



巨大分子雲からの 集团的星団形成

藤井 通子

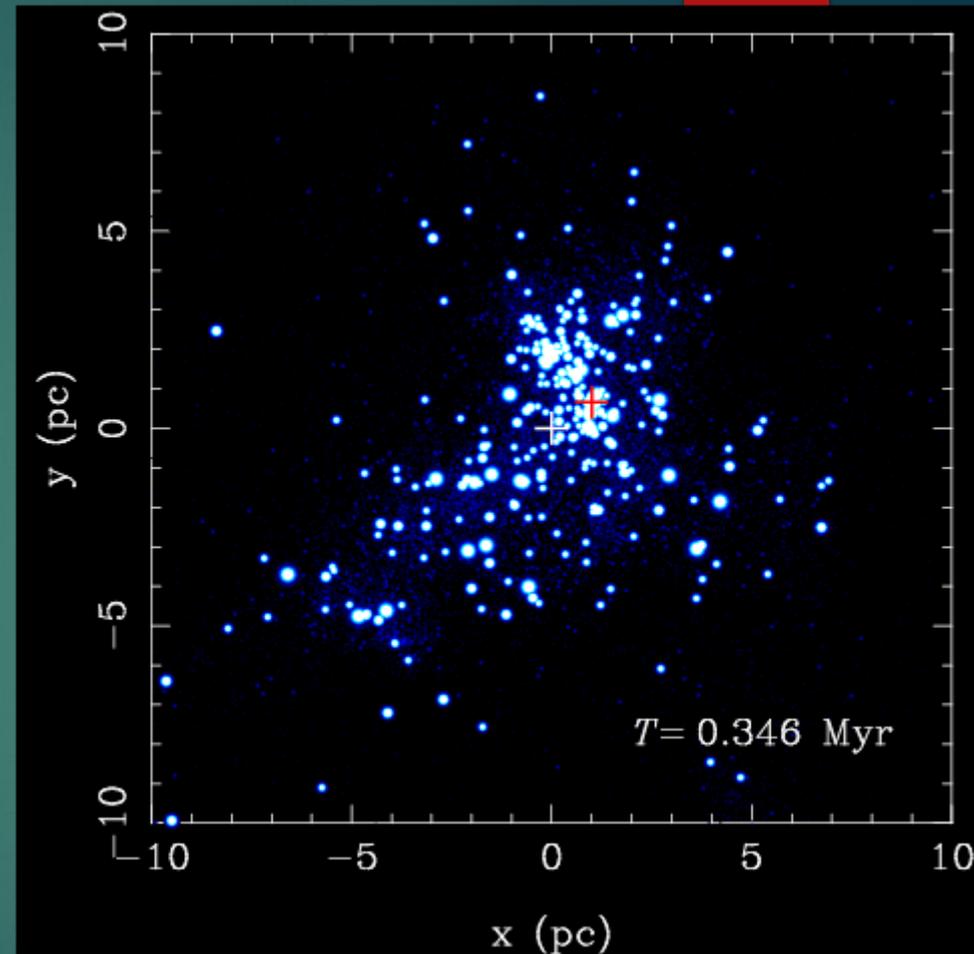
国立天文台 理論研究部 (国立天文台フェロー)

今年度の成果

- ▶ クランプの合体による若くてコンパクトな大質量星団 young massive clusterの形成
 - ▶ Fujii & Portegies Zwart (2013), MNRAS
- ▶ 質量関数のある星団のコアコラプス時間
 - ▶ Fujii & Portegies Zwart (2014), MNRAS
- ▶ 乱流を持つ分子雲から生まれた星団の質量関数
 - ▶ Fujii & Portegies Zwart (2013), MNRAS 投稿中

発表の概要

- ▶ 分子雲の流体計算
 - 星形成を仮定
 - 恒星系のN体計算
 - ▶ より現実的な初期条件
 - ▶ より大規模な星・星団形成領域
- ▶ Young massive cluster (YMC) と散開星団を同時に再現
 - ▶ ただし、高密度領域で星形成効率50%以上が必要
- ▶ 星団の質量関数
 - ▶ 星の質量関数とself-similar?
- ▶ 銀河全体の星団の質量関数を再現



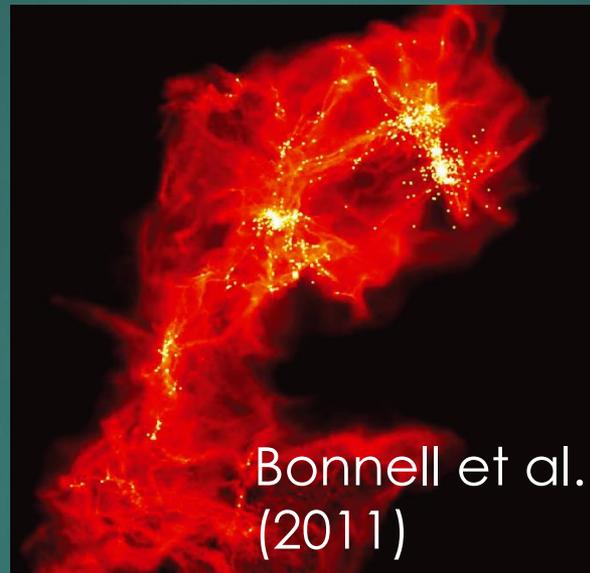
Fujii & Portegies Zwart
(2013): arXiv:1309.1223

星団はどのようにできた？

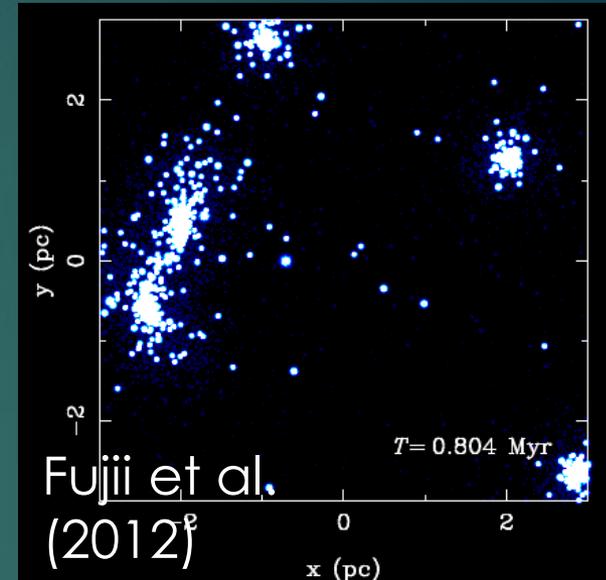
Observation



Star formation sim.



Clump merger sim.

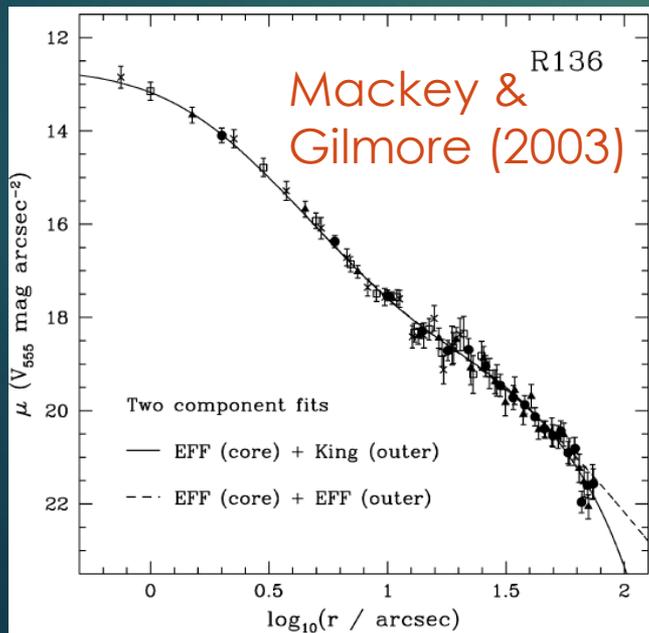


- ▶ 星団は初めから丸かったわけではないのでは？
- ▶ 階層的合体による星団形成シナリオは、young massive cluster の力学的進化を説明できる (Fujii et al. 2012)
- ▶ 観測的もシミュレーションも合体形成を示唆

クラump合体モデル

Fujii et al. (2012), Fujii & Portegies Zwart (2013)

- ▶ 小さな星団(クラump)が合体するモデル
 - ▶ それぞれが短時間でコアクラumpス→その後合体
- ▶ R136やNGC3603のような、コンパクトかつ大質量の若い星団(Young massive cluster)の年齢と力学的進化の矛盾を説明



R136: LMC・タランチュラ星雲内にある若い大質量星団
すでにコアクラumpスしている

現在の質量とサイズから見積もられる
コアクラumpス時間~20 Myr
⇔現在の年齢 2 - 4 Myr

Motivation

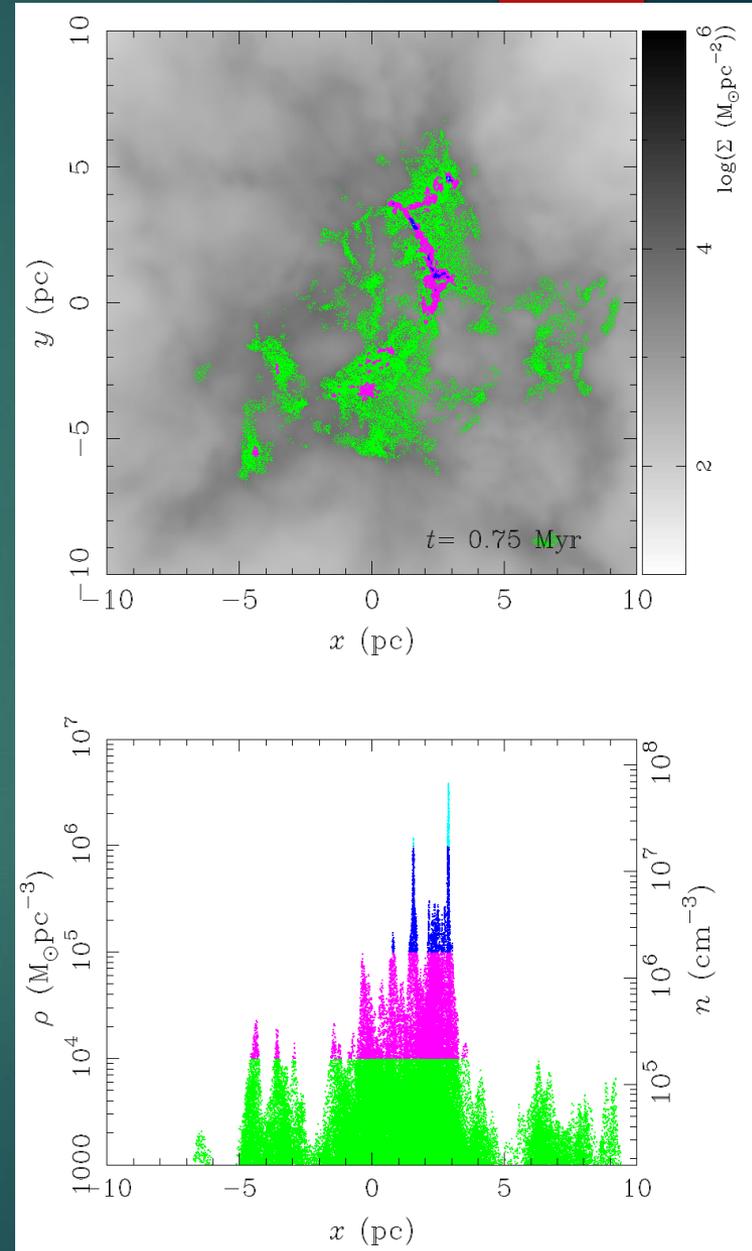
- ▶ これまでの星団のN体シミュレーション
 - ▶ 球対称、平衡（最も多く研究されてきた）
 - ▶ Cold、フラクタル
 - ▶ クランプの合体
- ▶ より、現実的な初期条件は？
 - ▶ 分子雲がコラプス、フィラメント状の構造、節に星のクランプが形成
- ▶ 星形成シミュレーション
 - ▶ 扱える最大質量に限界：
Dale et al. (2012) 分子雲の総質量 $10^6 M_{\odot}$ 。
 - ▶ 大きな星団（Young massive cluster $\sim 10^5 M_{\odot}$ ）は厳しい
- ▶ もう少し簡単な方法で、より大きな領域を計算できないか？

Method

- ▶ Step1: 乱流を持つ分子雲のシミュレーションをSPH法で、分子雲のfree-fall time(t_{ff})まで
 - ▶ 質量分解能: $1M_{\odot}$ 、空間分解能: 0.1pc
- ▶ Step2: ガス粒子を星粒子に置き換える
 - ▶ 密度の平方根に比例した星形成効率(SFE)を仮定 (cf. Krumholz 2012)
 - ▶ 星の質量はSalpeter IMF、位置はランダム
 - ▶ 残りのガス粒子は取り除く (instantaneous gas expulsion)
- ▶ Step3: 星粒子のみN体で10 Myr まで計算
 - ▶ ソフトニングなし
 - ▶ 星の合体、星の寿命あり

SPH simulation

- ▶ Code: Fi in AMUSE
 - ▶ Isothermal
 - ▶ $m_{\text{gas}} = 1 M_{\text{sun}}$
 - ▶ Softening length = 0.1 pc
- ▶ Homogeneous sphere
 - ▶ Turbulence $k=-3$
 - ▶ Density 100, 10 $M_{\text{sun}} \text{ pc}^{-3}$
 - ▶ $M_{\text{cloud}} = 4 \times 10^4, 10^5, 4 \times 10^5, 10^6, 5 \times 10^6 M_{\text{sun}}$



星形成効率の仮定

- ▶ 星形成過程は解かないので星形成効率のみ必要

- ▶ $SFE/t_{ff} = \text{constant}$
(Krumholz et al. 2012)

- ▶ t_{ff} に反比例（密度の平方根に比例）した星形成効率を仮定

$$\alpha_{sfe} \sqrt{\rho / 10^2 (M_{\odot} \text{pc}^{-3})}$$

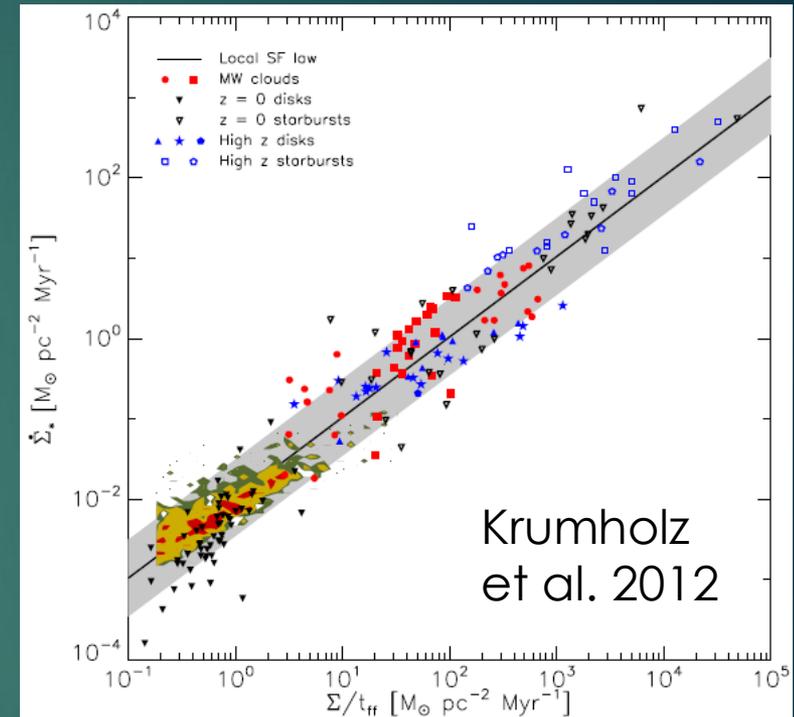
- ▶ 得られた星形成効率

- ▶ <5 % (領域全体)

- ▶ ~0.3 (高密度領域 $> 10^3 M_{\text{sun}} \text{pc}^{-3}$)

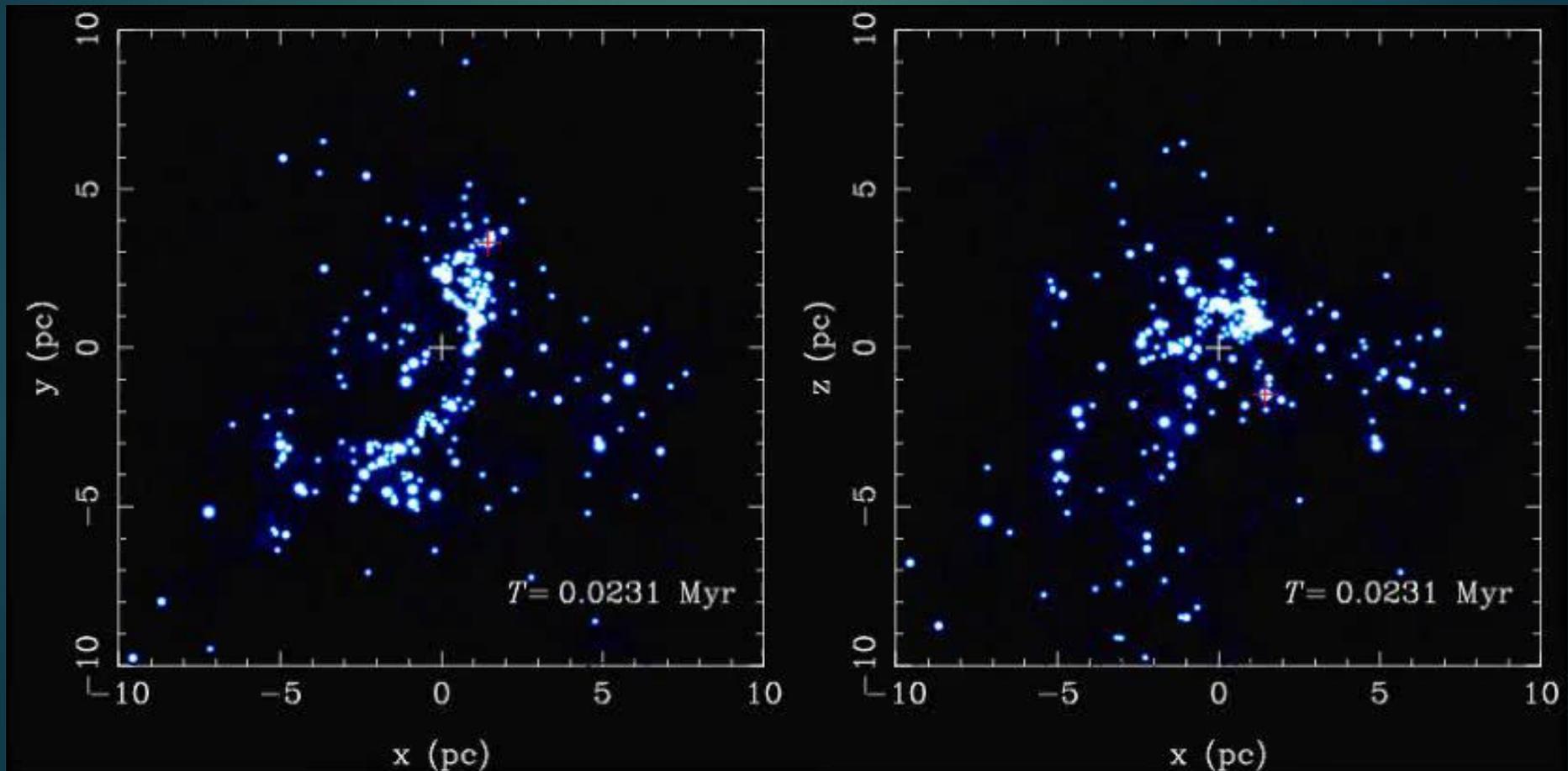
- ▶ さらに高密度の領域 > 0.5

- ▶ 星に置き換えた後の質量：最大 $2.5 \times 10^5 M_{\odot}$



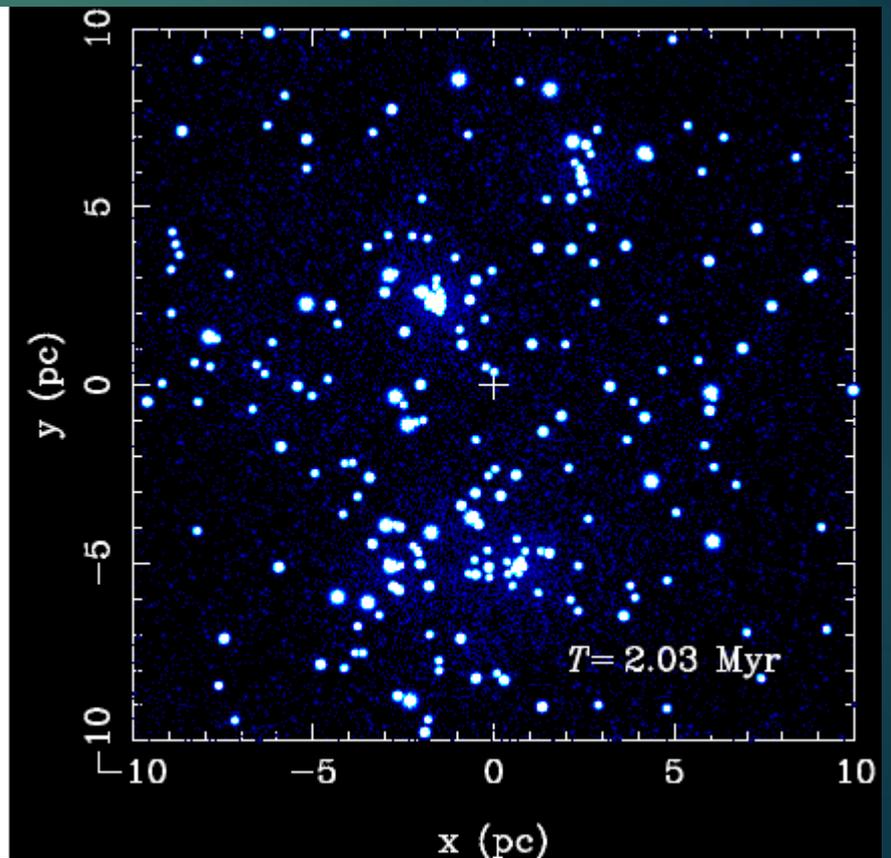
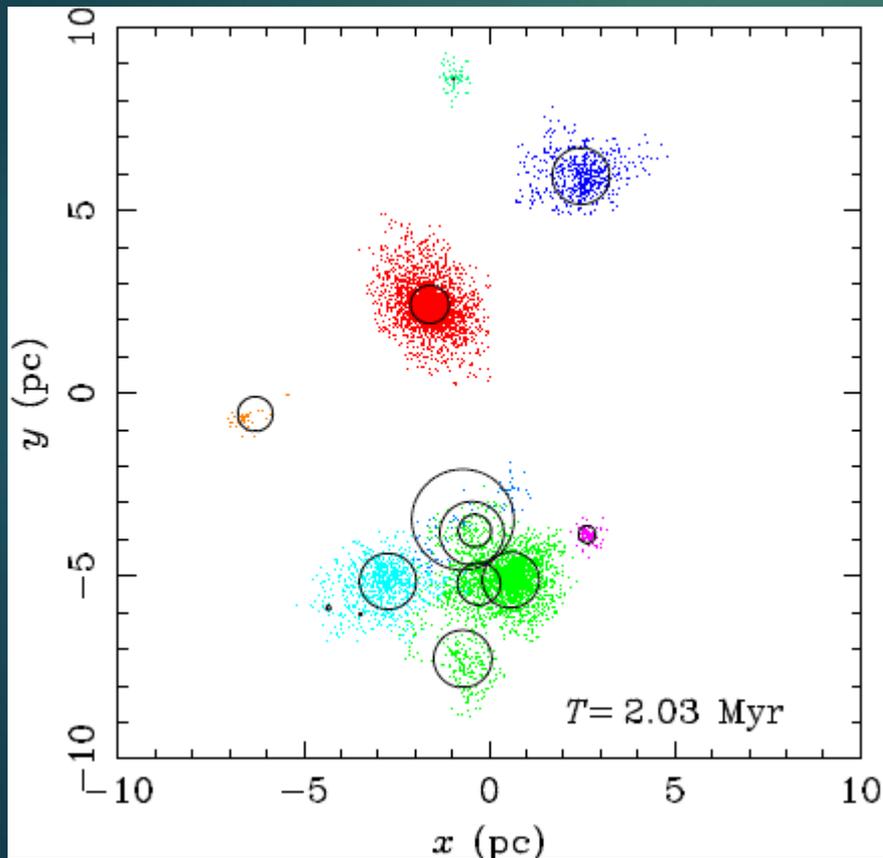
N-body simulation

- ▶ 6次エルミート法、NINJA(2次元並列スキーム)
(Nitadori et al. 2006, 2008)

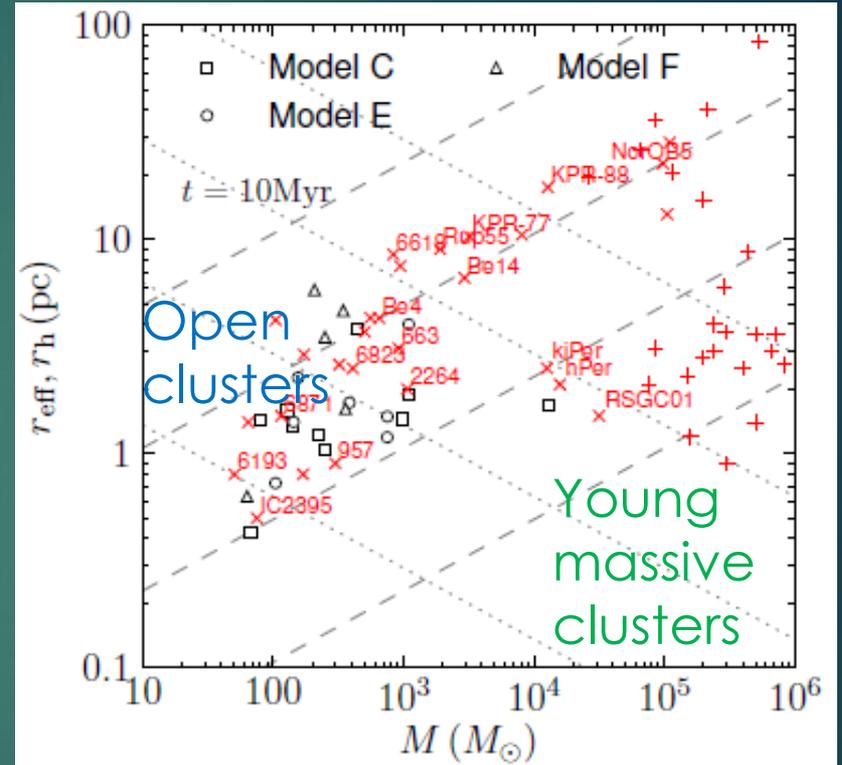
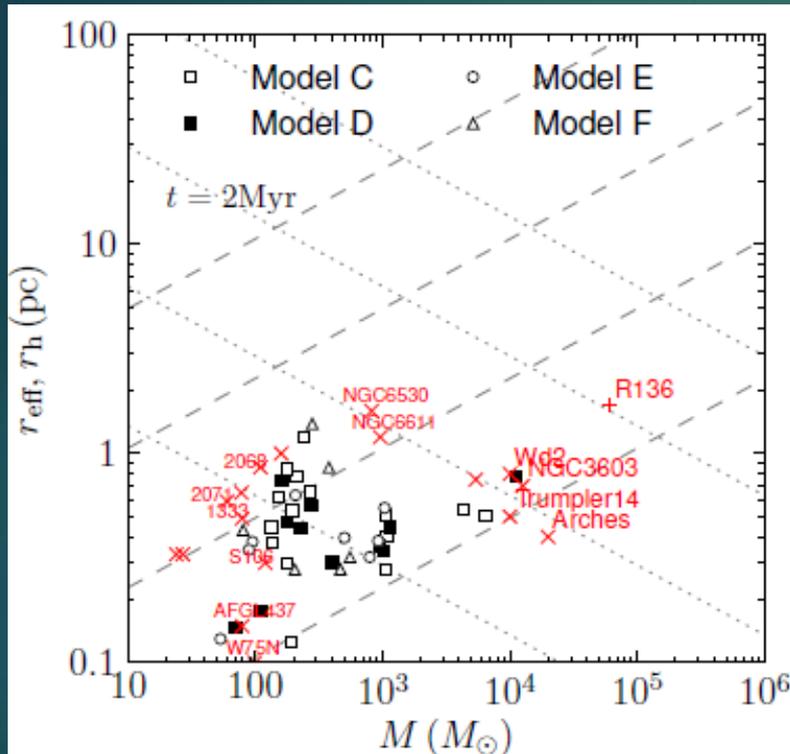


Clump finding

- ▶ スナップショットから星団を検出
 - ▶ HOP (Eisenstein and Hut 1998) in AMUSE

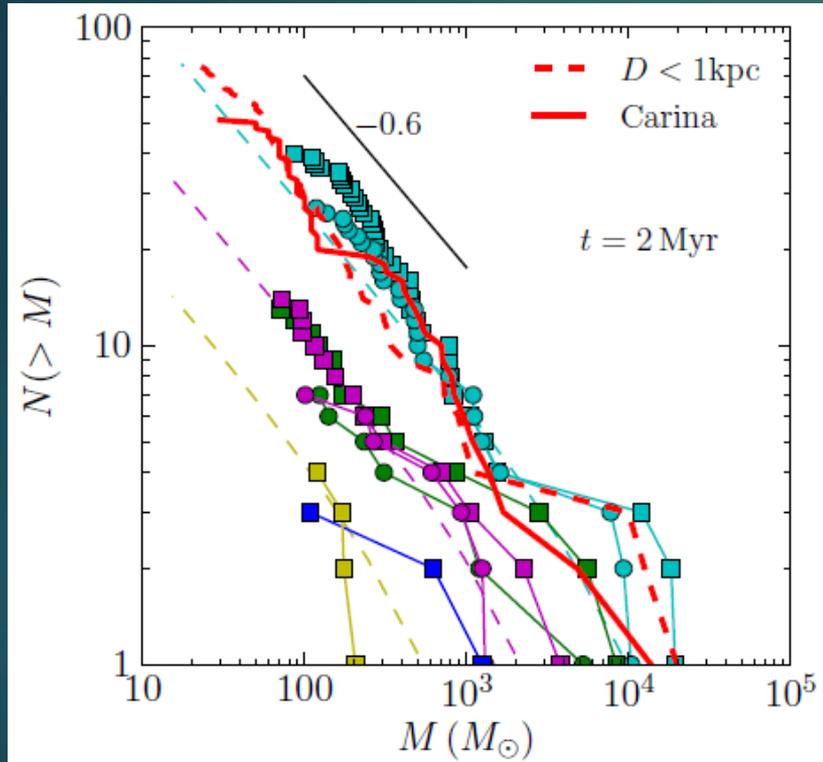


結果 1 : 質量-半径図



- ▶ 星団の半径と質量を観測と比較
- ▶ 散開星団とYMCは同様に形成する
- ▶ 一部は合体して成長：図の左から右へ移動（密度を保持して質量が増加）
- ▶ OCは緩和で低密度側（図の上方）へ成長

結果 2 : 星団の質量関数



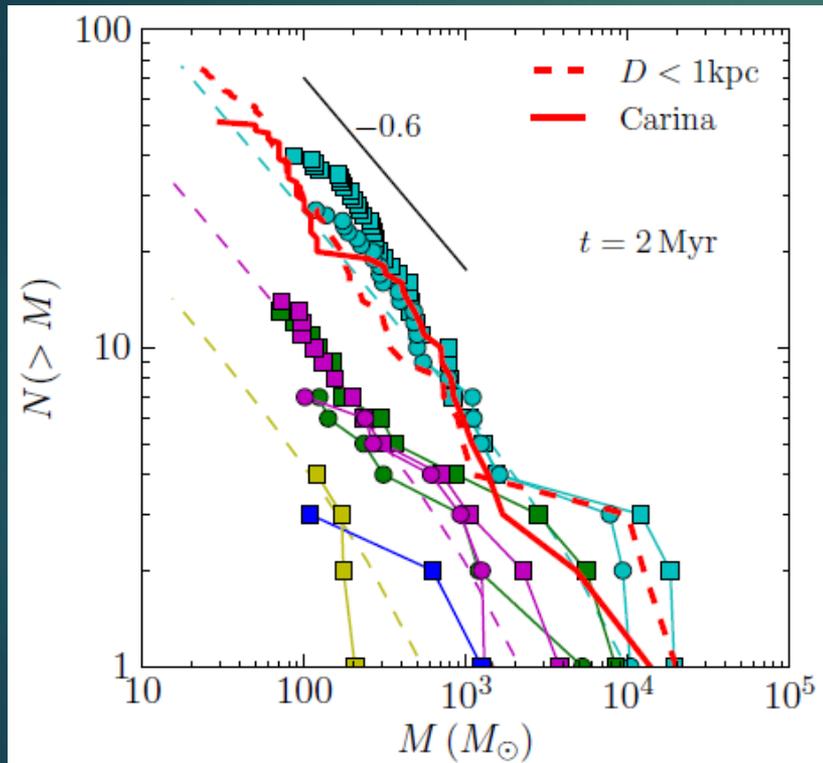
- ▶ 観測(赤線) :
 - ▶ Carina star cluster complex (Feigelson 2011)
 - ▶ 太陽から1kpc以内 (Pisunov+ 2008)
- ▶ シミュレーション(点)
 - ▶ フィッティング(破線)

- Schechter functionでフィッティング

$$N(> M) \propto M^{\beta+1} \exp\left(-\frac{M}{M_{\text{cut}}}\right)$$

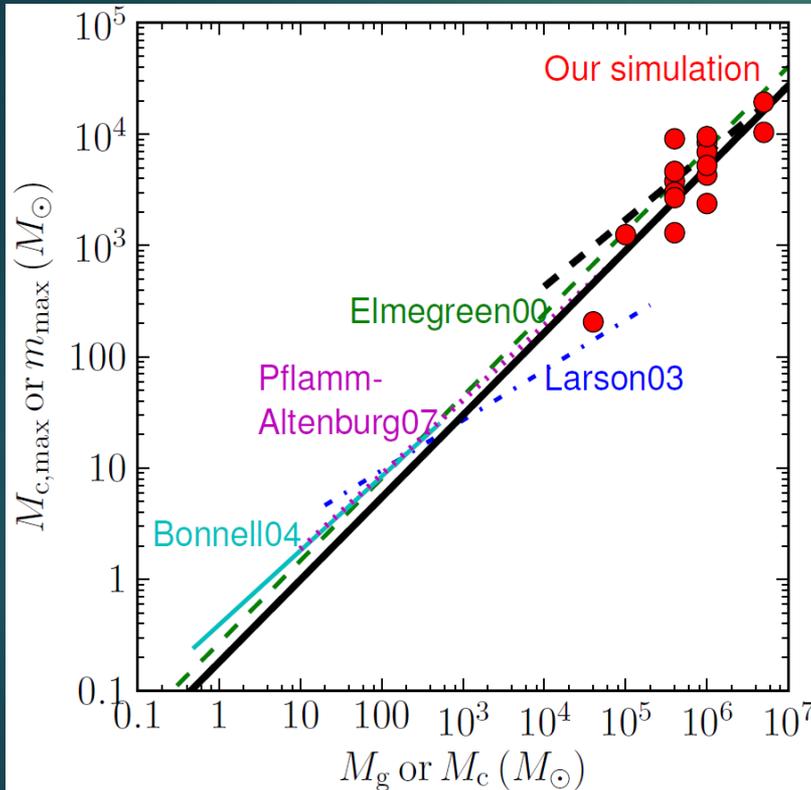
$$\beta = -1.55 \pm 0.11$$

Carina star cluster complex



▶ 観測で見えているのは、こんなかんじ ↑

結果 3 : 一番重い星団の質量



- ▶ 分子雲の質量に対する一番重い星団の質量

$$M_{c,max} = 0.18M_g^{0.74}$$

- ▶ 星団の質量に対する星団内で一番重い星の質量 (観測)

- ▶ Pflamm-Altenburg et al. (2007)

$$m_{s,max} = 0.4M_c^{0.67}$$

MWの場合：一番大きい分子雲 $\sim 10^7 M_{sun}$ \rightarrow 一番大きい星団 $\sim 10^4 M_{sun}$
 \rightarrow 最も重い星 $\sim 150 M_{sun}$

Self-similar structure?

- ▶ 星団の質量と星団内の星の最大質量

$$m_{s,\max} = 0.4M_c^{0.67}$$

- ▶ Pflamm-Altenburg et al. (2007)

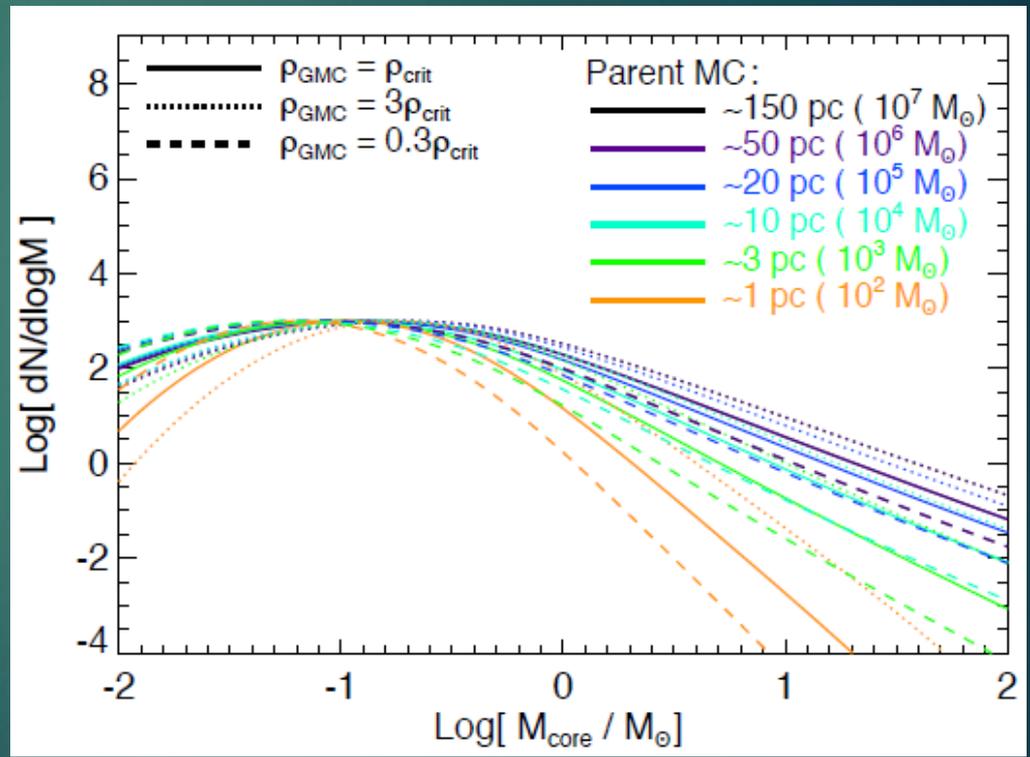
- ▶ 星の質量関数のべき
-2.35 (Salpeter)

- ▶ 星団の方が少し浅い
(観測的には-2くらい)

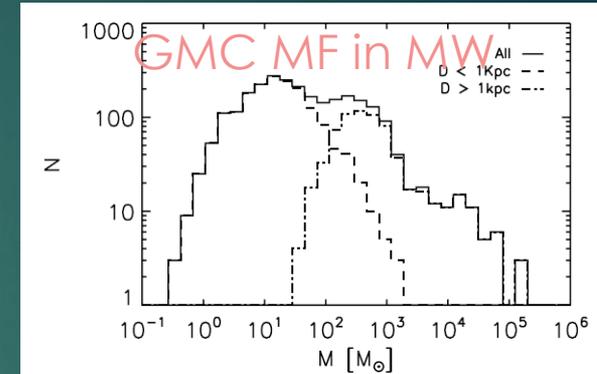
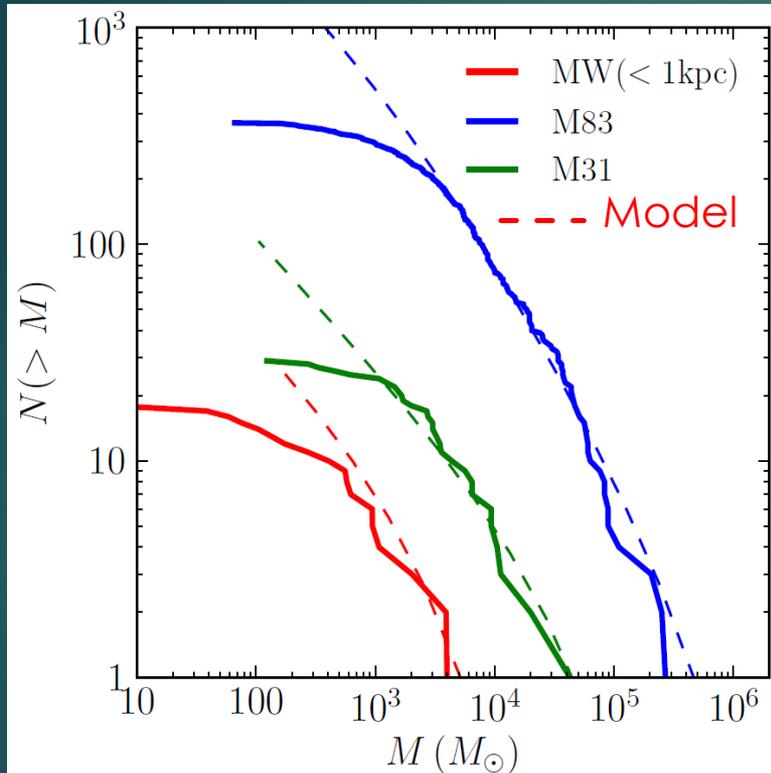
- ▶ 理論的予測と一致？

- ▶ Hopkins (2013)
- ▶ 分子雲の密度分布は lognormal と仮定

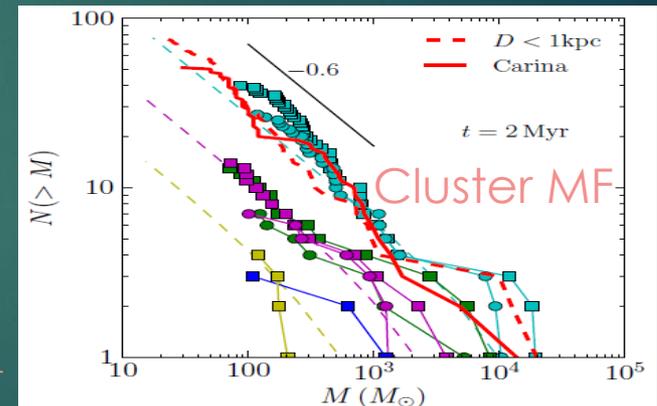
Analytic core mass function (Hopkins 2013)



結果 4 : 系外銀河の星団MF



Planck collaboration (2011)



- ▶ 各分子雲から生まれる星団のMFモデル×分子雲のMF
→銀河全体の星団のMF

まとめ

Fujii & Portegies Zwart
(2013): arXiv:1309.1223

- ▶ 分子雲のSPHシミュレーション→星形成を仮定
→恒星系のN体シミュレーション
 - ▶ より現実的な初期条件からの星団形成N体シミュレーション
 - ▶ 星形成シミュレーションより大規模な星・星団形成領域が扱える
- ▶ 散開星団もYMCも同様にできる
 - ▶ YMCs は合体を経て形成
 - ▶ ただし、高密度領域では星形成効率 >0.5
- ▶ 星団と星の質量関数はよく似ている
 - ▶ 分子雲の構造が星スケールまでself-similarに続いているのかもしれない
- ▶ 今後：銀河の渦状腕中、分子雲の衝突