

理論懇シンポジウム
2017/12/26
@東大本郷

初期宇宙における始原星団内での星の暴走的衝突と中間質量BH形成

櫻井祐也 (東京大)

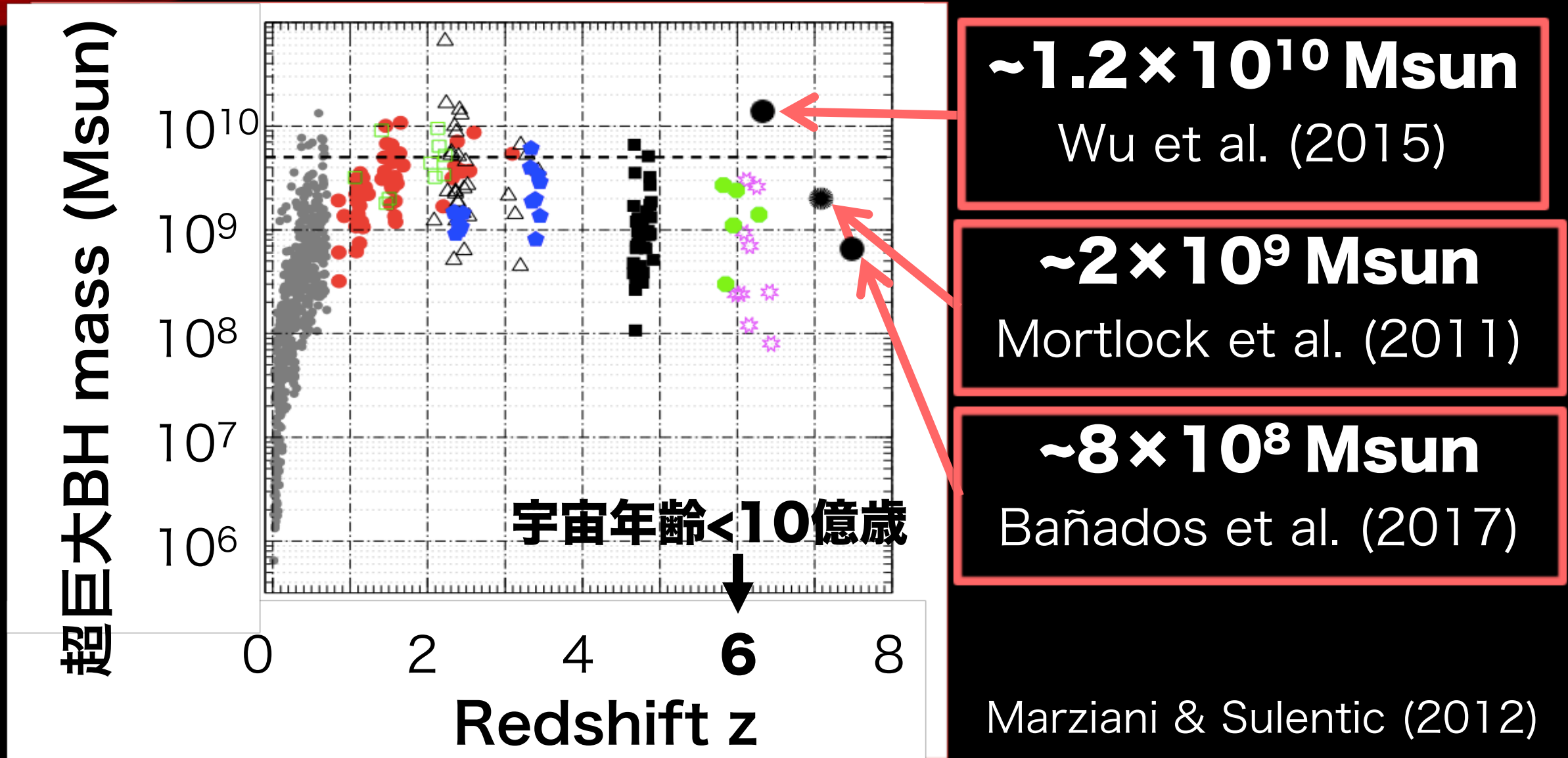
共同研究者:

吉田直紀 (東京大), 藤井通子 (東京大), 平野信吾 (テキサス大)

目次

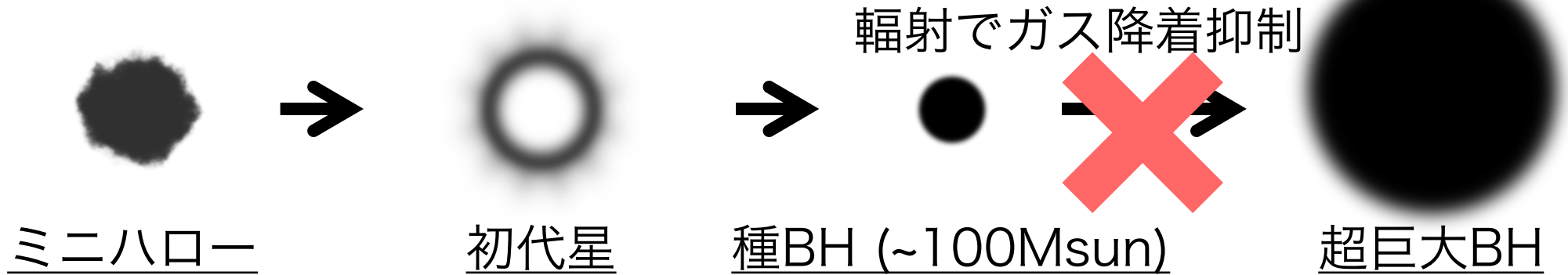
- 研究背景
 - ◆ 遠方宇宙の超巨大ブラックホール (SMBH) 観測とその起源
 - ◆ 暴走的衝突モデルとこれまでの研究
- 本研究の目的と内容
 - ◆ 数値シミュレーション
 - ◆ 結果
- まとめと展望

遠方宇宙 (=初期宇宙) には既に超巨大BHが存在していた!



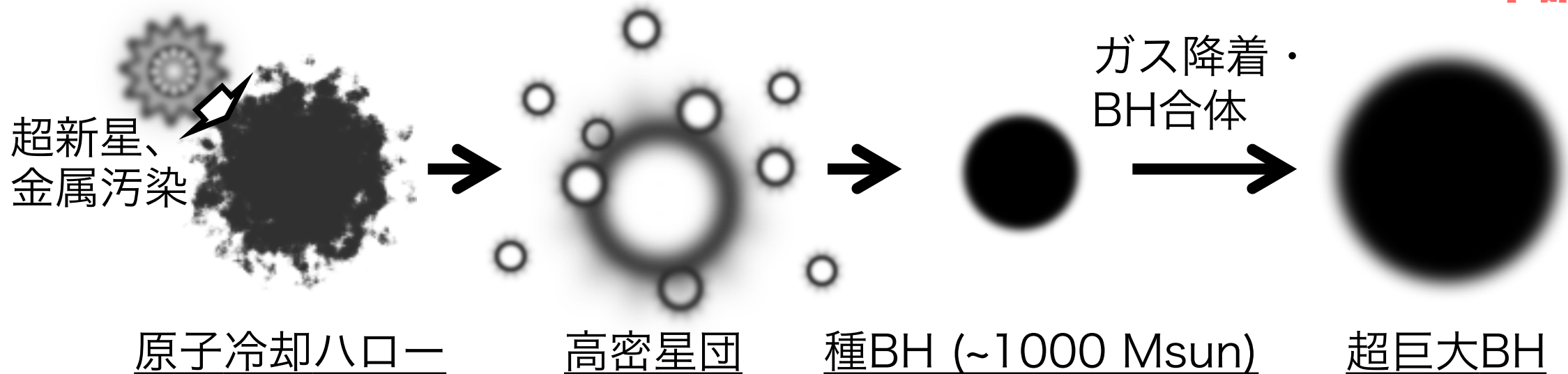
どのように宇宙論的に短期間で超巨大BHが形成したか？

初代星BHモデル：小さい種BH & 輻射フィードバック



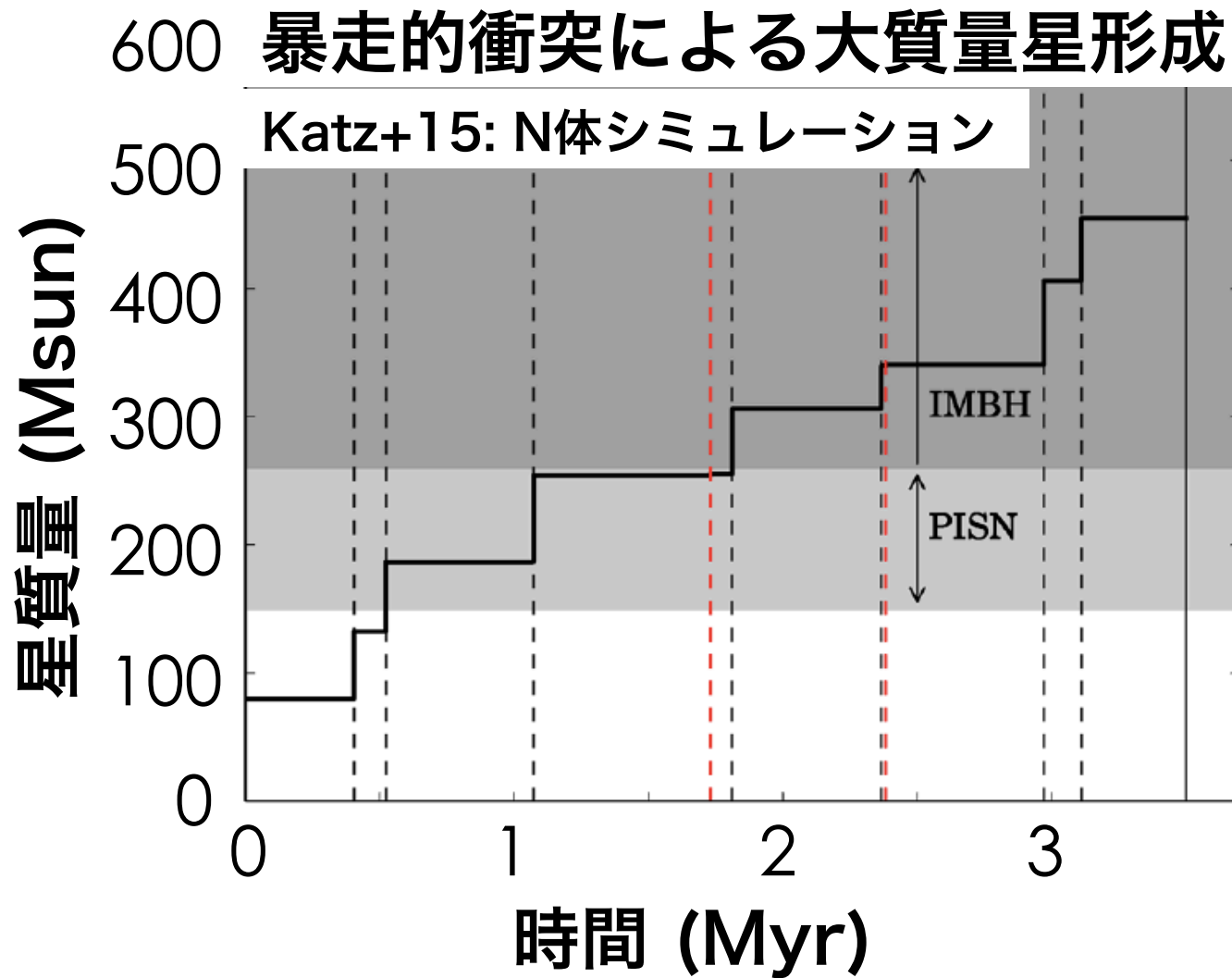
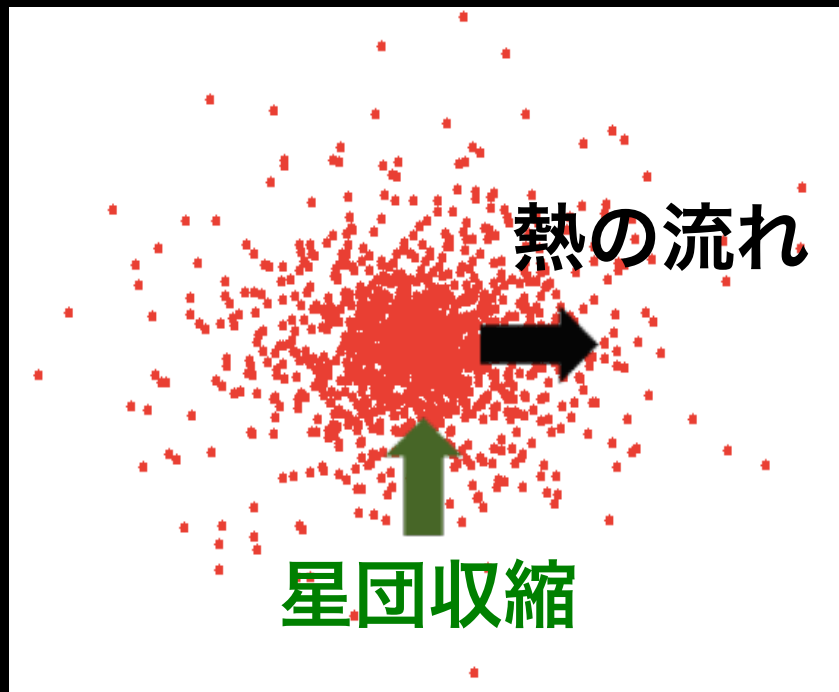
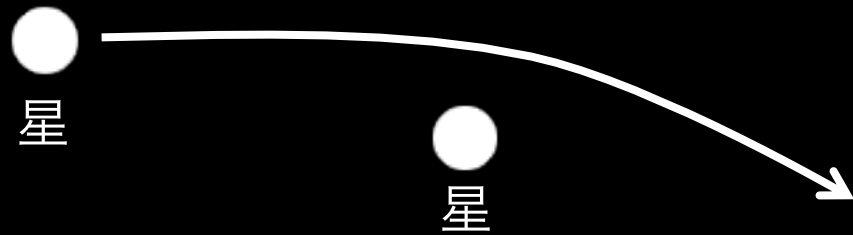
暴走的衝突モデル：大きい種BH

本講演



星の二体緩和と暴走的衝突

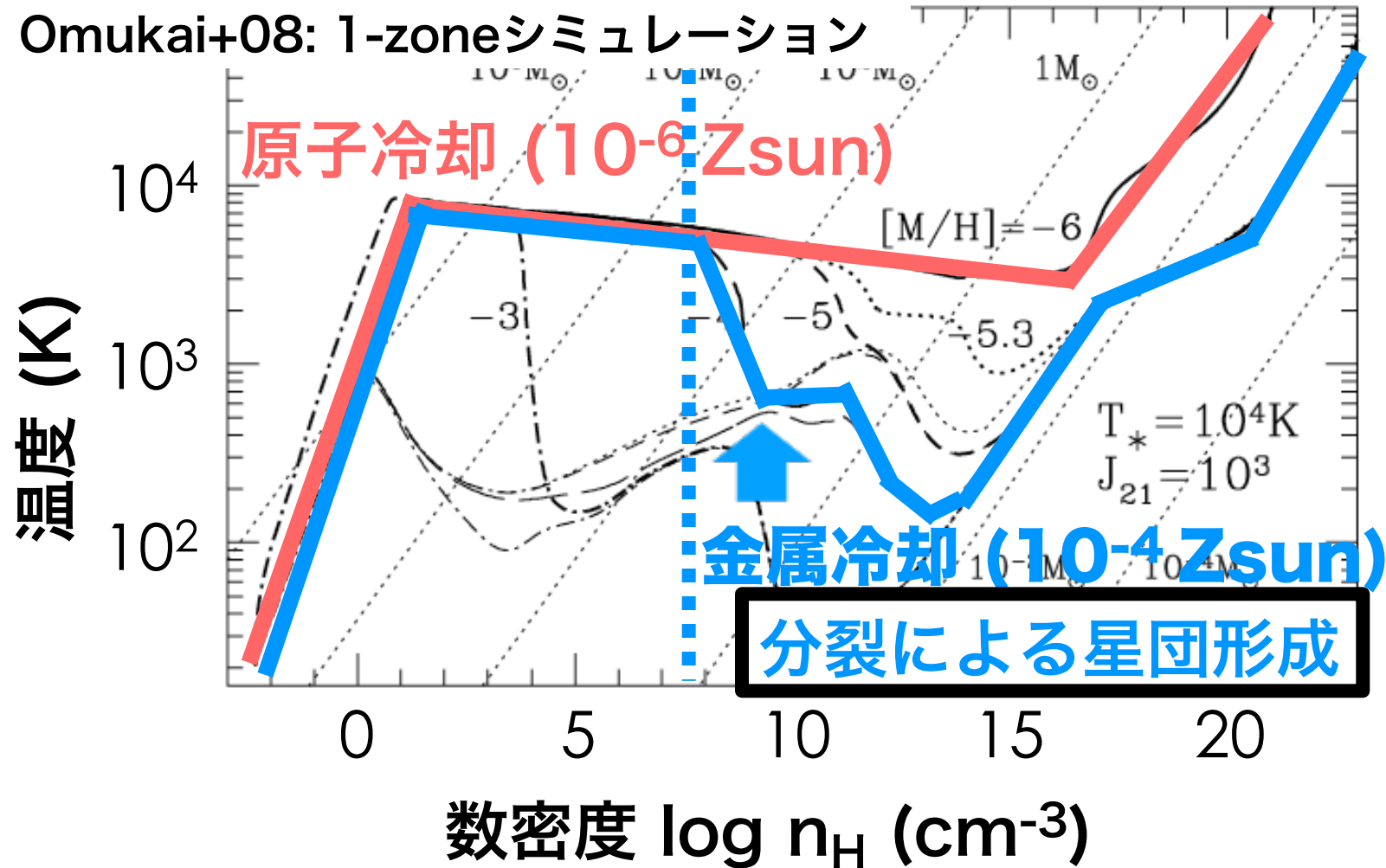
二体緩和： E_{kin} (熱) を輸送



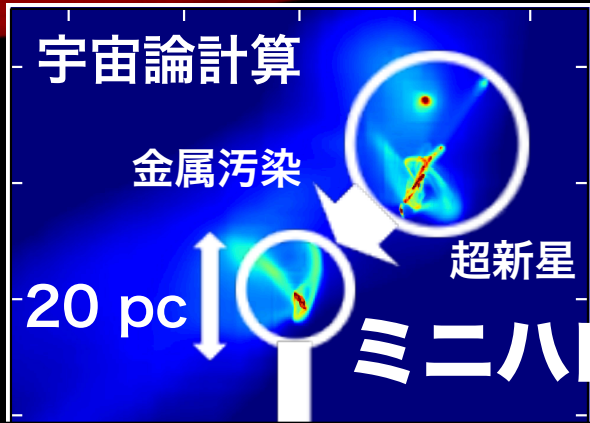
初期宇宙での星団形成の可能性

原子冷却ハロー内の始原ガス熱進化

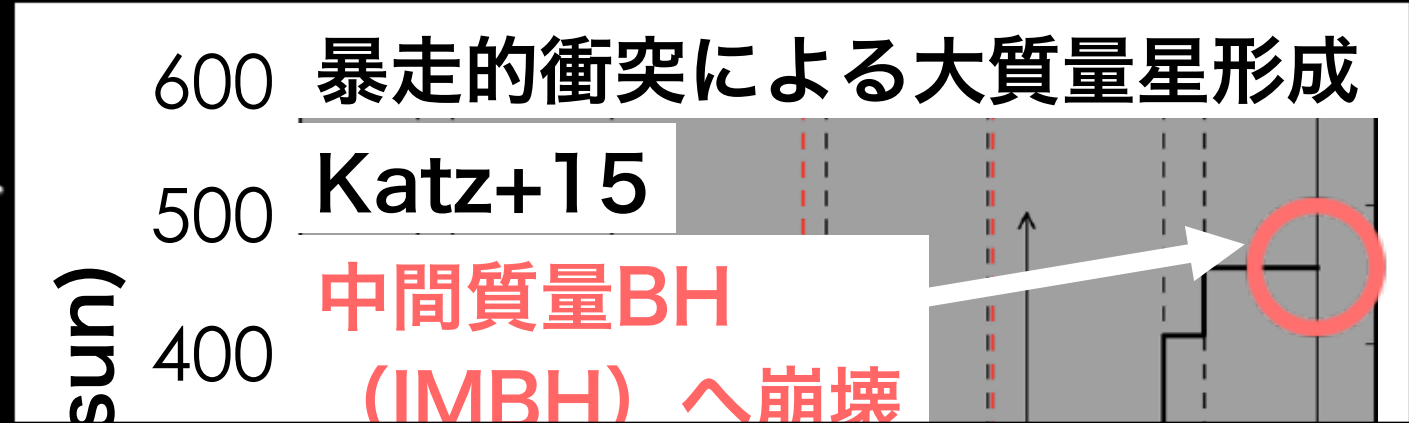
Omukai+08: 1-zoneシミュレーション



初期宇宙で形成された星団内での暴走的衝突

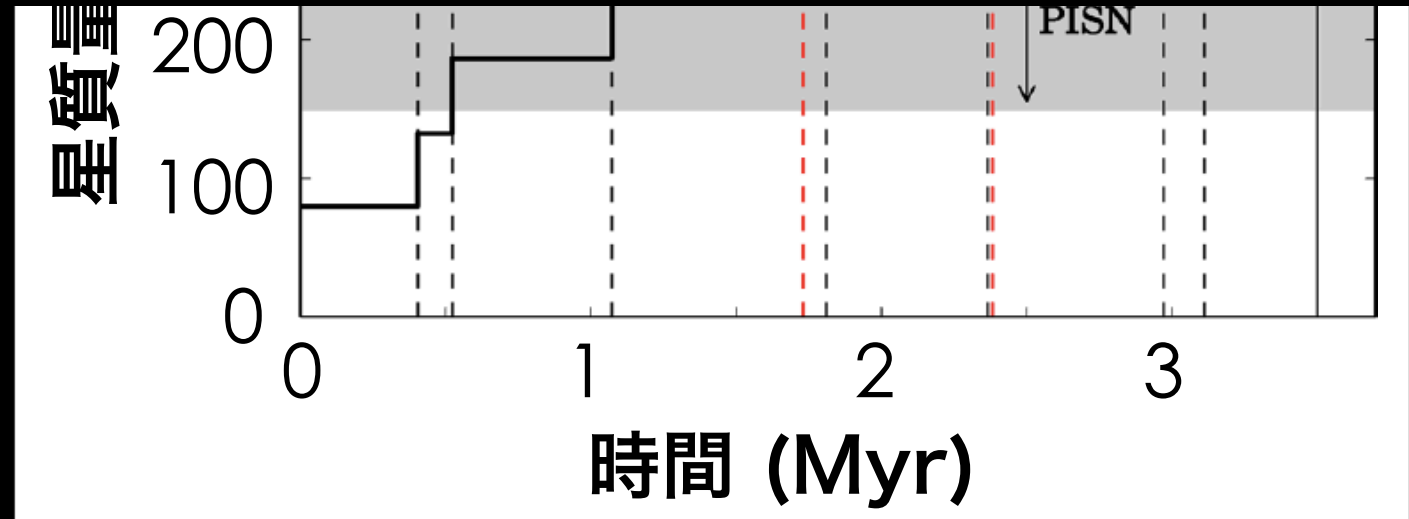
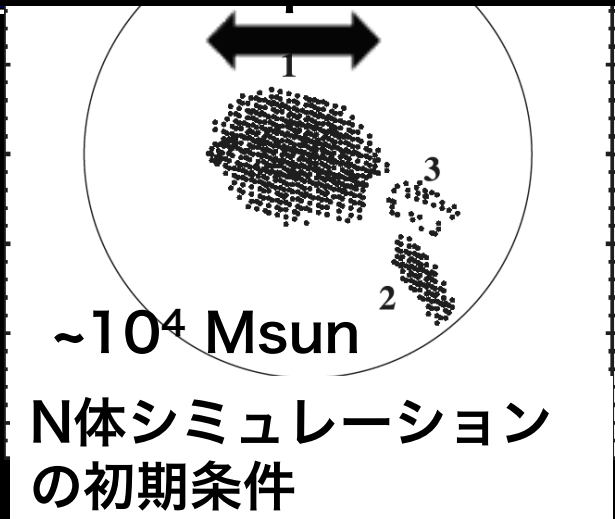


N体計算



原子冷却ハローの場合にも暴走的衝突は起きるか？

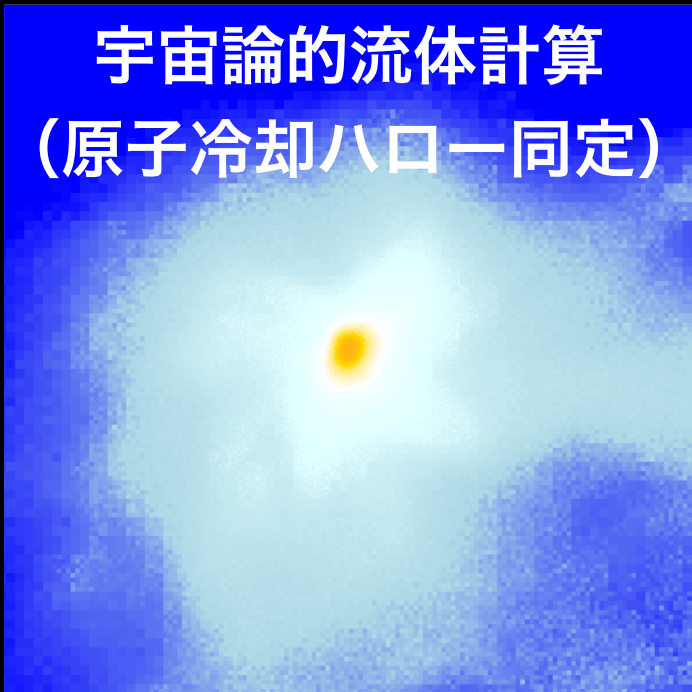
星団形成を仮定



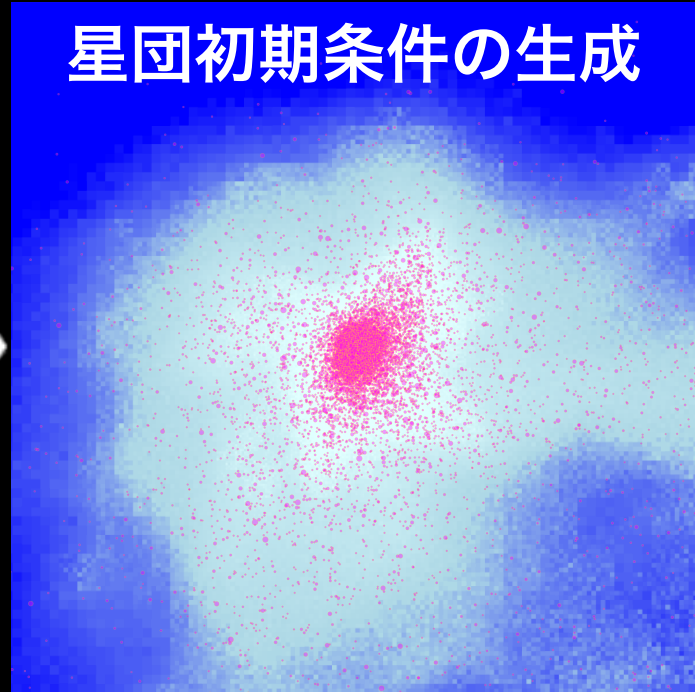
本研究の目的と内容

- 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

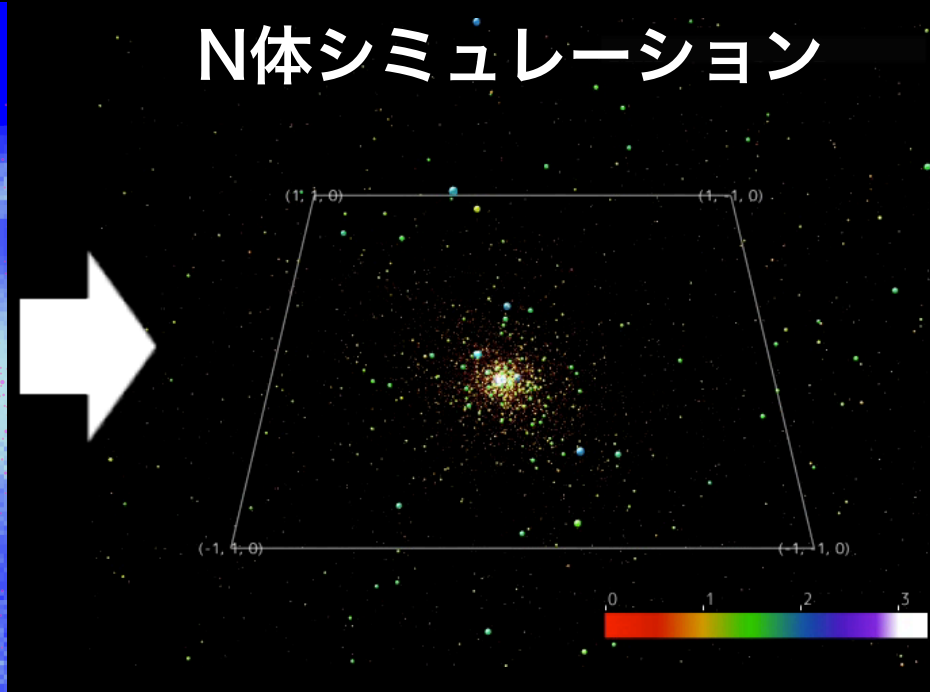
宇宙論的流体計算
(原子冷却ハロー同定)



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_{vir} (10^2 pc)	M_{vir} ($10^7 M_{\odot}$)
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

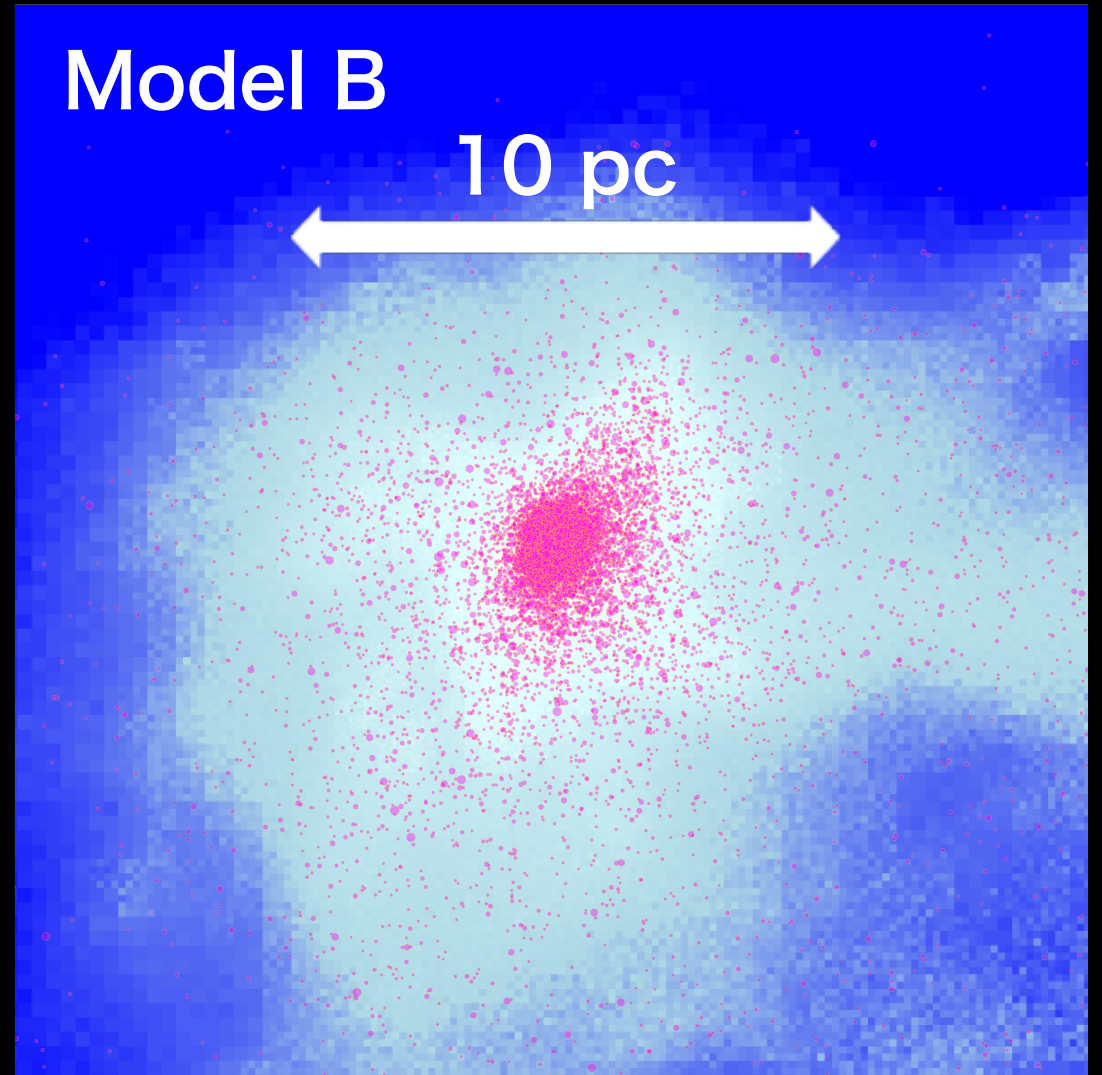
$$\epsilon_{\text{loc},i} = \max \left(\alpha_{\text{sfe}} \sqrt{\frac{n_{\text{H},i}}{1 \text{ cm}^{-3}}} e^{-r_i/R_{\text{cl}}}, 1.0 \right) \times \frac{m_{\text{gas},i}}{\bar{m}_{\text{s}}}$$

α_{sfe}	m_{min} (M_{\odot})	m_{max} (M_{\odot})	β	Q	m_{DM} (M_{\odot})
6.32×10^{-4}	3	100	2.35	0.5	1.87

紅色：星 背景色: ガス+DM

Model B

10 pc

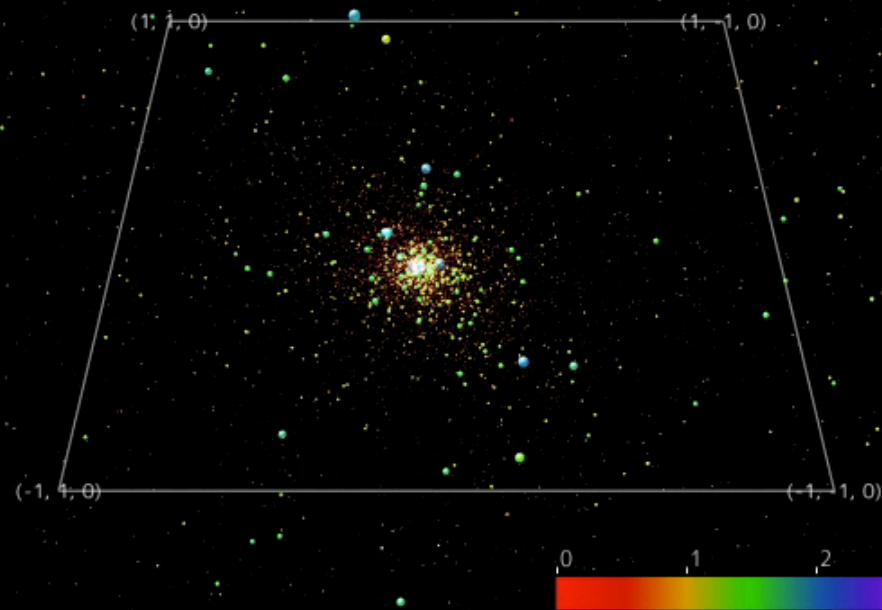


Salpeter IMF

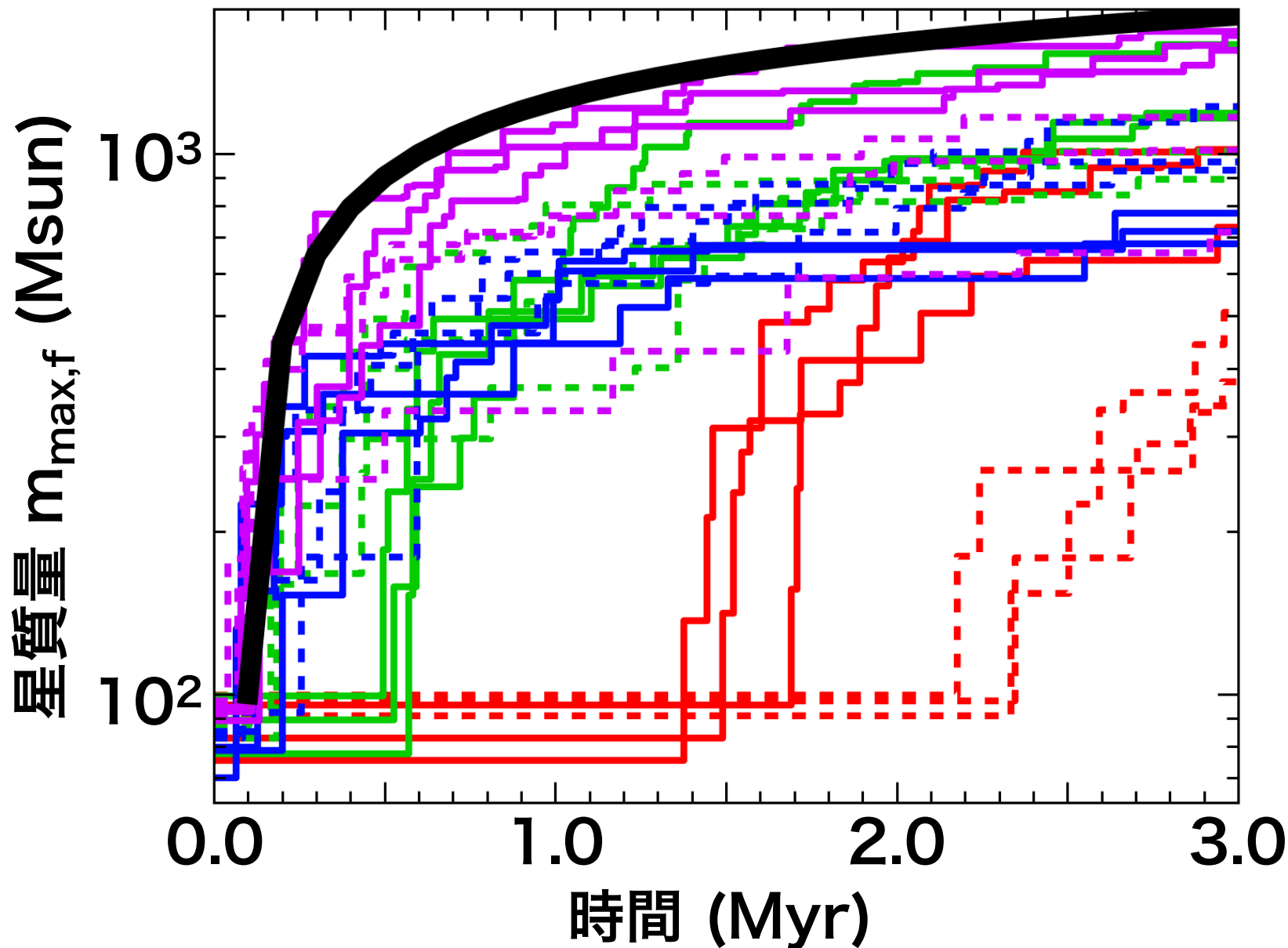
Model	$\bar{M}_{\text{cl},5}$ ($10^5 M_{\text{sun}}$)	\bar{N}_4 (10^4)
A	1.64	1.99
B	1.30	1.57
C	1.21	1.47
D	1.17	1.41
E	0.476	0.576
F	0.900	1.08
G	1.25	1.50
H	0.770	0.932

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 (~ 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_{sun}
→ IMBHに崩壊

	$\bar{m}_{\max,f}$ (M_{\odot})	\bar{N}_{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

パラメータ依存性

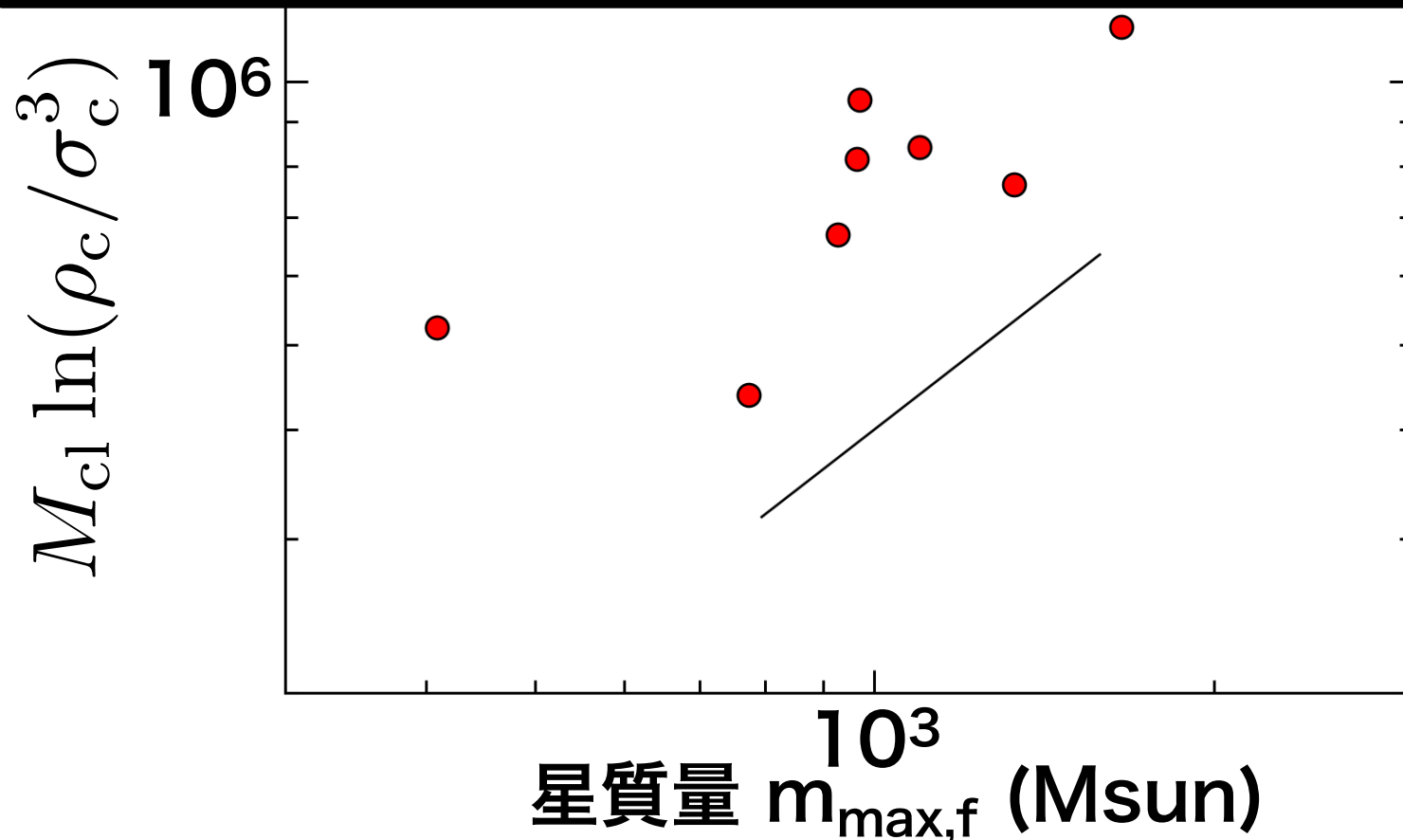
- DM、星の半径、 m_{\min} は結果に影響しない
- m_{\max} 、SFEパラメータ α_{sfe} が結果に影響する

	$\bar{M}_{\text{cl},4}$ ($10^4 M_{\odot}$)	\bar{N}_3 (10^3)	$\bar{m}_{\text{max},f}$ (M_{\odot})	\bar{N}_{coll}	Notes
A	16.4	19.9	929	11.7	fiducial model (Table 1)
AnoDM	16.4	19.9	915	10.7	no DM
Arad	16.4	20.0	958	9.00	half radii for stars, 1 realization
Amax	16.5	18.6	1510	11.0	$m_{\text{max}} = 200 M_{\odot}$, 1 realization
Amin	16.6	53.3	980	12.0	$m_{\min} = 1 M_{\odot}$, no DM, 1 realization
Asfe1	28.5	34.5	1060	14.5	$\alpha_{\text{sfe}} = 1.26 \times 10^{-3}$, 2 realizations
Asfe2	8.56	10.4	602	5.67	$\alpha_{\text{sfe}} = 3.16 \times 10^{-4}$
Asfe3	1.75	2.10	186	1.67	$\alpha_{\text{sfe}} = 6.32 \times 10^{-5}$

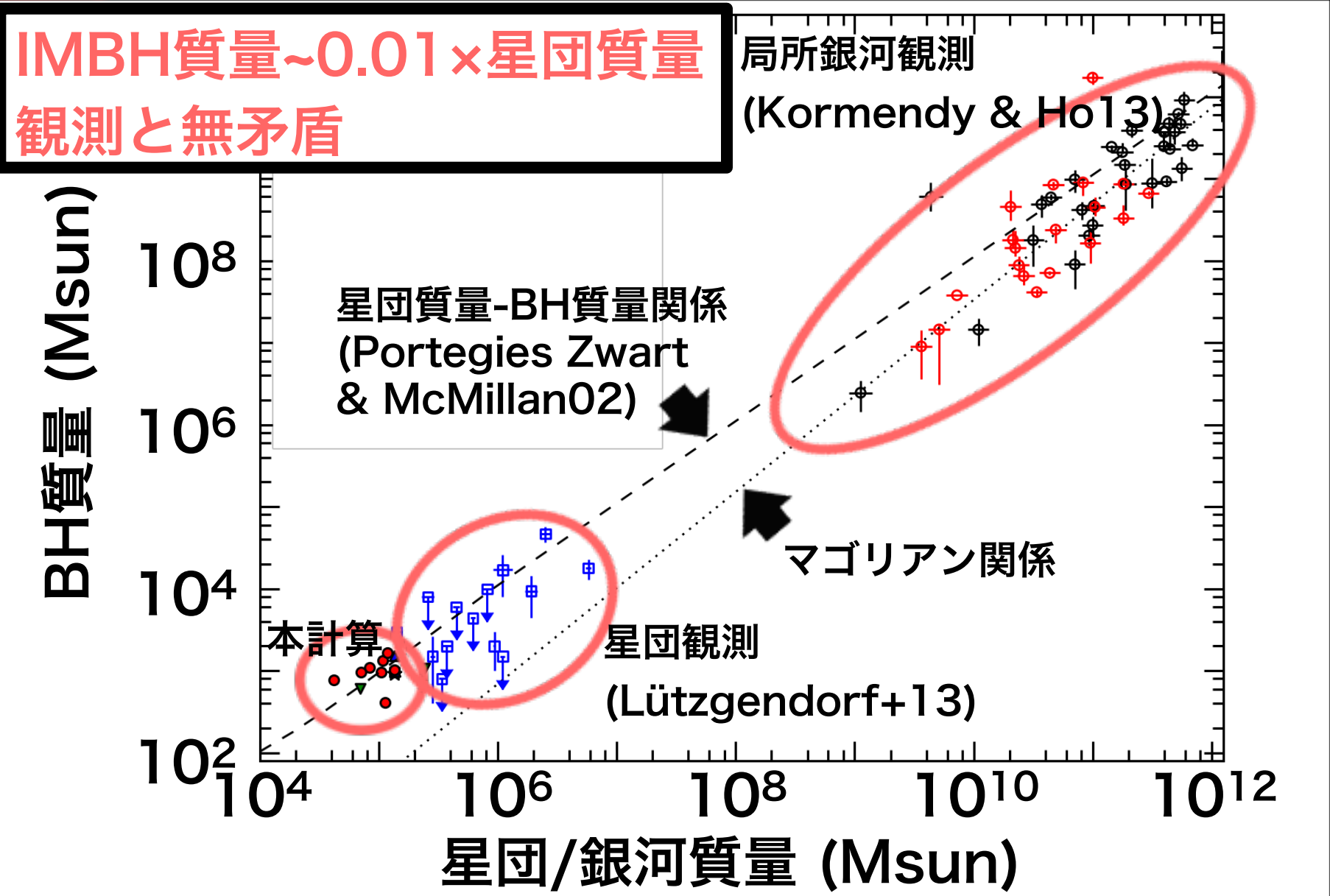
暴走的衝突が起きる条件

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

原子冷却ハローで M_{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



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**
- **$m_{\max,f} \sim 400-1900 M_{\text{sun}}$** の大質量星が形成される
- M_{vir} と $\rho_{\text{c,gas}}$ が大きく $\sigma_{\text{c,gas}}$ が小さいハローほど $m_{\max,f}$ 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

NO IMPACT OF DM ON THE RESULTS

- Dynamical friction timescale of stars due to DM is

$$t_{\text{df}} = \frac{0.186v^3}{G^2 m \ln \Lambda'} \int_0^r \frac{dr}{r\rho} \quad \left\{ \begin{array}{l} m: \text{stellar mass} \\ v: \text{stellar velocity} \\ \rho: \text{DM density profile} \end{array} \right.$$

From cosmological simulations, $\rho \propto r^{-1}$ for $r < 1 \text{ pc}$
 $m = 100 \text{ Msun}$, $v = 10 \text{ km/s}$, $\ln \Lambda' \sim 15$, $\rho_0 = 7 \times 10^{-20} \text{ g cm}^{-3}$
 $\rightarrow t_{\text{df}} \sim 7 \text{ Myr} \gg t_{\text{cc}}$

- Dynamical friction timescale of DM is longer than t_{cc}
 \rightarrow **DM dynamics has smaller impact** than stellar dynamics