

星団形成領域における分子ガス構造の 観測的研究

最終目標

星団形成メカニズムの解明、確立

- 形成される星の質量決定メカニズムの理解
初期質量関数 (IMF) の要因の理解、解明

齋藤 弘雄
宇宙観測研究室

星団形成

「星形成」

○ 銀河系内における星形成のモードA：大質量星形成 vs 小質量星形成

< 大質量星形成 >

- ・ 星の質量：～ 8 Mo (B3 type) 以上 (超新星爆発：可)
特に、～ 12 Mo (B1 type) 以上 (HII領域：形成可)
- ・ 絶対数：非常に少ない (10 Moの星は 1 Moの200分の1程度)
- ・ 形成領域：主に渦状腕内の巨大分子雲 (GMC) → 近傍に非常に少ない
- ・ 形成プロセス：質量降着 vs 小質量合体 (質量降着有利か)
- ・ タイムスケール：短い (～ 10^5 yr ?)
- ・ 周囲への影響：大 (分子流、HII領域/星風、超新星爆発)

< 小質量星形成 >

- ・ 星の質量：1 Mo前後
- ・ 形成領域：どこでも (低質量分子雲も) → 非常に近傍にも存在
- ・ 形成プロセス：質量降着 (進化クラスが確立)
- ・ タイムスケール：長い (> 10^6 yr 以上)
- ・ 周囲への影響：小 (分子流、星風?)

星団形成

「星形成」

○ 銀河系内における星形成のモードB：孤立星形成領域 vs 集団星形成領域

< 孤立星形成 >

- ・ 形成領域：（近傍）小質量星形成領域（Taurus領域 など）
- ・ 星密度：～ 数個/pc³
- ・ 星の質量：1 Mo前後（孤立した大質量原始星未確認）
- ・ 母体分子雲：数100 Mo ～ 数10⁴ Mo

< 集団星形成（星団形成） >

- ・ 形成領域：大質量星形成領域（ほぼ必ず星団が形成）
小（中）質量星形成領域（稀に星団が形成）
- ・ 星密度：～ 数100 個/pc³ 以上
- ・ 星の質量：大小質量の星が存在（1 Mo以下の質量の星から存在）
- ・ 星団サイズ：～ 0.5 pc
- ・ 母体分子雲：数100 Mo ～ 10⁶ Mo

星団形成

「星団形成」と「大質量星形成」

○ 形成条件

- ・ 大質量星は絶対数が少ない → 大質量星の形成条件：小質量星の形成条件より厳しい
- ・ 様々な質量の星が密集して存在 → 形成される星の質量は小さなスケールの物理量に依存
- ・ 大質量星は星団として形成 → 大質量星の形成条件：**星団の形成条件を満たす**
- ・ 小質量星星団の存在 → 星団の形成条件：**大質量星の形成条件を必ずしも満たさない**

○ 星団形成メカニズムの理解のメリット

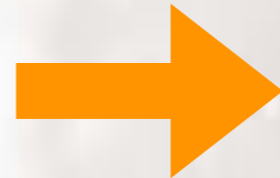
- ・ 分子雲や銀河スケールでの分子ガス進化の理解 (← 星形成のメインプロセス)
- ・ 様々な質量の星の形成環境の理解 (← 様々な質量の星が同時に形成)
- ・ 星の質量決定メカニズムの理解や初期質量関数 (IMF) の要因の理解

星団形成領域と分子ガス

- ・ 星は星間ガスが密集し、高密度になり形成される。
- ・ 星団も星間ガスから密度上昇により形成される。

現象の要因 / 生成の原料

- ・ 星間ガス
- ・ 分子ガス



現象の結果 / 生産の産物

- ・ 星
- ・ 星団

これらの間には何かしらの共通点が存在するはず・・・

○ 着目する点として

それぞれが持つ構造の特徴的なスケールに着目

- ・ 分子ガス（分子雲）：全体のサイズ、内部構造のサイズ
- ・ 星団：領域のサイズ、星団自体のサイズ、メンバー間の距離

特徴的構造

「分子ガス」と「星形成」

< Large scale ~ 50 pc >

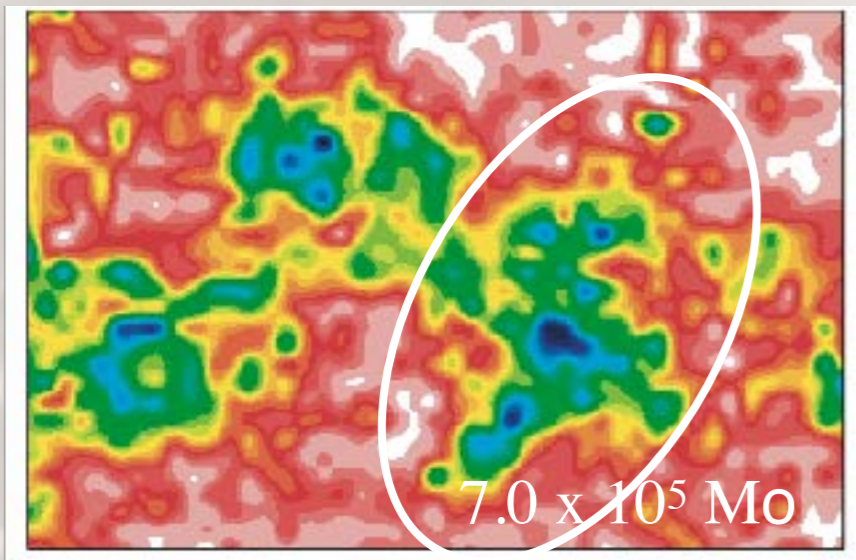
- (dense) gas -

- (Giant) Molecular Clouds
- total mass : $10^5 - 10^6 M_{\odot}$

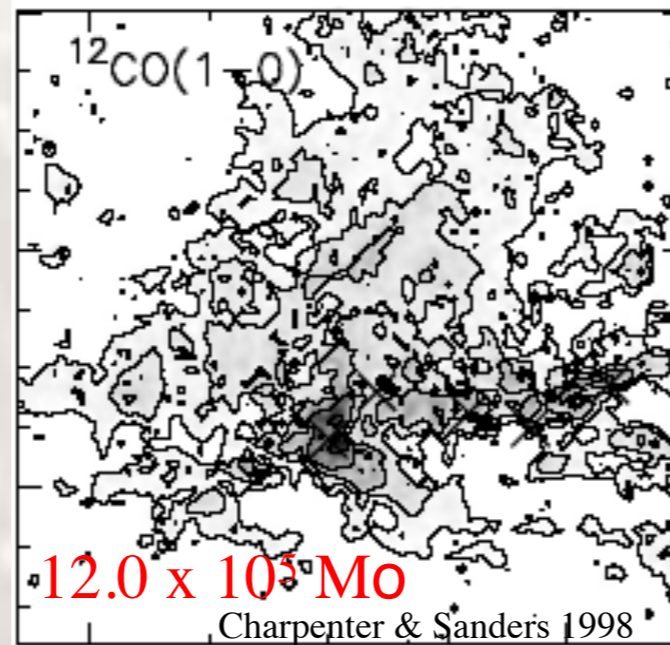
- Star Formation -

- Cluster complex + HII region
- total mass : $10^3 - 10^5 M_{\odot}$

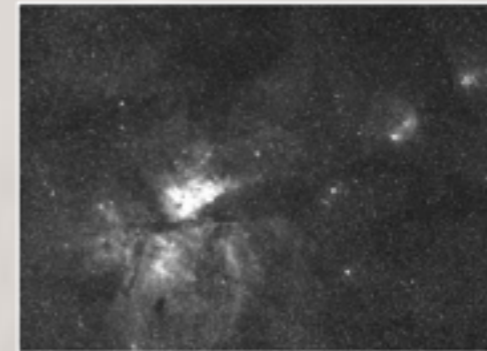
ケンタウルス領域のGMC



W51 GMC



Carina Nebula



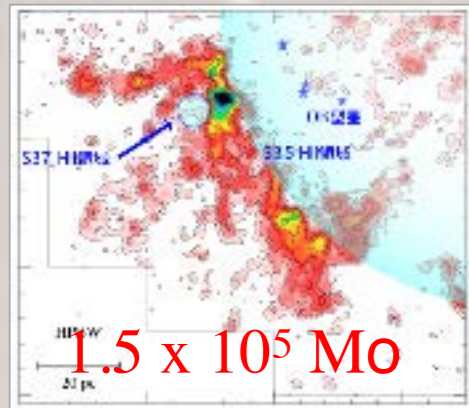
DSS

30 Dor



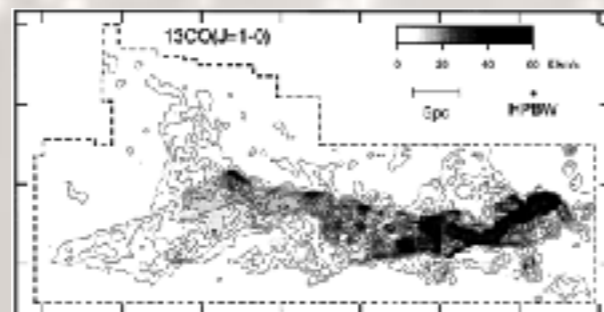
Form Home page of Z lab.

S35 GMC



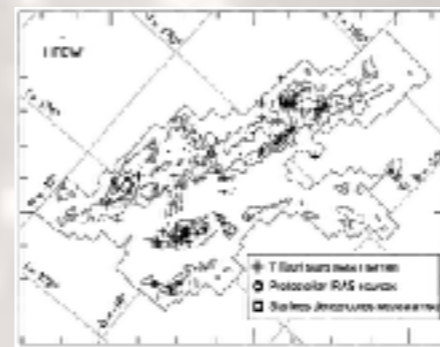
Saito et al. 1999

OMC A



Nagahama et al. 1998

TMC



Mizuno et al. 1995

100 pc



特徴的構造

「分子ガス」と「星形成」

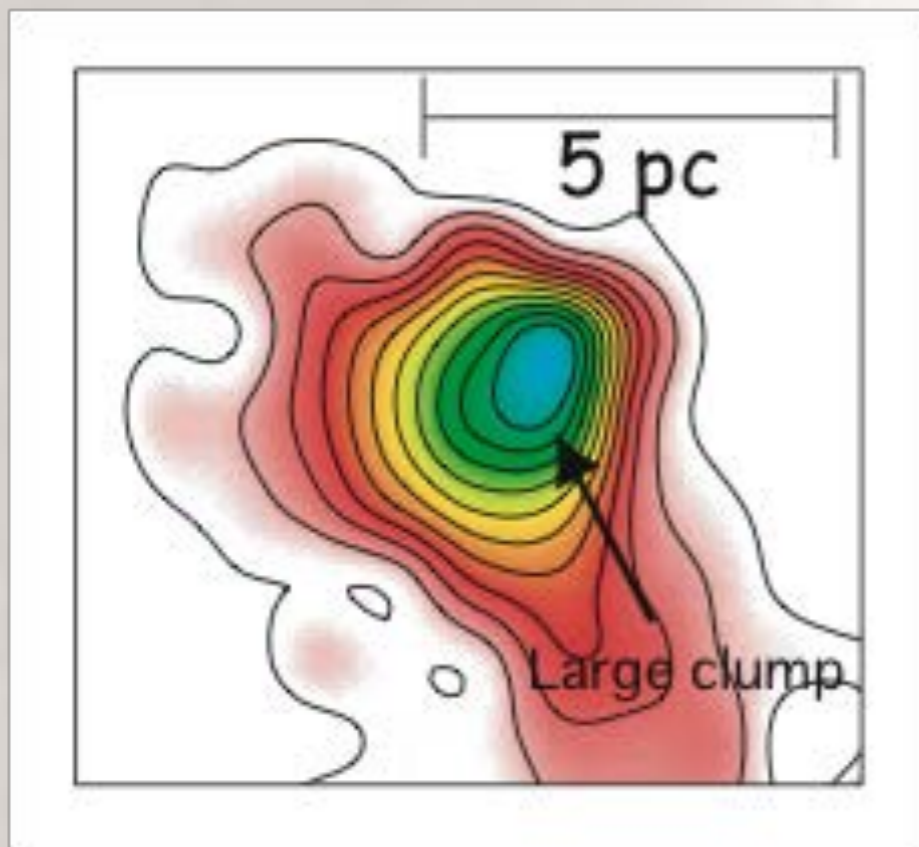
< Large scale 2 ~ 5 pc >

- (dense) gas -

- Large clump
- total mass : $\sim 10^3 - 10^4 M_{\odot}$

- Star Formation -

- Cluster complex or Globular Cluster
- total mass : $10^2 - 10^5 M_{\odot}$

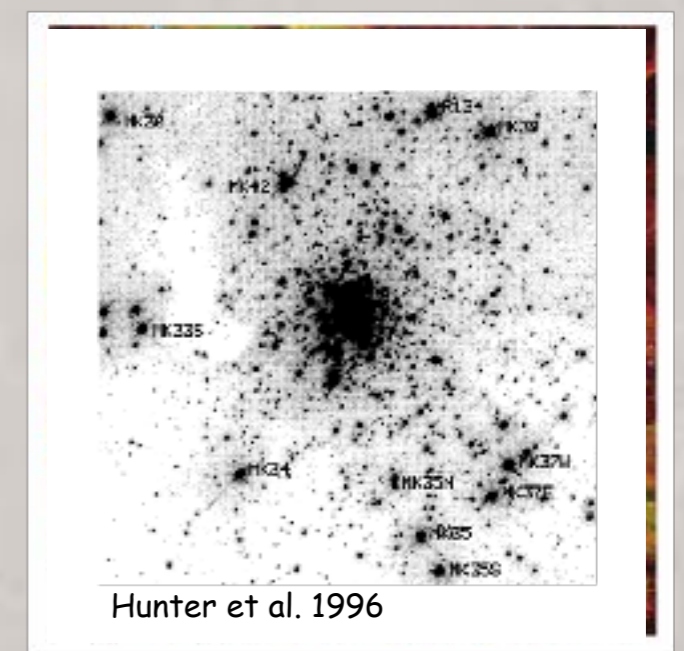


Saito et al. 1999

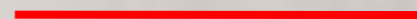
RCW 49 (Carina)



30 Dor (R136)



5 pc



特徴的構造

「分子ガス」と「星形成」

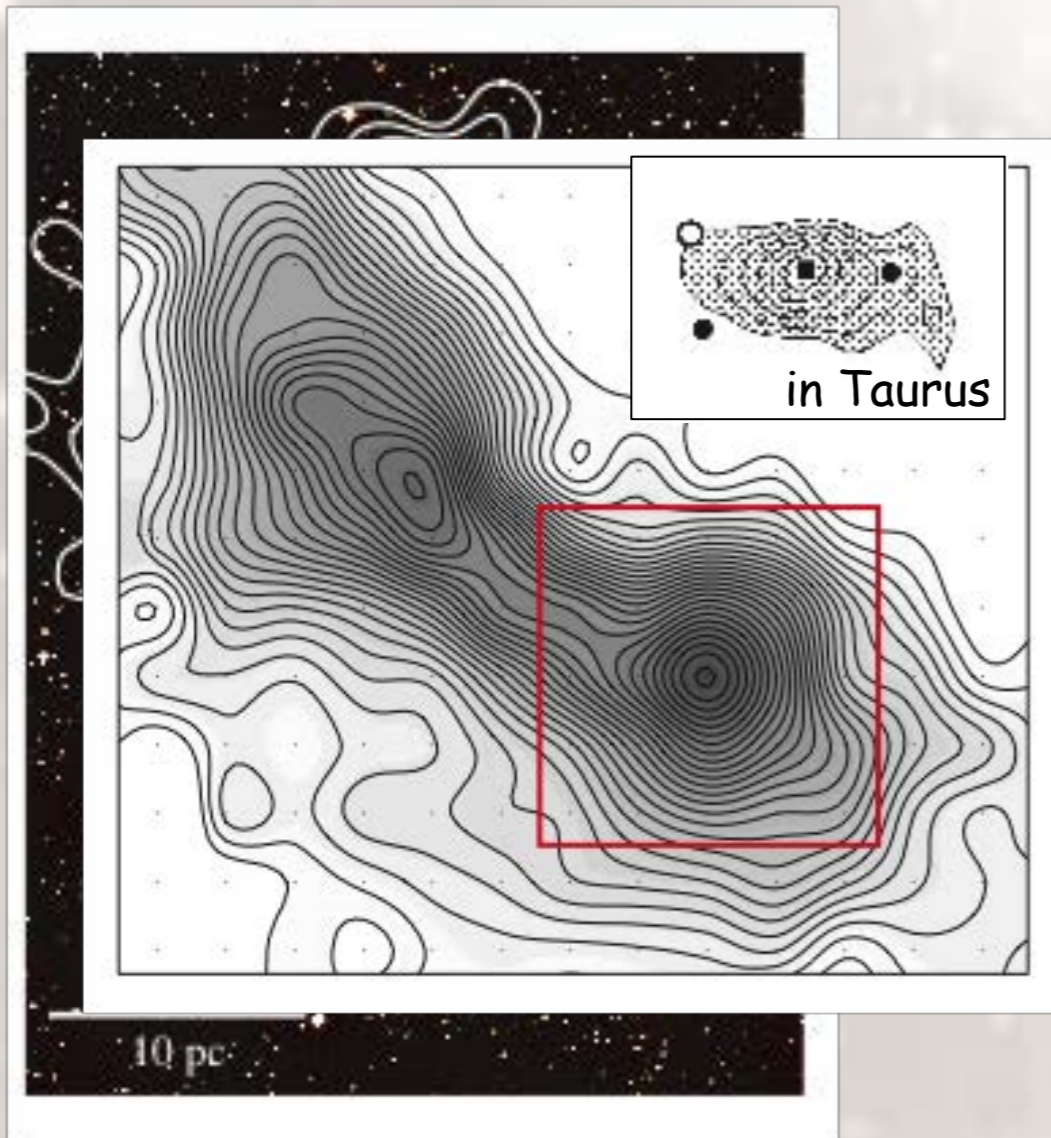
< middle scale ~ 0.5 pc >

- dense gas -

- Dense clump
- total mass : $\sim 10^1 - 10^3 M_{\odot}$

- Star Formation -

- Cluster
- total mass : $10^2 - 10^4 M_{\odot}$

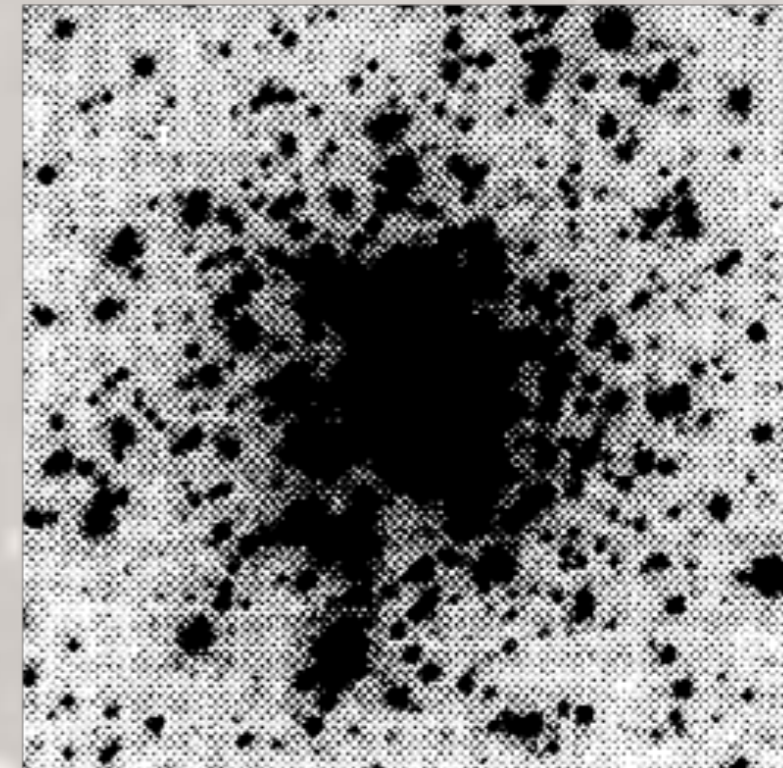


RCW 49 (Carina)



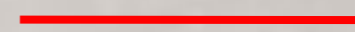
Form Home page of Z lab.

30 Dor (R136)



Hunter et al. 1996

1 pc



特徴的構造

「分子ガス」と「星形成」

< small scale ~ 0.05 pc >

- dense gas -

- Core (Hot core)
- total mass : ~ 1 - 100 Mo

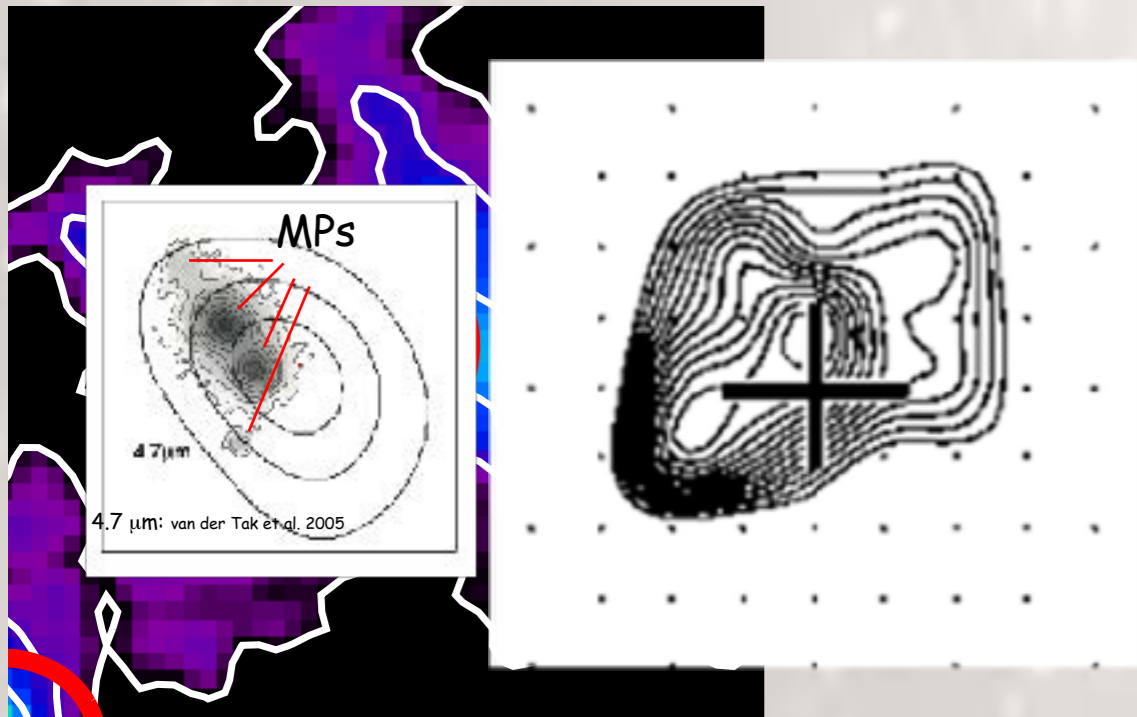
- Star Formation -

- star separation in the Cluster
- total mass : 1 - 10² Mo

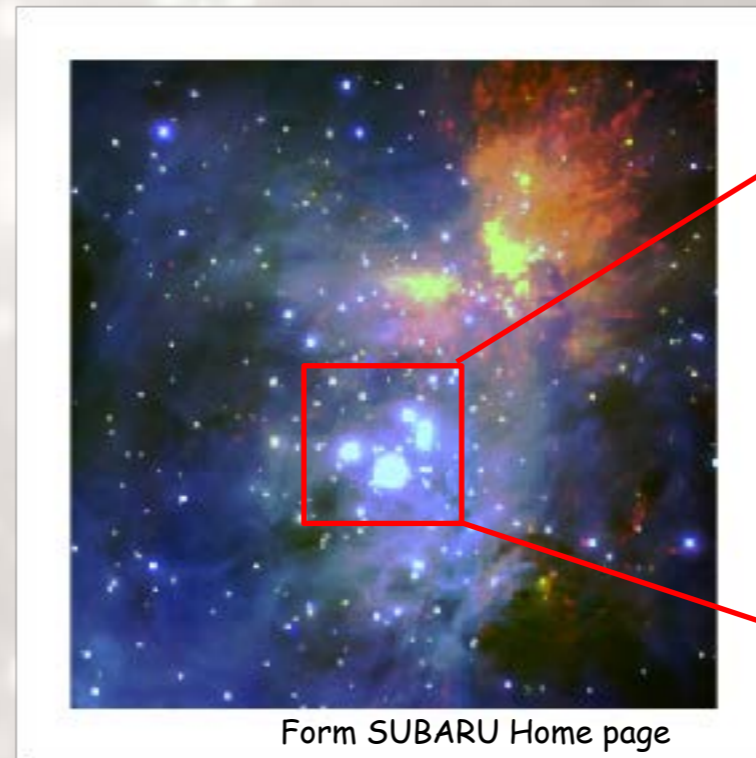
Hot core (HMSF)
(W3 IRS5)

H¹³CO⁺ core (LMSF)
(L1527 in Tau.)

M42 (Trapezium)



0.1 pc



Form SUBARU Home page

0.4 pc



0.1 pc

注目点

- middle scale : Dense clump & cluster

- 星団形成の母体となるクランプ構造の検出
- クランプの物理状態の解明
 - クランプ内での星団の特徴との関係の解明

- small scale : Dense core & star separation in cluster

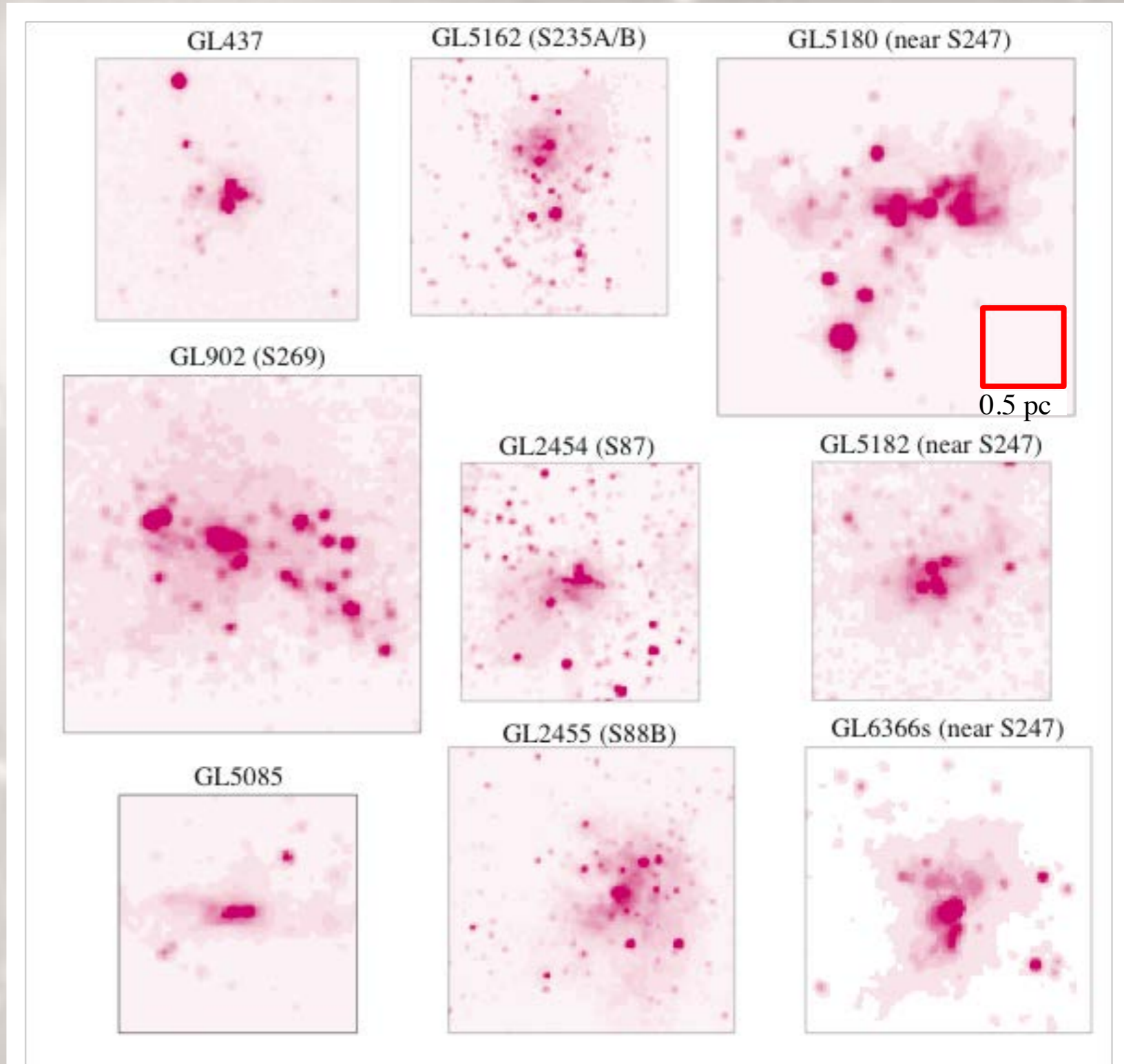
- クランプ内部の構造の把握とコア構造の同定
- コア構造の物理状態の解明
 - - クランプの物理状態とコア構造の物理量分布との関係の解明
 - コア構造の物理量と個々の星形成の関係の解明

• 大質量クランプ → コア構造 → 星団
それぞれの形成メカニズムの確立

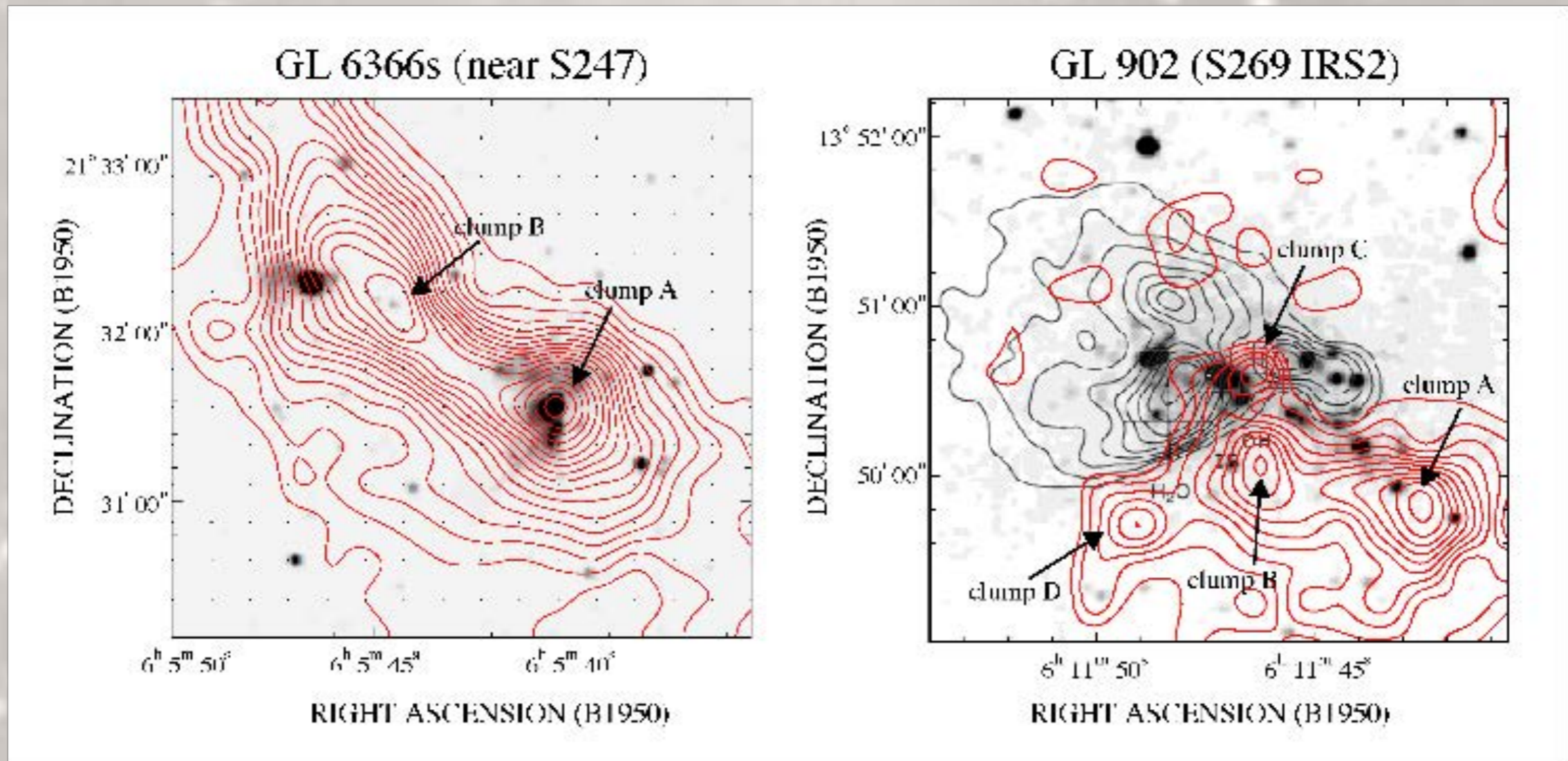
対象天体

- 近赤外線源星団が付随
- B1-08型の大質量星が付随
 - $L_{\text{IR}} = 1.5 - 10 \times 10^4 L_{\odot}$
 - $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_3\text{OH}$ masers
- 距離：3 kpc 前後
- 星団方向に高密度ガスの存在
(e.g., Zinchenko et al. 1994)

星団サイズ：0.3 - 1.5 pc



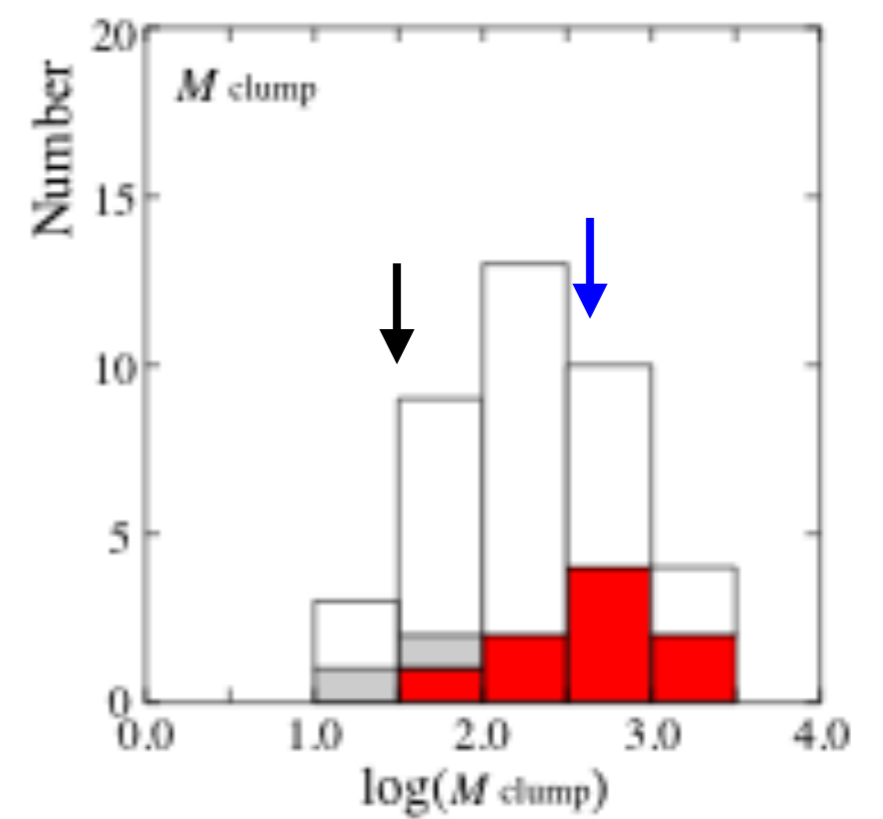
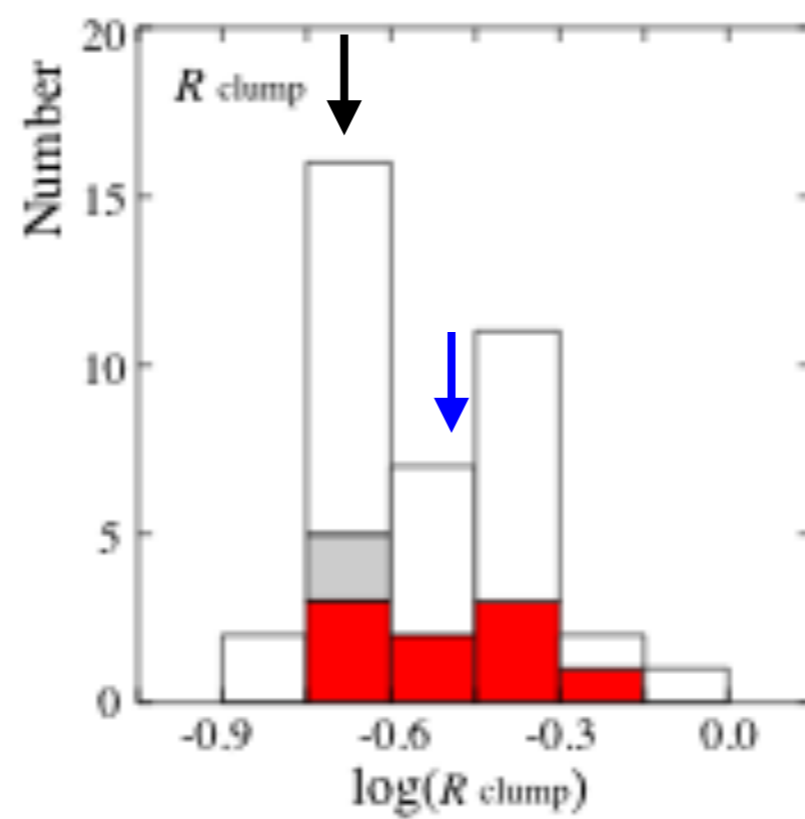
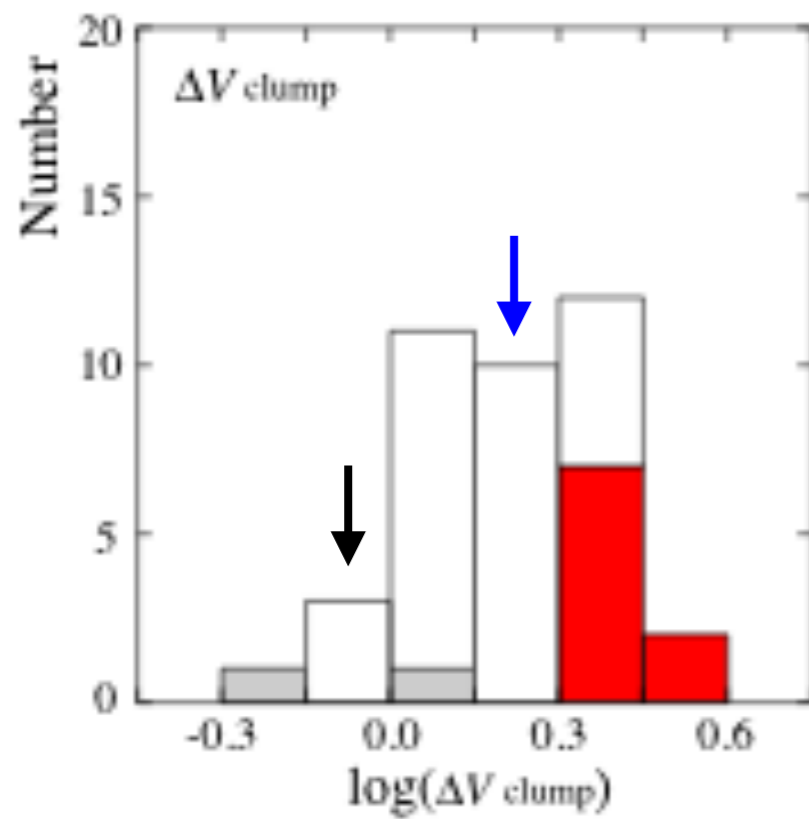
クラump構造



- ★ 39個のC¹⁸O clumpを同定 (巨大クラump内に2 - 6個のクラumpが存在)
 - ・ サイズ(R) : 0.14 - 0.76 pc
 - ・ 線幅 : 0.6 - 3.2 km/s
 - ・ 質量 : 15 - 1500 Mo
- ★ 星形成の指標 (MYSO & 2MASS sources)
 - ・ 大質量星形成クラump : 9個
 - ・ 星形成クラump : 28個

クラump構造

- Star-forming clumps in LMSFRs
(Tachihara et al. 2002)
- ρ Oph main body clump
(Tachihara et al. 2000)



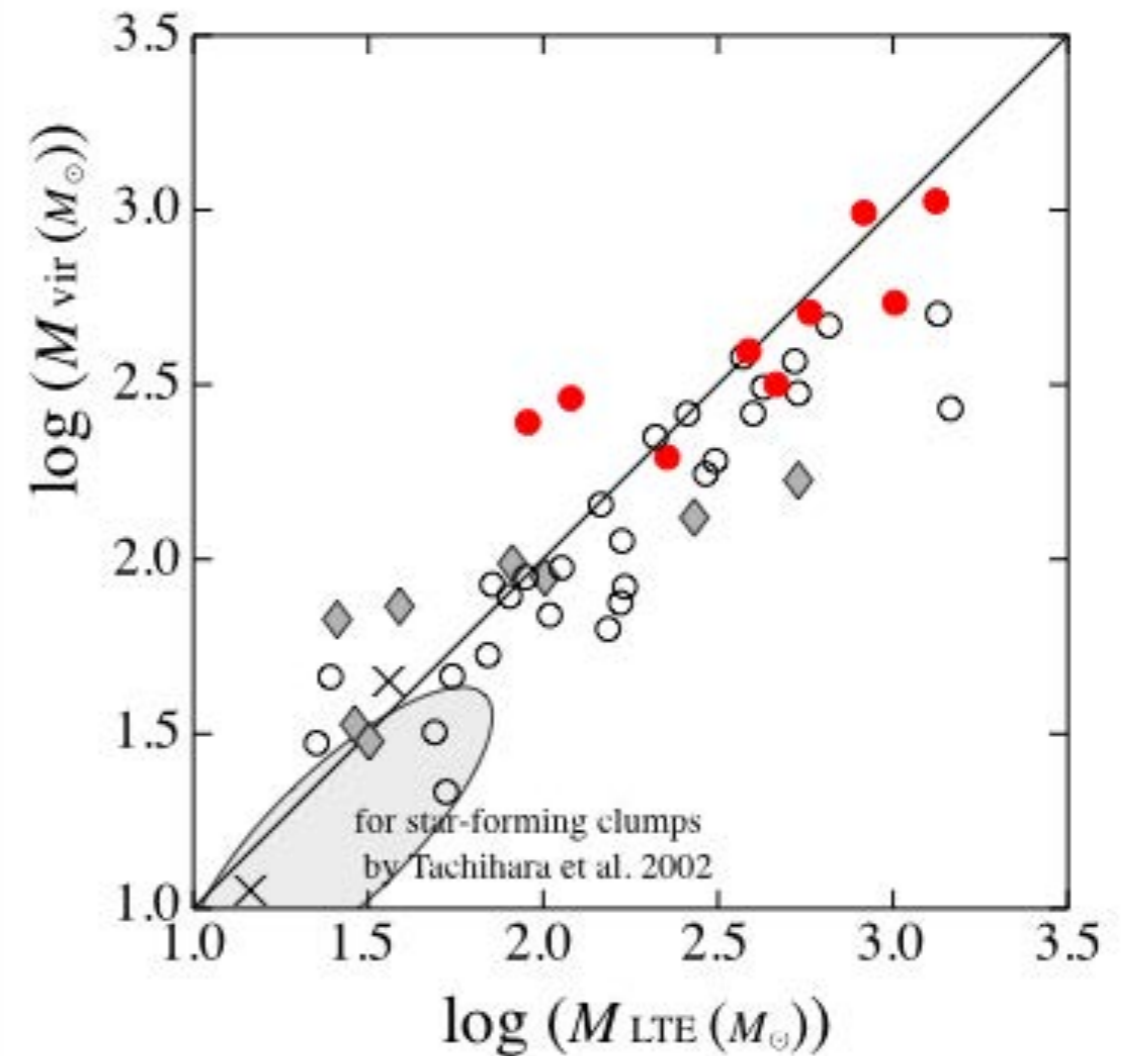
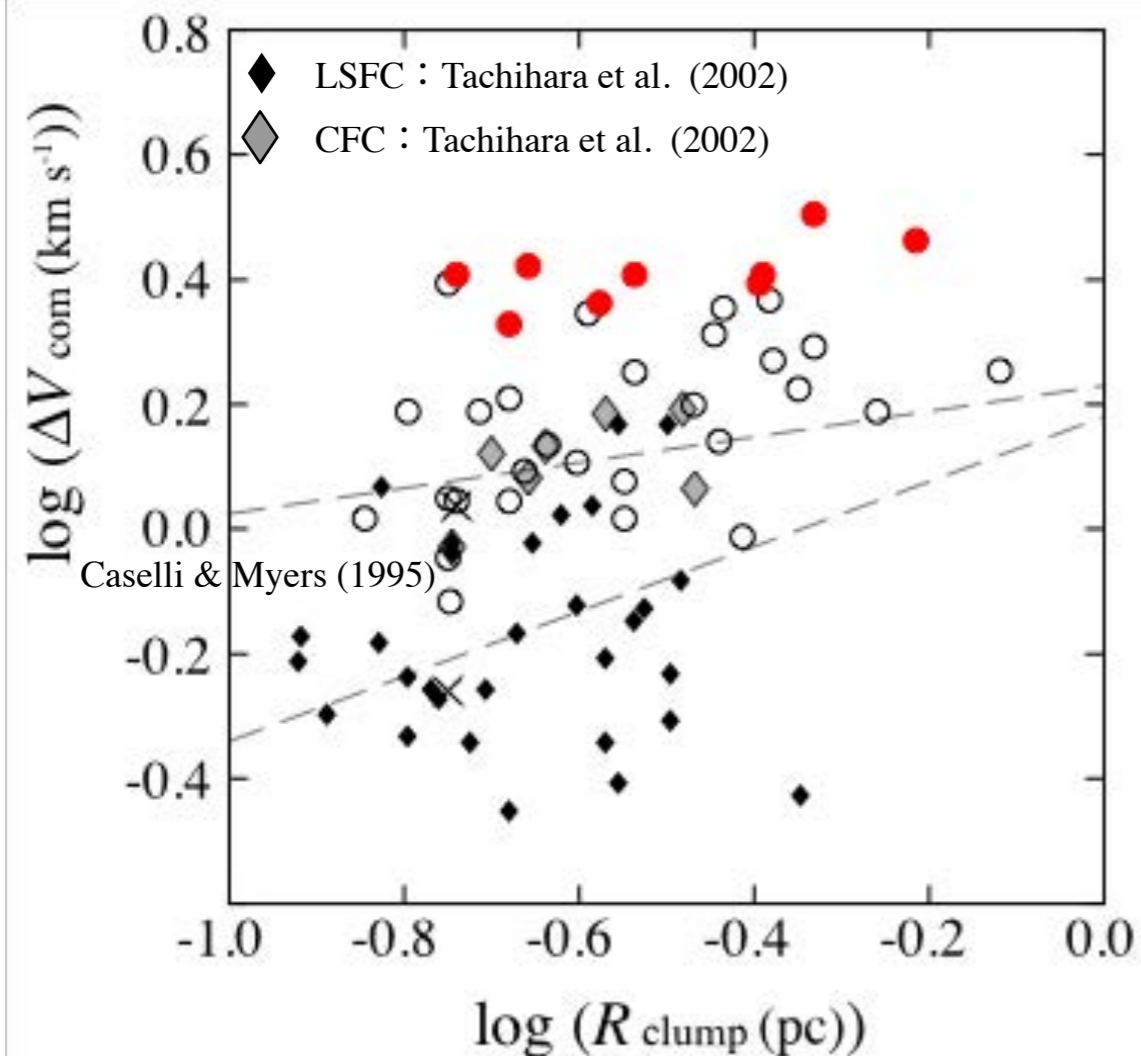
クランプの物理状態

★ サイズ線幅関係

- ・ 大質量星形成クランプで大きな線幅を保持
- ・ Caselli & Myers (1995)のMSCに傾きが類似
- ・ ただし、絶対値に違いが存在

★ ビリアル関係 ($M_v \sim 209R\Delta V^2$)

- ・ すべてのクランプで平衡状態
- ・ 大質量星の有無で顕著な違いなし

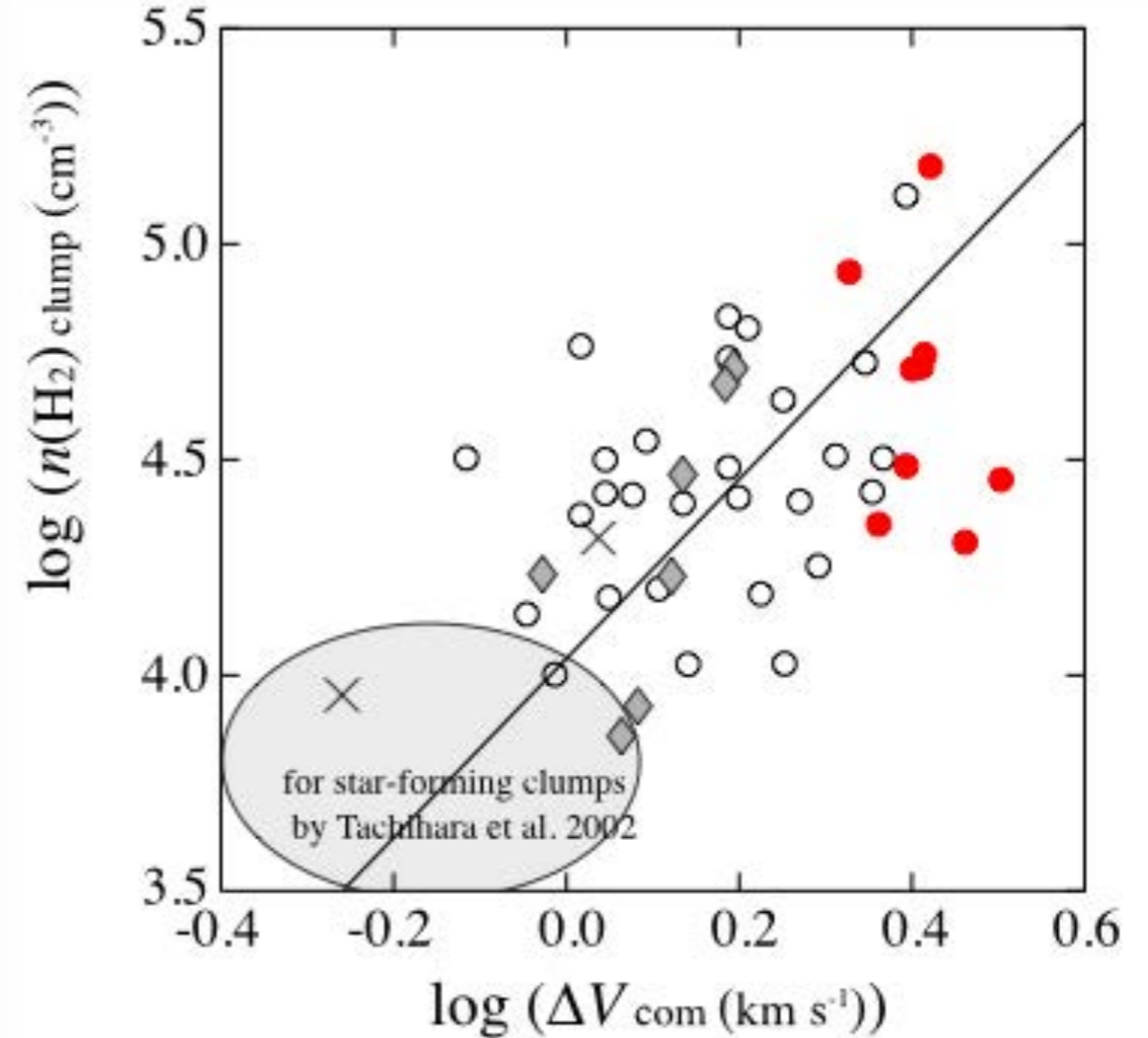
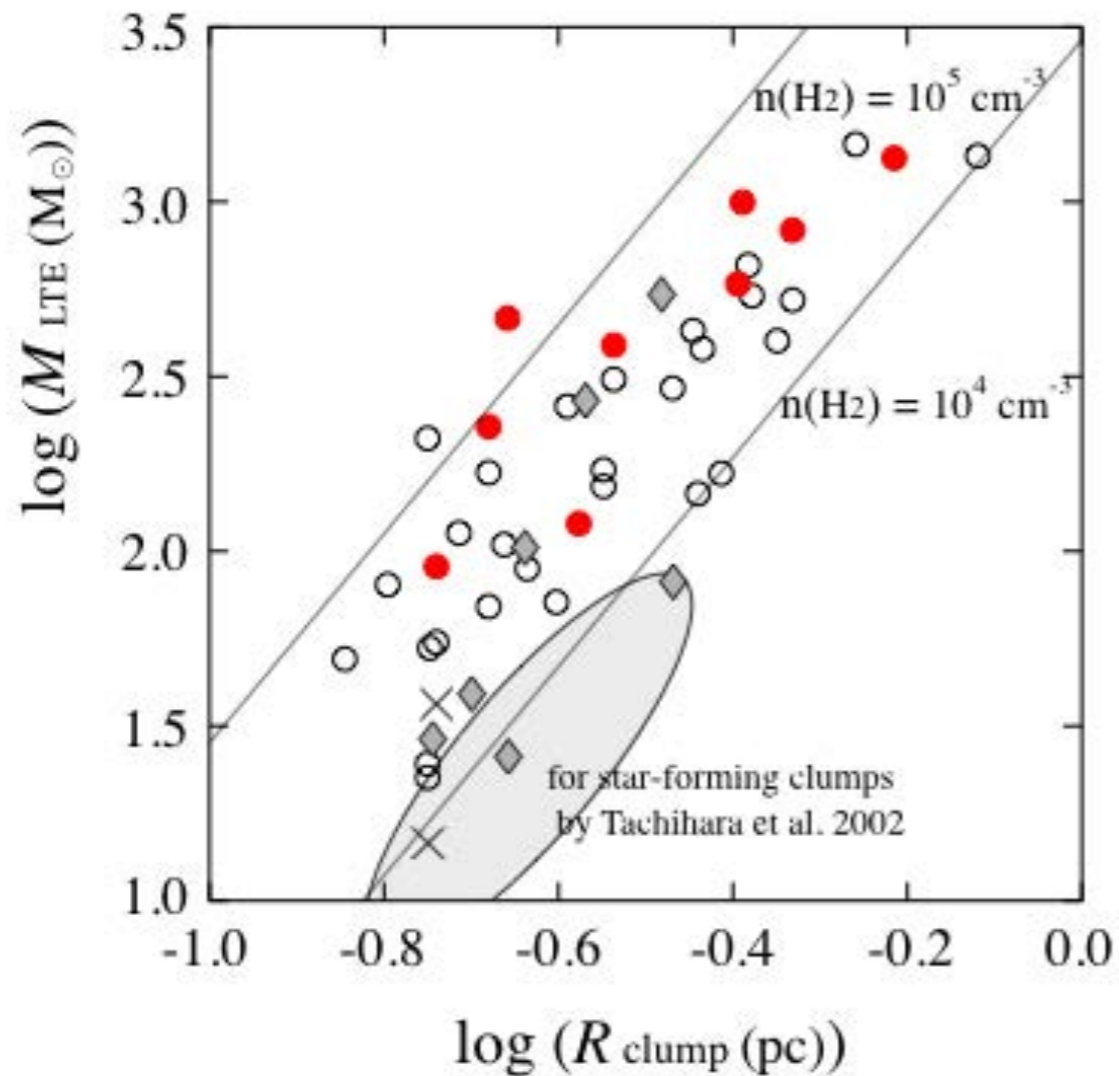


クラump構造

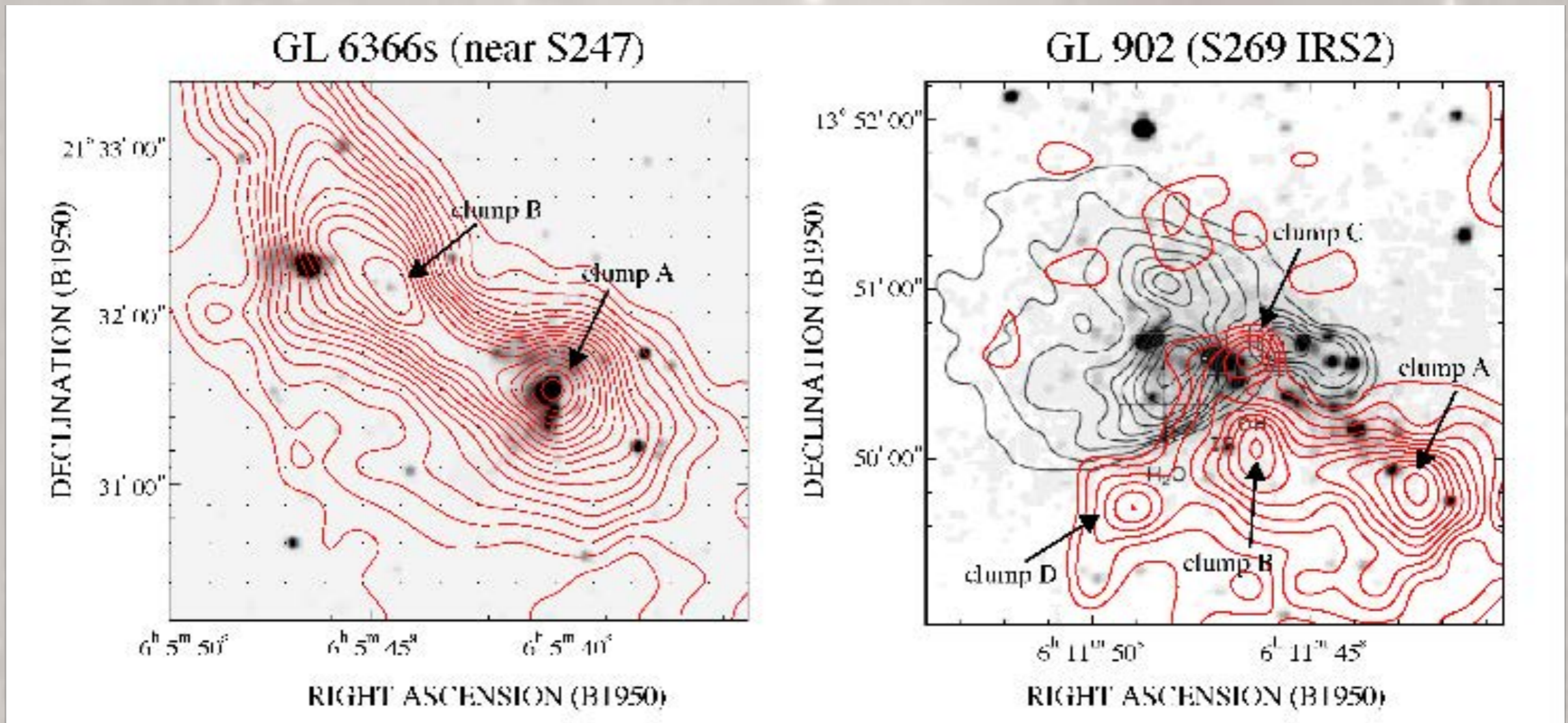
★ 線幅の大きなクラumpが束縛状態にある → 密度が大きいことを示唆

- Rに対して密度の違いが存在
- 大質量星形成クラumpで密度が大きい傾向あり

- 線幅の大きいクラumpで平均密度が大きい
($n(\text{H}_2) = M_{\text{cl}} / V_{\text{cl}}$)



星団とクランプ



- ★ 星団として認識される → 星が密集して存在・・・星同士の間隔が密
- ★ 現在見られる星団：1つのクランプから形成されたとは限らない
 - 「クランプ」を基準にし、そこでの星形成の特徴を把握する特徴・・・星の密集度など。

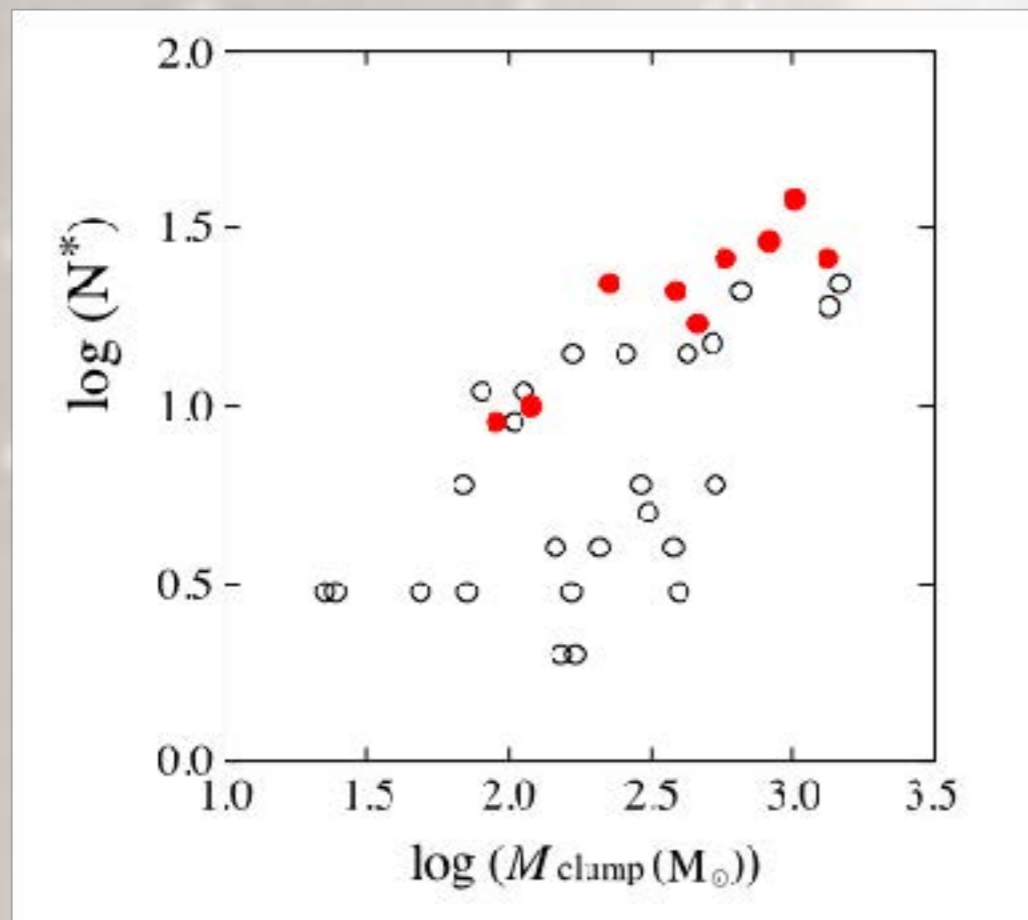
クラumpの物理量と星の個数密度

★ クラump内の近赤外線源の数を探査

→ $N^* = 0 - 39$ 個

(参) ・ 2MASS点源を利用

・ $A_v > 5$ magの点源を選出

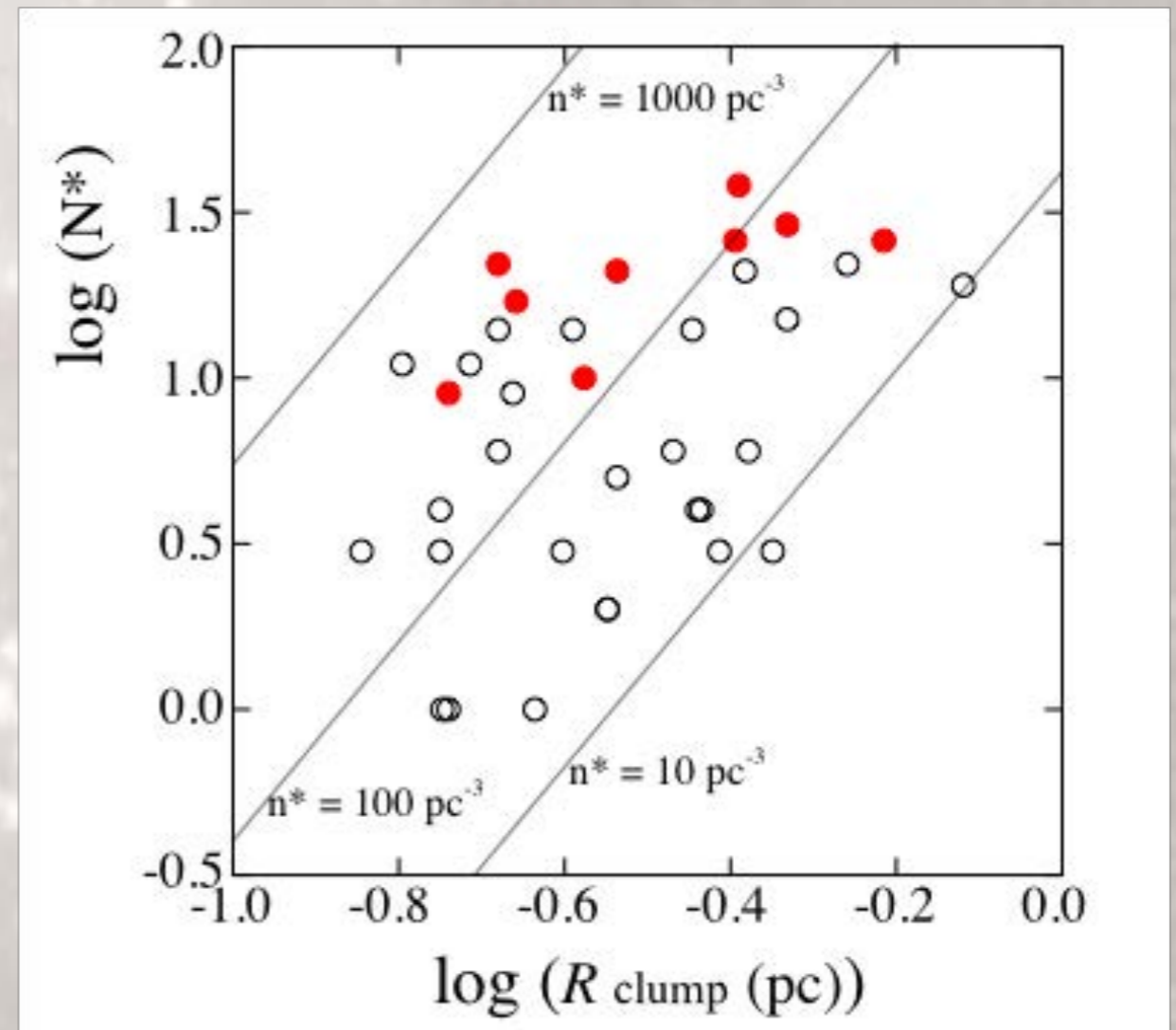


★ 星の個数密度に違いが存在

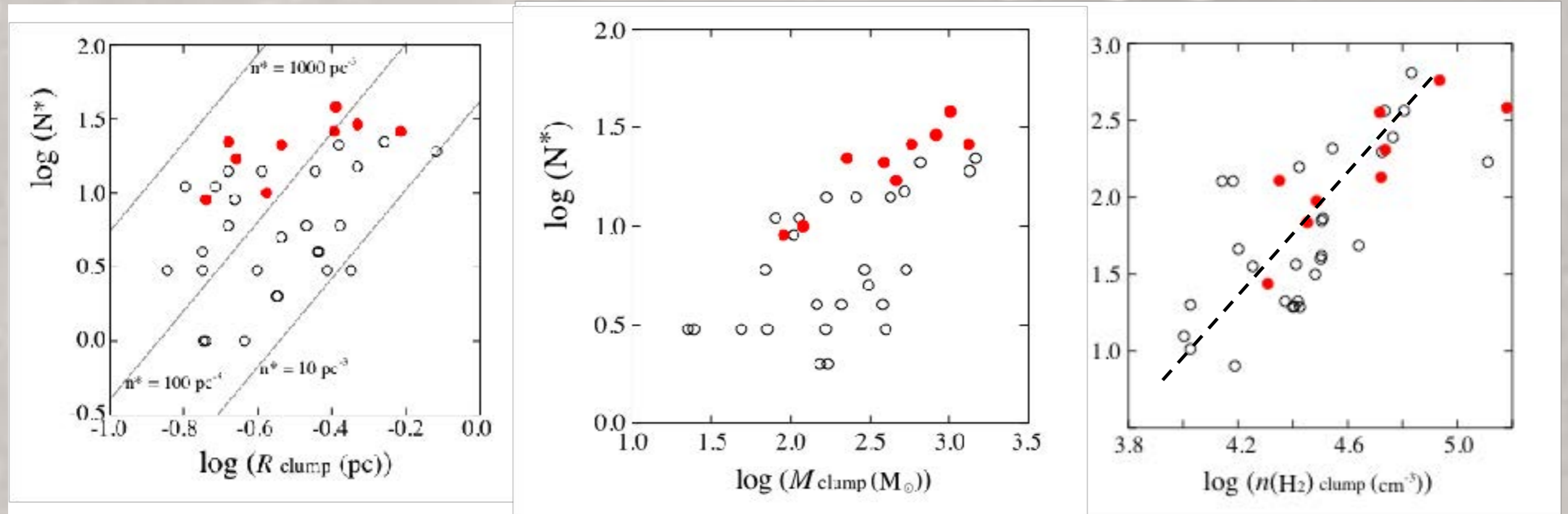
($n^* = 10 - 10^3$ 個/ pc^3)

(参) 0.25 pcのclumpに1個付随

→ $n^* = 20$ 個/ pc^3



クラumpの物理量と星の個数密度



★ クラumpの星密度を調査

$$n^* = N^* / V_{\text{clump}}$$

★ n^* → 大：星団として認識

★ 星の個数密度とclumpの H_2 密度の間に相関あり。

$$\rightarrow n^* \sim n(\text{H}_2)^{2.0}$$

- コア構造がclump内で分裂成長により複数形成され、星形成に至るとすると・・・

$$\rightarrow n^* \sim (1/\text{分裂波長})^3$$

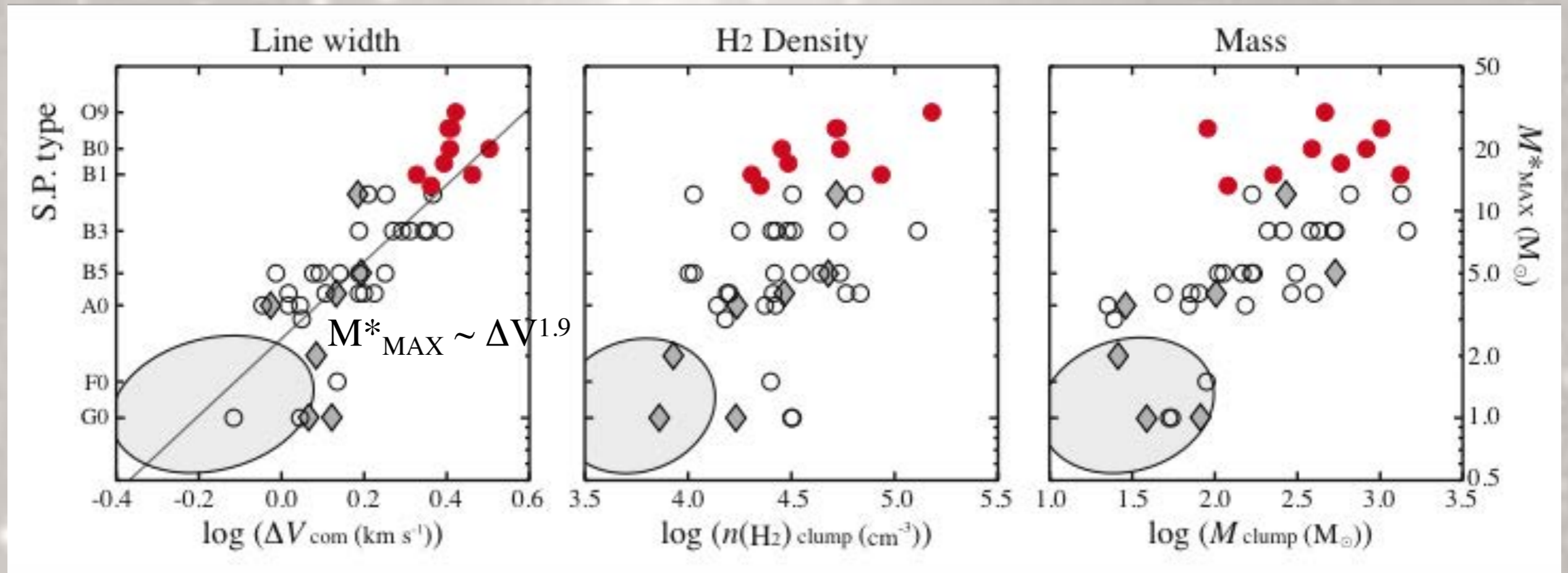
- Jeans不安定による成長を仮定すると・・・

$$\rightarrow n^* \sim (n(\text{H}_2)^{0.5})^3 \sim n(\text{H}_2)^{1.5}$$

星の最大質量との関係

★クラump質量と線幅（内部運動量）と良い相関

- ・特に、星団メンバーの最大質量は線幅との相関が強い。



クランプの内部構造

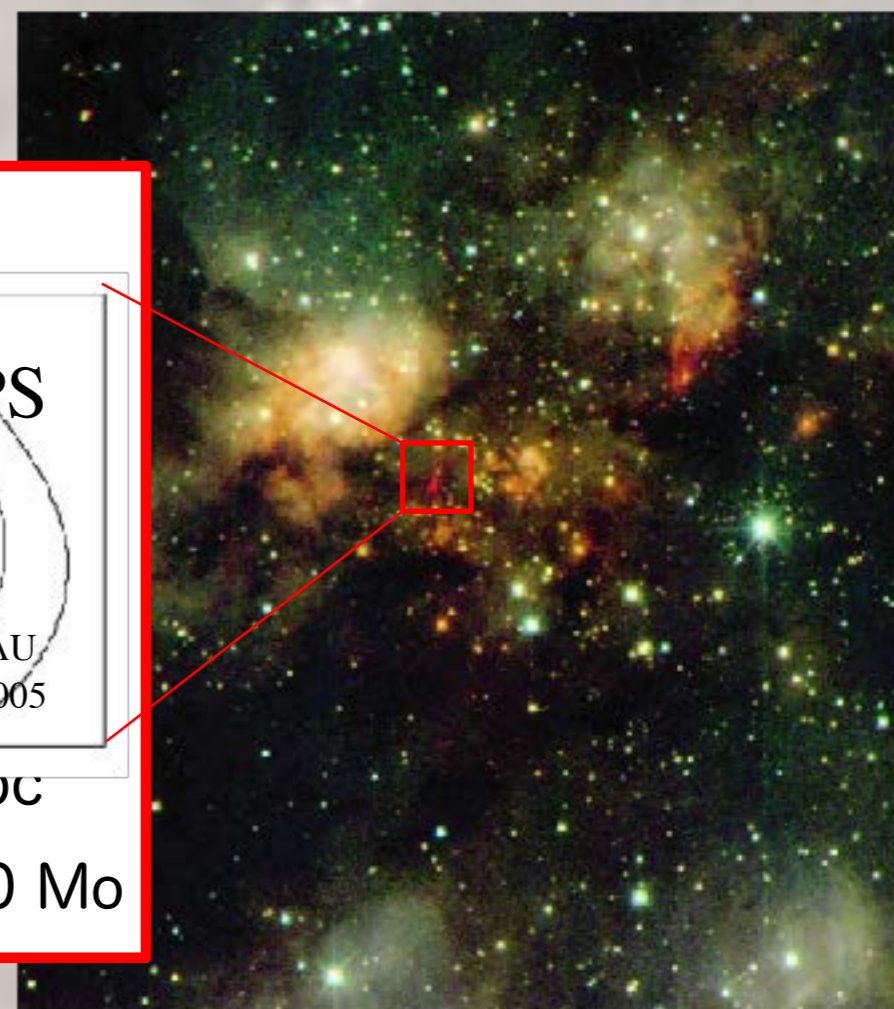
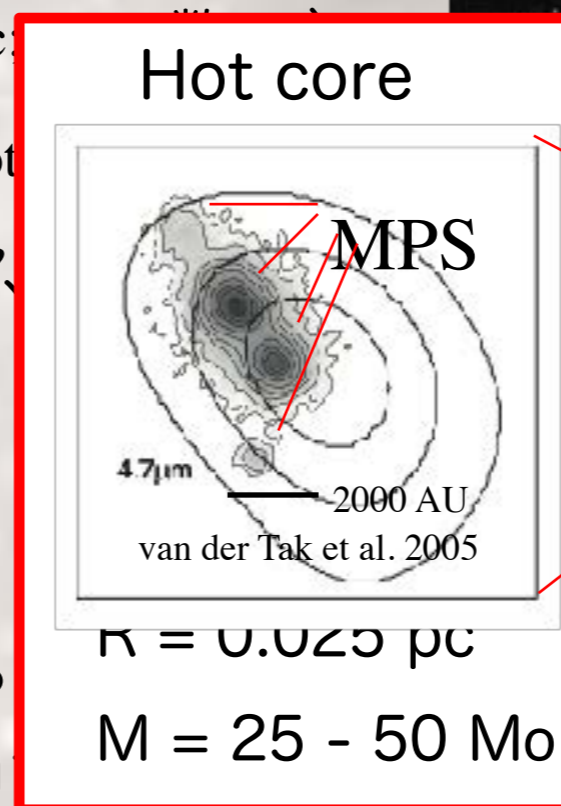
★ クランプ内部にはさらにコンパクトな構造が存在

- ・ 小質量星形成領域：H¹³CO⁺コア (R ~ 0.05 pc
(e.g., Onishi et al. 2002; Umemoto et al. 2003)
- ・ 大質量星形成領域：UC HII領域、ホットコア、

★ コアでの星形成

- ・ 小質量星形成コア：基本的に1個のコアから
- ・ 大質量星形成コア：しばしば1個のホットコ

の星が形成されることもある (e.g., Orion KL ; W3 IRS5)

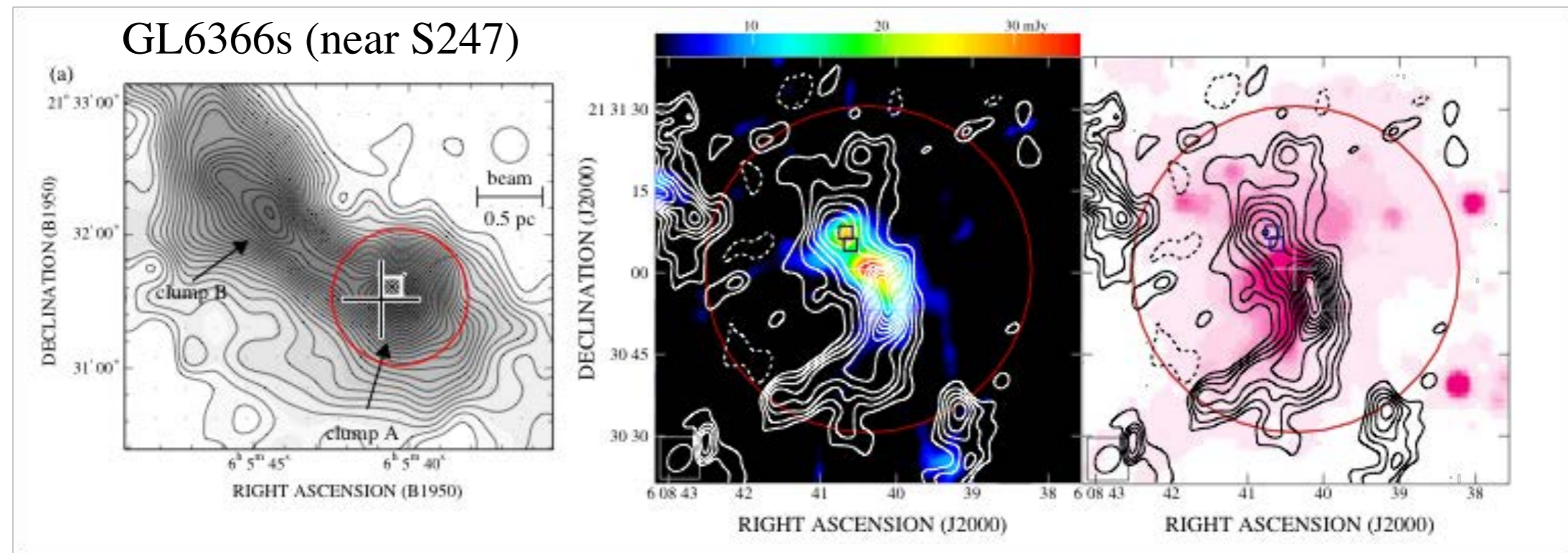


クランプ全体で数十個以上の星を形成するには・・・

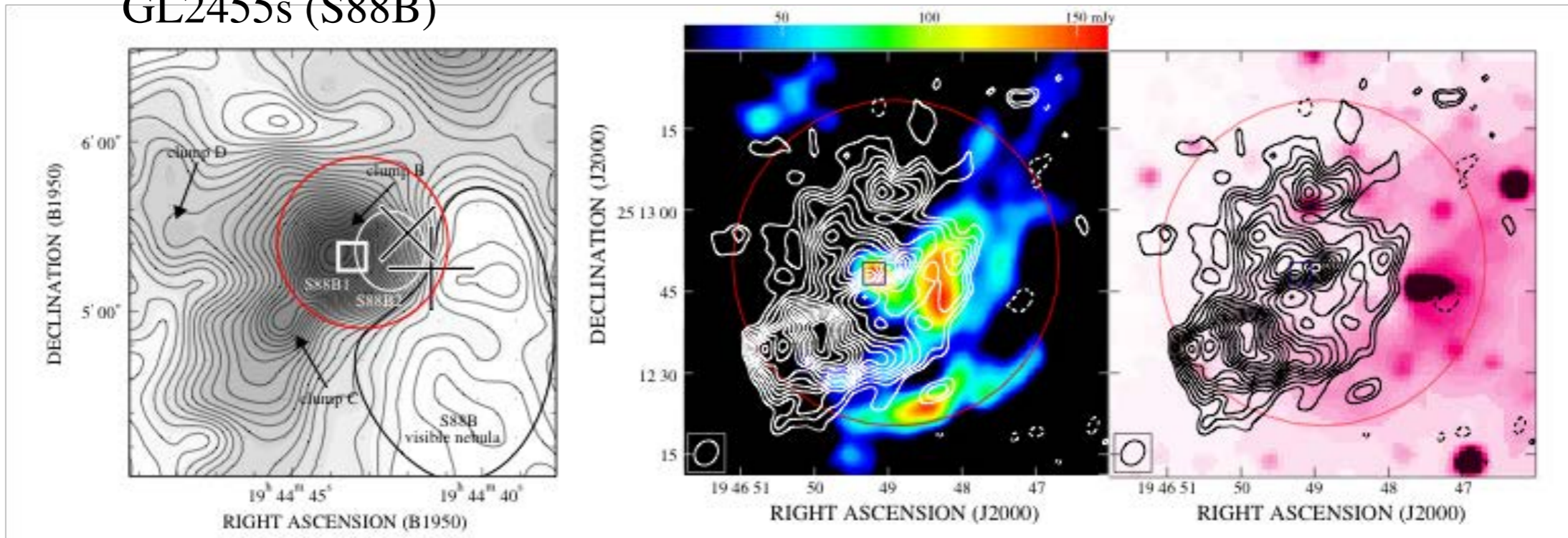
クランプ内に0.05pcスケールのコア構造が多数存在するはず！

クラump内部構造：コア構造

GL6366s (near S247)

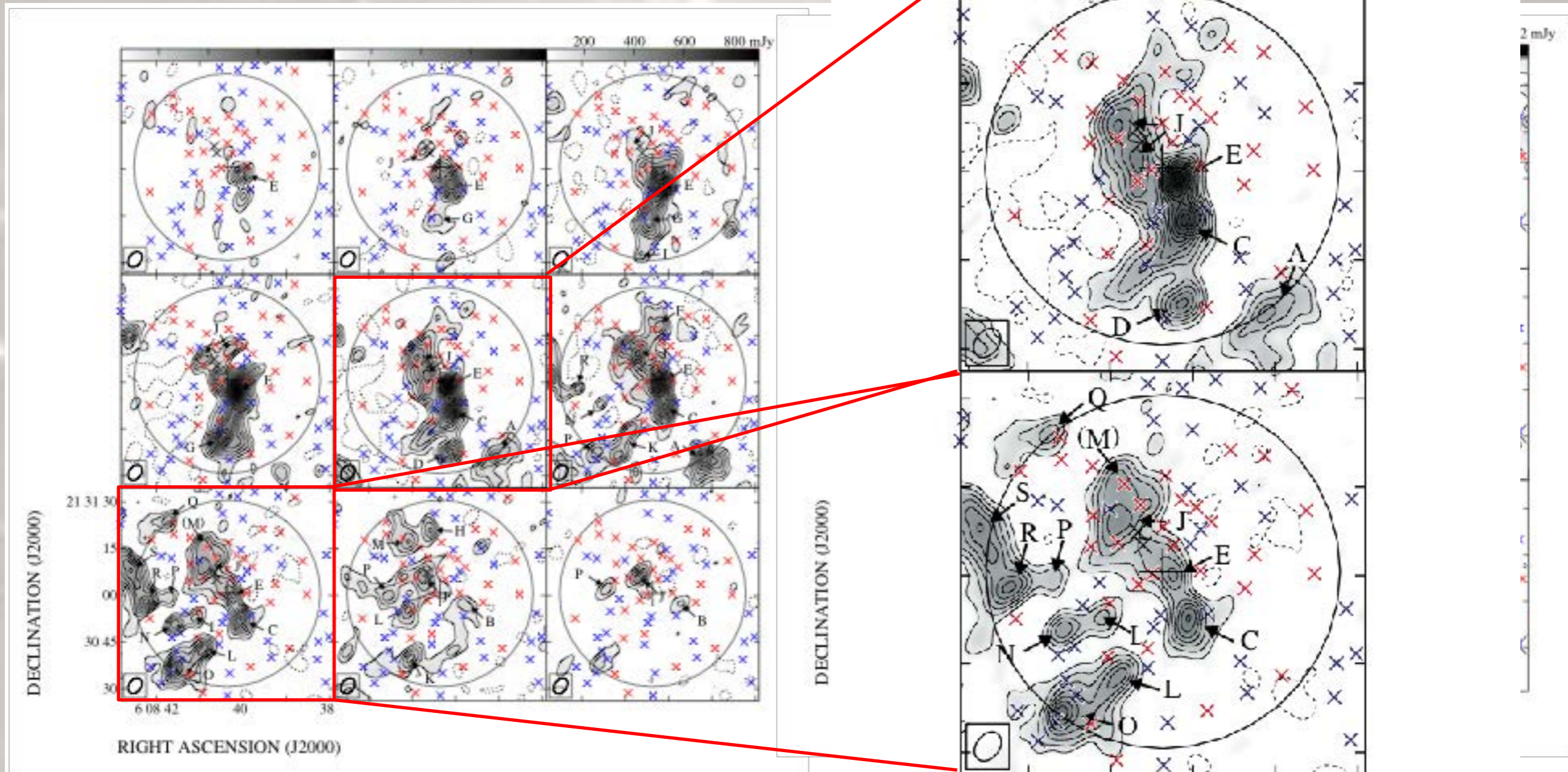


GL2455s (S88B)

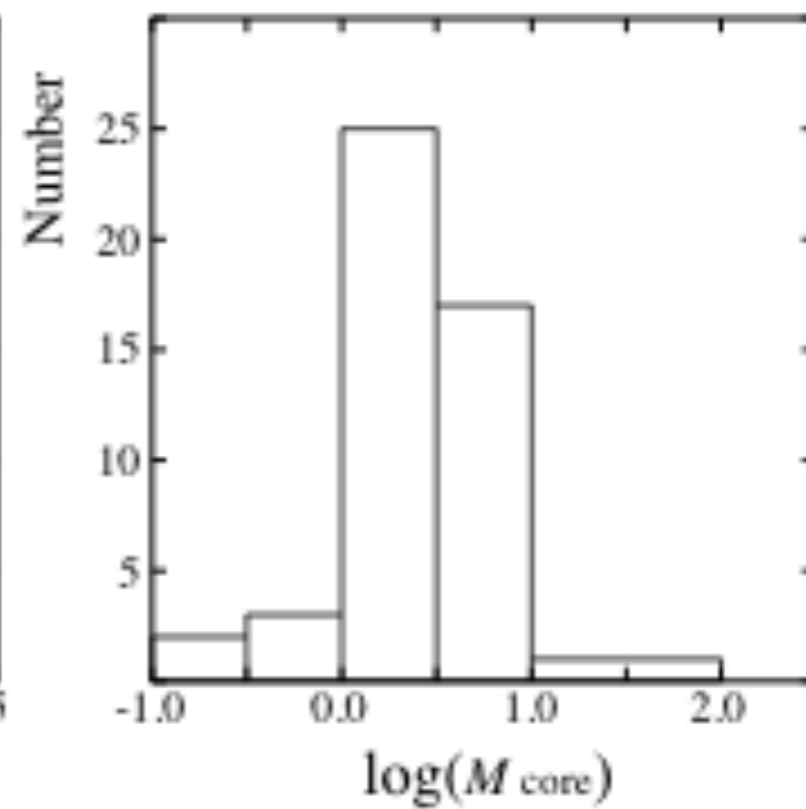
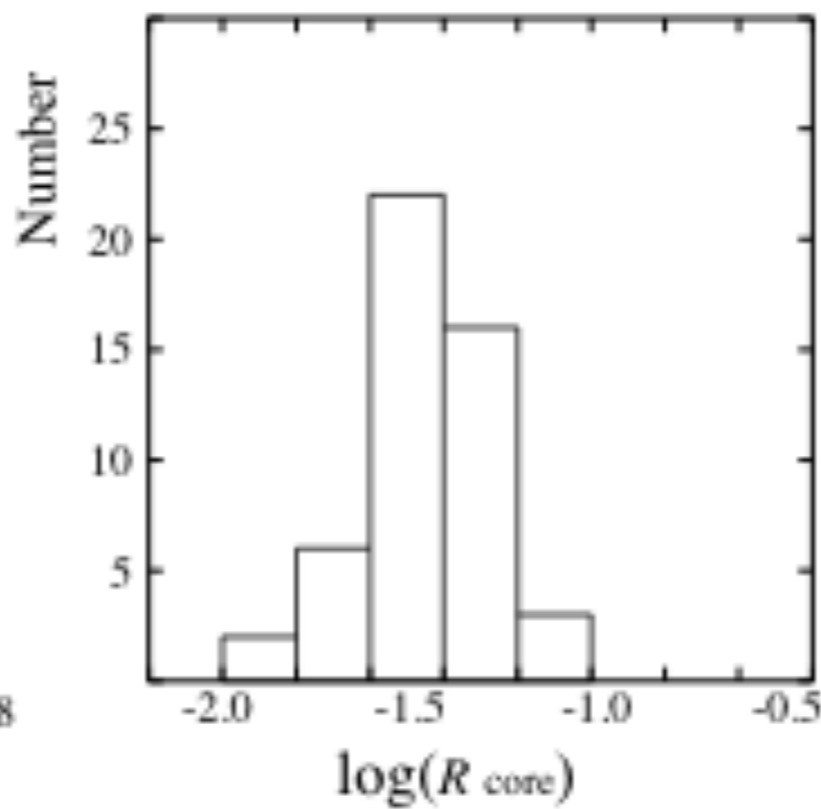
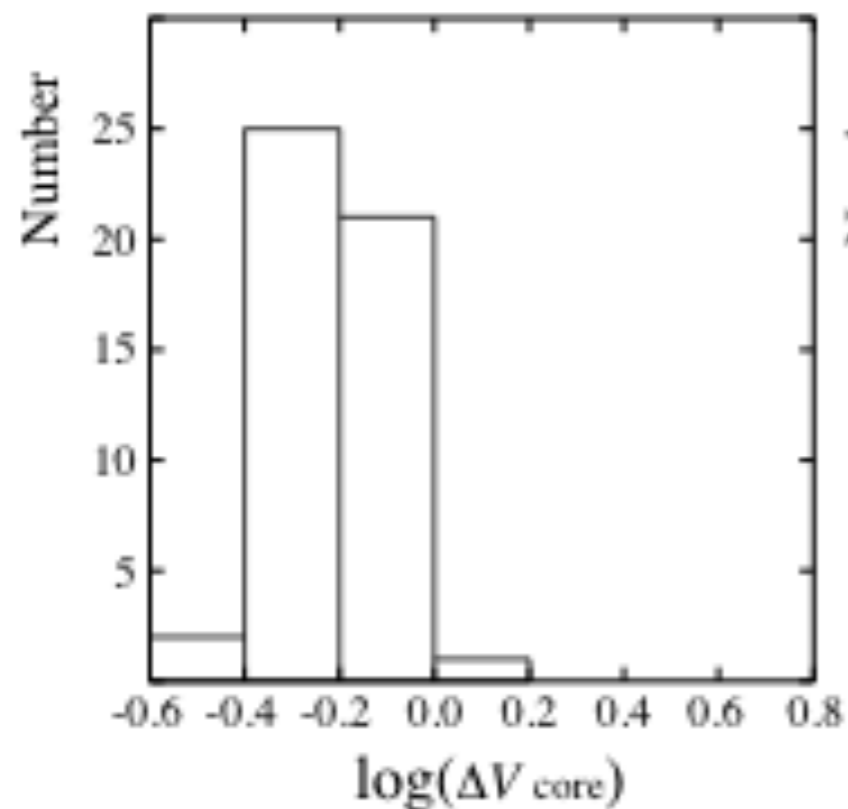
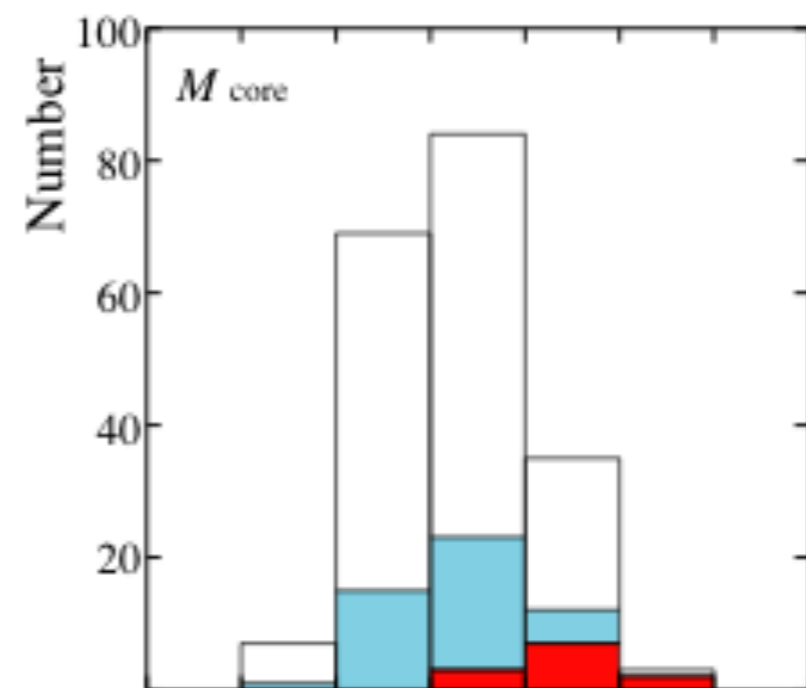
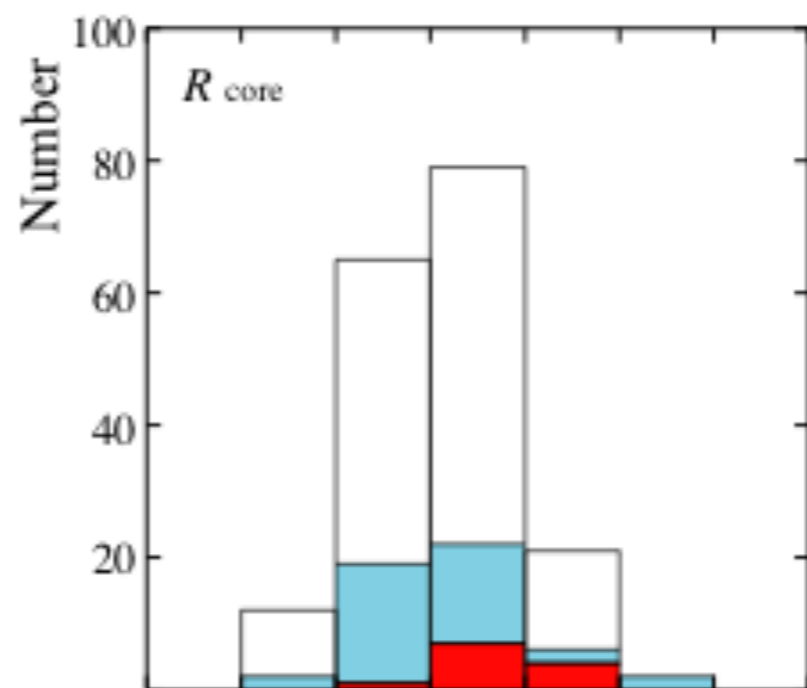
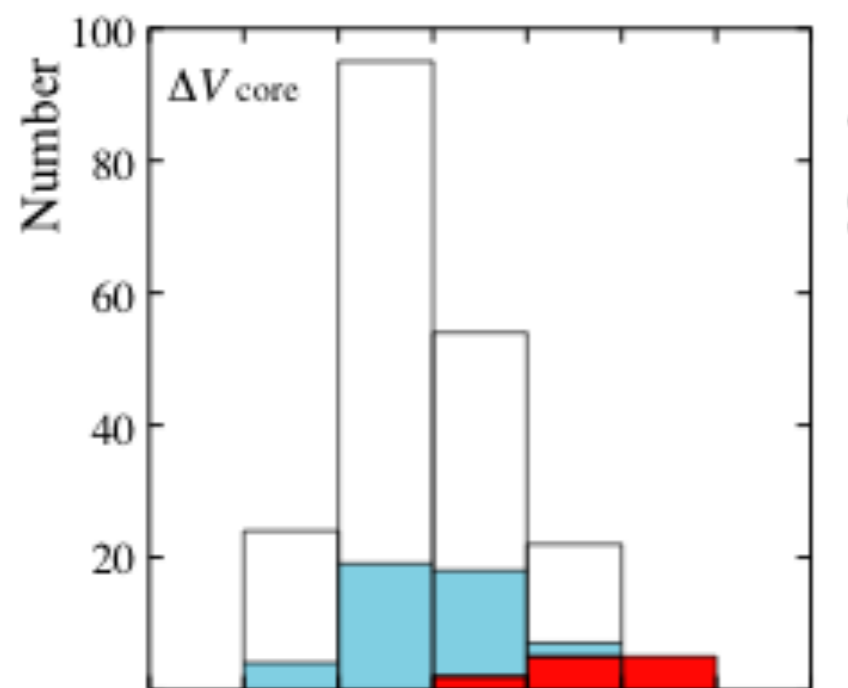


クランプ内部構造：コア構造

GL6366s (near S247)



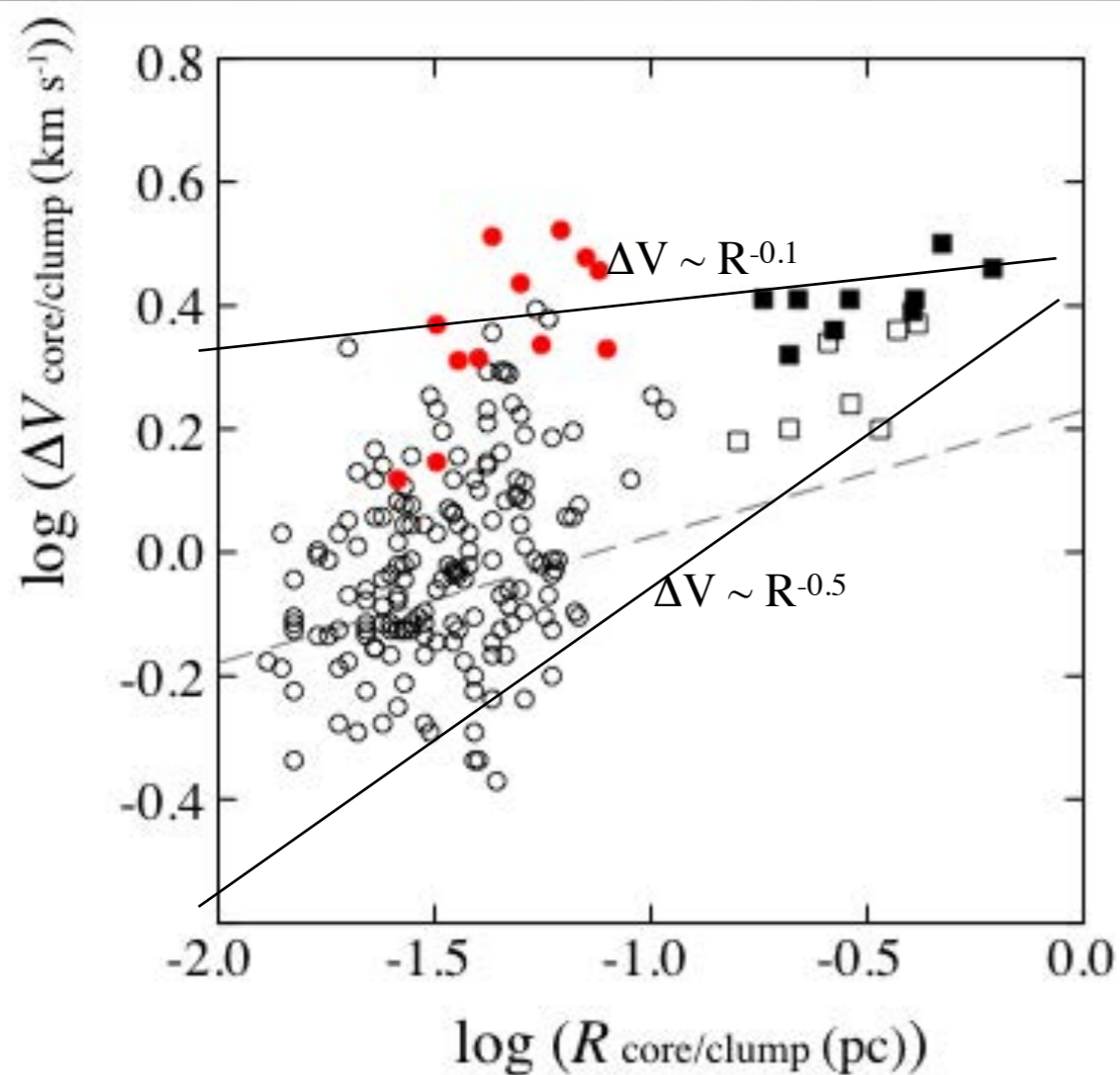
コア構造の物理量



物理量関係

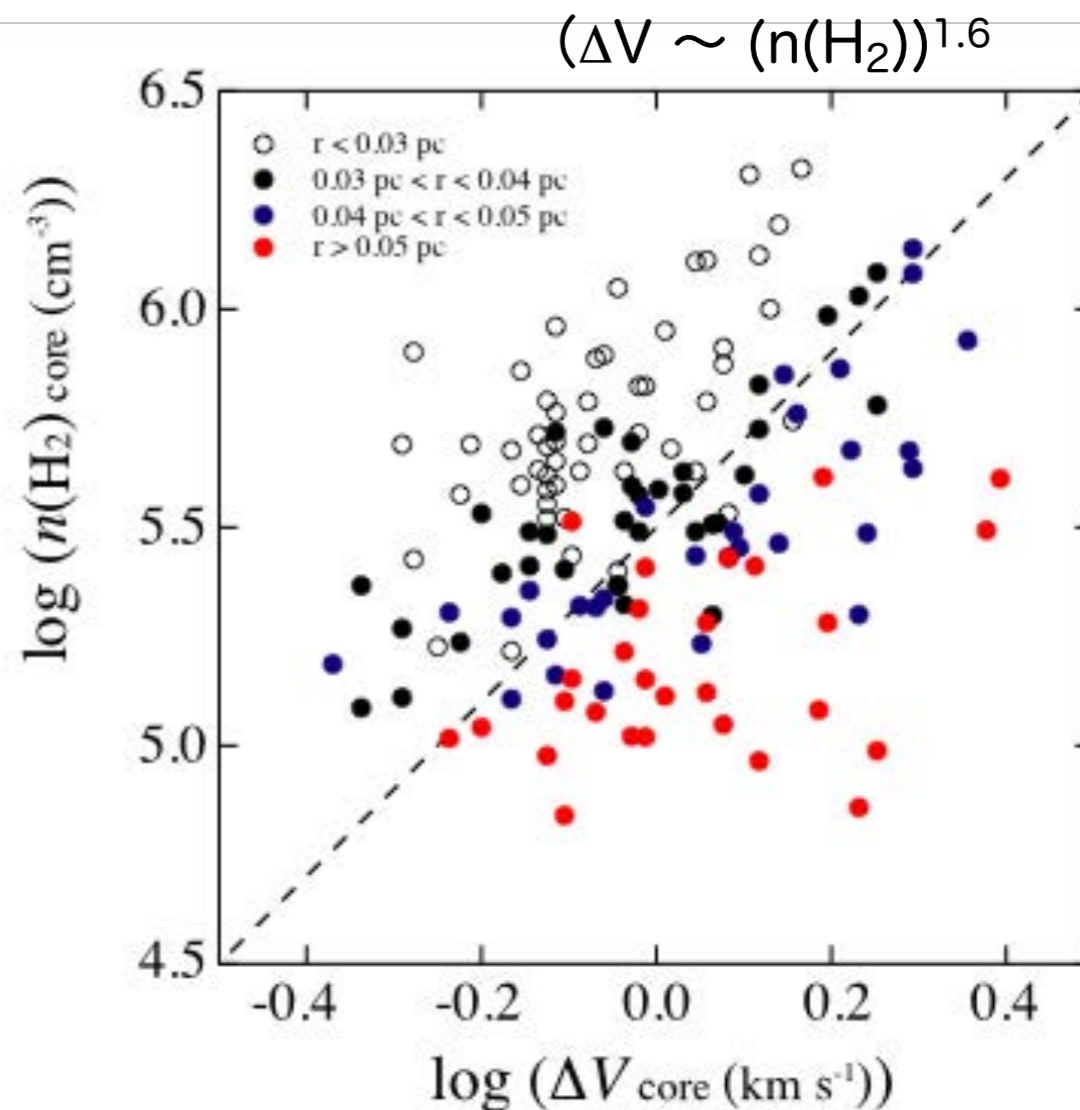
★ サイズ-線幅関係

- ・ 広い範囲に線幅が分布
- ・ 大きな線幅： $\Delta V \sim R^{0.1}$
- ・ 小さな線幅： $\Delta V \sim R^{0.5}$



★ 線幅-密度関係

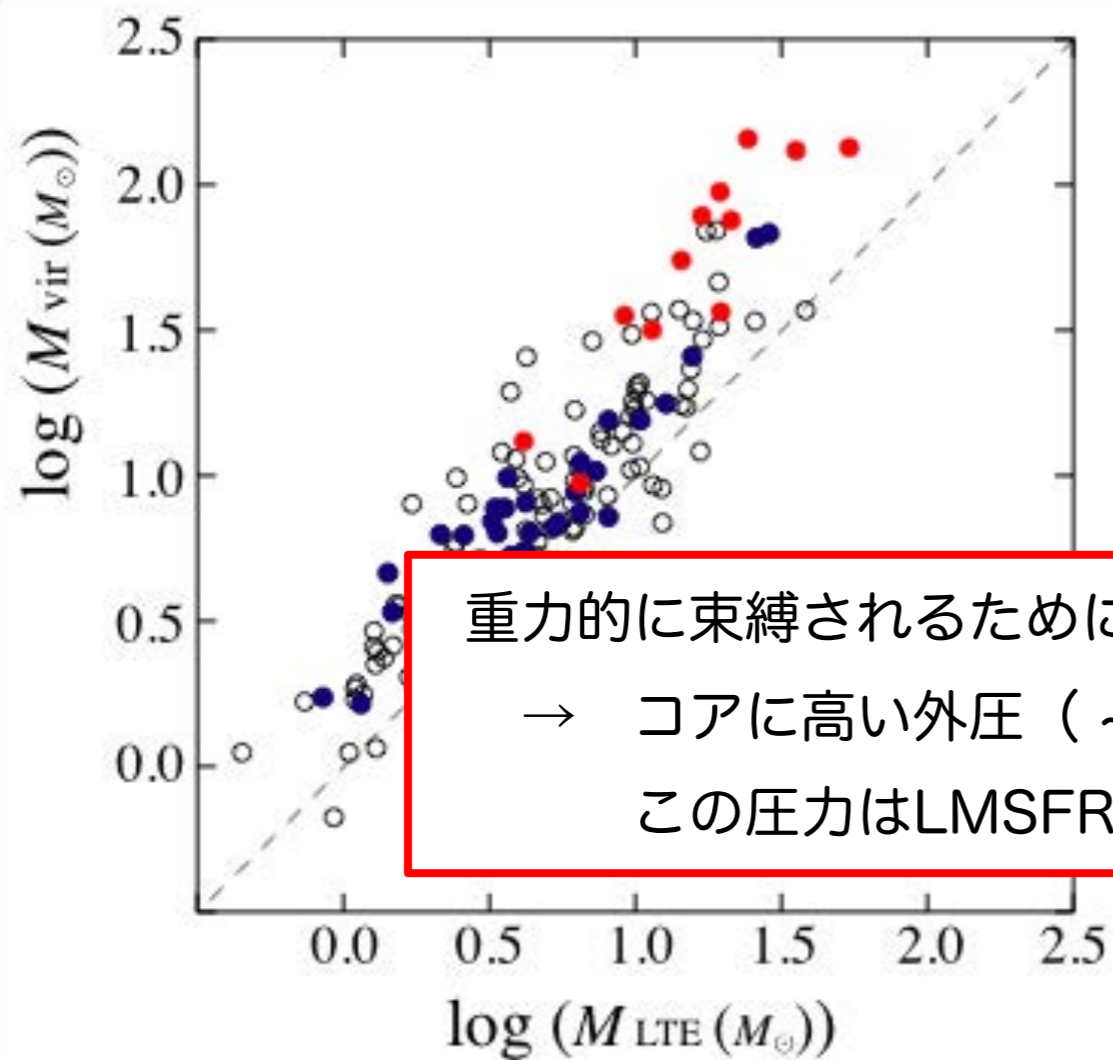
- ・ 弱い関係あり
- ・ クランプでの関係よりやや緩やか



コア構造

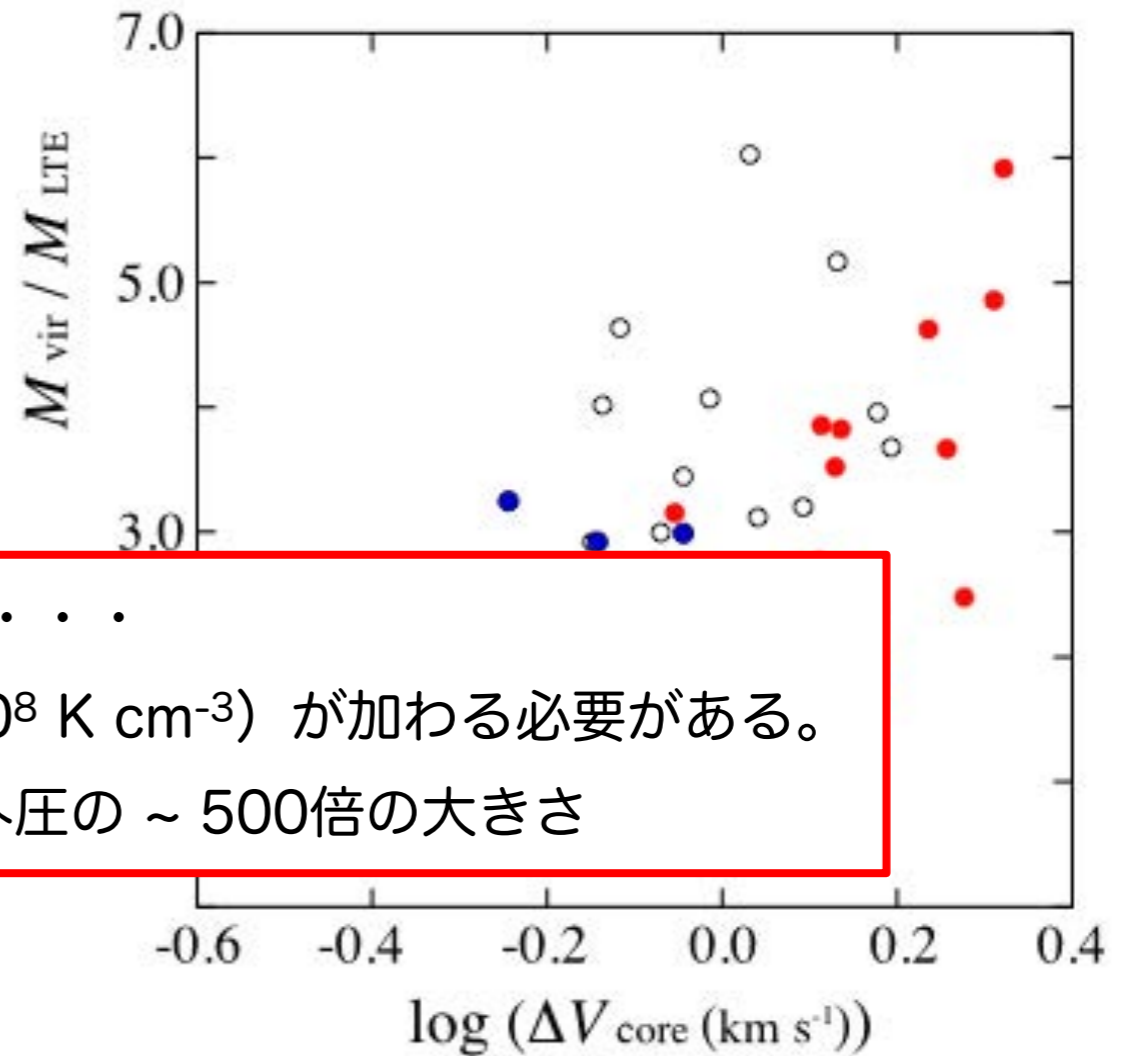
★ ビリアル関係

- M_{vir} が M_{LTE} よりやや大きい ($M_{\text{v}} \sim 1.5 M_{\text{LTE}}$)
- 星形成コアと星なしコアで大きな違いはない (大質量星形成コア以外)
- コアの線幅が大きくなるにつれ、 $M_{\text{vir}}/M_{\text{LTE}}$ も上昇



重力的に束縛されるためには・・・

- コアに高い外圧 ($\sim 10^8 \text{ K cm}^{-3}$) が加わる必要がある。
この圧力はLMSFRの外圧の ~ 500 倍の大きさ



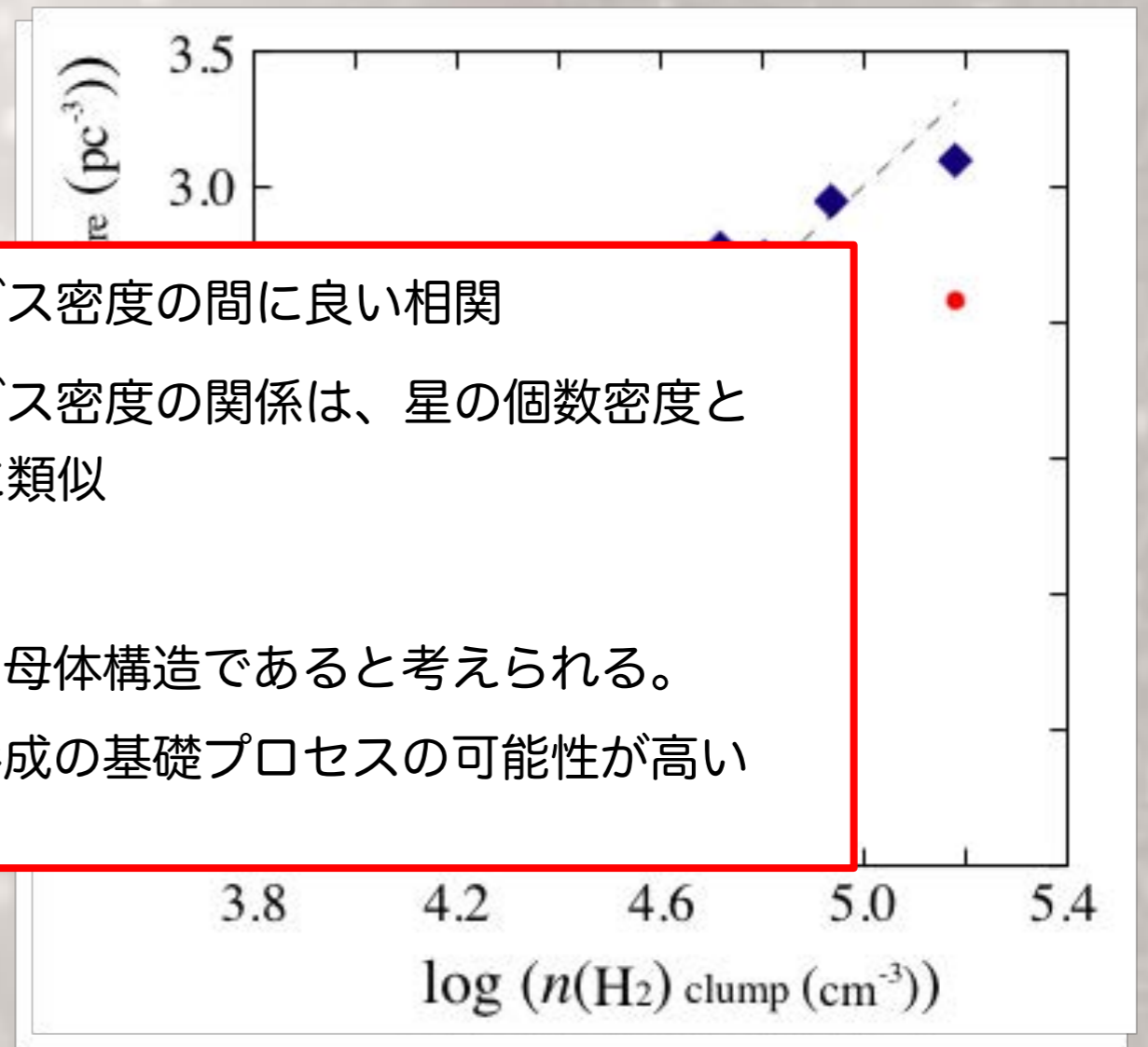
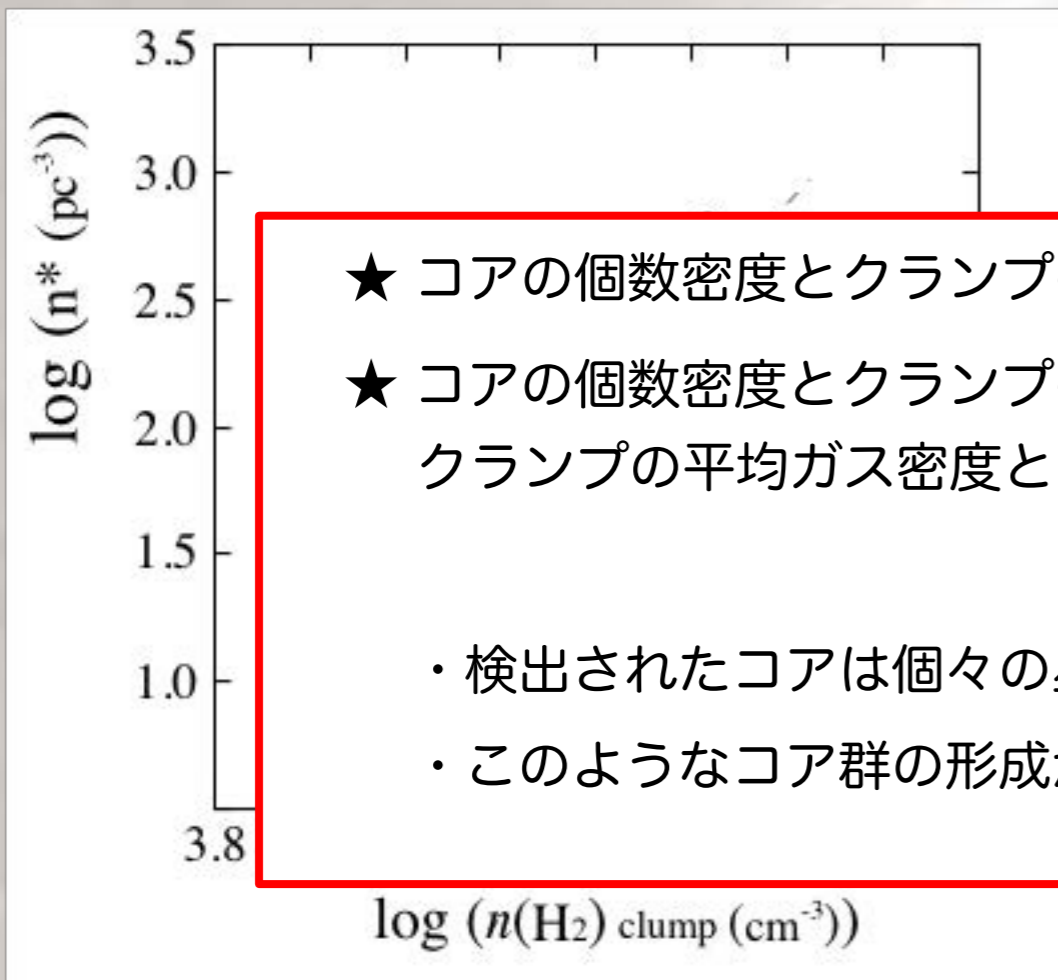
コア構造とクラump構造

★ クラump

- ・ ガスの平均密度と星の個数密度に良い相関がある ($n^* \sim n(\text{H}_2)^2$)

★ 星とコアの関係

- ・ 1個のコアから1個（または多重星）の星が形成されるなら・・・
 - クラumpの平均密度とコアの個数密度の間には関係があるはず。



- ★ コアの個数密度とクラumpの平均ガス密度の間に良い相関
 - ★ コアの個数密度とクラumpの平均ガス密度の関係は、星の個数密度とクラumpの平均ガス密度との関係に類似
- ↓
- ・ 検出されたコアは個々の星形成の母体構造であると考えられる。
 - ・ このようなコア群の形成が星団形成の基礎プロセスの可能性が高い

Conclusion (Cluster formation and Dense gas)

○ the formation of the cluster-structure --- dense clump

★ クランプの物理状態

- ・ほとんどのクランプがビリアル状態
→ クランプは概ね重力的に束縛された状態
- ・大質量（原始星）が付随したクランプの線幅は他のクランプ（小中質量星形成）より大きい（大きな内部運動を保持）
- ・クランプの線幅の増加に伴い、クランプの平均密度も増加

★ クランプ内での星形成

- ・クランプの平均ガス密度の増加に伴い、クランプ内の星個数密度も増加：
 $n^* \sim n(\text{H}_2)^2 \cdot \cdot \cdot \text{Jeans instability } (\sim n(\text{H}_2)^{1.5})$
→ 星団形成は重力不安定による構造進化により形成？
- ・クランプで形成される星の最大質量は、クランプの線幅（内部運動）に依存

Conclusion (Cluster formation and Dense gas)

○ the formation of the stars --- dense core

★ 高密度コアの物理状態

- ・ クラump内に複数の高密度コアが存在
- ・ コアの質量と線幅の分布範囲が非常に広い
- ・ コアの線幅の増加に伴い、コアの平均ガス密度も上昇
- ・ ほとんどのコアのビリアル質量がLTE 質量より大きい
→ コアを束縛するには大きな外圧 ($\sim 10^8 \text{ K cm}^{-3}$) が必要

★ コアとクラumpの関係

- ・ クラump内におけるコアの個数密度はクラumpのガス密度に伴い増加：

$$n^* \sim n(\text{H}_2)^{1.6} \cdot \cdot \cdot \text{Jeans instability } (\sim n(\text{H}_2)^{1.5})$$

- ・ コアの個数密度とクラumpのガス密度との関係と星の個数密度とクラumpのガス密度との関係が類似

→ クラump内でコア群構造が形成することが星団形成の基礎プロセスの可能性

