

銀河系内分子雲における 階層的進化モデルの観測的検証

佐々木 誇虎 (筑波大学)

久野成夫、福島肇、Zhou Yuqiu (筑波大学)、
藤田真司 (統計数理研究所)、野崎信吾 (九州大学)

1. 序論

大質量星形成と分子雲衝突

大質量星 ($> 8 M_{\odot}$)

紫外線放射・フィードバック → 銀河進化の鍵

具体的な形成過程は未解明

分子雲衝突 (Cloud-Cloud Collision; CCC)

有力な大質量星形成シナリオ

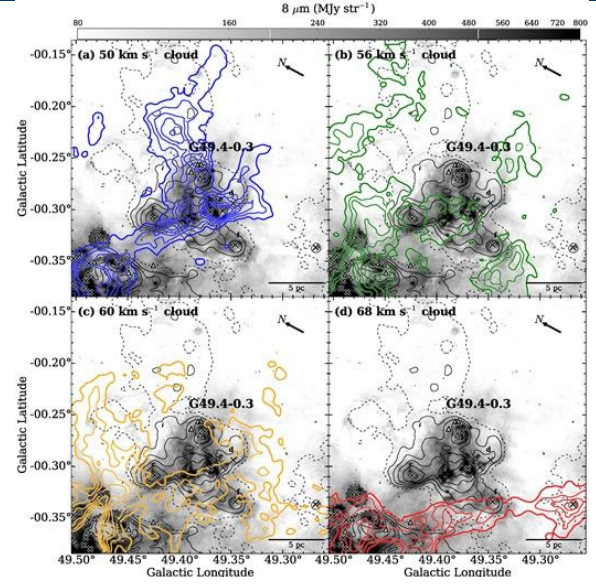
多数の観測で衝突を示唆 (e.g., Fujita et al. 2021)

衝突頻度の矛盾

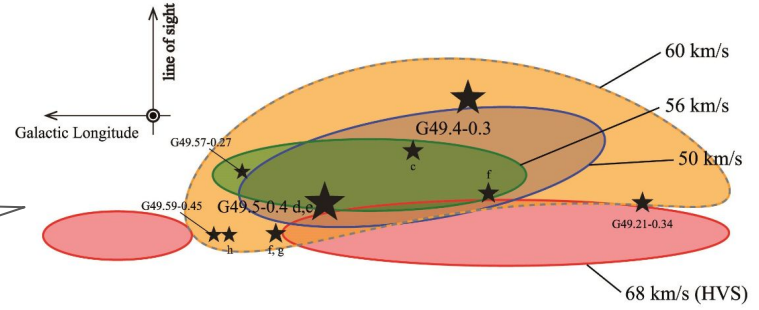
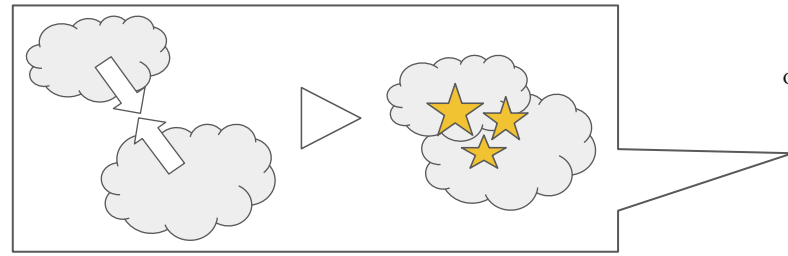
タイムスケールの運動学的見積もり (Sun et al. 2022)

- ・衝突タイムスケール: ~ 100 Myr
- ・分子雲の自由落下時間: 5 - 20 Myr
- 単純な偶然の衝突は稀な現象?

高頻度なCCC発生メカニズムの解明が, 大質量星形成過程の理解に不可欠



Fujita et al. 2021



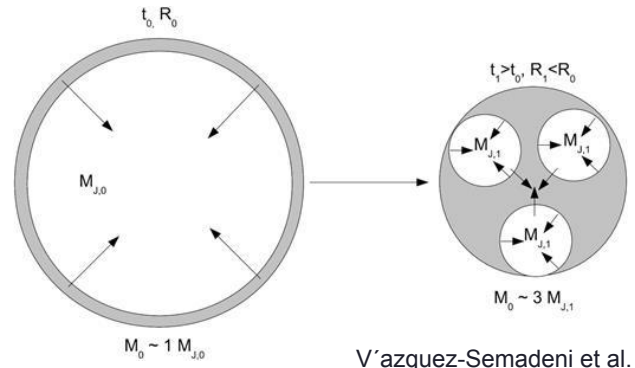
1. 序論

階層的進化

階層的進化モデル

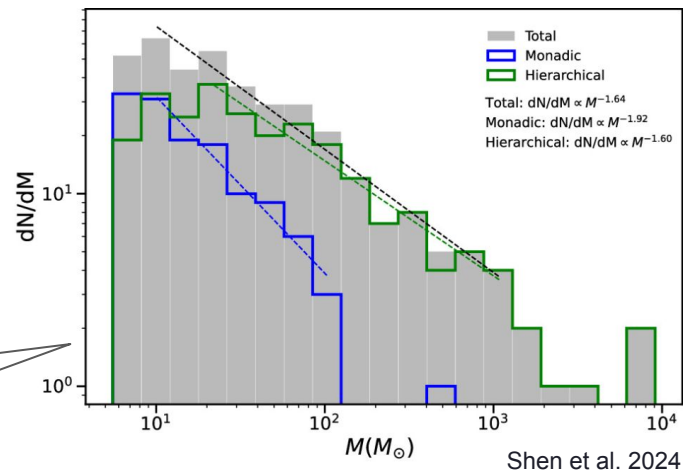
(Global Hierarchical Collapse; GHC,
e.g., Vázquez-Semadeni et al. 2019)

巨大分子雲が全球的に収縮 → 高密度構造が内部に階層的に生成
高密度構造の衝突・相互作用により, 大質量星形成を効率的に誘発



- Maddalena GMC: 階層構造と単一の構造で物理量を比較 (Shen et al. 2024)
- Rosette molecular cloud: 全体としてGHCモデルを支持 (He et al. 2026)

これらの先行研究は単一のケーススタディにとどまる
銀河系内の多数の分子雲に対して, GHCは普遍的か?



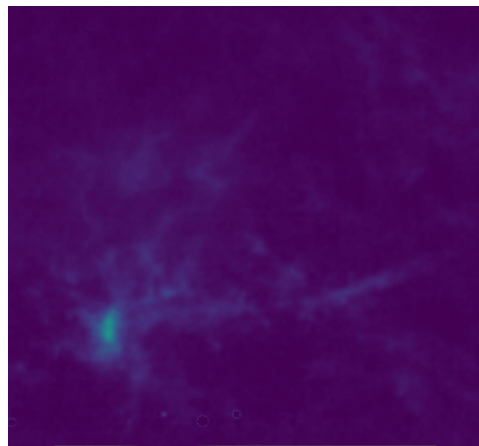
Maddalena GMCにおいて,
階層構造(緑)と単一構造(青)で
質量分布に差

1. 序論

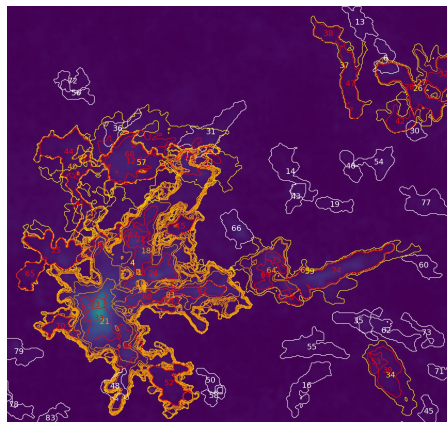
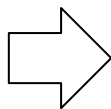
目的

銀河系内に存在する複数の分子雲を対象に，階層的構造と星形成活動の関連性を体系的に評価する

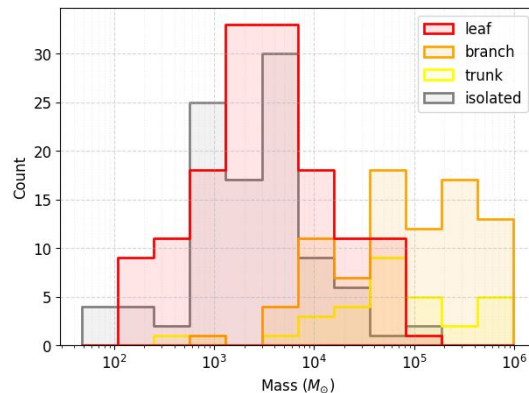
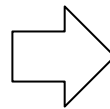
- ・野辺山45m電波望遠鏡で取得されたFUGINプロジェクト(Umemoto et al. 2017)のデータを対象とする
- ・階層構造分類アルゴリズムのDendrogram(Rosolowsky et al. 2008)を適用して分子雲の階層構造を抽出
- ・得られた階層構造の物理量を基に，分子雲階層構造の形成・進化過程を具体的に議論



FUGINデータ



Dendrogramを用い
階層構造を抽出



物理量を算出し比較・議論

2. 観測データ

FUGIN

FUGIN

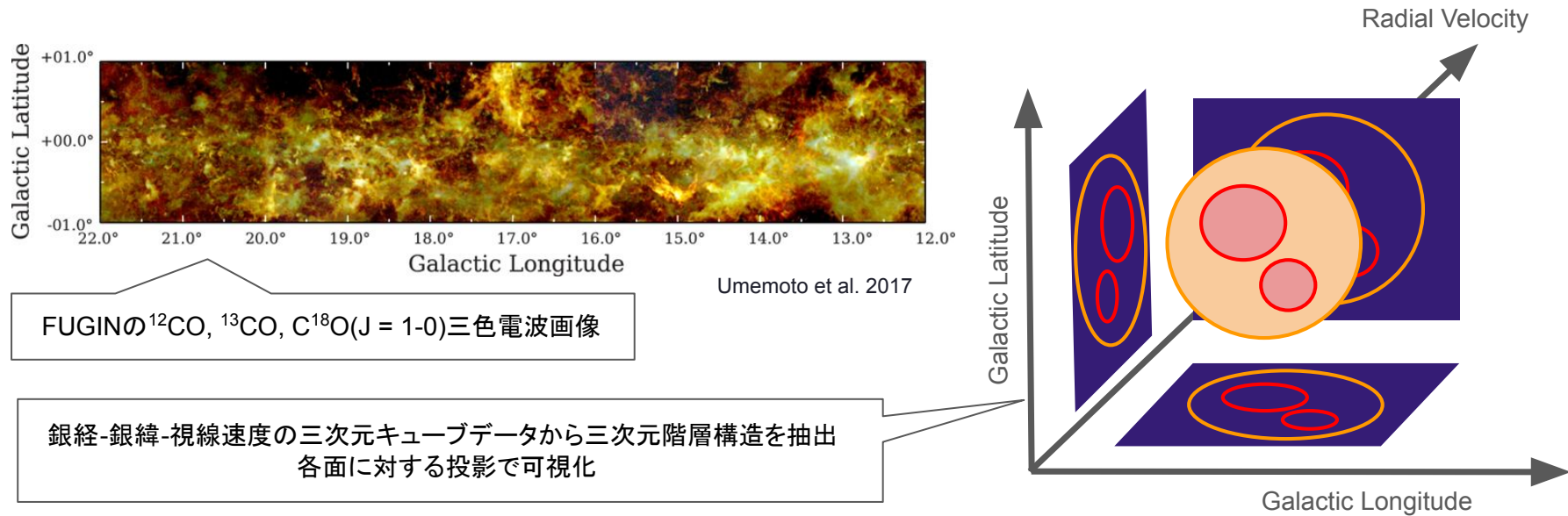
(FOREST Unbiased Galactic plane Imaging survey with the Nobeyama 45m telescope, Umemoto et al. 2017)

天の川銀河のCO多輝線同時サーベイ観測、銀河面の大規模サーベイと高分解能を両立

角度分解能: $\sim 20''$, 速度分解能: 1.3 km s^{-1}

使用輝線: $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ (光学的に薄く、分子雲の内部構造をよく捉えることが可能)

CCC / GHCの候補領域12領域を選定し解析を実施



2. 観測データ

Spitzer-GLIMPSE, Spitzer-MIPSGAL, WISE

位置-位置平面へ投影された構造内部の赤外線強度やHII領域の個数から、階層構造と実際の星形成との関連を検討

Spitzer 8 μm (Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire; GLIMPSE, Benjamin et al. 2003)

PAH(多環芳香族炭化水素)の輝線 = 若い星からの紫外線による励起

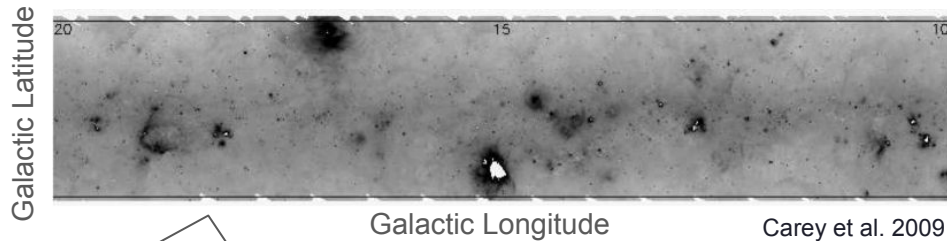
Spitzer 24 μm (MIPS Galactic Plane Survey; MIPSGAL, Carey et al. 2009)

温かいダスト(Warm Dust)からの熱放射 = ダスト内部に埋もれた活動的な星形成/ 原始星

WISE HII領域カタログ (Anderson et al. 2014)

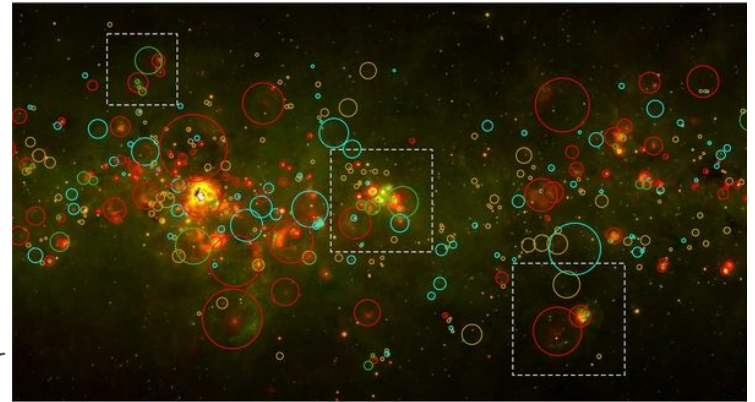
全点サーベイ衛星WISEの赤外線データに基づく、銀河系内HII領域のカタログ

HII領域(電離ガス): 大質量星からの紫外線で形成 = 大質量星形成の証拠



MIPSGALによる24 μm イメージ

WISE 赤外線データから同定された HII領域



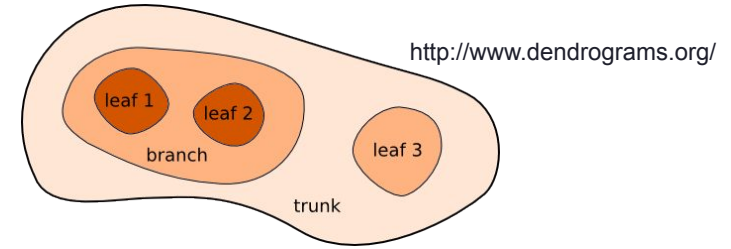
Anderson et al. 2014

3. 解析ツール

Dendrogram

Dendrogramアルゴリズム (Rosolowsky et al. 2008)
 三次元キューブデータに対し、輝線強度に基づく階層構造を同定

- leaf: 内部構造を持たない最小単位
- branch: 内部に部分構造を持つ構造
- trunk: 最も上位の構造
- isolated: 親も子も持たない単一構造, 階層構造との比較対象として抽出



各構造に対し、以下の物理量を導出

• 有効半径 : 位置-位置平面への投影面積 から $R = \sqrt{S/\pi}$

• 質量 M : M FEを仮定し導出した H_2 柱密度 から $M = \mu m_H A_{\text{pix}} \sum N_{H_2}$

• 体積密度 : 体積 $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ から $\rho = \frac{M}{V}$

• ビリアルパラメータ : 構造全体のスペクトルを足し合わせて導出した速度分散 から, σ_v $\alpha_{\text{vir}} = \frac{5\sigma_v^2 R}{GM}$

$\mu = 2$: 平均分子量,
 m_H : 水素原子質量,
 A_{pix} : ピクセルの物理断面積

G : 万有引力定数

乱流圧力に対する重力の強さを評価する量, つり合っている(ビリアル平衡)時, α_{vir} (Bertoldi & McKee 1992)

4. 結果

全構造の物理量ヒストグラム

階層内部構造 (leaf) と
単一構造 (isolated) の比較

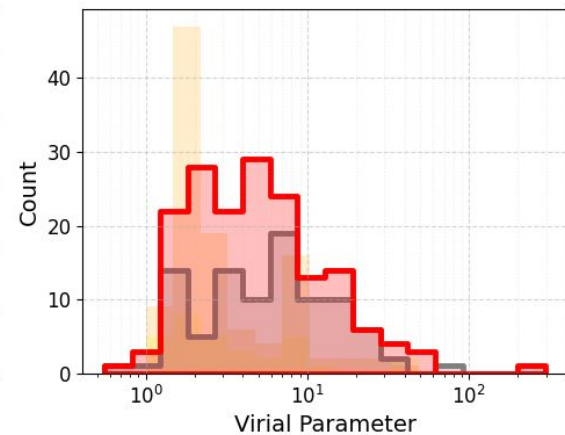
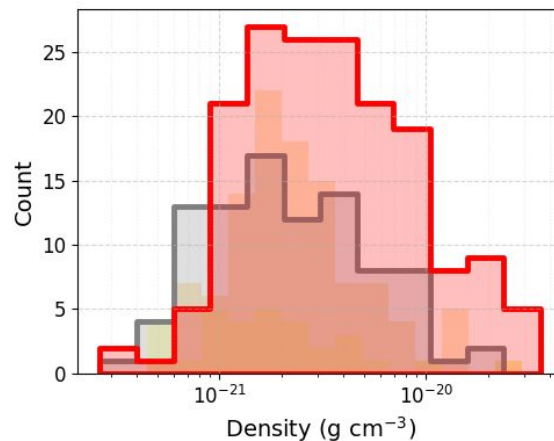
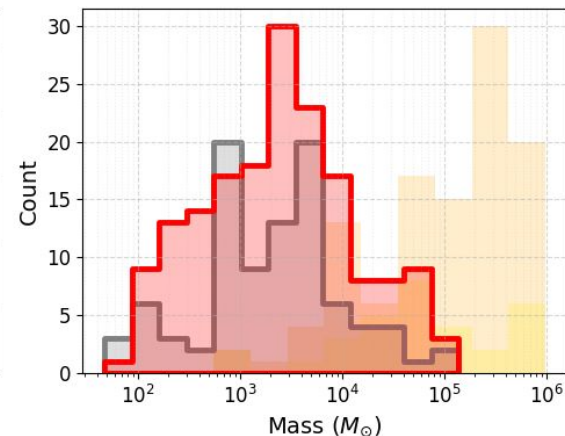
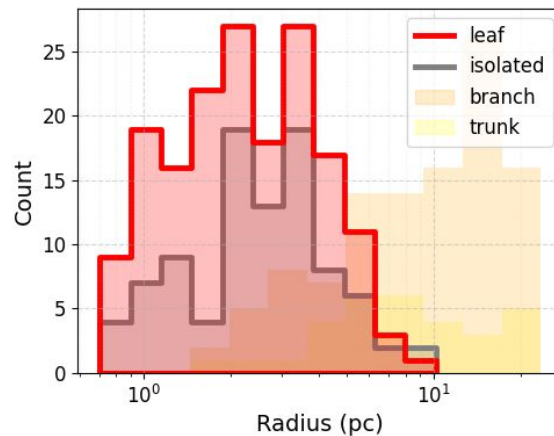
有効半径: 有意差なし

質量, 体積密度: leaf > isolated

ビリアルパラメータ: leaf < isolated

→ 内部構造の方が単一構造と比べ、
より星形成に適した環境

物理量	p値
有効半径	0.52
質量	2.1×10^{-6}
体積密度	2.6×10^{-9}
ビリアルパラメータ	4.1×10^{-4}



4. 結果

W51A解析結果

W51Aにおいて,

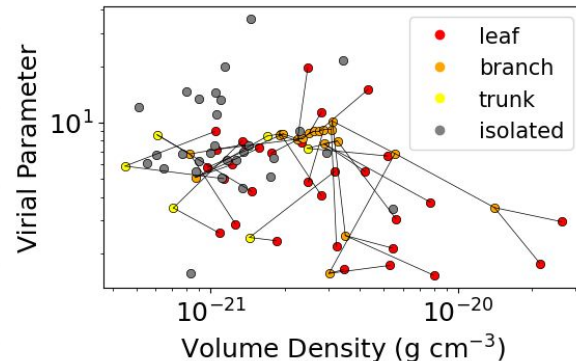
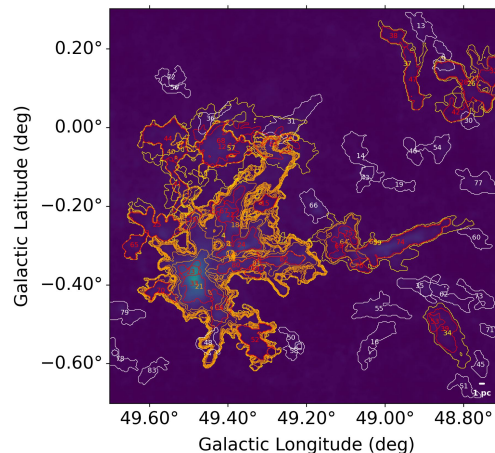
- ・階層構造は単一構造に比べてより高密度
- ・階層構造は単一構造に比べ
ビリアルパラメータが有意に小さい
(leaf < isolated, $p = 0.012$)

→ 個々の領域でも、階層構造はより星形成に適した環境

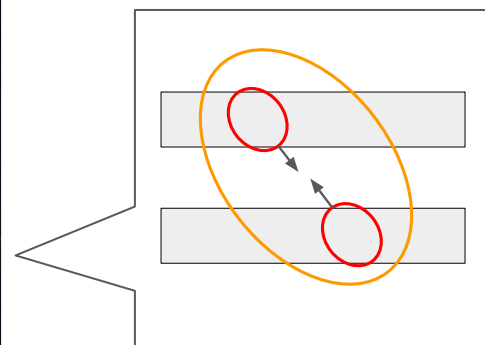
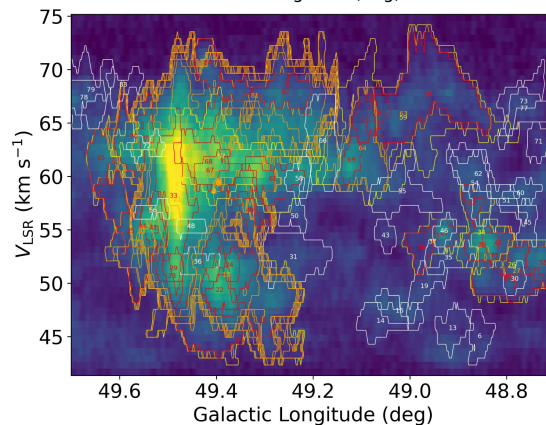
・銀経-視線速度図から、複数の速度成分上にleafが点在

・階層の全体構造 (branch, trunk) は複数の速度成分にまたがって存在

→ **高密度構造の衝突(CCC)を誘発するような、階層的な閉じ込め構造の存在**



速



5. 議論

8 μm / 24 μm との比較

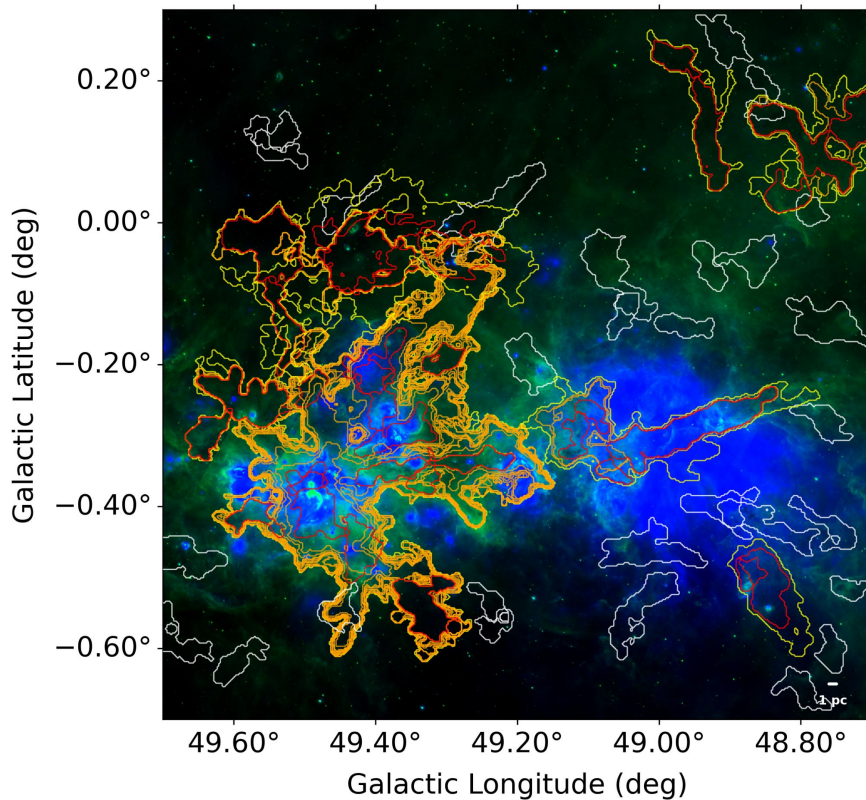
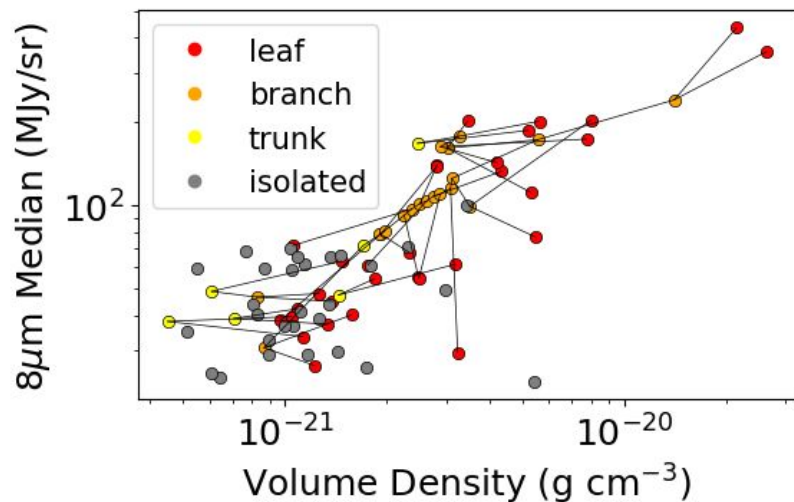
階層コントラストと8 μm / 24 μm プロット

→ 階層構造は活発な星形成現場と空間的に一致

構造密度と8 μm / 24 μm の比較

密度 \propto 赤外線強度, 階層構造 \geq 単一構造

→ 高密度な階層構造内部で星形成が進行



5. 議論

HII領域数の比較

HII領域の内包数

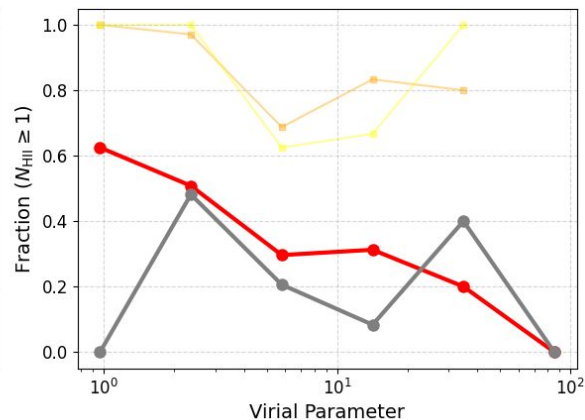
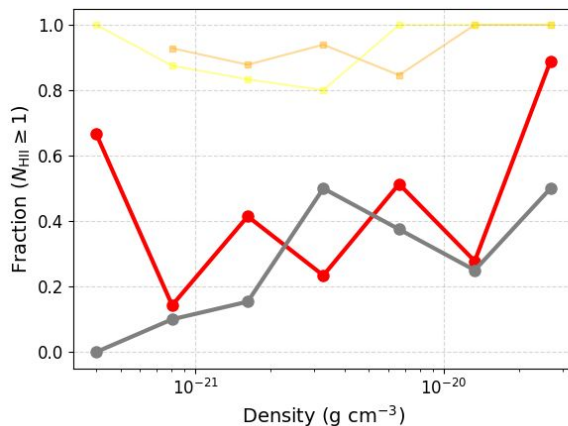
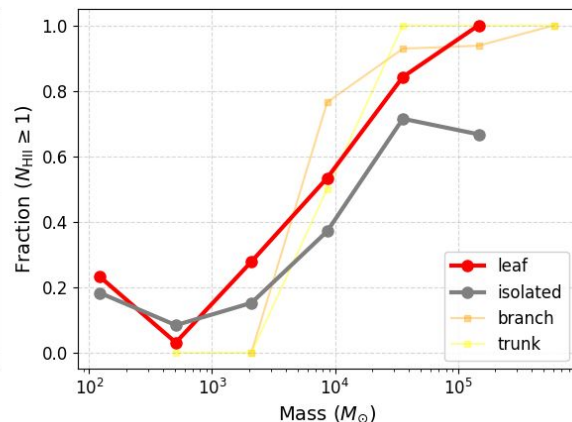
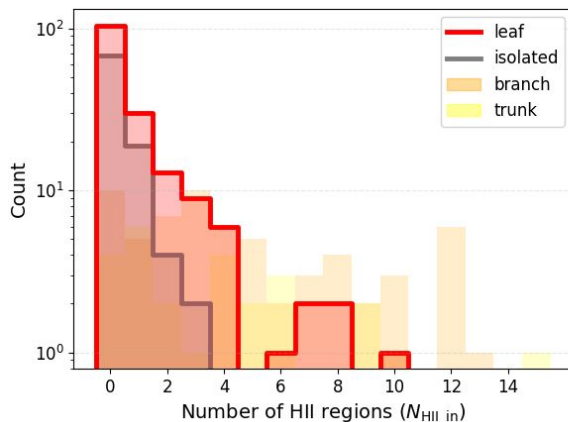
isolated: 最大3個, leaf: 最大10個

HII領域の内包率

物理量に寄らず差なし

→ 大質量星形成の物理条件は同じだが、
個数が異なる

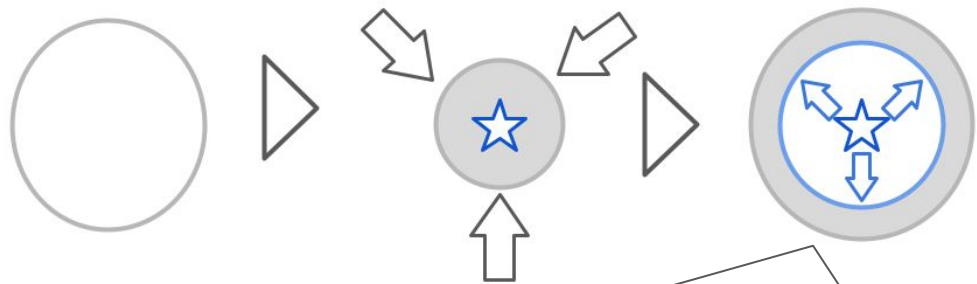
- ・単一構造(高ビリアルパラメータ)
自己重力がフィードバックに耐えきれず、
ガス散逸 → **星形成停止**
- ・階層構造(低ビリアルパラメータ)
外部構造の自己重力による閉じ込めで、
ガス保持 → **星形成を維持**



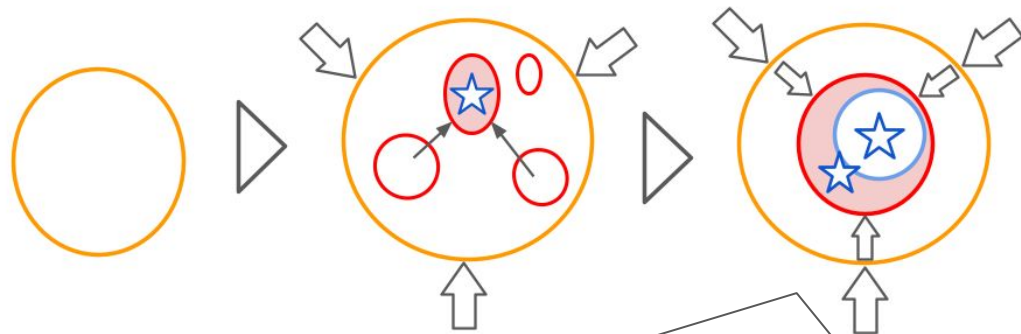
5. 議論

階層的進化モデル

1. **分子雲全体 (trunk) の収縮**
trunkの収縮, 内部に多様な速度成分
2. **内部構造 (leaf) の階層的形成**
全体収縮に伴い, 固有の速度を持つleafが生成
3. **閉じ込めと相互作用による大質量星形成**
trunkによる閉じ込めで高密度を維持
leaf同士の相互作用(衝突)
→ 大質量星形成
4. **フィードバックへの耐性**
閉じ込め効果 → ガスの散逸を抑制
ガスの保持 → 集団的星形成を維持



単一構造: フィードバックによりガスが散逸し, 数個の星形成で停止



階層構造: 相互作用により高密度化し, 大質量星形成,
閉じ込めによりフィードバックに耐え, 集団的な星形成の維持

6. 結論, 今後の展望

実施内容

- ・銀河系内の主要な星形成領域を対象に, FUGINデータを解析
- ・Dendrogramを用いて階層構造と単一構造を分類・比較

結果

- ・階層構造は単一構造と比べ, 高密度かつ重力的に束縛 → **星形成により適した環境を実現している**
- ・全体構造は複数速度成分を持ち、内部構造を包含 → **重力的な閉じ込めにより、内部衝突 (CCC) を誘発**
- ・階層構造は単一構造と比べ, 赤外線 (8 μm , 24 μm) 強度が強い → **実際に活発な星形成現場と空間的に一致**
- ・階層構造と単一構造でHII領域の内包率は変わらないが, 内包する個数には差
 - ・単一構造: 少数で停止 → **フィードバックによるガス散逸**
 - ・階層構造: 多数を形成 → **より外部の構造によるガスの閉じ込めによって星形成を維持**

結論

**大規模構造による閉じ込めと内部構造の相互作用が, フィードバックに耐えうる集団的星形成を維持するメカニズム
GHCIによるCCC誘発シナリオを観測的に支持**

今後

近傍銀河M33の観測を通して, より正確・進んだ階層進化モデルの検討

GPUを用いた高解像な流体シミュレーションを, 同様の手法で解析し, 観測データと比較

Appendix

対象領域一覽

領域名	銀経 [degree]	銀緯 [degree]	視線速度 [km s ⁻¹]	距離 [kpc]
G18.15-0.30+51	17.8 - 18.8	-0.8 - 0.0	25 - 75	6.07
G45.3+0.1	45.0 - 45.6	-0.3 - 0.3	50 - 75	8.00
M16 (eagle nebula)	16.6 - 17.4	0.1 - 0.9	14 - 30	1.74
M17	14.8 - 15.5	-0.8 - -0.3	0 - 30	1.98
N4	11.8 - 12.0	0.7 - 1.0	20 - 30	2.80
N14	13.7 - 14.9	-0.6 - 0.1	30 - 50	3.10
N35	24.1 - 24.7	-0.1 - 0.5	100 - 130	8.80
W33	12.5 - 13.5	-0.5 - 0.5	15 - 60	2.40
W42	25.5 - 26.0	-0.5 - 0.0	85 - 125	3.80
W43	30.2 - 31.2	-0.5 - 0.5	70 - 120	5.49
W49N	42.8 - 43.4	-0.4 - 0.2	-5 - 20	11.11
W51A	48.7 - 49.7	-0.7 - 0.3	40 - 75	5.40

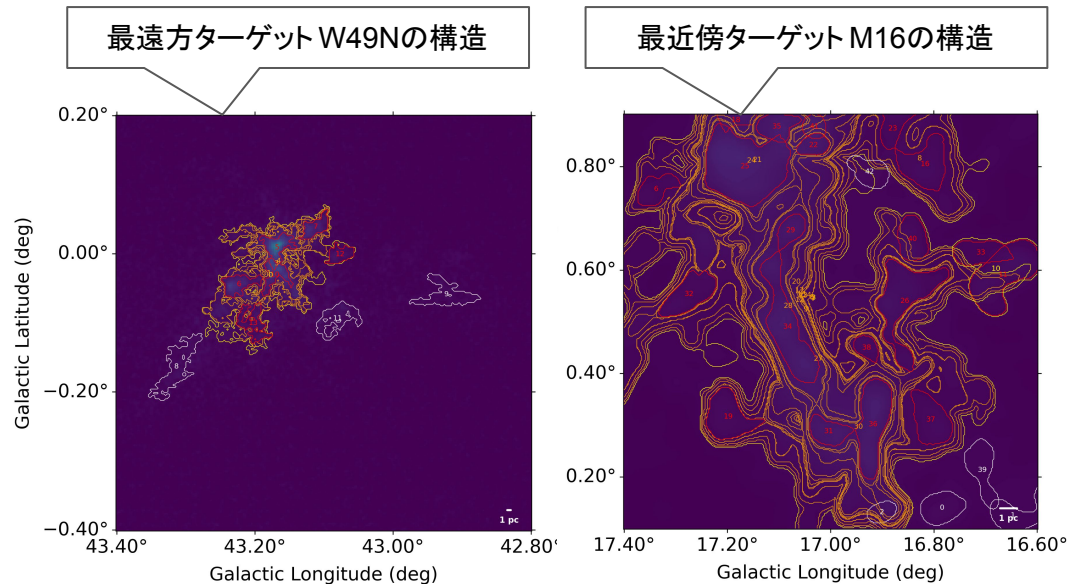
Appendix

分解能補正

領域名	距離 [kpc]	補正後分解能 [arcsec]
G18.15-0.30+51	6.07	37
G45.3+0.1	8.00	28
M16 (eagle nebula)	1.74	128
M17	1.98	112
N4	2.80	79
N14	3.10	72
N35	8.80	25
W33	2.40	93
W42	3.80	58
W43	5.49	40
W49N	11.11	20
W51A	5.40	41

CASAによるimsmoothを用いて、距離に応じて分解能を補正し、空間スケールを統一

最遠方のW49N(11.11 kpc)に合わせ、距離 kpc にあるターゲットの補正後の分解能は $20'' \times (11.11 / \text{距離})$ となる



Appendix

柱密度導出(励起温度)

$$\begin{aligned}\Delta I_{12} &= (1 - e^{-\tau_{12}})(B_\nu(T_{\text{ex}}) - B_\nu(T_{\text{bg}})) \\ &= (B_\nu(T_{\text{ex}}) - B_\nu(T_{\text{bg}})) \quad \because \tau_{12} \gg 1\end{aligned}$$

$$\Delta I_{12} = \frac{2k\nu_{12}^2}{c^2} T_{\text{peak}} \quad (\text{ } T_{\text{peak}}^{12}\text{CO}(J=1-0)\text{輝線のピーク輝度温度}), \quad B_\nu(T) = \frac{2h\nu_{12}^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu_{12}/kT} - 1}$$

$$\begin{aligned}\therefore T_{\text{peak}} &= \frac{h\nu_{12}}{k} \frac{1}{e^{h\nu_{12}/kT_{\text{ex}}} - 1} - \frac{h\nu_{12}}{k} \frac{1}{e^{h\nu_{12}/kT_{\text{bg}}} - 1} \\ &= \frac{5.53}{e^{5.53/T_{\text{ex}}} - 1} - 0.819\end{aligned}$$

$$\Rightarrow T_{\text{ex}} = \frac{5.53}{\ln\left(1 + \frac{5.53}{T_{\text{peak}} + 0.819}\right)}$$

柱密度導出(光学的厚み)

$$\Delta I_{13} = (1 - e^{-\tau_{13}})(B_\nu(T_{\text{ex}}) - B_\nu(T_{\text{bg}}))$$

$$\Rightarrow \tau_{13} = -\ln\left(1 - \frac{\Delta I_{13}}{B_\nu(T_{\text{ex}}) - B_\nu(T_{\text{bg}})}\right)$$

$$\Delta I_{13} = \frac{2k\nu_{13}}{c^2} T_{\text{b}} \quad (\text{ } T_{\text{b}}^{13}\text{CO}(J=1-0)\text{輝線の構造内ピクセル輝度温度})$$

$$\tau_{13} = -\ln\left(1 - \frac{T_{\text{b}}}{\frac{h\nu_{13}}{k} \frac{1}{e^{h\nu_{13}/kT_{\text{ex}}} - 1} - \frac{h\nu_{13}}{k} \frac{1}{e^{h\nu_{13}/kT_{\text{bg}}} - 1}}\right)$$

$$= -\ln\left(1 - \frac{T_{\text{b}}}{5.29(J - 0.164)}\right), \quad J = \frac{1}{e^{5.29/T_{\text{ex}}} - 1}$$

$$N_{13} = \frac{3k}{8\pi^3 \mu^2 B} \frac{T_{\text{ex}} + 0.88}{1 - e^{-h\nu_{13}/kT_{\text{ex}}}} \int \tau_{13} dv$$

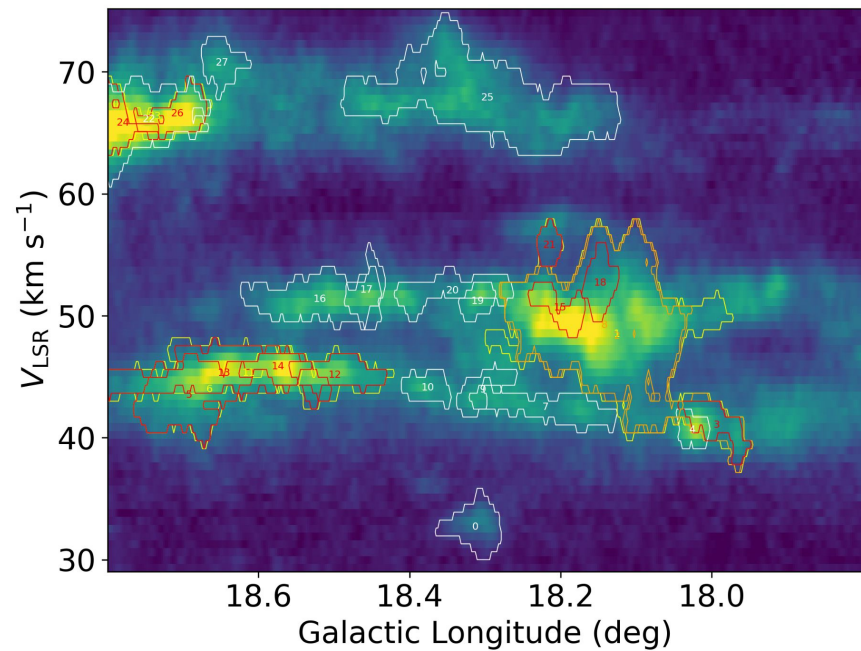
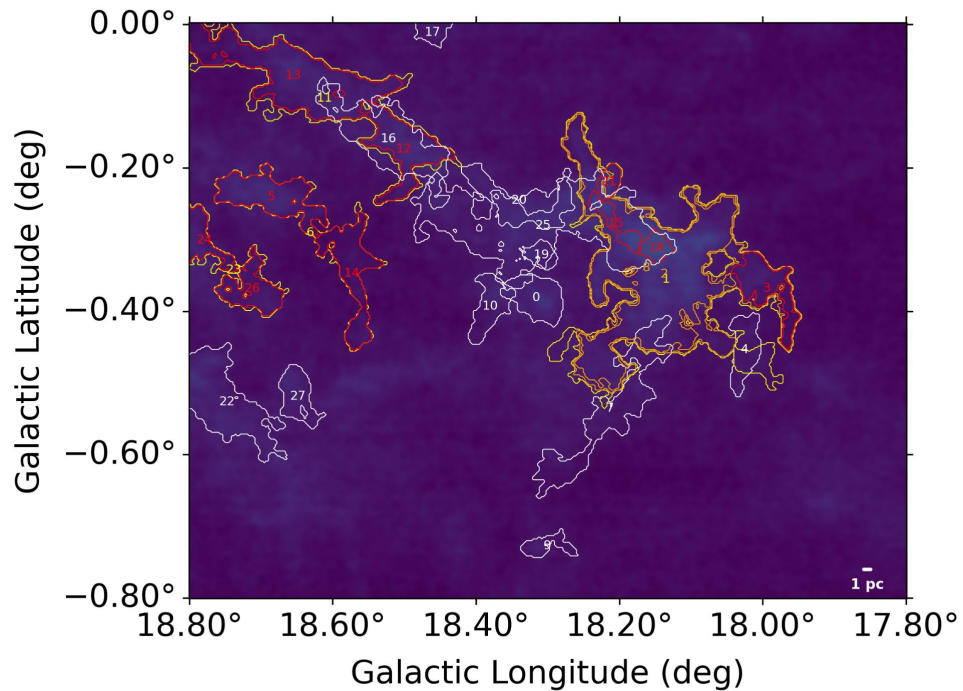
$$= 2.42 \times 10^{14} \frac{T_{\text{ex}} + 0.88}{1 - e^{-5.29/T_{\text{ex}}}} \int \tau_{13} dv$$

ただし分配関数 $Q = \sum_J (2J + 1) e^{-\frac{E_J}{kT_{\text{ex}}}} \sim \frac{kT_{\text{ex}}}{hB} + \frac{1}{3} \sim T_{\text{ex}} + 0.88$

$$N_{\text{H}_2} = 5.0 \times 10^5 N_{13} \quad (\text{Dickman 1978})$$

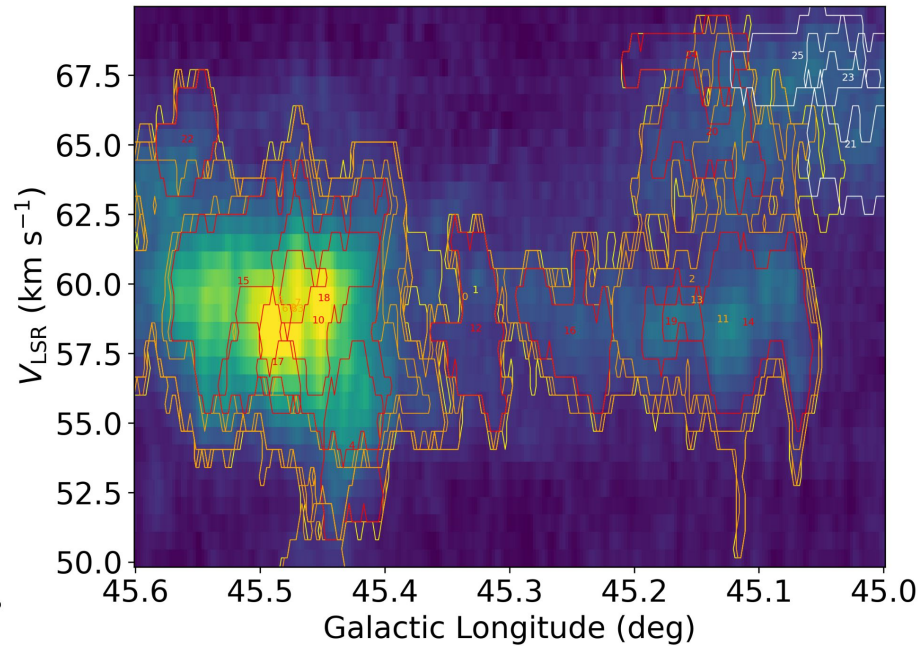
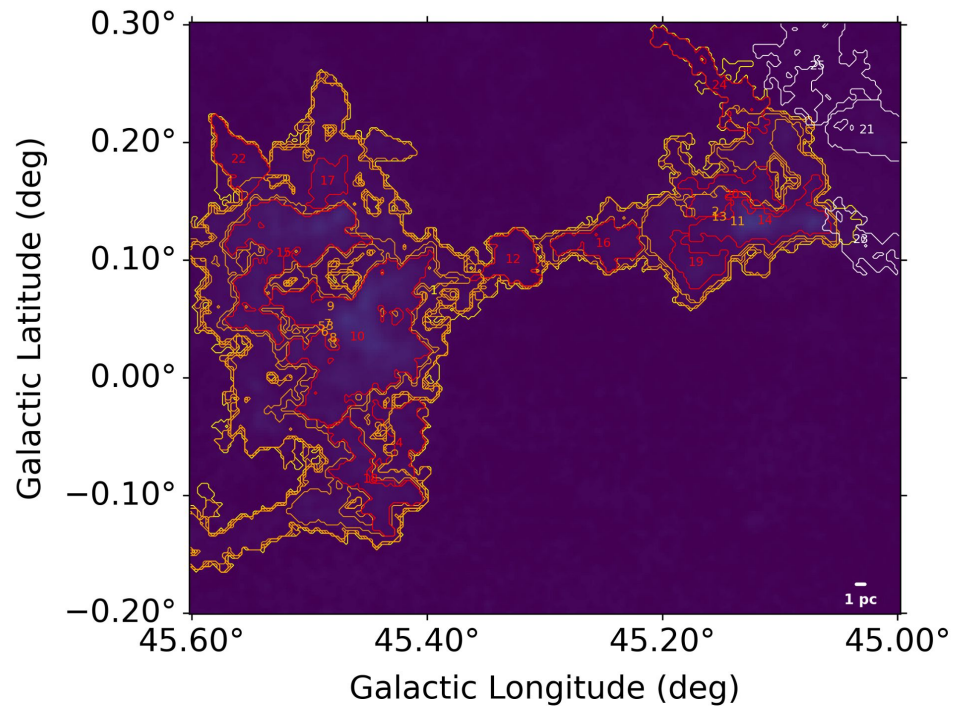
Appendix

G18.15-0.30+51 解析結果



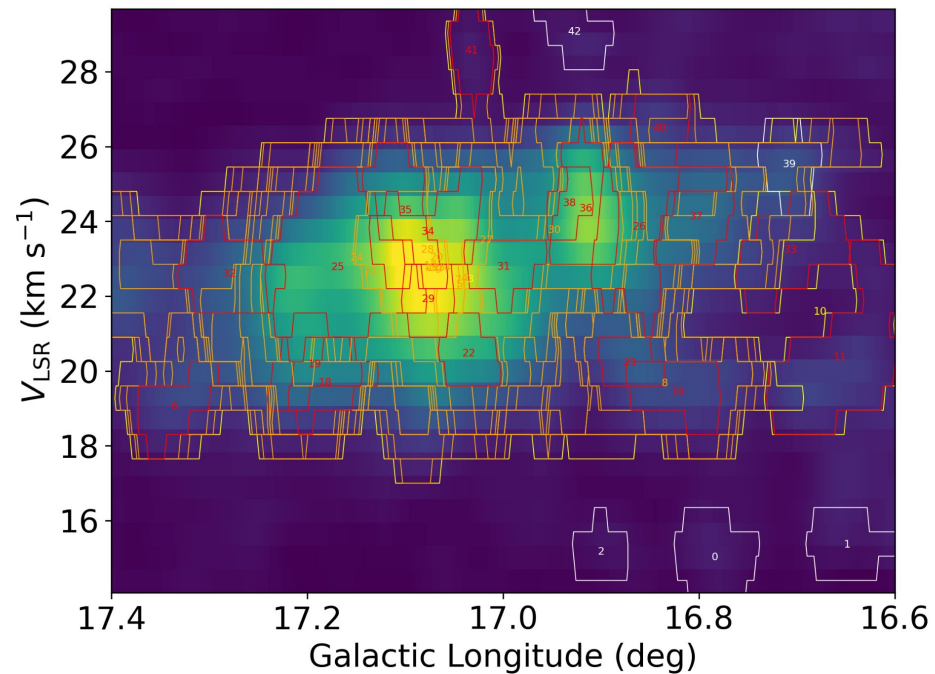
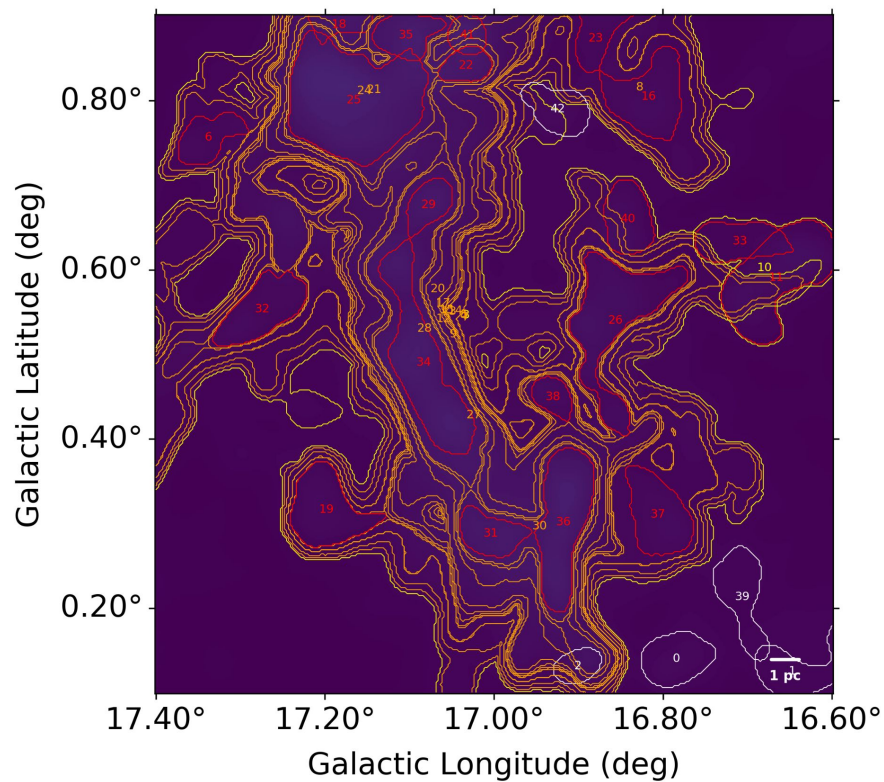
Appendix

G45.3+0.1 解析結果



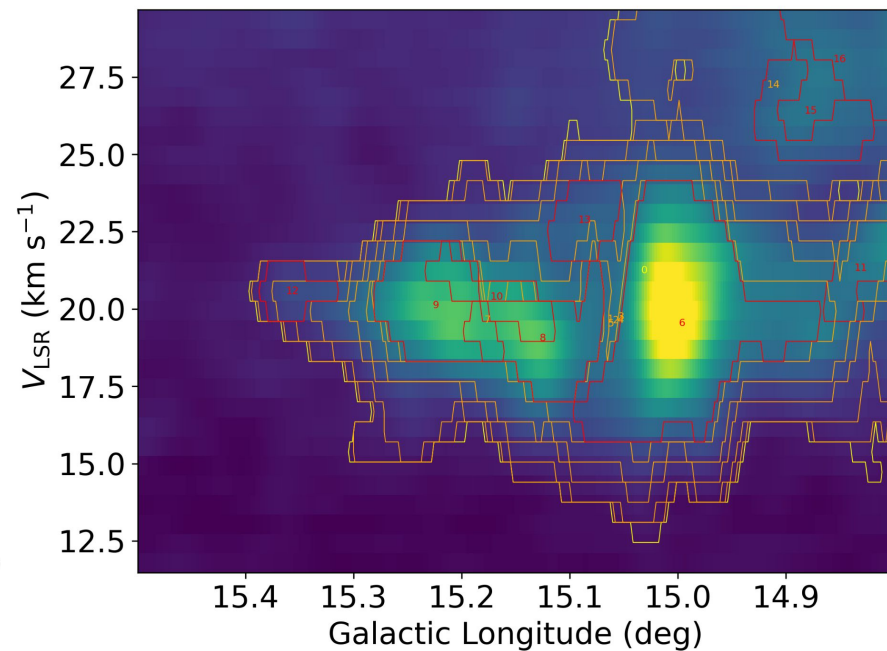
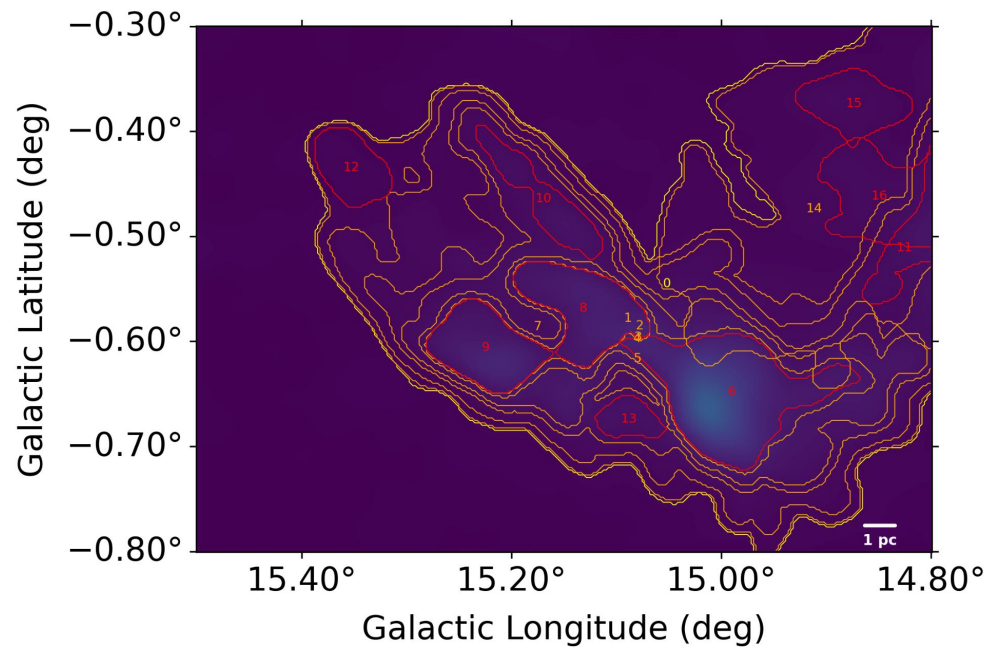
Appendix

M16解析結果



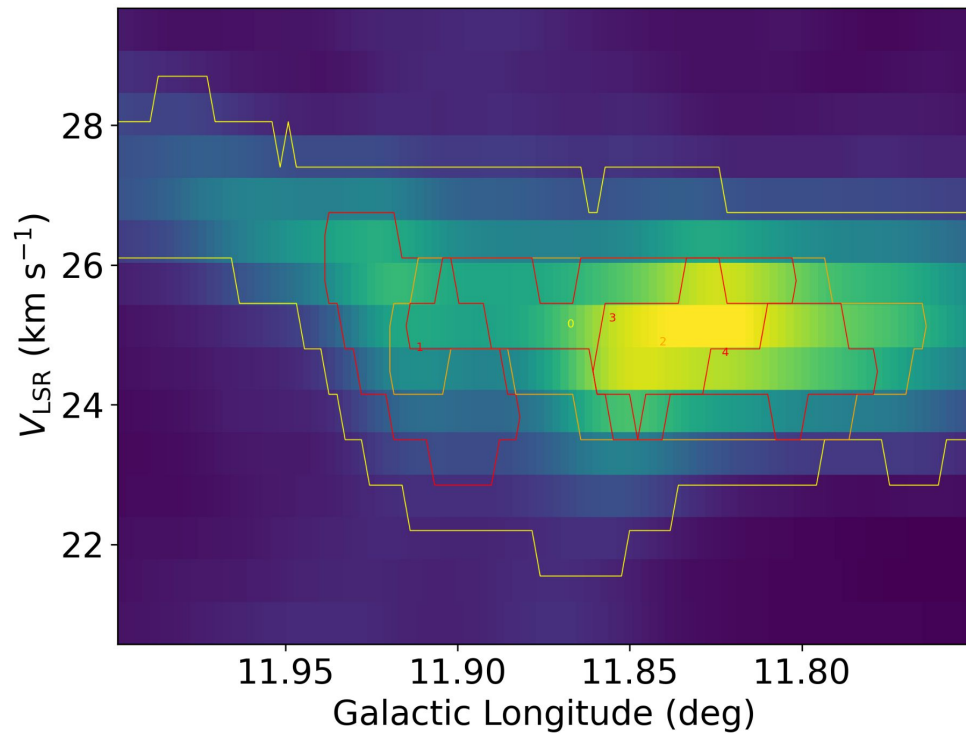
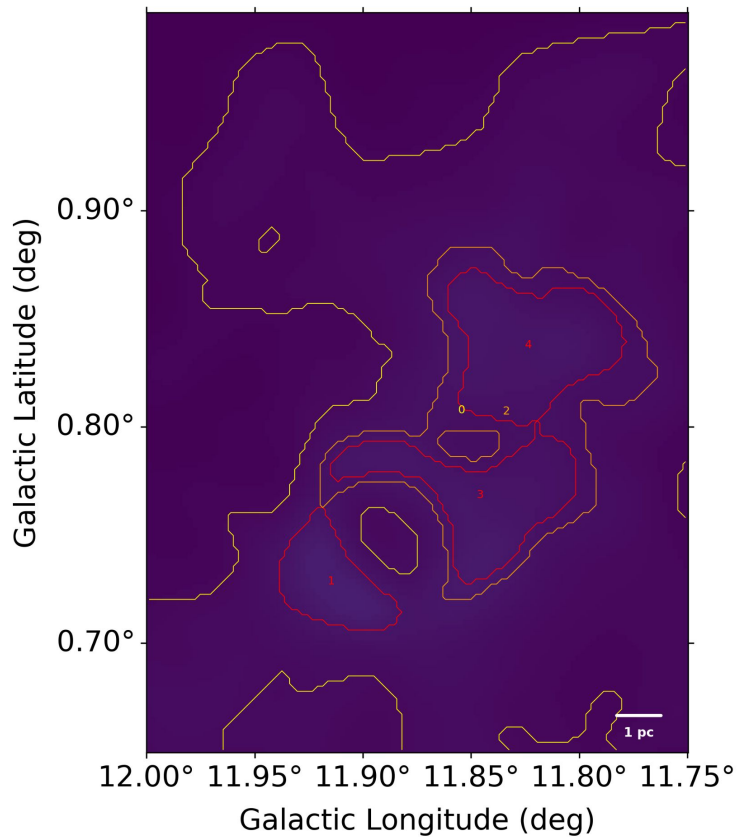
Appendix

M17解析結果



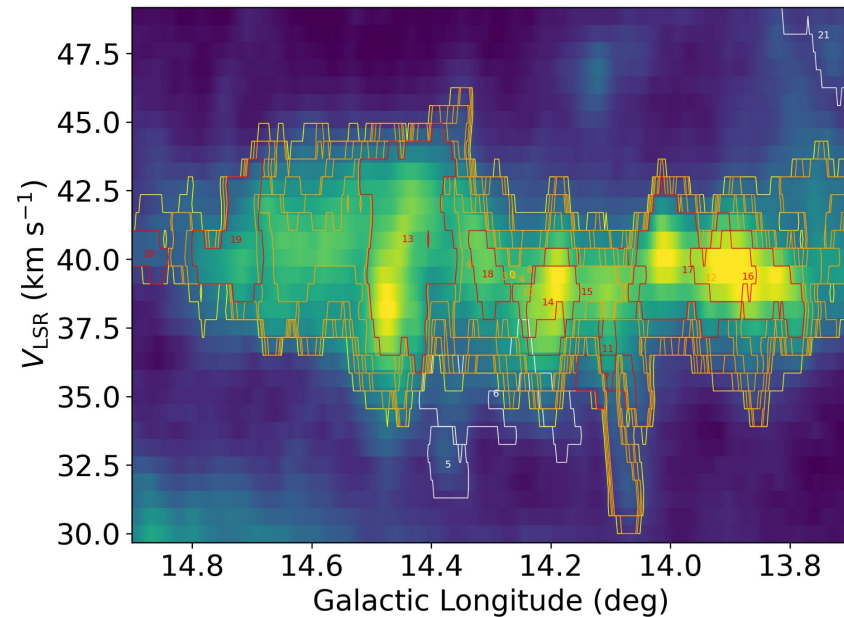
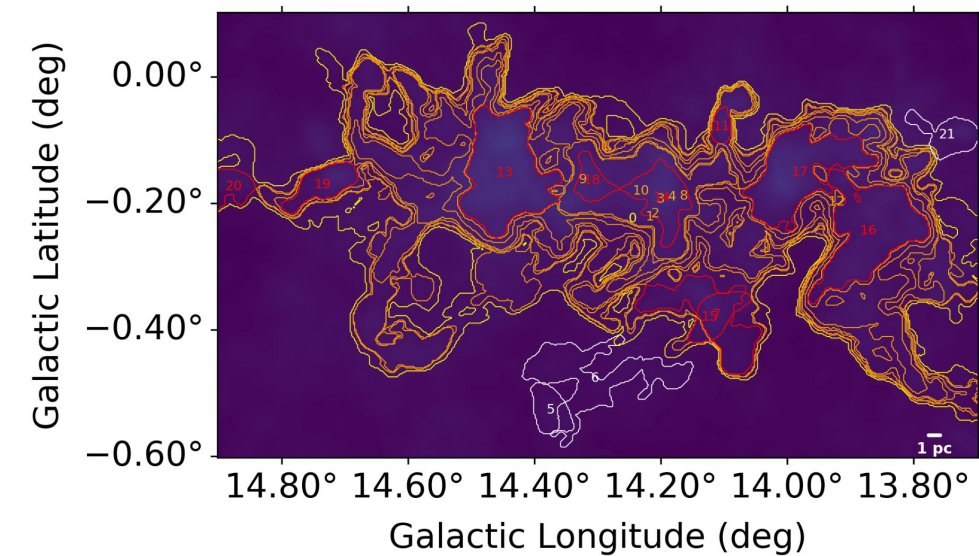
Appendix

N4解析結果



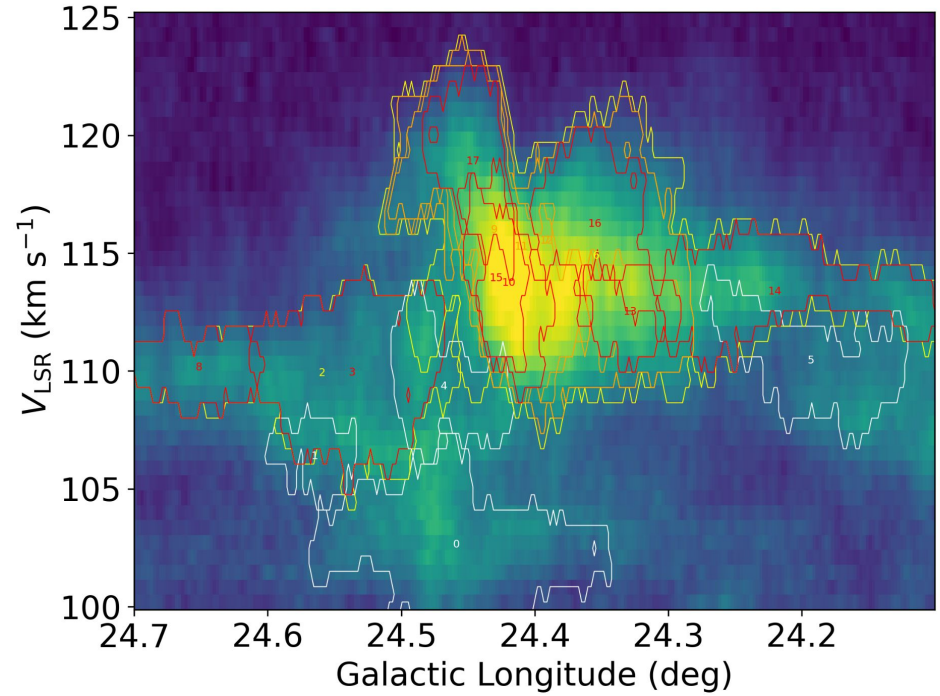
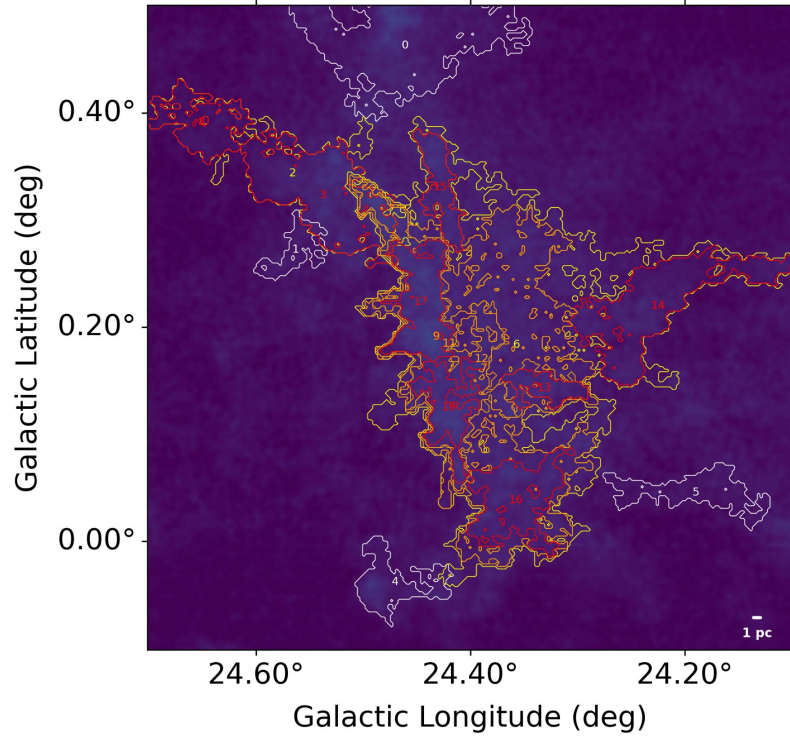
Appendix

N14解析結果



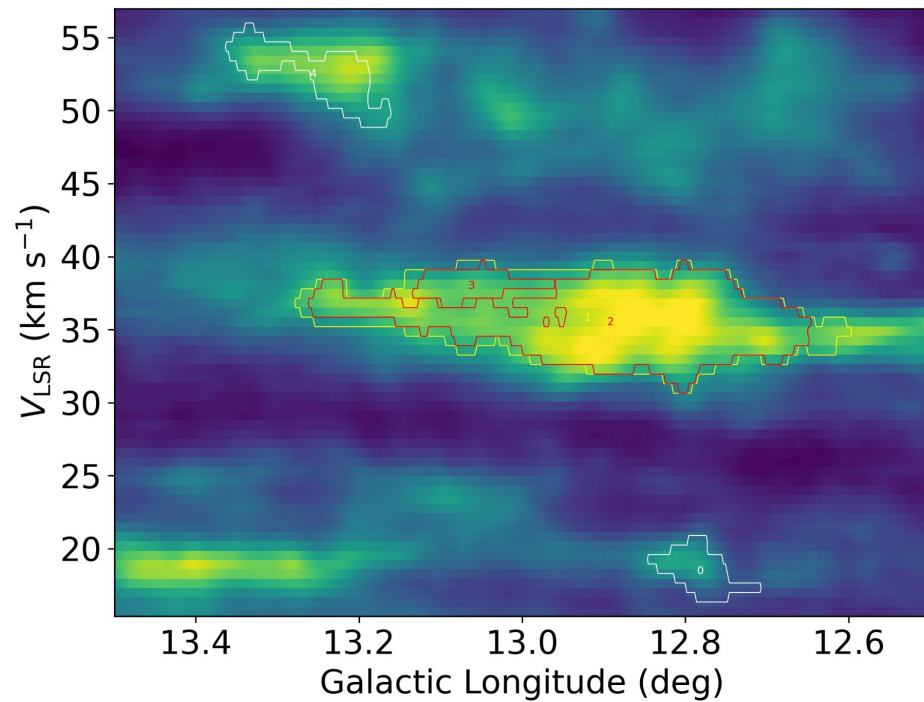
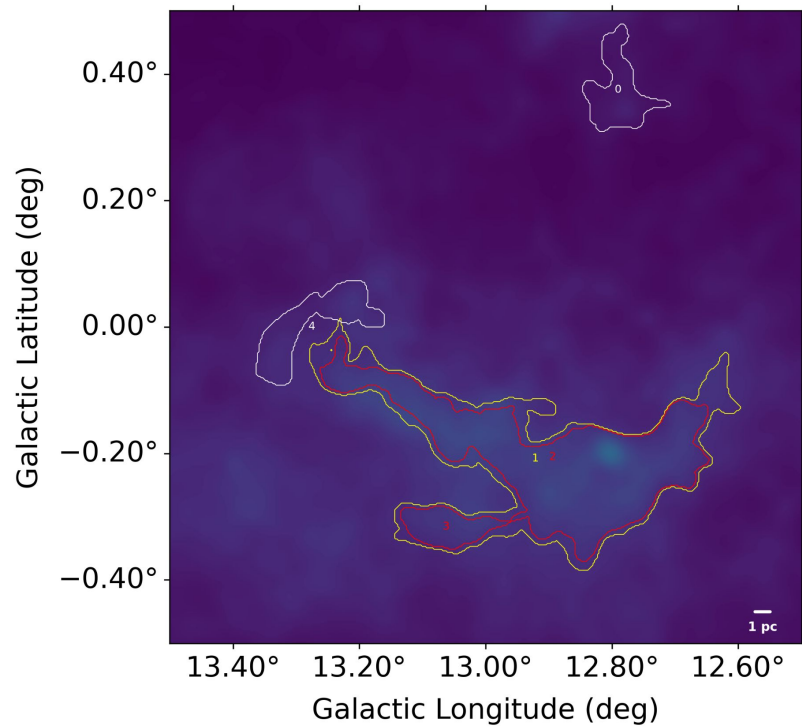
Appendix

N35解析結果



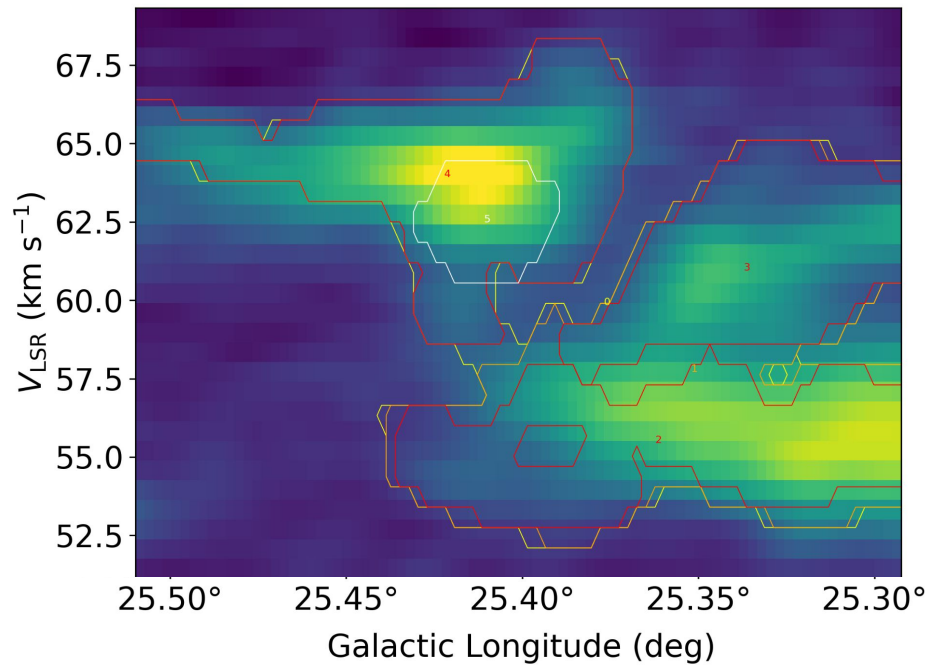
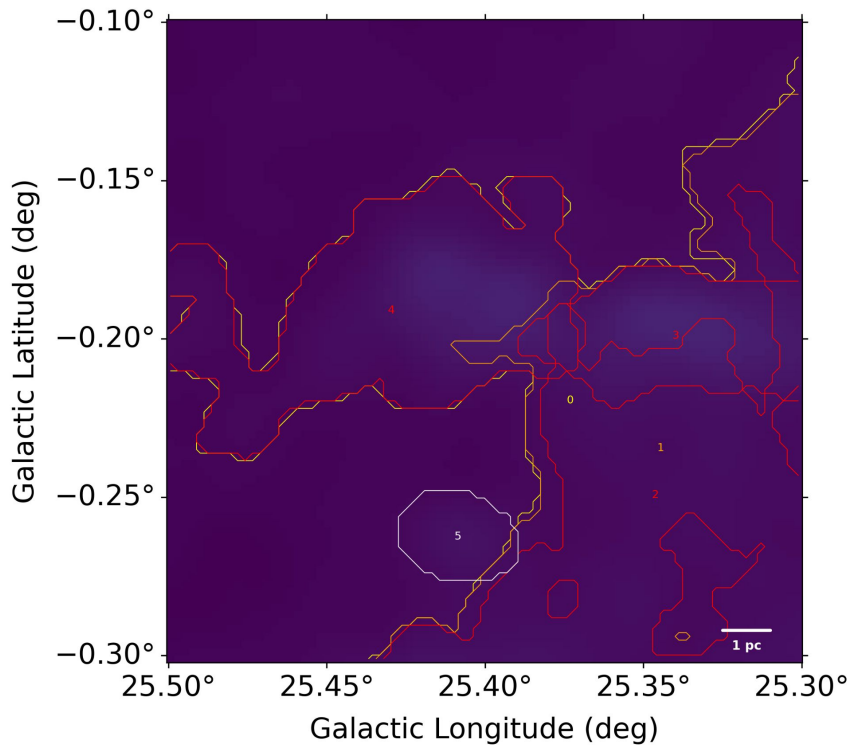
Appendix

W33解析結果



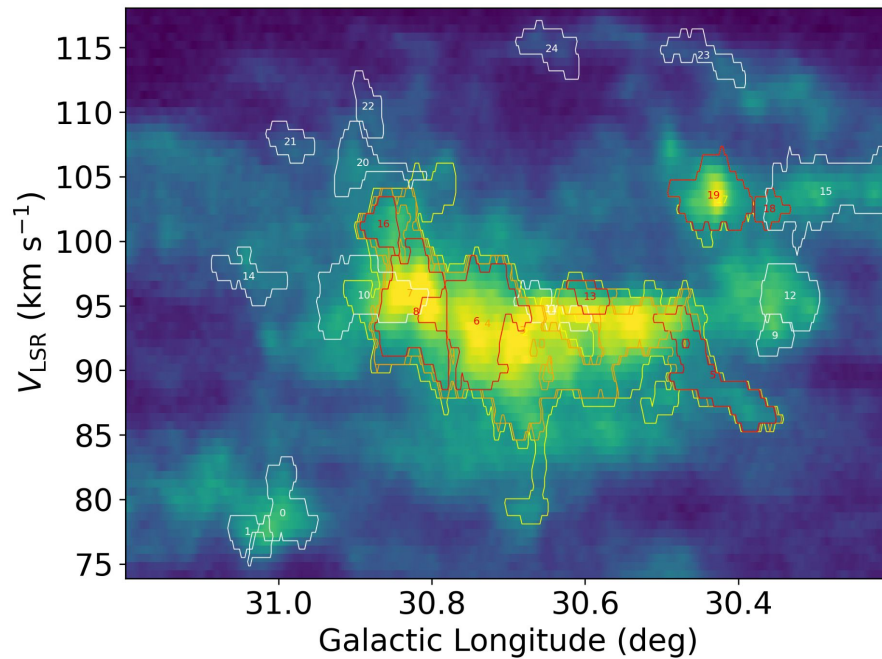
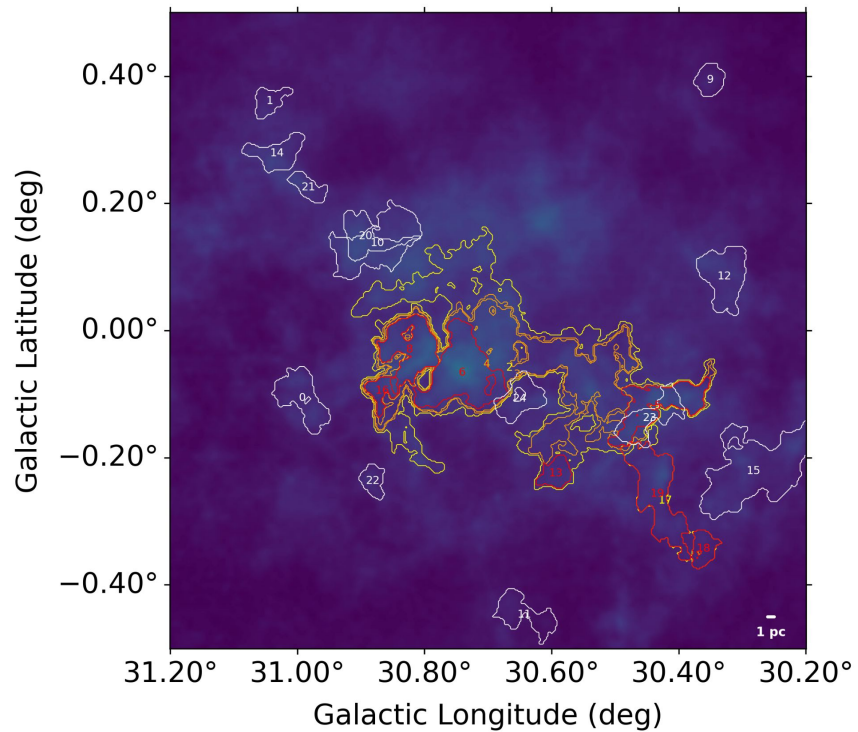
Appendix

W42解析結果



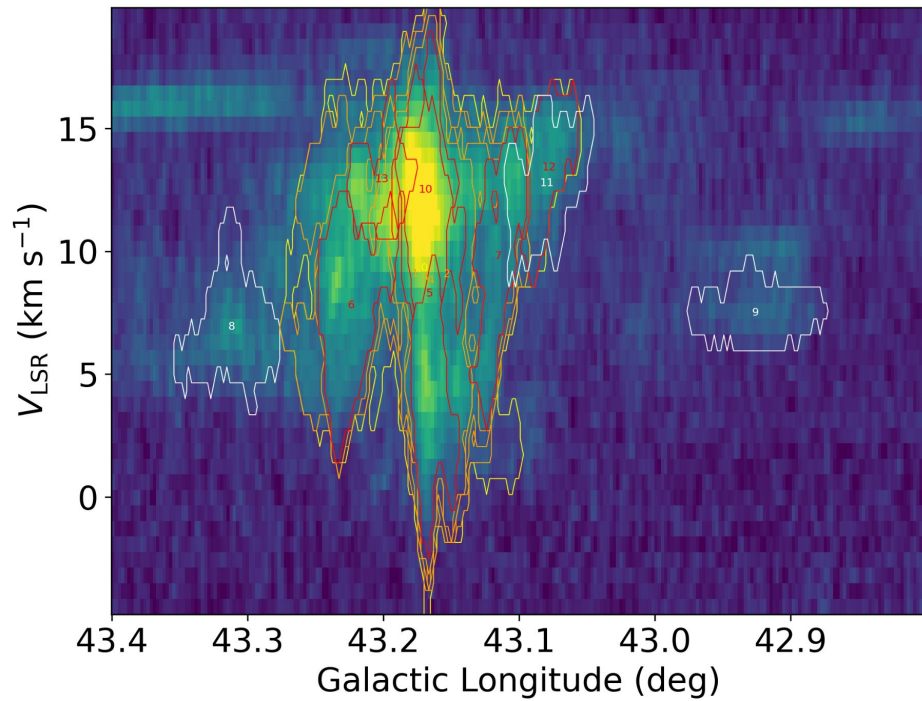
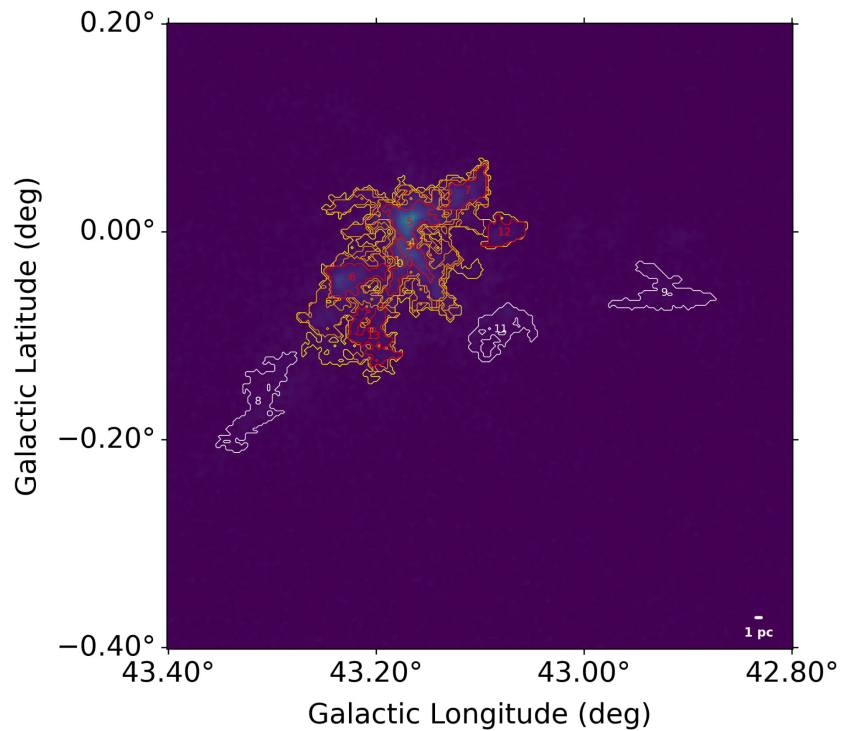
Appendix

W43解析結果



Appendix

W49N解析結果



Appendix

M33観測

銀河系内観測:

奥行の位置情報の欠如、無関係なソースの混濁...

→ 階層構造解析の正確性には限界

近傍銀河(M33)観測:

Face-on視点 = 銀河面に対する分子雲の分布を正確に決定可能

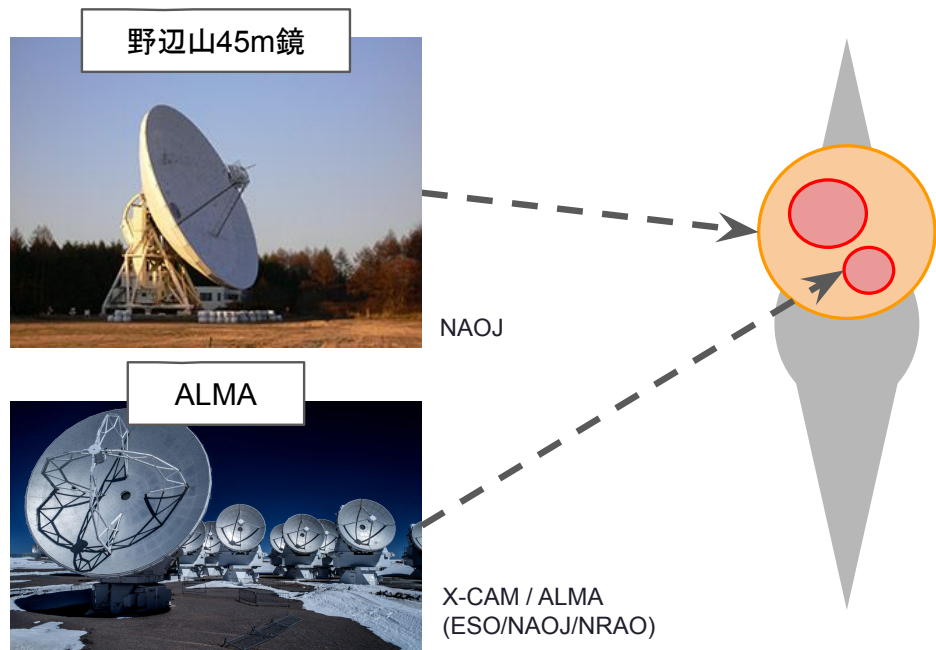
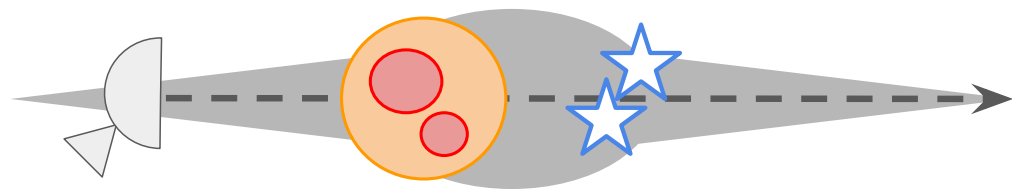
渦状腕・腕間などの銀河環境の差による階層構造雲の比較、環境依存性の検討

→ **より正確・進んだ階層的進化の議論が可能に**

野辺山45m鏡(単一鏡)による広域観測(trunk)

+ ALMA(干渉計)による詳細観測(leaf)

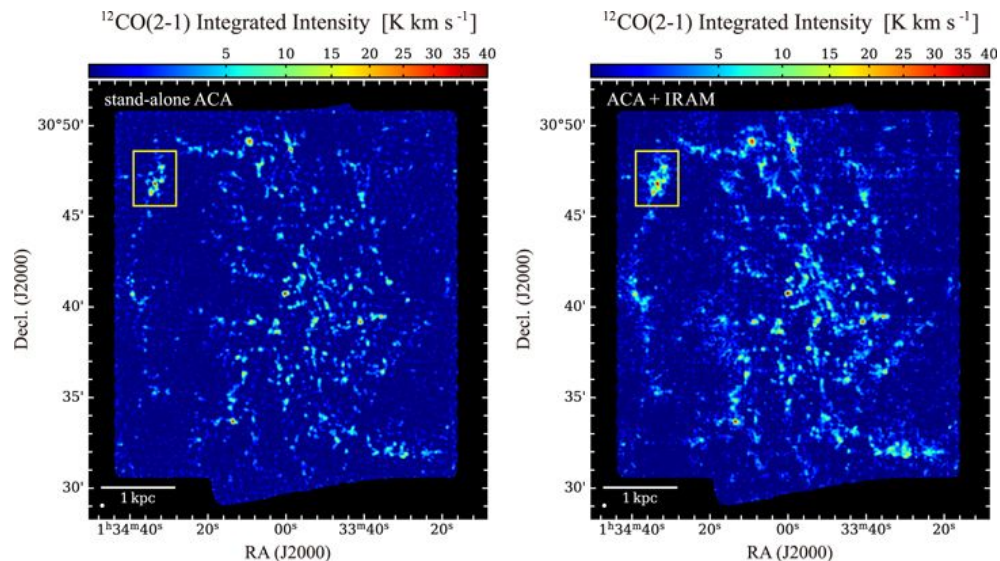
→ Dendrogramによる解析



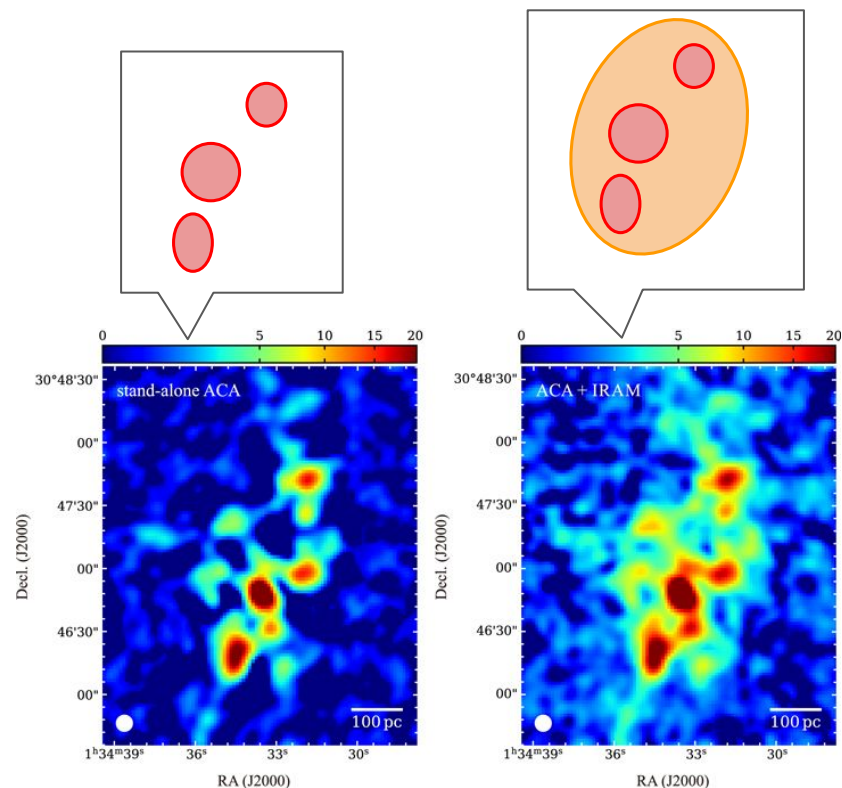
M33の野辺山45m鏡+ALMAを組み合わせた観測

Muraoka et al. 2023: ALMA-ACAとIRAMを組み合わせたM33観測
干渉計による高解像観測と単一鏡による広域観測を組み合わせ
複数の分子雲とそれを取り巻くガス構造を同定

同様の観測を野辺山45m鏡とALMAでできないか？



Muraoka et al. 2023



Muraoka et al. 2023

GPU計算機による高解像度流体計算

GPU高速化コードによる流体計算

GPU搭載スーパーコンピュータMiyabi(JCAHPC)による、
高解像度流体計算

自己重力流体コードSFUMATO(Matsumoto 2007)の
GPU移植版(宇宙理論研究室福島助教)を採用

→ **従来比10倍以上の高速化、高解像度化を実現**

観測との直接比較

計算結果データから疑似観測データを作成

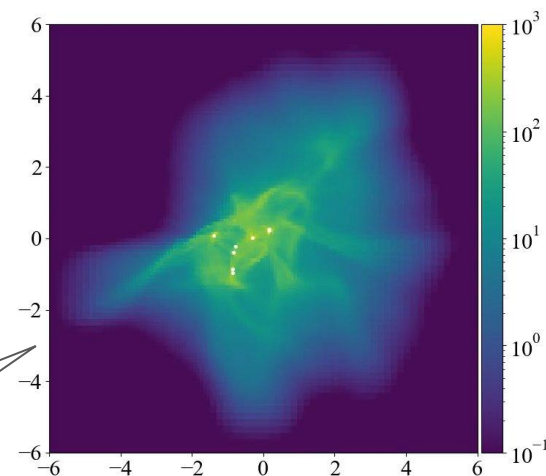
Dendrogramで解析し、観測データの解析結果と比較

→ **階層構造の時間発展を追い、観測データから得られた
シナリオの妥当性を検討**

観測と理論の両面の知識を総動員し、大質量星形成過程の
解明に多角的にアプローチしていく



CCS



福島助教による、自己重力流体球の
時間発展シミュレーション