

初代星・初代銀河研究会2017

2018/2/10

@呉 広まちづくりセンター5F 会議室503

# Runaway stellar collisions and formation of IMBHs in first star clusters

櫻井祐也 (東京大)

共同研究者:

吉田直紀 (東京大), 藤井通子 (東京大), 平野信吾 (テキサス大)

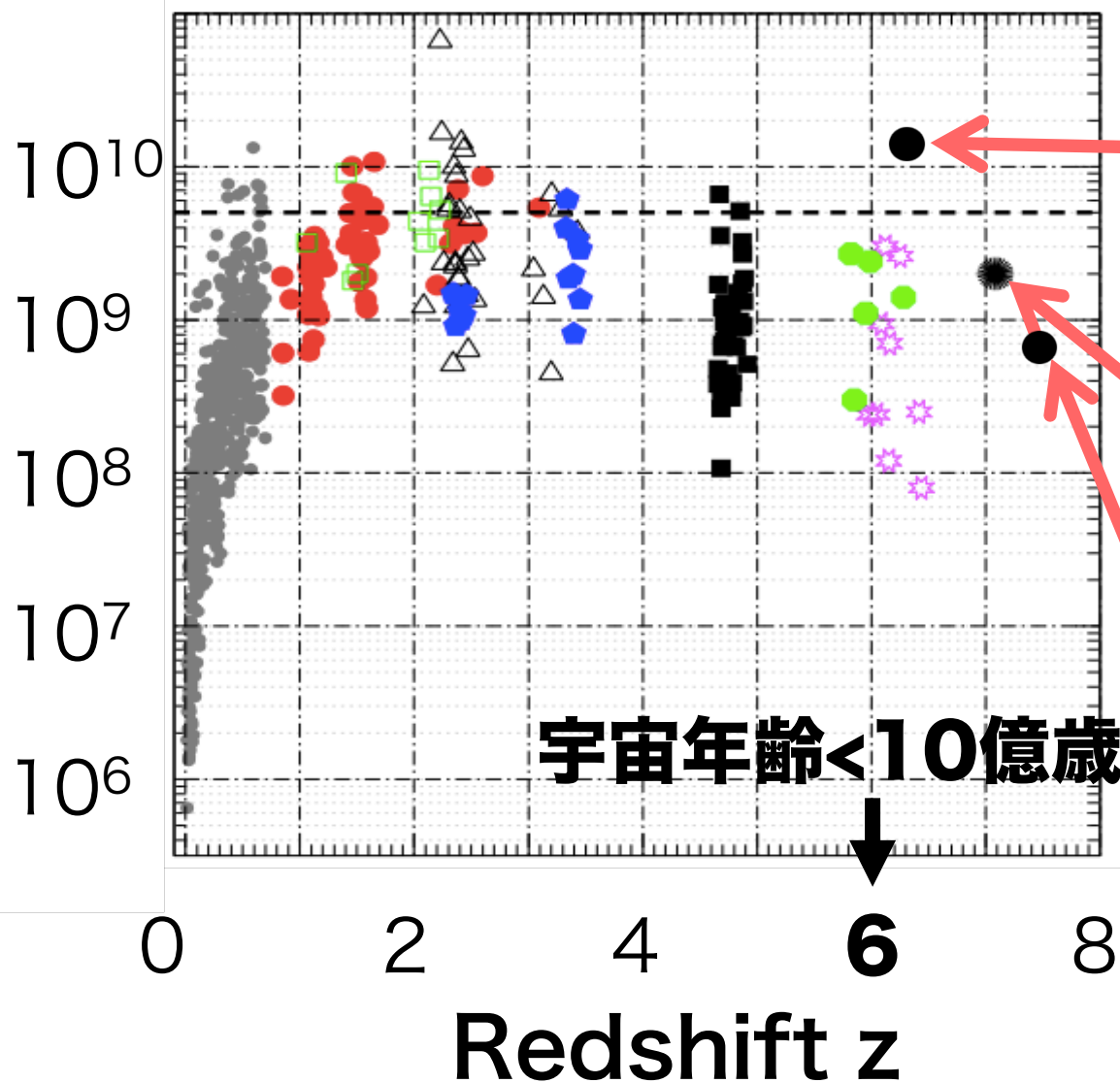
Sakurai Y., Yoshida N., Fujii M. S., Hirano S., 2017, MNRAS, 472, 1677

# 目次

- 研究背景
  - ◆ 遠方宇宙の超巨大ブラックホール（SMBH）観測とその起源
  - ◆ 暴走的衝突モデルとこれまでの研究
- 本研究の目的と内容
  - ◆ 数値シミュレーション
  - ◆ 結果
- まとめと展望

# 遠方宇宙 (=初期宇宙) には既に超巨大BHが存在していた！

超巨大BH mass (Msun)



**$\sim 1.2 \times 10^{10} \text{ Msun}$**

Wu et al. (2015)

**$\sim 2 \times 10^9 \text{ Msun}$**

Mortlock et al. (2011)

**$\sim 8 \times 10^8 \text{ Msun}$**

Bañados et al. (2017)

Marziani & Sulentic (2012)

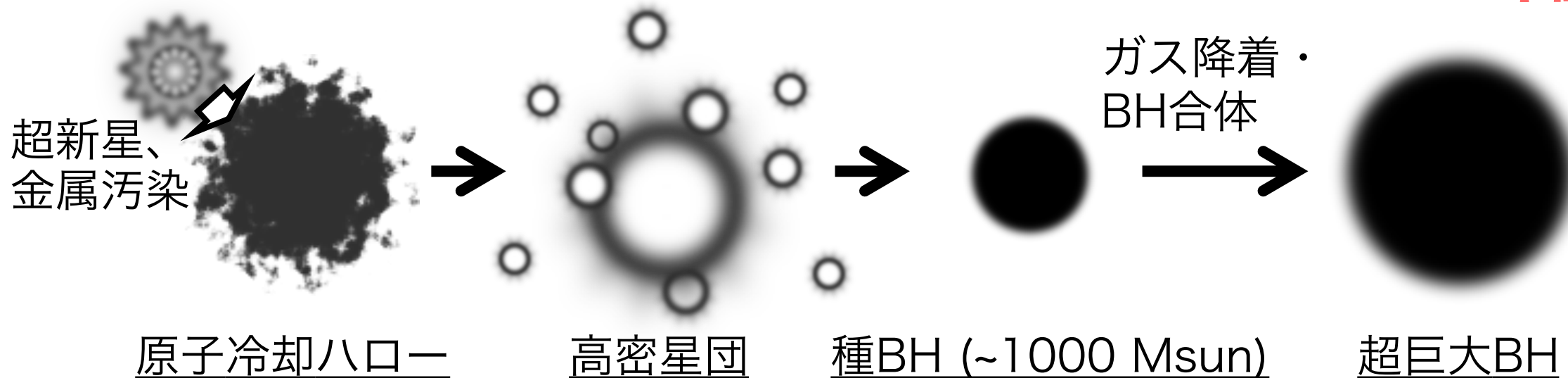
# どのように宇宙論的に短期間で超巨大BHが形成したか？

## 初代星BHモデル：小さい種BH & 輻射フィードバック



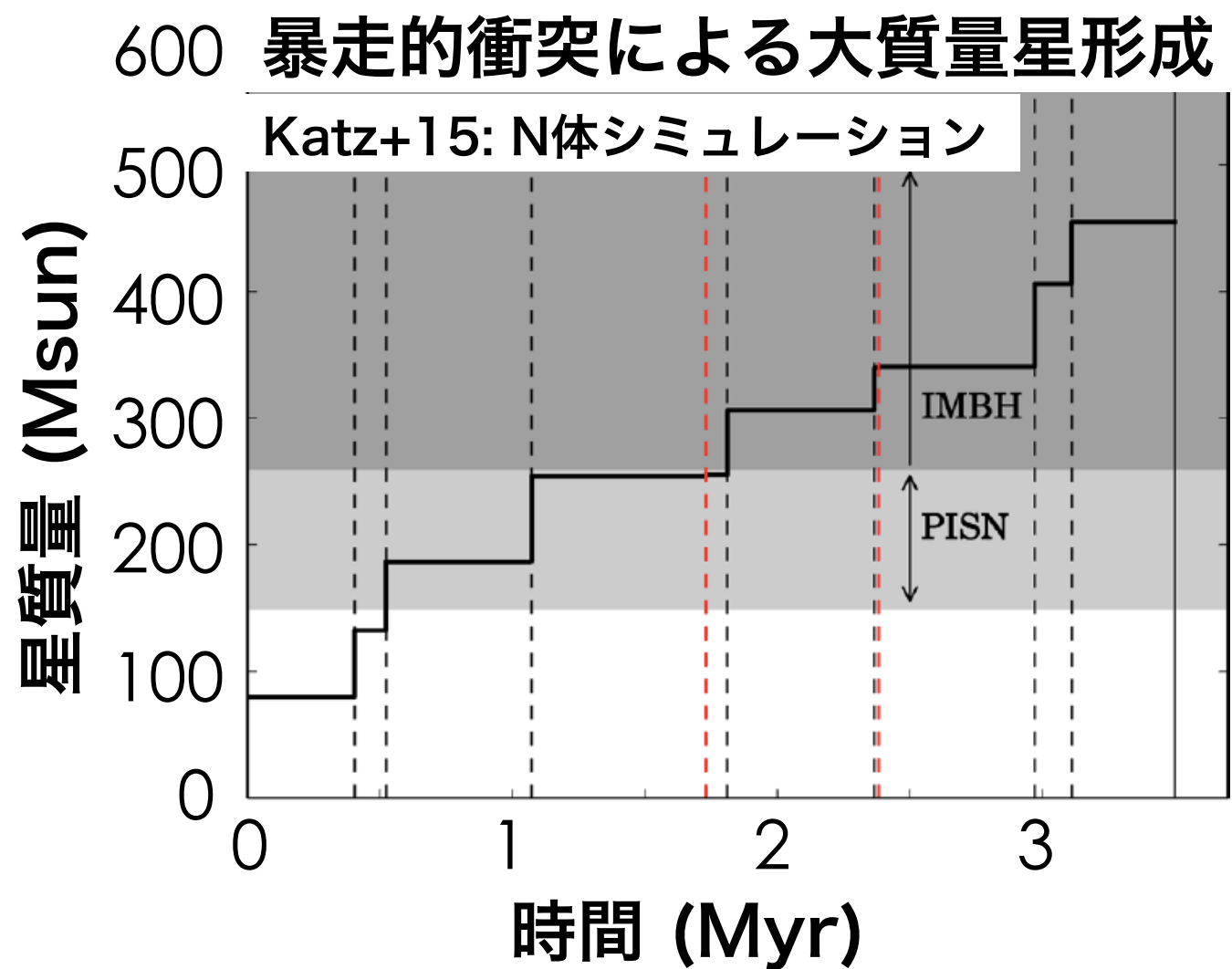
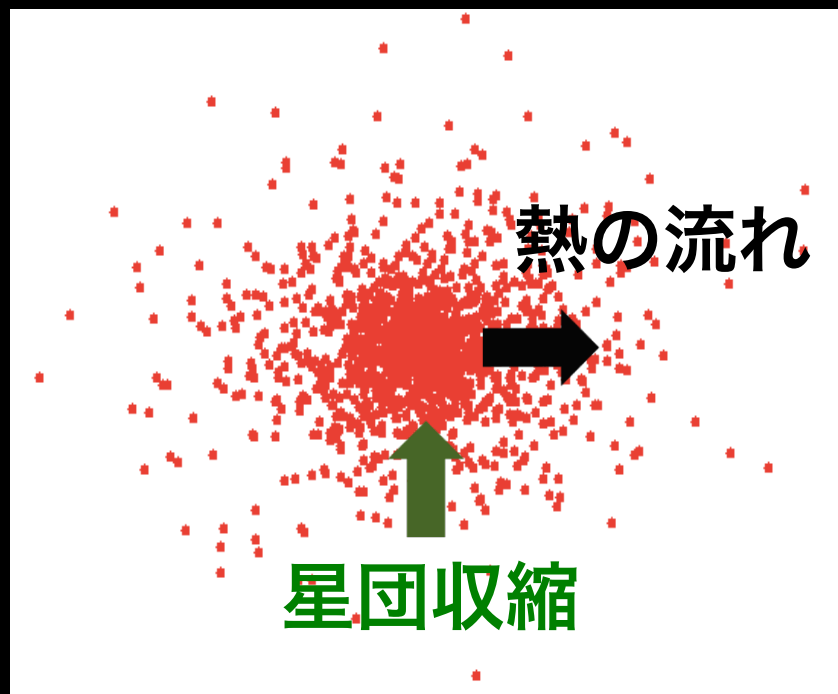
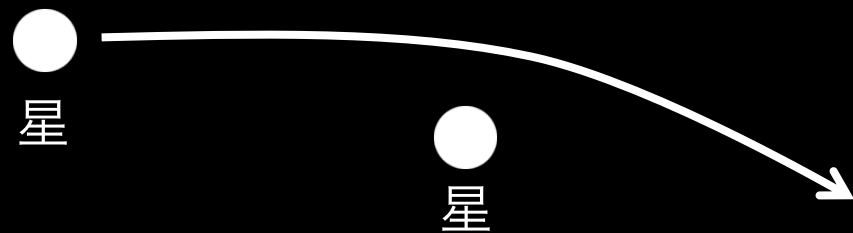
## 暴走的衝突モデル：大きい種BH

本講演



# 星の二体緩和と暴走的衝突

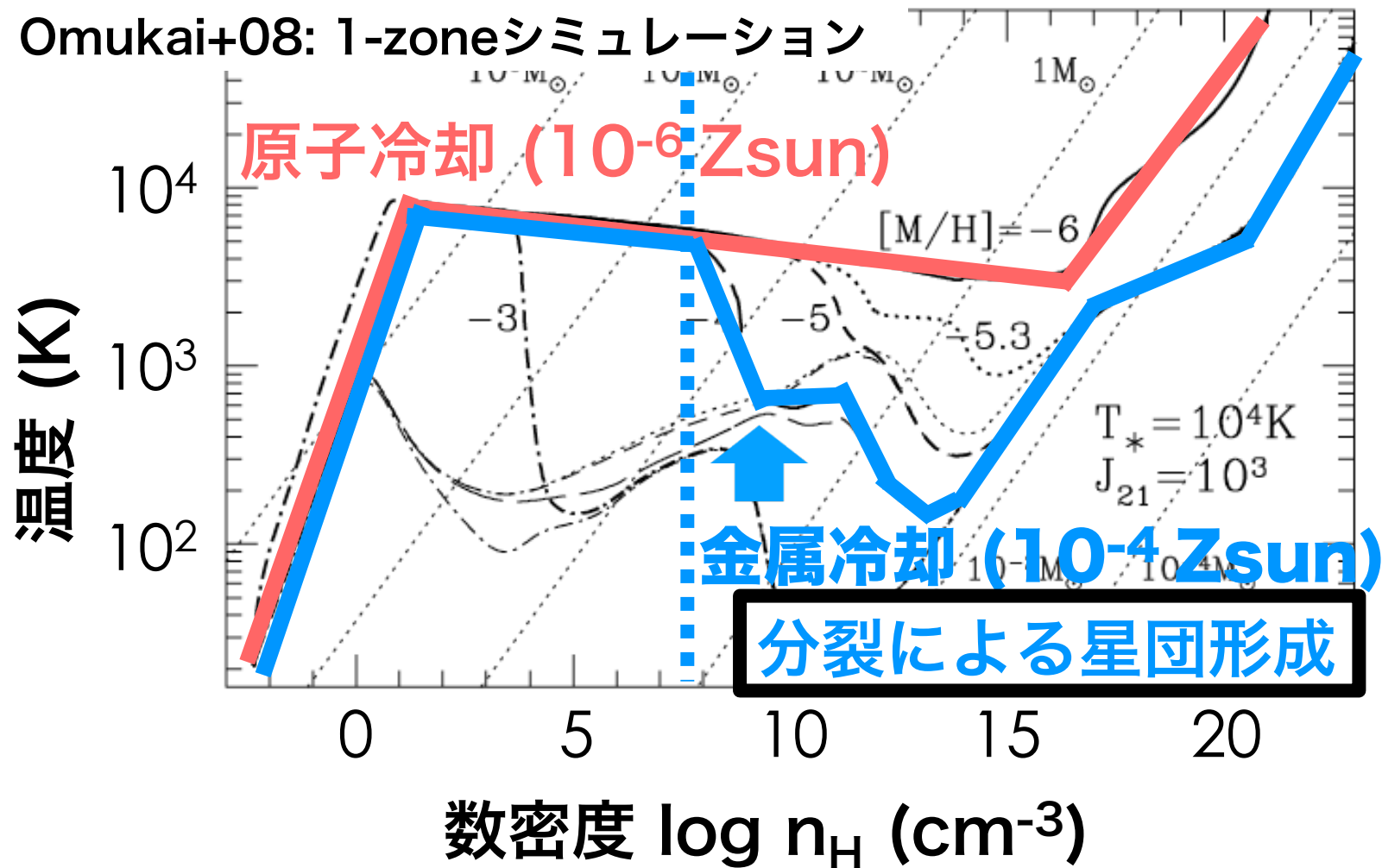
二体緩和： $E_{\text{kin}}$  (熱) を輸送



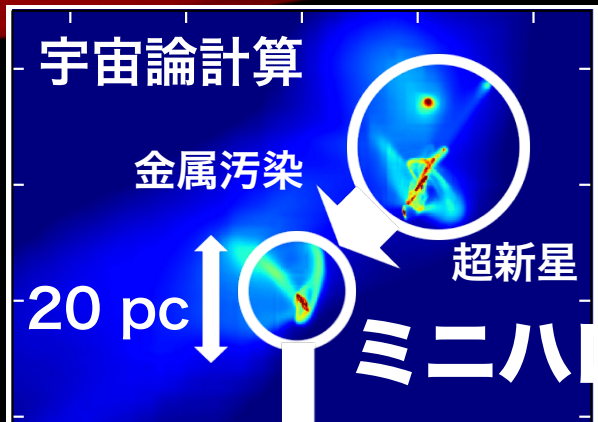
# 初期宇宙での星団形成の可能性

## 原子冷却ハロー内の始原ガス熱進化

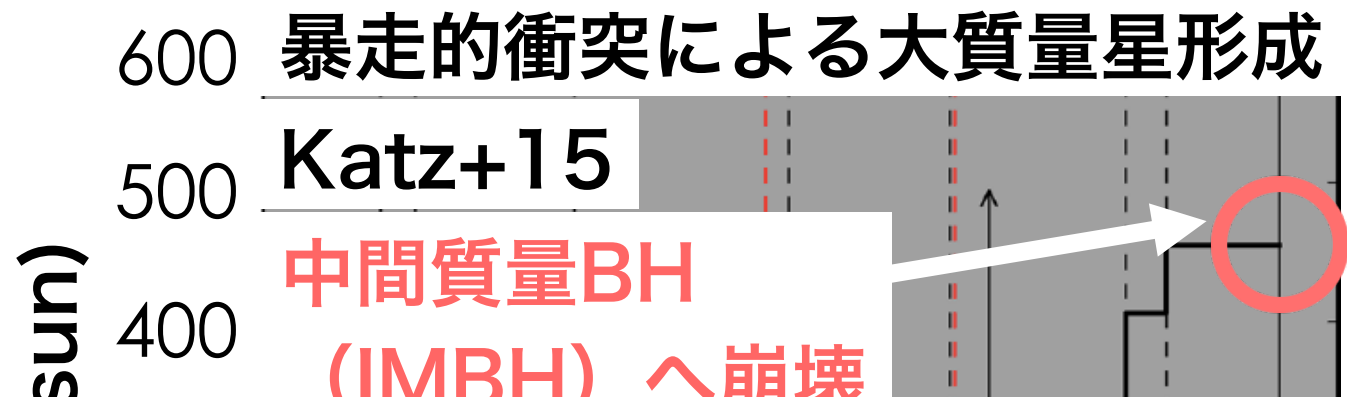
Omukai+08: 1-zoneシミュレーション



# 初期宇宙で形成された星団内での暴走的衝突

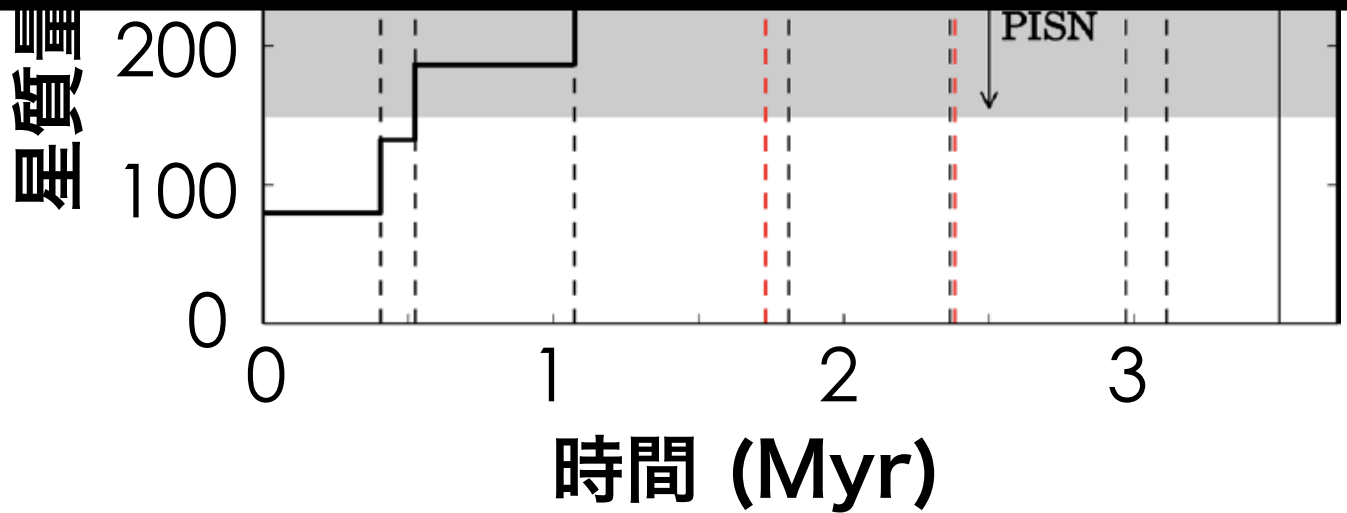
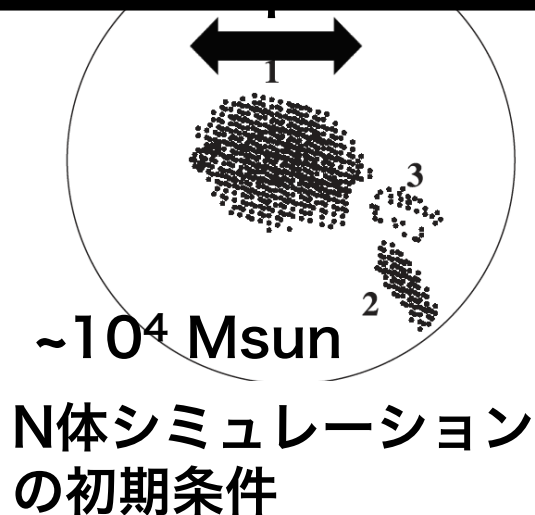


N体計算



## 原子冷却ハローの場合にも暴走的衝突は起きるか？

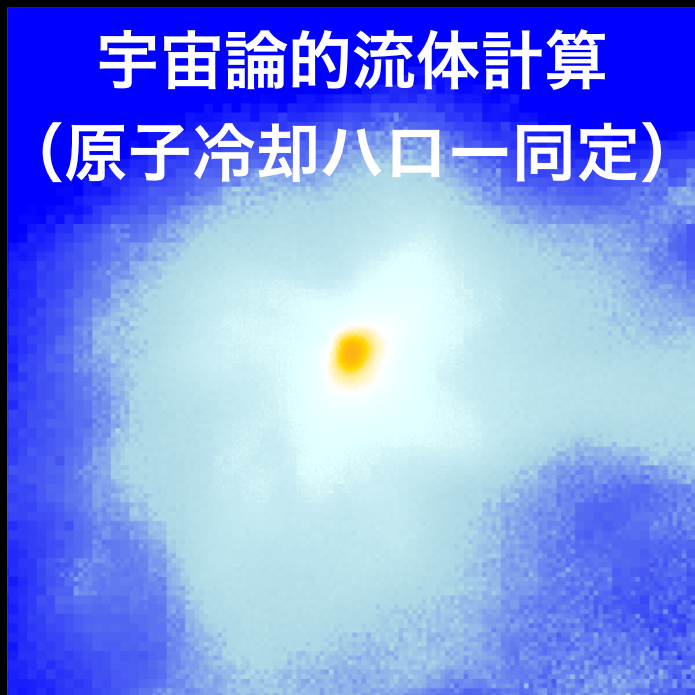
星団形成を仮定



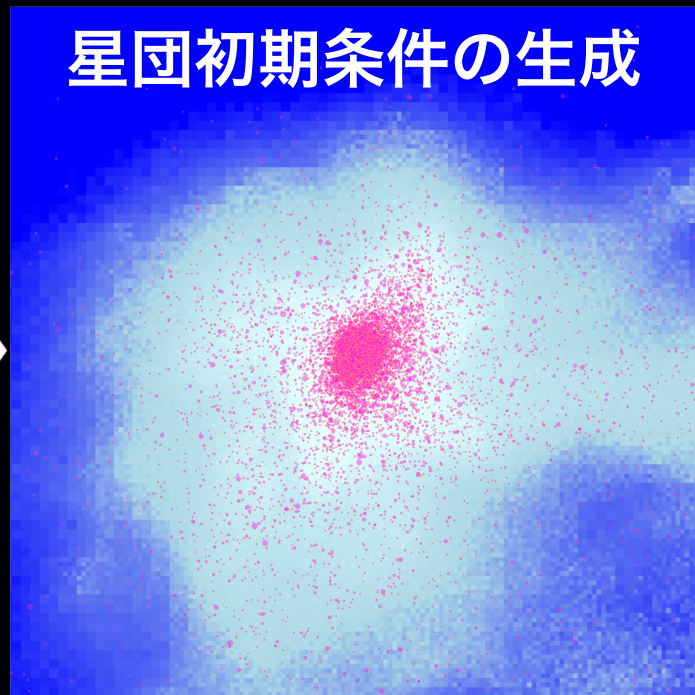
# 本研究の目的と内容

- 原子冷却ハローで形成された星団でも暴走的衝突が起きるか？
- どのような条件で大質量星形成とIMBH形成は起きるか？
- 数値シミュレーションの流れ

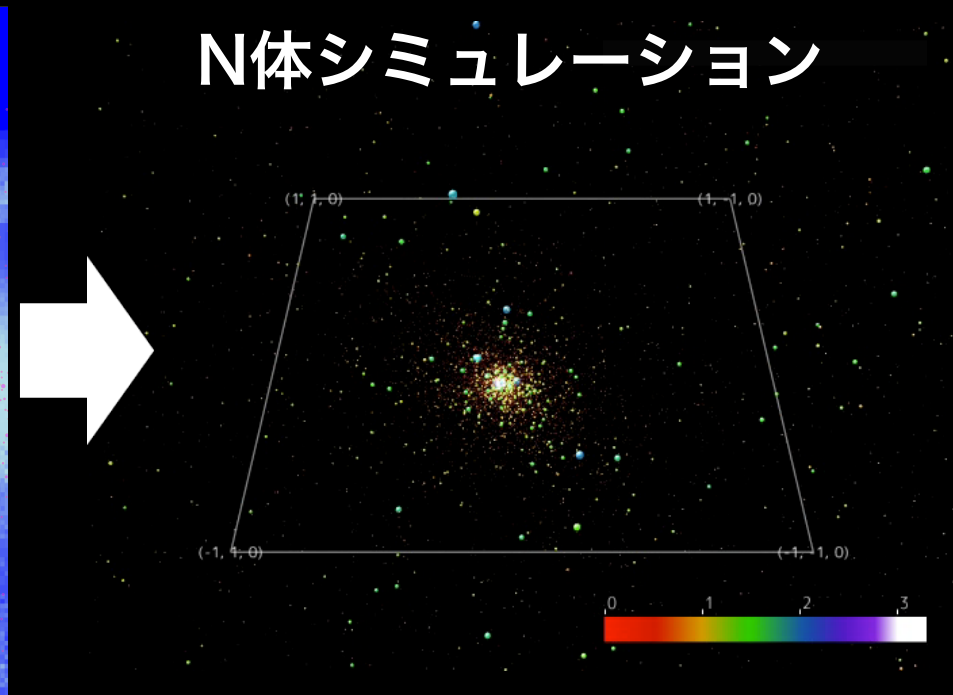
宇宙論的流体計算  
(原子冷却ハロー同定)



星団初期条件の生成



N体シミュレーション



# 宇宙論的流体シミュレーション

- コード: Gadget-3 (Hirano et al. 2014)
- 初期条件: MUSIC software (Hahn&Abel11),  $z=99$ , サイズ= $10h^{-1}$  Mpc

① DMのみの計算 ( $N=512^3$ ):  
◆  $z=10$ で原子冷却ハロー候補

② ズームイン計算:  
◆ 解像度  $m_{\text{DM}} \sim 1 \text{ Msun}$

③ **SPH (粒子法)** 計算:  
◆ 水素分子・金属冷却なし  
◆  **$n_{\text{H}} \sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$ まで**

| Model | Redshift | $R_{\text{vir}}$<br>( $10^2$ pc) | $M_{\text{vir}}$<br>( $10^7 M_{\odot}$ ) |
|-------|----------|----------------------------------|------------------------------------------|
| A     | 19.72    | 2.81                             | 4.03                                     |
| B     | 19.57    | 2.76                             | 2.97                                     |
| C     | 19.73    | 2.08                             | 2.03                                     |
| D     | 14.89    | 3.21                             | 2.60                                     |
| E     | 17.06    | 2.64                             | 1.47                                     |
| F     | 16.53    | 3.12                             | 2.01                                     |
| G     | 16.91    | 2.42                             | 1.99                                     |
| H     | 11.67    | 5.41                             | 4.22                                     |

**8個の原子冷却ハローを取得**

# 星団の初期条件生成

## SPH粒子を星粒子に置き換える確率

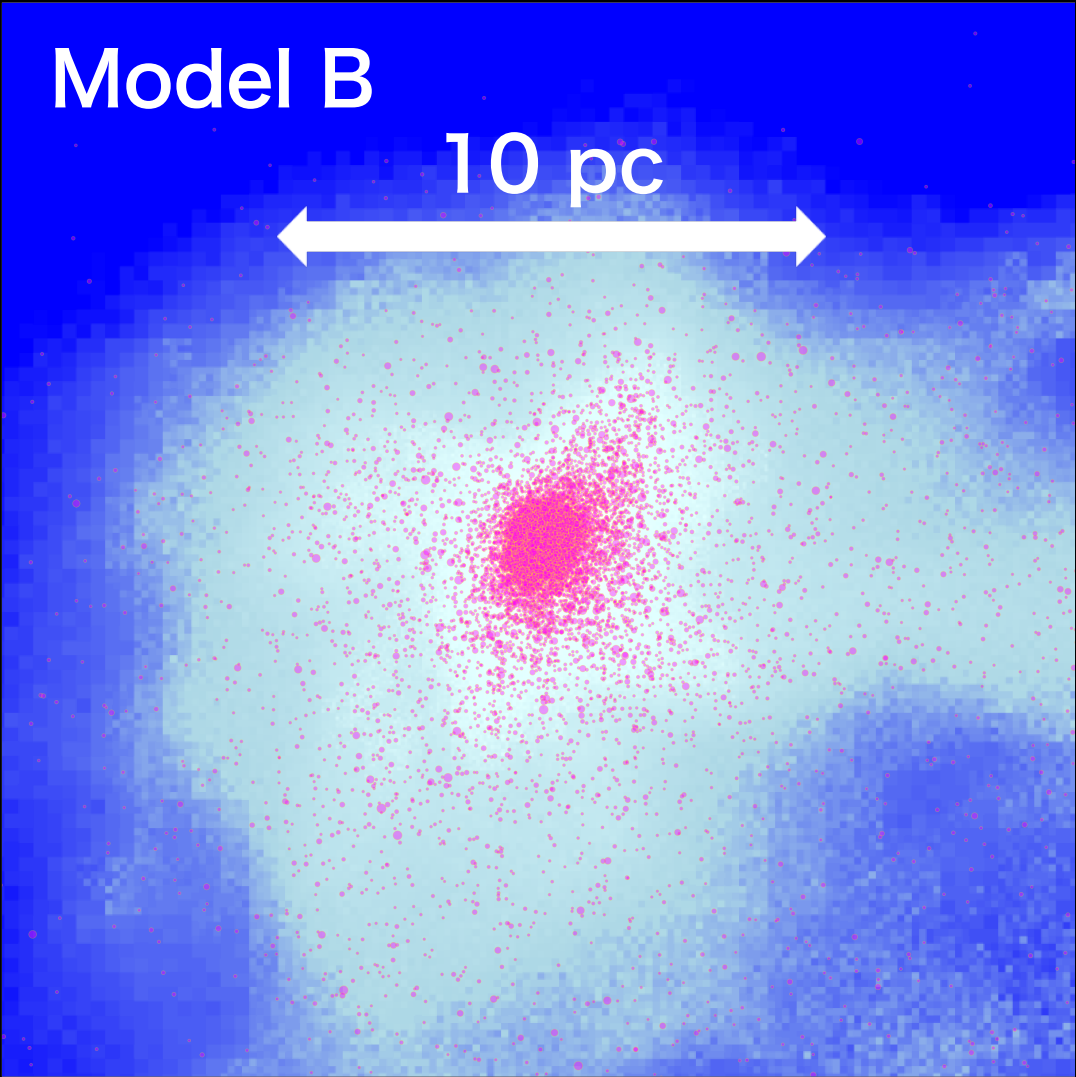
$$\epsilon_{\text{loc},i} = \max \left( \alpha_{\text{sfe}} \sqrt{\frac{n_{\text{H},i}}{1 \text{ cm}^{-3}}} e^{-r_i/R_{\text{cl}}}, 1.0 \right) \times \frac{m_{\text{gas},i}}{\overline{m}_{\text{s}}}$$

| $\alpha_{\text{sfe}}$ | $m_{\text{min}}$<br>( $M_{\odot}$ ) | $m_{\text{max}}$<br>( $M_{\odot}$ ) | $\beta$ | $Q$ | $m_{\text{DM}}$<br>( $M_{\odot}$ ) |
|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------|-----|------------------------------------|
| $6.32 \times 10^{-4}$ | 3                                   | 100                                 | 2.35    | 0.5 | 1.87                               |

| Model | $\overline{M}_{\text{cl},5}$<br>( $10^5 \text{ Msun}$ ) | $\overline{N}_4$<br>( $10^4$ ) |
|-------|---------------------------------------------------------|--------------------------------|
| A     | 1.64                                                    | 1.99                           |
| B     | 1.30                                                    | 1.57                           |
| C     | 1.21                                                    | 1.47                           |
| D     | 1.17                                                    | 1.41                           |
| E     | 0.476                                                   | 0.576                          |
| F     | 0.900                                                   | 1.08                           |
| G     | 1.25                                                    | 1.50                           |
| H     | 0.770                                                   | 0.932                          |

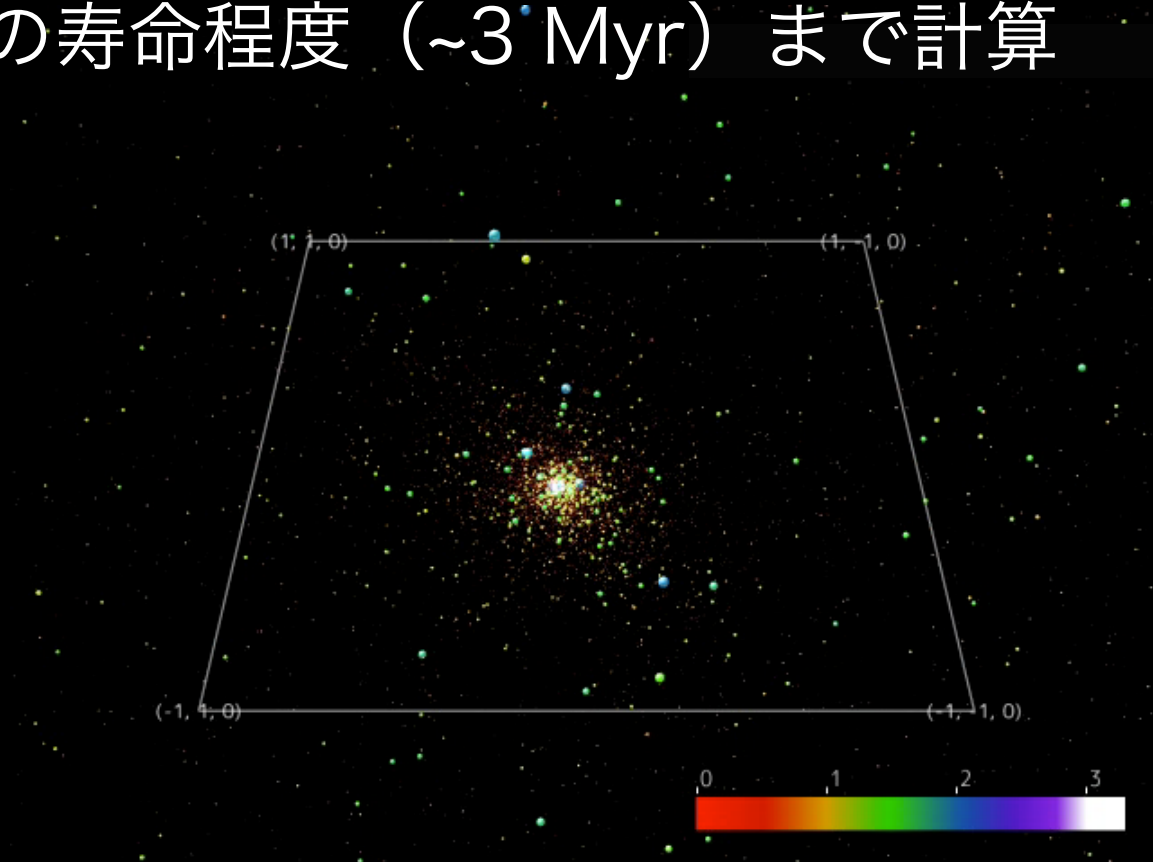
Salpeter IMF

紅色：星      背景色: ガス+DM

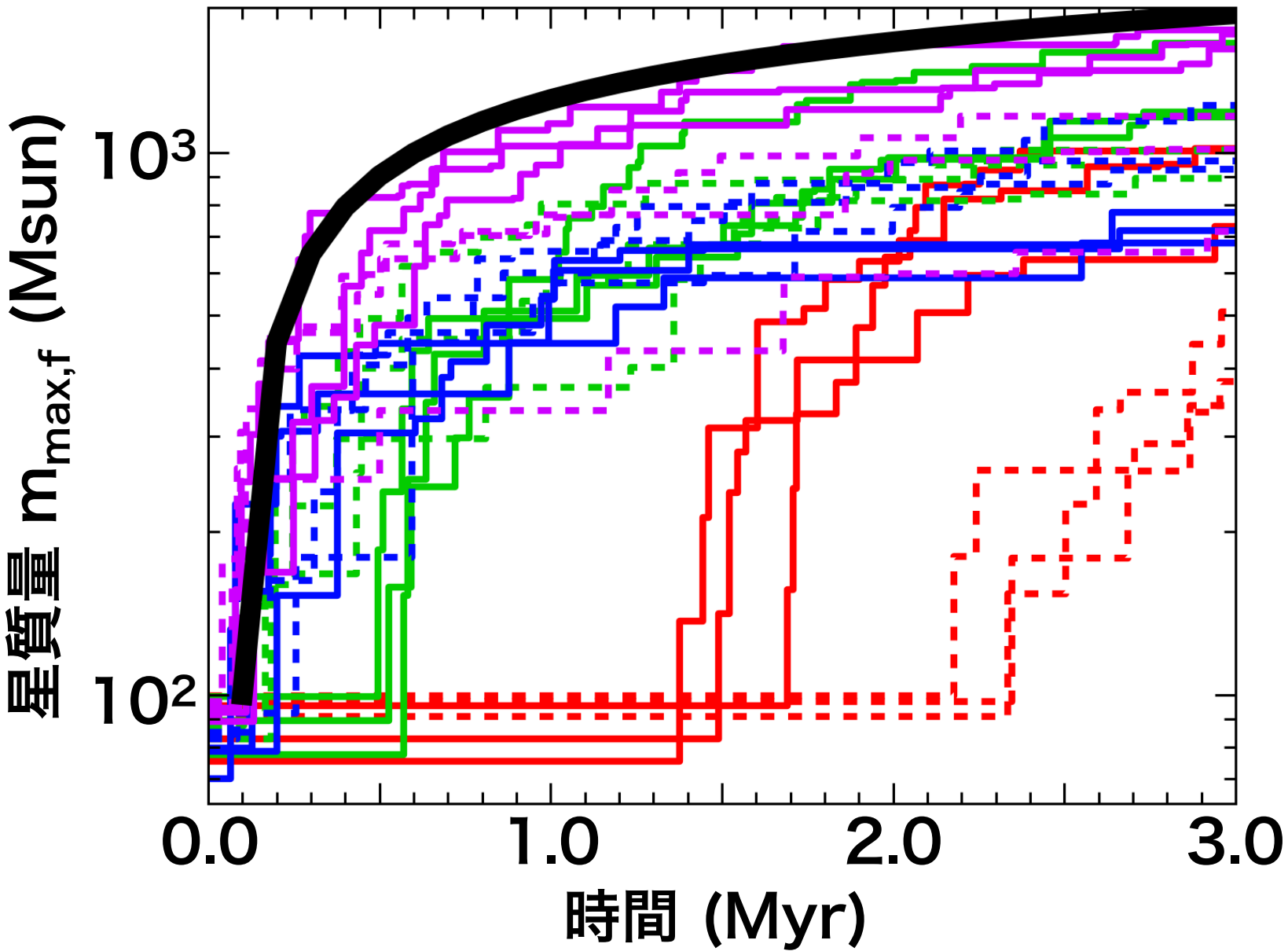


# ハイブリッドN体シミュレーション

- コード: BRIDGE (Fujii et al. 2007)
  - ◆ 星は直接法、DMはツリー法で重力計算
  - ◆ 合体条件: 2 星間距離  $< R_1 + R_2$  (ZAMS半径, Tout+1996)
  - ◆ 大質量星の寿命程度 ( $\sim 3$  Myr) まで計算



N体計算結果：暴走的衝突・大質量星形成は起きる！！！！



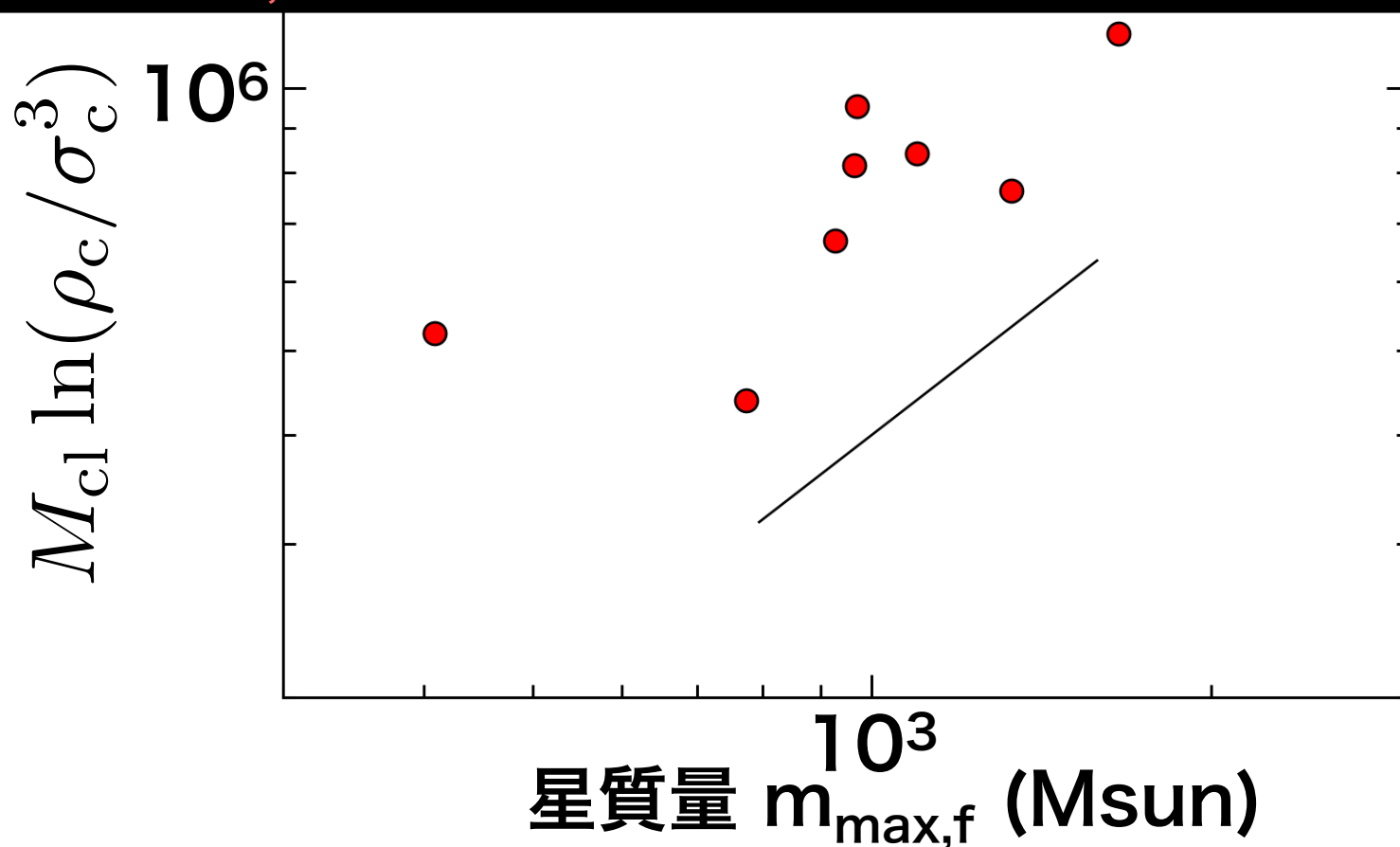
全モデルで暴走的衝突  
～ 400-1900  $M_{\text{sun}}$   
→IMBHに崩壊

|   | $\overline{m}_{\max,f}$<br>( $M_{\odot}$ ) | $\overline{N}_{\text{coll}}$ |
|---|--------------------------------------------|------------------------------|
| A | 929                                        | 11.7                         |
| B | 409                                        | 4.67                         |
| C | 1330                                       | 18.3                         |
| D | 971                                        | 13.7                         |
| E | 773                                        | 9.67                         |
| F | 1100                                       | 14.0                         |
| G | 1660                                       | 25.0                         |
| H | 964                                        | 15.0                         |

# 暴走的衝突が起きる条件

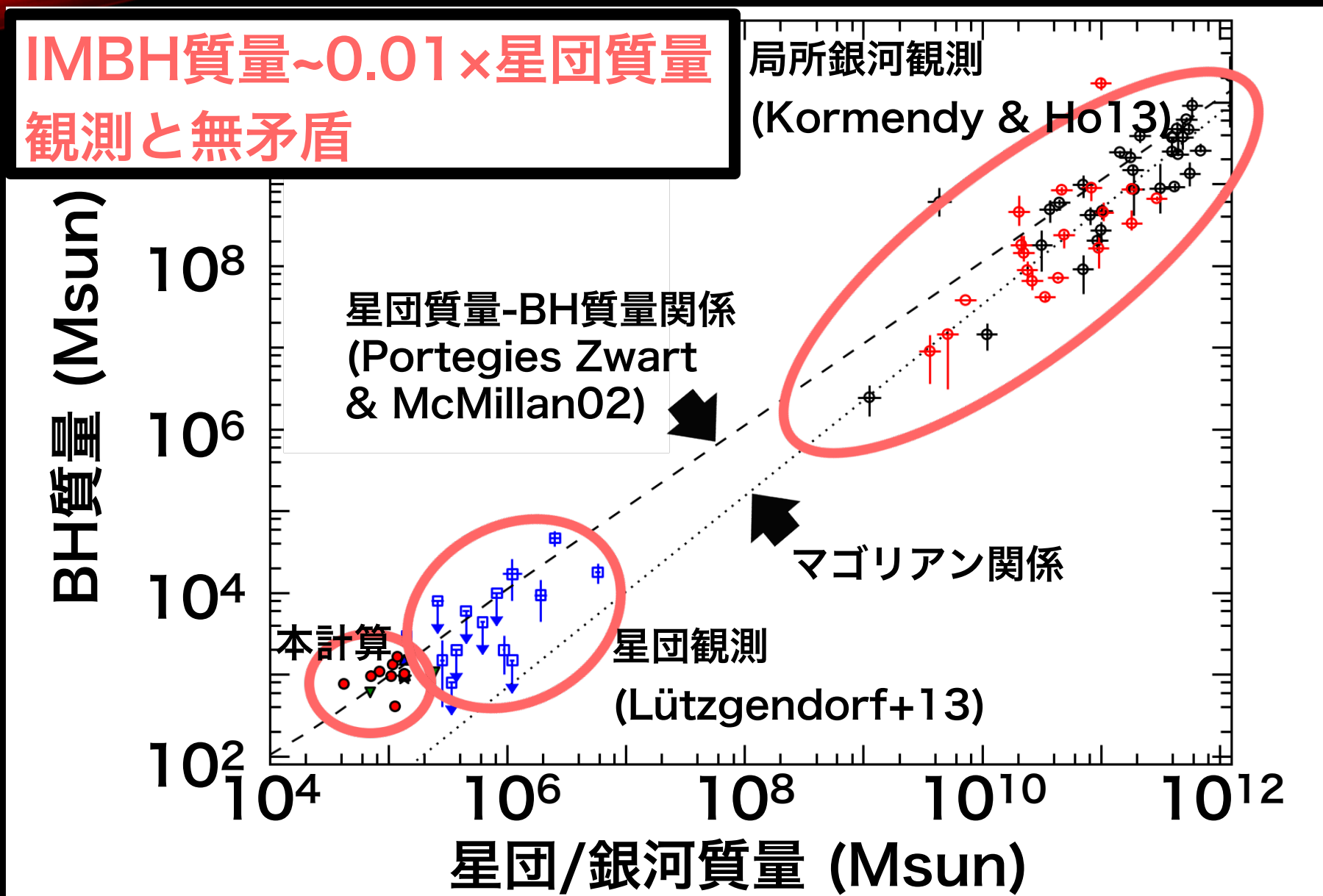
$$m_{\max, f} \propto M_{\text{vir}} \ln(\text{const.} \times \bar{\rho}_{\text{c, gas}} / \sigma_{\text{c, gas}}^3)$$

原子冷却ハローで $M_{\text{vir}}$ と $\rho_{\text{c, gas}}$ が大、 $\sigma_{\text{c, gas}}$ が小  
→ $m_{\max, f}$ は大きくなる



# 観測との比較：BH質量-星団/銀河質量の関係

IMBH質量 $\sim 0.01 \times$ 星団質量  
観測と無矛盾



## まとめと展望

- 原子冷却ハローで形成された星団で**星の暴走的衝突は起きる**
- **$m_{\text{max,f}} \sim 400\text{--}1900 M_{\text{sun}}$** の大質量星が形成される
- $M_{\text{vir}}$ と $\rho_{\text{c,gas}}$ が大きく $\sigma_{\text{c,gas}}$ が小さいハローほど $m_{\text{max,f}}$ は大きい
- **IMBH質量 $\sim 0.01 \times$ 星団質量 (観測と無矛盾)**
- IMBHのその後の運命は . . .
  - ◆ 超巨大BHの種BHとなる
  - ◆ 星団中にIMBHとして残る



今後の研究課題