

Embedded Clusters

Joana Ascenso 2018

GMCsゼミ 第16回

2018/12/06

原田遼平

Abstract

- 過去10年間に、分子雲スケールでの星形成研究の増加
- 分子雲中での一貫した星形成の基本単位として長い間認識されている“Embedded clusters”は、数十pcに渡るcluster complexes に存在。
- “Embedded clusters”の特性と、星団スケールでのプロセスではなく、分子雲スケールとして星形成を見ることの意義について説明する。

1 Introduction

- 分子雲のダストの多い環境にある“Embedded clusters”は、光では見えず、より長い波長では見える。
 - それらは形成された最も若い星が含まれているため、星形成過程の貴重なプローブ
 - 観測的には星形成の全数調査による大幅な飛躍
- (2MASS, Skrutskie et al., 2006), (c2d, Evans et al., 2003), (GLIMPSE, Churchwell et al., 2009; Benjamin et al., 2003), MIPS GAL (Carey et al., 2009), (*Herschel*, André & Saraceno, 2005)

2 What is an Embedded Cluster?

2.1 Defining “*embedded*”

- embedded star (or cluster)は、母体分子雲に閉じ込められているもの
- ダスト粒子によって減光され、光では観測されないが、若い星が放出する近赤外線で見ることができ、ダストも透明
- 星は時間とともに母体のガスとダストを散逸させるので、embedded star (or cluster)は必然的に若い
- 星団が光で見えるようになるのに十分な物質を取り除く標準的なタイムスケールは約 5 Myrである (Leisawitz et al. 1989)
- だが、大質量星はHII領域を作ってより早く散逸させるので、embeddedだからといって星団の均質の年代のサンプルの基準ではない

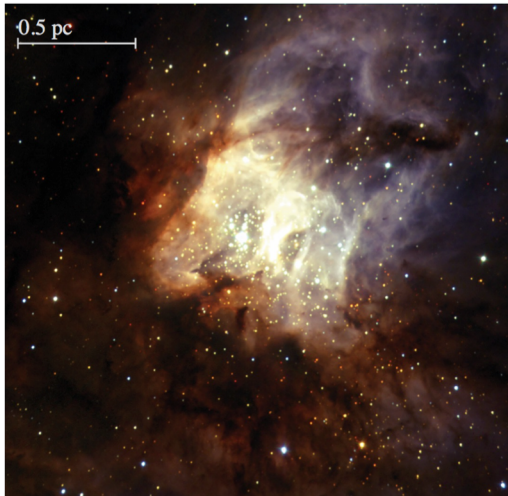


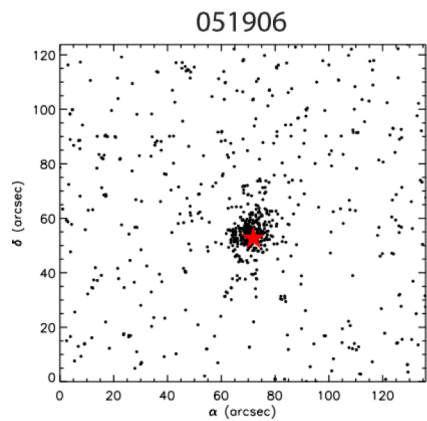
Fig. 1, RCW 38, young embedded cluster

2.2 Defining “cluster”

- 数百万年よりも若い星は、古い星と区別できる性質を持っている
- したがって、星団の観測研究は、通常、近赤外やX線を分析して若い星 (YSOs) を同定し、次に星団を見つける

2.2.1 Morphological criteria

- 経験的に、星団は物理的に同じ場所にある星の過密度
 - よって表面密度のピークを目で Finder と同じくらい簡単 (例えば、背景上で 3σ の星面密度。Ivanov et al. 2002)
- (その他には the minimum spanning tree (MST) algorithm)



2.2.2 Dynamical criteria

- Lada & Lada (2003) は35以上のメンバーを含み、その密度が $1.0 M_{\odot} \text{pc}^3$ よりも高い場合、星団とみなされる。
- 星団の定義は、星団の年齢、その質量、およびそのビリアル半径に強く依存
- 測光観測から星団の年齢を決定することは、主に星団までの距離に依存し、現在の視差測定ではあまりにも遠すぎる。

(例えば、最近の文献 (Ascenso et al., 2007a; Carraro et al., 2013; Zeidler et al., 2015; Rauw et al., 2011) においても、Westerlund 2までの距離は2.8から8 kpcの範囲である)

- ESAのmission Gaia (Gaia Collaboration et al. 2016) は貴重
(<https://news.mynavi.jp/article/20180502-624845/>)
- 結果として、多くの既知の星団の力学的状態に関する我々の知識は、依然として経験に基づいた推測の域を出ない。
- 我々は、現時点では、束縛、非束縛星団の統計的に正確な比較を行う立場にない。
- せいぜい、星団を密度、質量、光度、年齢の順並べ、異なる環境下での星形成の物理的条件を制約するための相関関係を見つけることぐらい。

3 Morphology and Structure

- Embedded clustersにはさまざまな形がある。
 - “centrally condensed” or “hierarchical” (Lada & Lada, 2003)
- 異なる形態は母体クラウドの異なる条件によって生成され、それらは異なる物理現象を反映する。大規模な時間スケールでの星団の生存を予測することができる。

3.1 *Observational challenges*

- 不完全性は、形態学的研究の敵
- 星形成領域に典型的な星間減光と明るい星雲は、Embedded clusters内で変化し、検出限界と完全性を空間的に変化させてしまう。
- フィールド星からのまぎれ込みも重要です。星団メンバーがフィールド星とに区別されない限り、特に低面密度星団の場合には、空間分布の分析に大幅な偏りが生じる可能性がある。

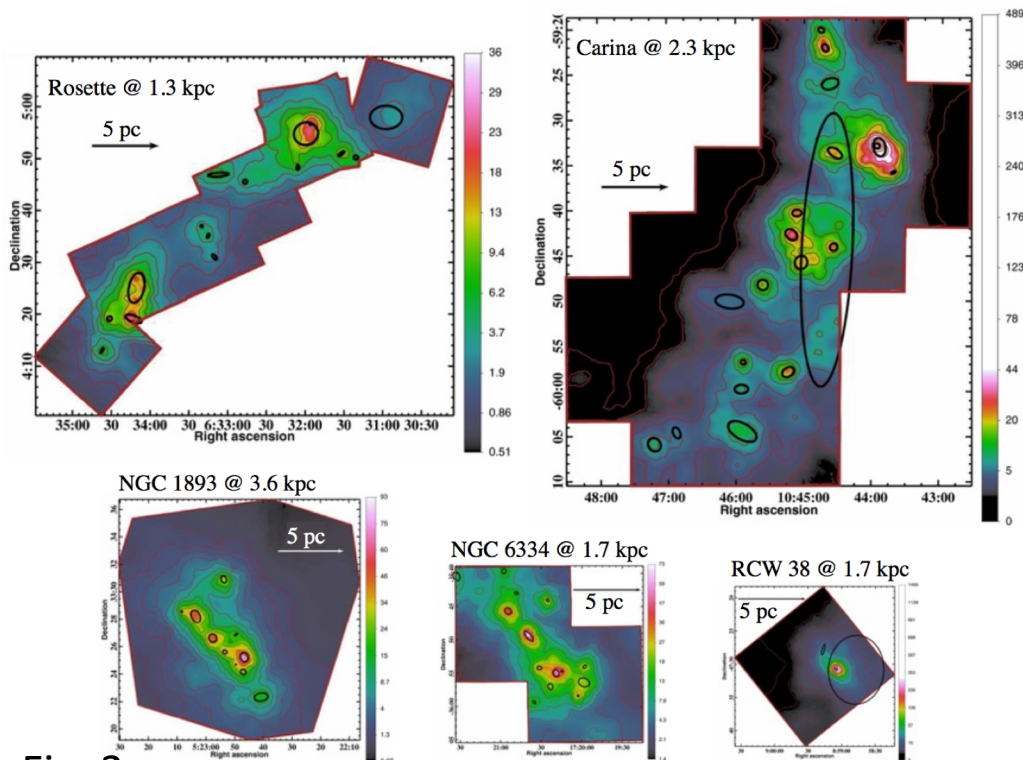
3.2 Cluster morphologies

- “centrally condensed”
 - 中心に凝縮していると認識される星団は、一般に比較的孤立した星団であり、ほとんどのメンバーは空の比較的小さな投影領域に位置する。
 - 表面密度は、球状星団と同様に滑らかな関数として中心から減少する。
- “hierarchical”
 - Cartwright & Whitworth (2004) は、星団の形態を特徴づける最も強力なパラメーターとして Q パラメーターとなるものを提案
 - $\bar{m}$ と $\bar{s}$ との間の比として定義され、サブクラスタリングの程度を定量化することができ、centrally condensed と hierarchical morphology を区別できる。

3.3 The molecular cloud scale

- いくつかのサーベイは個々の星団を対象としており、YSO質量スペクトルのlow-mass endまで調査できるほど十分深い観測。
- 観測の時間的制約と空間分解能の限界のために、これらの調査は、比較的近傍で低質量星団、低質量の雲に限られる。
- massive endは2つのサーベイ Carina, Cygnus X complexes (Preibisch et al. (2014) and Reipurth & Schneider (2008, see also Wright et al. (2014))

3.3.1 Cluster complexes



- ほとんどが単一の星団ではなくCluster complexesである。
- 星団のサイズは約1 pc

Fig. 3 Kuhn et al. 2014

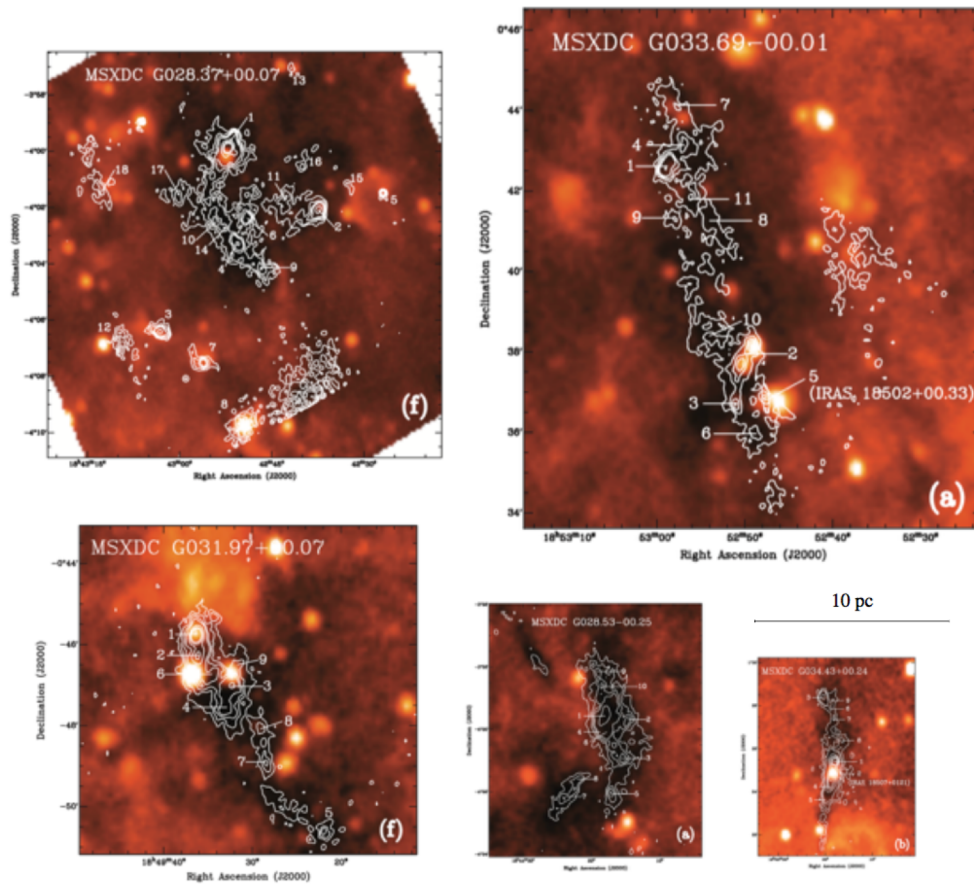


Fig. 4 Rathborne et al. 2006

- Infrared dark clouds (IRDC) は星団の前身
- 細長い構造で複数のピークをもつ密度分布
- Cluster complexes と似ている。
→ Cluster complexes がクラウドの力学的タイムスケールよりも若い。そうでなければ、球状の形状をとる。

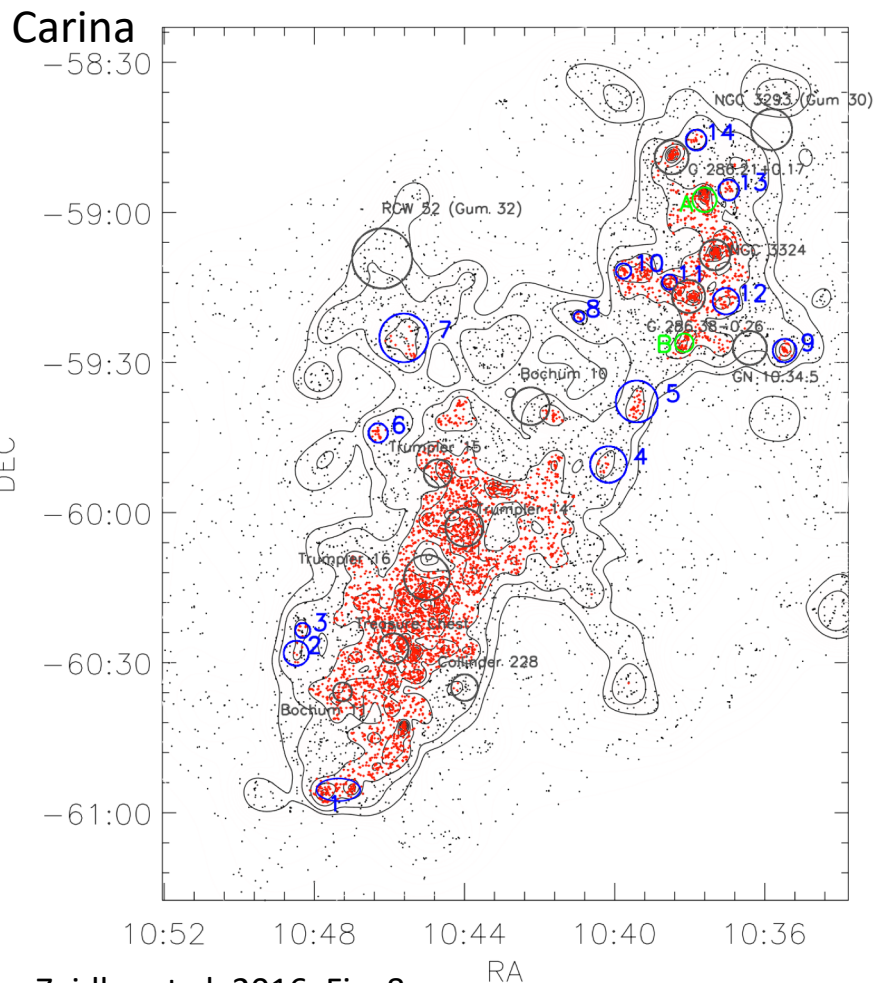
3.3.2 Isolated Clusters

- いくつかのEmbedded clustersは比較的孤立(Westerlund 2, NGC 3603, NGC 6611, and RCW 38) 。サイズは1 pcかそれ以下。
- これらの孤立星団はCluster complexesの個々の星団より大規模



Image credit: X-ray: NASA/CXC/SAO/Sejong Univ./Hur et al; Optical: NASA/STScI

3.3.3 Unclustered young stars



Zeidler et al. 2016, Fig. 8

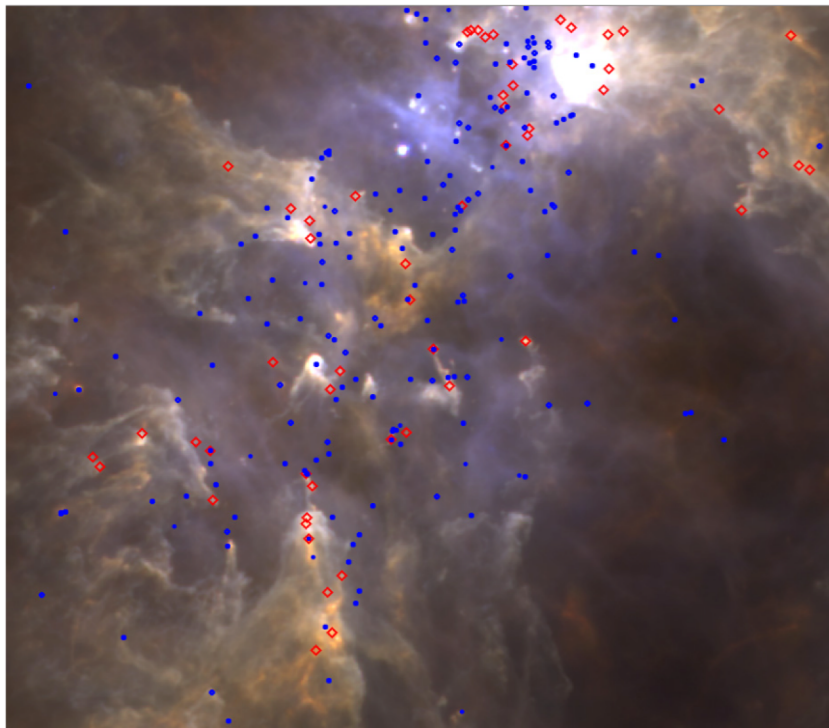
- すべての星が星団のコアの中にあるわけではなく、むしろ分子雲の全体にわたって比較的孤立して分布している
- フィールド星や遠方銀河からの除去が重要
- 孤立天体の割合は10~20%程度
(Porrás et al., 2003; Koenig & Leisawitz, 2014; Gutermuth et al., 2009; Evans et al., 2009)

1. 比較的孤立して現在の場所で形成
2. 近くの星団から放出された可能性
3. 同じクラウドで形成された少し古い星団の可能性

これらの星の少数は大質量星のフィードバックによって作られたbubbleやpillarの端に見られる。

3.3.3 Unclustered young stars

Carina



- すべての星が星団のコアの中にあるわけではなく、むしろ分子雲の全体にわたって比較的孤立して分布している
- フィールド星や遠方銀河からの除去が重要
- 孤立天体の割合は10~20%程度
(Porrás et al., 2003; Koenig & Leisawitz, 2014; Gutermuth et al., 2009; Evans et al., 2009)

1. 比較的孤立して現在の場所で形成
2. 近くの星団から放出された可能性
3. 同じクラウドで形成された少し古い星団の可能性

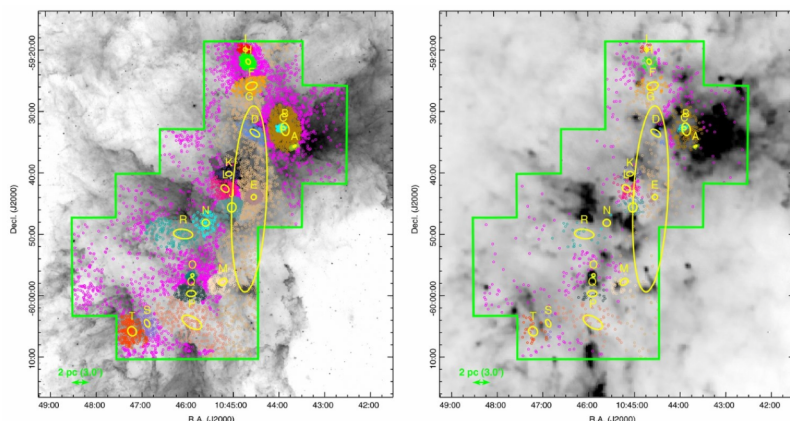
Gaczowski et al. 2013, Fig. 10

これらの星の少数は大質量星のフィードバックによって作られたbubbleやpillarの端に見られる。

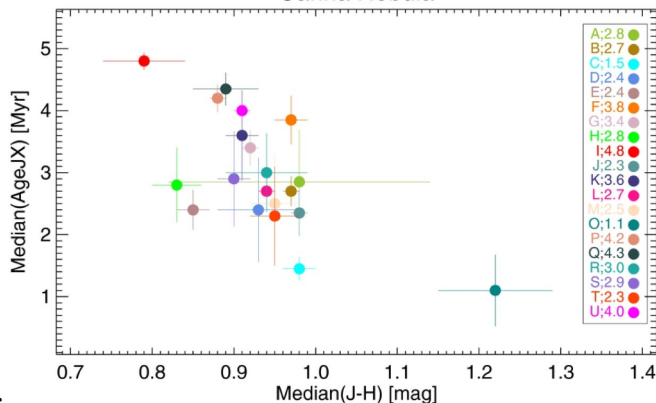
4. Age Spreads

- 分子雲は1世代の星を形成するわけではない
- 年齢の決定には多くの不確実性があることは留意

4.1 *Age spreads in cluster complexes*



Carina Nebula



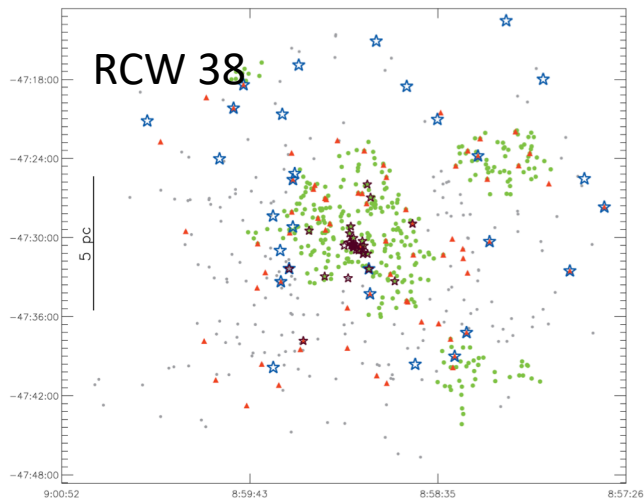
- Cluster complexesは、クラウド内の星形成の進行を調べるのにいい。
- 異なる年齢の星団をもつが、年齢の広がりあまりなく、年代順にもなっていない。
- 内部の誘発が星形成の支配的なメカニズムであることと矛盾
- 星団間の年齢差は1 Myr以下で、分子雲は長い休みはとらない

- 外部事象 (a spiral density wave, nearby supernova events, or cloud-cloud collisions) は、必ずしも順番でない星団年齢分布を生成可能

Fig. 6
(Getman et al. 2014)

isolated clustersでは

- このタイプの星団はすでに約1~2 Myrであり、進行中の星形成の証拠を示さないため、かなりのage spreadsを持つ複合体を生成するだろう
- Westerlund 2活発な星団形成の唯一の場所であり、このクラウドは多くの複合体を形成する可能性は低い
- 3つのisolated clustersで最も若いRCW 38も、その周辺部で進行中の星団形成の証拠を示しており(Winston et al. 2011)、若い年齢(0.5 Myr)を考えると、この星団はWesterlund 2やNGC 3603よりもCluster complexesに発展する可能性が高い



(Winston et al. 2011, Fig. 15)

4.2 Age spreads in individual clusters

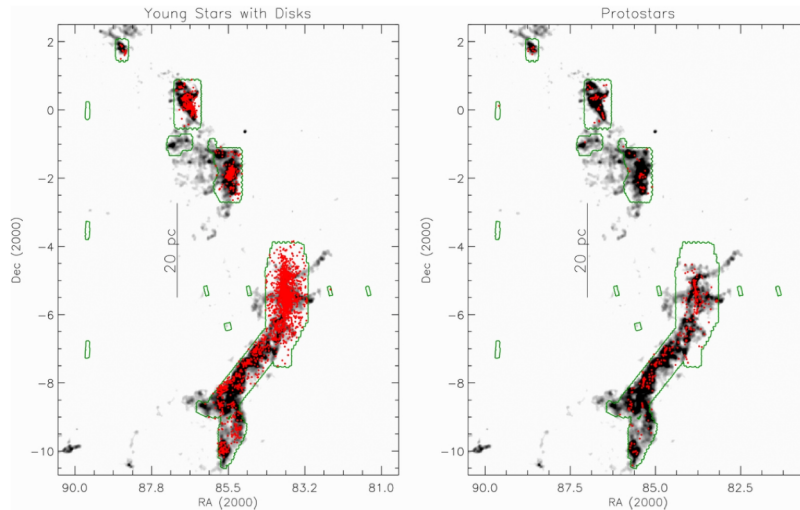
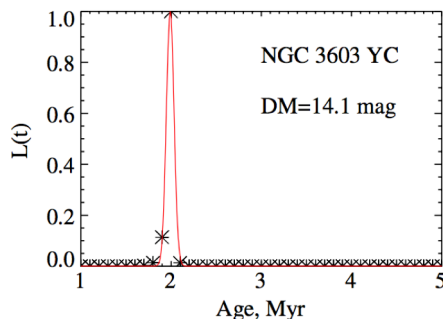


Fig. 7 (Megeath et al. 2012)

- age spreadは非常に小さい
- クラス0/I YSOs は、クラスII, III YSOsより密集



(Kudryavtseva et al. 2012, Fig. 4)

massive clusterでは？

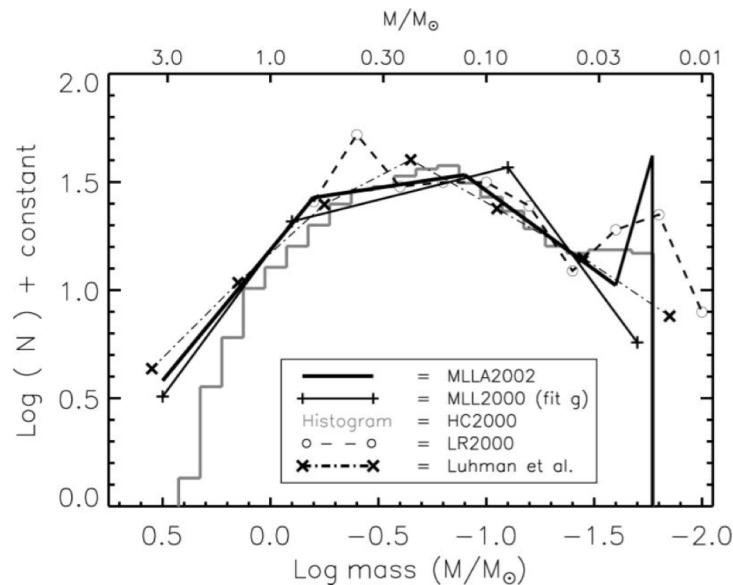
- 顕著なage spreadがない
- 小さい星団の集合体ではなく、starburstシナリオを支持
- どうやってそんなdense gasを集める → Sec. 6

4.3 Age spreads of the unclustered stars

- 非常に若い星や原始星の一部は、クラウド内の静かな領域でフィラメントに沿って見られる。個々の星団スケール(1 pc)では集まっていない。

5 Stellar mass distributions

- 観測された若い星団の恒星質量分布は、初期質量関数(IMF)の良い近似(e.g., Lada & Lada, 2003)
- 大質量星、小質量星のどちらが優先的に形成されるか、もしあれば、最初に形成された星が質量分布にどのような影響を及ぼすかはまだ明確ではない。
- 異なる規模での類似したIMFに対してどのように一貫性を持たせるのかは明らかではない。



(Lada & Lada, 2003, fig. 11)

6 Embedded Clusters and Star Formation

- 個々のembedded clustersは1 Myrより若いのが一般的 (Sec. 4.2)

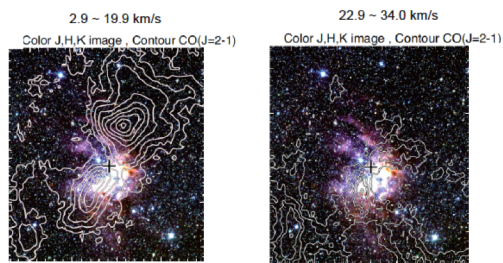
Cloud-cloud collisions (福井先生グループなど)

- Cloud-cloud collisions による大規模星団の急速な形成(NGC 3603, Westerlund 2)
- シミュレーションでboundされた大質量クランプを作れる
- 同様の特徴が小質量のクラウドでも見られる(M 20, RCW 120)
- このシナリオは、高密度ガスを集めるのに特に困難な、孤立した大規模な若い星団の場合に特に魅力的。

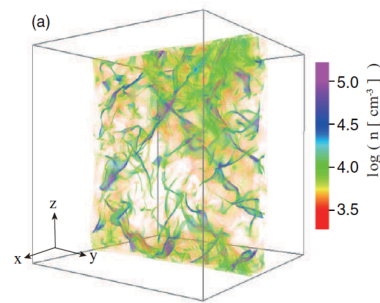
Competing theories (Bonnell et al., 2003; McMillan et al., 2007; Bate, 2009; Maschberger et al., 2010)

- フィラメントに沿って星形成し、ポテンシャルの最も深いところで星団が形成さる
- 星形成に先立って大量のガスを必要とせず、急速に星団を形成する

NGC 3603



Fukui et al. 2014
There are two component clouds
(~13 km/s and ~28 km/s)



Inoue and Fukui 2013

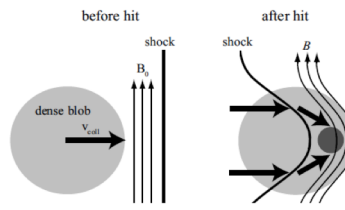
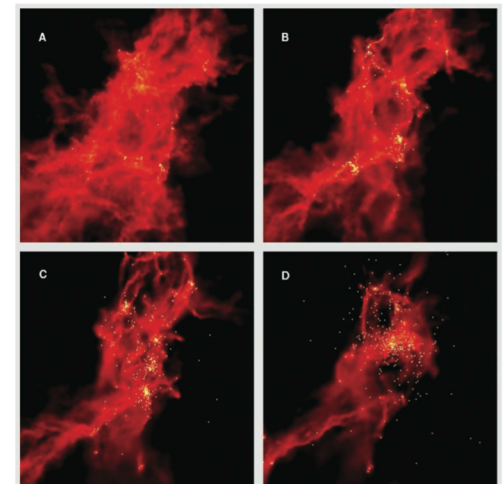


FIG. 1.— Schematics of the gas stream before (left) and after (right) the interaction between a shock and a dense blob. Because the deformed shock wave leads to a kink of stream lines across the shock, stream lines are headed toward convex point of the deformed shock wave.



Bonnell et al. 2003