

# 階層的星團形成

齋藤貴之

JSPS fellow/NAOJ

collaborators:

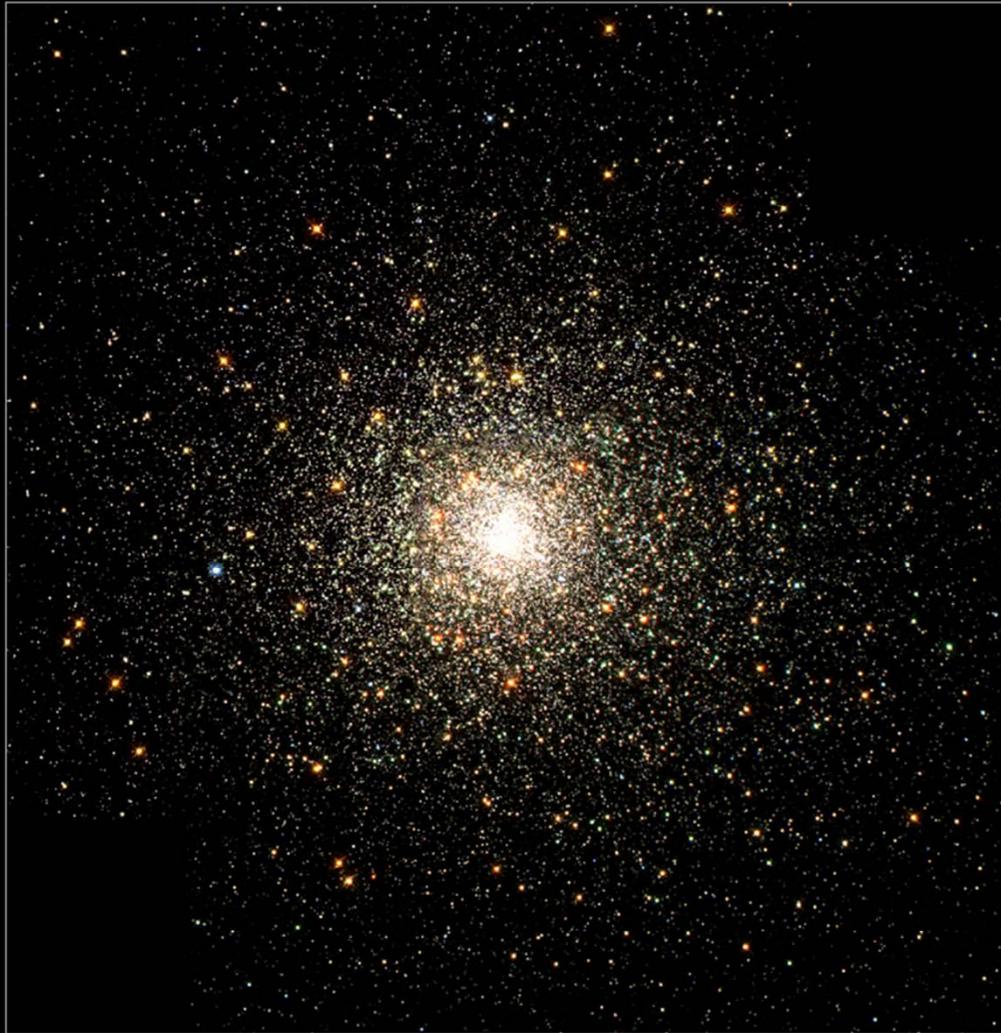
小久保英一郎、富阪幸治、牧野淳一郎(NAOJ)、台坂博(一橋)、  
吉田直紀(IPMU)、岡本崇(筑波)、和田桂一(鹿児島)

Papers: Saitoh et al. (2008,2009), Saitoh et al. in prep.  
Saitoh Makino (2009;2010)





Globular Cluster NGC 6093



Hubble  
Heritage

PRC99-26 • Space Telescope Science Institute • Hubble Heritage Team (AURA/STScI/NASA)



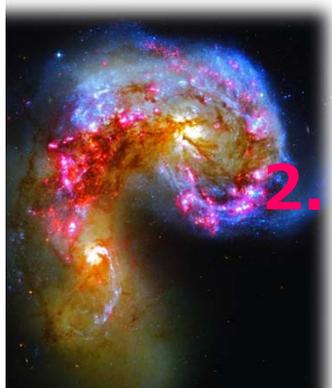
# 星团

- **Local: Open Clusters( $\sim 10^3 M_{\odot}$ )、Globular Clusters( $\sim 10^6 M_{\odot}$ )**
- **Extragalactic : GCs, Young Star Clusters ( $10^4\text{-}8 M_{\odot}$ )**



# 球状星団形成

- 星団の形成過程は依然不明
  - 無数のシナリオがある
    - 基本的には $\sim 10^6 M_{\odot}$ のガス雲を一気に作り崩壊させる  
(レビュー：Harris 1991, Ashman & Zepf 1998, Brodie & Strader 2006)
  - 銀河衝突によって星団形成が誘発されるというシナリオはそのうちの一つ (Schweizer 1987, Ashman & Zepf 1992, Kumai et al. 1993)
    1. 銀河の星質量で規格化した球状星団個数が楕円銀河 > 円盤銀河 (Schweizer 1987, Harris 1991, Zepf & Ashman 1993)
    2. 相互作用銀河における若い星団の発見 (e.g., Whitmore & Schweizer 1995, Whitmore 2003 for a review)



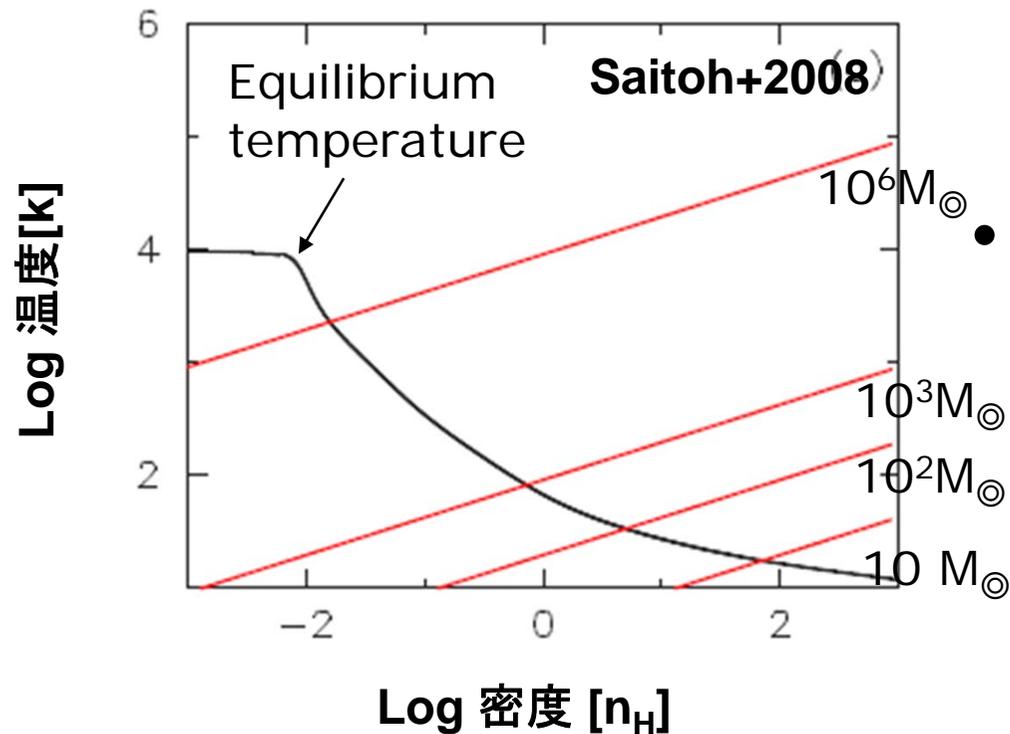
# Numerical studies on SC formation in merger simulations

- SPH simulations with an isothermal ISM of  $\sim 10^4\text{K}$ : Bekki & Couch (2001), Li et al. (2004)
  - 典型的な銀河衝突シミュレーションと同等のモデル (Barnes & Hernquist and Mihos & Hernquist)
  - ジーンズ質量は  $> \sim 10^6 M_{\odot}$ , 星団は非常に大きなクラウドで形成されるとする
- Sticky particle simulations with SF and FB (Kick): Bournaud et al. (2008)
  - そもそも流体を解いていない

**星団形成過程を扱った研究はない**

**→ 高分解能計算に基づく現実的なISM/SF/FB  
を用いて星団形成過程を明らかにする**

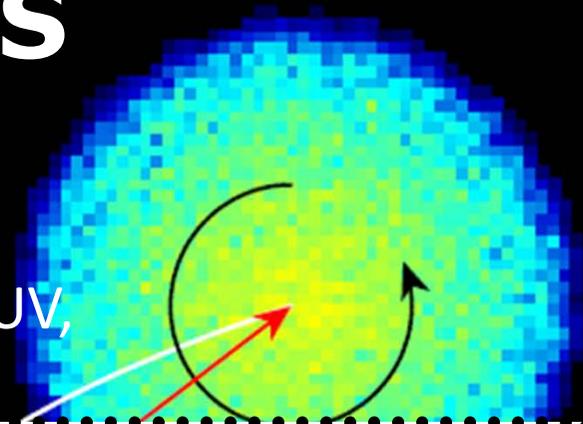
# Realistic modeling of the ISM based on high-resolution



- シミュレーションの高分解能化により、低温高密度の星間ガス(低ジーンズ質量)を扱うことができるようになる
- メリット：(Saitoh+ 2008):
  - a. クランピーな星間ガス構造を表せる
  - b. 観測に対応するような薄い星円盤を形成できる
  - c. 結果の星形成効率パラメータ( $C_*$ )依存が弱くなる

# Merger simulations

- Two equal mass galaxies ( $10^{11}M_{\odot}$ )
  - Parabolic orbit
- Gravity, Hydrodynamics, Radiative cooling, FUV, Star formation, TypeII SN



- ISM: a wide temperature range ( $10^{1-8}K$ ), thanks to high mass resolution
- SF : Schmidt law @  $n_H > 100 \text{ cm}^{-3}$   
 $T_{th} < 10^4 \text{ K}, \nabla \cdot v < 0$ 
  - $dp_*/dt = C_* \rho_{gas}/t_{dyn} \propto \rho_{gas}^{1.5}$  ;  $C_* = 0.033$
- SN:  $10^{51} \text{ ergs/1SN}$ , thermal energy form

See Saitoh et al (2008,2009)

|             |             |             |           |           |                             |       |
|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------------------------|-------|
| Low/20pc    | 7 420 000   | 6 965 000   | 3 044 94  | 150 506   | $3.0 \times 10^4 M_{\odot}$ | 20 pc |
| Middle/20pc | 29 680 000  | 27 860 000  | 1 218 344 | 601 656   | $7.6 \times 10^3 M_{\odot}$ | 20 pc |
| High/20pc   | 118 720 000 | 111 440 000 | 4 872 798 | 2 407 202 | $1.9 \times 10^3 M_{\odot}$ | 20 pc |
| Low/5pc     | 7 420 000   | 6 965 000   | 3 044 94  | 150 506   | $3.0 \times 10^4 M_{\odot}$ | 5 pc  |
| Middle/5pc  | 29 680 000  | 27 860 000  | 1 218 344 | 601 656   | $7.6 \times 10^3 M_{\odot}$ | 5 pc  |
| High/5pc    | 118 720 000 | 111 440 000 | 4 872 798 | 2 407 202 | $1.9 \times 10^3 M_{\odot}$ | 5 pc  |
| Middle/1pc  | 29 680 000  | 27 860 000  | 1 218 344 | 601 656   | $7.6 \times 10^3 M_{\odot}$ | 1 pc  |

# Parallel N-body/SPH code : ASURA

- **C言語(C99) + MPI**
- **領域分割 : Orthogonal Recursive Bisection**
- **重力: Parallel Tree+GRAPE**
  - **Hardware accelerators : GRAPE-5/GRAPE-6A/GRAPE-7/GRAPE-DR**
  - **Software accelerator : Phantom-GRAPE**
    - SSEを使いチューニングされたG5互換ライブラリ
    - <http://grape.mtk.nao.ac.jp/~nitadori/phantom/>
- **流体 : Smoothed Particle Hydrodynamics法**
- **時間積分: Leap-frog + 独立時間刻み法**
  - +Time-step limiter(Saitoh & Makino 2009)
  - +FAST (Saitoh & Makino 2009)

# Simulation of galaxy-galaxy merger

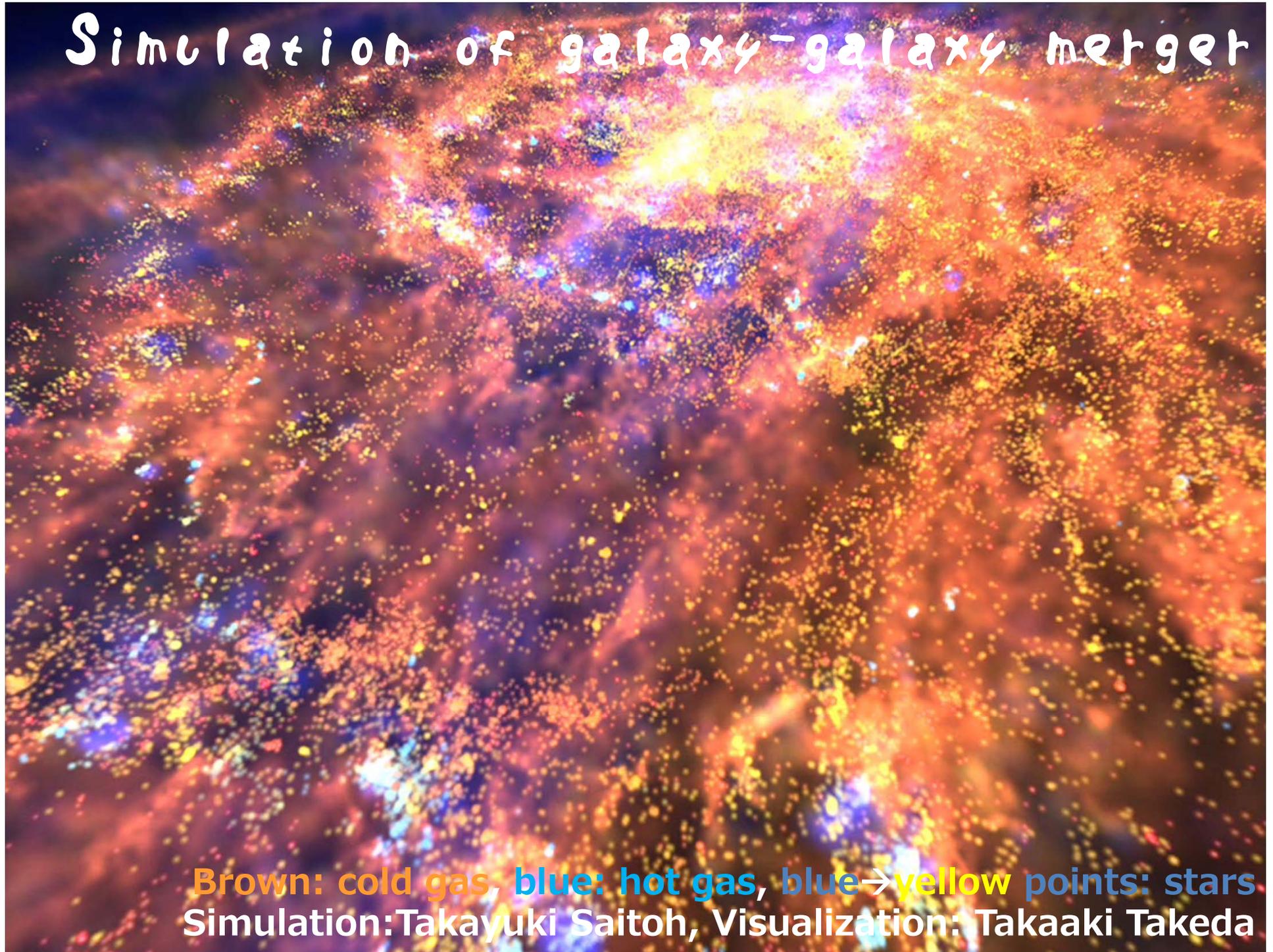
- 二つの銀河の間にショックで励起されたフィラメントが現れる
  - Filament mass:  $10^9 M_{\odot}$
  - 高密度 ( $>100 n_H / \text{cm}^3$ ) & 低温 ( $<100 \text{K}$ )
- フィラメントでスターバースト発生
- 数十の星団が形成される

**Brown: cold gas, blue: hot gas, blue→yellow points: stars**  
Simulation: Takayuki Saitoh, Visualization: Takaaki Takeda

# Simulation of galaxy-galaxy merger

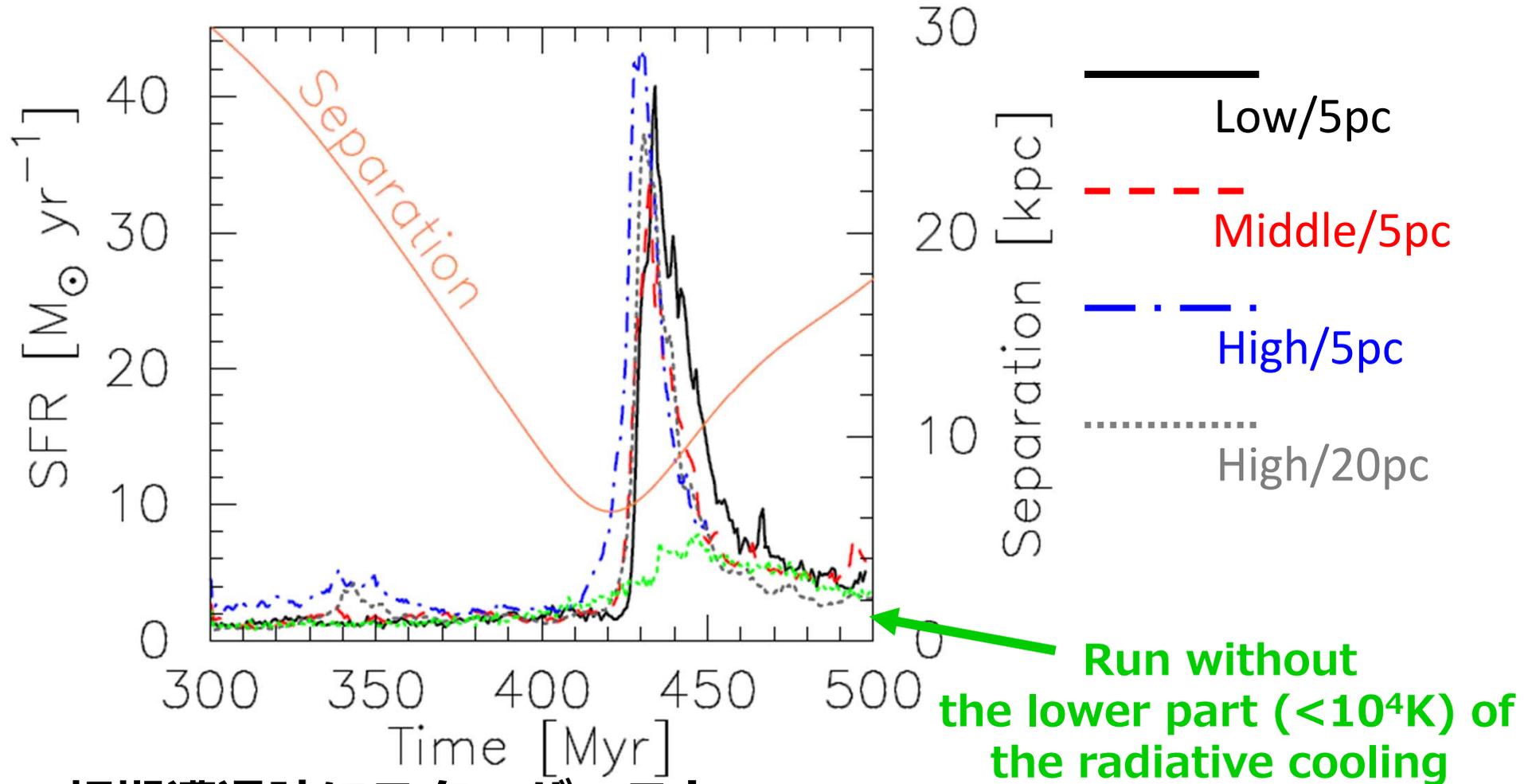
**Brown: cold gas, blue: hot gas, blue→yellow points: stars**  
Simulation: Takayuki Saitoh, Visualization: Takaaki Takeda

# Simulation of galaxy-galaxy merger



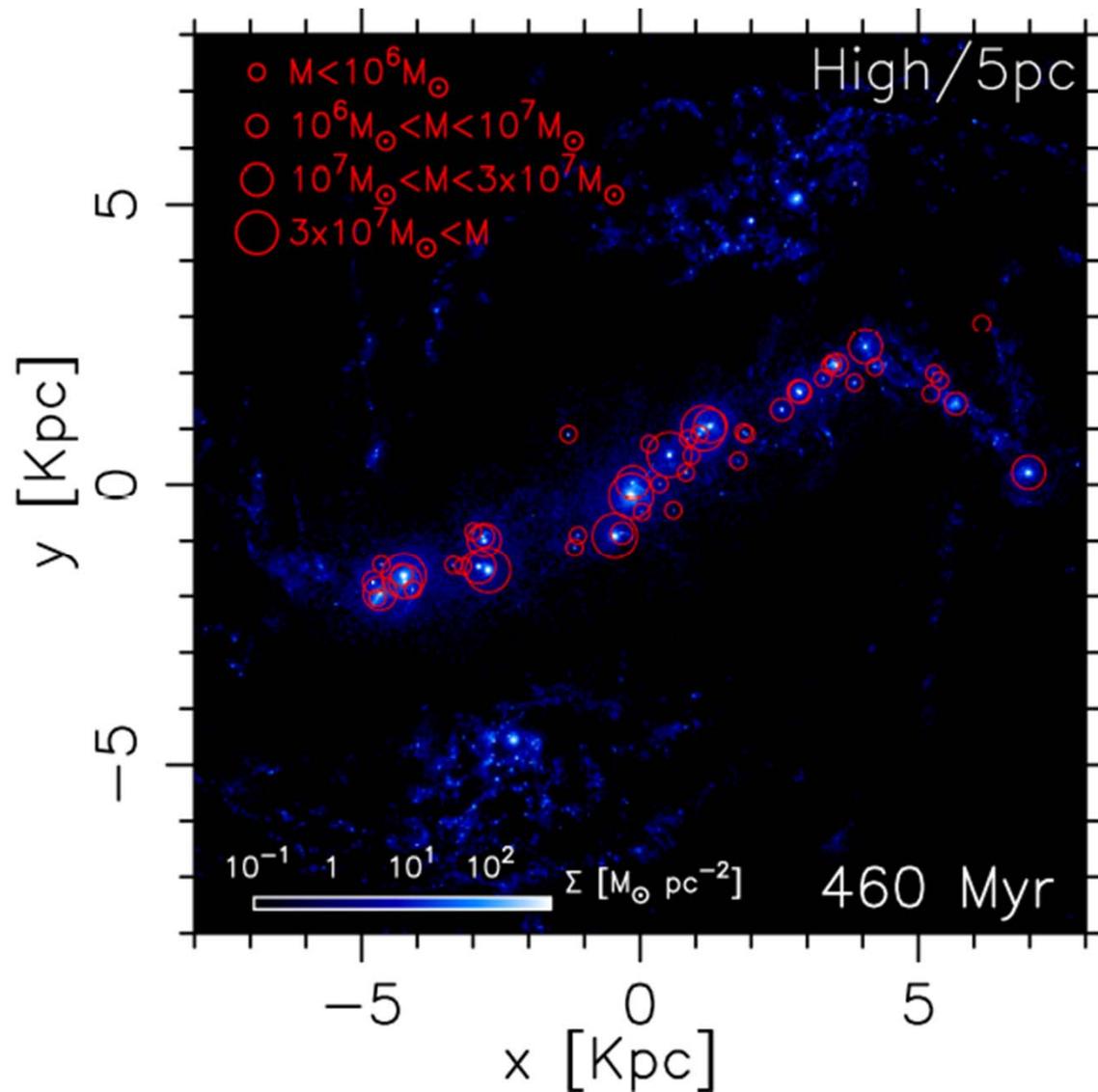
**Brown: cold gas, blue: hot gas, blue→yellow points: stars**  
Simulation: Takayuki Saitoh, Visualization: Takaaki Takeda

# “Starburst” at the first encounter



- 初期遭遇時にスターバースト
- 従来のモデルではスターバーストを起こさない
- スターバーストの急激な終焉は超新星爆発の影響

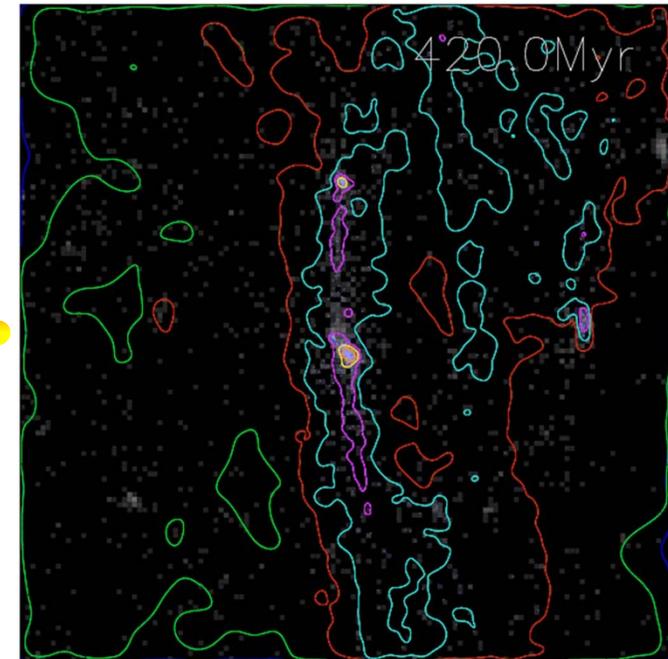
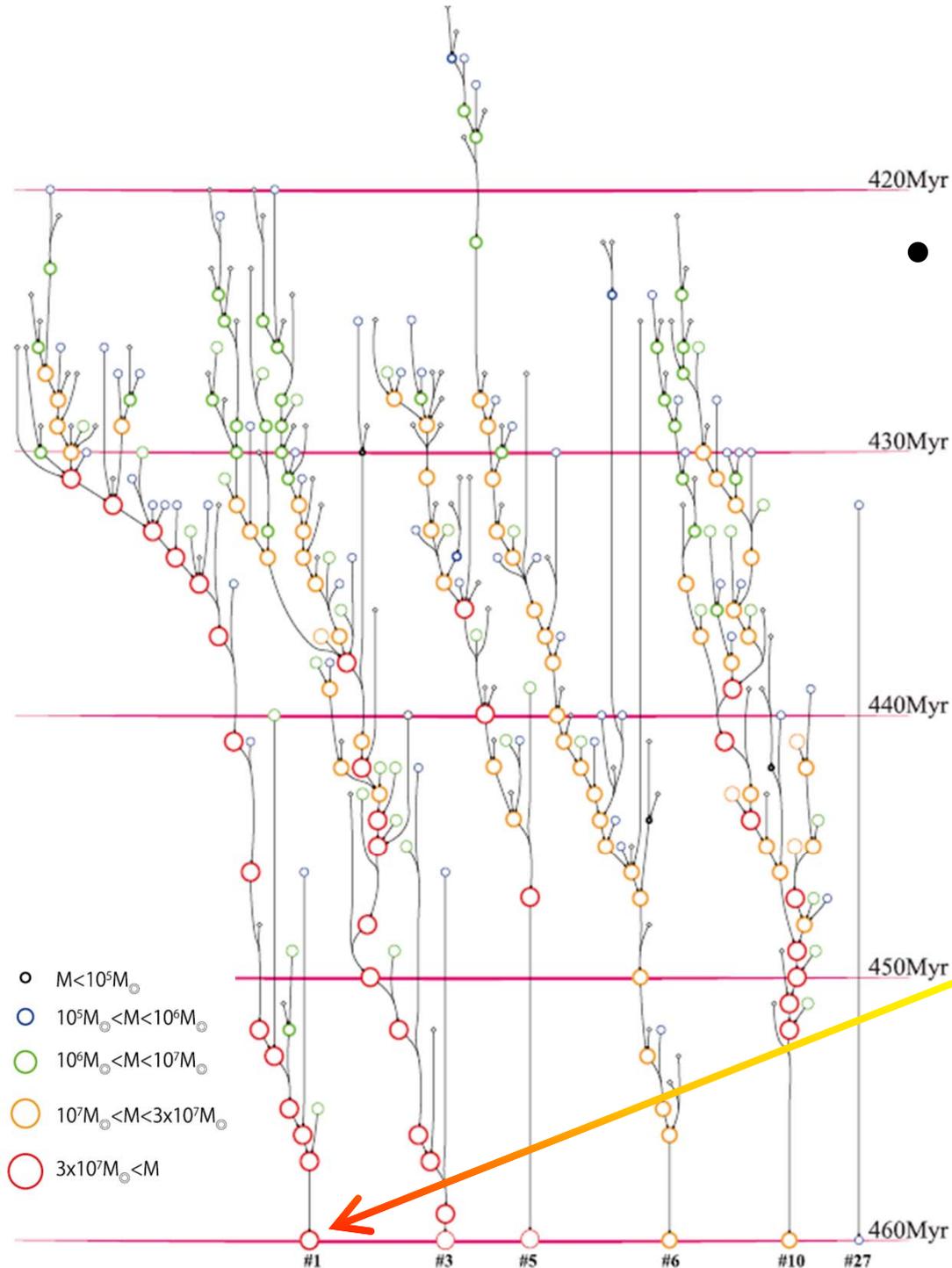
# Star clusters



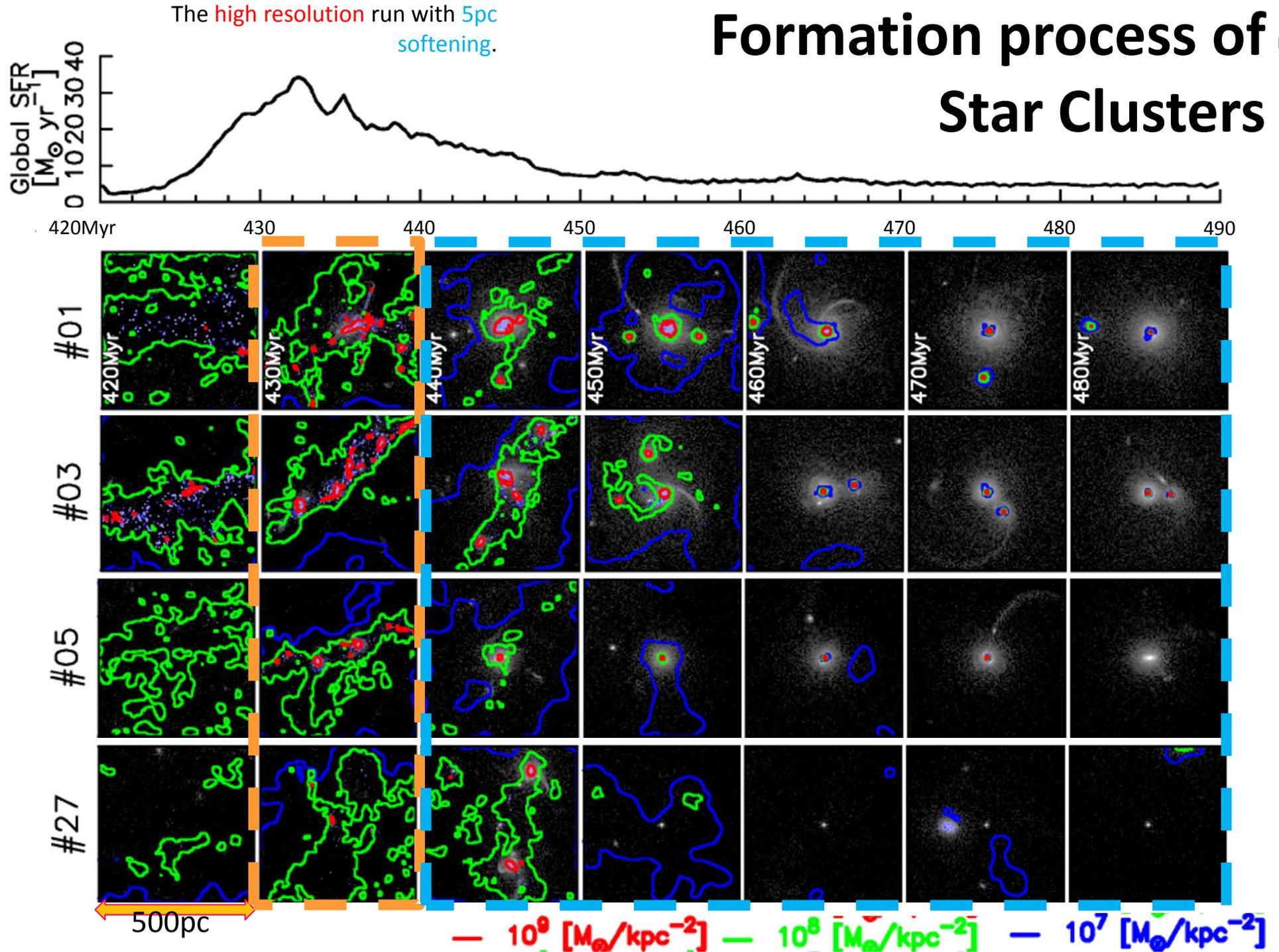
- 数十の星団がフィラメントに沿って形成 ( $N_s > 100$ 個)
  - Mass  $\sim 10^5$ - $8 M_\odot$
  - No dark matter component
  - Size  $\leq$  Softening length

# 合体史

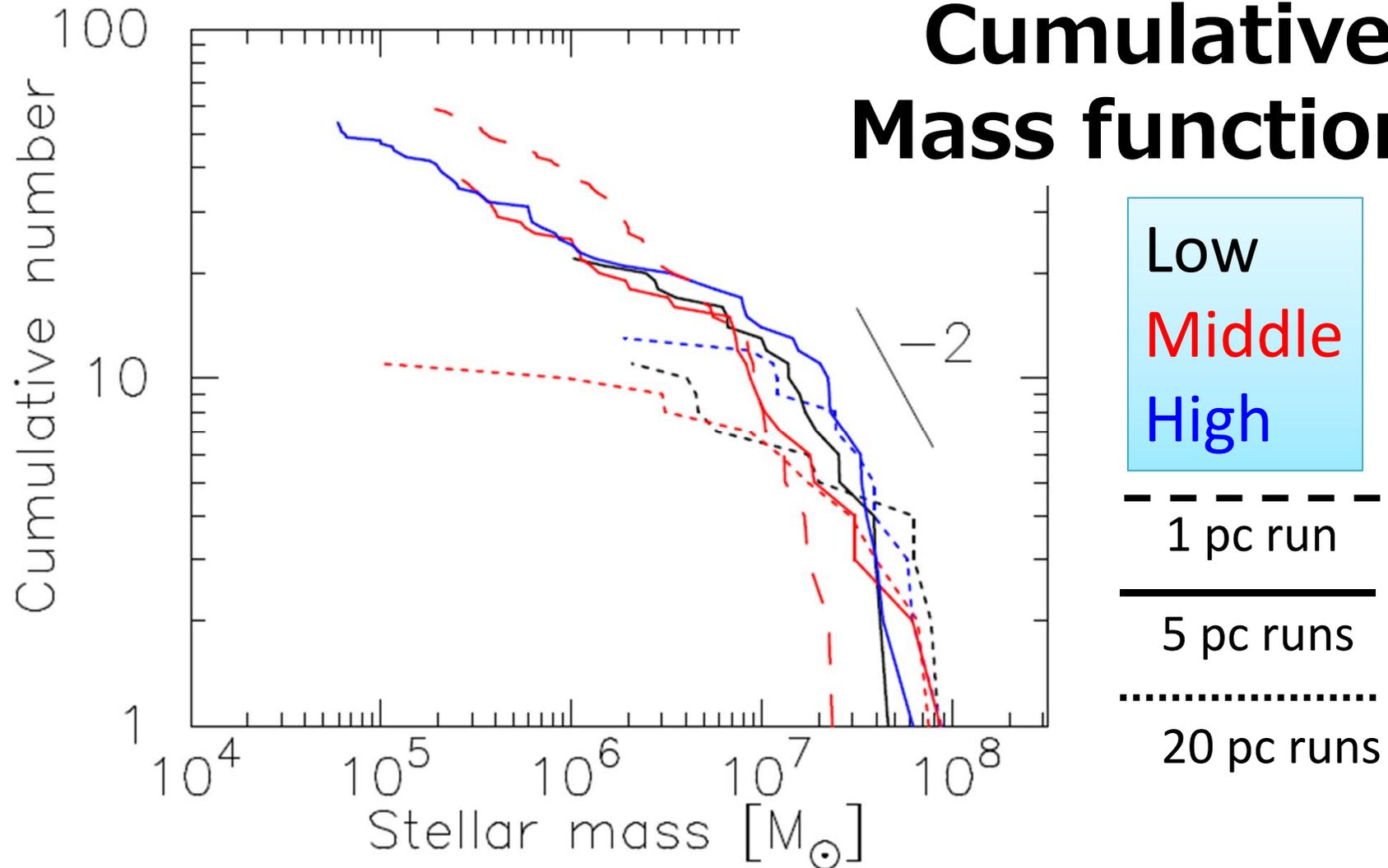
- 長期にわたって豊かな合体史を持つ
  - $T < 430 \text{ Myr}$ : 豊富なガスの中で星形成
  - $T > 430 \text{ Myr}$ : SNe のよりグローバルな星形成が終焉



# Formation process of Star Clusters

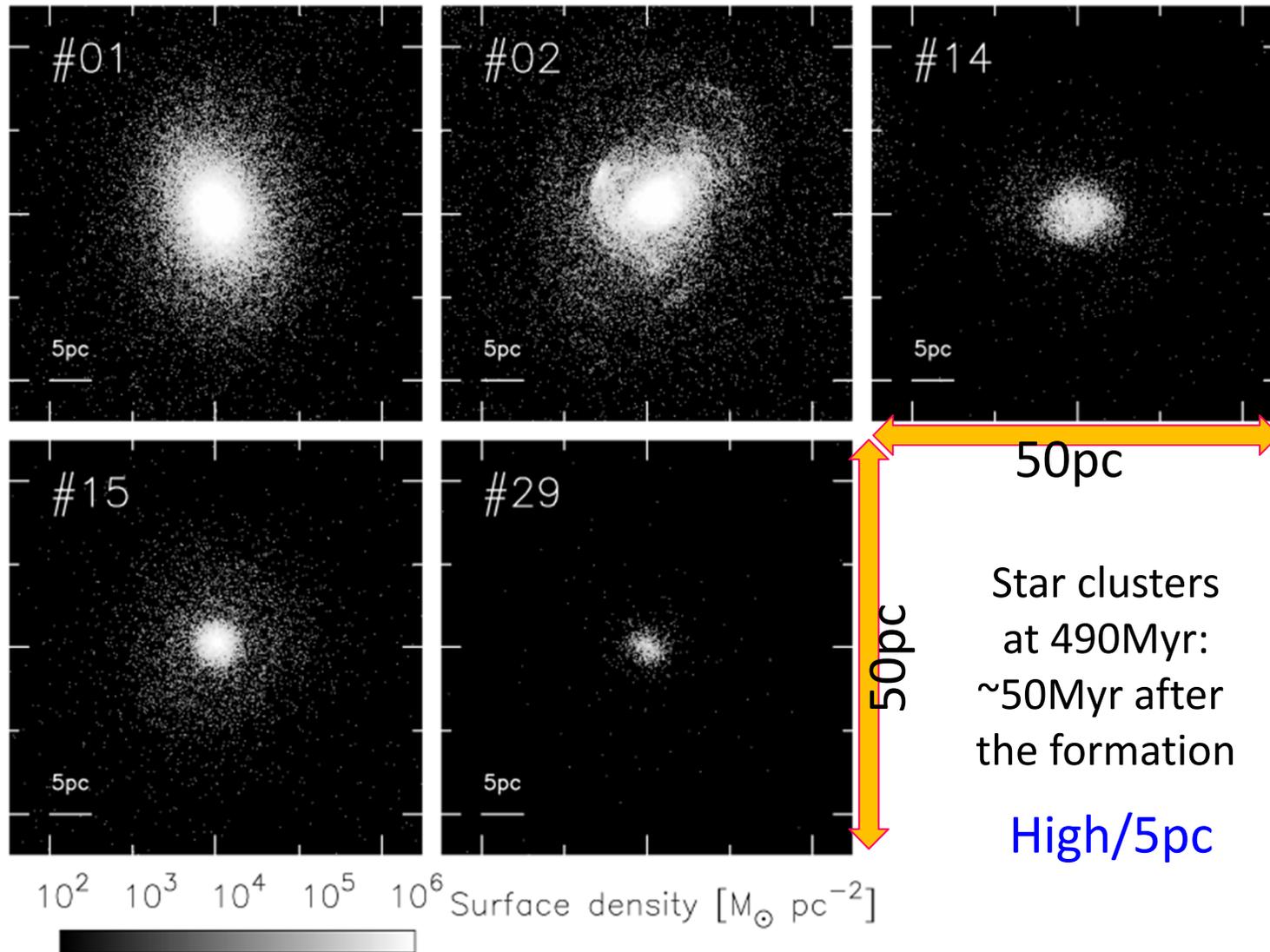


# Cumulative Mass functions



- $N_{sc}(5pc) \gg N_{sc}(20pc)$
- 大質量側は冪 “ $\sim -2$ ”
  - 若い星団系の質量関数の冪と一致 (e.g., Whitmore 2003)
  - 重力がスケールフリーな物理を反映 (Elmegreen 2006)
  - 大質量側で質量/空間分解能依存弱い (ただし除く 1pc run)

# Star clusters : $t \sim 490 \text{ Myr}$



# 階層的星団形成シナリオと 観測の対応

- 若い星団形成領域は非常に混み合っている  
(Whitmore+1999)
  - 階層的星団形成過程では非常に混み合っている
- 高い多重星団率(Binary/Multiple rate  $\sim 1/2$ - $1/3$  @ Larsen 2004)
  - 合体形成中の星団はバイナリやマルチプレットをなす
- 冪的質量関数(Zhang&Whitmore+1999他)
  - 重力的に合体成長すると自然と冪的に
  - 重力はスケールフリーな物理だから

# まとめ

- **超高分解能銀河衝突シミュレーションにより、星団形成過程を調べた**
  - 星団の形成を流体/星形成/超新星爆発まで考慮して行った初めての研究
- **初期遭遇時のショック領域でスターバーストが起き、そこで多数の星団が形成される**
- **星団の形成過程は階層的**
  - ショックによって圧縮されたフィラメント中の小クラウド中で星が形成され、重力的に集まり成長
  - 初期の種星団の質量は $\sim 10^6 M_{\odot}$ よりずっと小さい