

始原星の質量分布: 宇宙初期における星形成の多様性

平野 信吾
(東大天文・D3)

細川隆史, 吉田直紀, 梅田秀之(東大), 大向一行(東北大),
千秋元(東大), H. W. Yorke(JPL)

始原星 (Primordial Star / Pop III)

(化学的)第1世代星

First Light & First Metal

→ Dark Ageを終わらせる

始原星の星質量(分布)

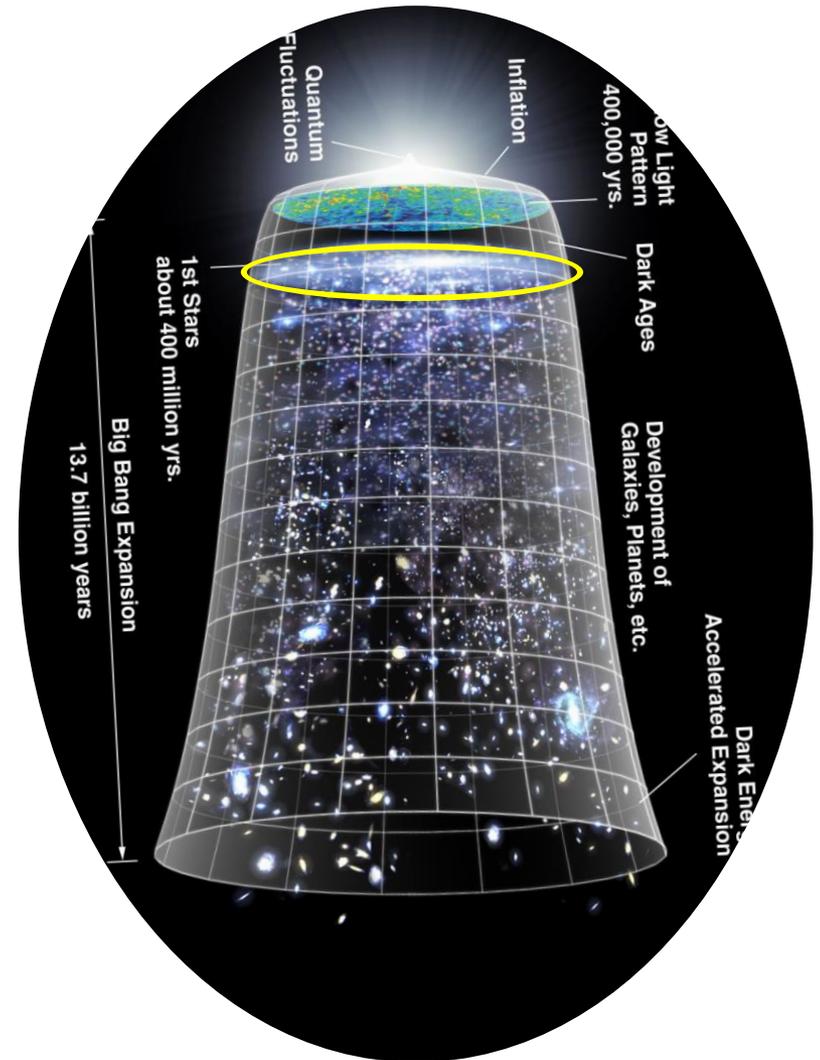
星の一生・最期を決める

→ 初期宇宙のモデル化

宇宙論的初期条件が存在

第一原理的に計算できる

→ 数値シミュレーション



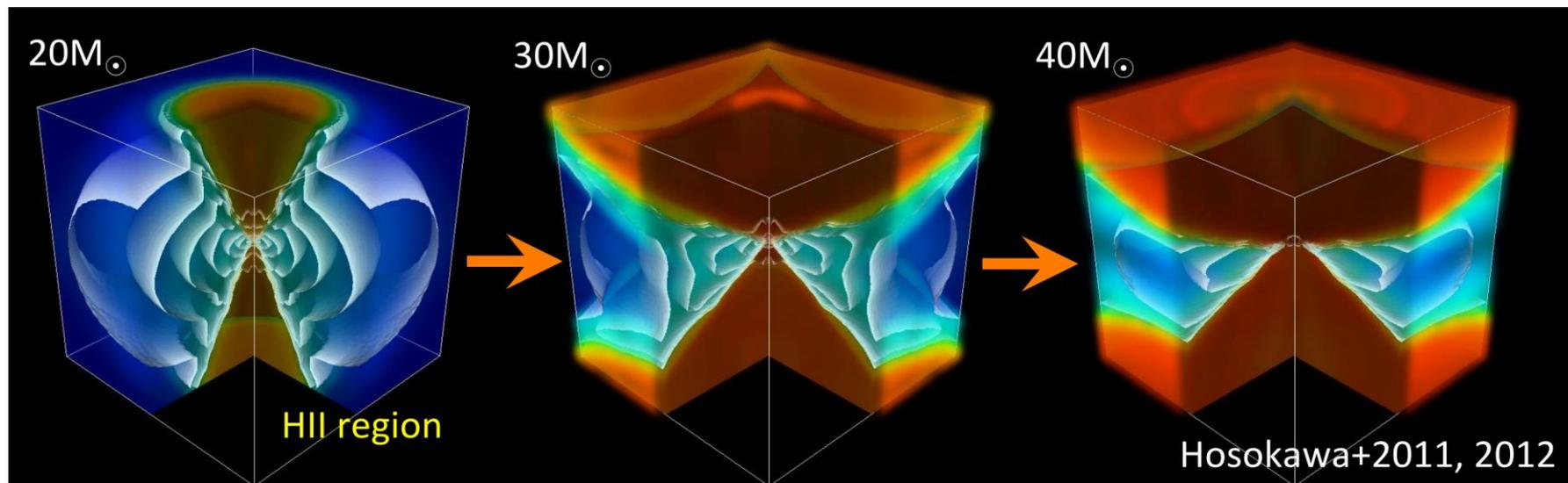
星形成シミュレーション

大規模構造 → minihalo → ガス雲 → 原始星コア

多くの先行研究より明らかに (e.g., Yoshida+'08)

原始星の降着進化 (Hosokawa+'11, Stacy+'12, Susa+'13)

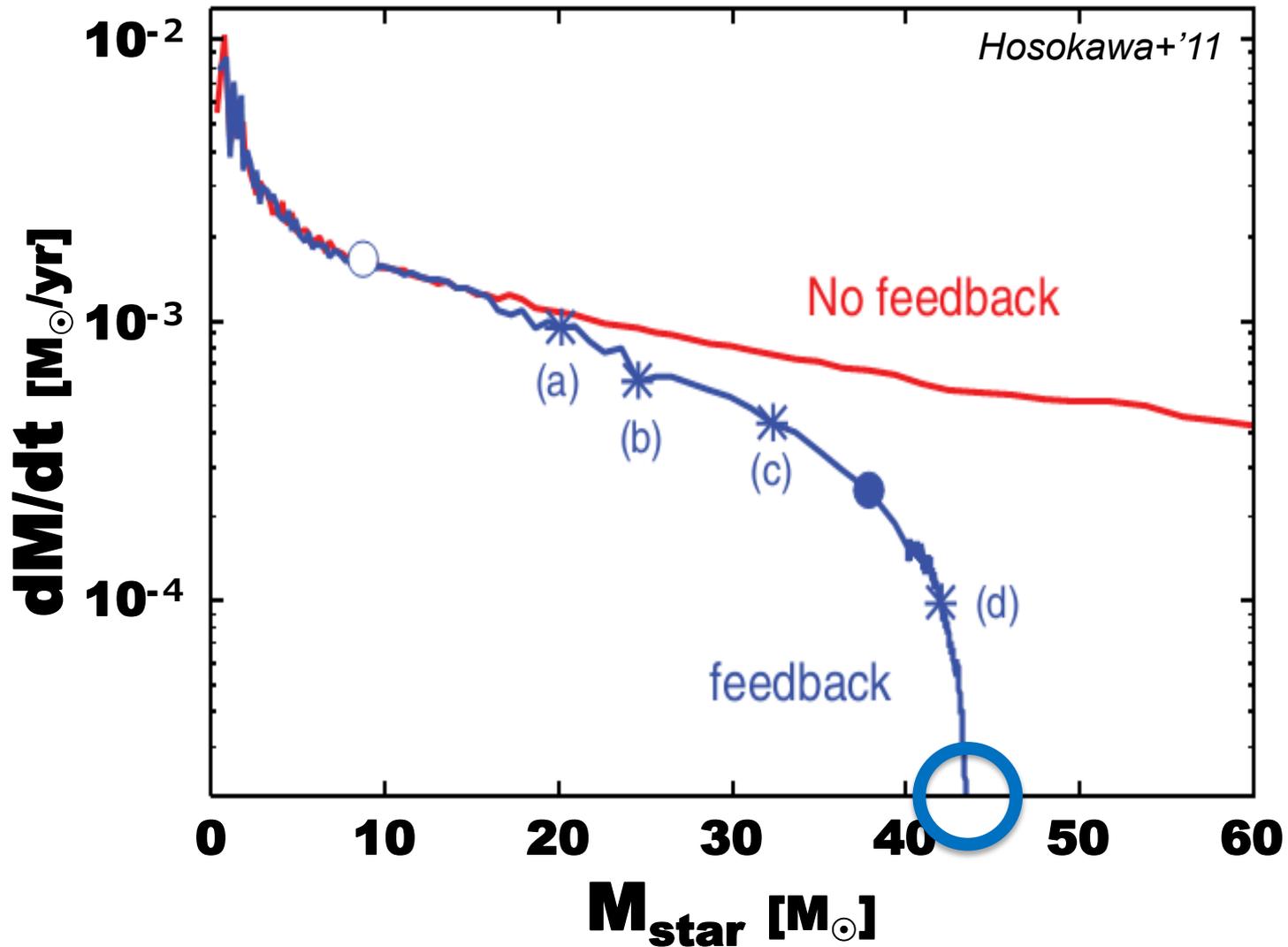
輻射フィードバックによる降着阻害 (McKee&Tan'08)



星形成シミュレーション

大規模
多く

原始
輻射



ア



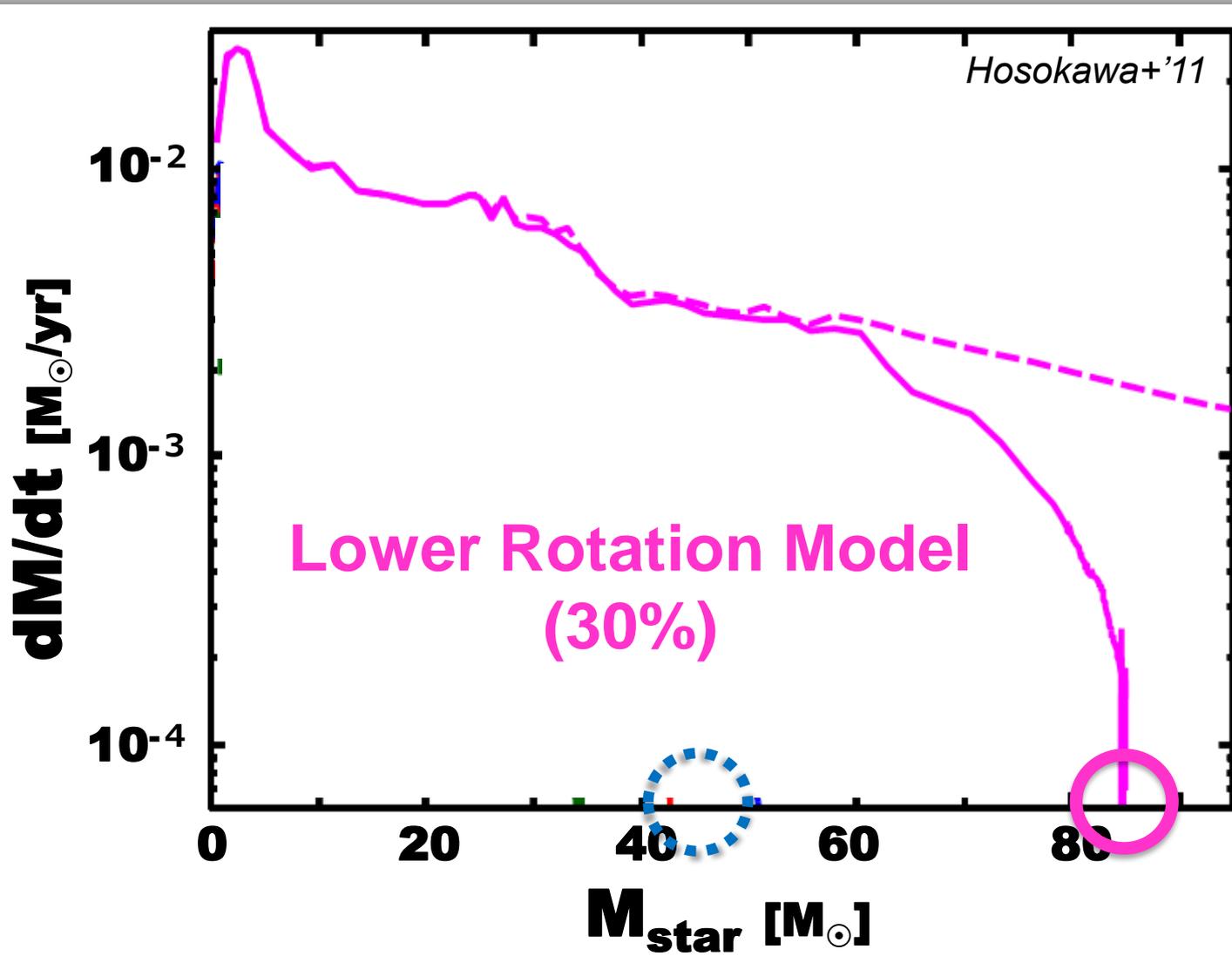
星形成シミュレーション

大規

多く

原始

輻射



ア



2012

星形成過程の多様性

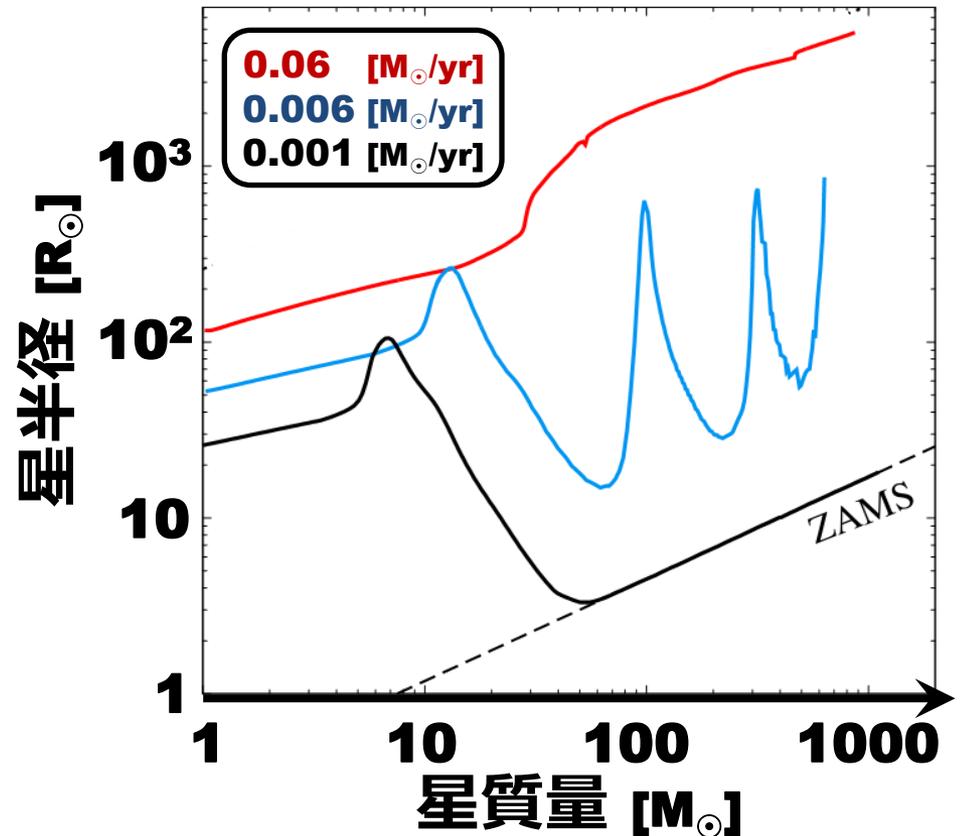
典型的な星質量？

星形成ガス雲の熱進化
に左右される

→ 降着率の大小

原始星進化の質的变化

輻射フィードバックの
効き方に影響



$$\dot{M} > 4 \times 10^{-2} [\text{M}_{\odot}/\text{yr}]$$

超巨星モード

(Hosokawa+'12)

$$\dot{M} > 4 \times 10^{-3} [\text{M}_{\odot}/\text{yr}]$$

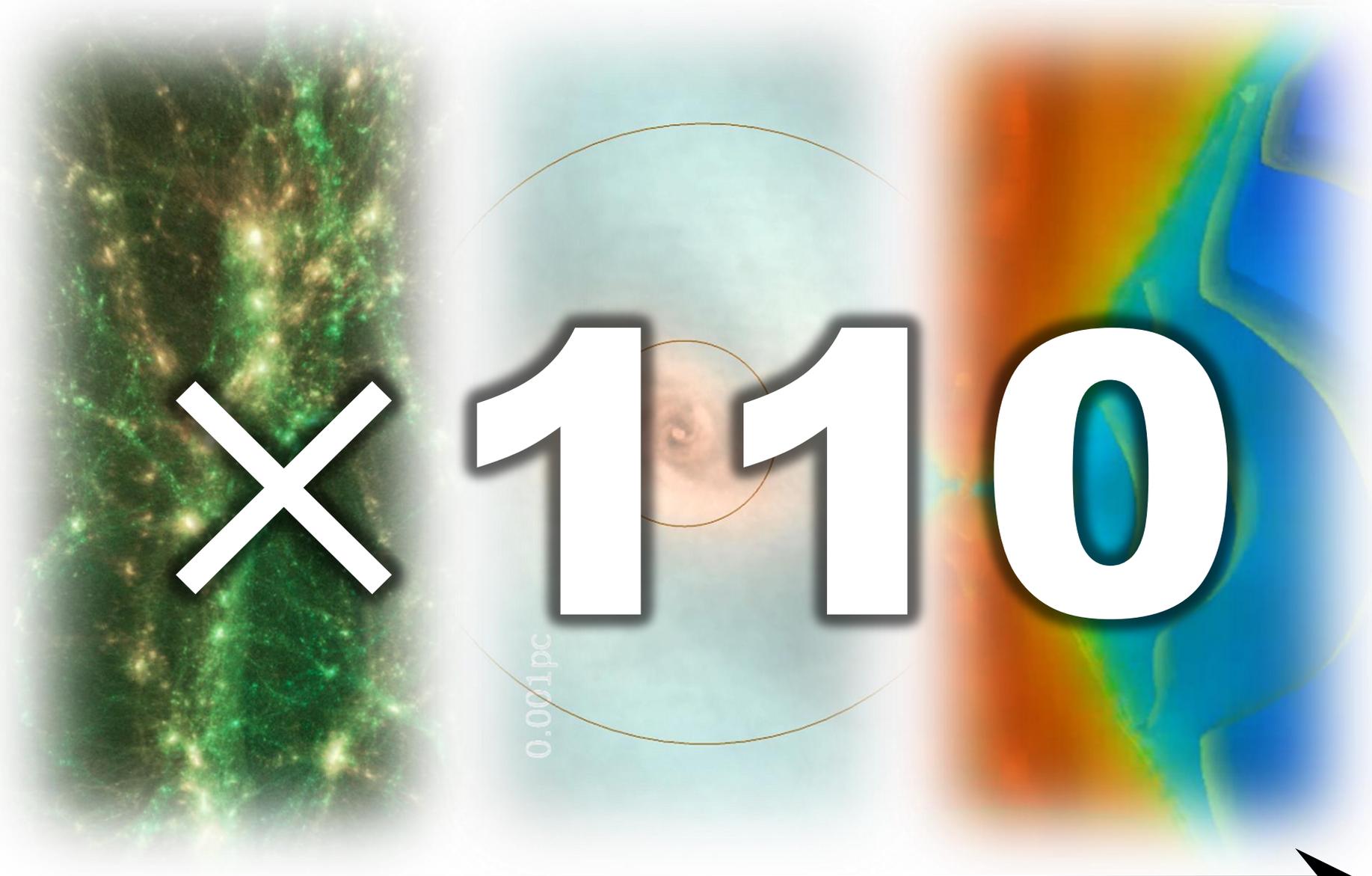
振動モード

(Omukai&Palla'03)

$$\dot{M} < 4 \times 10^{-3} [\text{M}_{\odot}/\text{yr}]$$

KH収縮モード

フィードバックが
働かない



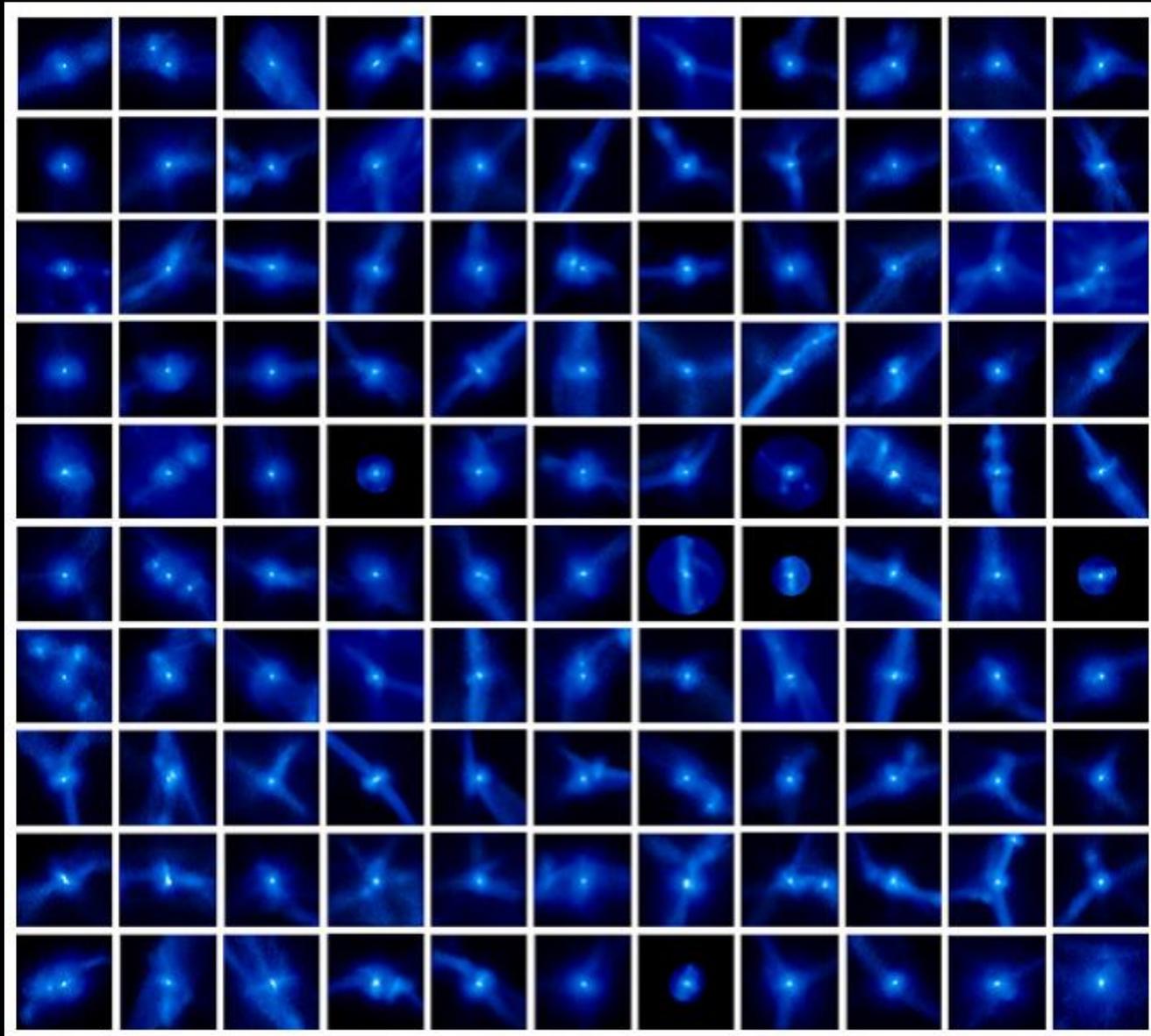
X 110

0.001pc

<p>Gadget-3 (Springel'05) ... N-body / SPH + Primordial Chemistry + Zoom-In + Particle Splitting</p>	<p>Hosokawa+'11,12 ... 2D axisymmetric RHD + Protostellar Evolution</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------

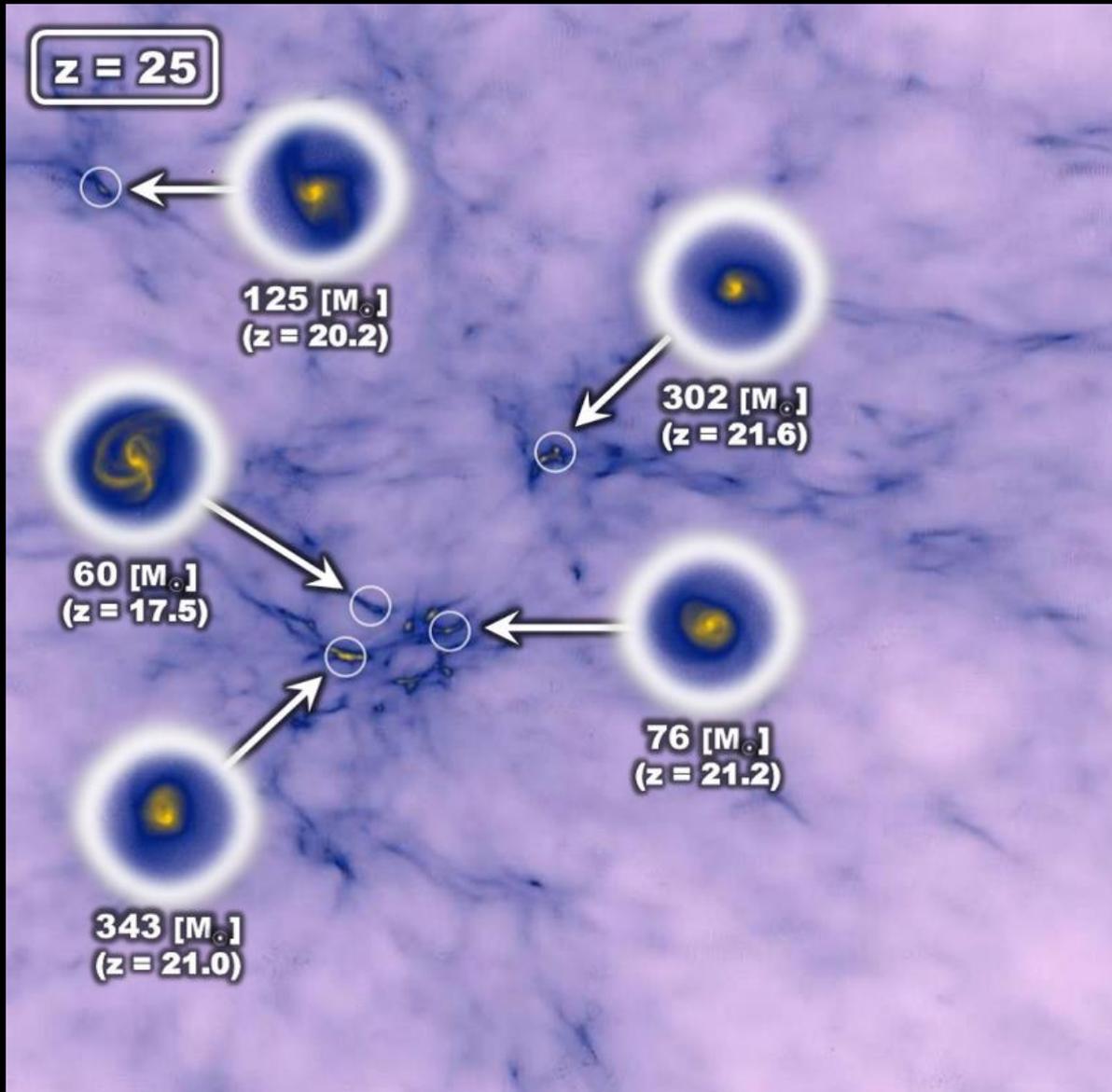
110 Dark Matter Mini-halos

Projected density distributions of DM (500 [pc] on a side)



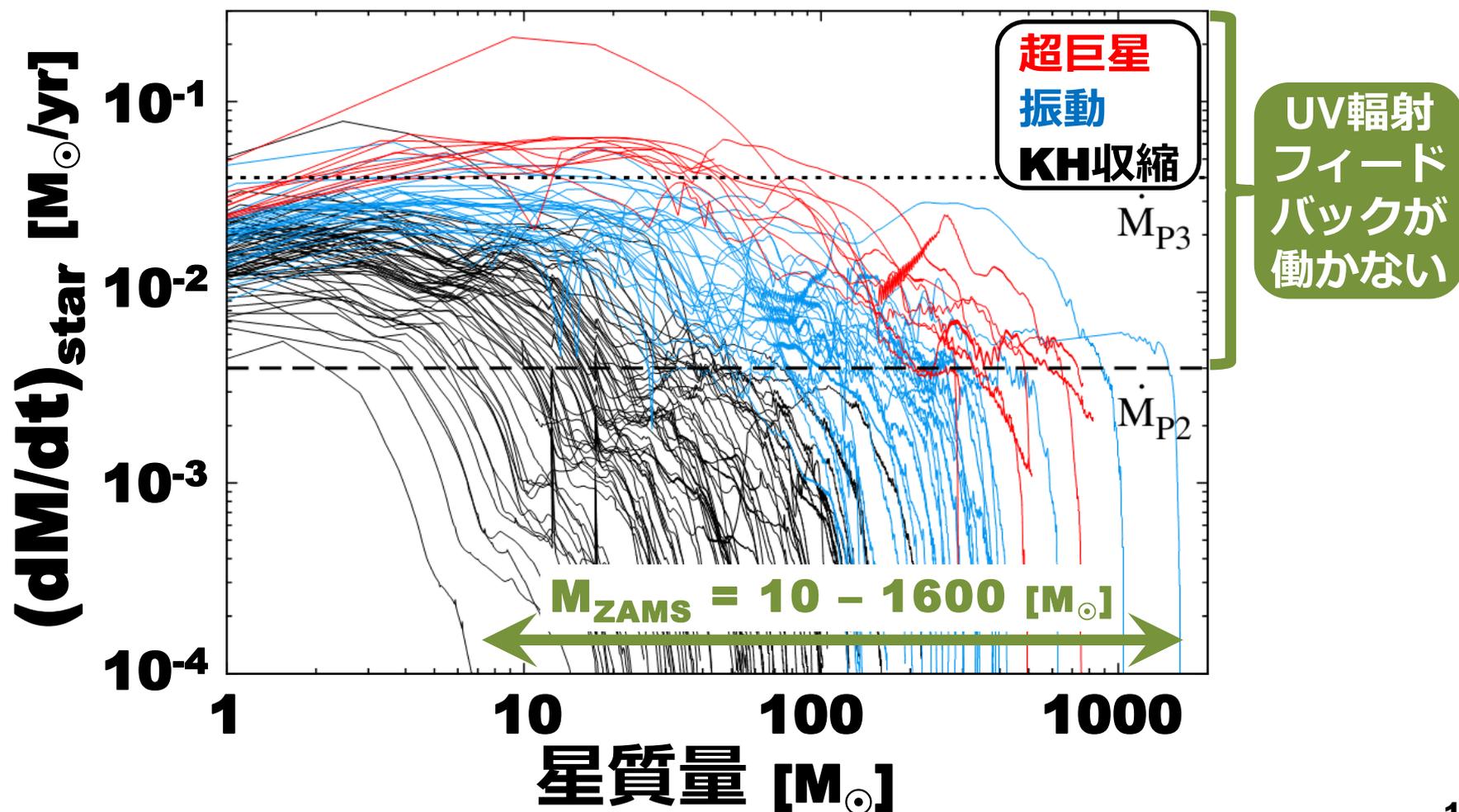
5 / 110 Cases

Projected density distribution of gas (15 [kpc] on a side at $z = 25$)



原始星の降着進化

星形成ガス雲によって大きく異なる



ガス雲の初期状態 ⇔ 星質量

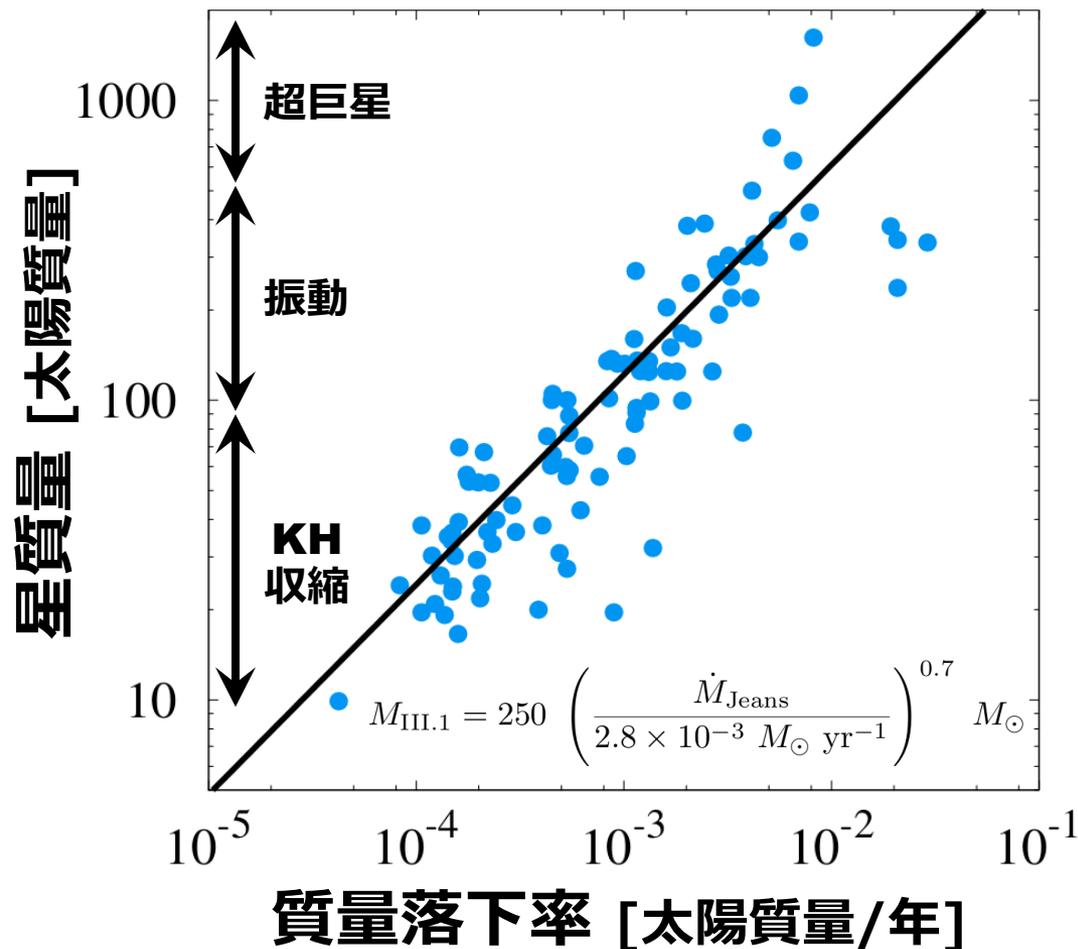
ガス雲の性質と相関

変数：ジーンズ不安定になったガス雲の質量落下率 ($4\pi R^2 \rho v_{\text{rad}}$)

(Minihaloでも相関)

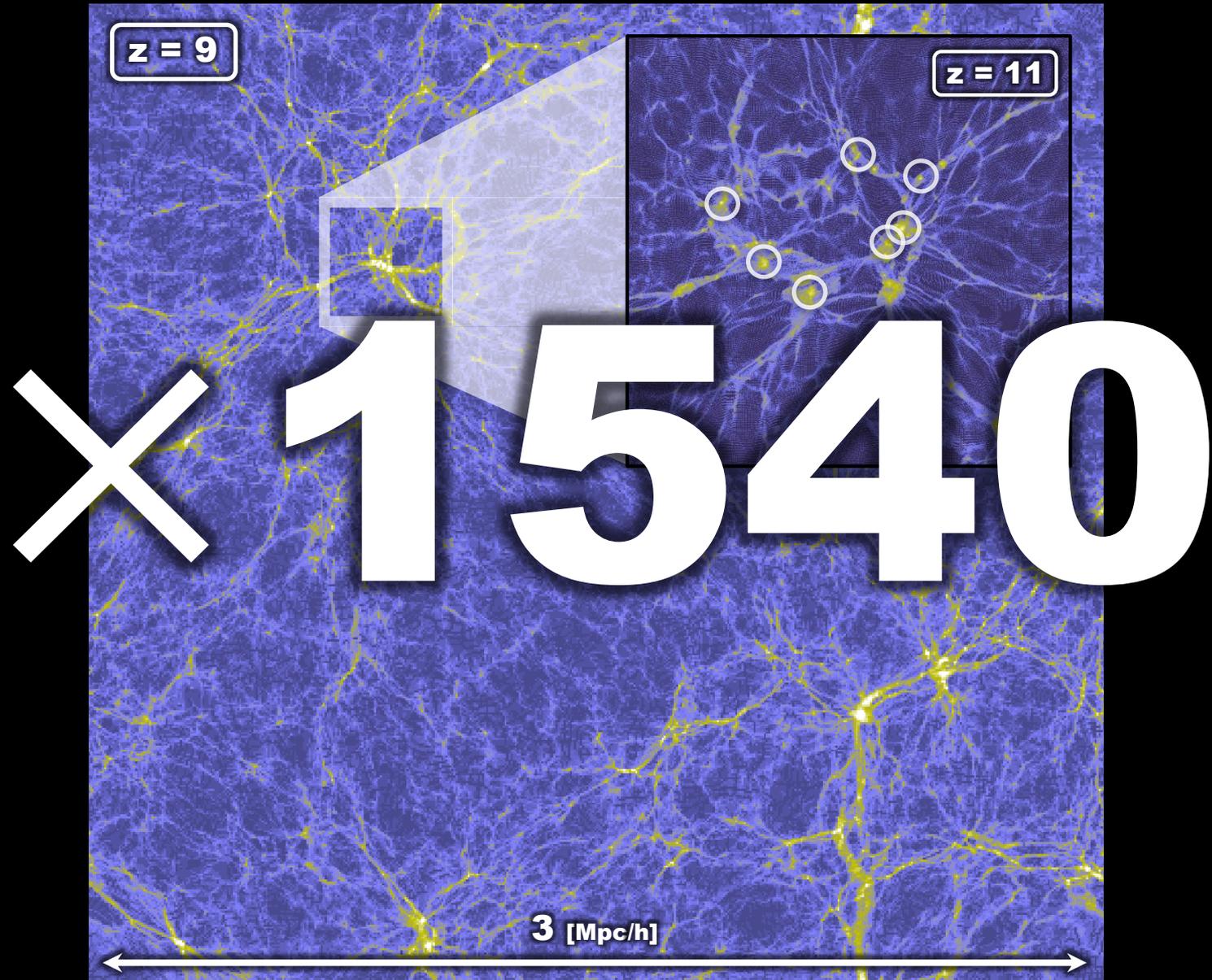
星質量を推定できる

パラメータ分布から星質量分布が決まる



Non-biased Cosmological sample

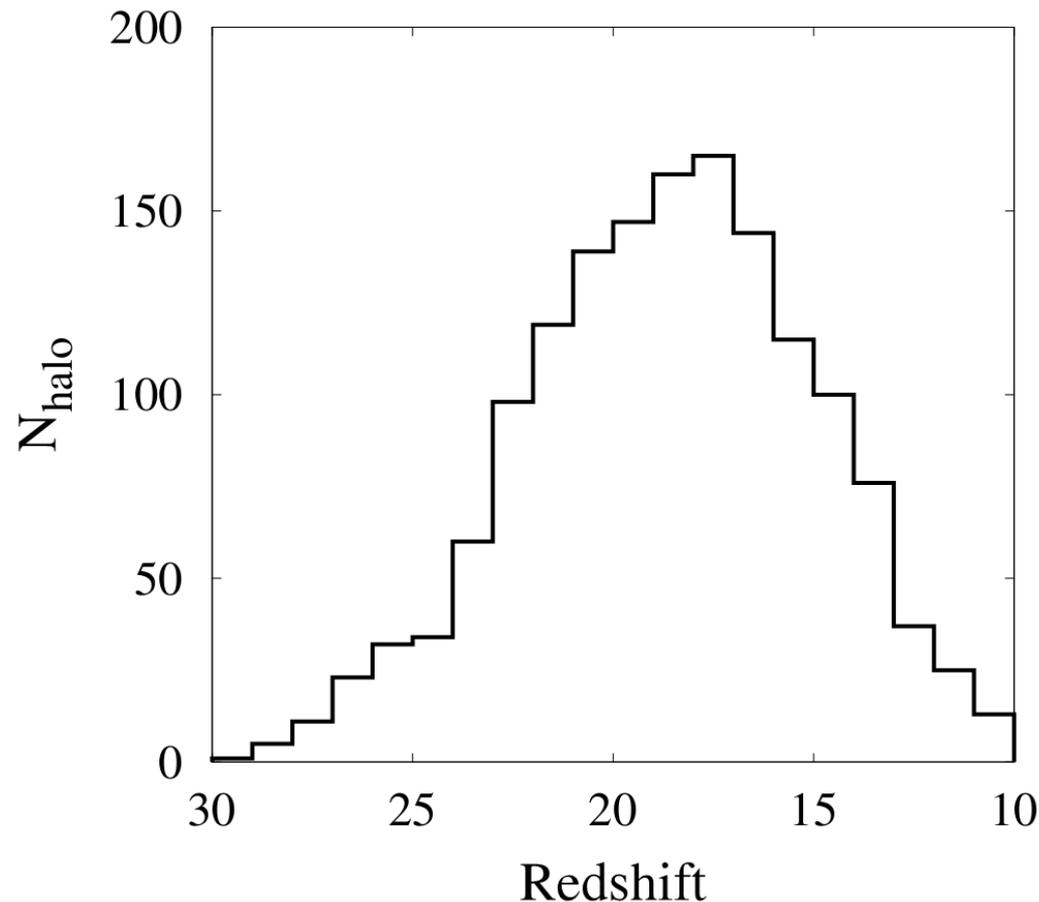
1540 Primordial Star-Forming Gas Cloud



Non-biased 宇宙論的サンプル

平均量・赤方偏移依存性を議論可能

$$z = 30 - 10, M_{\text{vir}} = 2 \times (10^5 - 10^6) [M_{\odot}]$$

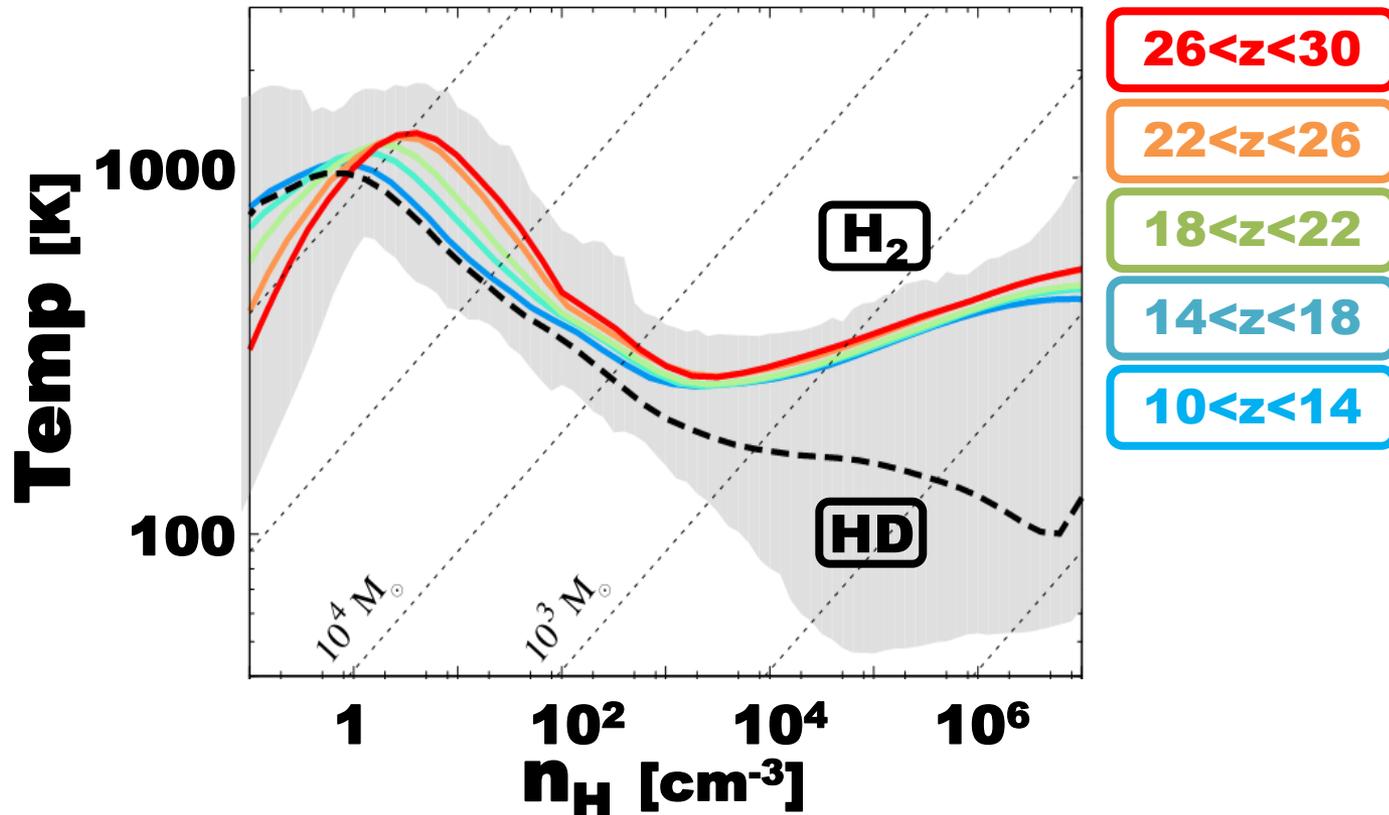


ガス雲の平均的性質

赤方偏移(z)依存性を示す (**high- z** \rightarrow **low- z**)

原始星への降着率は温度に依存 $\dot{M} \sim \frac{M_{Jeans}}{t_{free-fall}} \propto T_{Jeans}^{1.5}$

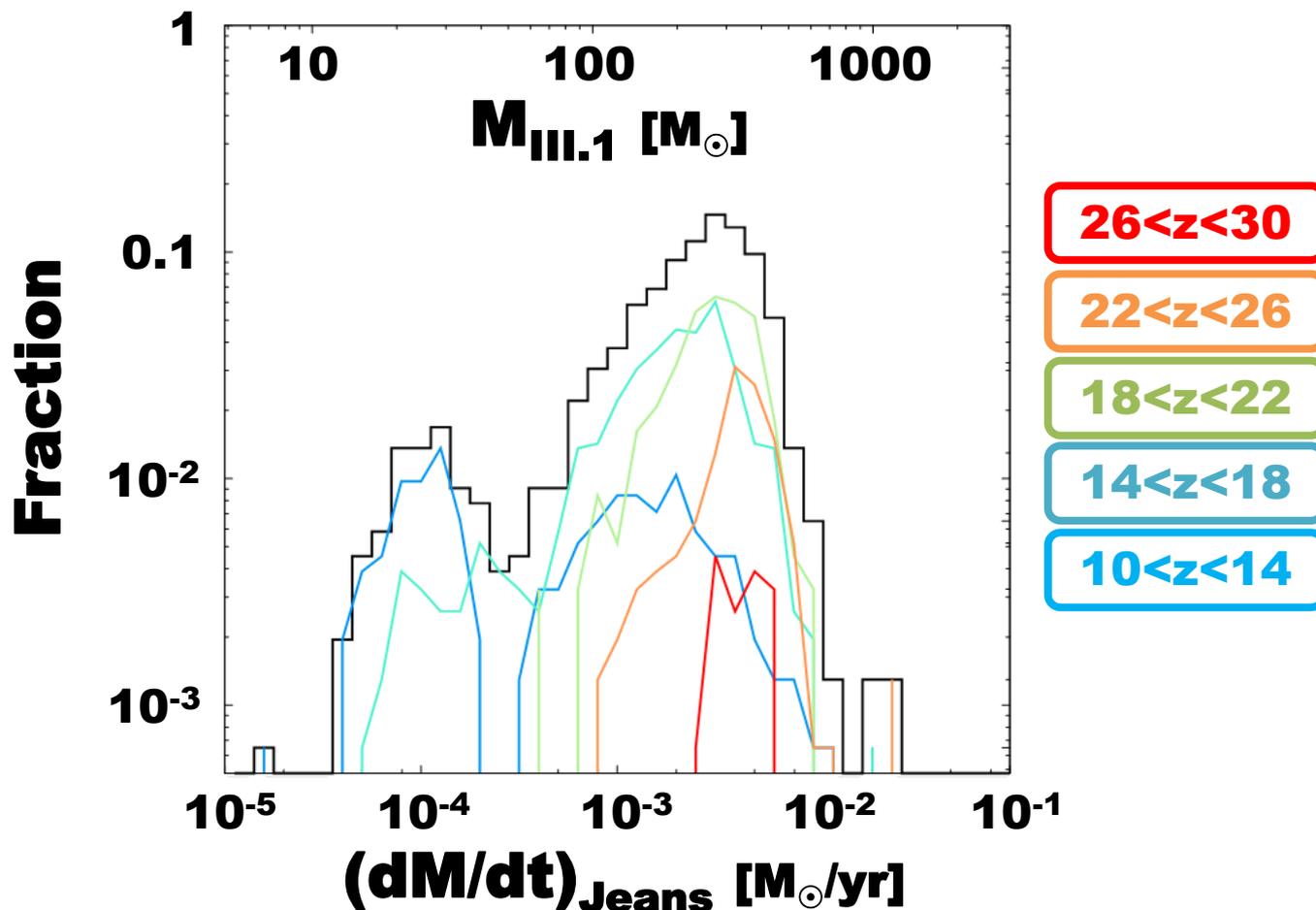
HD冷却が効くと更に低温 (black)



ガス雲パラメータ分布

$$(4\pi R^2 \rho v_{\text{rad}})_{\text{Jeans}} \rightarrow M_{\text{III.1}} = 250 \left(\frac{\dot{M}_{\text{Jeans}}}{2.8 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}} \right)^{0.7} M_{\odot}$$

ピーク値が存在し、low-zほど小さい (赤→青)



Pop III星のsub-populations

Pop III.2星

化学的には第1世代、
外部輻射がガス雲を
変性 (解離/電離/...)

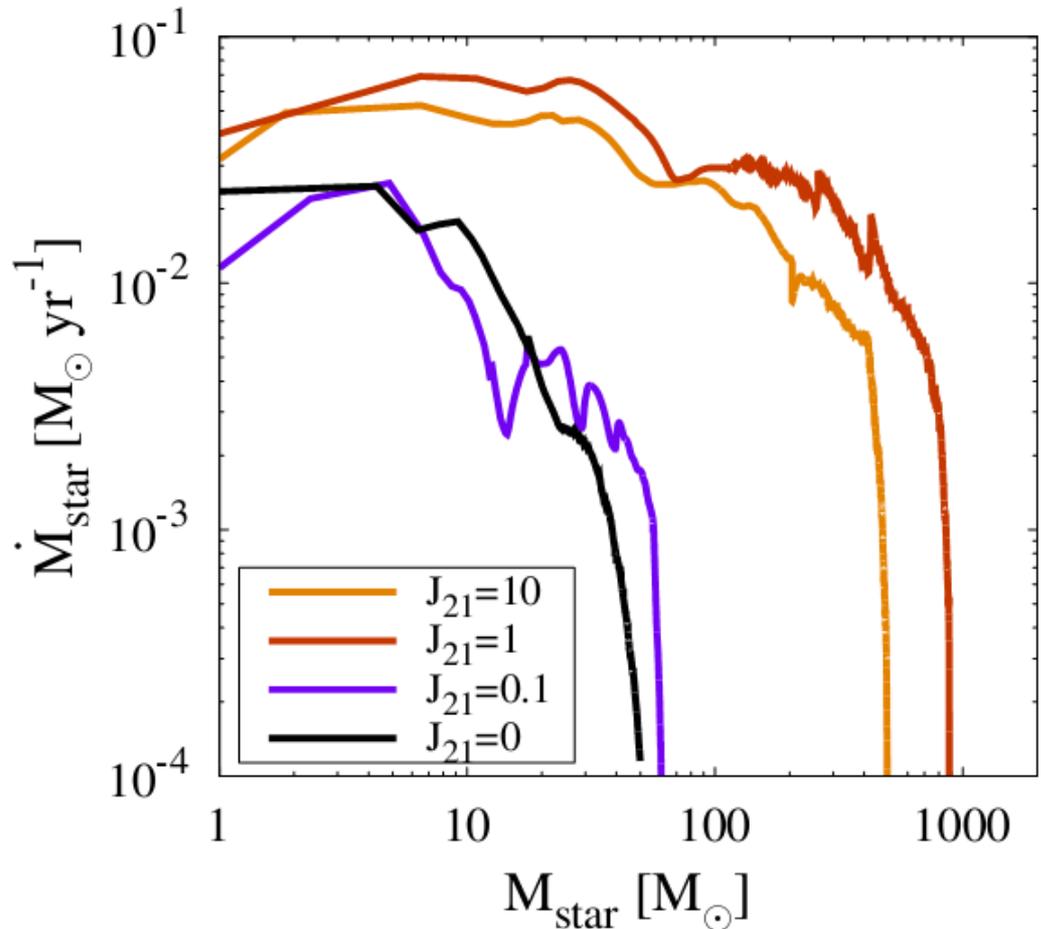
→ 冷却源である

H_2 組成が増減

星質量分布に影響

特に大質量側に注目

→ H_2 解離 (**Pop III.2_D**)



水素分子が解離

→ 高温進化・高降着率・大質量星

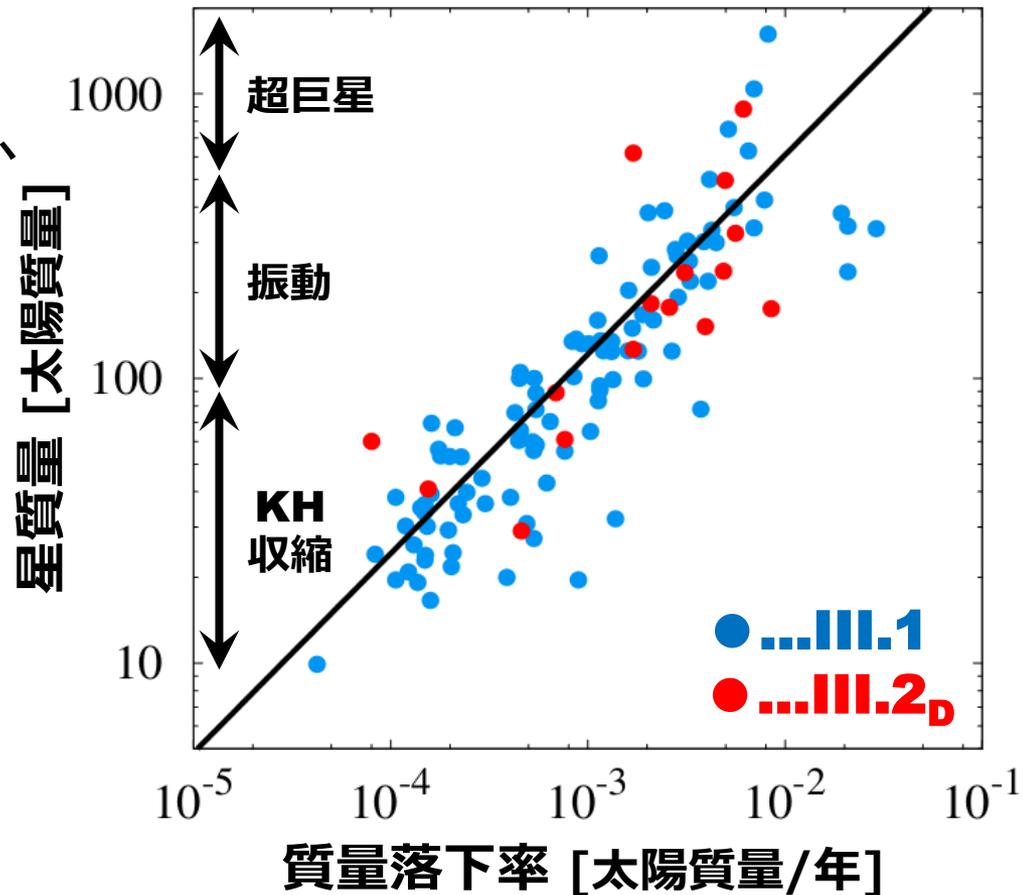
ガス雲の性質 ⇔ 始原星質量

III.1と同じ相関

重力収縮が進みガス雲が光学的に厚くなると、輻射の影響はなくなる (自己遮蔽効果)

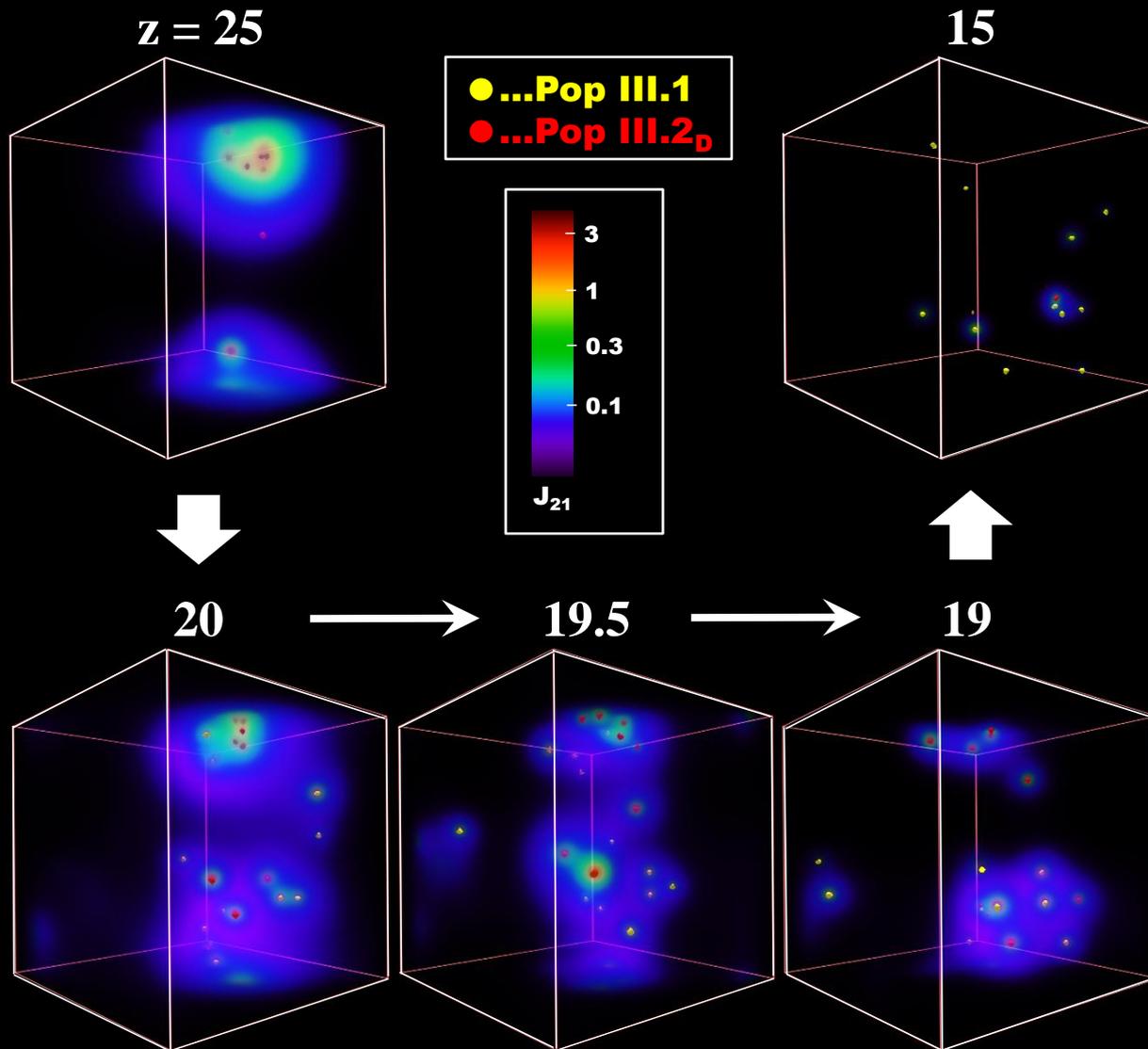
始原星の質量分布

宇宙論的サンプルを III.1 & III.2_D 星形成ガス雲に分類 ($J_{21, \text{crit}} = 0.1$)



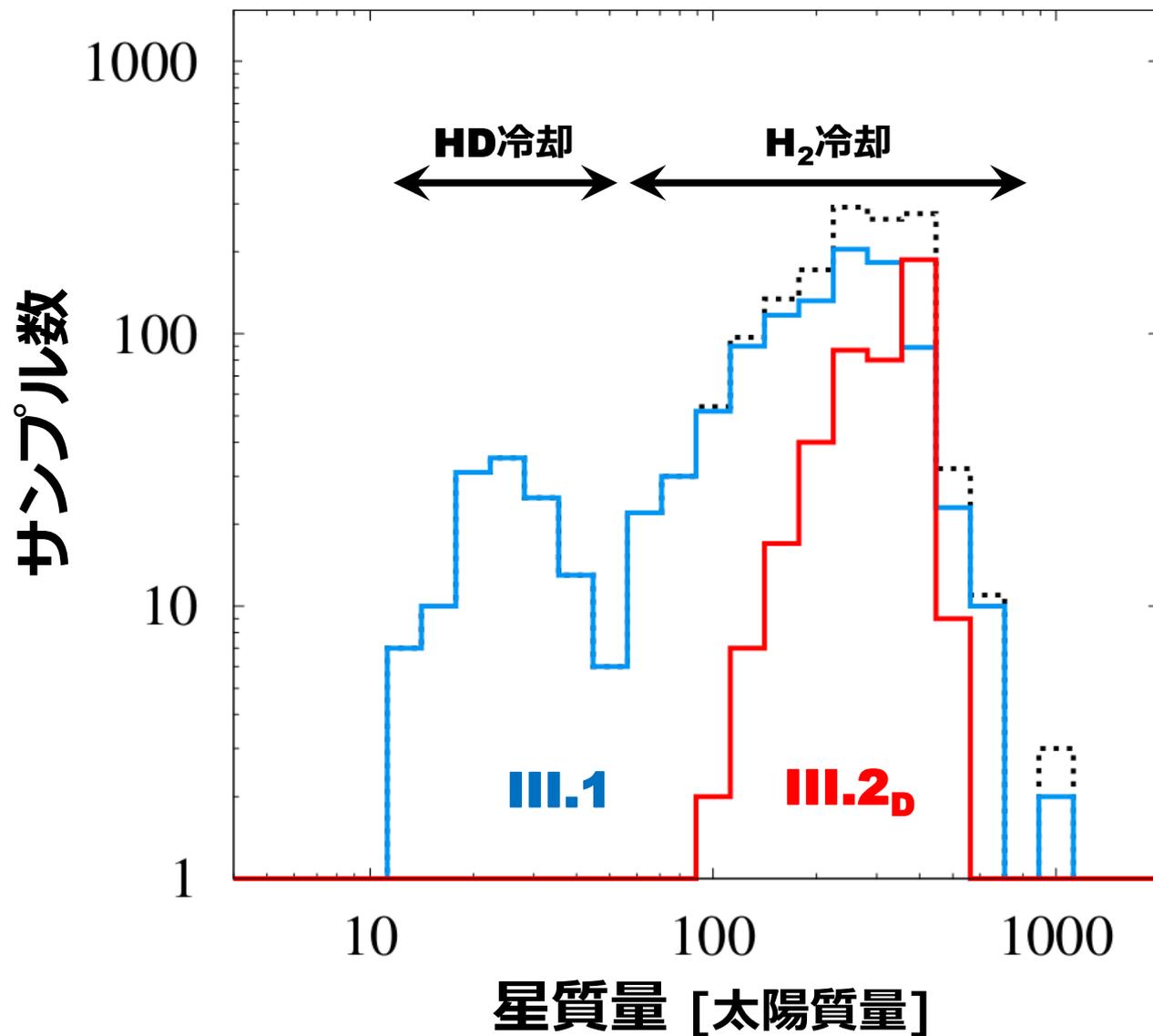
Time Evolution of the Local FUV Intensity

$L_{\text{box}} = 3$ [cMpc/h], Stellar Properties (Schaerer'02)



数值計算・可視化: SH

始原星の質量分布



まとめ

『始原星の質量分布』

典型値が存在し、**高赤方偏移ほど大質量**

→ high-/low-zで宇宙進化に及ぼす影響が異なる

『宇宙初期における星形成の多様性』

幅広い星質量分布の原因

- 形成環境 : Pop III.1, III.2_D
- 冷却過程 : H₂ and/or HD
- 原始星進化 : KH収縮 / 振動 / 超巨星

初期状態 – 星質量相関

大変な計算をスキップ → 準解析計算に使える