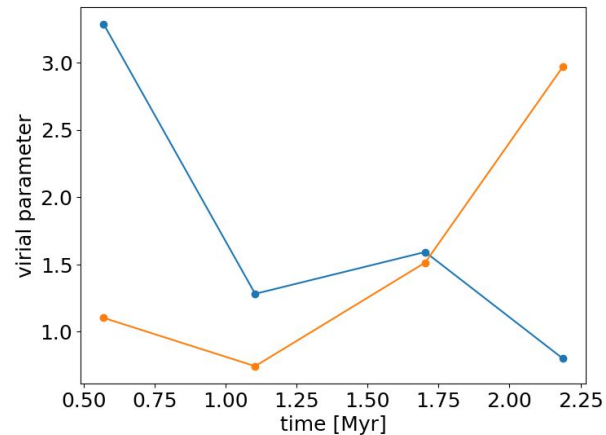
サイズの平均値変化



質量の平均値変化

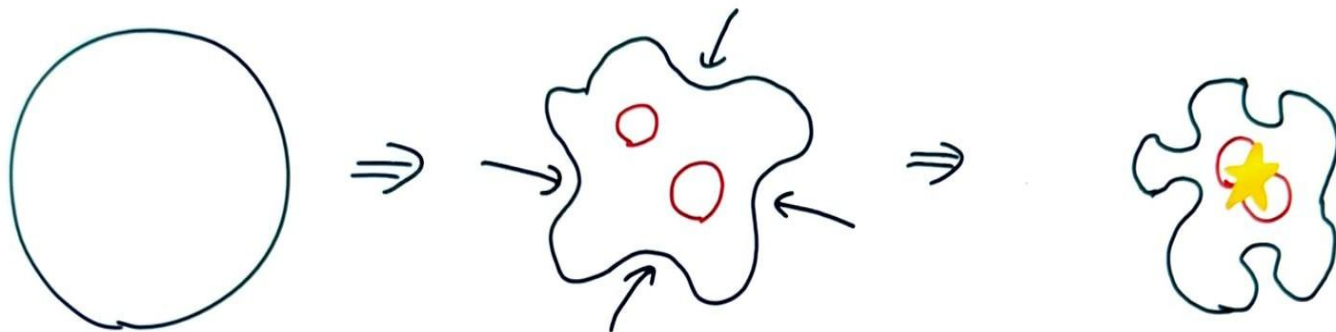


ビリアルパラメータの平均値変化



2. 卒業研究: 分子雲の進化シナリオ

- 全体として徐々に収縮, フィラメント構造発展
- 内部構造はサイズと質量の増減を繰り返す
→ 全体の収縮は収まり, 内部構造が分裂や合体を繰り返す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
初期質量 [M_solar]	7.7e7	7.1e7	1.0e7	9.9e6	1.1e6
Class II / I 比率	4.58	2.1	2.50	1.4	1.7

Class I 天体: スペクトルエネルギー分布が長波長側へ増加, 原始星に対応

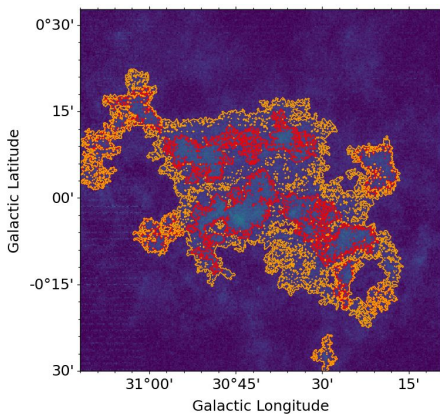
Class II 天体: スペクトルエネルギー分布が平坦もしくは長波長側へ減少, Tタウリ型星に対応

Class II / I 比率: 星団(分子雲)の星形成段階の指標の一つ

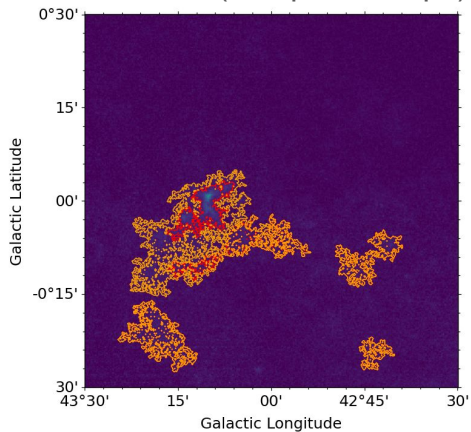
分子雲の年齢と考えると, $M16 < M17 < W49A < W51A, B < W43 \text{ Main}$

3. 観測データ解析: 結果

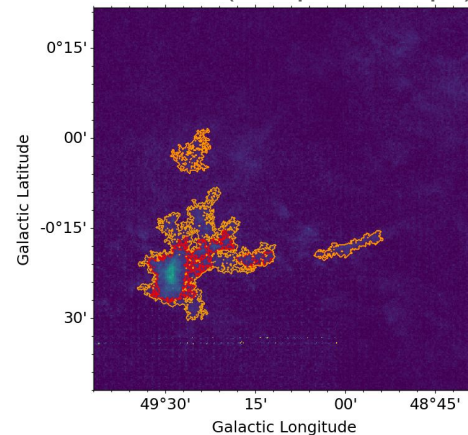
W43付近 (100 pc × 100 pc)



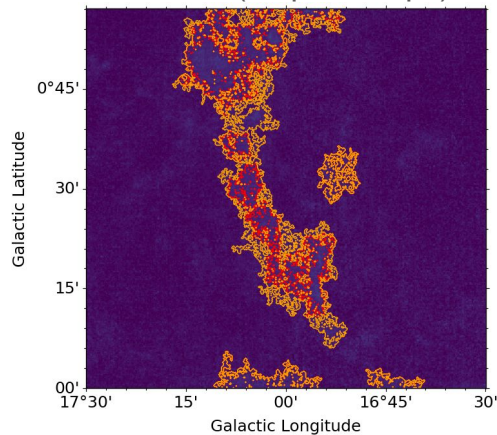
W49付近 (100 pc × 100 pc)



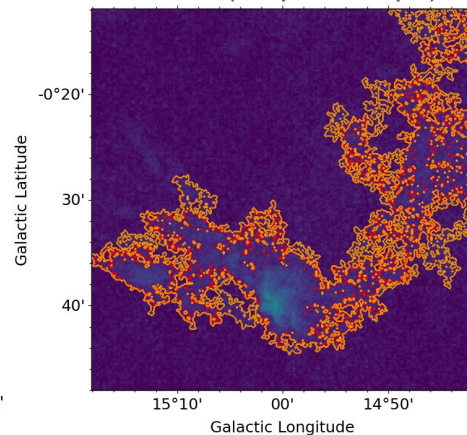
W51付近 (100 pc × 100 pc)



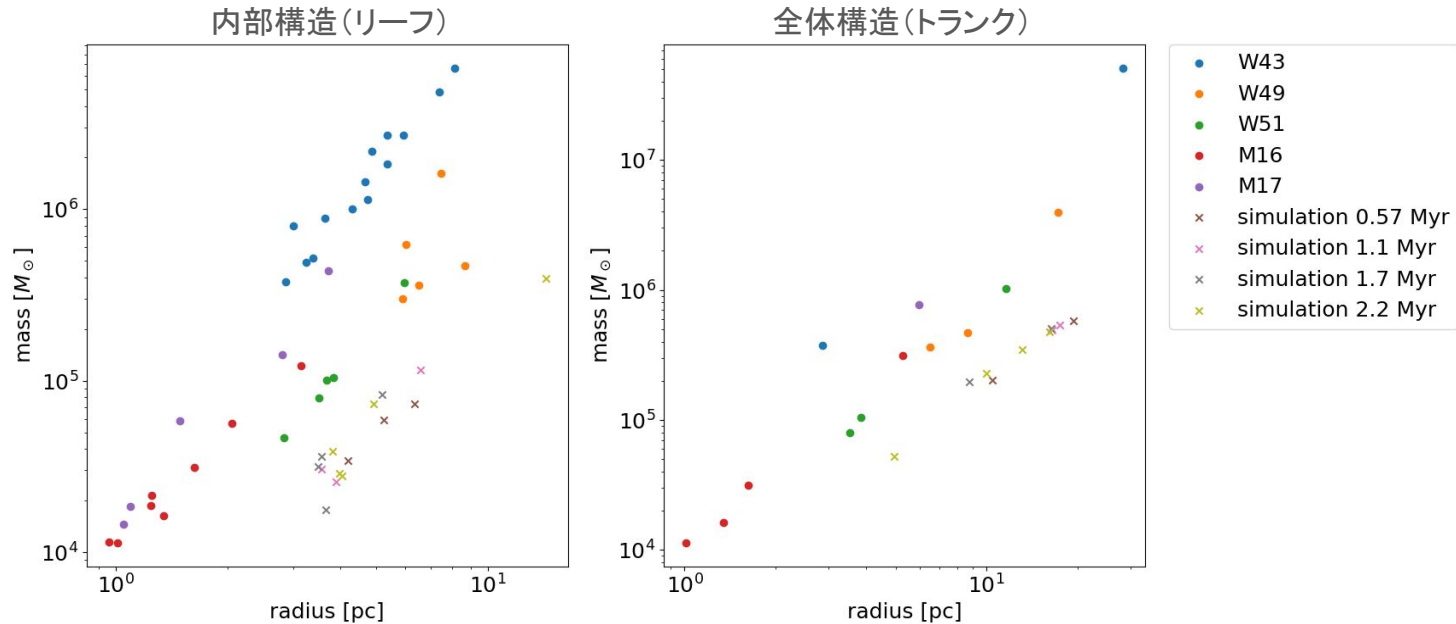
M16付近 (30 pc × 30 pc)



M17付近 (21 pc × 21 pc)



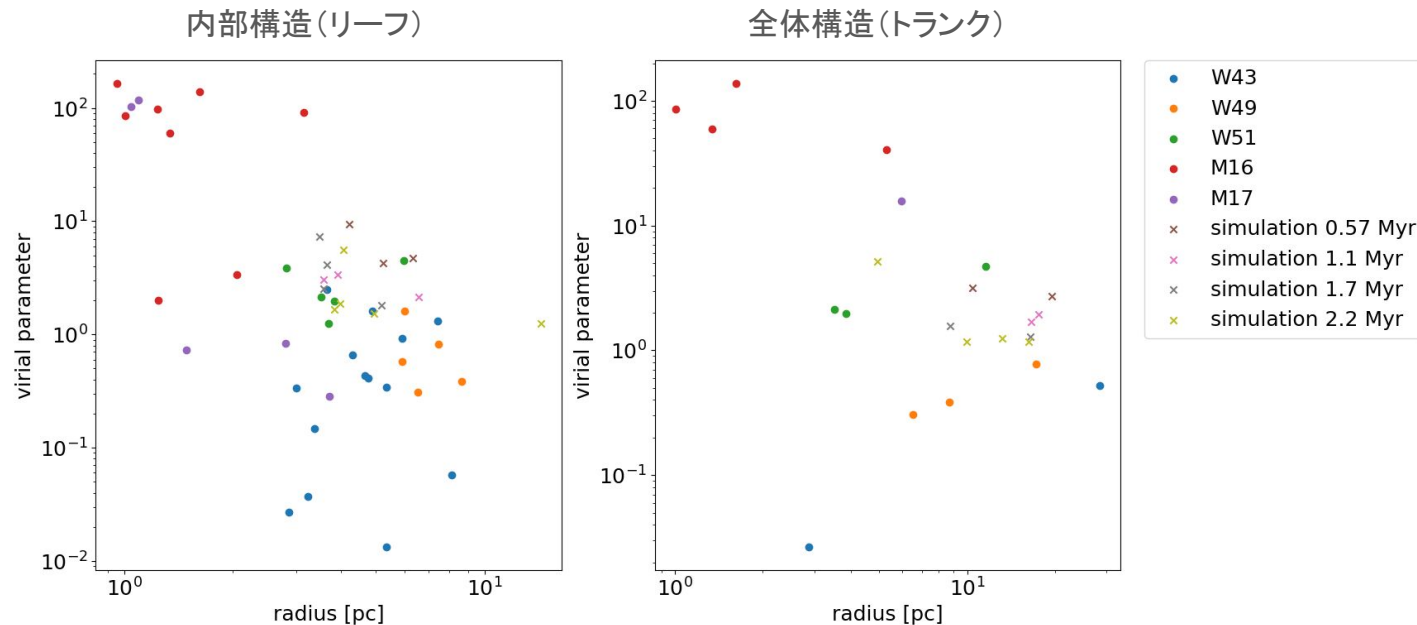
3. 観測データ解析: サイズ vs 質量



- ・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(初期質量の違い?シミュレーションが途中で途切れている?)

シミュレーションのプロットが観測データよりも下に位置している

3. 観測データ解析: サイズ vs ビリアルパラメータ

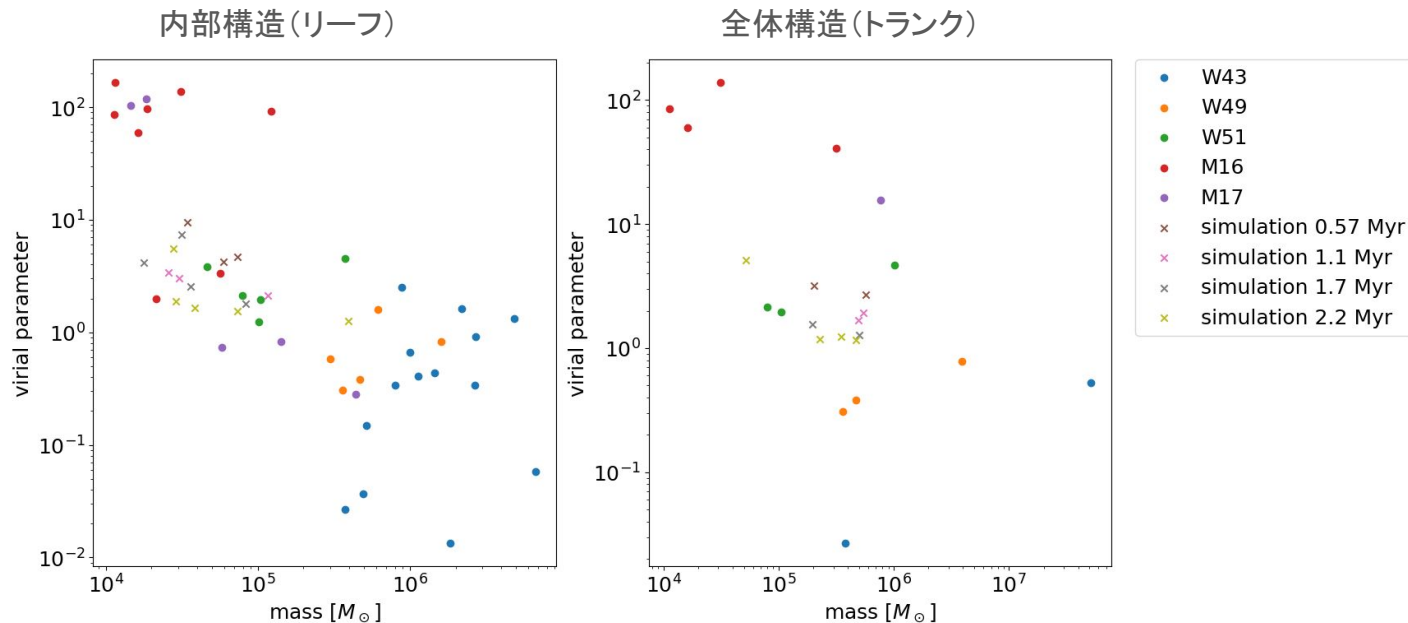


・内部構造は負の相関の上で増減

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だが、シミュレーションが途中で途切れている？

3. 観測データ解析: 質量 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だが、シミュレーションが途中で途切れている？

(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？

4. 新規シミュレーションの実施

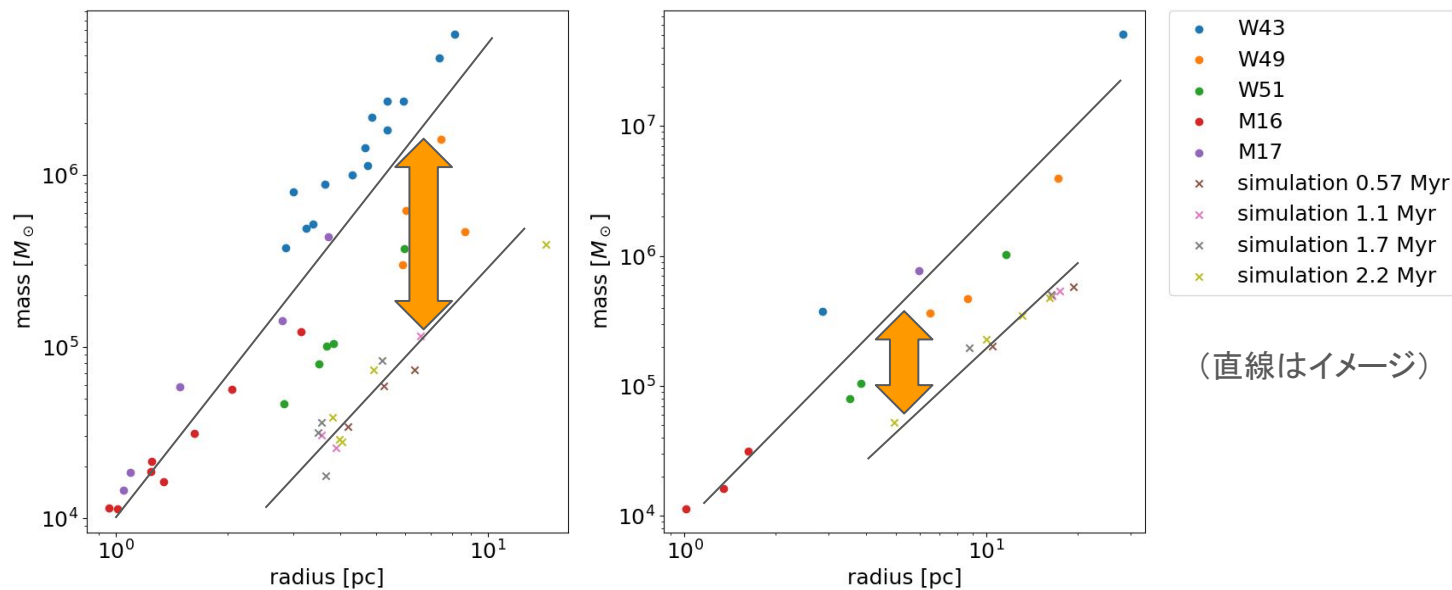
シミュレーションと観測データとの間にはずれ

→ 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)

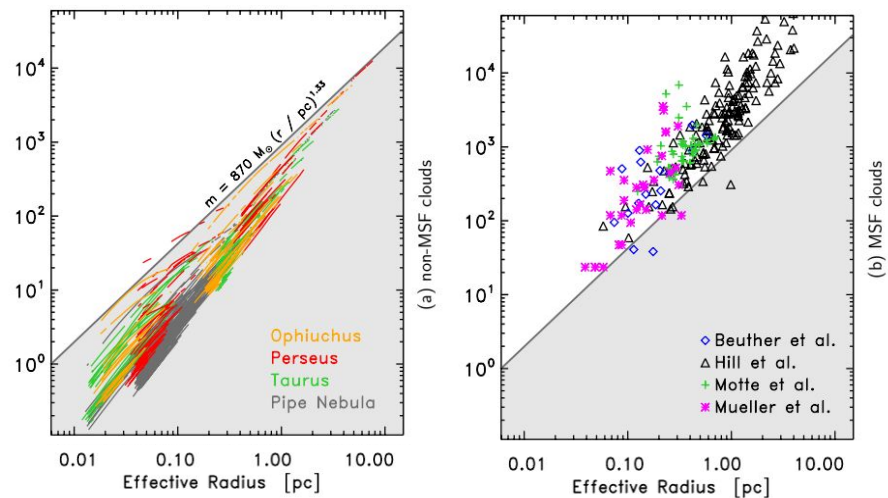


4. 新規シミュレーションの実施

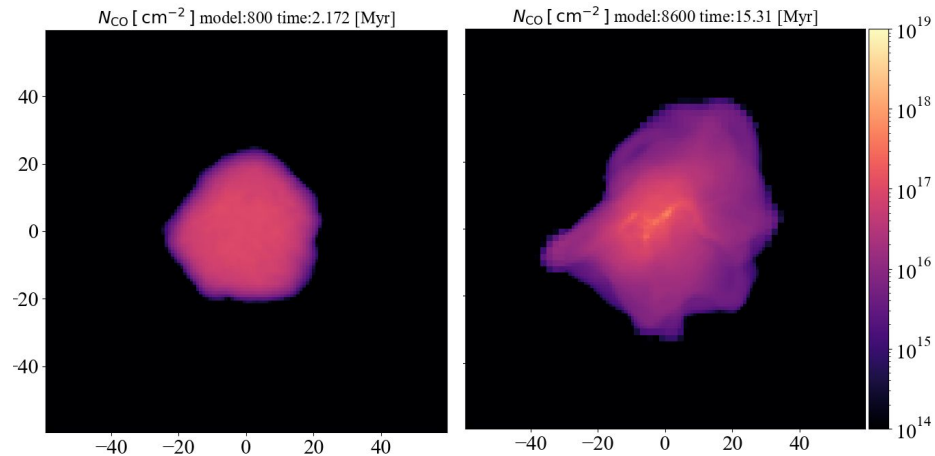
質量の大きい分子雲でしか大質量星形成が起こらない (Kauffman+2010)

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？

5. まとめ

FUGINの ^{13}C O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たシミュレーションと比較した結果、

- ・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
- ・シミュレーションよりも、構造あたりの質量が大きいことが分かった

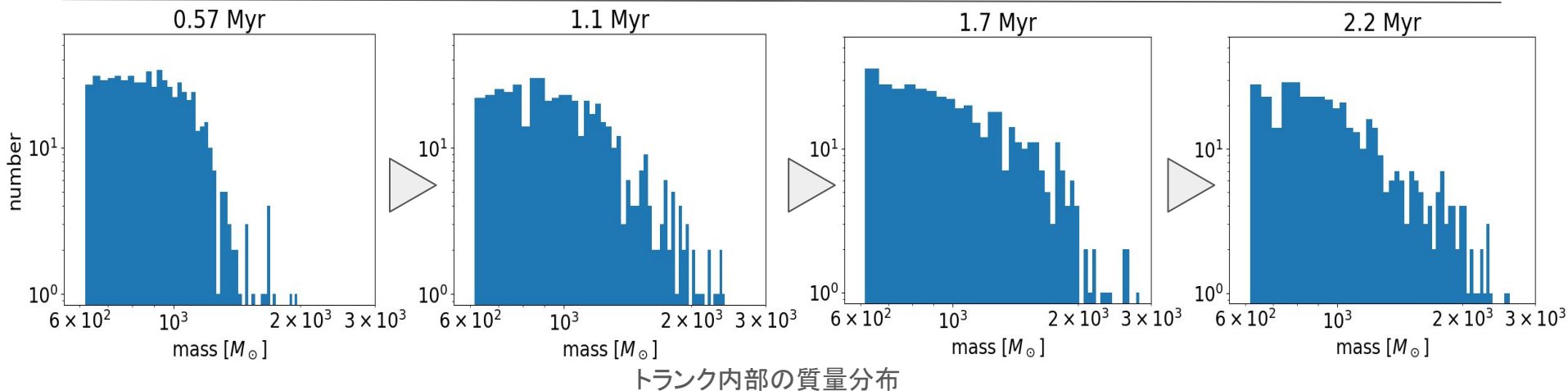
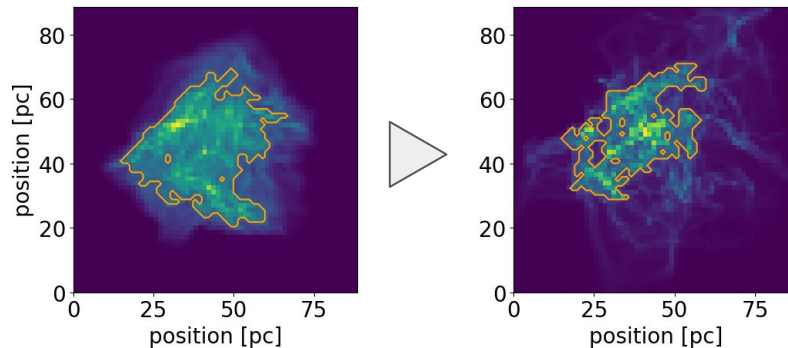
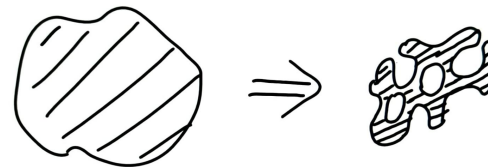
今後

- ・新規シミュレーションを行う
 - ・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ことで、星形成に重要なシミュレーションを探る
 - ・様々な質量でシミュレーションを行い解析することで、大質量形成の条件をデンドログラムの視点から探る
- ・さらなる観測データの解析

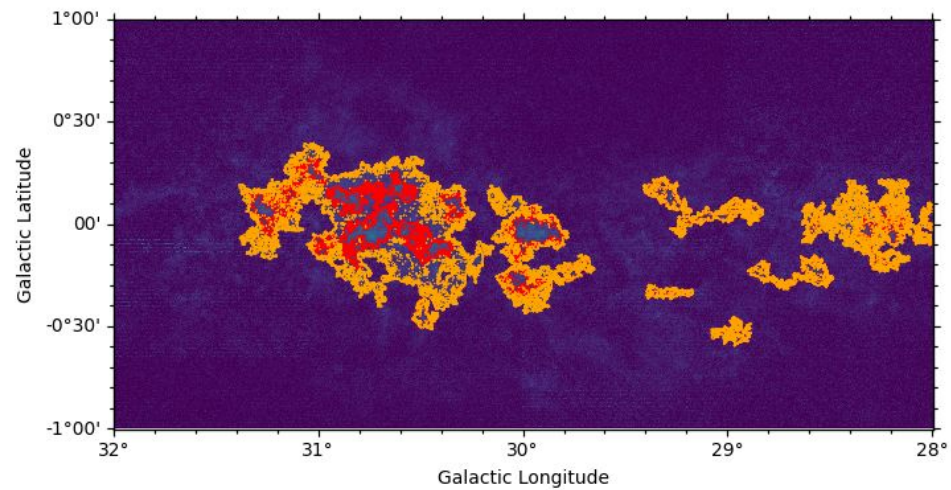
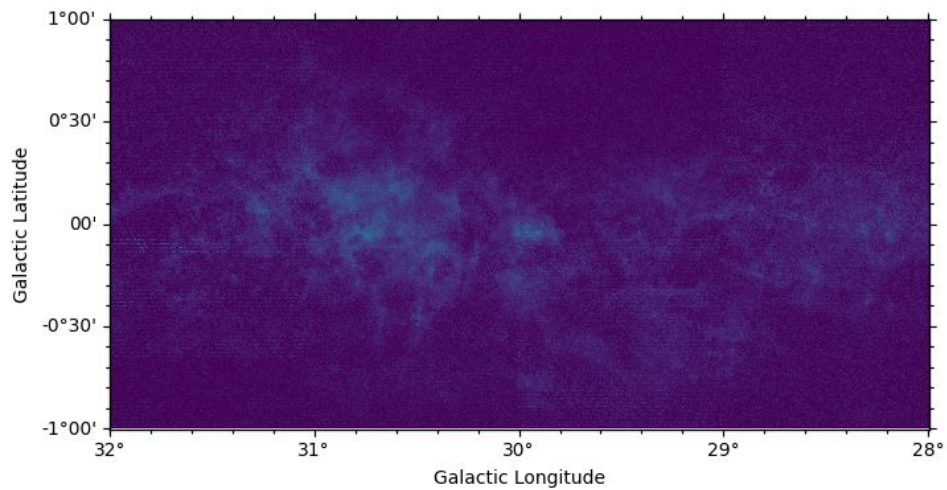
Appendix: フィラメントの発達

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

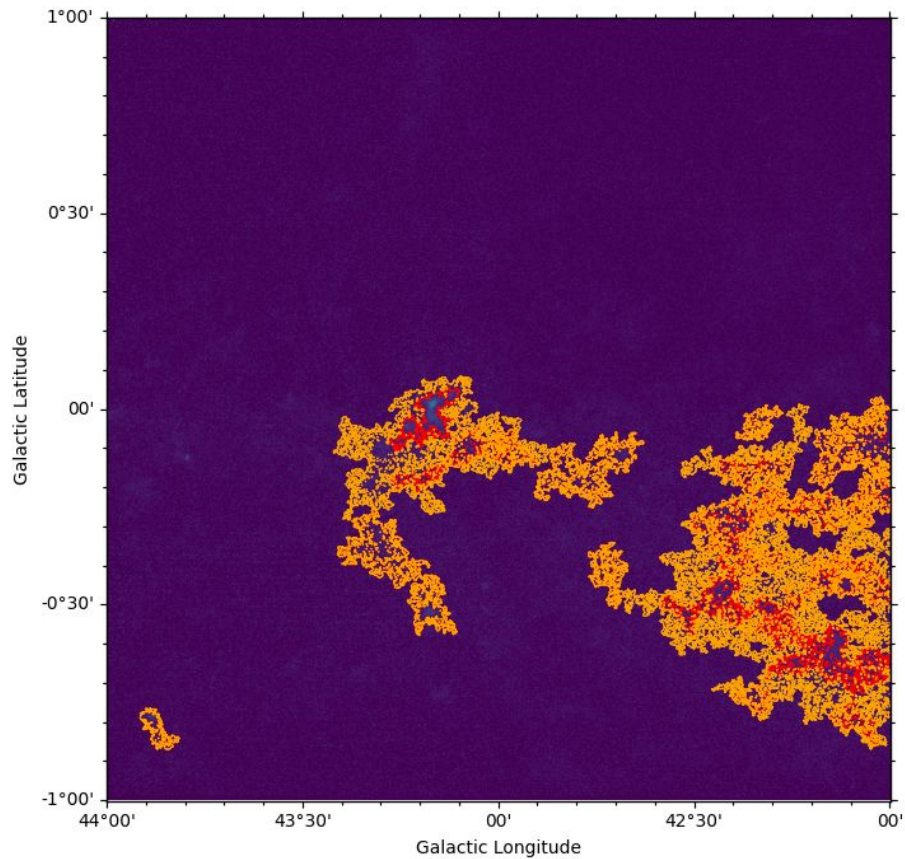
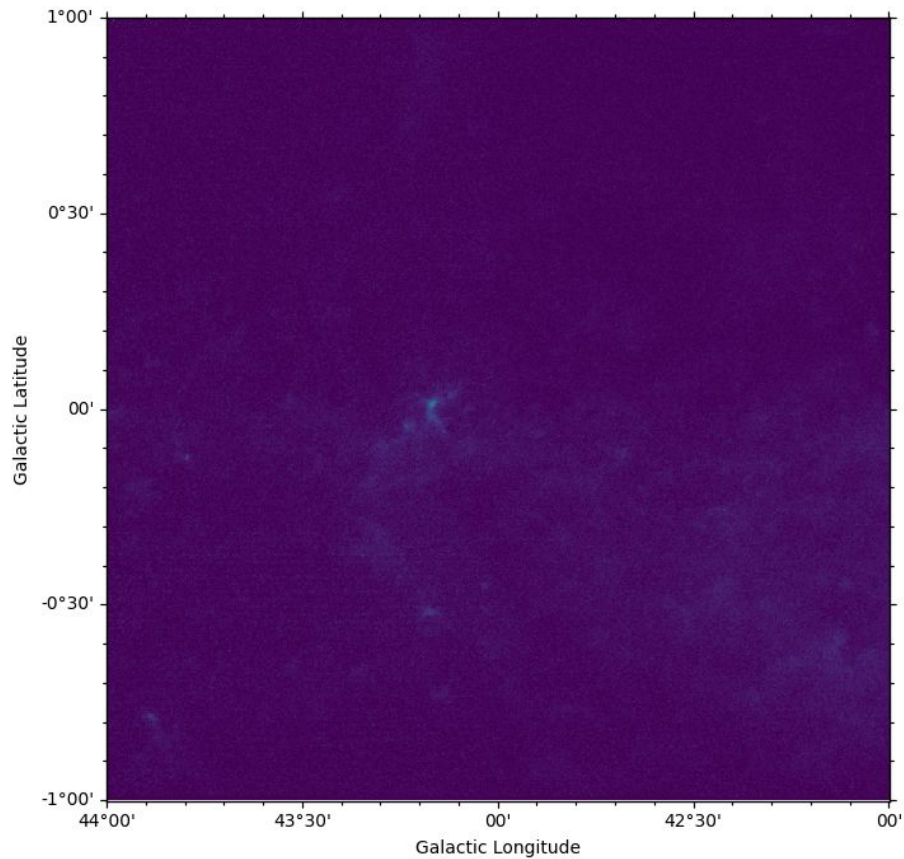
サイズの減少+フィラメント構造の発達によりトランク内部の質量が線形に減少



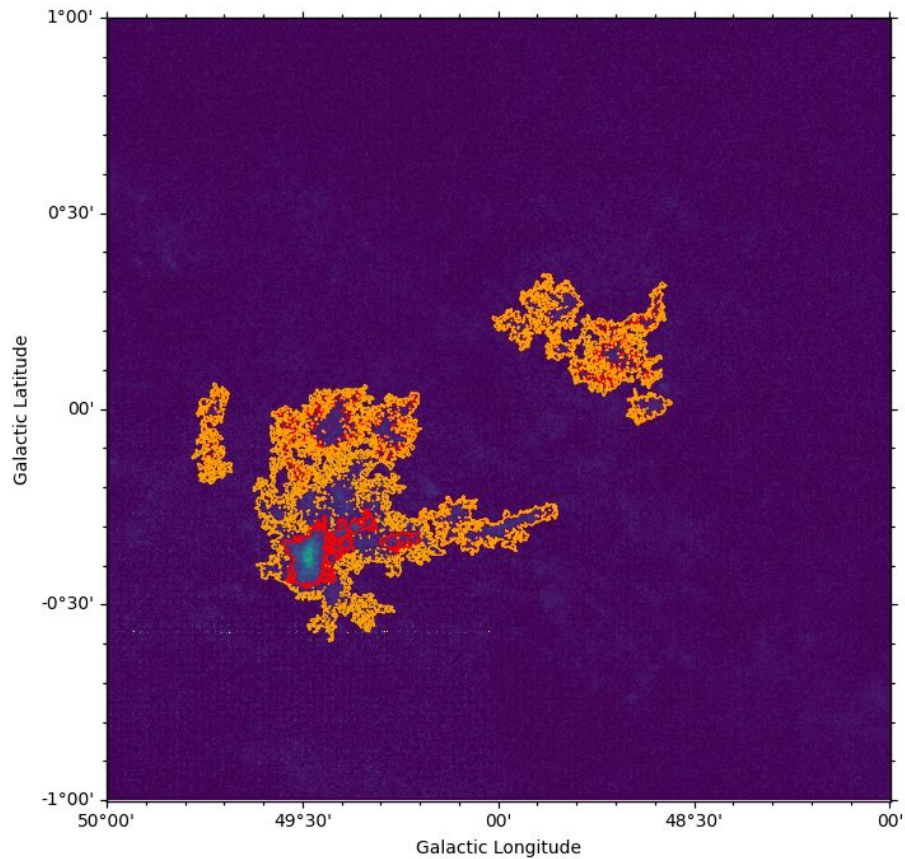
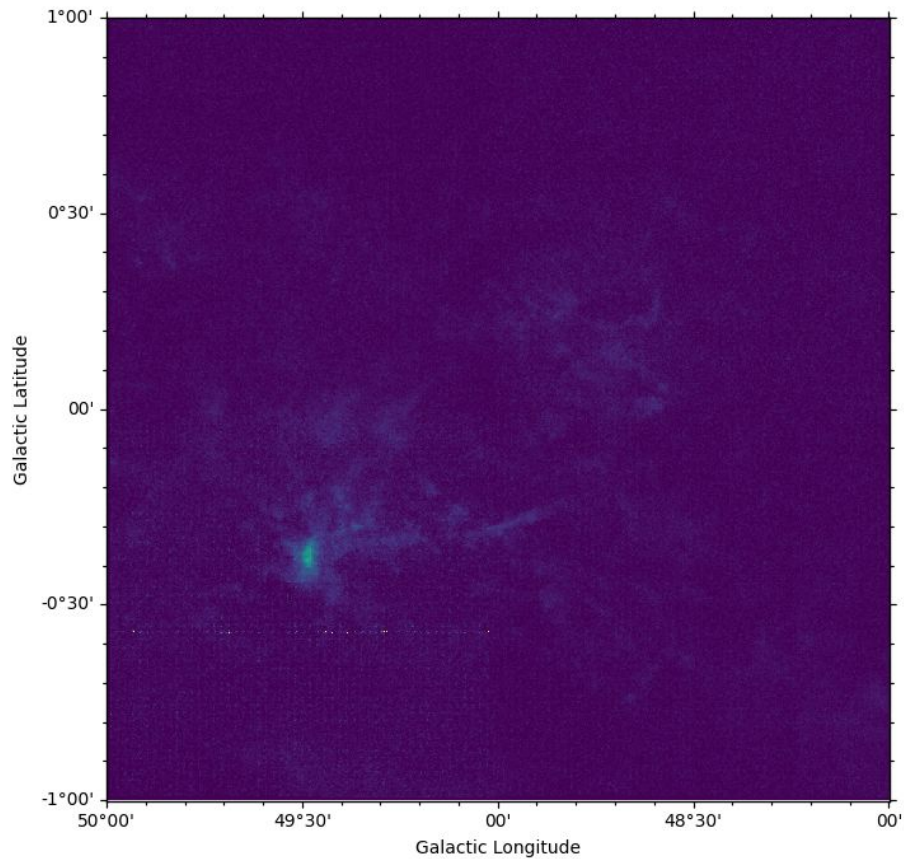
Appendix: W43解析



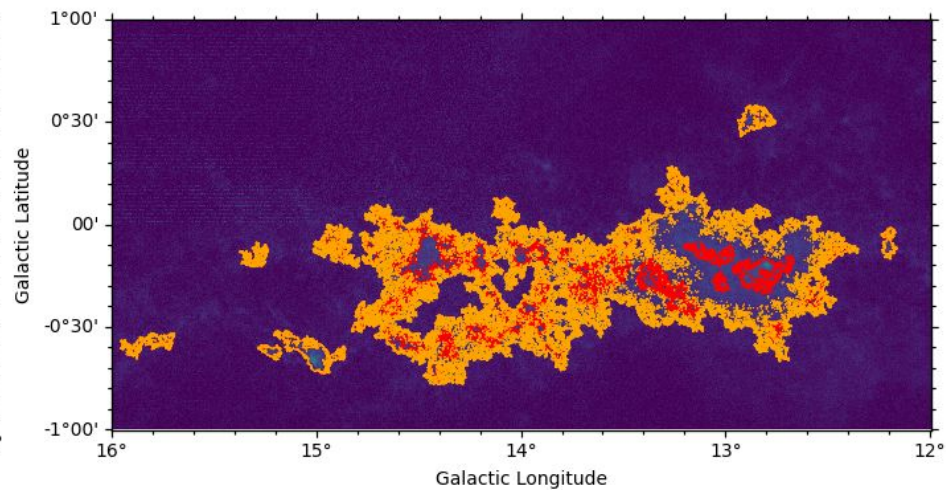
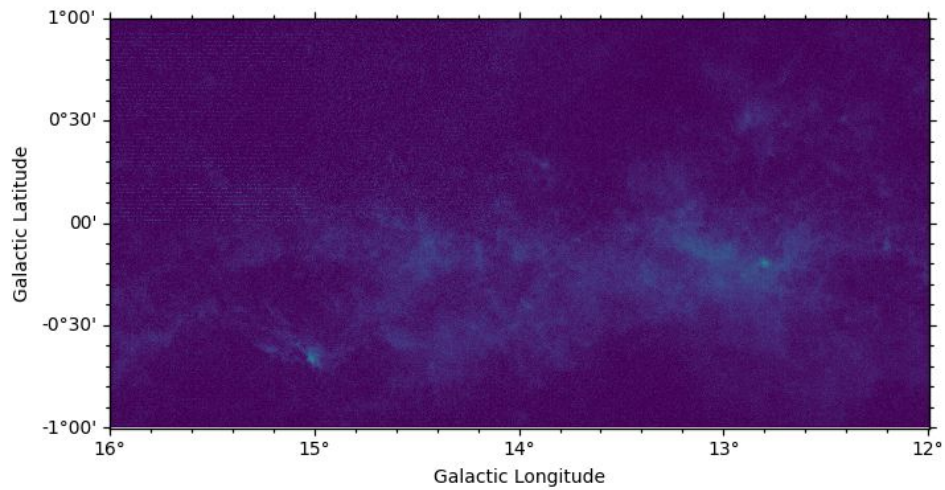
Appendix: W49解析



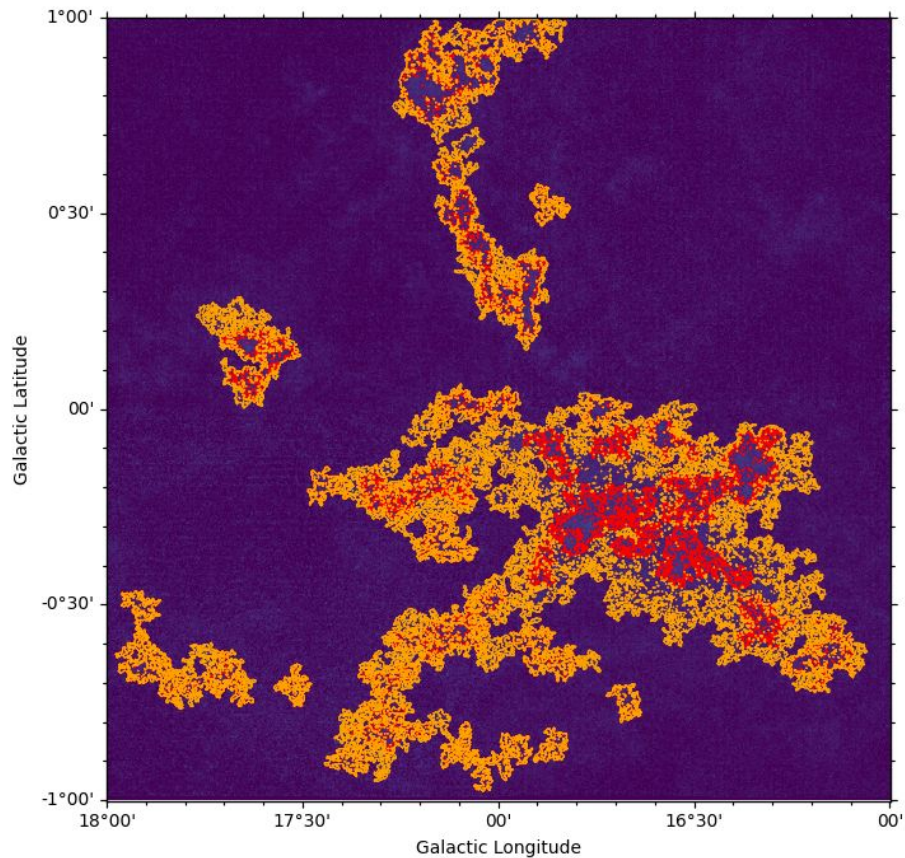
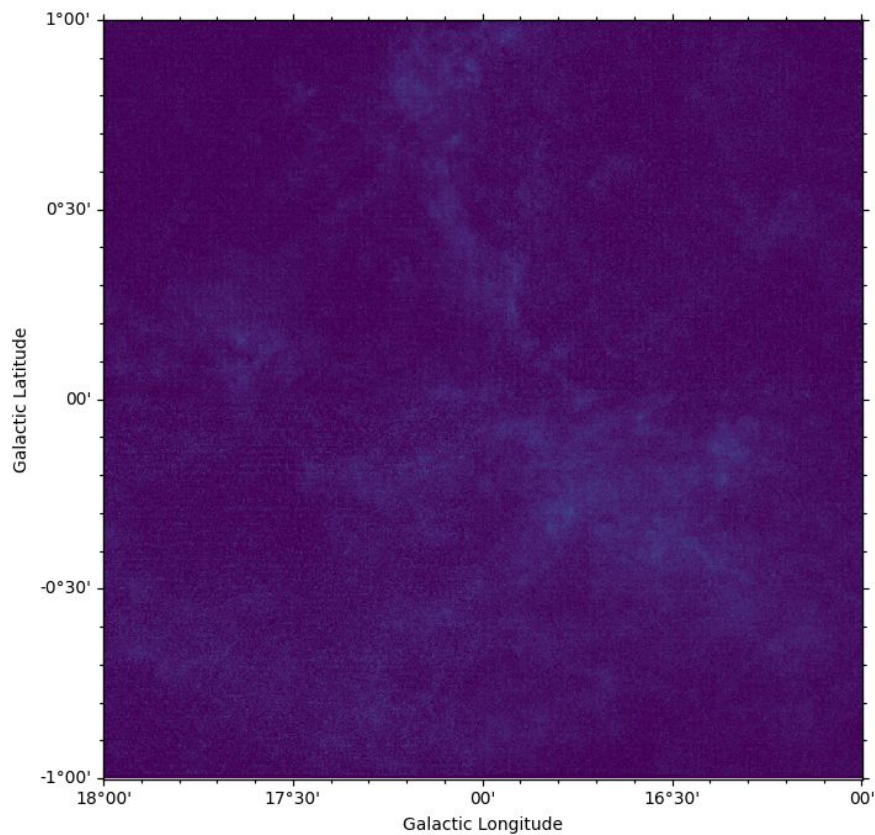
Appendix: W51 解析



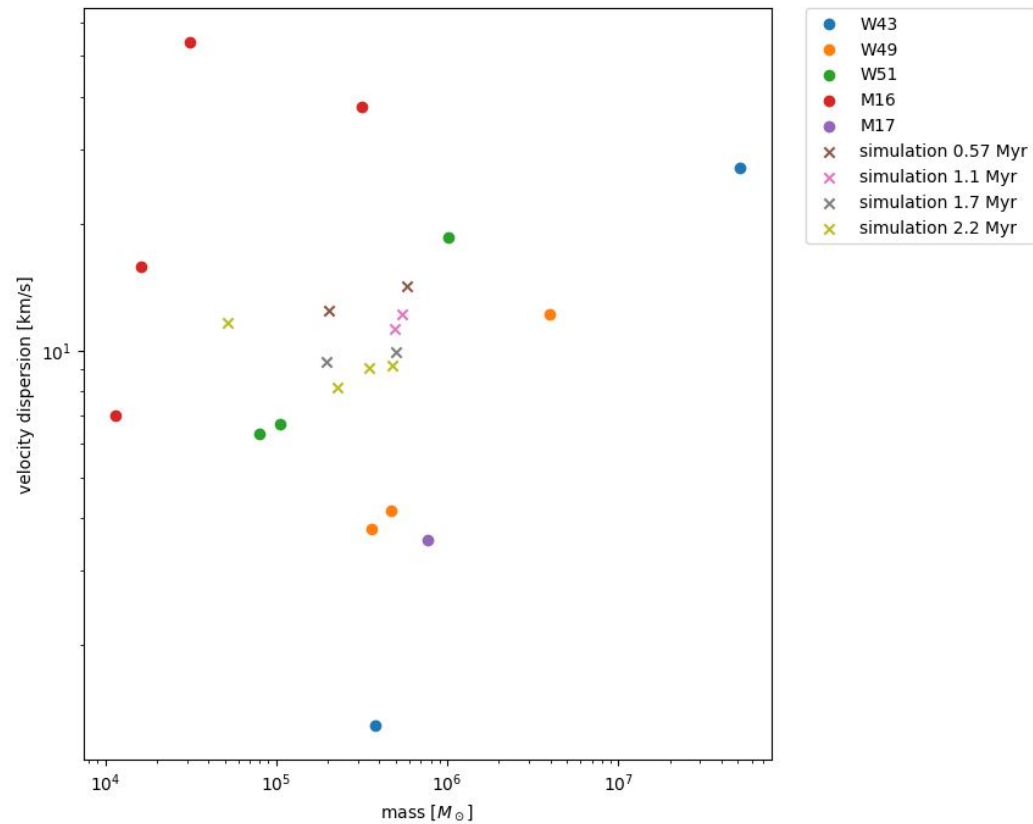
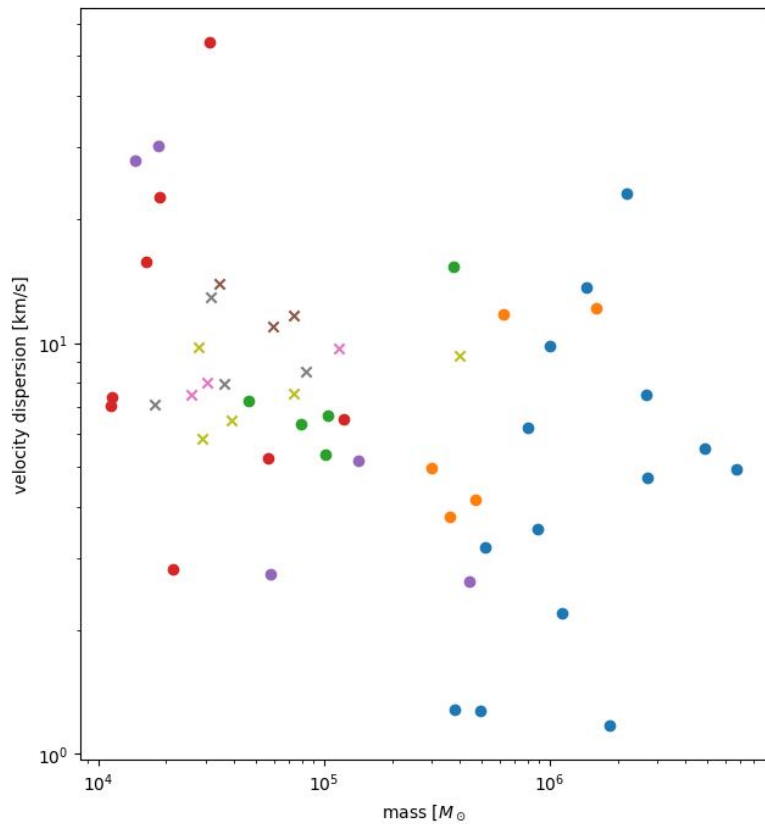
Appendix: M17解析



Appendix: M16解析



Appendix: 質量 vs 速度分散



Appendix: 速度分散 vs ビリアルパラメータ

