

(大質量)星団形成 に関するレビュー

参考文献

- Lada & Lada 2003, ARA&A, 41, 57
- Portegies Zwart, et al. 2010, ARA&A, 48, 431
- Longmore, et al. 2014, Protostars and Planets VI, 1, 291

東北大学

前田龍之介

Outline

✓ Introduction

星団とは

星団の重要性, 星形成, 銀河進化, 大質量星, 宇宙線加速, IMBH etc…

✓ 星団形成

銀河内での星形成

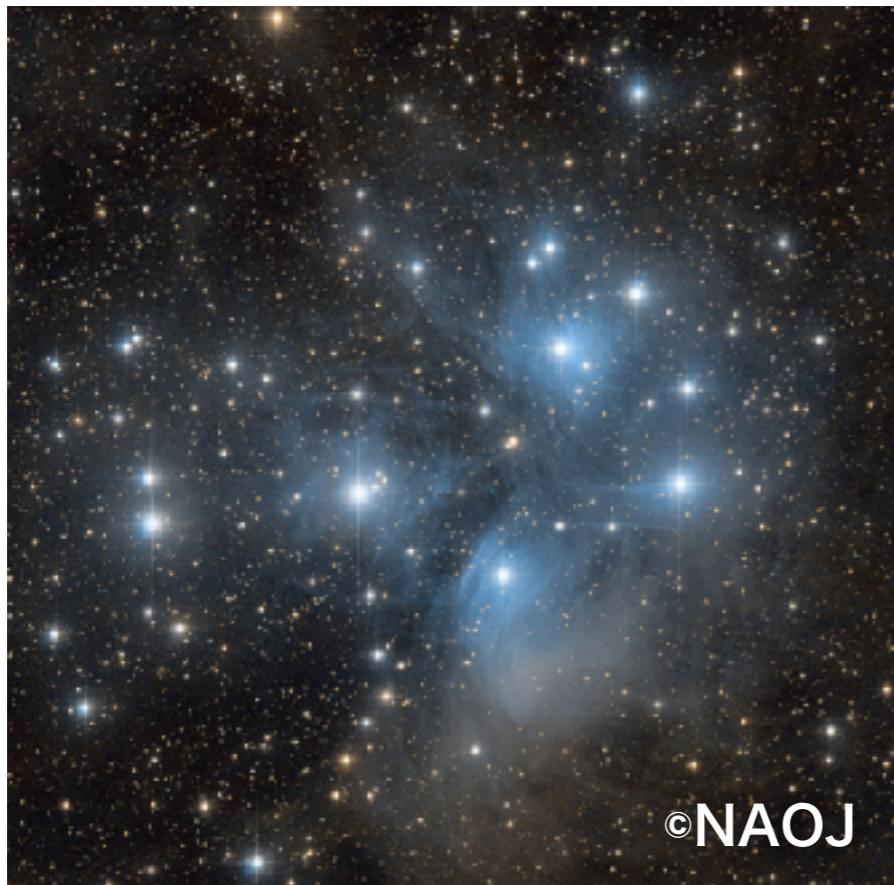
大質量な星団を形成するには？

宇宙初期環境の星団形成

✓ ガス衝突による星団形成シナリオの紹介

✓ まとめ

銀河内の星形成の場：星団



✓ 星団とは？

» 星が高密度に集まつた天体

$$\rho_{\text{star}} \gtrsim 0.1 \text{ M}_\odot \text{ pc}^{-3} \quad (= \rho_{\text{star,field}})$$

Holmberg & Flynn 2000

» 3つのtypeに分類

→ 散開星団, 球状星団,
Young Massive Cluster

✓ 星のほとんど星は星団中で生まれる e.g., Lada & Lada 2003

» 太陽近傍の大質量星のうち単独星として形成したもの ~4 % de Wit+05

» 銀河の星形成率密度 ~若い星団の星形成率密度

$$3 \times 10^{-3} \text{ M}_\odot \text{ yr}^{-1} \text{ kpc}^{-2} \sim 3 - 7 \times 10^{-3} \text{ M}_\odot \text{ yr}^{-1} \text{ kpc}^{-2}$$

Miller+79

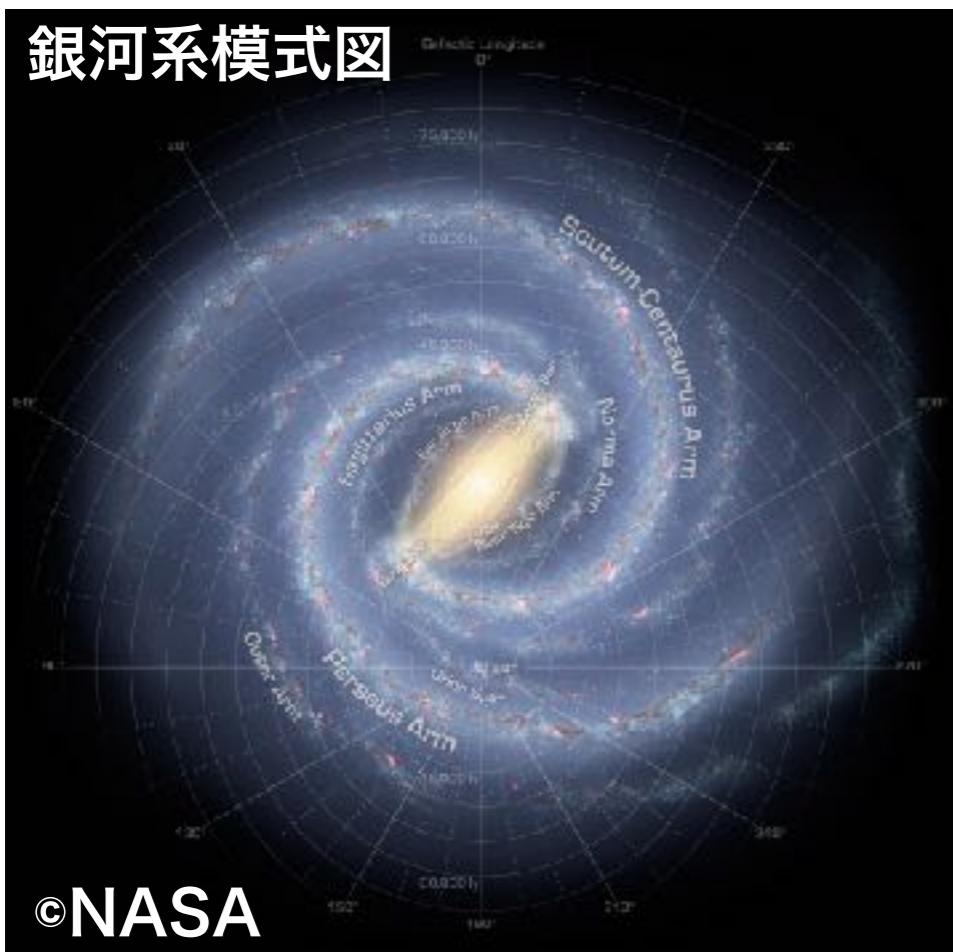
Lada+03

銀河の星形成を知るために星団形成を知らなくてはいけない

銀河形成・進化と星団形成

✓ 銀河は星を作って進化していく

銀河系模式図



» 銀河系の星形成率の進化

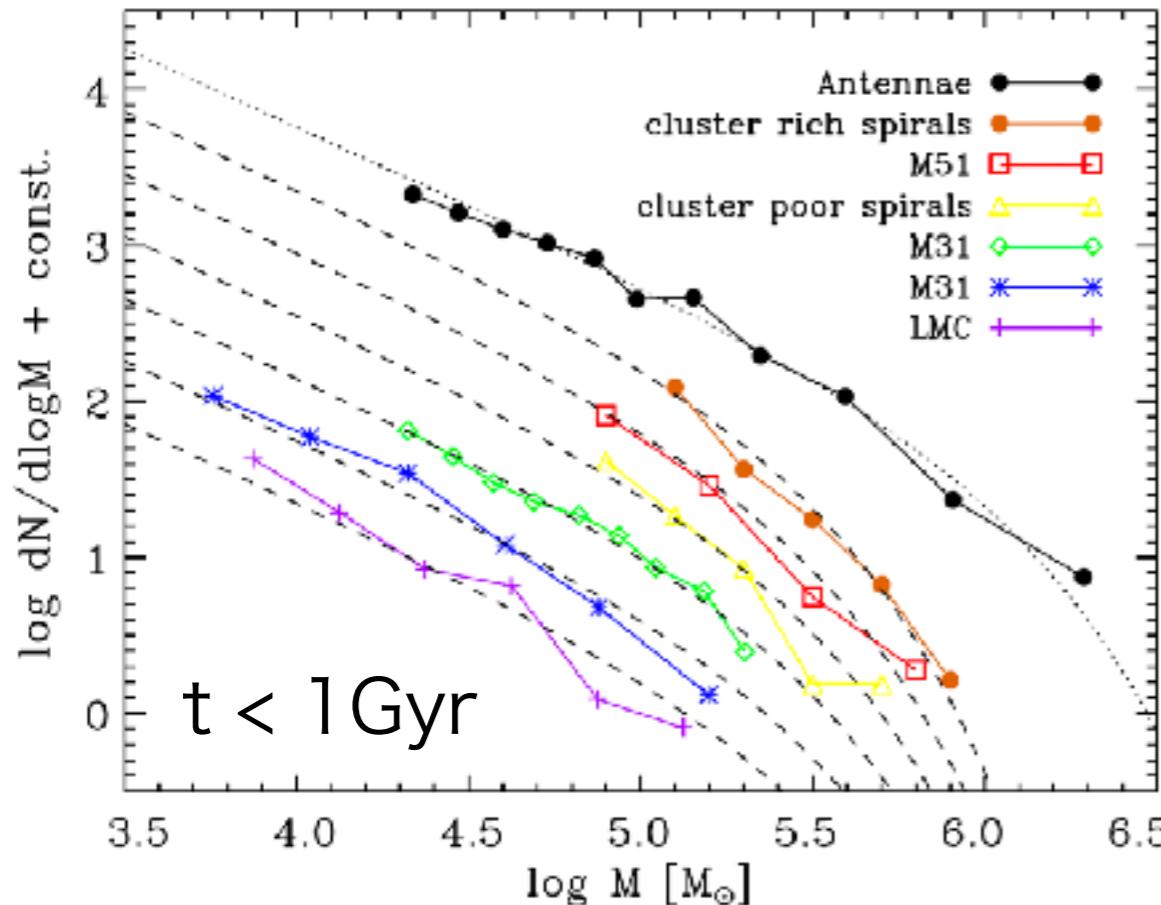


- » 銀河系質量は約9割が星、残りの約1割が星間ガス
- » 銀河は星(星団)を作り続けて現在の姿に
- » 星の核融合によって銀河内の重元素量が進化

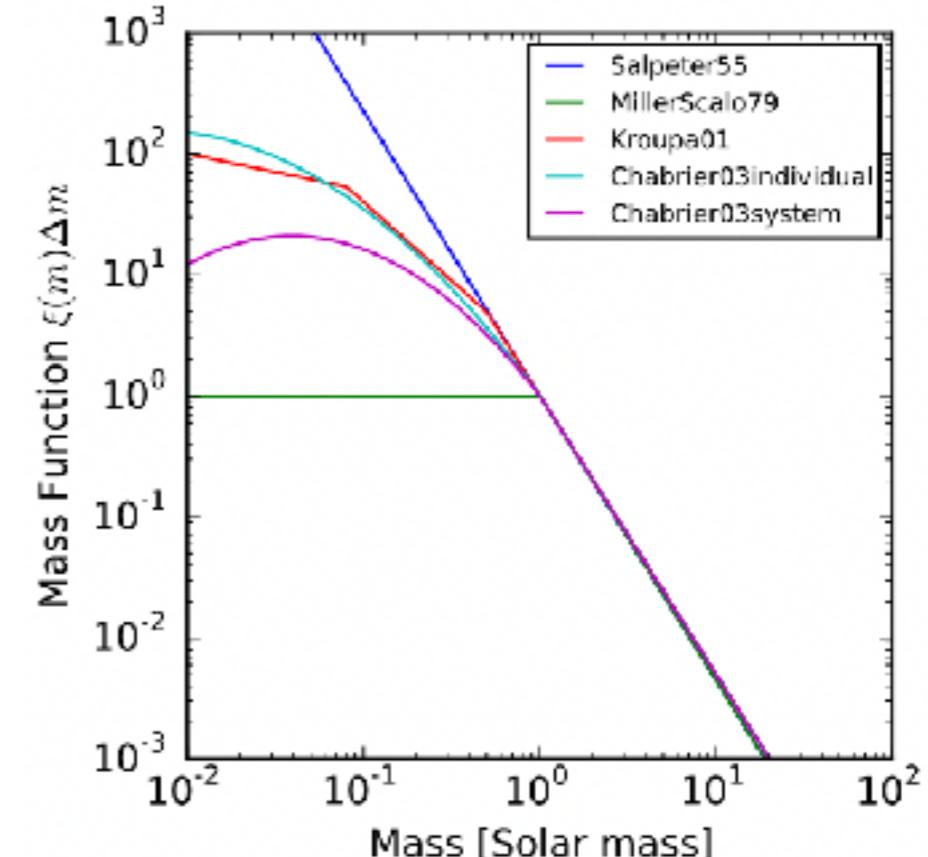
星団形成と銀河進化は密接につながっている！

なぜ星団形成を知りたいのか？

✓ 星団の質量分布関数



✓ 星の質量分布関数



» 星団は星の生まれる場なので形成過程を知るとその銀河の星形成がわかる

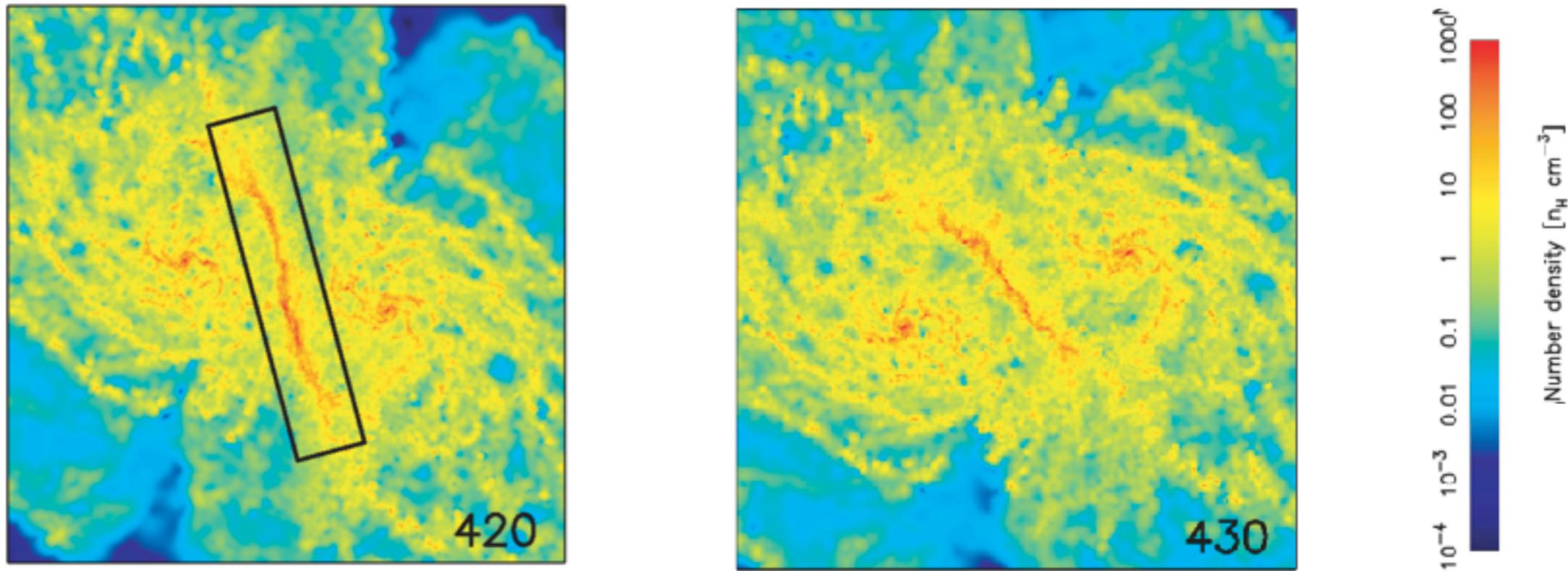
$$\frac{dN}{dM} \propto M^{-2} \times \exp(M/M_*)$$

» どのような質量の星がどれだけできるかを知りたい

→銀河の金属量の歴史、超新星爆発の頻度等にも重要

銀河の合体史との関わり

Saitoh+09

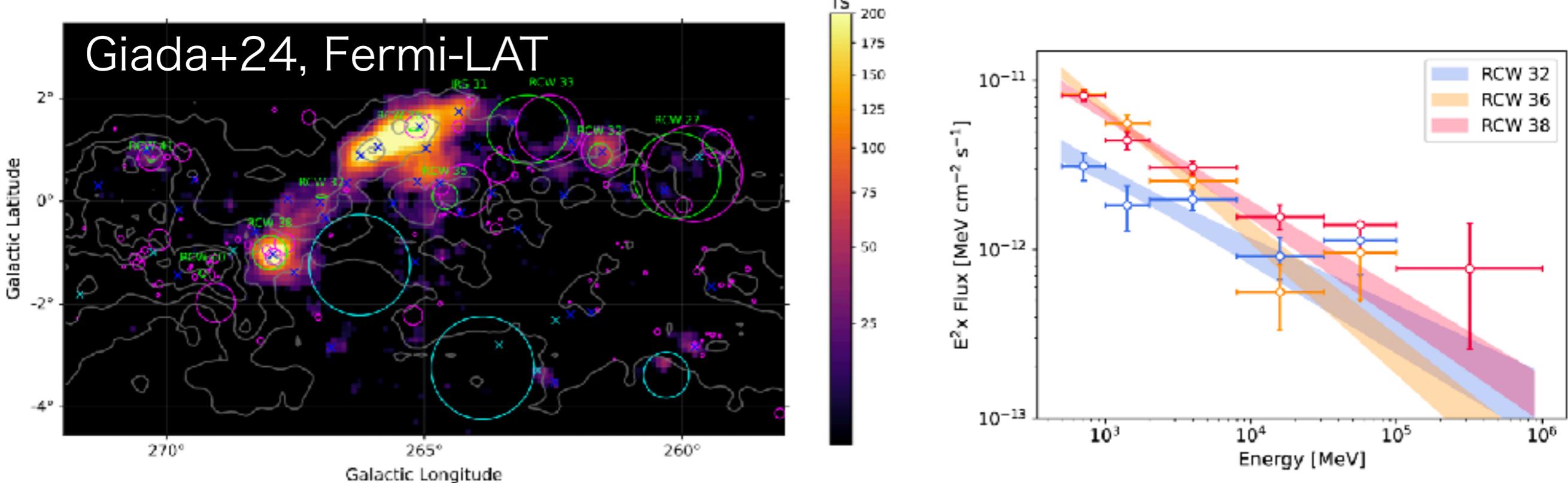


- » 銀河は合体しながら進化していく
- » 衝突銀河, スターバースト銀河では大質量星団が多く観測 Ashman+92
- » どのような環境で大質量な星団が形成するかわかれれば
過去の銀河形成史もわかるかも

大質量星団の形成は銀河スケールの現象と密接に関わっている

大質量星団形成境域で観測されるガンマ線

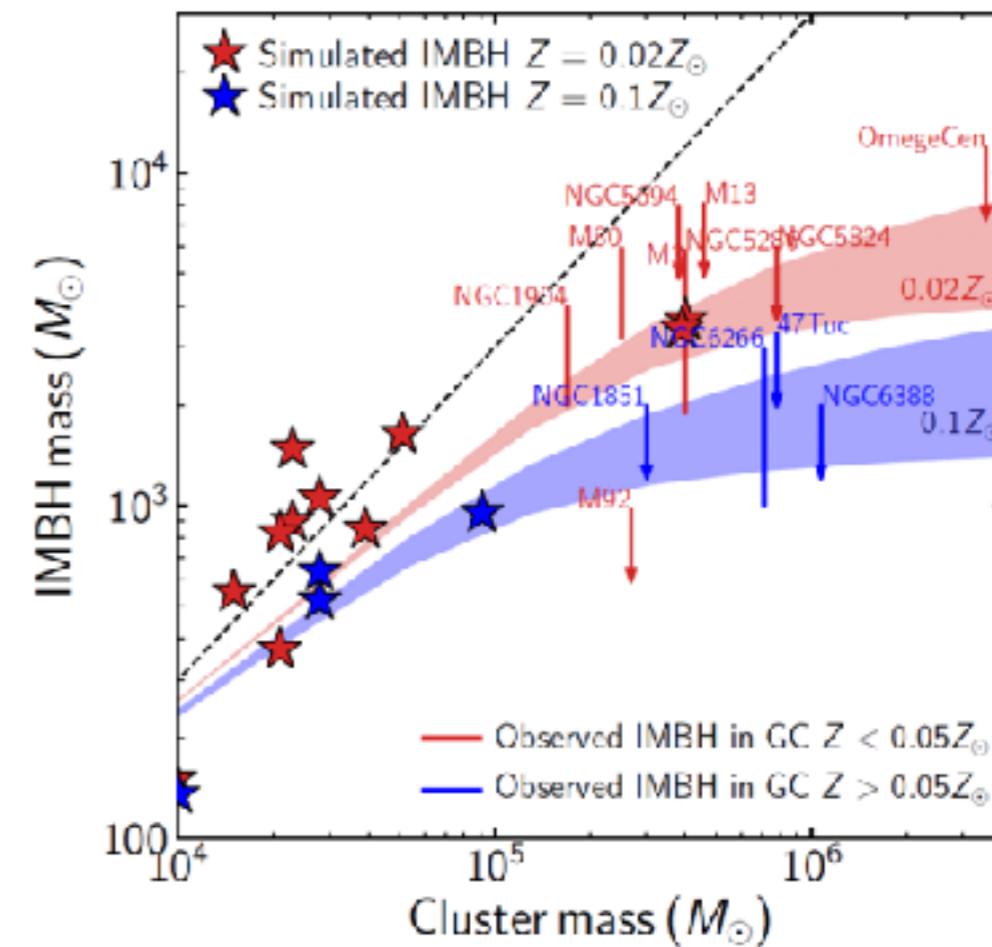
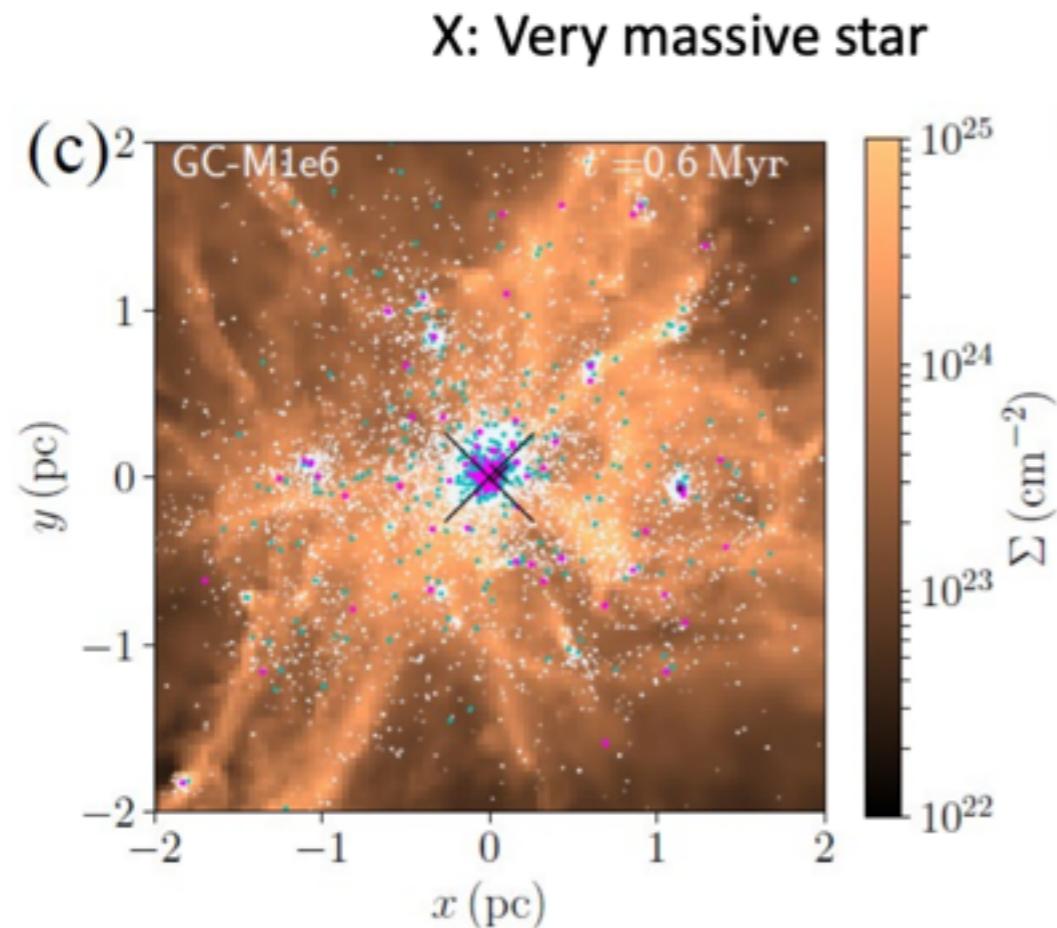
✓ 若い大質量星団はEnergetic



- » 超新星爆発を起こしていない若い星団からガンマ線を観測
- » 星風バブルによるフェルミ加速で生成した宇宙線が周囲の分子雲と反応しガンマ線を放出
- » ~1–10%の銀河宇宙線が星風で加速している

宇宙線加速の場としても重要なかも

超高密度な環境におけるブラックホール形成



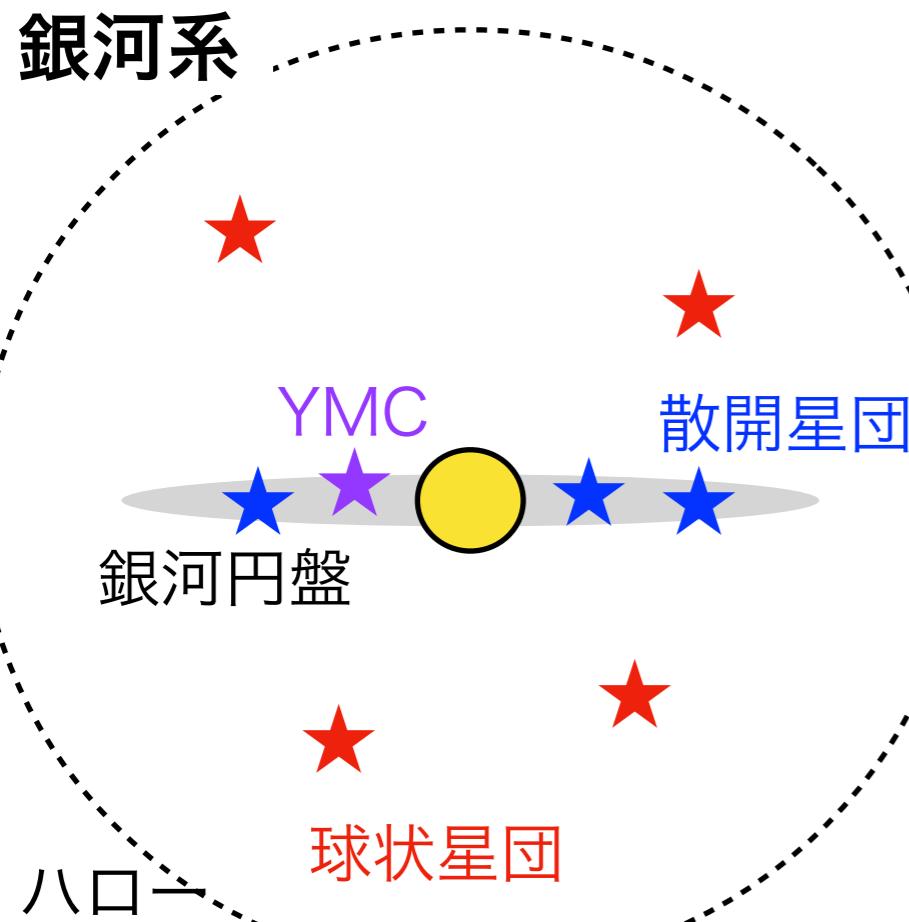
Fujii + 24

- » 分子雲から星を形成するシミュレーション
- » 重たい星団の中心部は高密度になり星が合体し超大質量星を形成
- » 超大質量星の星の進化を解くと質量 $> 10^3 M_{\odot}$ のIMBHに進化

IMBH形成に星団が重要？

銀河系を構成する3種類の星団

» 銀河系



✓ 散開星団

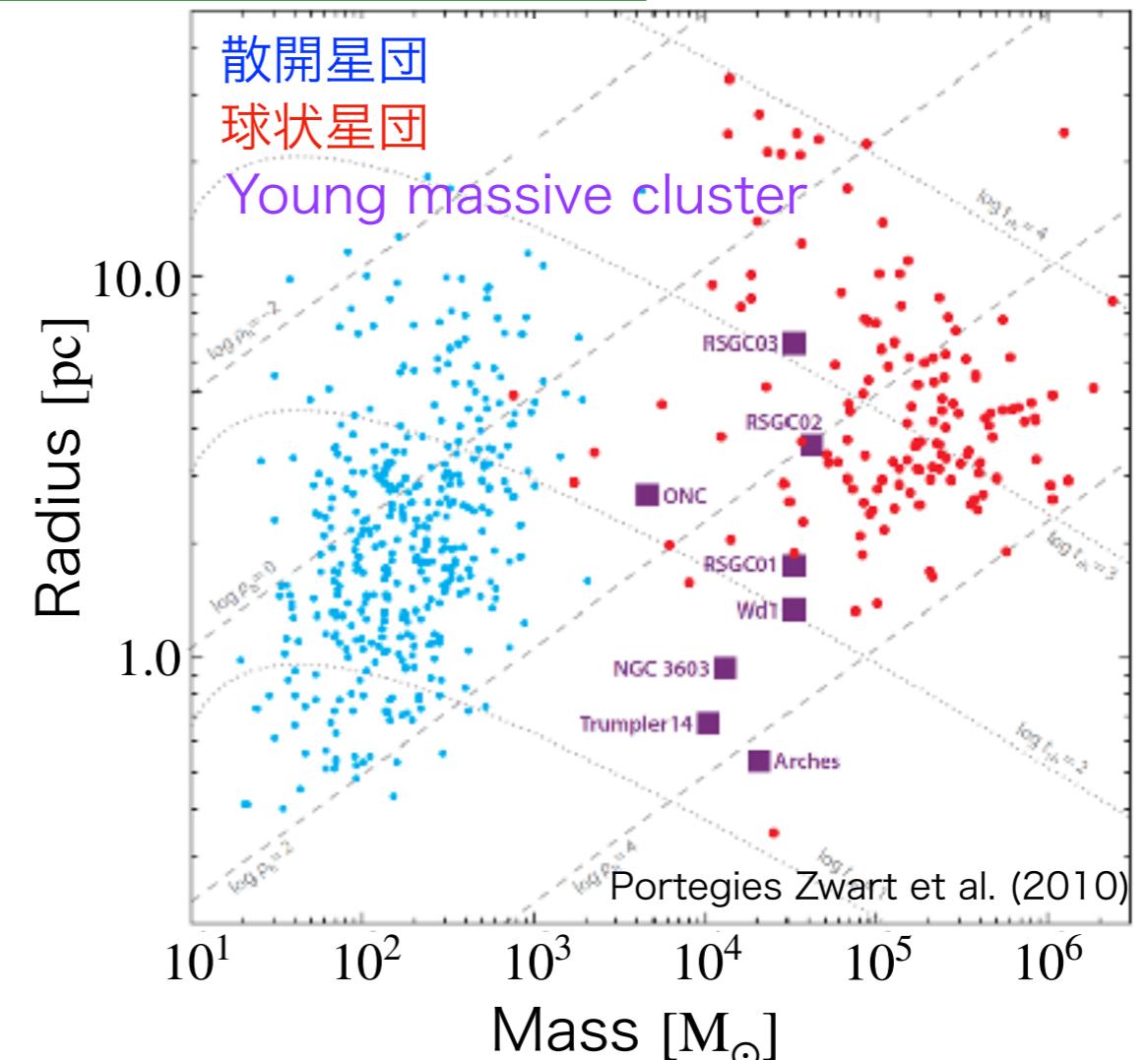
» 現在の星形成領域で観測される若い($t_{\text{age}} \lesssim 0.3$ Gyr)星団

✓ 球状星団

» 銀河系ハローに存在する古い($t_{\text{age}} \gtrsim 10$ Gyr)星団

✓ Young Massive Clusters (YMC)

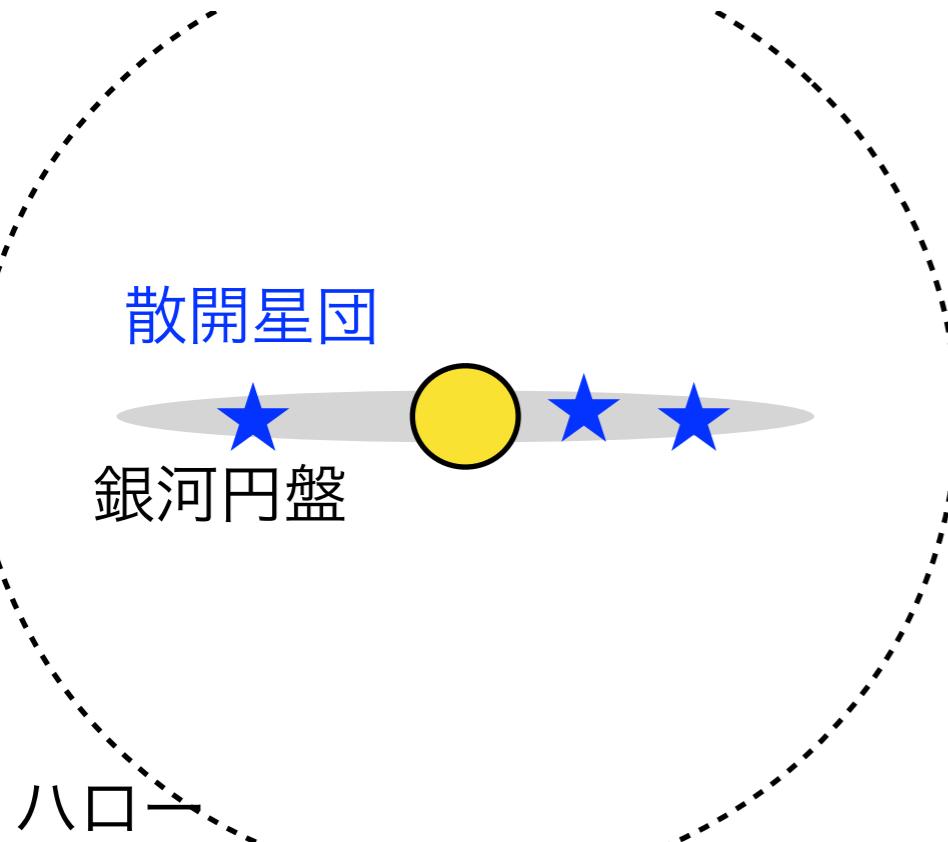
» 球状星団程度の星密度を持つ若い($t_{\text{age}} \lesssim 0.1$ Gyr)大質量星団



銀河系を構成する様々な星団の形成過程を知りたい

散開星団

» 太陽近傍の星団形成領域



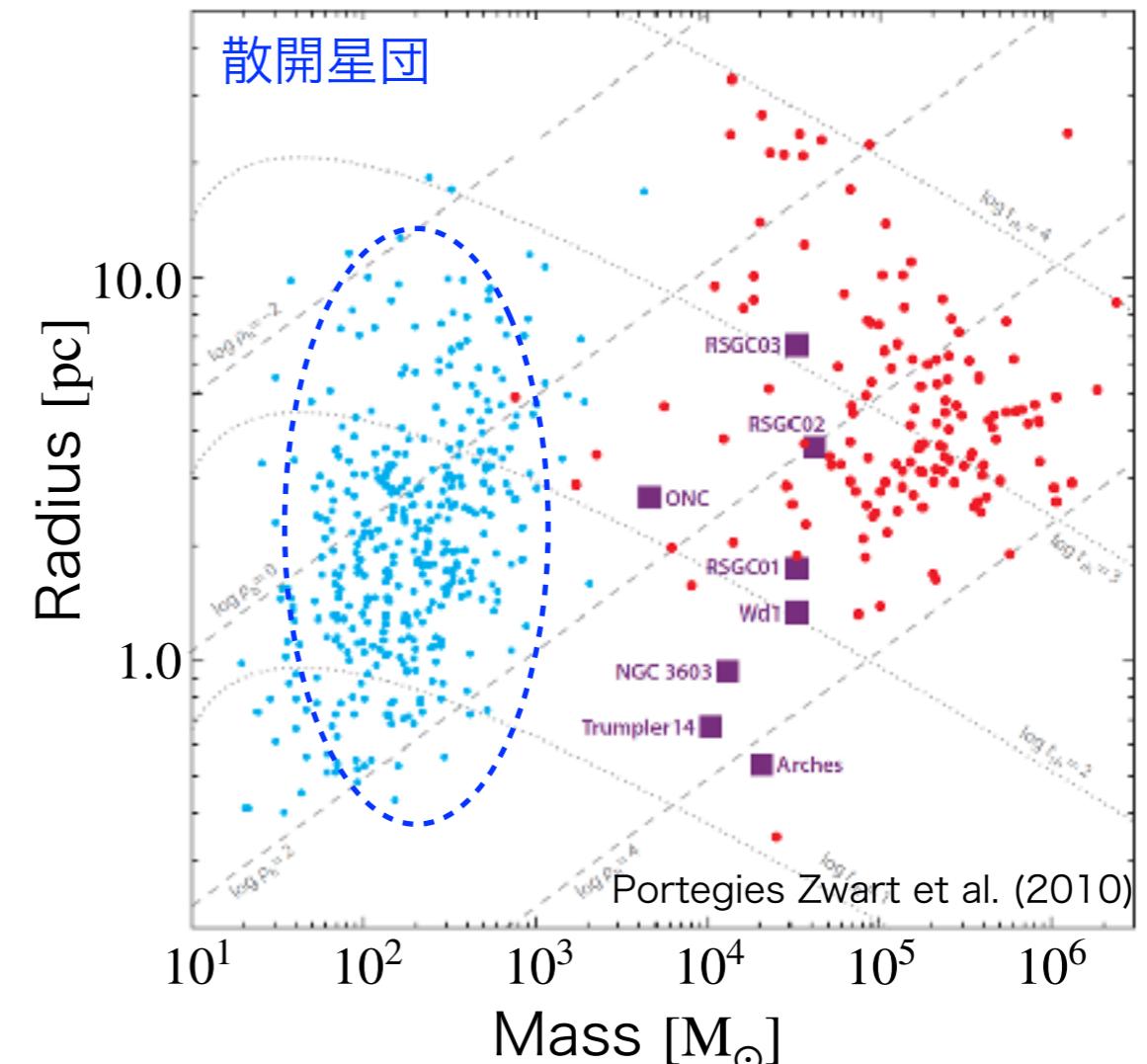
✓ 散開星団

» 比較的軽い若い星団

$$M \lesssim 10^3 M_{\odot} \quad R \sim \text{pc} \quad (\rho < 10^3 M_{\odot} \text{ pc}^{-3}) \quad t_{\text{age}} \lesssim 0.3 \text{ Gyr}$$

» 10 Myr で 90% の星団は壊れて Field Star へ

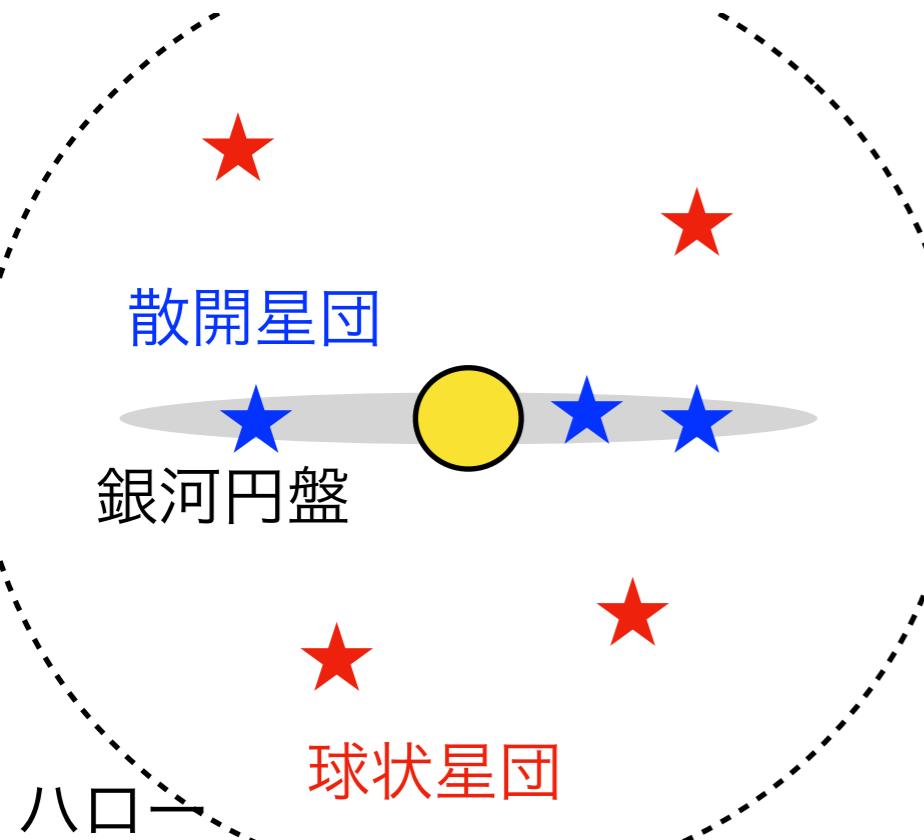
» 現在の星形成領域である銀河円盤に存在



現在の銀河系円盤の星形成領域で形成して星団

球状星団

» 球状星団の存在領域



✓ 球状星団

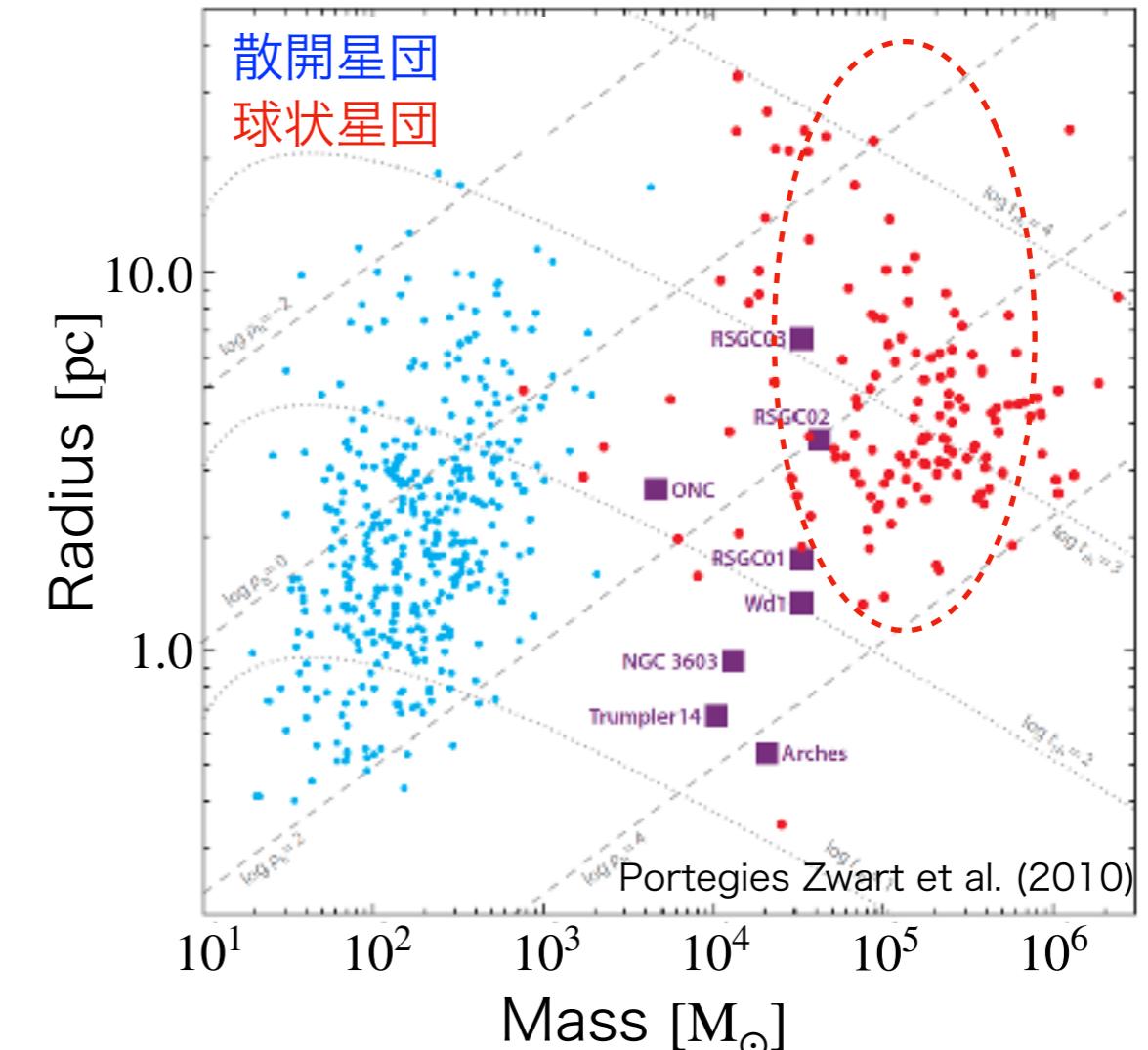
» 銀河系ハローに存在する古い星団

$$M \gtrsim 10^5 M_{\odot} \quad R \sim \text{pc} \quad (\rho > 10^3 M_{\odot} \text{ pc}^{-3})$$

$$t_{\text{age}} \gtrsim 10 \text{ Gyr}$$

» 球状星団より2桁大きな星の密度

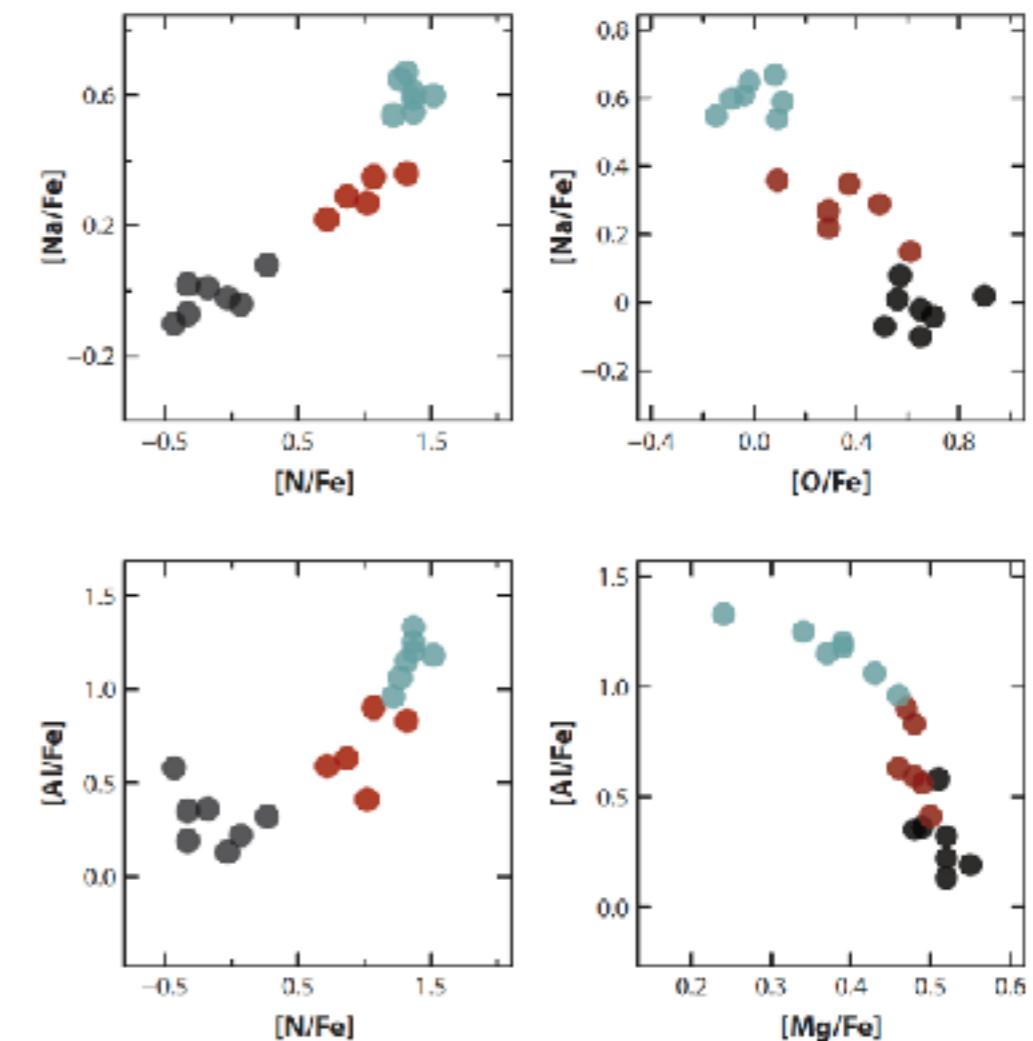
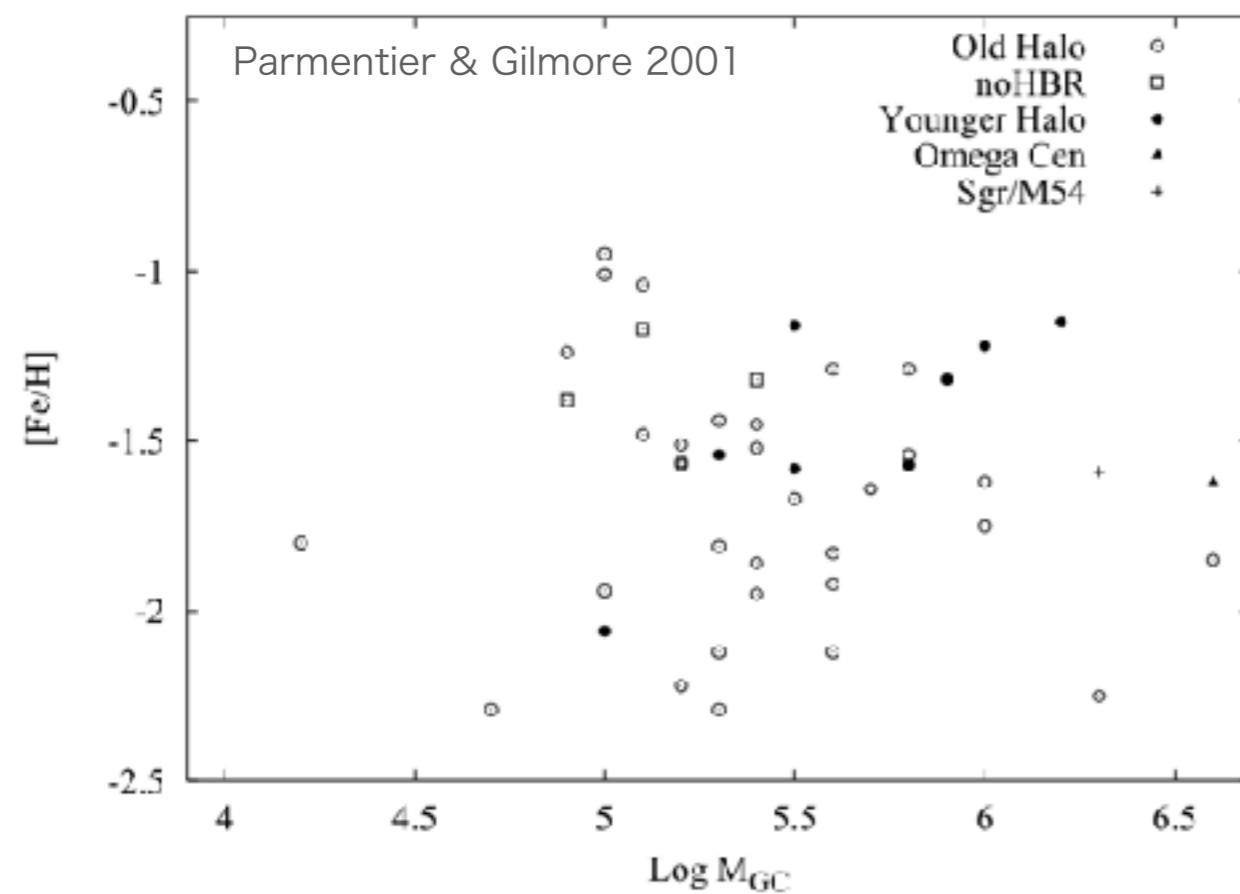
» 重力束縛され長期間構造を維持？



なぜ過去にこれほど大質量な星団が形成したのか？

球状星団の金属量

» NGC6752における金属の逆相関

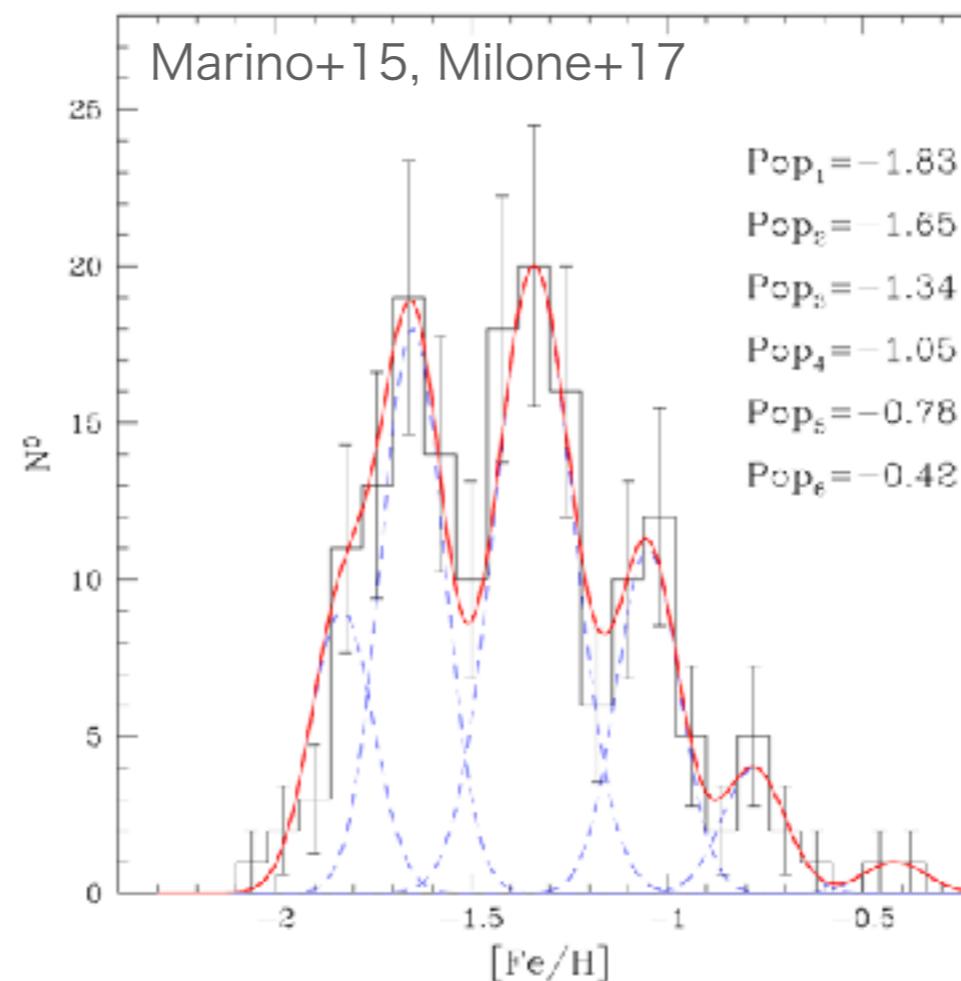


Bastian & Lardo 2018

- » 多くの球状星団では一様な金属量を持つ (e.g., Fe, C+N+O)
- » 一方で星の金属組成は一定ではなく、複数のpopulationが存在
- » AGB星の星風で汚染されたガスで再び星を形成?
→星風成分で形成した質量が70%程度必要だが本当に作れるかは謎

球状星団の金属量分布を完全に再現する理論はない

球状星団の金属量

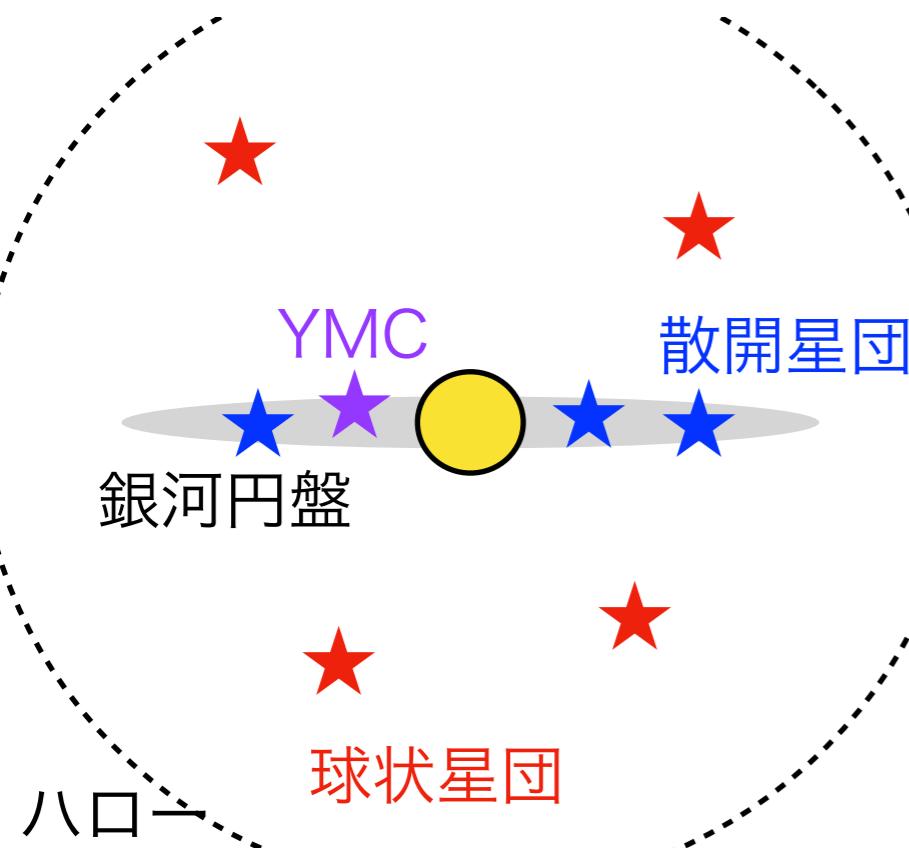


- » 鉄やC+N+O に分布が存在するGCも発見
- » 銀河系最大の ω -Cenでは複数の金属量成分の星が確認されている
- » 鉄が測られているGCの~25%ぐらいが複数金属量を持つ
→銀河系バルジと似ているので矮小銀河のコアの生き残りと考えられている

銀河合体の名残か？

Young Massive Cluster

» YMC



✓ Young Massive Clusters (YMC)

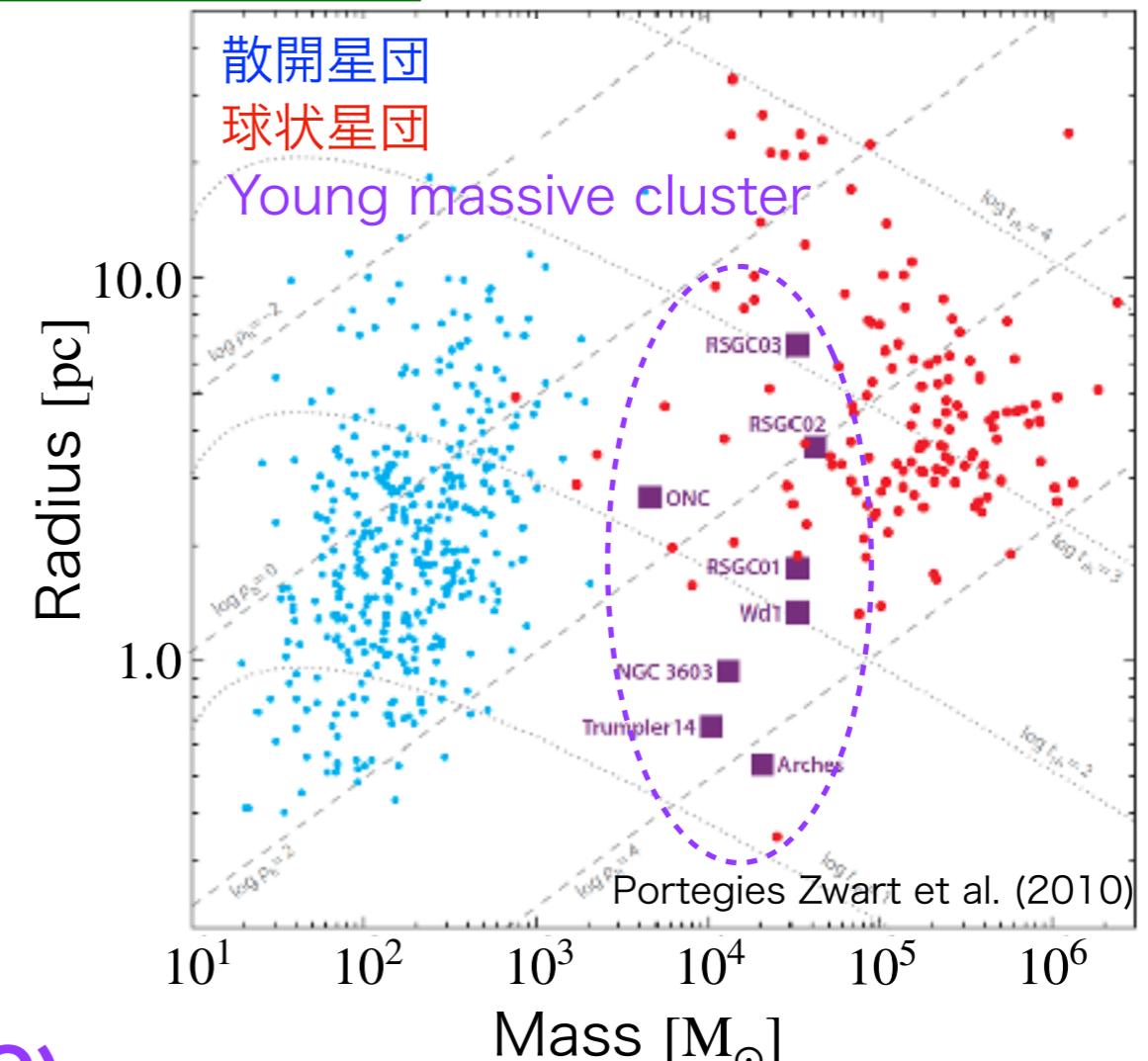
» 球状星団程度の星密度を持つ若い大質量星団

$$M \gtrsim 10^4 M_{\odot} \quad R \sim \text{pc} \quad (\rho > 10^3 M_{\odot} \text{ pc}^{-3}) \quad t_{\text{age}} \lesssim 0.1 \text{ Gyr}$$

» 複数の大質量星を含む

→ 恒星風, UV, 超新星爆発

» 相互作用銀河で多く観測

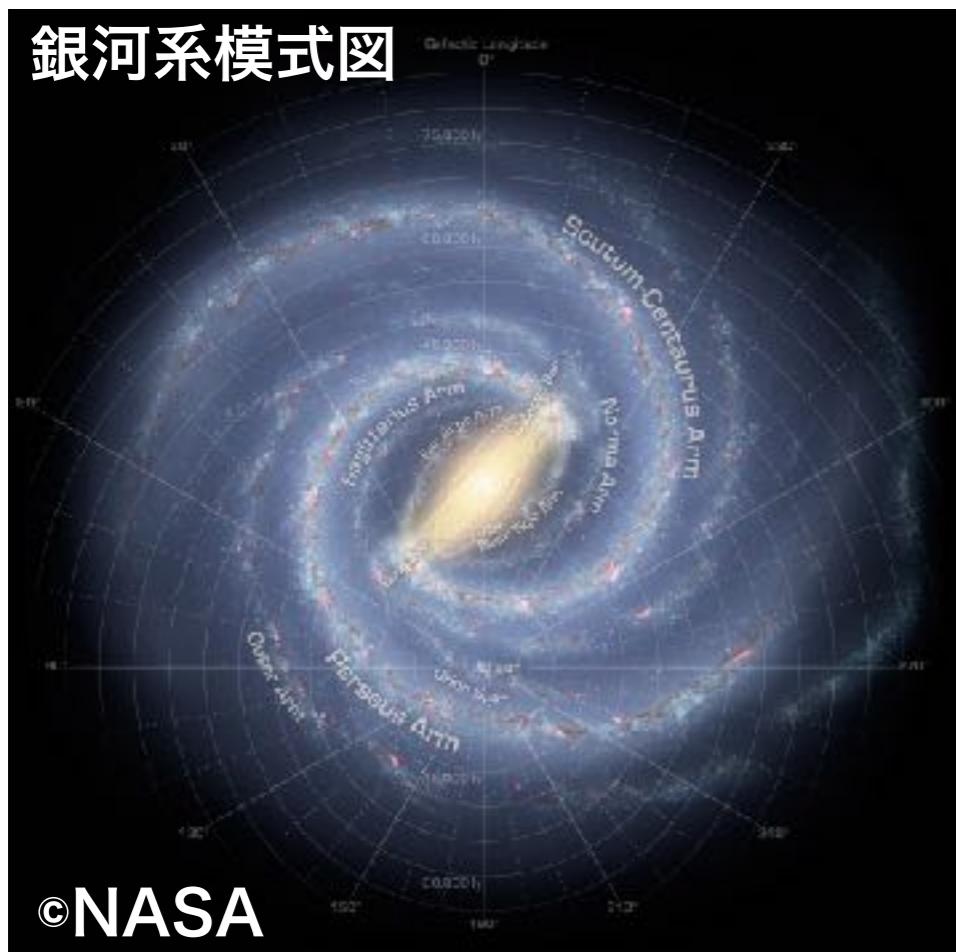


球状星団の若い姿の可能性がある星団

銀河形成・進化と星団形成

✓ 銀河は星を作って進化していく

銀河系模式図



©NASA

» 銀河系の星形成率の進化



- » 銀河系質量は約9割が星、残りの約1割が星間ガス
- » 銀河は星(星団)を作り続けて現在の姿に
- » 星の核融合によって銀河内の重元素量が進化

星団形成と銀河進化は密接につながっている！

Outline

✓ Introduction

星団とは

星団の重要性, 星形成, 銀河進化, 大質量星, 宇宙線加速, IMBH etc…

✓ 星団形成

銀河内での星形成

大質量な星団を形成するには？

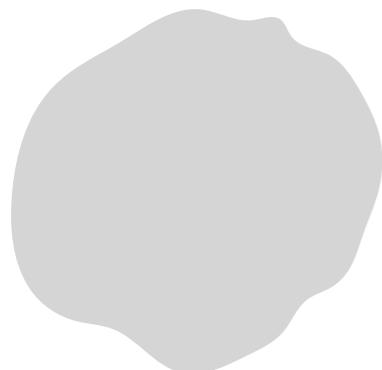
宇宙初期環境の星団形成

✓ ガス衝突による星団形成シナリオの紹介

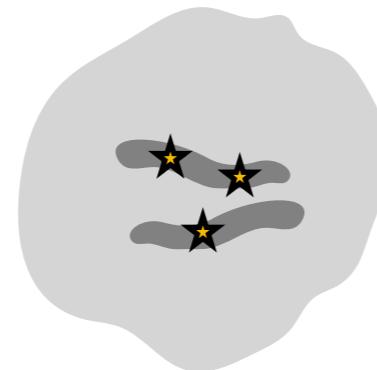
✓ まとめ

星団形成の流れ

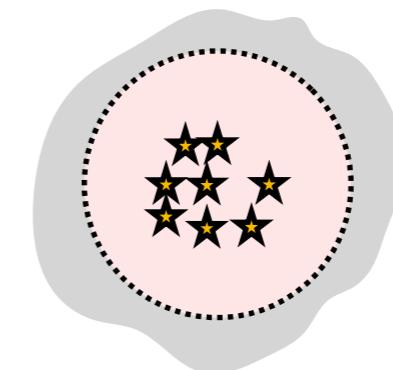
星間ガス



星形成



フィードバック



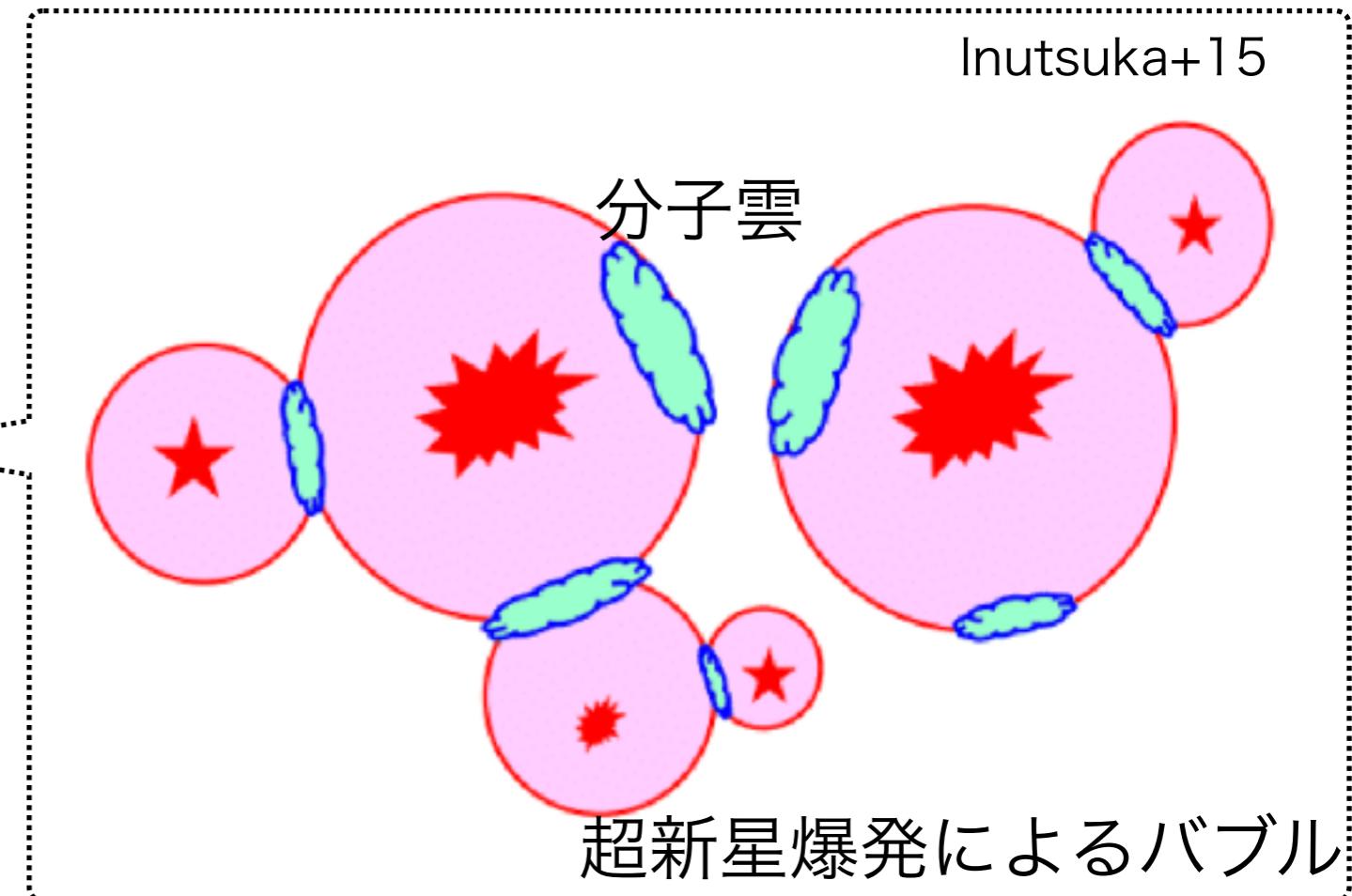
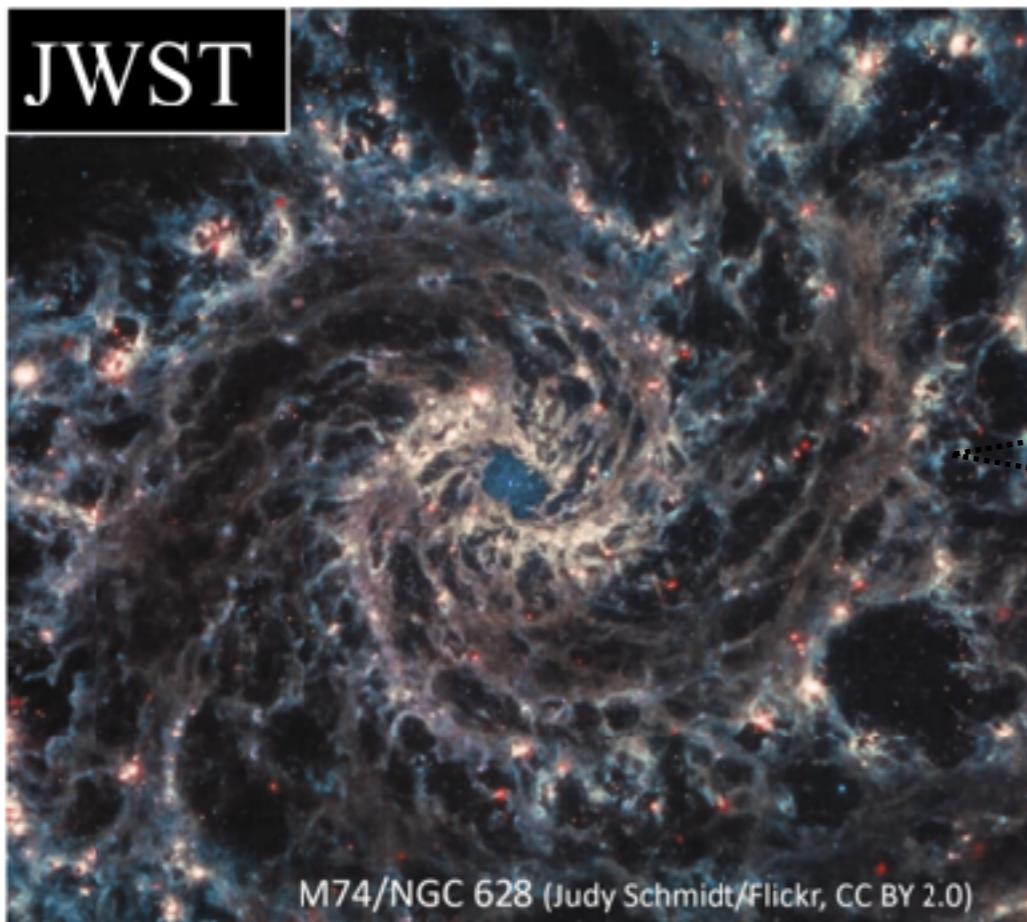
星団



- » 薄いHIガスから高密度な分子雲を形成
- » 星間ガスの高密度領域が重力崩壊して星に
- » 大質量星が形成すると周囲のガスをフィードバックで蒸発
- » 形成した星団はN体相互作用で進化する

進化の流れを見ていく

星形成の元となるガス分子雲の形成



» 銀河内の星間ガスはよく超新星爆発の衝撃波を経験する

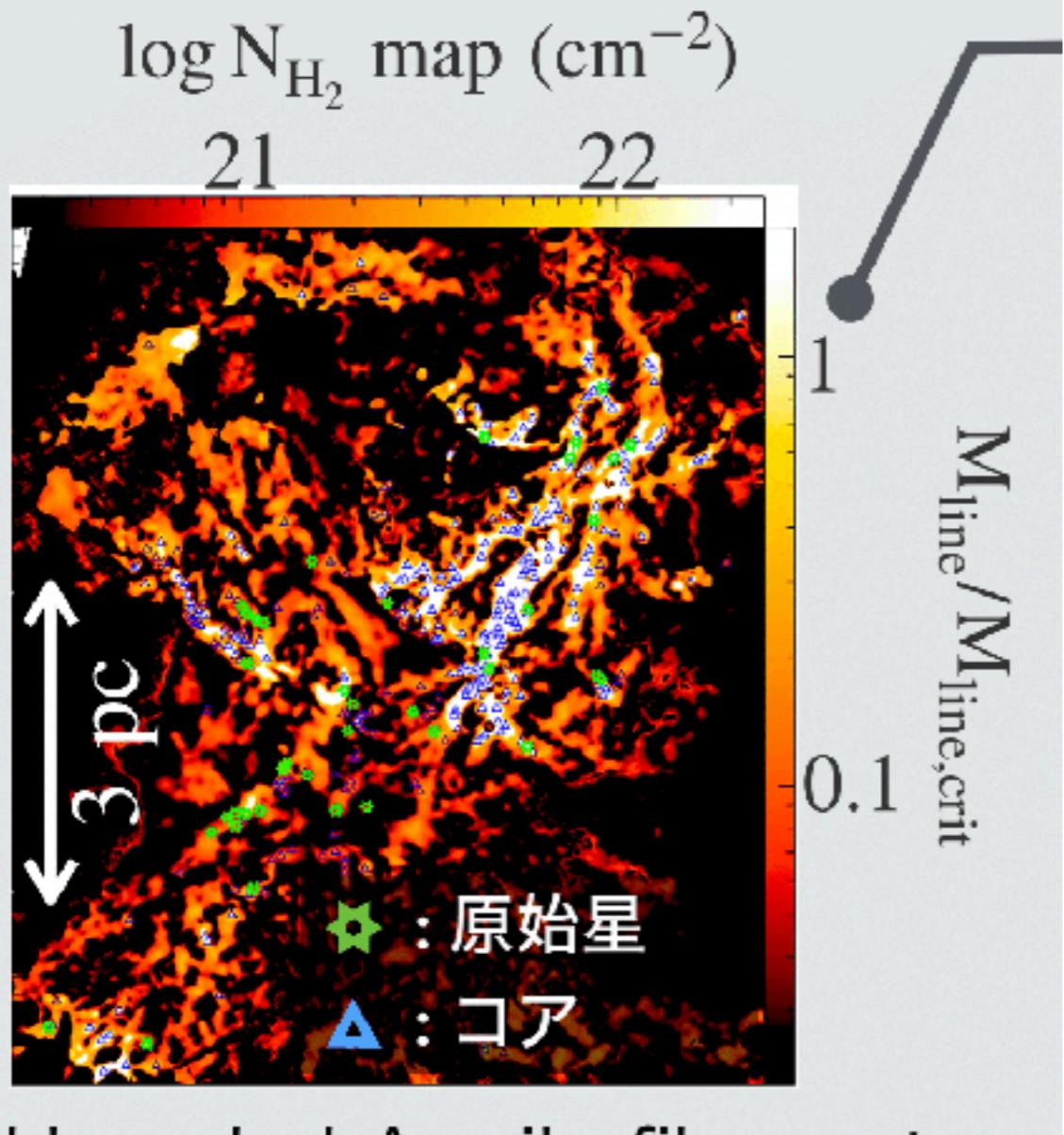
$$t_{\text{SN}} \sim 1 \text{ Myr}$$

» 複数の超新星爆発の衝撃波によって圧縮されたHIガスは低温高密度の分子雲に進化する

$$M \sim 10^6 \text{ M}_\odot \quad R \sim 10 - 100 \text{ pc} \quad (\rho \sim 10^{0-3} \text{ M}_\odot \text{ pc}^{-3})$$

分子雲の高密度領域での星形成

分子雲のダストの熱放射の観測



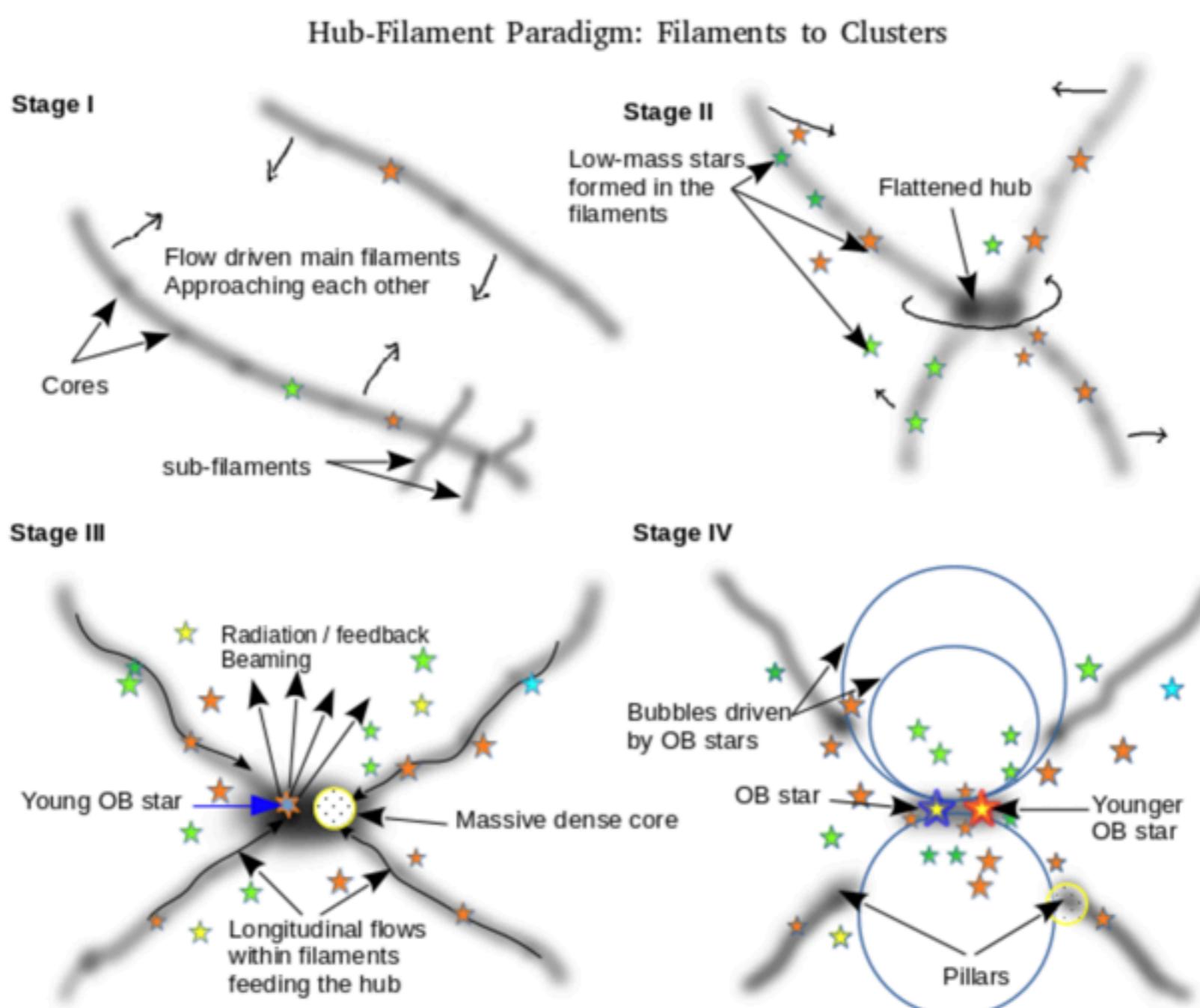
Herschel Aquila filaments

André et al. (2010)

From Abe Slide

- » 近年のハーシェル望遠鏡によるダスト熱放射の観測
- » 分子雲の高密度領域はフィラメント状
- » 臨界線密度を超えた領域が重力でつぶれる
- » フィラメントと原始星が空間相関

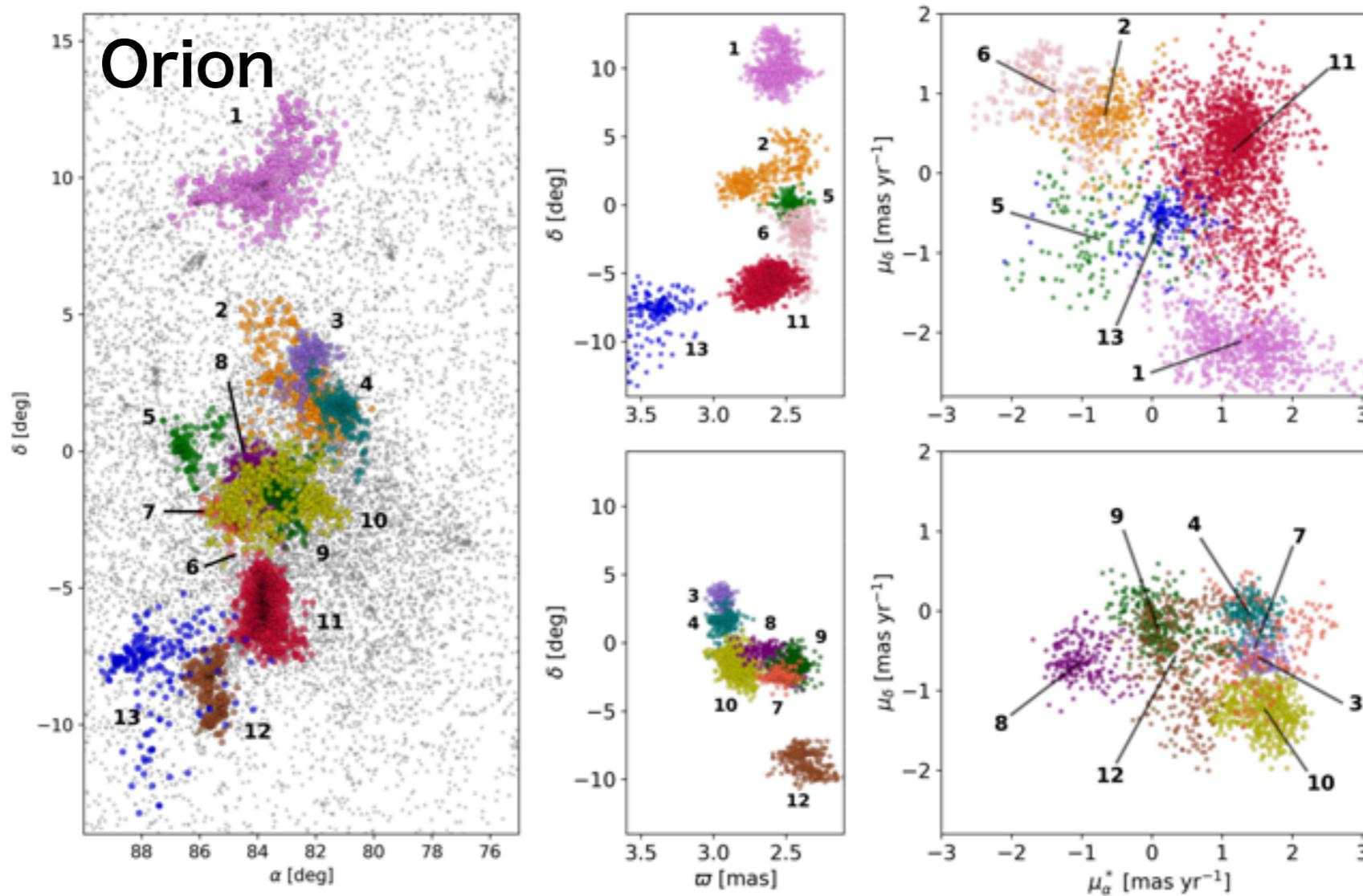
フィードバックによる雲の蒸発



Kumar+20

大質量星が形成すると周囲のガスを電離し星形成をとめる

星団形成の複数成分



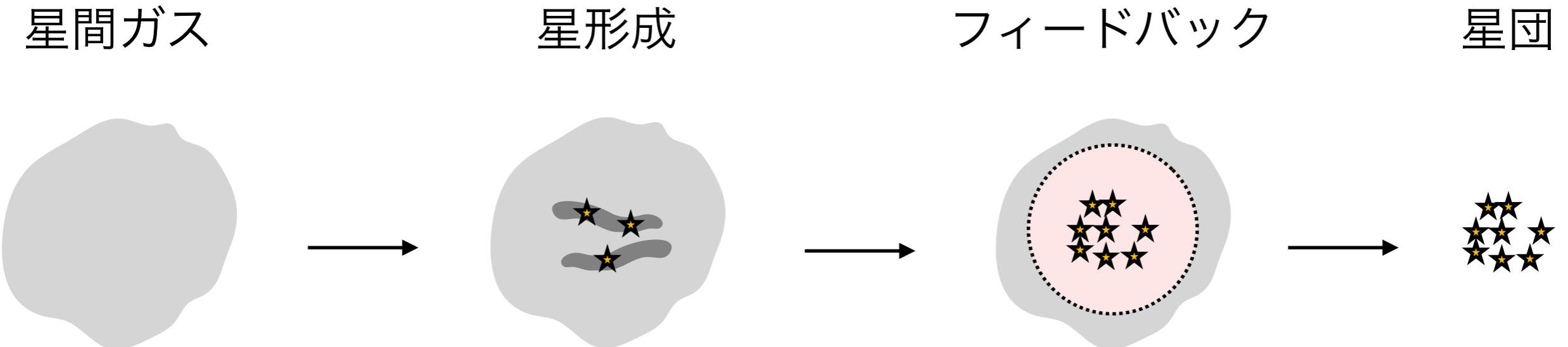
Sánchez-Sanjuán + 24

巨大分子雲では電離が完了し終わるまで星を作り続ける

$t_{age} \sim 30\text{Myr}$

そのため星団は複数の成分のクランプから成る

星団の蒸発



» 分子雲の密度

$$M \sim 10^6 M_{\odot}$$

$$R \sim 10 - 100 \text{ pc}$$

$$(\rho \sim 10^{0-3} M_{\odot} \text{ pc}^{-3})$$

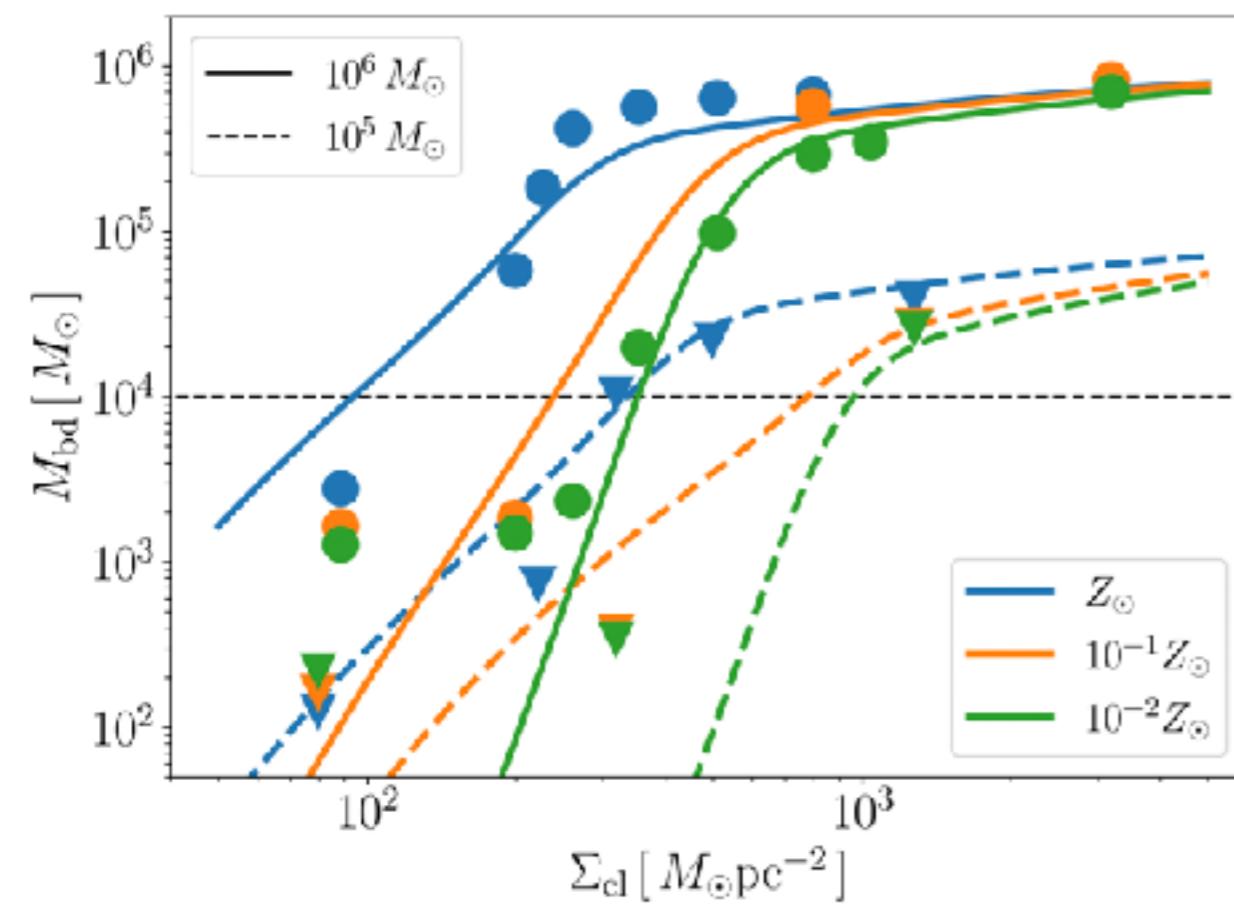
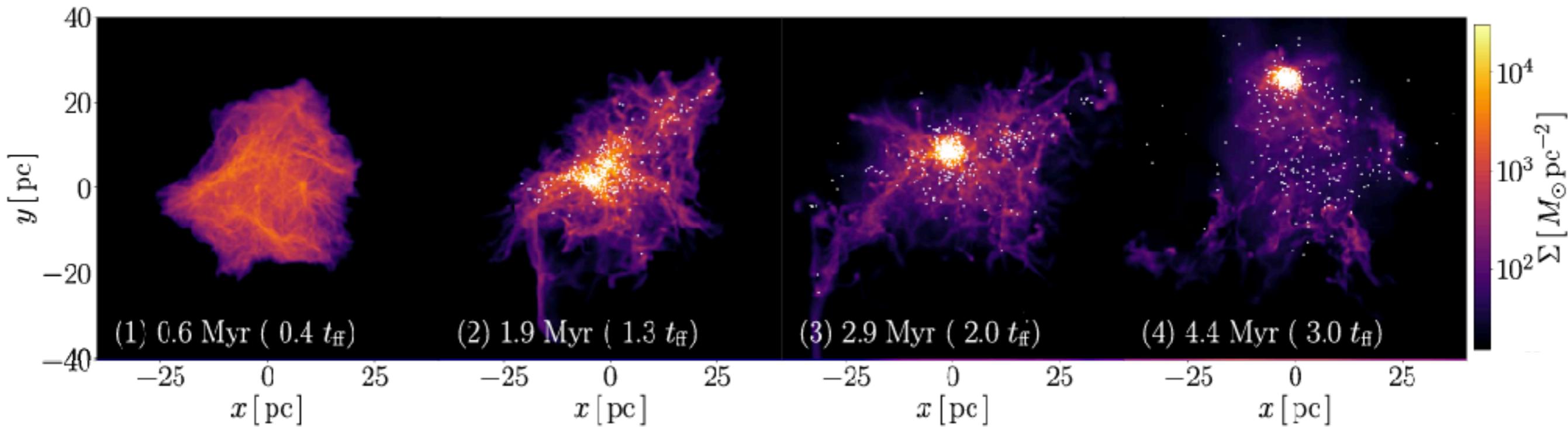
» 形成する星密度 (星形成効率1-10% : 星団形成領域)

$$\rho \sim 10^{-1 \sim 2} M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$$
 (球状星団の密度よりは小さい)

-> 密度の低い星団は重力束縛できずフィールド星に

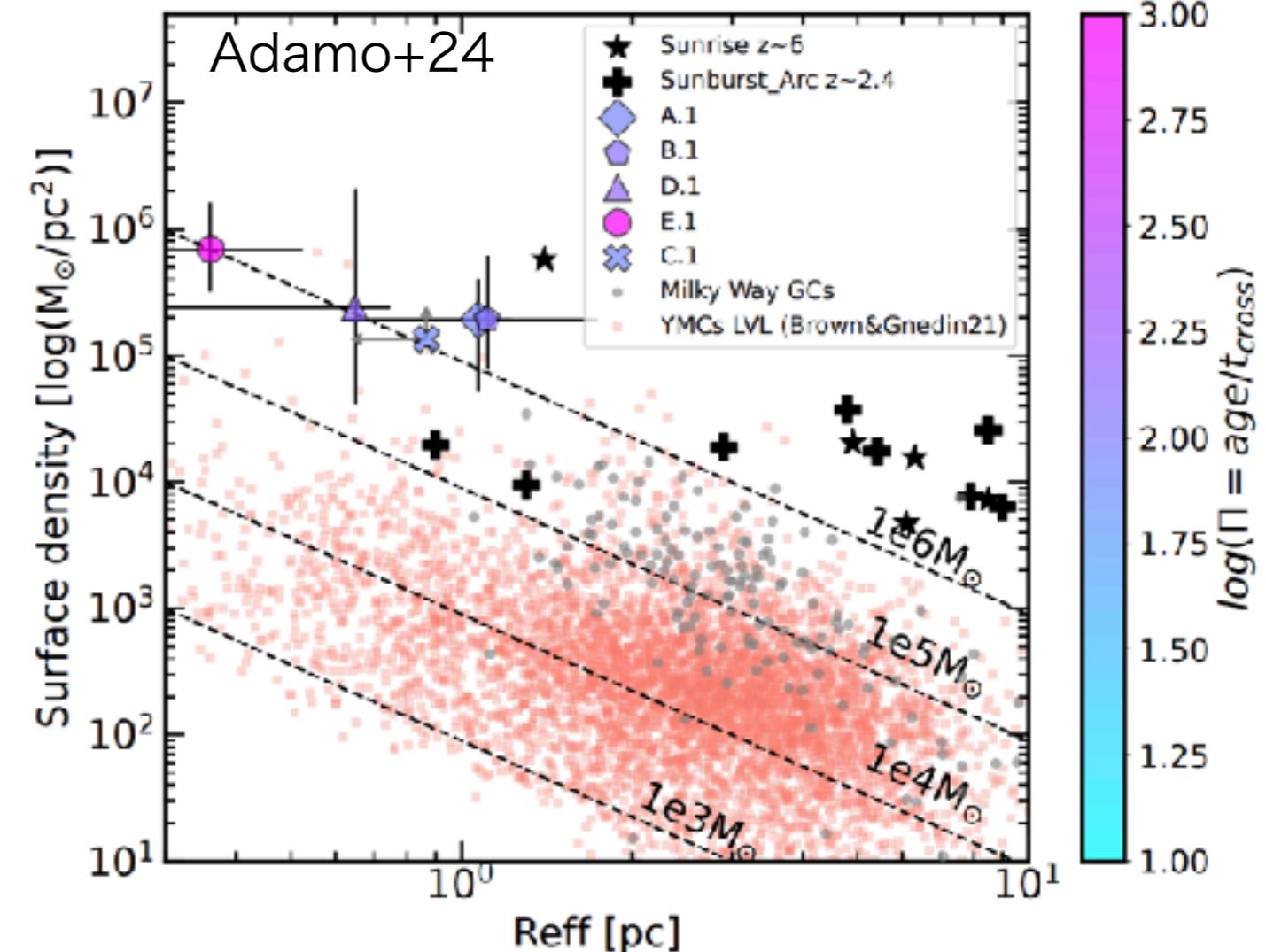
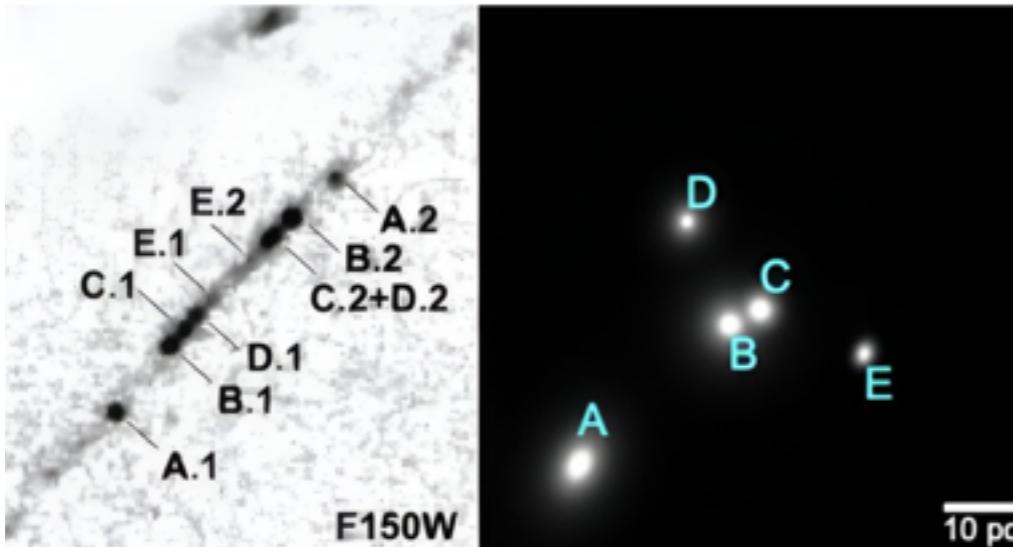
大質量星団を形成するには

e.g., Fukushima & Yajima (2021)



- » 球状分子雲の崩壊
 - » 高い面密度を持つ雲の場合はバウンドクラスターに
 - » HIIフィードバックが効かないくらい高い面密度が重要
 - $v_{\text{esc}} > c_{\text{s,HII}} \sim 10 \text{ km/s}$
 - » 高いSFEで星を形成し高密度星団へ
- 面密度が高いとフィードバックが効かず
に大質量星団に→どのように？

球状星団も同様に形成するのか？



✓ JWSTで観測された星団

e.g., Vanzella+22, 23a, 23b, Adamo+24

JWSTによる重力レンズされた銀河の観測

$M \sim 10^6 M_\odot$ の星団が $z \sim 4 - 10$ で発見されてきている

大質量星団の総質量はその銀河の星質量の > 30 % に相当

初期宇宙の大質量星団形成領域の観測されつつある

低金属環境ではIMFも変化

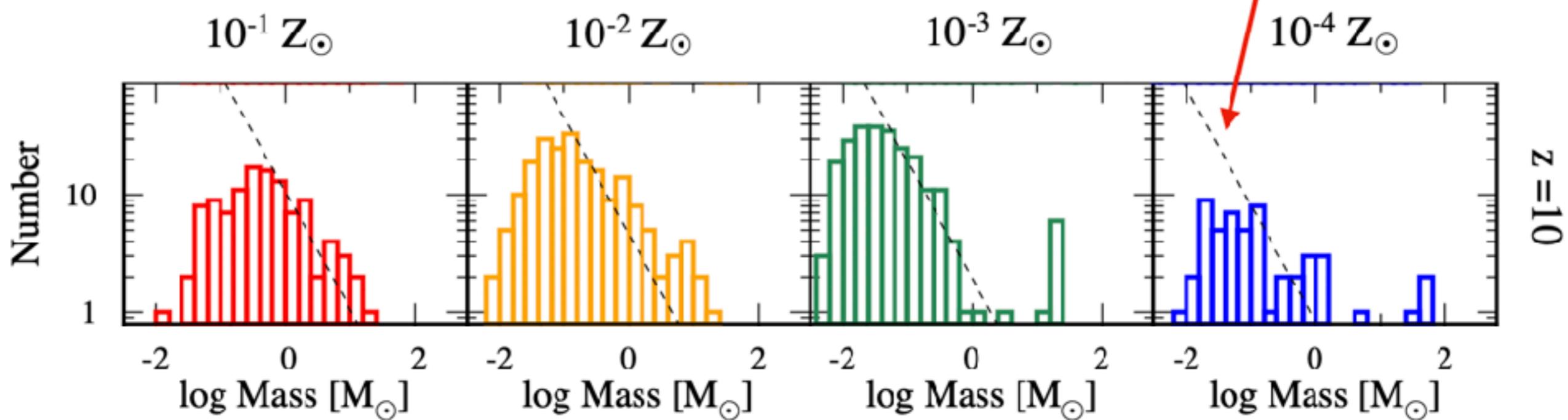
✓ 高赤方偏移環境

高いCMB温度 + 低い金属量

高赤方偏移環境を模擬した星団形成シミュレーション

Chon et al. 2022

点線は $\frac{dn}{dM} \propto M^{-\alpha}$
において $\alpha = 2$ に相当



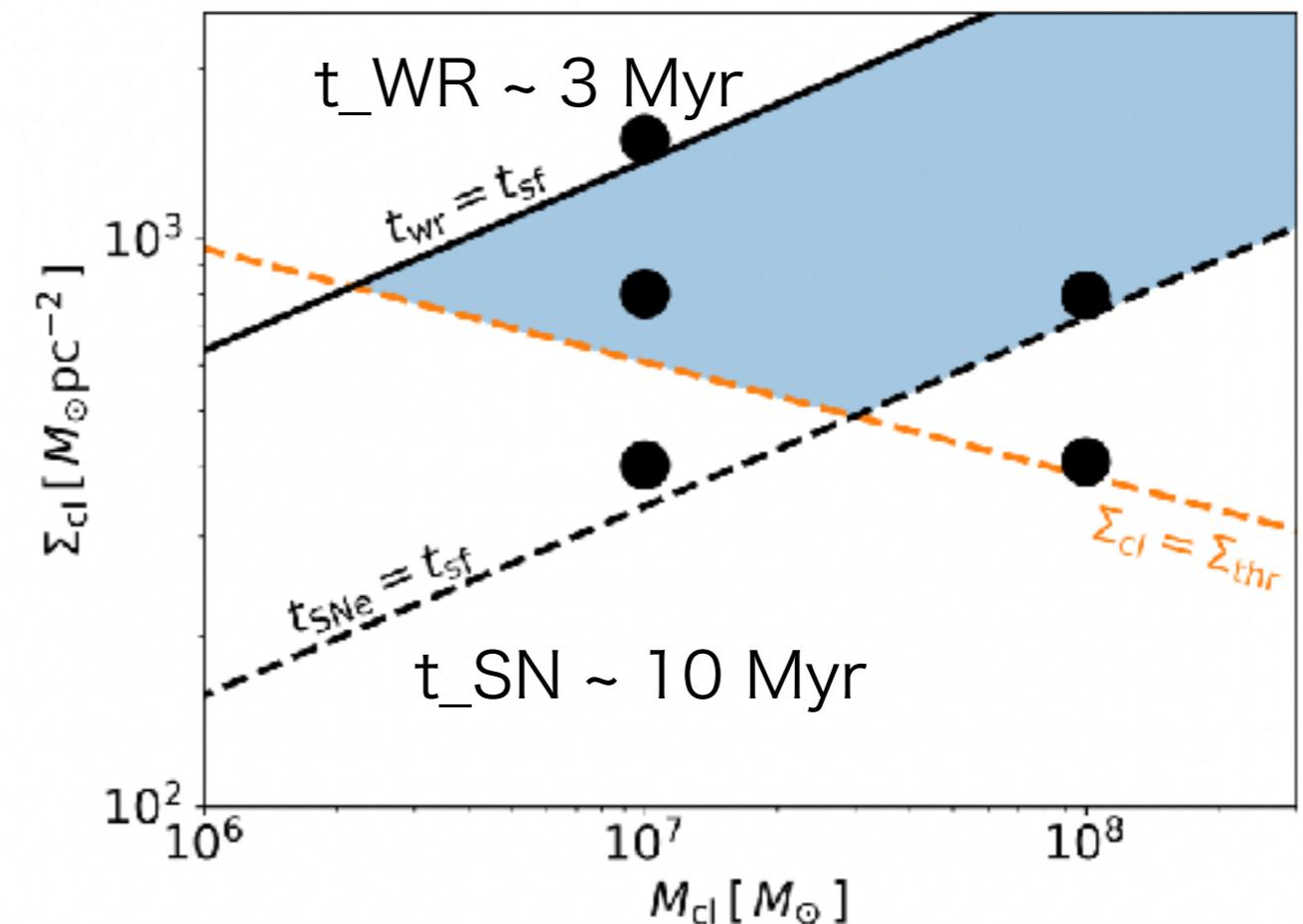
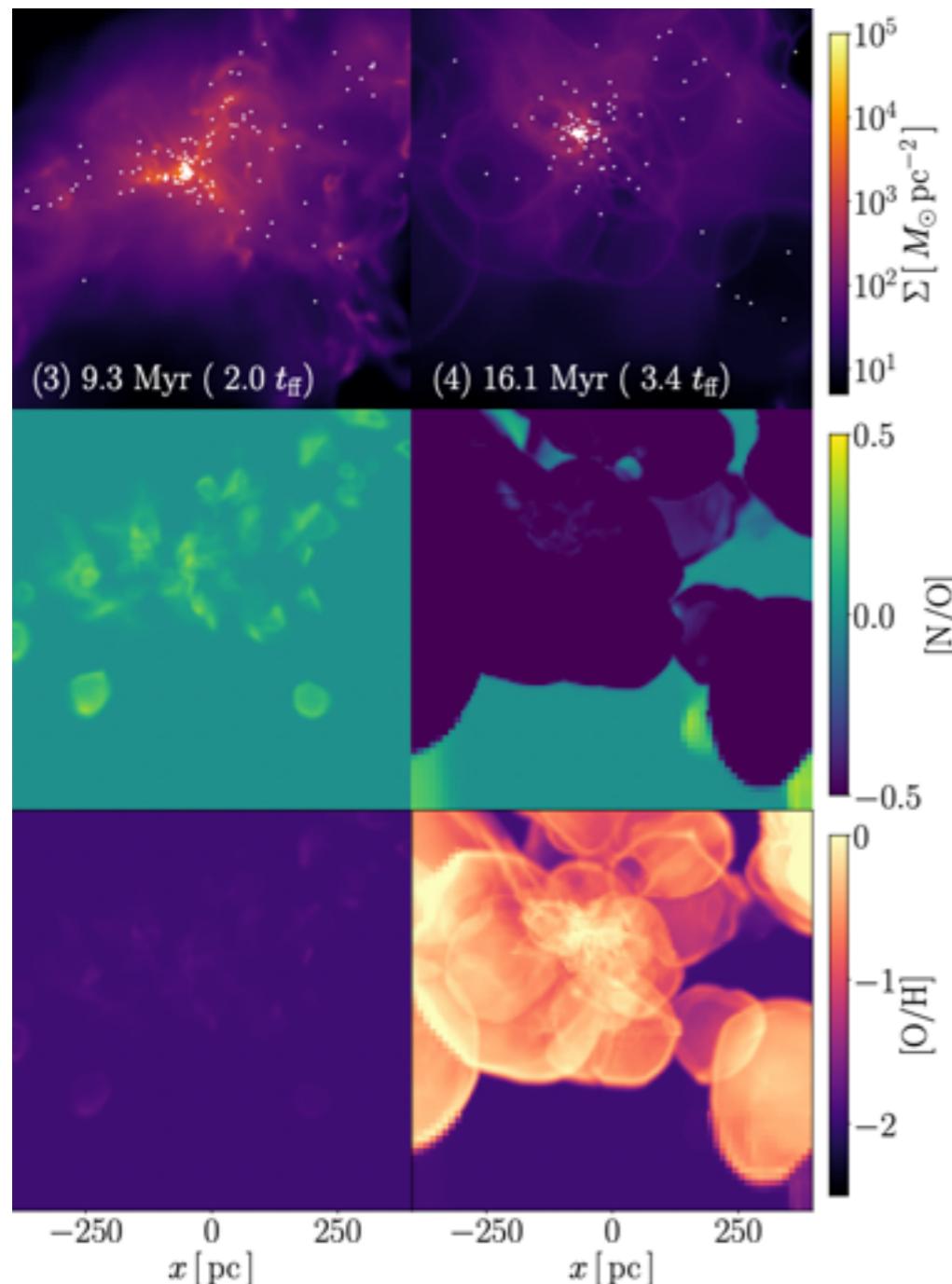
低金属量になるにつれ、大質量星の割合が増加（トップヘビーIMF）

From Ishida Slide

太陽近傍と同様に星団が形成するかは議論の余地あり

球状星団の組成異常を再現するシミュレーション

✓ 星風・SN入りの星団形成シミュレーション



星風でNリッチなガスを放出
超新星爆発が起きる前に第二世代星を形成

->ただし十分な質量な第二世代星ができているわけではない

ここまでまとめ

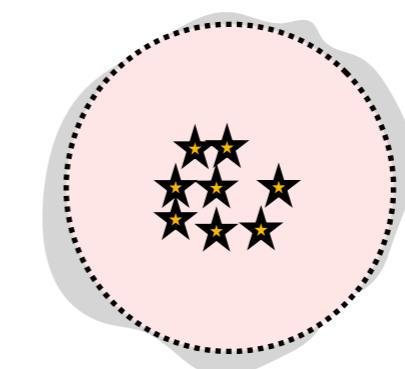
✓ 面密度が小さい場合

星間ガス

星形成

フィードバック

星団



重力で束縛できずに
散開星団へ

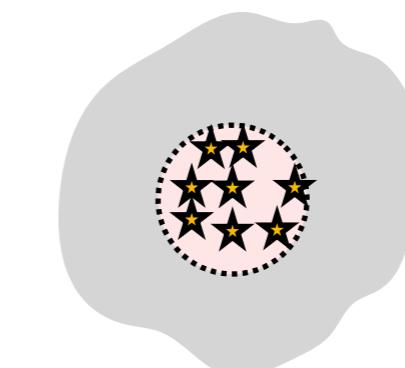
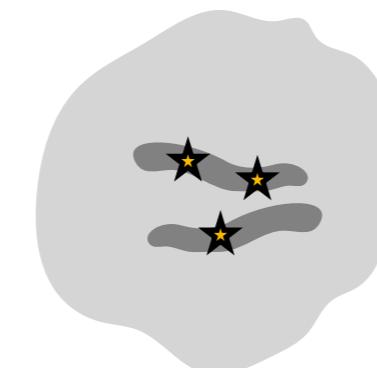
✓ 面密度が大きい場合

星間ガス

星形成

フィードバック

星団



YMC

一方で銀河のどのような領域でこれほど面密度が
大きいガスができるのかは謎

球状星団になるかも

Outline

✓ Introduction

星団とは

星団の重要性, 星形成, 銀河進化, 大質量星, 宇宙線加速, IMBH etc…

✓ 星団形成

銀河内での星形成

大質量な星団を形成するには？

宇宙初期環境の星団形成

✓ ガス衝突による星団形成シナリオの紹介

✓ まとめ

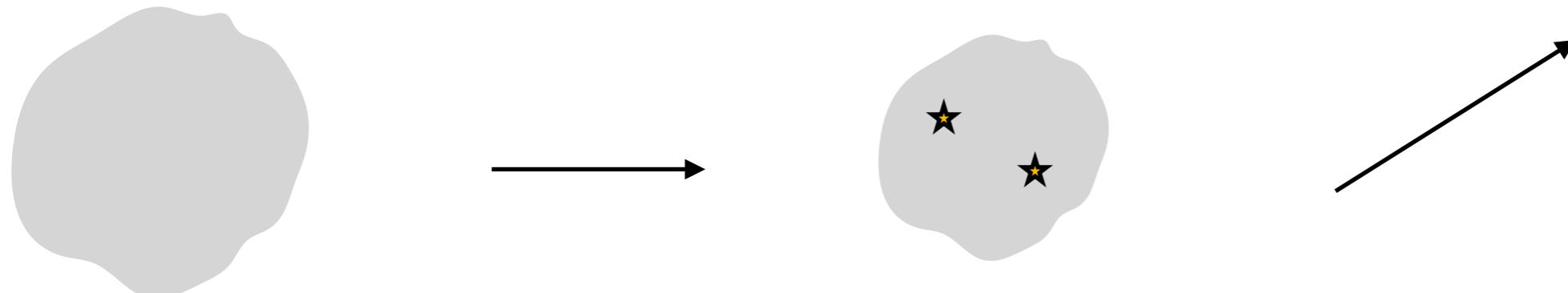
高密度な星団形成を起こすためのいくつかのシナリオ

Longmore+14

- ✓ 元々高密度なガス雲が崩壊



- ✓ 星を作りながら段々と高密度に



» 銀河中心のような高密度な分子ガスが崩壊して星団を作る?
→銀河外縁の大質量星団はどのように形成するかは謎

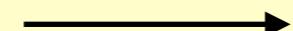
» 分子雲が崩壊しながら大質量星団を作る
→フィードバックが効く前にコンパクトになれるか?

どちらの説も観測的には確かめられていない

我々の研究

✓ 大質量星団の形成

星間ガス



星間ガスの高速衝突？

YMCを形成する
高密度ガス塊



YMC



► 本研究

H_Iガスの高速衝突が示唆される
領域でYMCが形成 @LMC

Fukui et al. (2017), Tsuge et al. (2019)

ガス衝突領域の重力崩壊で
コンパクトなガスクランプが形成

Maeda et al. (2021)

► コンパクトなガスクランプの進化

Fukushima & Yajima (2022)

乱流入りの球状分子雲を初期条件と
したシミュレーション

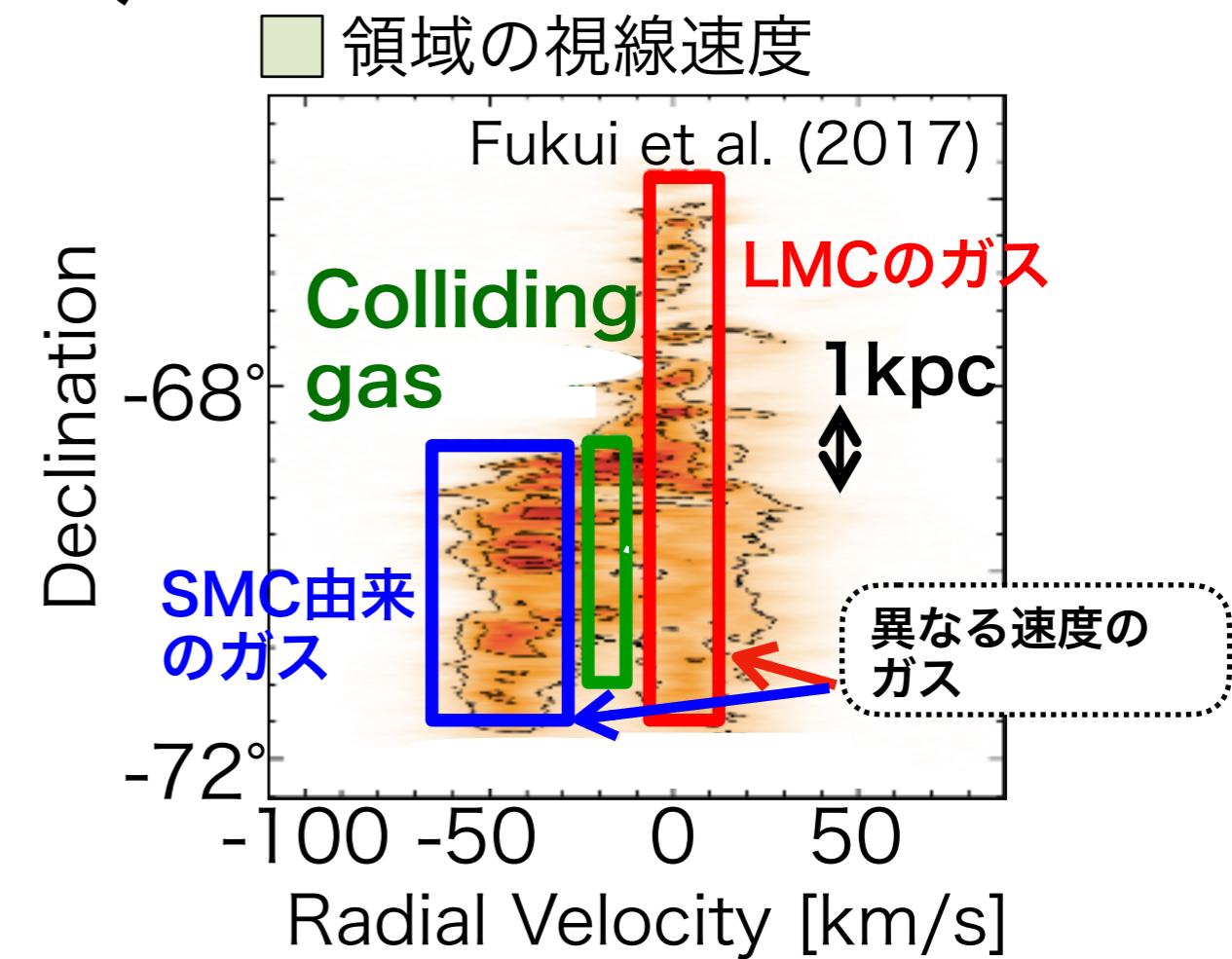
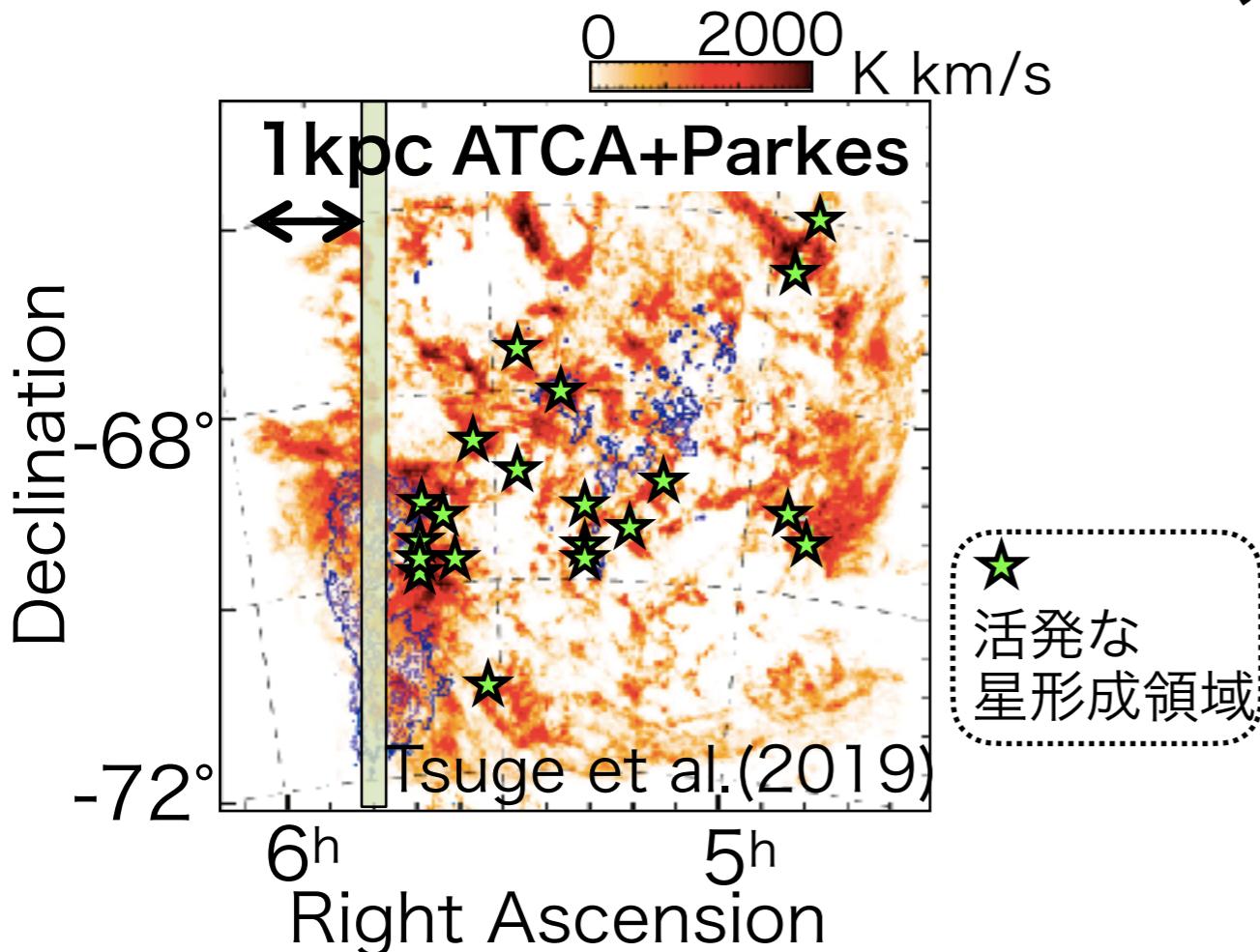
初期条件のガス雲が大質量で
超コンパクトな場合はYMCに進化

$$\Sigma_{\text{th}} \sim 400 \text{ M}_{\odot} \text{ pc}^{-2}$$

YMC形成におけるフィードバック効果の影響？

観測が示唆するYMC形成メカニズム @LMC

HIガスの全天マップ @ 大マゼラン雲(LMC)



✓ LMCで観測されるHIガスの特徴

Fukui et al. (2017), Tsuge et al. (2019, 2020)

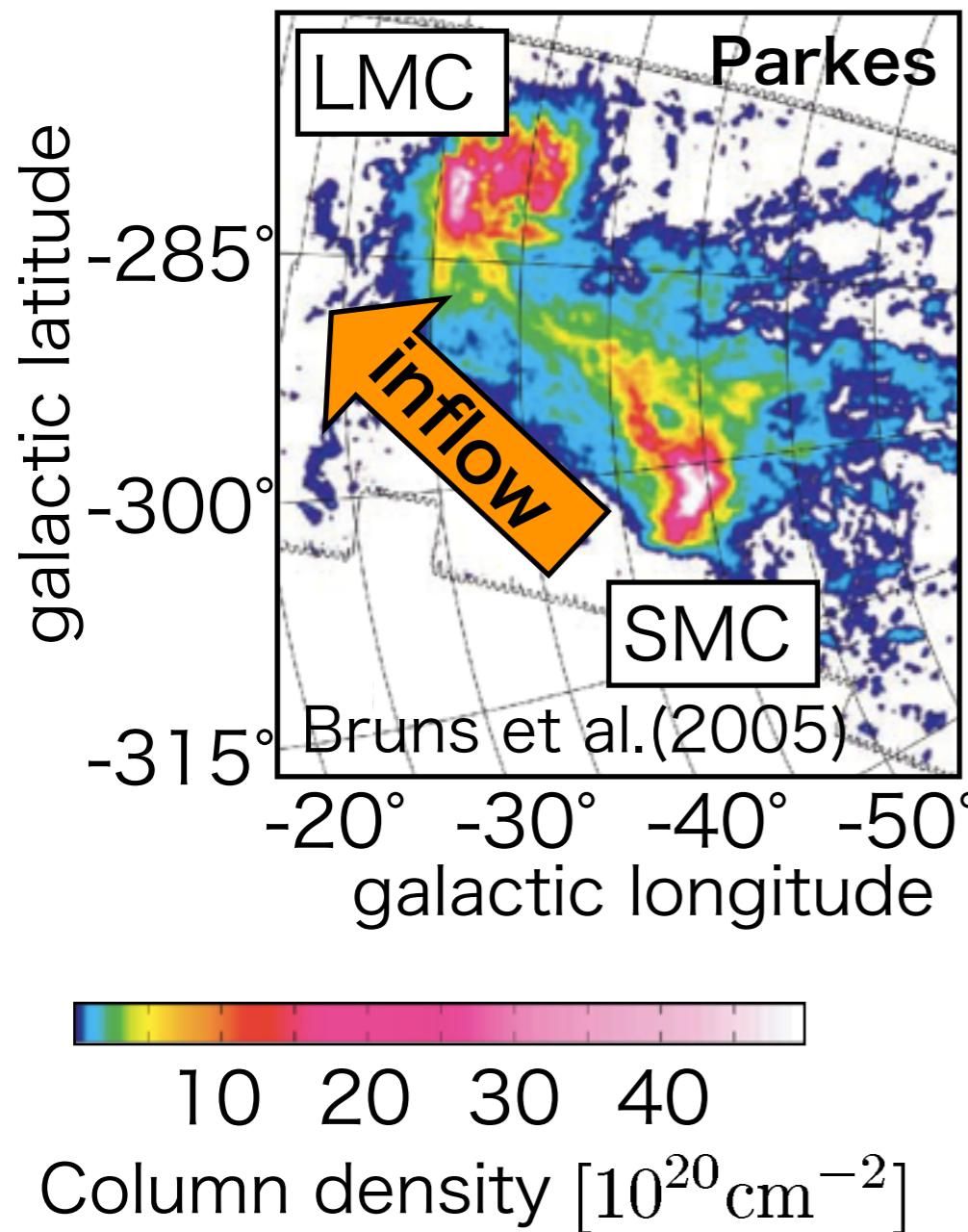
- 速度の異なる(~ 100 km/s)二成分のHIガスが衝突
- ガス衝突領域では活発な星形成が観測されている (R136, N44, etc…)

銀河間相互作用に由来する超大規模な ($\sim kpc$)
ガスの高速衝突(~ 100 km/s $\gg c_{s,HI} \sim 10$ km/s)でYMCが形成?

LMCにおけるガス衝突の起源

- ✓ SMCとLMCの近接遭遇によるガスの流入

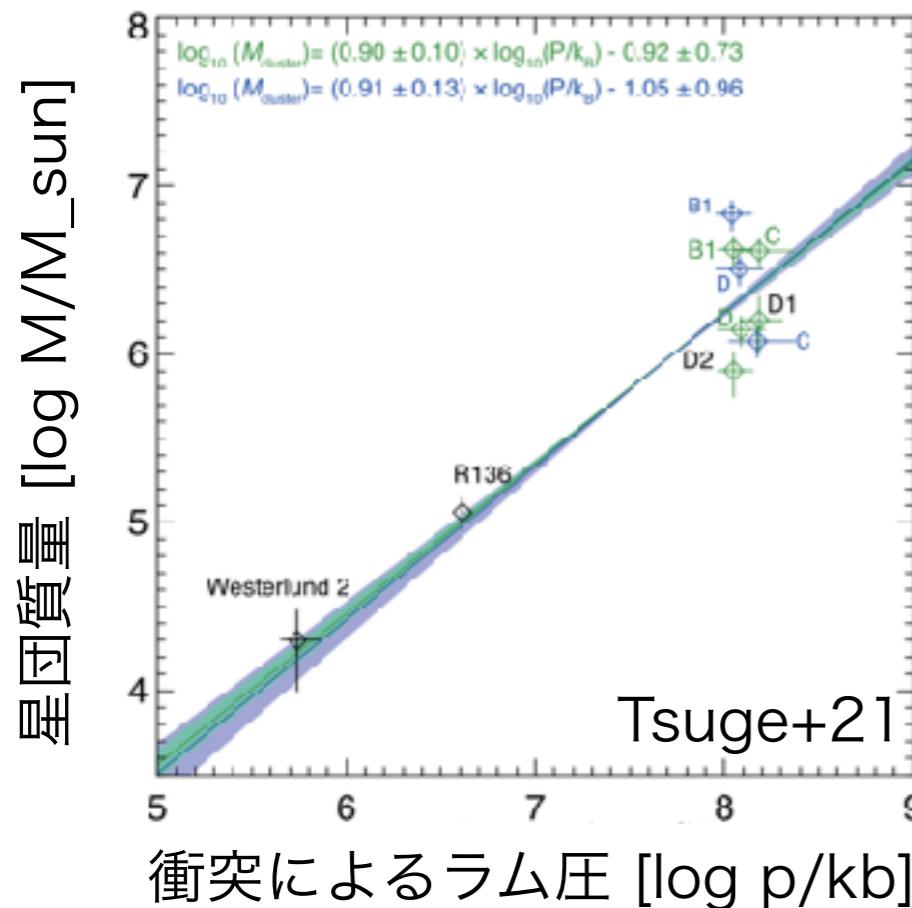
» マゼラン雲のHIガスの柱密度



- SMCとLMCの近接遭遇によるガスの剥ぎ取り(~0.2 Gyr 前)
Fujimoto & Noguchi (1990), Bekki & Chiba (2007)
- SMCのガスがLMCに落下しガスが高速衝突
- ガスの衝突領域の金属量はLMCの金属量に比べて小さい
(LMC $\sim 1/3 Z_{\odot}$, SMC $\sim 1/10 Z_{\odot}$)
Fukui et al. (2017)

LMCで観測されたガスの高速衝突は
銀河間相互作用に由来

大質量星団形成に関する観測的示唆



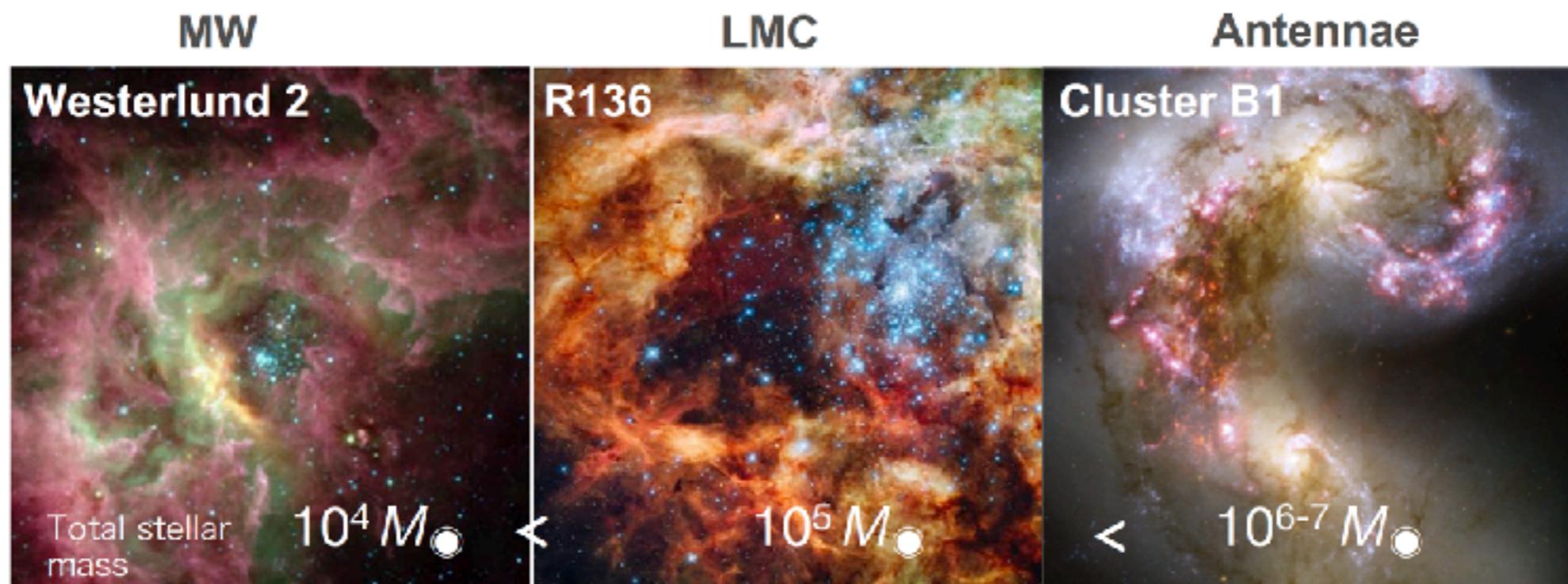
✓ 近傍の星団形成領域

銀河間相互作用による高速なガス衝突で
大質量星団が形成する

e.g., Fukui+17, Tsuge+19, 21

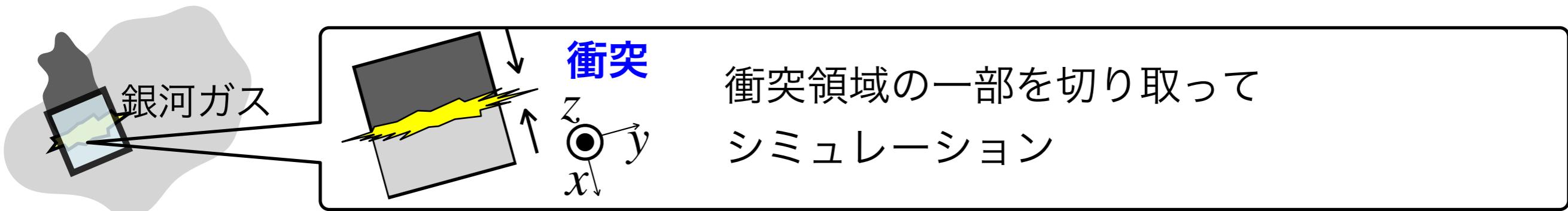
衝突するガスのラム圧と形成する
星団の質量に相関がある

→ガス衝突メカニズムを理解
することが重要



シミュレーションセットアップ

✓ 観測で示唆されているHIガス衝突



➤ 基礎方程式

MHD c.f. Inoue & Inutsuka (2012)

+ 加熱冷却 Inoue & Inutsuka (2012)

+ 化学反応 Inoue & Omukai (2015)

+ 自己重力 Maeda et. al. (2024a)

+ フィードバック Maeda et. al. (2024b)

➤ 境界条件

yz 面

ガス流入

xy, zx 面

周期境界

➤ 初期条件

$v_{\text{rel}} = 15, \underline{100} \text{ km/s}$

: 相対速度

$n_0 \sim \underline{1}, 10 \text{ cm}^{-3}$

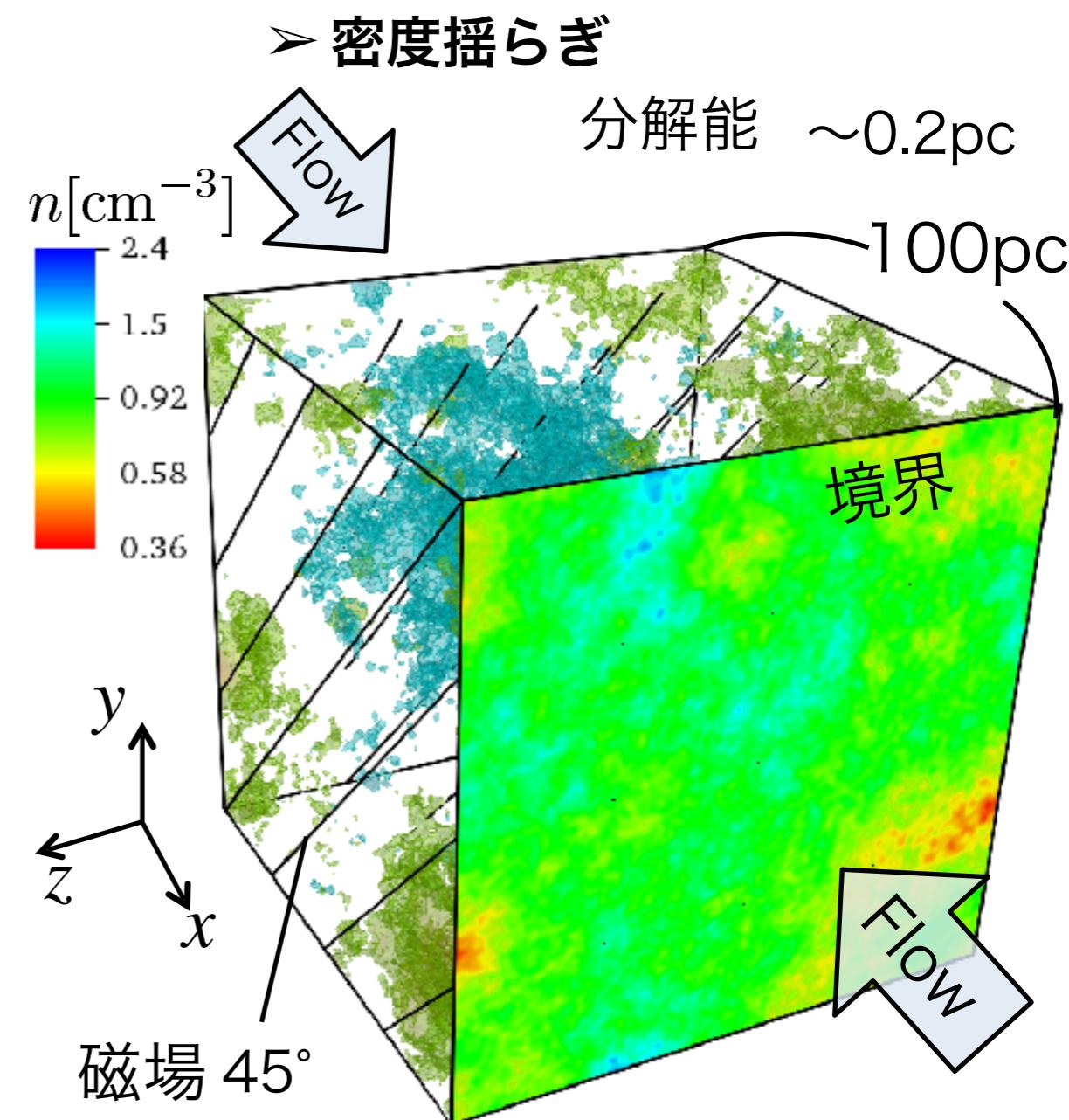
: 初期密度

$B_0 = \underline{1}, 3 \mu\text{G}$

: 初期磁場強度

$Z = 1 Z_\odot$

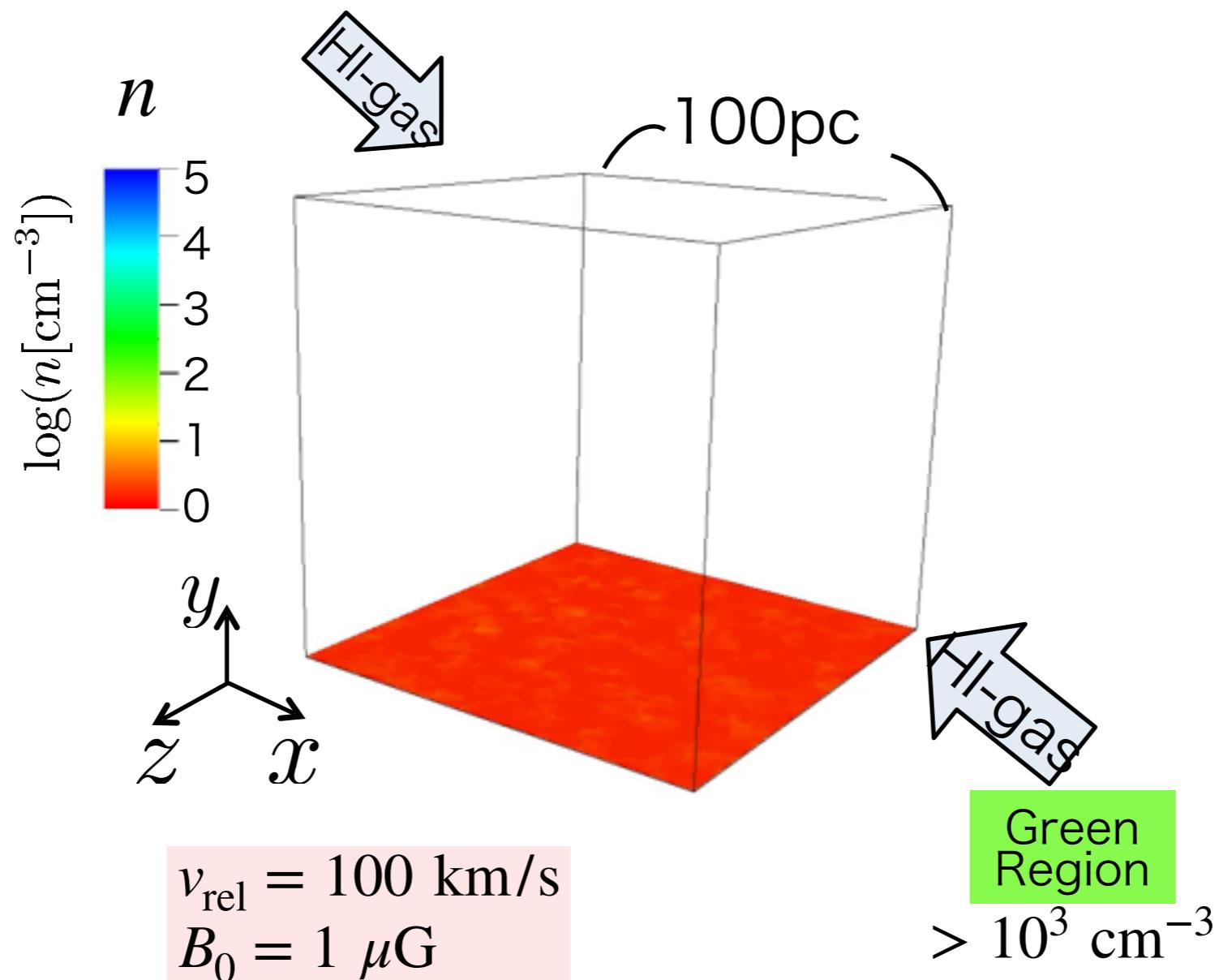
: 金属量



Formation of Massive Gas Clumps by Fast HI Gas Collision

✓ Fast HI gas collision simulation

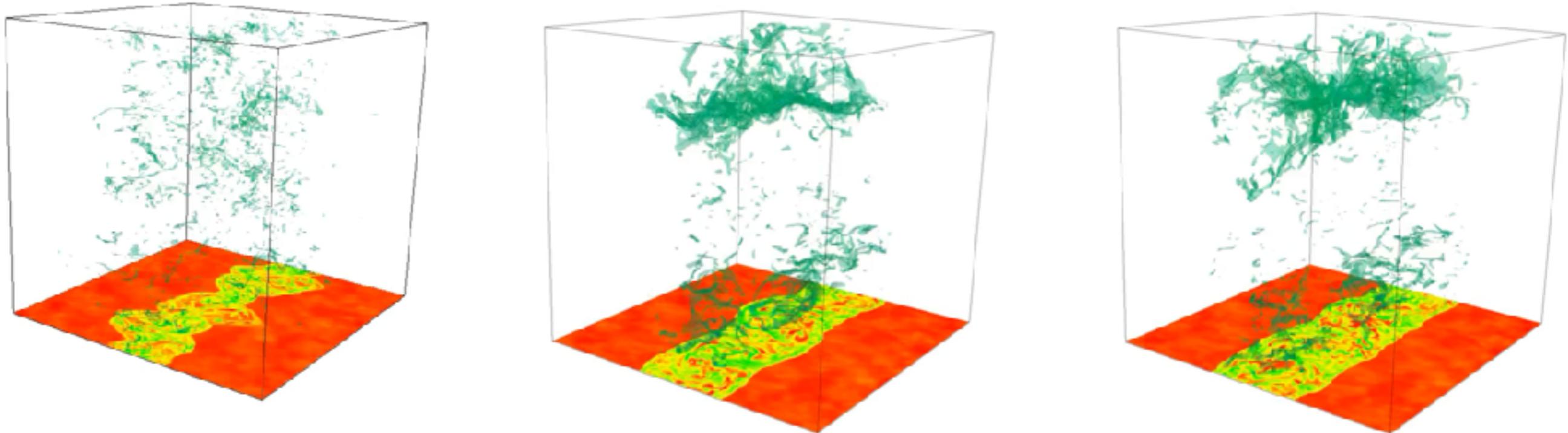
Maeda et. al. (2021, 2024b)



Massive ($> 10^4 M_\odot$) & compact ($< 10 \text{ pc}$) clumps seem to be formed by the global gravitational collapse of molecular clouds created in the shocked layer

Formation of Massive Gas Clumps by Fast HI Gas Collision

Evolution



✓ 3 stages of massive clump formation

» Formation of
small clouds

Small cloud formation
by thermal instability

» Massive clump
formation

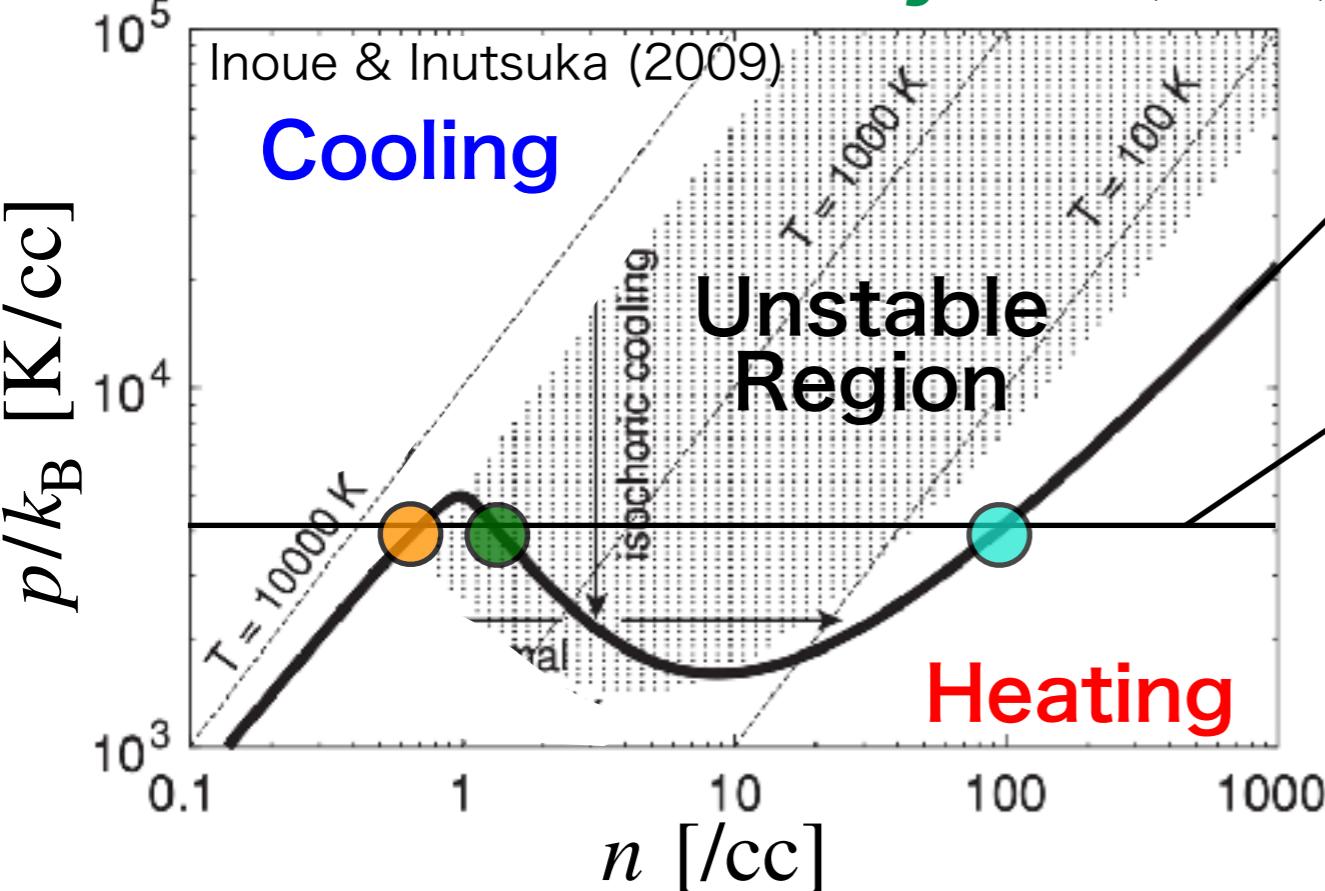
Small clouds merge
by gravity to form
massive clouds.

» Feedback

Massive stars are
formed in clouds,
causing feedback.

Formation of Small Clouds in Shocked Region

✓ Thermal instability Field (1965)



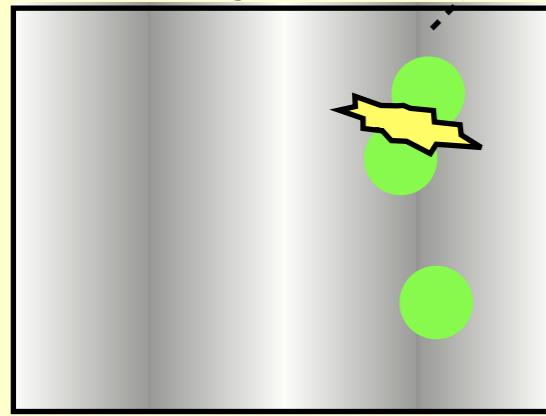
Thermal equilibrium curve
(Cooling = Heating)

HI gas have three (● ● ○) thermal equilibrium point

- Cold Neutral Medium (CNM)
- Warm Neutral Medium (WNM)
- Unstable equilibrium point

» At ● point

Density



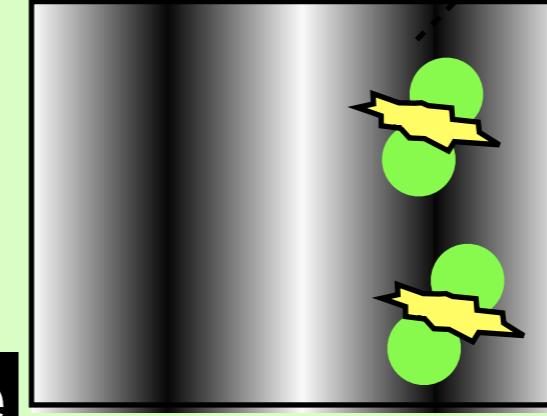
Cooling

Strong cooling
in dense region.

Unstable

Pressure

Density

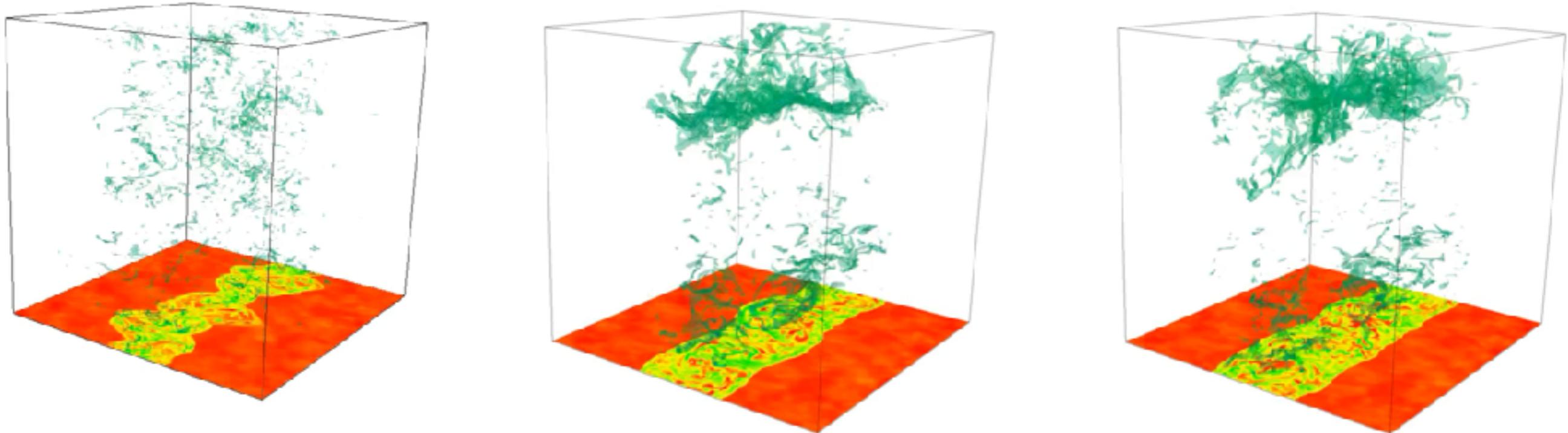


Pressure

Gas becomes
more dense due to
the pressure gradient
force.

Formation of Massive Gas Clumps by Fast HI Gas Collision

Evolution



✓ 3 stages of massive clump formation

» Formation of
small clouds

Small cloud formation
by thermal instability

» Massive clump
formation

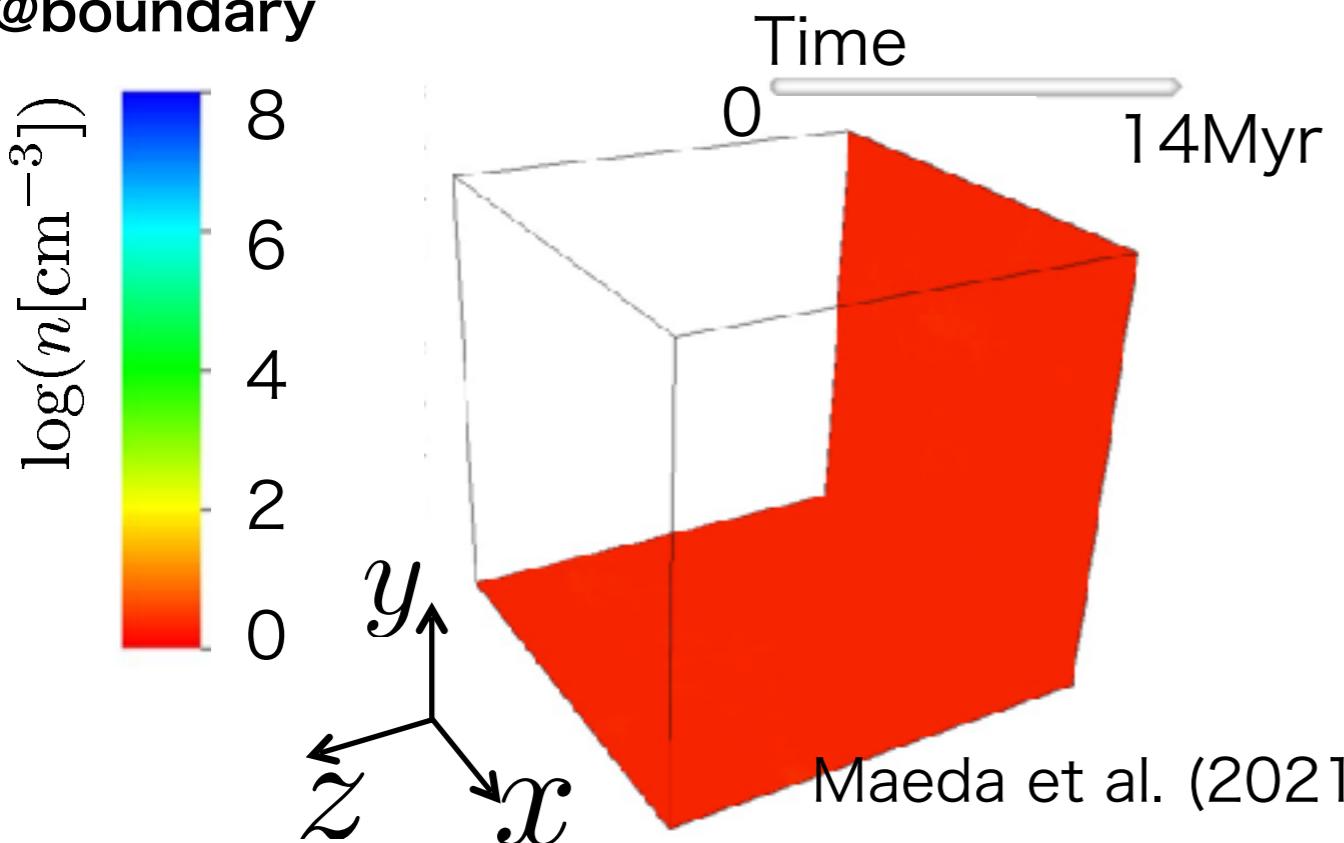
Small clouds merge
by gravity to form
massive clouds.

» Feedback

Massive stars are
formed in clouds,
causing feedback.

Massive Clump Formation by Gravitational Collapse of Shocked Sheet

Number density
@boundary



✓ Strong initial B-field simulation

$$B_0 = 3 \mu\text{G}$$

» Dense regions are not created due to strong B-field

$$n > 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

» Low density clumps which are supported by B-field

$$n \sim 10^2 \text{ cm}^{-3}$$

✓ Gravitational collapse condition of shock compressed layer

(Mouschovias & Spitzer Jr, 1976; Nakano & Nakamura, 1978)

$$\frac{M}{\Phi_m} \cdot 2\pi\sqrt{G} = 1.2 \left(\frac{\sin \theta}{\sin 45^\circ} \right)^{-1} \left(\frac{L}{100\text{pc}} \right) \left(\frac{B_0}{1\mu\text{G}} \right)^{-1} \left(\frac{n_0}{1\text{cm}^{-3}} \right) > 1$$

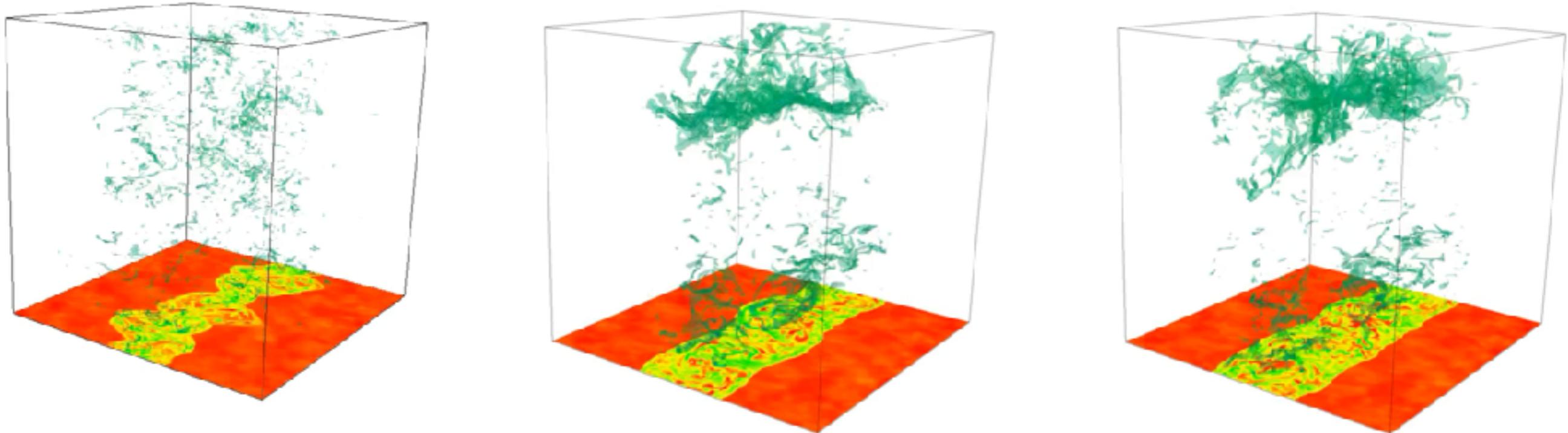
Gravitational collapse against B-field (Fiducial model)

$$= 0.4 \left(\frac{\sin \theta}{\sin 45^\circ} \right)^{-1} \left(\frac{L}{100\text{pc}} \right) \left(\frac{B_0}{3\mu\text{G}} \right)^{-1} \left(\frac{n_0}{1\text{cm}^{-3}} \right) < 1$$

Gravitational collapse suppressed due to B-field

Formation of Massive Gas Clumps by Fast HI Gas Collision

Evolution



✓ 3 stages of massive clump formation

» Formation of small clouds

Small cloud formation by thermal instability

» Massive clump formation

Small clouds merge by gravity to form massive clouds.

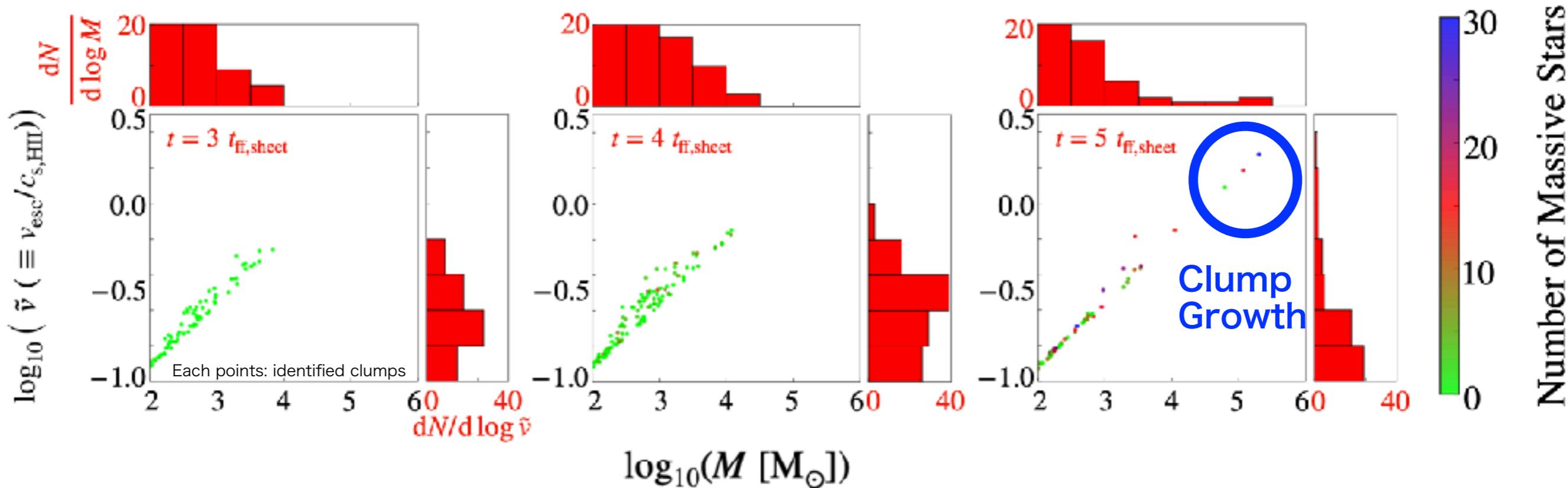
» Feedback

Massive stars are formed in clouds, causing feedback.

Evolution of the Mass of Formed Gas Clumps

✓ Evolution of clumps formed by gas collision simulation

→ One connected region ($> 10^4 \text{ cm}^{-3}$) is identified as the clumps at each time.



» $M \sim 10^5 \text{ M}_\odot$ clumps remain even with feedback
(after forming many massive stars).

» By contrast, $M \sim 10^3 - 10^4 \text{ M}_\odot$ clumps are decreased
(evaporated by feedback?)

Effect of Feedback in Clump Formation

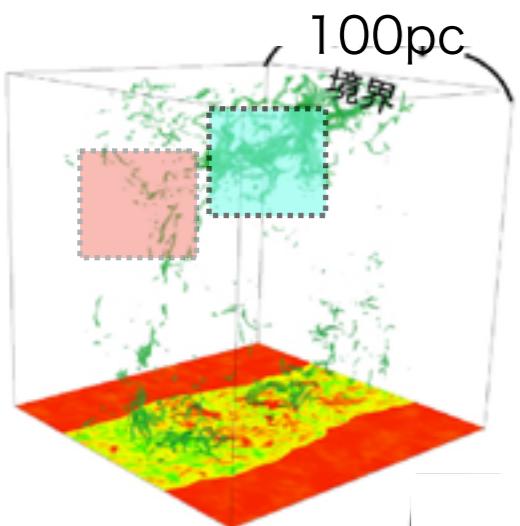
✓ Comparison of escape velocity and sound speed of HII region



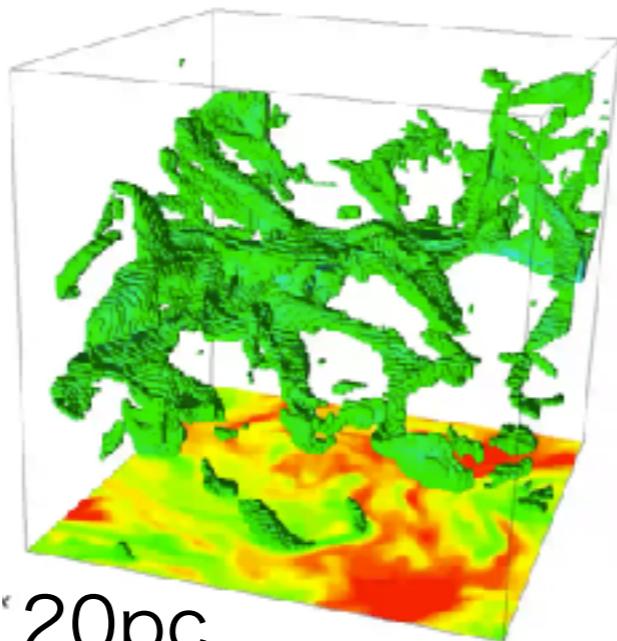
- $v_{\text{esc}} > c_{\text{HII}}$
Gravity prevents gas escape
- $v_{\text{esc}} < c_{\text{HII}}$
HII region expands against gravity

e.g., Bressert et al. (2012)

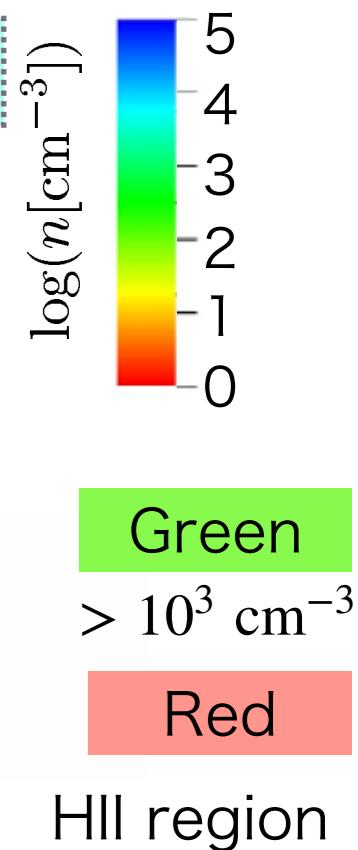
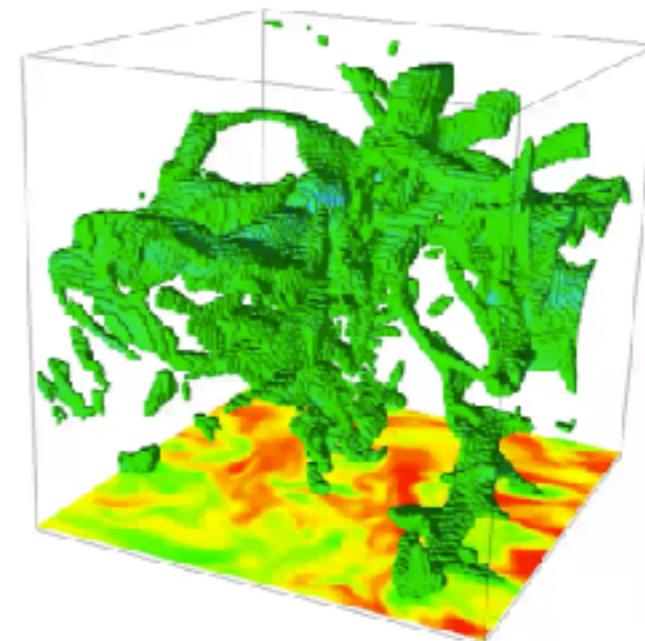
✓ The difference in the evolution of gas clumps with different escape velocities



➤ Escape velocity(small)

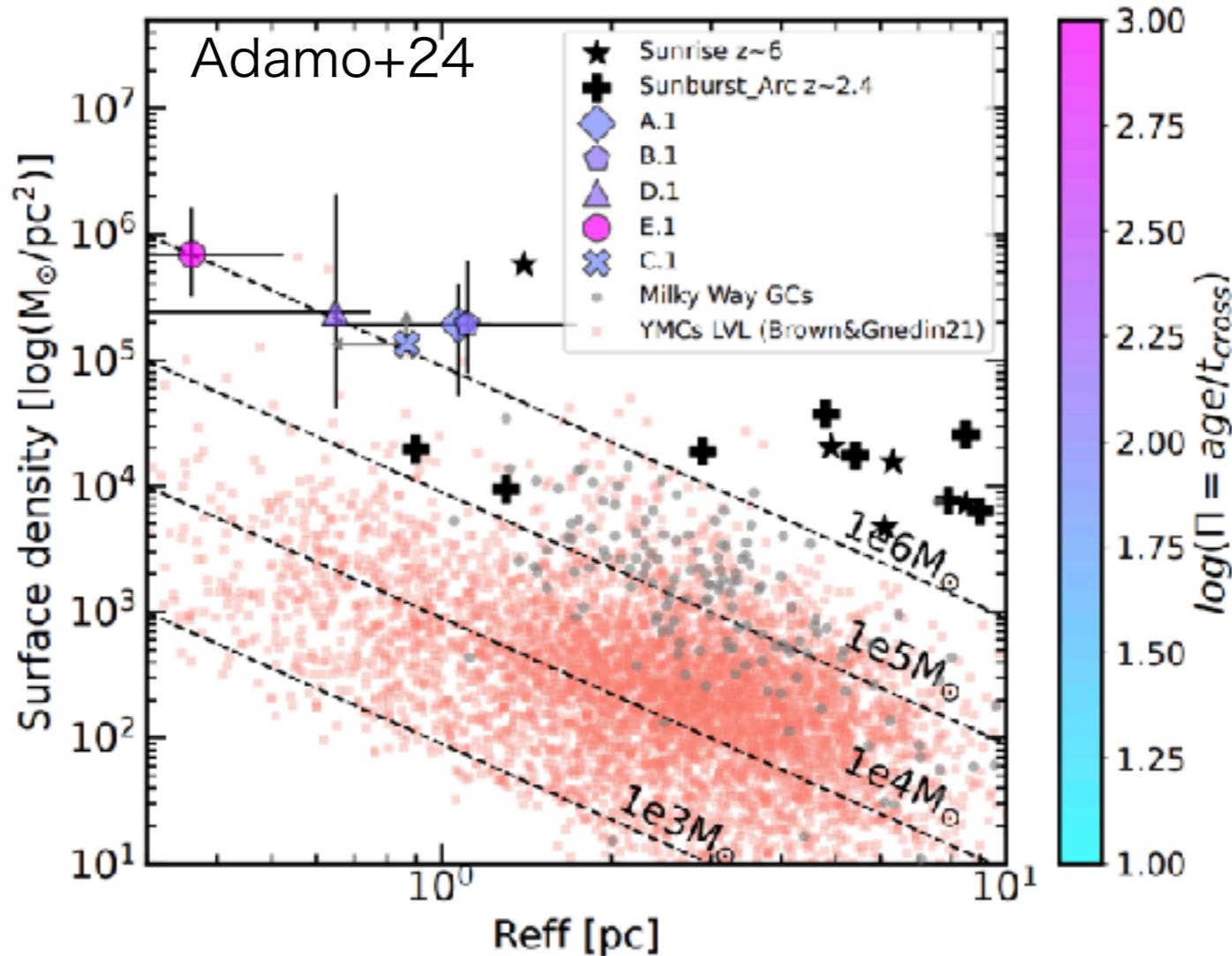


➤ Escape velocity (Large)



The clumps with large escape velocity maintain a dense structure for a long time and form a star → YMC

JWSTで観測された宇宙初期の大質量星団



✓ JWSTで観測された星団 e.g., Vanzella+22, 23a, 23b, Adamo+24

JWSTによる重力レンズされた銀河の観測

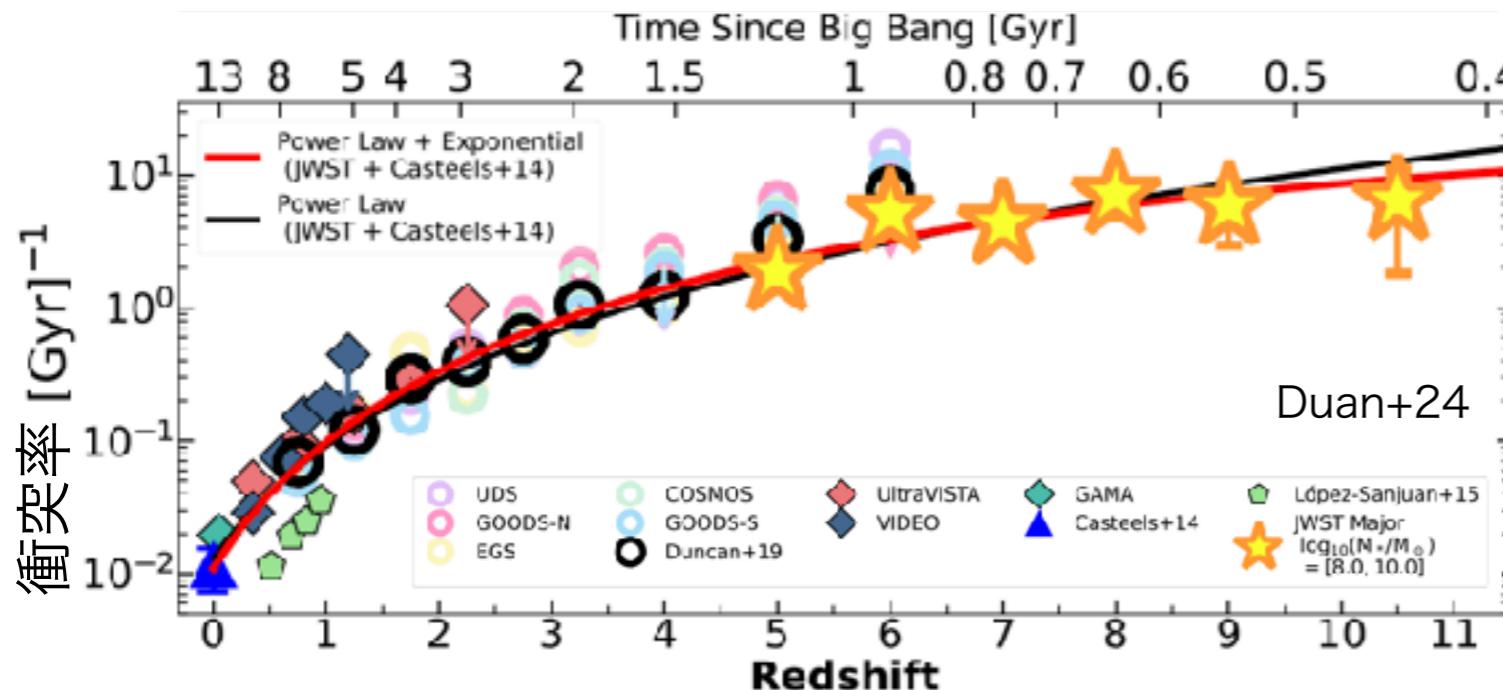
$M \sim 10^6 M_{\odot}$ の星団が $z \sim 4 - 10$ で発見されてきている

大質量星団の総質量はその銀河の星質量の > 30 % に相当

宇宙初期環境での大質量星団形成の理解したい

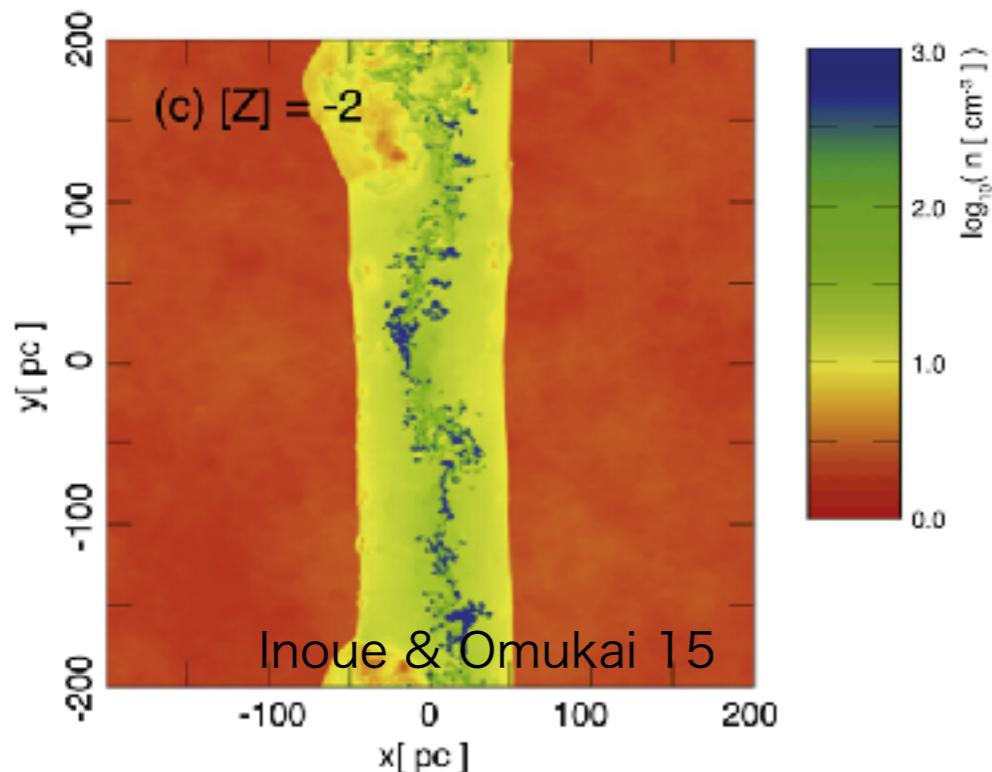
初期宇宙環境のガス衝突計算

✓ 初期宇宙での銀河衝突率の観測



- » JWSTによる観測
- » 銀河衝突率が増加
- » ガス衝突領域で同様に星団形成がおきうるか？

✓ 宇宙初期環境のガス衝突計算



- » 金属量の小さいガス計算では熱不安定性の最大成長波長が大きくなり大きなクラウドが形成
- » $Z < 0.04 Z_\odot$ で熱不安定で形成した雲のスケールがジーンズ長を超える → 大質量星団形成？
- » 自己重力と磁場がある場合はどうなるのか？

シミュレーションセットアップ

✓ 基礎方程式

MHD c.f. Inoue & Inutsuka 12

+ 加熱冷却 Inoue & Inutsuka 12

+ 化学反応 Inoue & Omukai 15

+ 自己重力 Maeda+24a

+ フィードバック Maeda+24b

冷却は Maeda+24b に加えて
高温側の冷却関数を導入 Kim+23

Free-Free Draine+11

再結合線 (H) Draine+11

CIE Gnat & Ferland 12

✓ 境界条件

yz 面

ガス流入

xy, zx 面

周期境界

✓ 初期条件

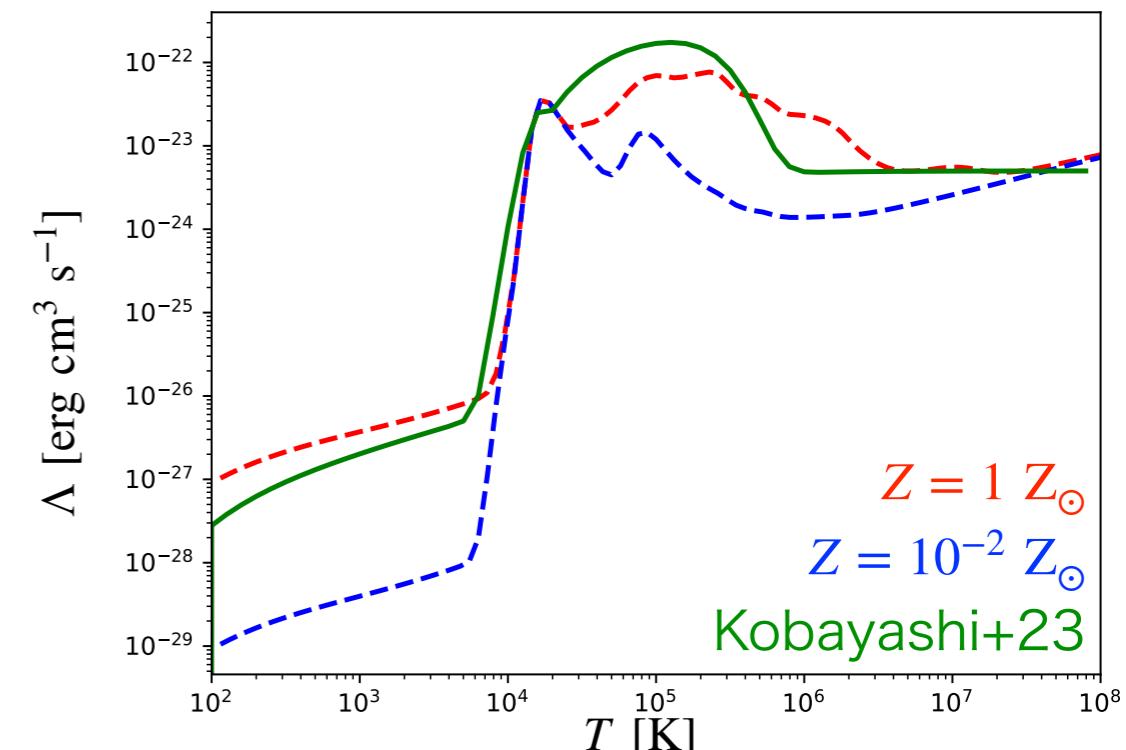
$v_{\text{rel}} = 100 \text{ km/s}$: 相対速度

$n_0 \sim 1 \text{ cm}^{-3}$: 初期密度

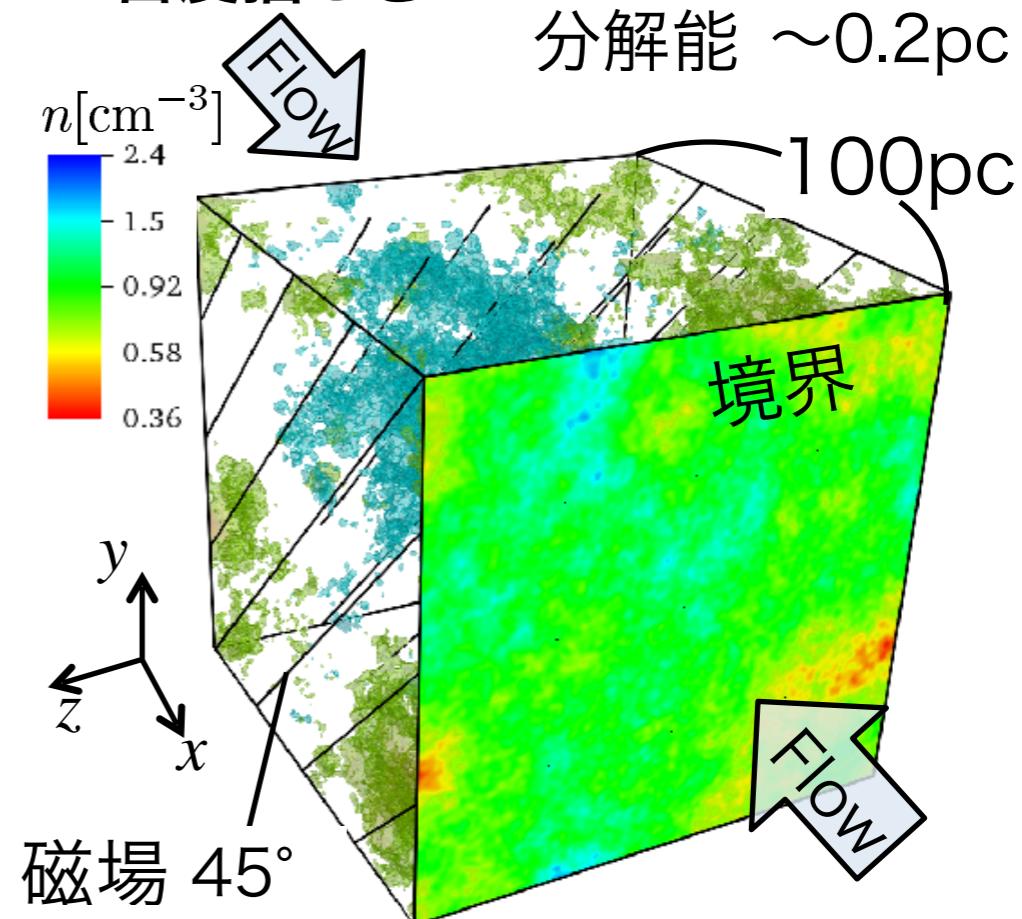
$B_0 = 1 \mu\text{G}$: 初期磁場強度

$Z = 10^{-2}, 10^{-4} Z_\odot$: 金属量

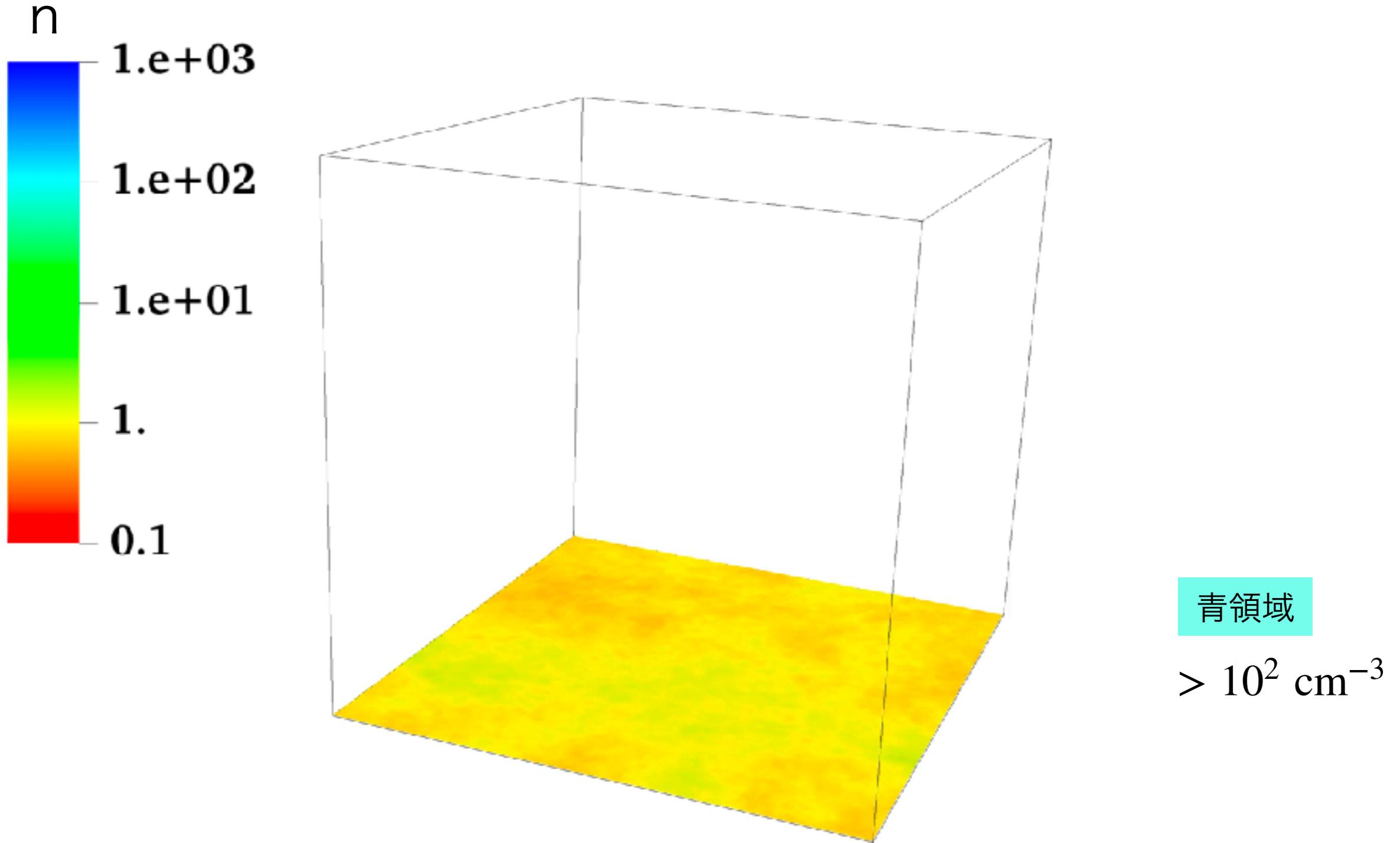
► 冷却関数



► 密度揺らぎ



低金属ガス衝突シミュレーション ($10^{-4} Z_{\odot}$)

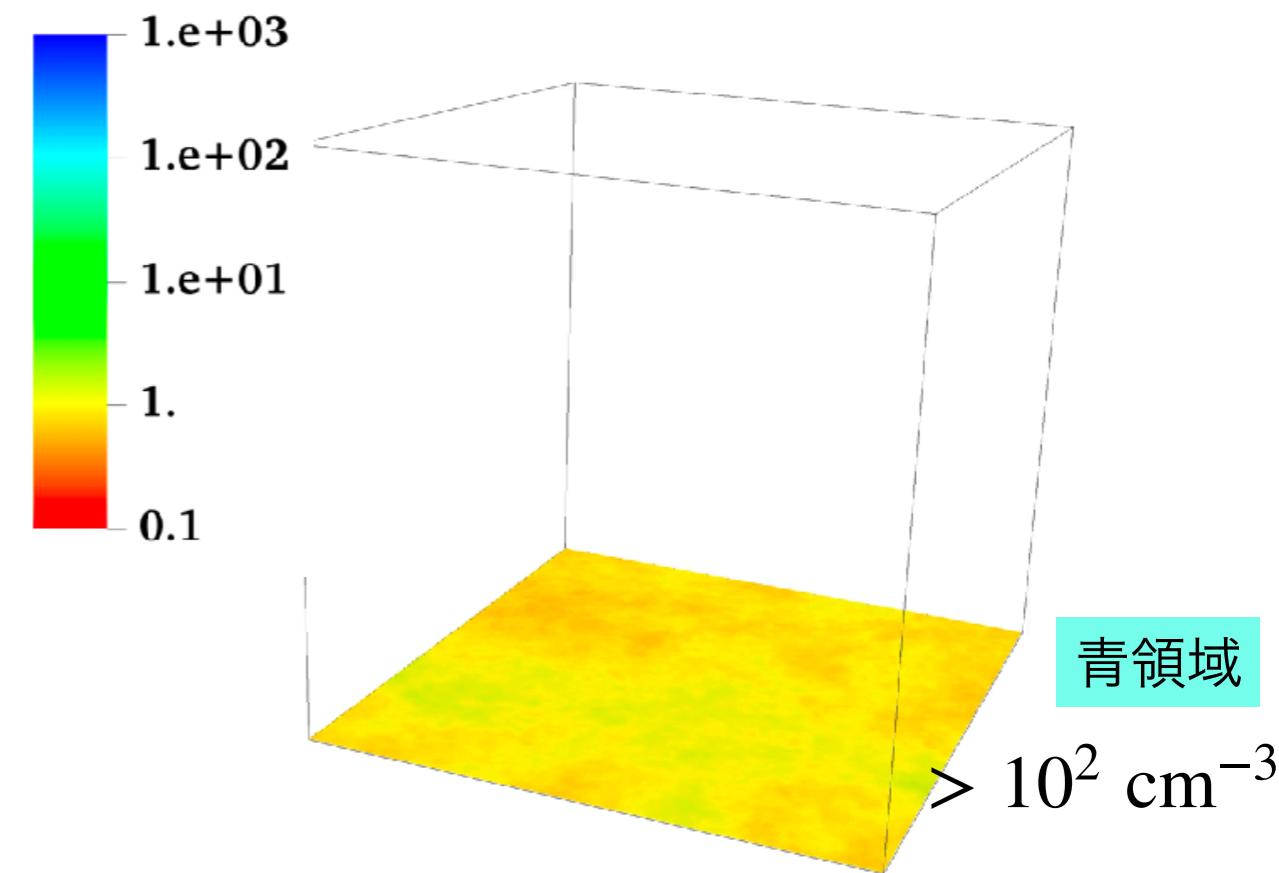
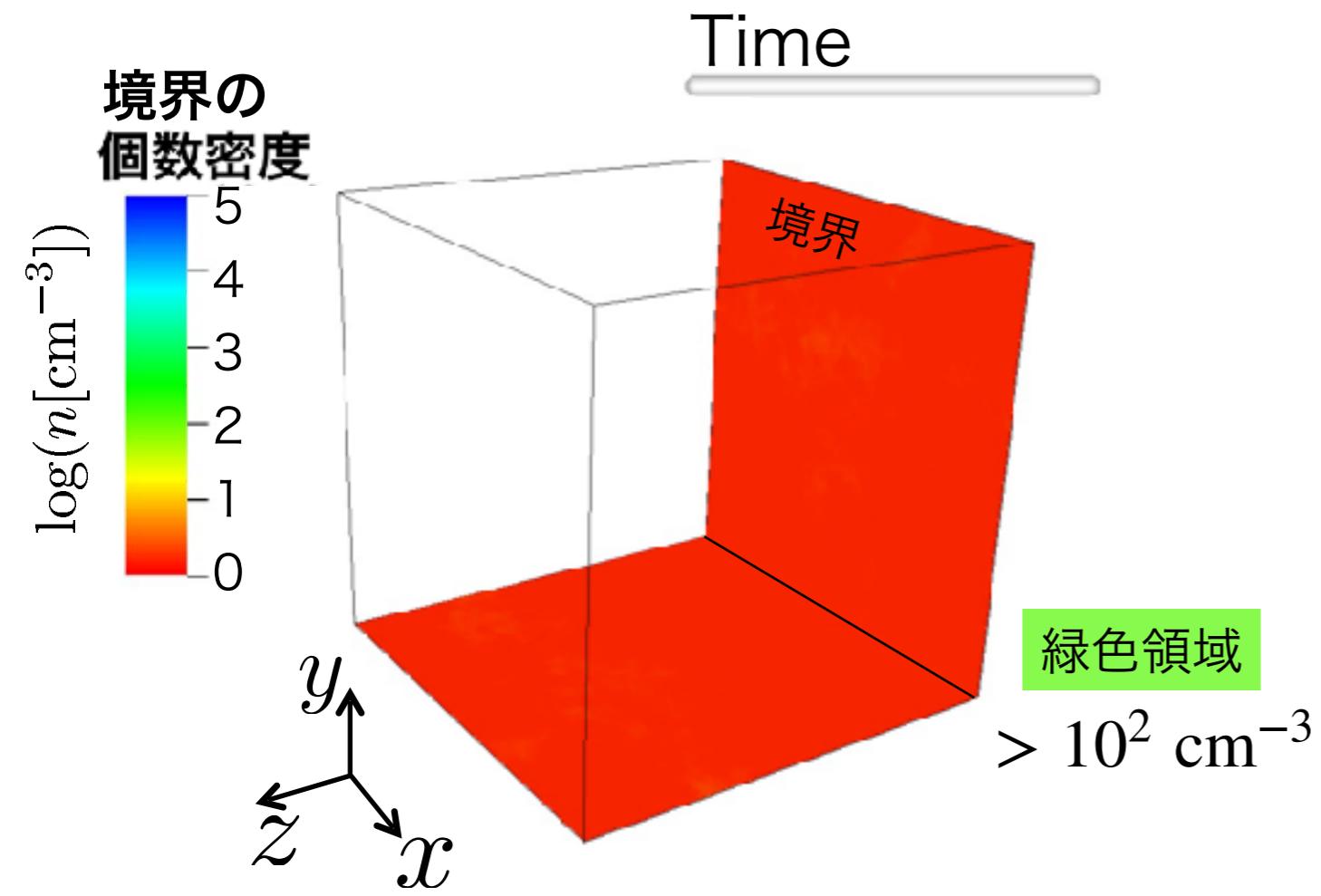


- » 計算初期はほとんど高密度領域は形成しない
- » 時間が経過すると100/cc以上の領域が形成

Solar Metalとの比較

✓ 太陽金属

✓ 低金属環境 (宇宙初期)

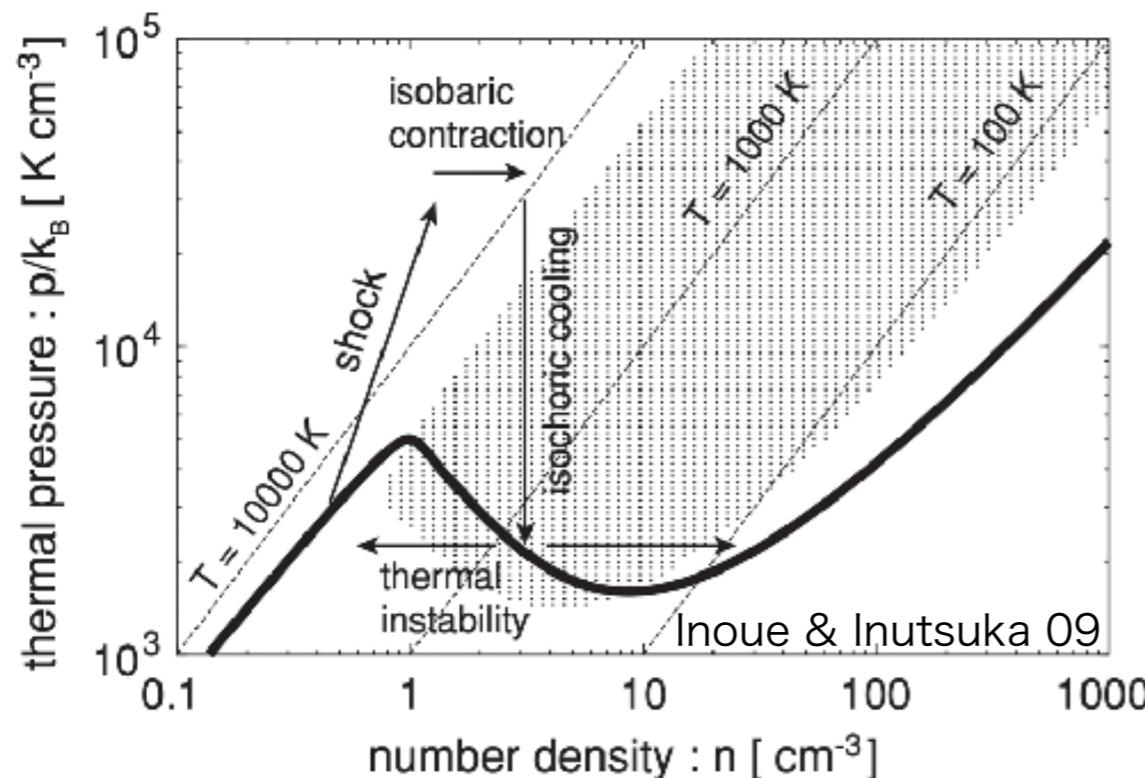


- » 太陽金属環境では小さいCNMが合体し大質量なクラウドを形成
- » 低金属環境では小さいクラウドを形成してない

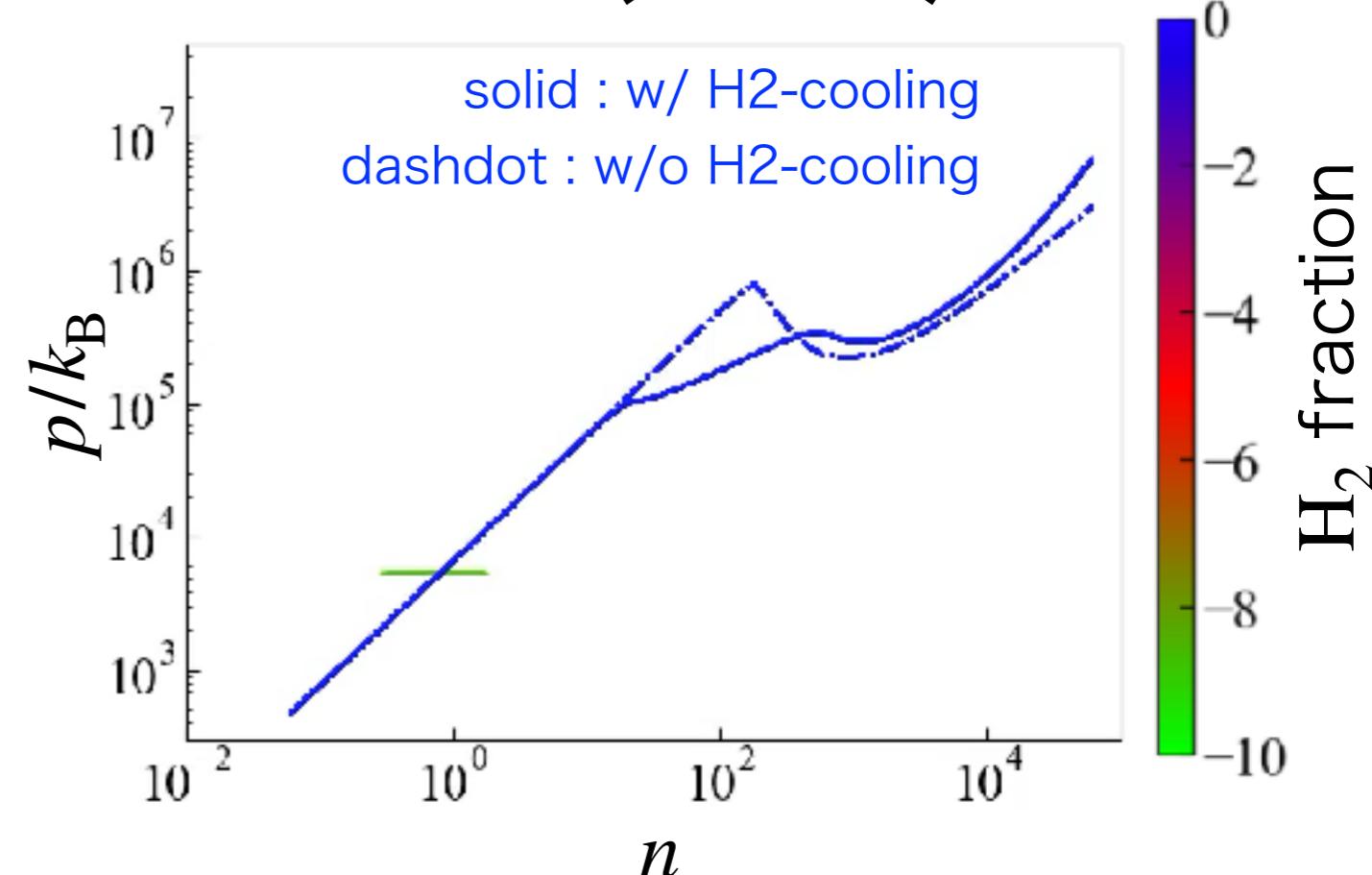
クラウド形成の違いの要因は？

低金属環境における高密度ガス雲形成

✓ 太陽金属のガスの進化



✓ 低金属環境 (宇宙初期)

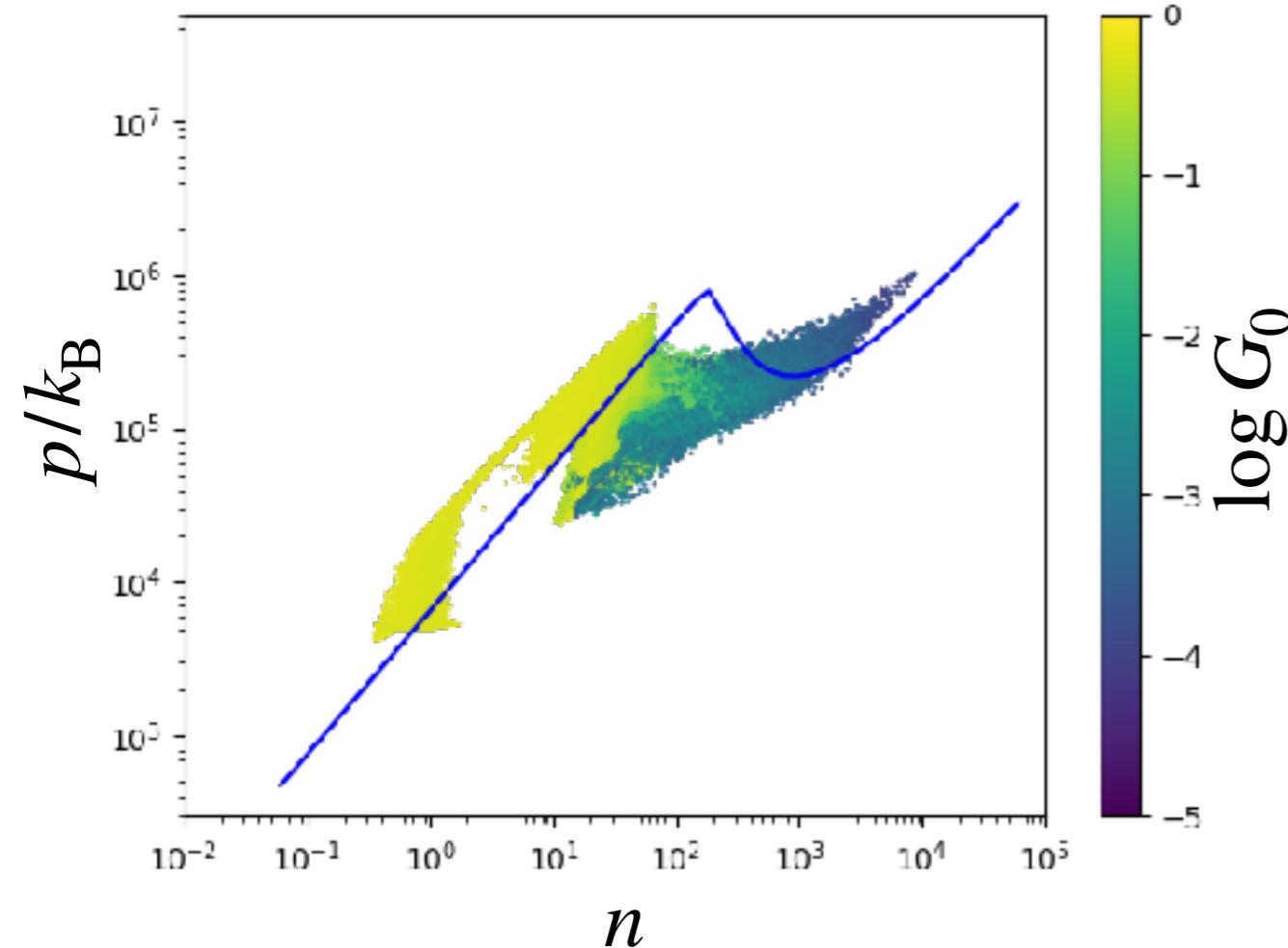


- » 低金属環境では熱平衡曲線の山の位置が変化
- » 衝撃波加熱されたガスは熱平衡曲線の山を超えない
- » H₂が形成すると冷却が効いて高密度なガスが形成

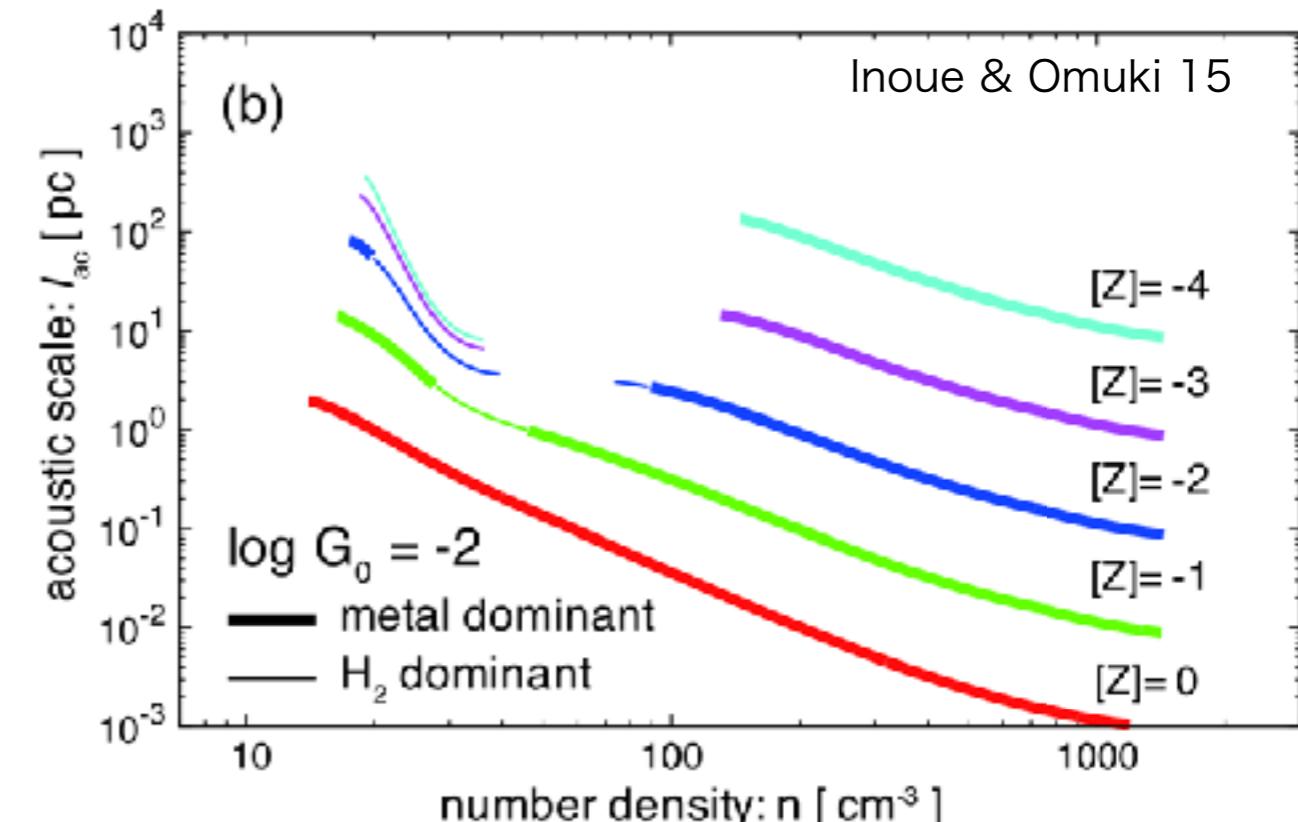
金属冷却ではなくH₂の冷却が高密度ガス雲形成に重要

H₂冷却が効く場合のガス雲形成

✓ 高密度領域のFUV強度



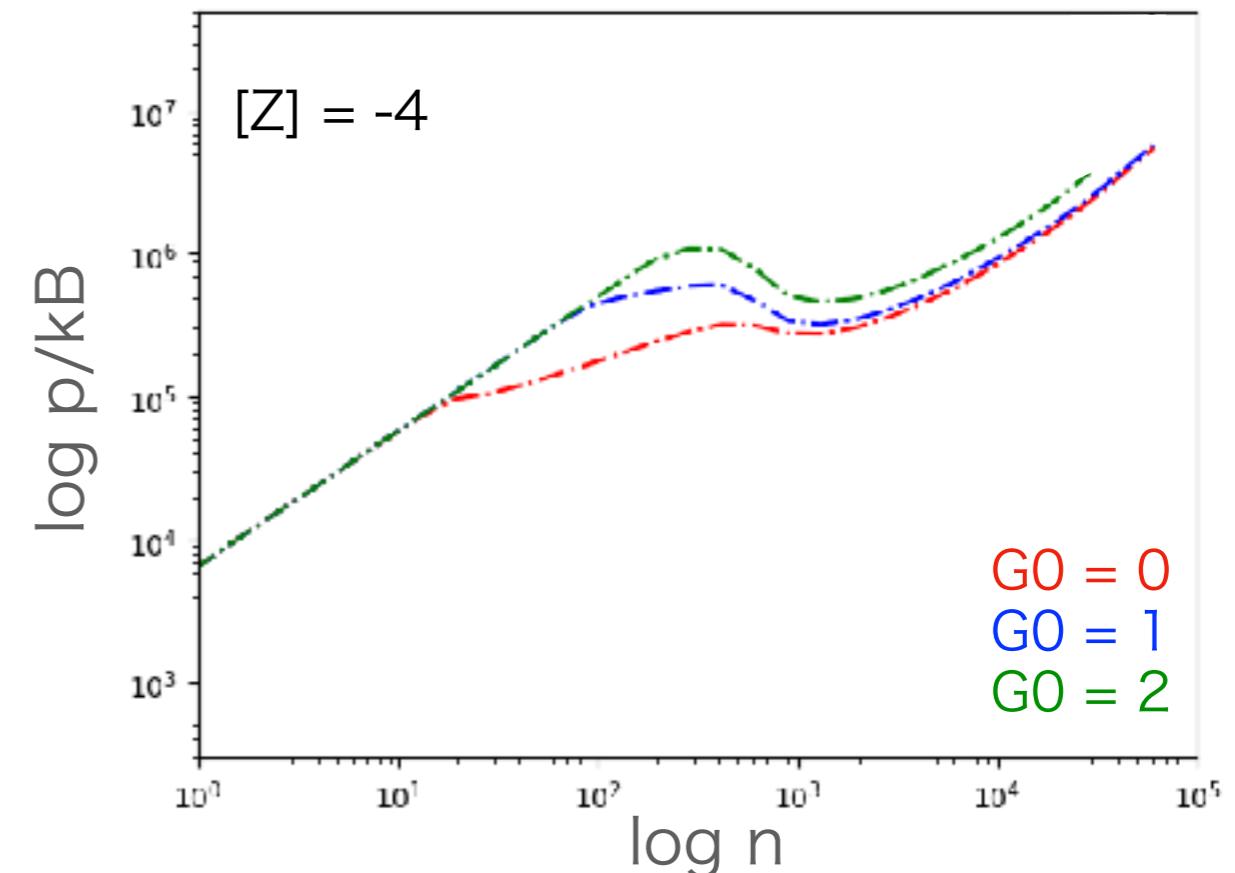
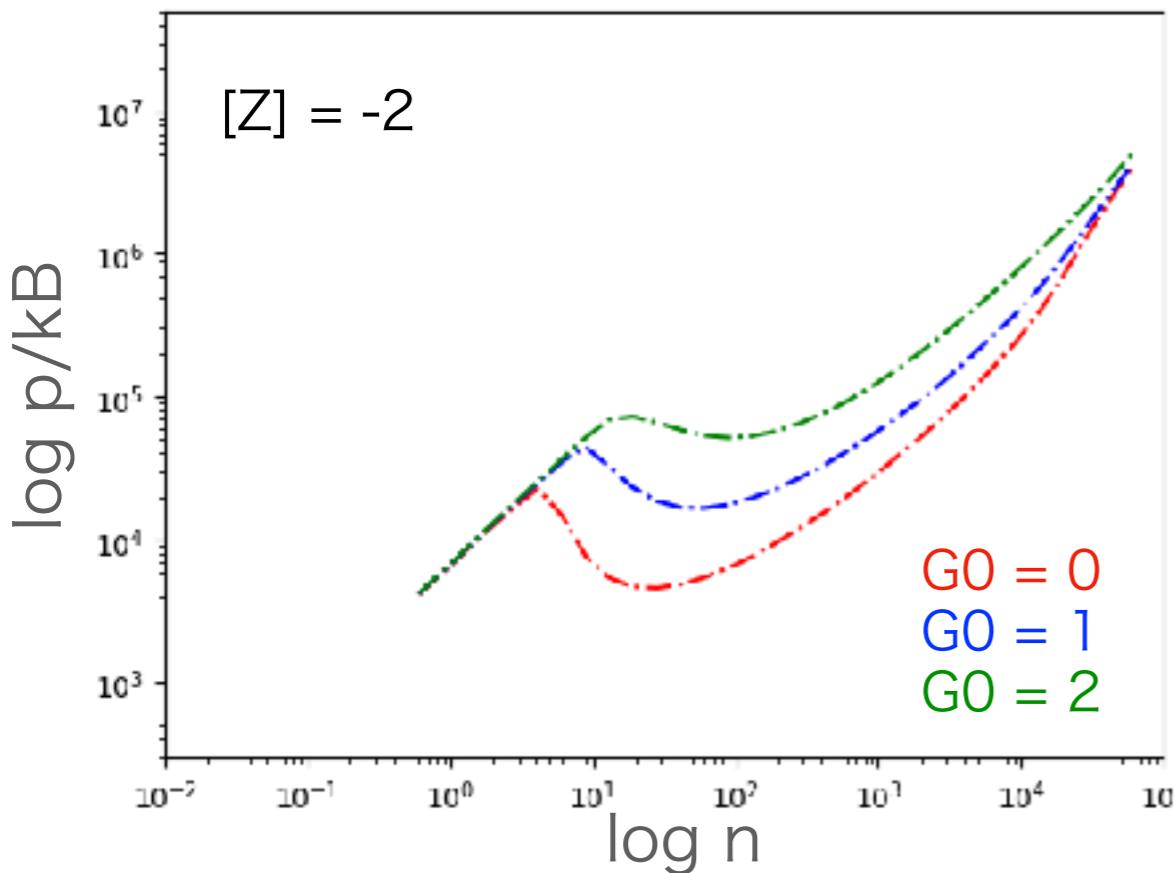
✓ 熱不安定性の金属量依存性
(1 Zone)



- » H₂冷却が効く場合は熱不安定性が抑制される
- » 热不安定性が抑制されると小さいクラウドに分裂せず大質量な星団に進化する可能性がある

低金属環境ではより大質量な星団が形成可能か?
→今後 質量依存性を調べていく

議論：熱平衡曲線の性質



» 山の位置

$$n_{\text{cool},Z} = 1.2 \text{ cm}^{-3} \left(\frac{Z}{10^{-2} Z_\odot} \right) \left(\frac{\zeta}{3 \times 10^{-17} \text{ s}^{-1}} \right)$$

» 山でH₂冷却が勝つか

$$Z_{\text{cool,H}_2} = 8.0 \times 10^{-3} \left(\frac{\zeta_{3.e-17}}{G_0} \right)^{2/3}$$

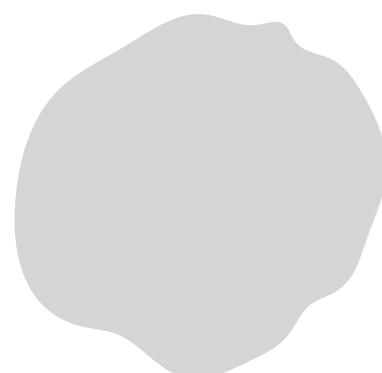
see Bialy+19

熱平衡曲線は周囲のG0や宇宙線の電離率によっても異なる

まとめ

✓ 面密度が小さい場合

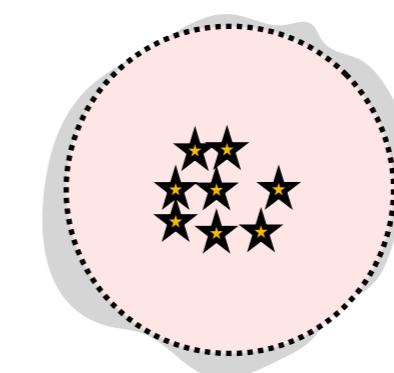
星間ガス



星形成



フィードバック



星団



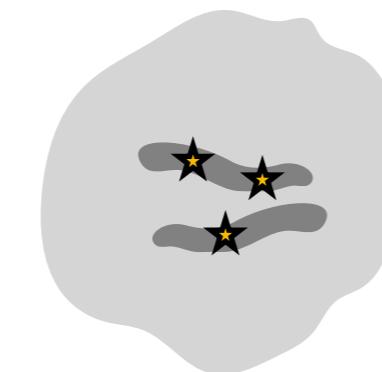
重力で束縛できずに
散開星団へ

✓ 面密度が大きい場合

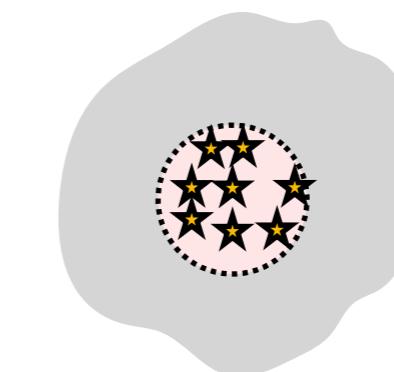
星間ガス



星形成



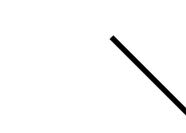
フィードバック



星団



YMC



大質量星団を作るような面密度の高いガス塊
の形成にはガス衝突が重要！

球状星団になるかも