

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. 背景・目的
2. 方法
3. 結果
4. 議論
5. まとめ

自己紹介

佐々木 誇虎 (ささき ことら)

北海道札幌市出身

筑波大学 物理学類

→ 筑波大学大学院 物理学学位プログラム (M2)

趣味: 音楽!



1. 背景・目的

大質量星形成と分子雲衝突

星は分子雲の重力収縮によって形成

大質量星: 巨大分子雲のみから星団として形成

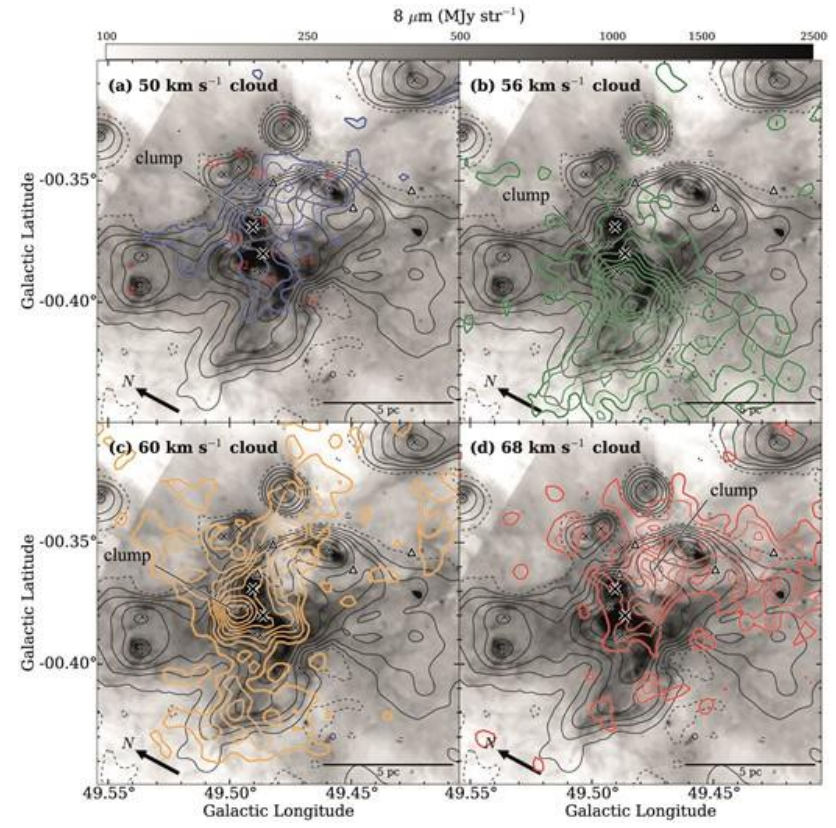
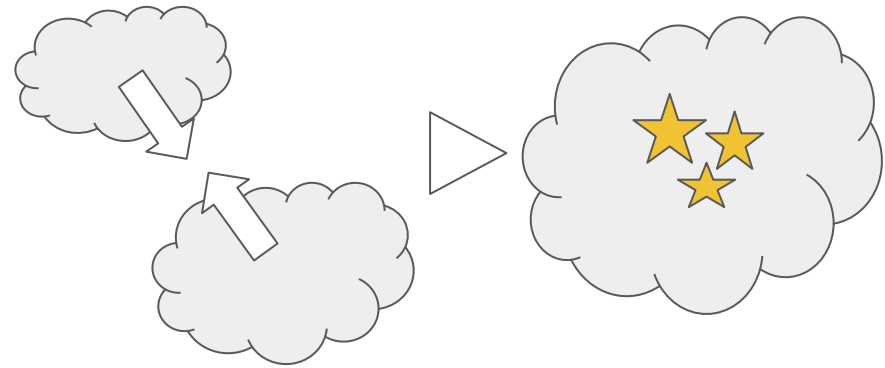
分子雲からどのようなプロセスで星団形成に至るかは謎

分子雲衝突: 大質量星形成の有力なシナリオ

大質量星近傍で雲衝突を示唆する観測多数

(FUGIN: Fujita+2021など、ALMA: Sano+2013など)

運動学的タイムスケールから、分子雲衝突は支配的な頻度では起こっていない? (Sun+2022)



1. 背景・目的

階層的重力収縮

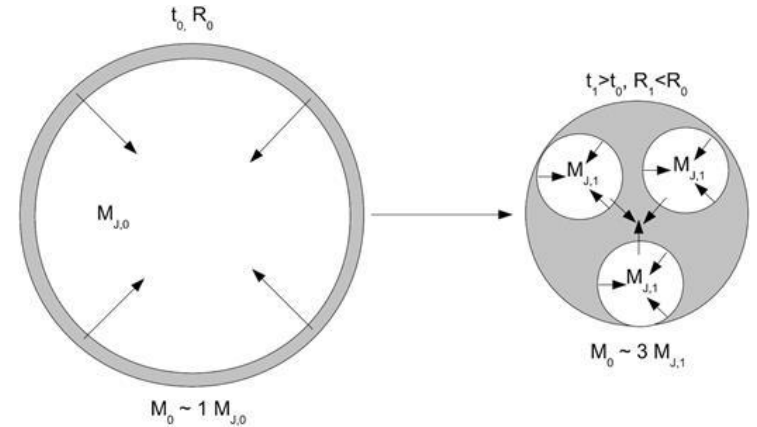
これまでの研究から、**階層的重力収縮**が有力なシナリオとして得られつつある:

1. 巨大分子雲が全球的に収縮
2. 内部で高密度領域が階層的に形成
3. 内部構造が互いに高頻度で衝突

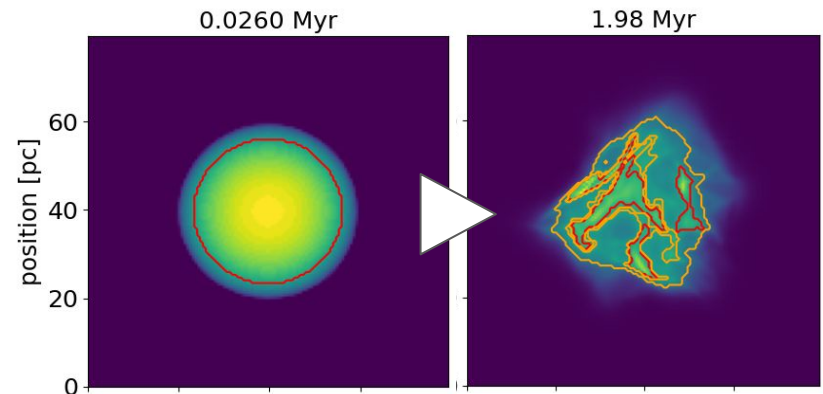
→ **巨大分子雲のみでの大質量星形成、分子雲衝突といった大質量星形成に特有の観測事実を説明可能**

階層的な重力収縮を取り入れた理論モデルはすでに議論されている(Vázquez-Semadeni+2019など)が、**観測とシミュレーションの両面から検証する試みはほとんどない**

分子雲進化シナリオは、時間発展を追うことができるシミュレーションを、観測データと同一手法で解析することで初めて検証できる



Vázquez-Semadeni+2019



1. 背景・目的

研究目的

**観測とシミュレーションの解析を通じて、
分子雲の階層的な重力収縮と相互作用という新たな分子雲進化シナリオを検討し、
大質量星形成のメカニズムを解明する**

- ・観測とシミュレーションの双方に共通の構造解析ツールを適用
→ **観測データとシミュレーションデータの比較が容易**
- ・シミュレーションデータの解析と観測データの解析それぞれの物理量を比較し、
分子雲進化シナリオの検討を行う

シミュレーションについて:

スーパーコンピュータPegasus 及び Miyabi での
流体シミュレーションを実行・解析予定

解析コード:SFUMATO(Matsumoto+2007)をベースに
GPU上での計算を可能にした改良版(福島助教)

**従来のCPUベースの計算と比べ10倍以上の速度・解像度
GPUベースのシミュレーションは星形成分野では初**



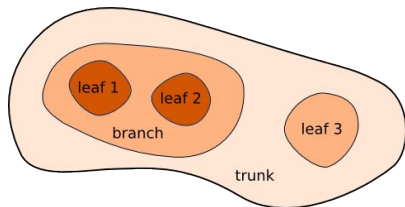
2. 方法

解析ツール

astrodendro (Rosolowsky et al. 2008) を用いた解析

Dendrogram: 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



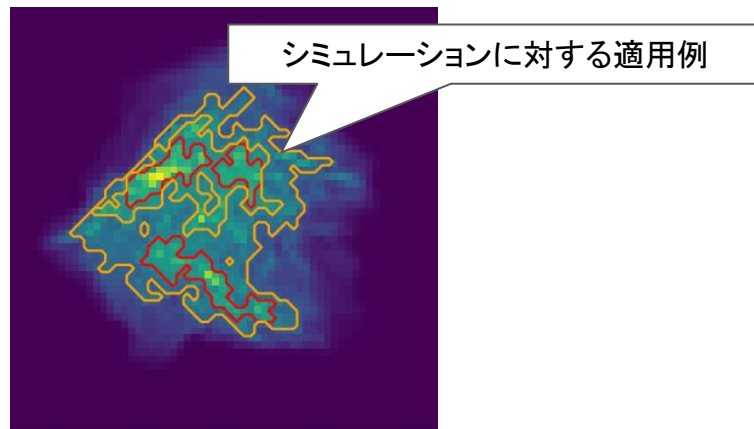
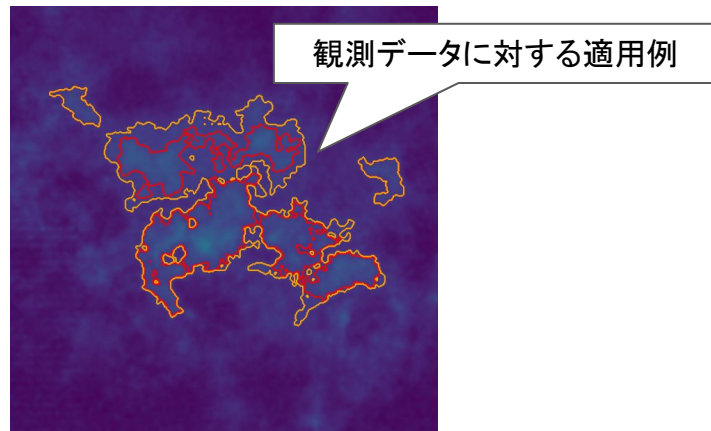
階層構造分類アルゴリズム

→ **階層的重力収縮の検証に最適**

観測データとシミュレーションデータの双方に対して適用する

→ **シミュレーションデータと観測データの比較が容易**

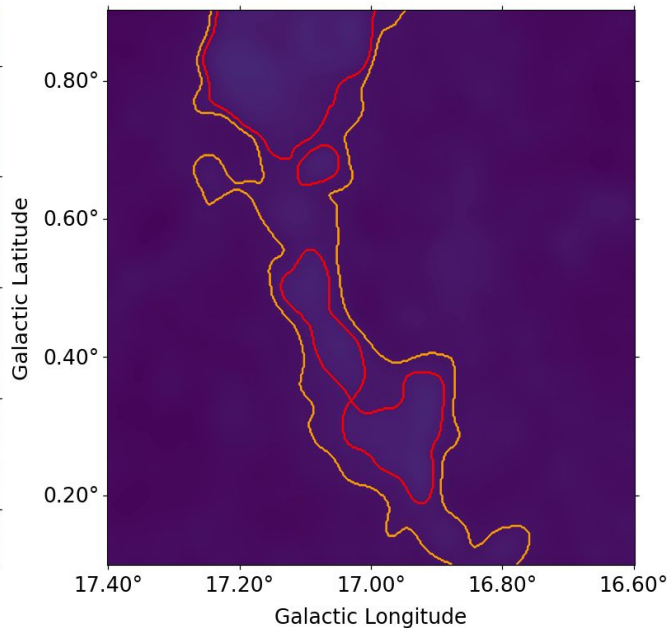
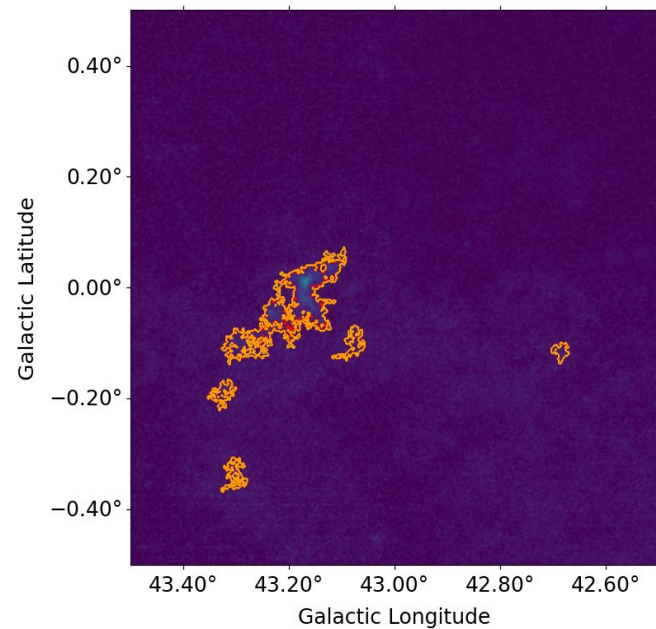
得られた構造それぞれについて物理量を求めて考察する



2. 方法

観測データ概要

- ・FUGIN (Umemoto et al. 2017) : 野辺山45m電波望遠鏡によるCO多輝線同時サーベイ観測
- ・17種類の分子雲について、 ^{13}CO ($J = 1-0$) 輝線強度マップから積分強度図を作成し解析



左: 最遠方のW49
右: 最近傍のM17

最遠方のW49 (11.11 kpc) に
合わせて分解能を調整した
上で解析

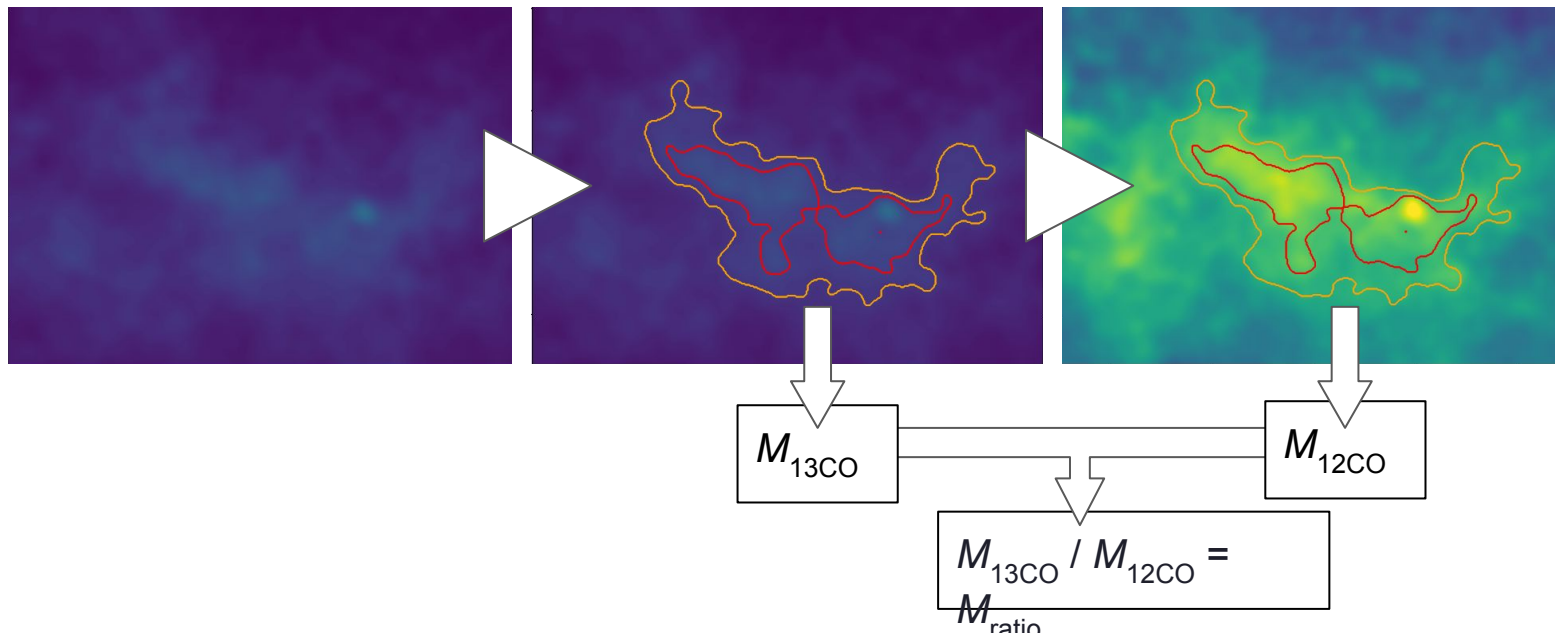
分解能: ~ 0.46 pc

2. 方法

M_{ratio}

$M_{\text{ratio}} = M_{13\text{CO}} / M_{12\text{CO}}$ を分子雲の進化段階とみなして物理量の推移を調べる

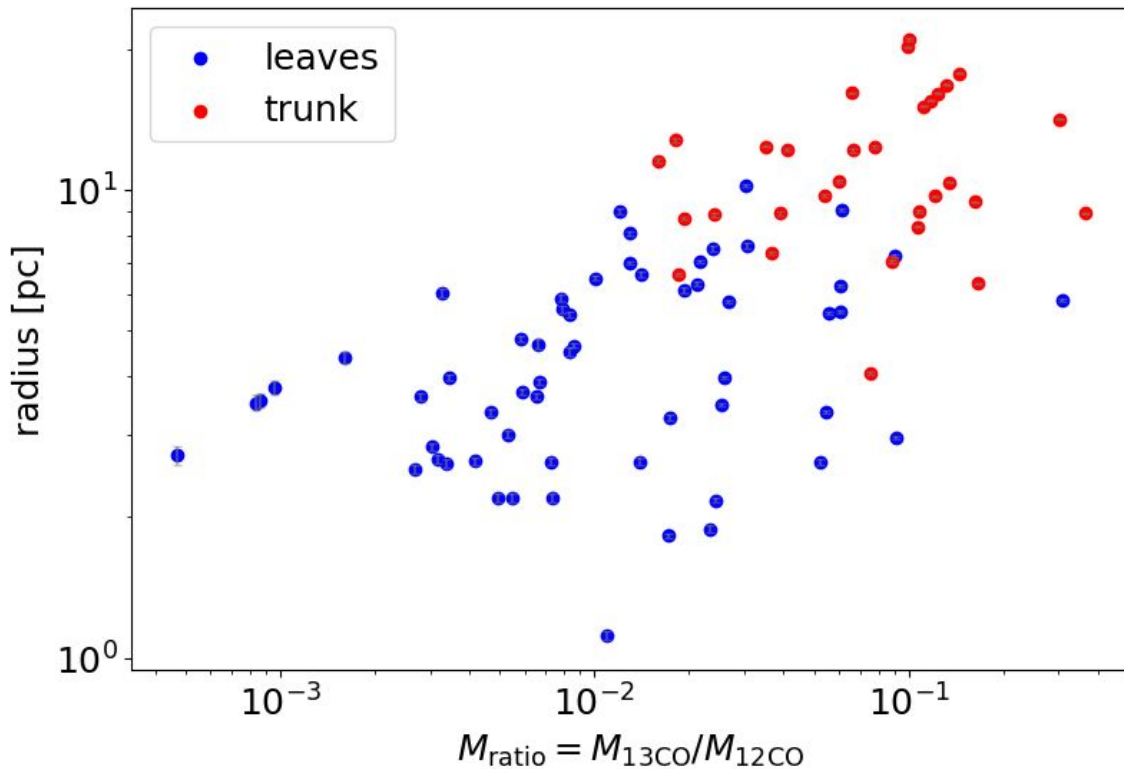
- ^{13}CO 輝線データのdendrogram構造から高密度ガス質量 $M_{13\text{CO}}$ を算出
- 同様の構造を ^{12}CO 輝線データにマスクして低密度ガス質量 $M_{12\text{CO}}$ を算出
- 高密度ガスの割合 $M_{13\text{CO}} / M_{12\text{CO}} = M_{\text{ratio}}$ を算出して定量的な分子雲の進化段階とする



3. 結果

サイズ変化

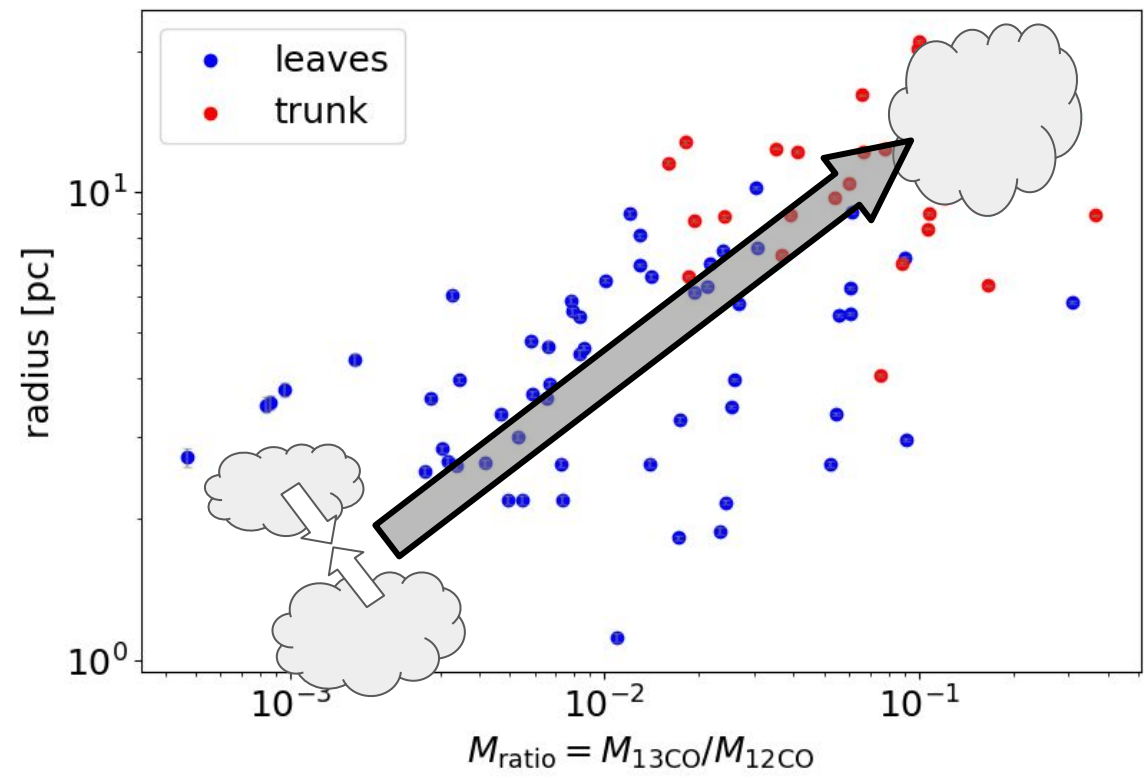
M_{ratio} が増加: サイズは増加
高密度ガスの割合が大きいほど巨大



3. 結果

サイズ変化

M_{ratio} が増加: サイズは増加
高密度ガスの割合が大きいほど巨大
→ 進化の進んだ分子雲ほど巨大・大質量
分子雲同士の合体を表している?



3. 結果

サイズ変化

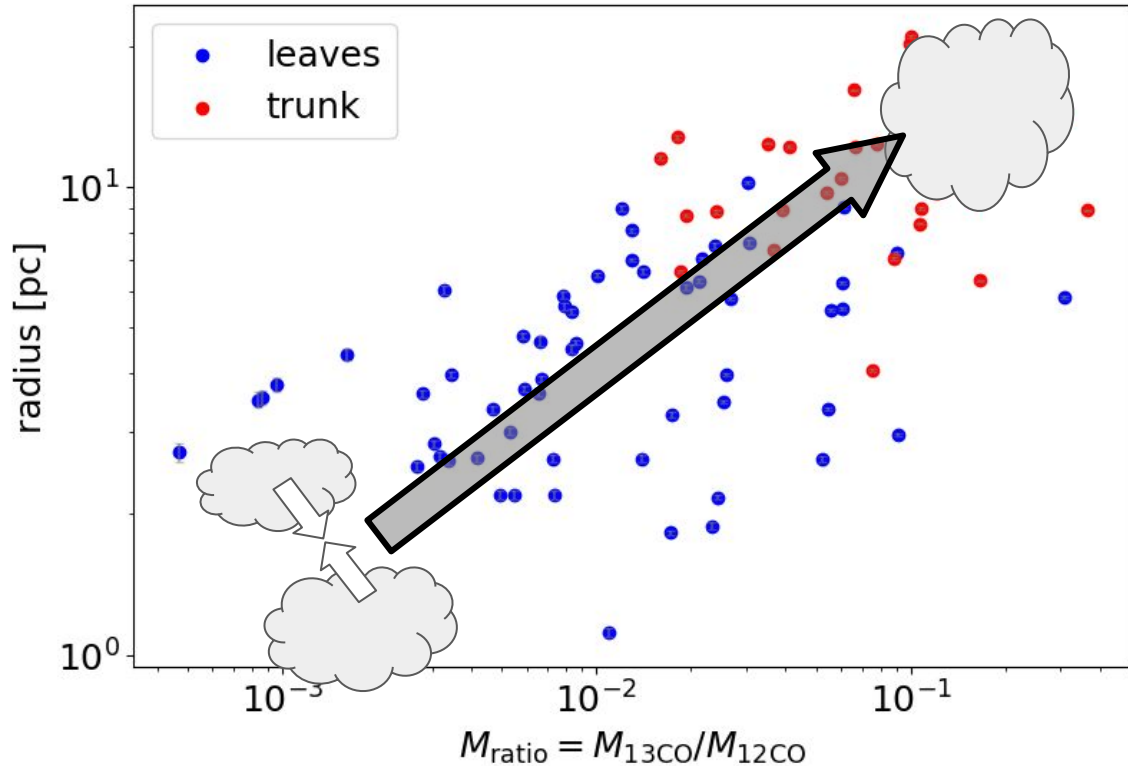
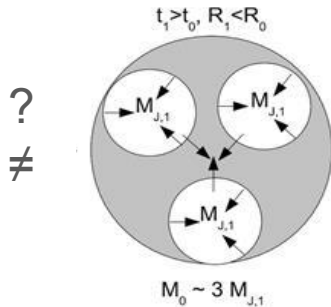
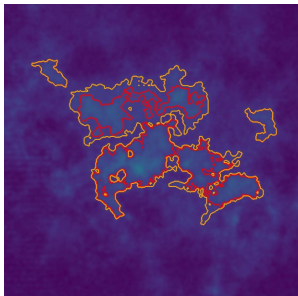
M_{ratio} が増加: サイズは増加

高密度ガスの割合が大きいほど巨大

→ 進化の進んだ分子雲ほど巨大・大質量
分子雲同士の合体を表している?

リーフとトランクは同様の傾向を示している

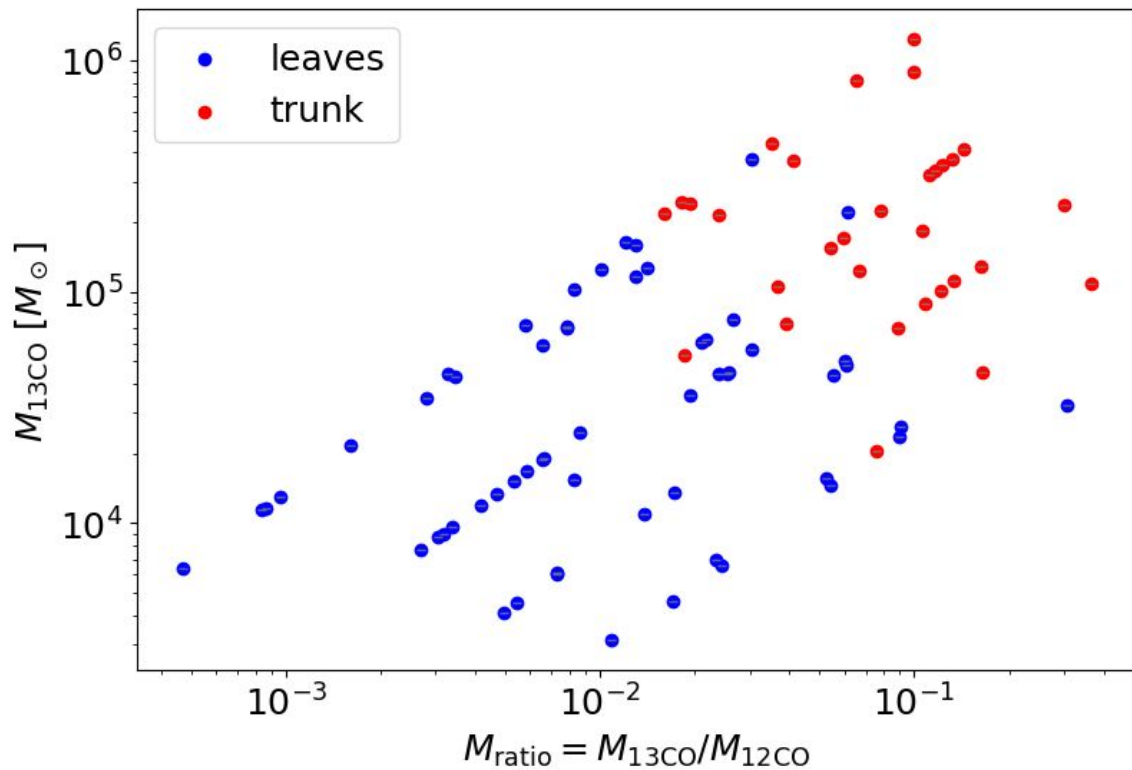
→ トランクは最外部の構造を捉えているわけではない?



3. 結果

質量変化

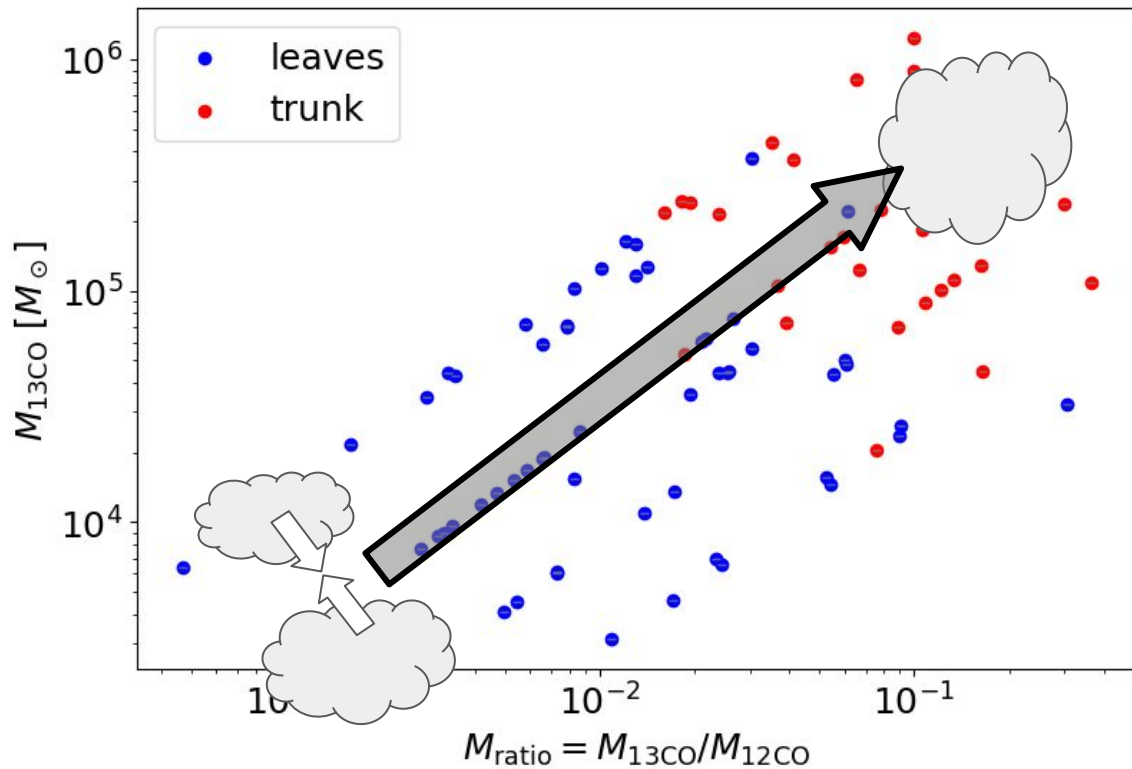
M_{ratio} が増加: 質量は増加
高密度ガスの割合が大きいほど大質量



3. 結果

質量変化

M_{ratio} が増加: 質量は増加
高密度ガスの割合が大きいほど大質量
→ 進化の進んだ分子雲ほど大質量
分子雲同士の合体を表している?

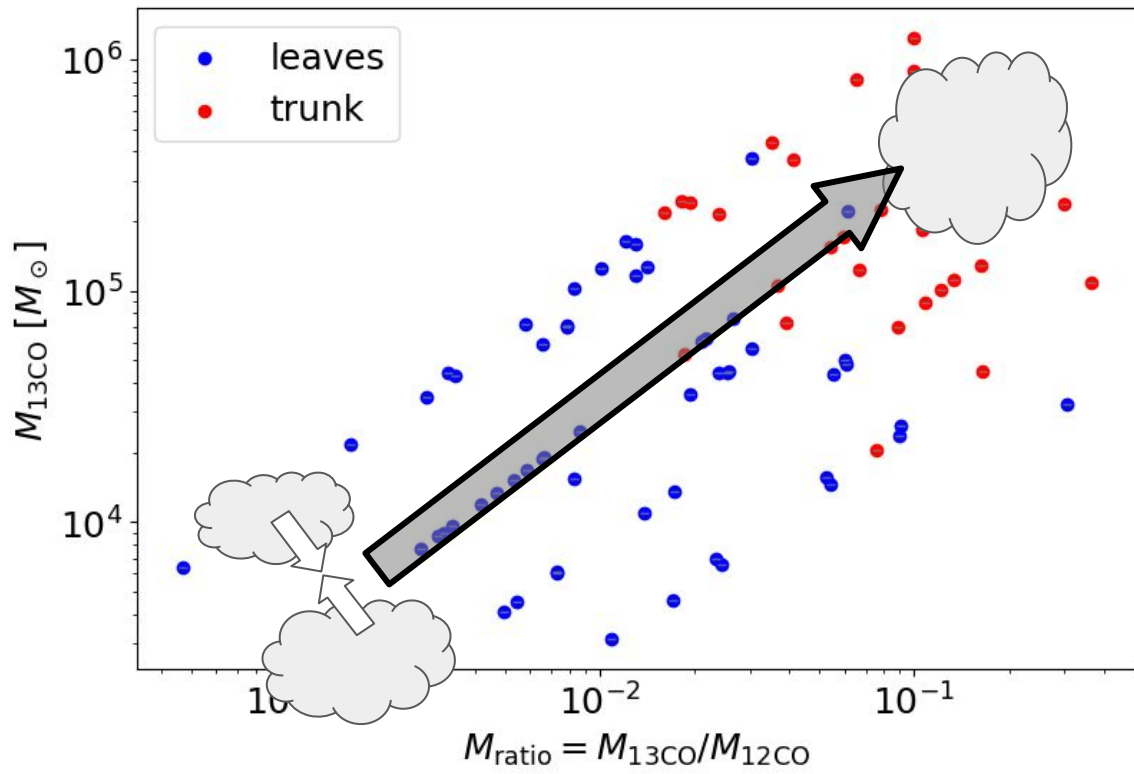
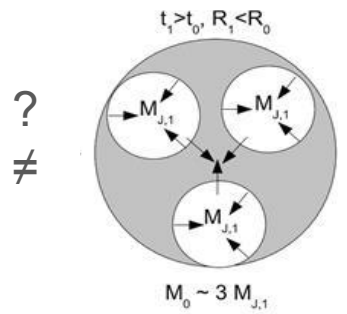
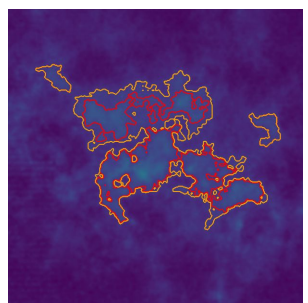


3. 結果

質量変化

M_{ratio} が増加: 質量は増加
高密度ガスの割合が大きいほど大質量
→ 進化の進んだ分子雲ほど大質量
分子雲同士の合体を表している?

リーフとトランクは同様の傾向を示している
→ トランクは最外部の構造を捉えているわけではない?



3. 結果

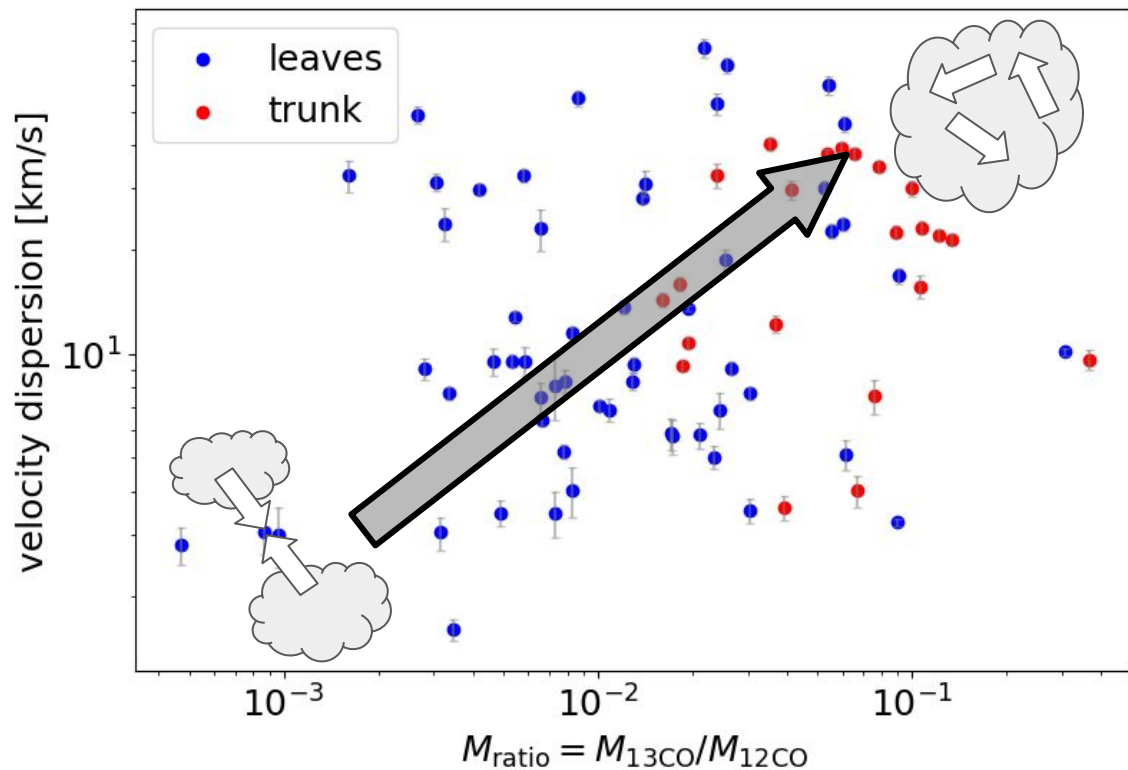
速度分散変化

M_{ratio} が増加: 速度分散は増加

高密度ガスの割合が大きいほど

乱流が強い

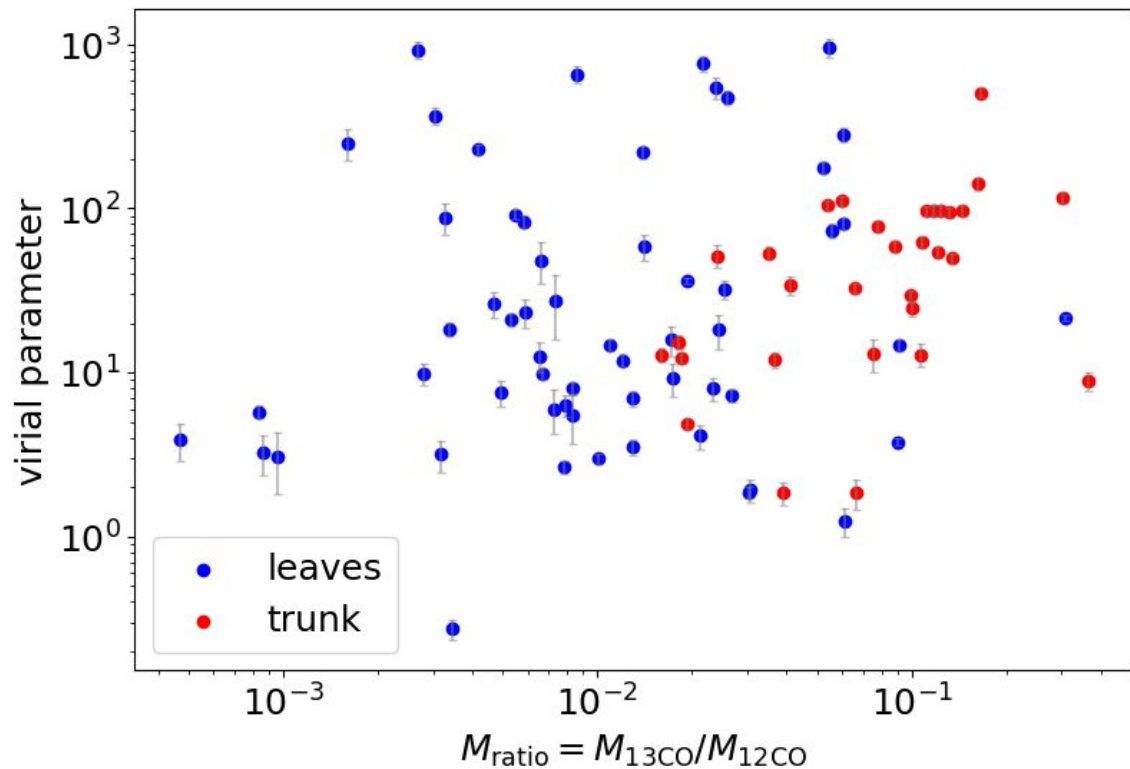
→ 合体した分子雲内部の速度のばらつき
を表している?



3. 結果

ビリアルパラメータ変化

M_{ratio} が増加:
ビリアルパラメータは横ばい?

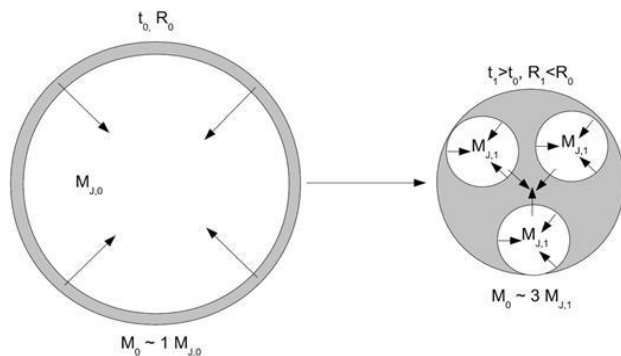


3. 結果

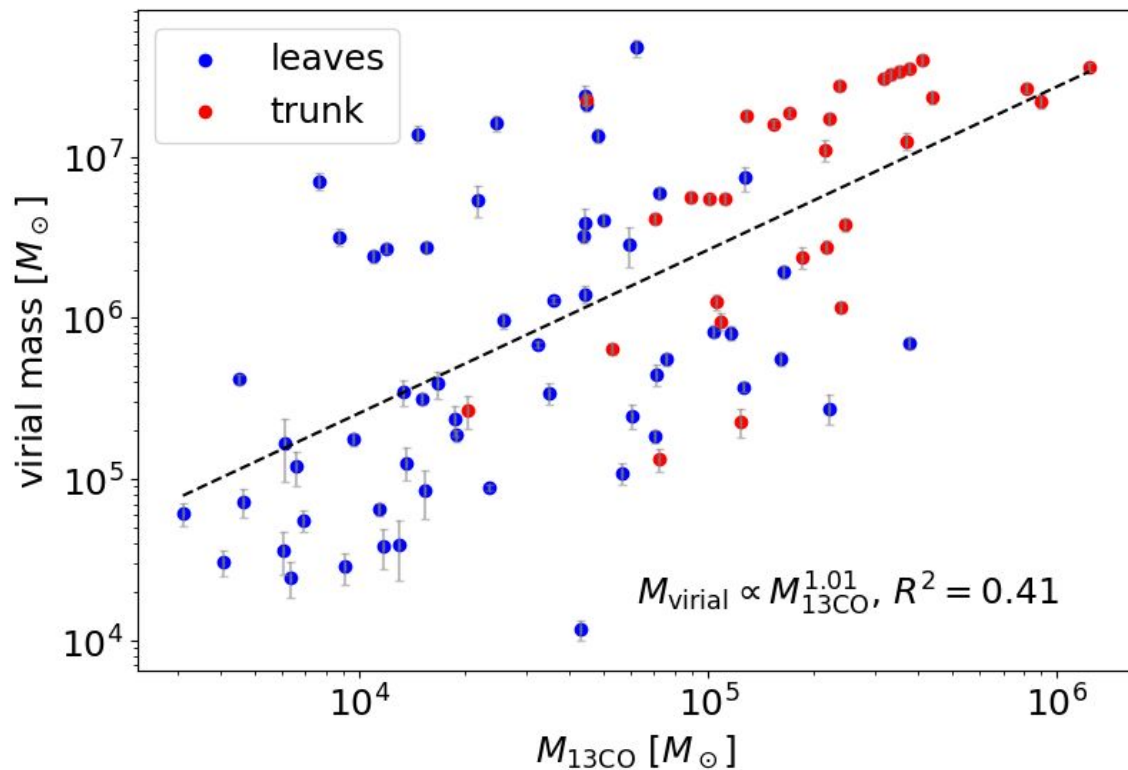
質量 vs ビリアル質量

質量とビリアル質量はほぼ比例
同定された分子雲は
ビリアル平衡下にある

分子雲合体によって乱流が増加しても、重力的束縛が壊れることはない？
さらに外縁にあるガスの全球的崩壊による抑え込み？



V'azquez-Semadeni+2019



4. 議論

より大きな規模での解析の必要性

本研究では巨大分子雲単体に注目して解析を行った ($< 100^2 \text{ pc}^2$)

→ 内部構造同士の相互作用は見られたものの、その外側の全球的収縮の傾向は見られなかった (トランクで捉えたかったができなかった)

全球的収縮はより大きなスケールで起こっている可能性がある

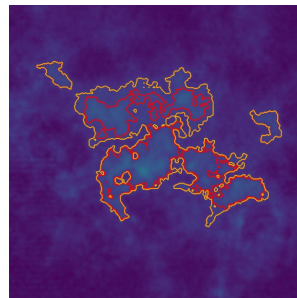
分子雲の全球的収縮を捉えるため、銀河スケールでの観測・解析が必要

例:

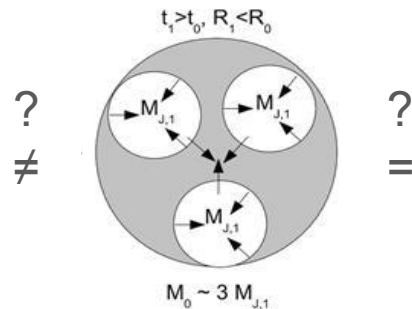
- ・FUGINのデータをつなげ、系内全体で同様の解析を実行
- ・M33のALMA観測をDendrogramで解析

銀河全体を一括して解析

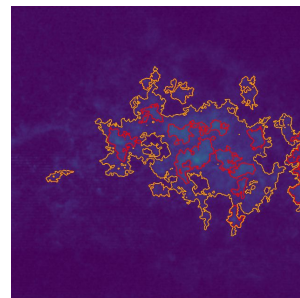
他の領域との比較から、巨大分子雲特有の階層的重力収縮の兆候を捉える



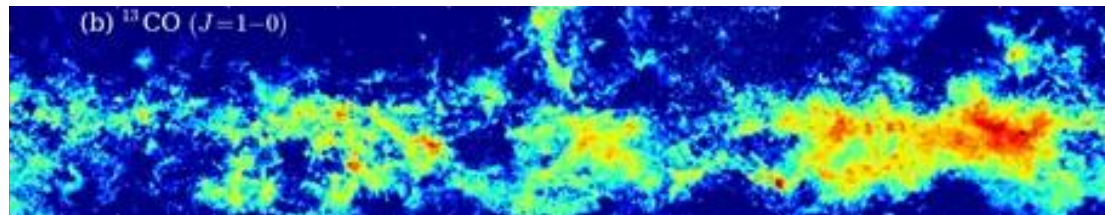
96 x 96 pc²



Vázquez-Semadeni+2019



192 x 192 pc²



Umemoto+2017

5. まとめ

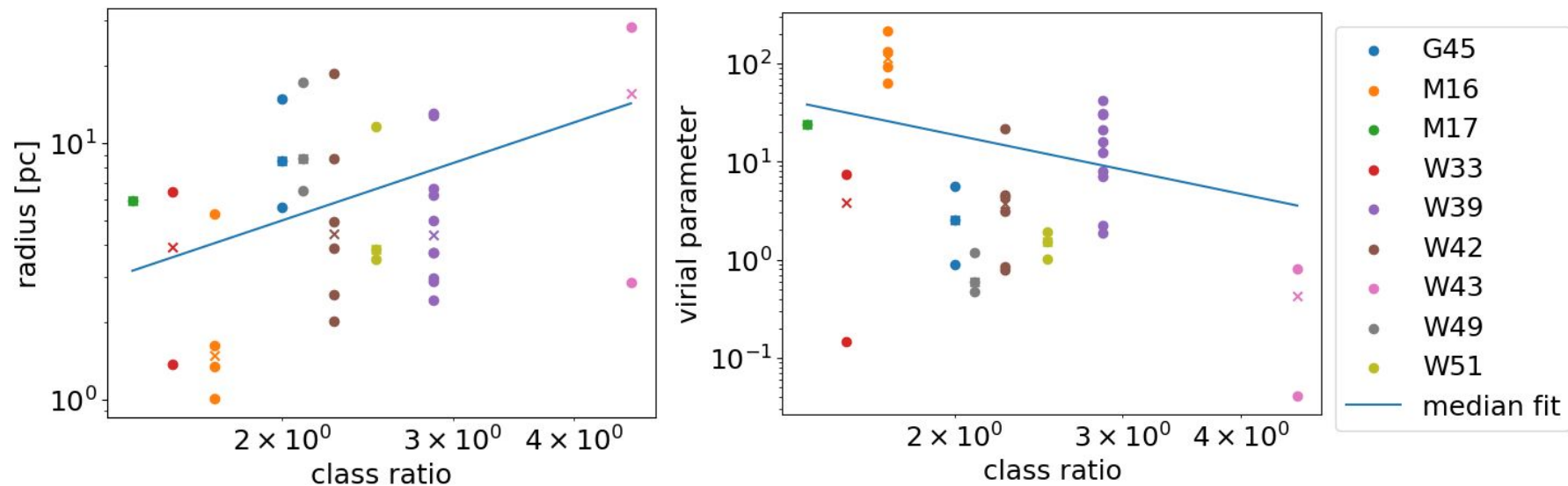
FUGINの分子基線データをDendrogramで解析し、分子雲の物理量推移を調べた

- ・高密度ガスの割合 $M_{\text{ratio}} = M_{13\text{CO}} / M_{12\text{CO}}$ を進化段階として使用
- ・ M_{ratio} に伴う物理量推移から、高密度ガスの割合が大きい分子雲ほど巨大・高質量であることがわかった
- ・分子雲はいずれもビリアル平衡下にあることがわかった
- ・物理量の推移は、階層的重力収縮における**分子雲同士の衝突・合体の兆候と解釈することができる**
- ・全球的な収縮を捉えるためには、**より大きな規模での観測・解析が必要**

今後:

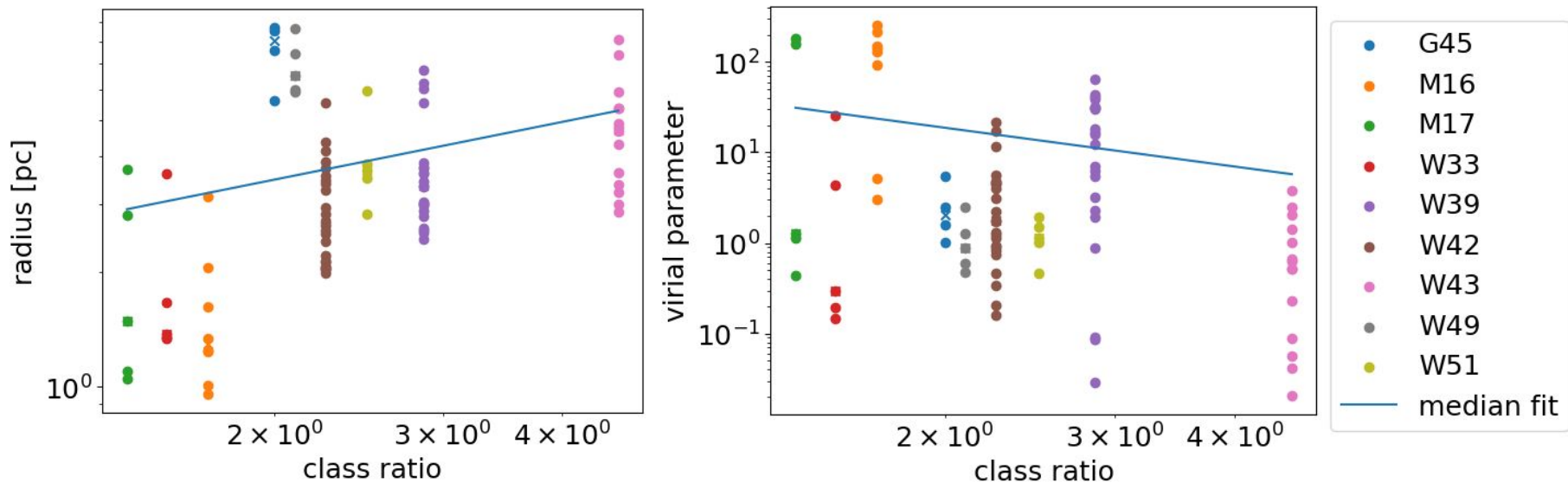
- ・観測データ解析の論文化
- ・FUGINを用いた大規模データ解析
- ・ALMAによる系内分子雲の高解像度観測
- ・ALMAによるM33の観測・解析
- ・GPUによる流体シミュレーション実行・解析
 - ・単一流体球
 - ・流体球衝突
 - ・銀河スケールでの計算

Appendix. クラス比に対するトランクの物理量変化



近傍星団のクラス比を分子雲年齢としたときの物理量推移
サイズ、質量、速度分散: 増加 (シミュレーションとは異なる)
ビリアルパラメータ: 減少

Appendix. クラス比に対する内部構造の物理量変化



近傍星団のクラス比を分子雲年齢としたときの物理量推移
サイズ、質量、速度分散: 増加 (シミュレーションとは異なる)
ビリアルパラメータ: 減少

Appendix. 全物理量プロット

