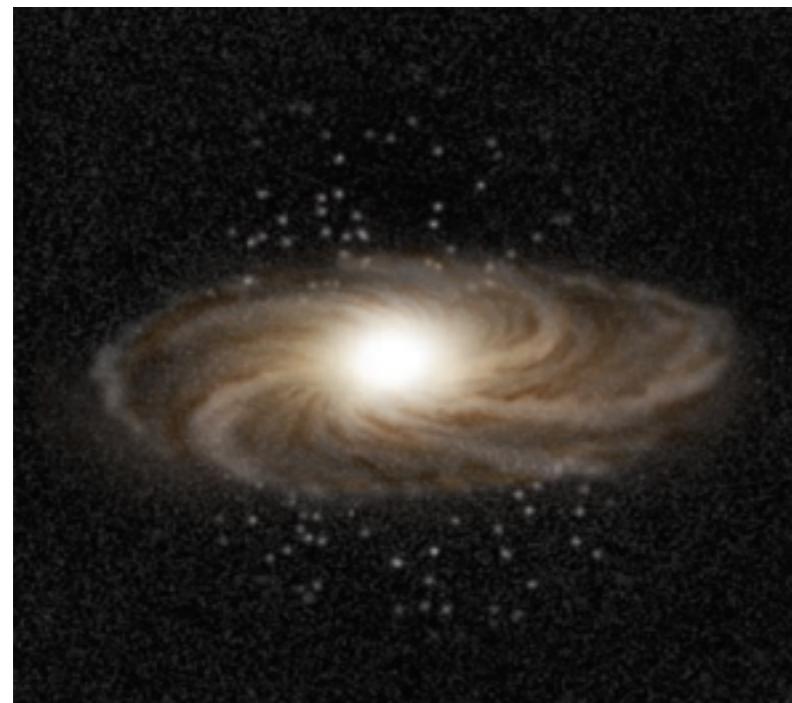


3次元輻射流体計算による非等方背景輻射場中の 球状星団形成過程の研究

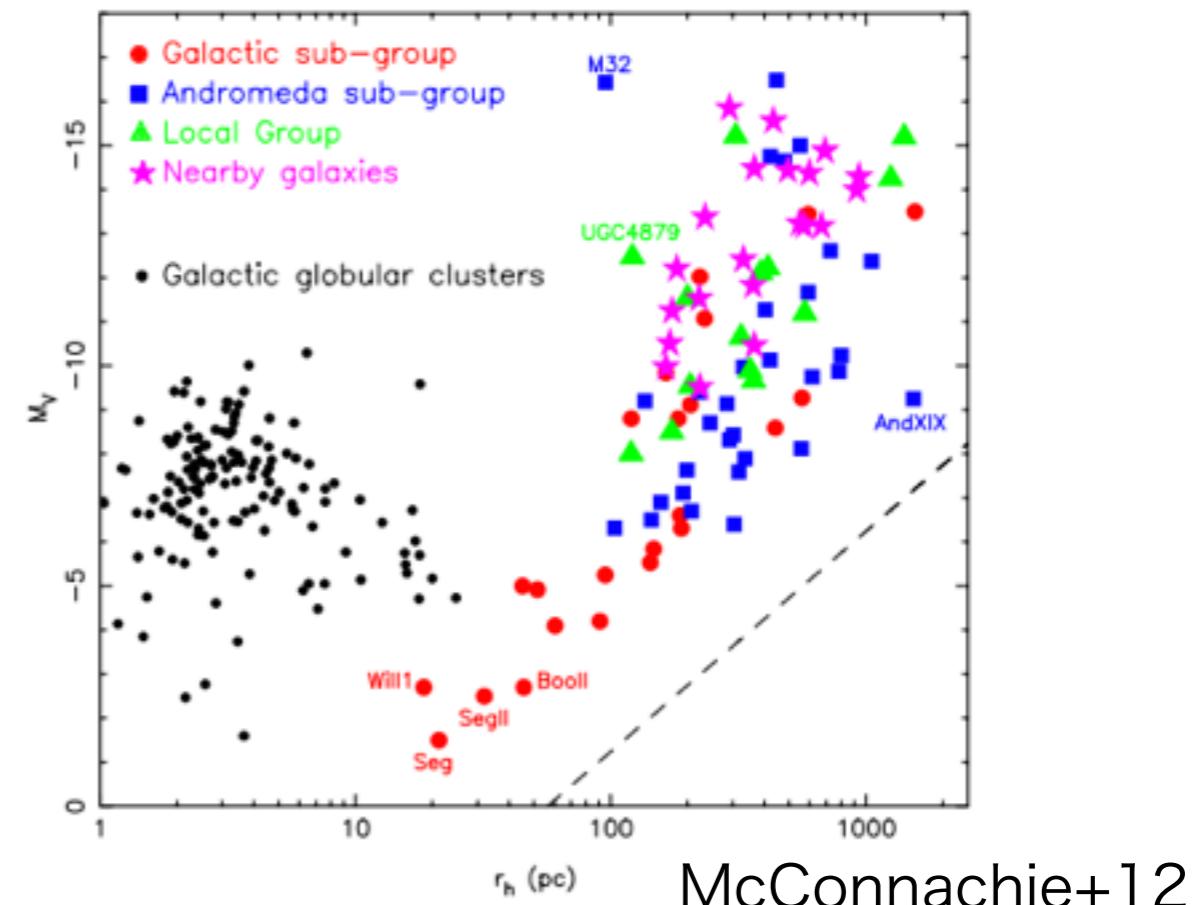
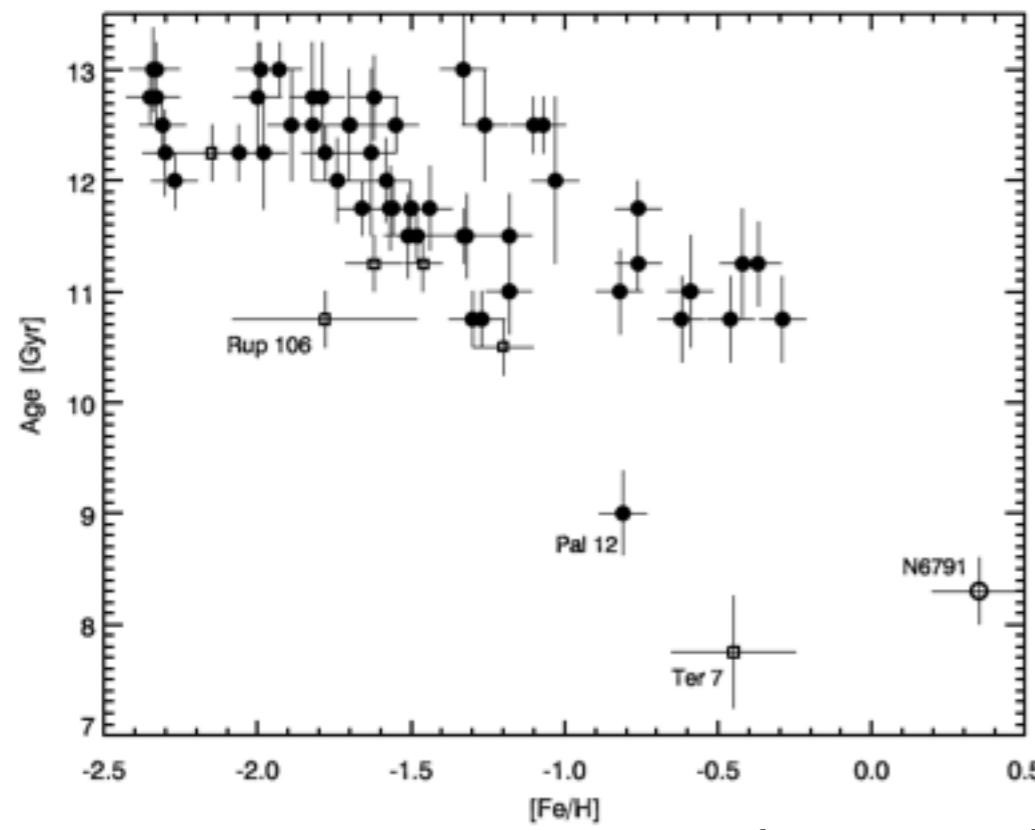
安部牧人（筑波大学）

共同研究者：梅村雅之（筑波大学）、長谷川賢二（名古屋大学）

Introduction

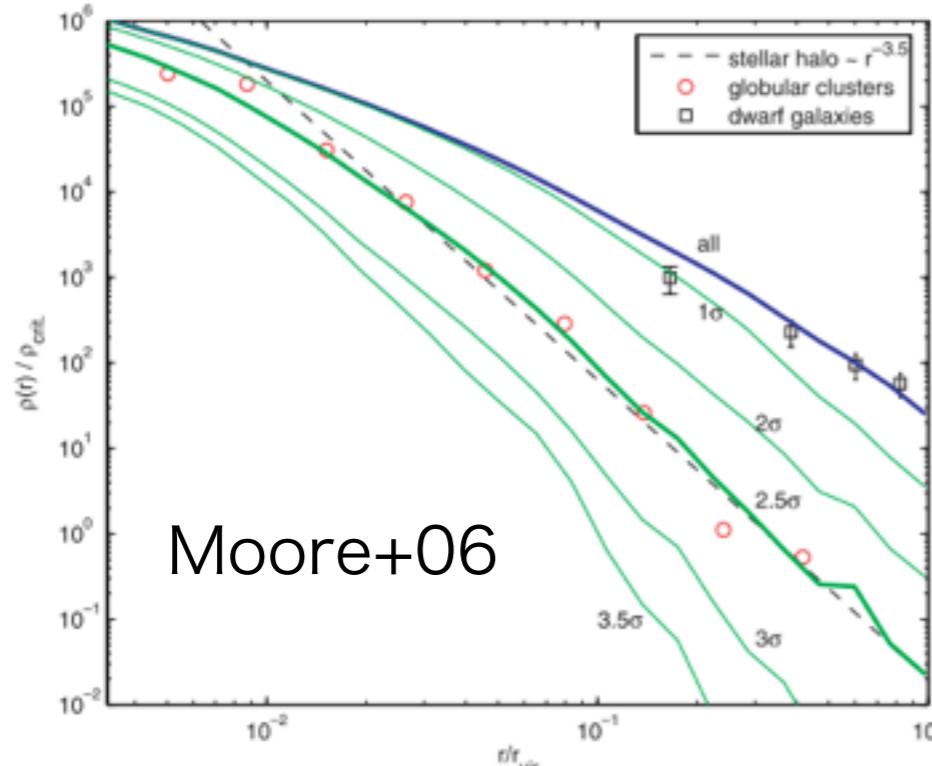


概念図 (Krauss&Chaboyer 2003) • Number in the Galaxy = 157 (Harris 1996)

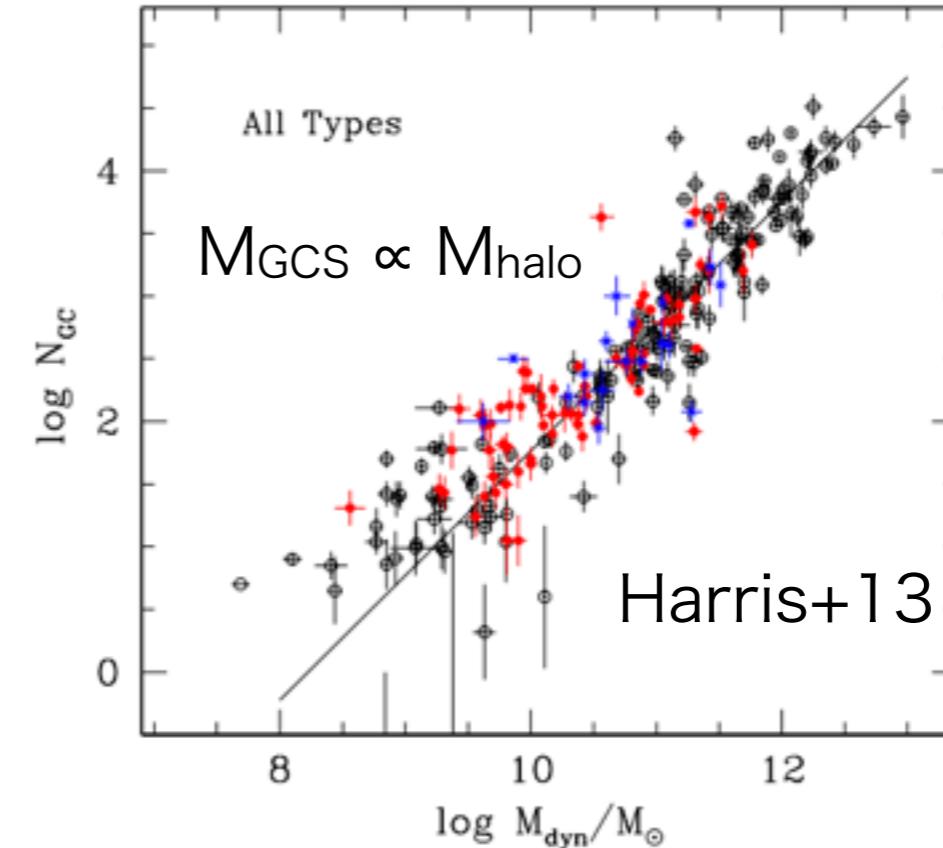


階層的構造形成の初期段階での形成

- Moore+06、Diemand+06
 - 宇宙論的N体計算により、sub-haloの現在のradial分布を予言
→ 2.5σ のdensity peakのradial distributionが球状星団と一致
 - ある σ のdensity peakについて、 $z=0$ でのhost halo中に含まれる存在量はhost massに依らず一定となる
→ host中に存在する球状星団の全質量は、hostの質量に依らず一定？
- 観測的に、球状星団の全質量はhostの質量と形態に依らず一定(Harris+13)



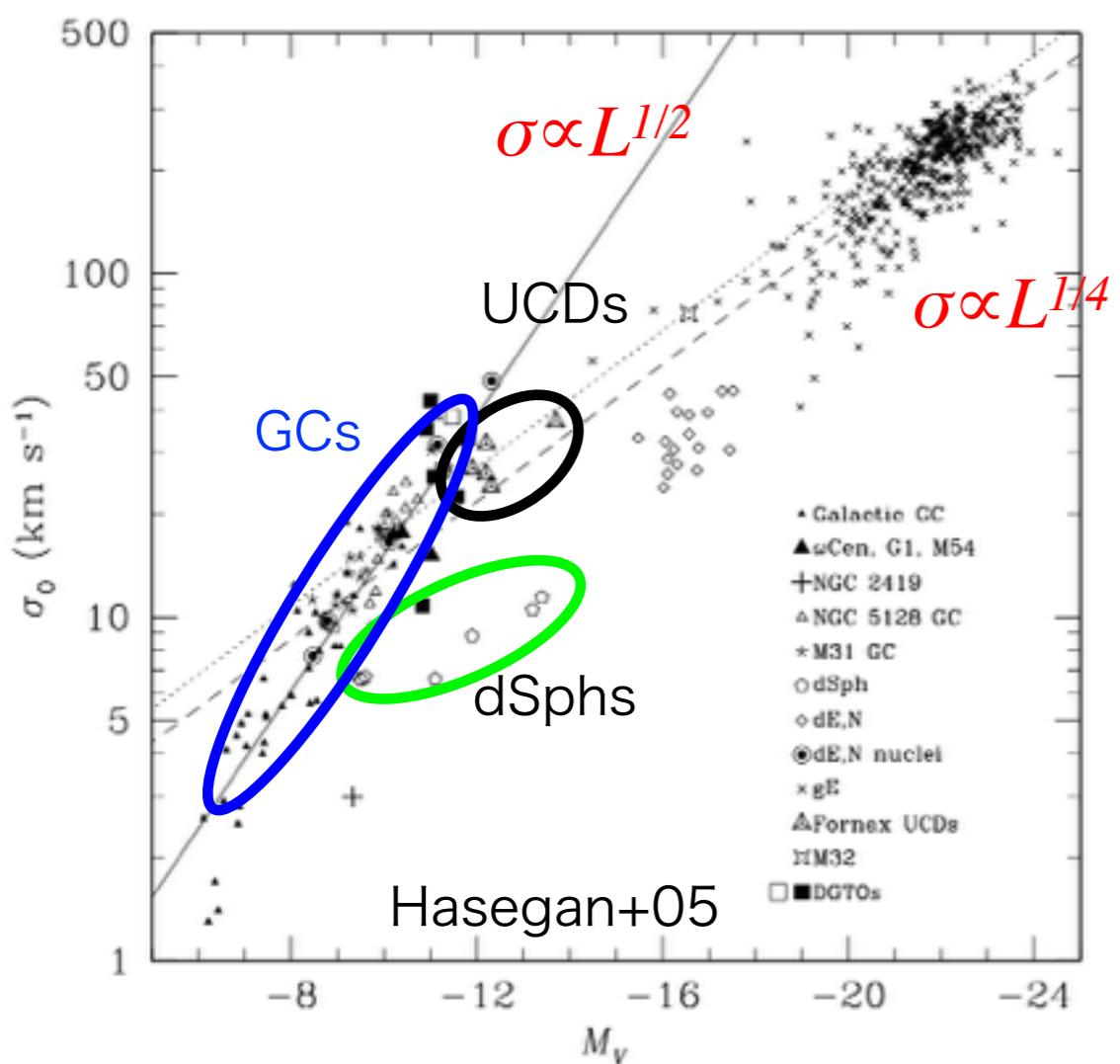
Moore+06



Harris+13

速度分散-光度関係

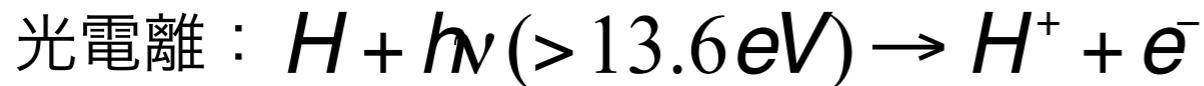
- ・ 球状星団や矮小銀河は、宇宙初期の星形成活動の名残
- ・ GCはdSphsといった低質量天体としばしば比較されるが、異なる速度分散-光度関係を示す



- ・ 速度分散-光度関係
- 球状星団 $\sigma \propto L^{1/2}$ 楕円銀河 $\sigma \propto L^{1/4}$
- 宇宙再電離期
 - ・ 再電離期 $z_r > 6$ (e.g., Fan+06, Ouchi+07)
 - ・ 多くの球状星団は背景輻射の影響を受けながら形成されたことが予想される
 - ・ 初期天体からの輻射の影響を考慮して、球状星団の高い速度分散を説明できないか？

紫外線フィードバック

(i) 光電離過程による加熱



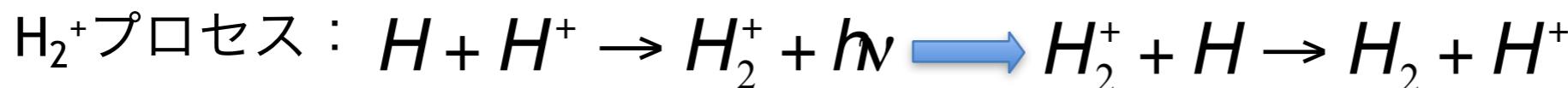
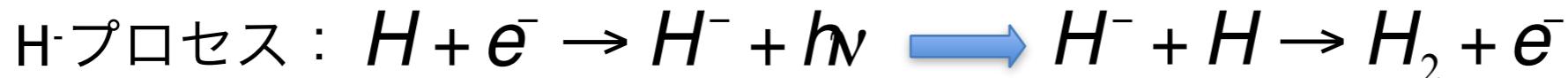
紫外線のエネルギーと電離に使われたエネルギーの差がガスに渡る
→ 加熱過程、ガス温度は~ 10^4 K まで上昇

$M_J (T \sim 10^4 \text{ K})$ 以下の質量のガスは収縮できなくなる

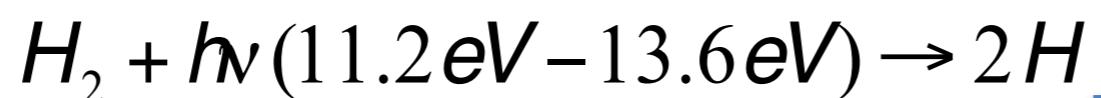
(ii) 冷却材の破壊

水素分子：金属量の少ない宇宙初期での主要な冷却材($T < 10^4 \text{ K}$)

- ・ 水素分子形成プロセス



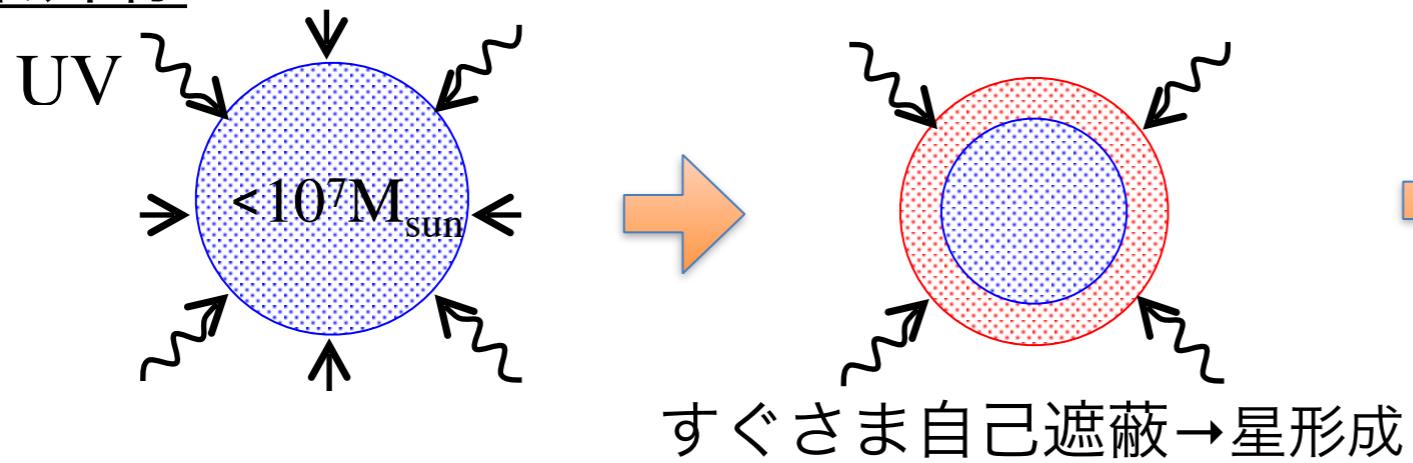
- ・ 水素分子形成にマイナスのプロセス(輻射過程)



H_2 や H_2^+ 形成に必要な触媒は
輻射過程で破壊される

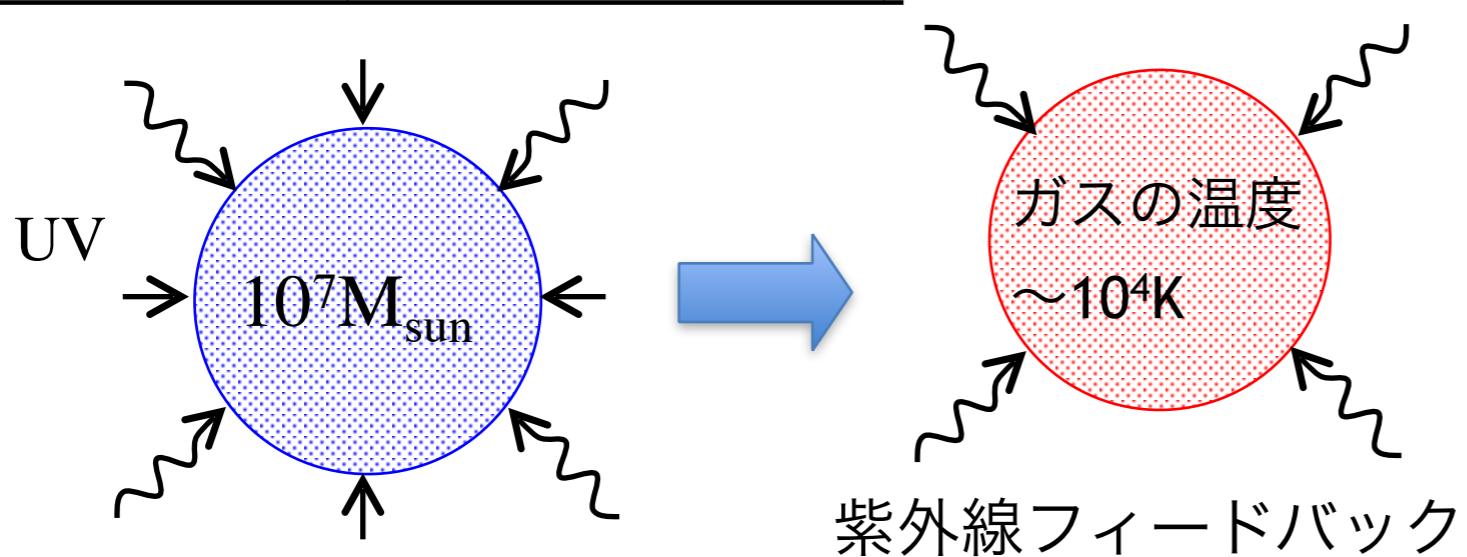
紫外線輻射場中の天体形成

弱い紫外線



形成される星団は
コンパクトにならない

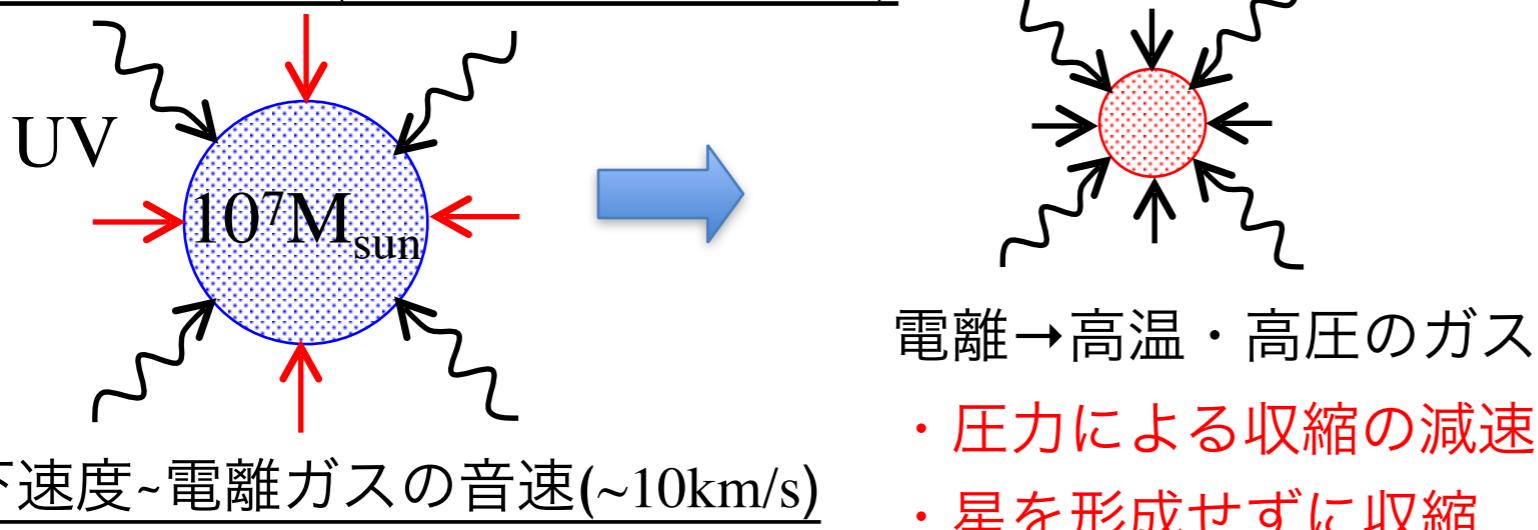
強い紫外線-1(早い時期に照射)



膨張

天体形成されない

強い紫外線-2(遅い時期に照射)

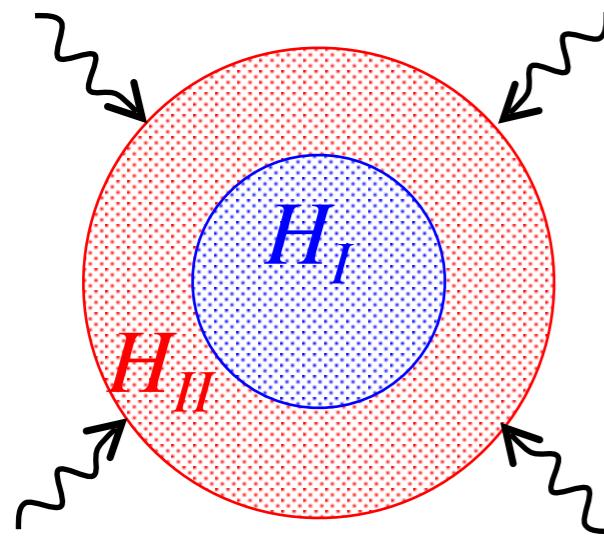


- 紫外線を遮断して冷却、星形成

→コンパクトな星団を形成できる

(Hasegawa+2009、1次元球対称)

背景輻射場中の星形成：自己遮蔽効果による星形成



中性のガス → 紫外線により電離($T \sim 10^4\text{K}$)



電離されたガス → 一定の割合で再結合

- 基底状態へ再結合 → 水素を再び電離
- 励起状態へ再結合 → ガス雲から逃げて行く



自己遮蔽効果($T < 10^4\text{K}$)

遮蔽条件：単位時間当たりの入射UV光子数(表面積) = ガス雲の再結合率(体積)

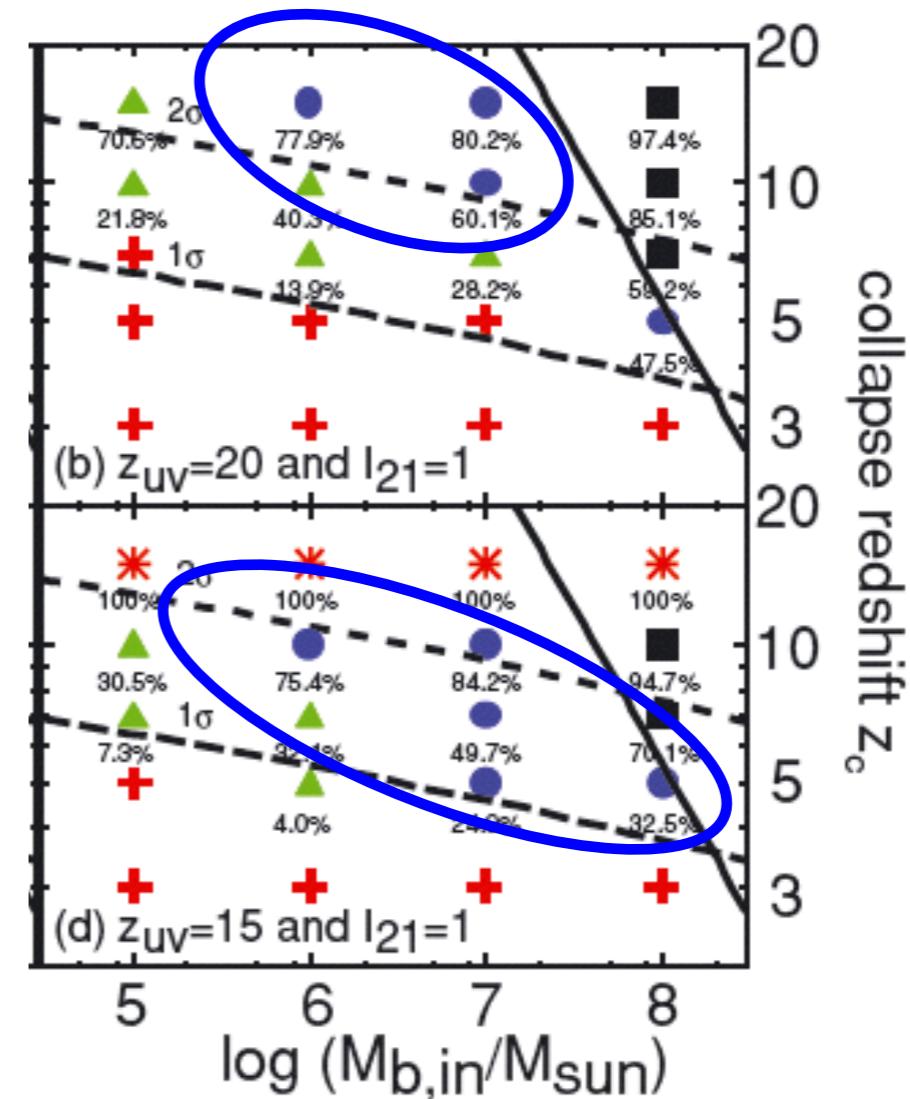
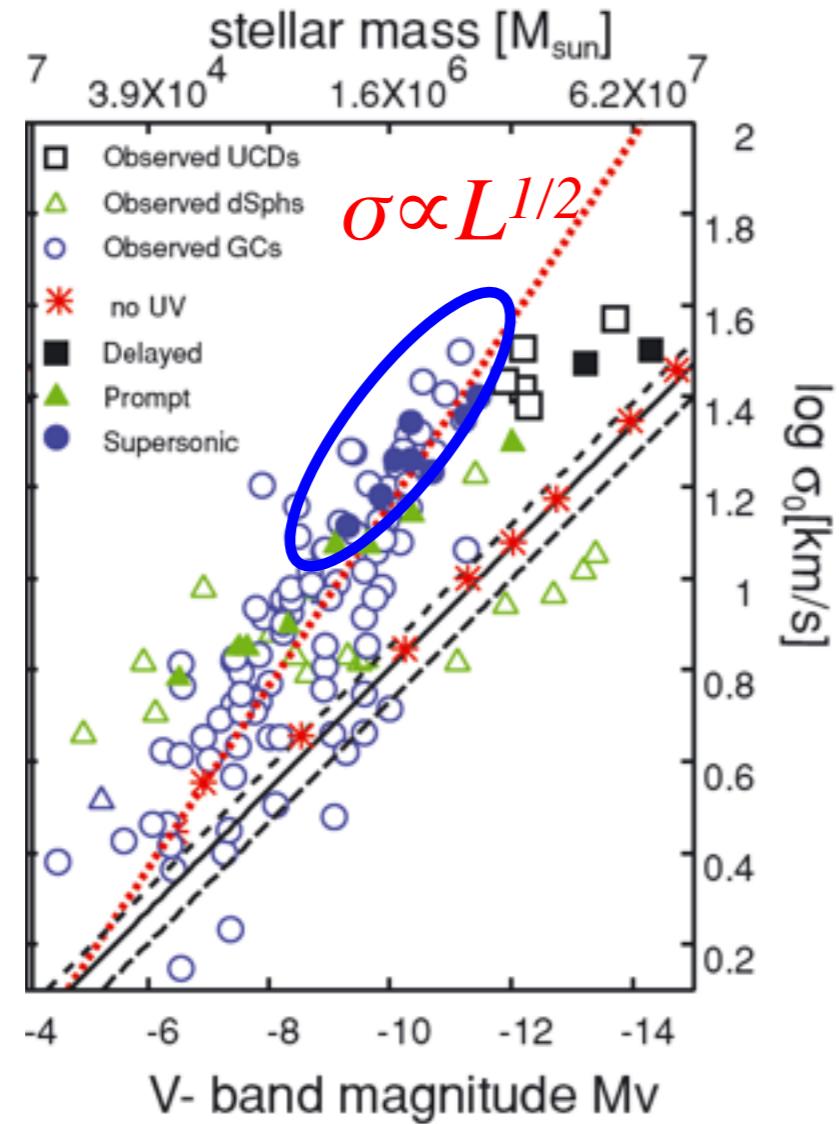
電離される体積 V_{HII} は以下のように決まる(Madau+’99)

$$\dot{N}_{\text{UV}} = \langle n \rangle^2 \alpha_B C V_{\text{H}_{\text{II}}}$$

\dot{N}_{UV} : 単位時間当たりのUV光子数
 n : 平均数密度
 α_B : 再結合係数 $2.59 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ ($T=10^4\text{K}$)
 C : clumping factor

ガス雲全体を電離するUV光子数は $\dot{N}_{\text{crit}} = \langle n \rangle^2 \alpha_B C V_{\text{gas}}$

紫外線輻射場中の球状星団形成（1次元球対称）



(Hasegawa et al. 2009、1次元球対称計算)

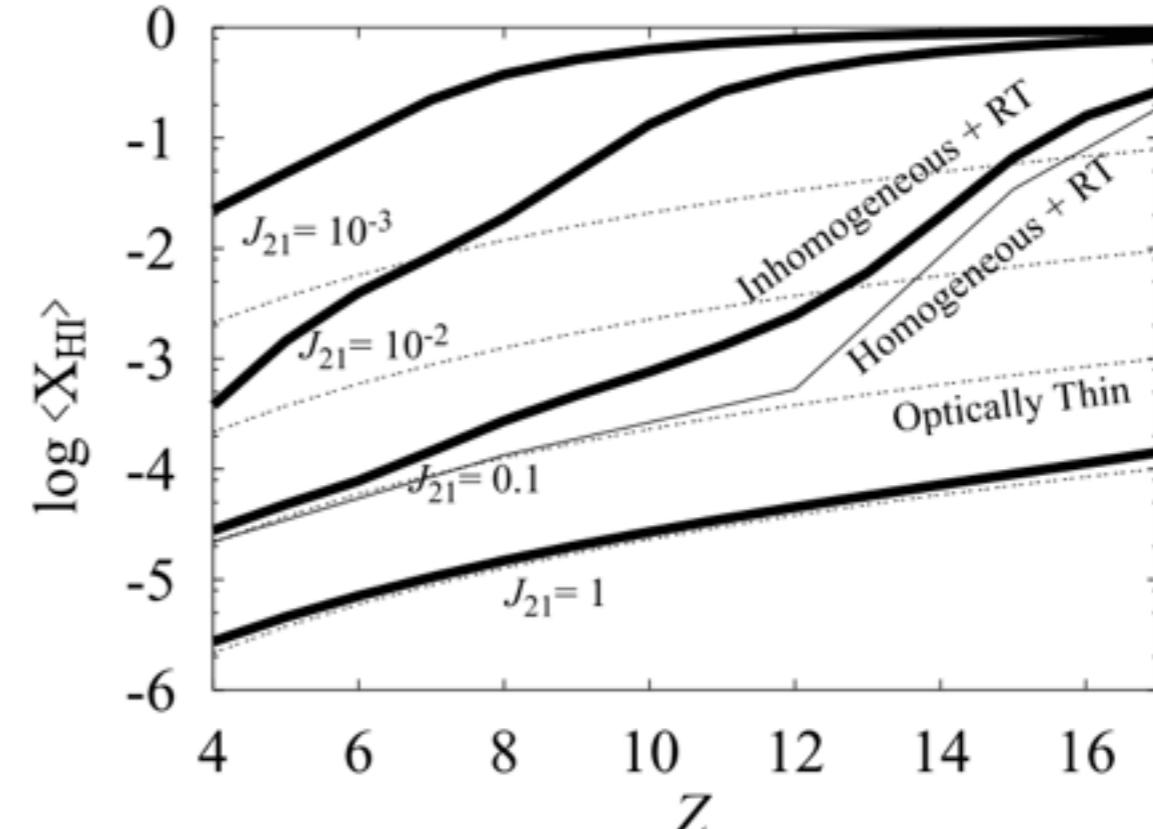
- 1D計算
 - supersonic infall → 球状星団のようなコンパクトな星団が形成可能
 - Λ CDM宇宙論において、 1σ 以上の密度ゆらぎから球状星団が形成される可能性
- 3次元非等方輻射場でも、同様にコンパクトな星団は形成されるか

輻射の3次元的効果

- 3次元的な密度の非一様性

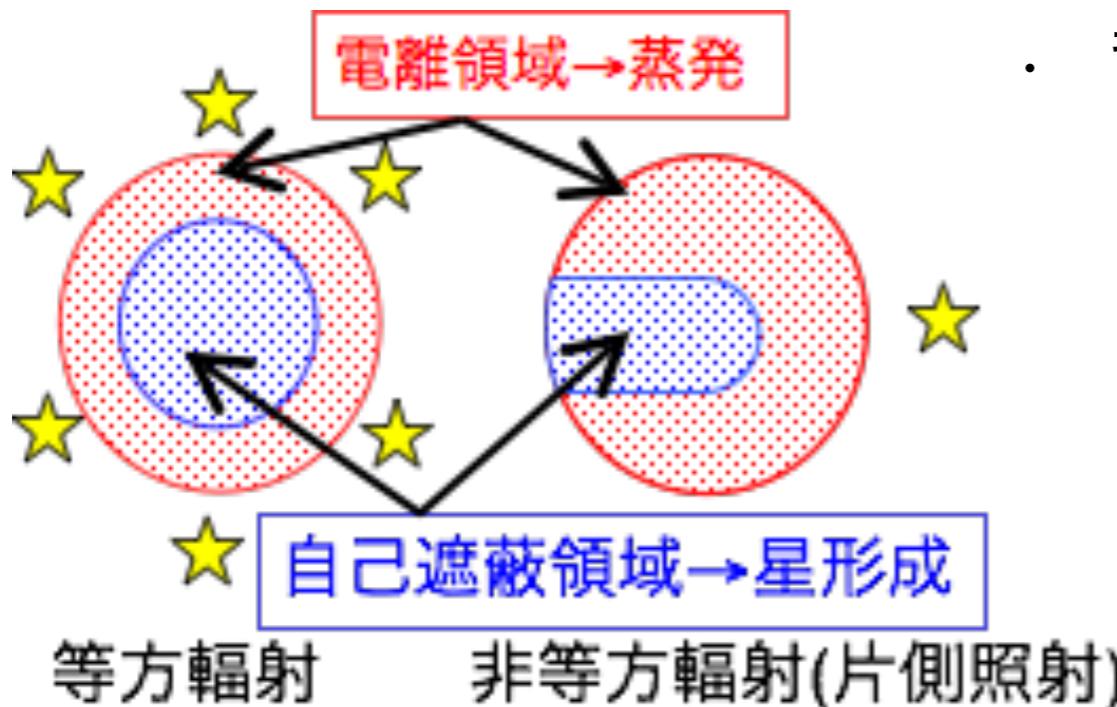
- 再結合率 $\propto C = \langle n^2 \rangle / \langle n \rangle^2$

- ガス密度の非一様性は、遮蔽効果に重要



ex.) 密度場の非一様性による電離史の違い(Nakamoto+01)

- 日陰効果



- 背景輻射場が非等方的な場合、自己遮蔽領域も非等方的になる
- ガスの収縮過程に影響する？

3次元の輻射流体力学による
星団形成過程の研究

計算モデル

- ・ 3次元流体力学 (SPH) + DM粒子
 - $m_{\text{SPH}} \sim 40 M_{\text{sun}}$, $m_{\text{DM}} = (\Omega_m - \Omega_b)/\Omega_b \times m_{\text{SPH}} \sim 200 M_{\text{sun}}$
 - 非平衡化学反応 : e^- 、 H 、 H^+ 、 H^- 、 H_2 、 H_2^+
- ・ ray-tracing : RSPH (Susa 2006)、電離率・解離率の計算

photo heating rate : $\Gamma_i = \int_{\nu_L}^{\infty} d\nu \int d\Omega \frac{I_\nu}{h\nu} \kappa_\nu (h\nu - h\nu_L)$

photoionization rate : $k_{\text{ion}} = \int_{\nu_L}^{\infty} d\nu \int d\Omega \frac{I_\nu}{h\nu} \kappa_\nu$

photodesorption (H^-), photodissociation (H_2^+) : $k_i = \int_{\nu}^{\nu_L} d\nu \int d\Omega \frac{I_\nu}{h\nu} \kappa_{\nu,i}$

photodissociation (H_2) : $k_{H_2,\text{dis}} = 1.125 \times 10^8 F_{\text{LW}}$ (Draine & Bertoldi 1996)

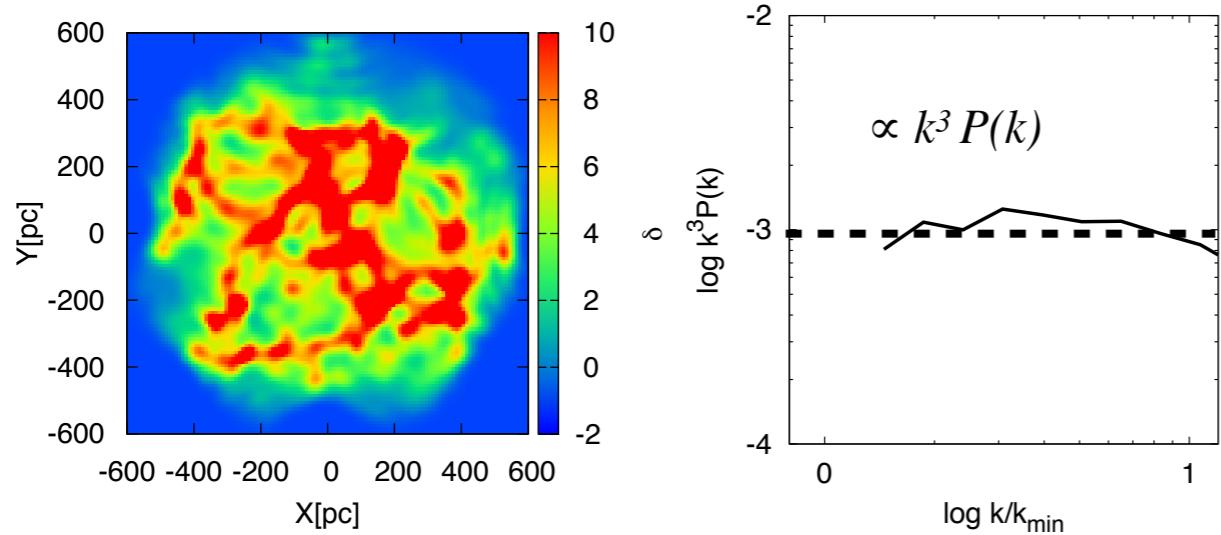
$$F_{\text{LW}} = F_{\text{LW},\text{ex}} f_{\text{shield}} = \min [1, (N_{H_2}/10^4)^{-0.75}]$$

- ・ 星形成 : 星形成条件 : $\nabla \cdot \vec{v} < 0$ & $Y_{H_2} > 5 \times 10^{-4}$ & $T < 5000\text{K}$
 - ・ SPH粒子 → 無衝突粒子にして重力多体計算
 - ・ 星形成のタイムスケールを評価

$$\frac{d\rho_*}{dt} = C_* \frac{\rho_{\text{gas}}}{t_{\text{ff}}}$$

計算モデル

- 初期条件 & 手法



- 宇宙項=0、最大膨張期からのガスの収縮を追うsemi-cosmologicalな計算

$$R_{\max} = \left(\frac{4}{3\pi^3} \frac{M}{\rho_c(0)} \right)^{1/3} (1 + z_{\max})$$

- 輻射場

- 片側照射 (1 source) & 等方輻射 (18 sources)
- 入射電離光子数 \dot{N}_{ion} : \dot{N}_{crit} で規格化 (ガス全体を電離する電離光子数)
- 輻射入射時期 ($z_{UV} \geq 6$)、輻射強度を変えて、**非等方輻射場中での prompt star formation, supersonic infall**について調べる

計算パラメータまとめ

z_c	radiation field	formation	z_{UV}	M_{gas}	$\dot{N}_{\text{ion}}/\dot{N}_{\text{crit}}$	J_{21}/α
9	one-sided/isotropic	supersonic	10	2.5	10	855.8
12	one-sided/isotropic	supersonic	13.8	2.5	10	1359.7
12	one-sided/isotropic	supersonic	14.0	5.0	10	903.4
6	one-sided	supersonic	6.8	2.5	10	375.7
6	one-sided	supersonic	6.9	5.0	10	428.9
9	one-sided	supersonic	10	5.0	10	679.3
6	one-sided	supersonic	7.0	10.0	10	183.1
9	one-sided	supersonic	10.0	10.0	10	1117.3
6	one-sided	prompt	8	1.0	0.1	6.2×10^{-3}
12	one-sided	prompt	15.9	1.0	0.1	0.14
6	one-sided	prompt	8	2.5	0.1	9.4×10^{-3}
9	one-sided	prompt	12	2.5	0.1	5.5×10^{-2}
12	one-sided	prompt	15.9	2.5	0.1	0.21
6	one-sided	prompt	8	5.0	0.1	1.3×10^{-2}
9	one-sided	prompt	12	5.0	0.1	7.4×10^{-2}
12	one-sided	prompt	15.9	5.0	0.1	0.28

- $10^{-2} < J_{21} < 10^3$
- $\dot{N}_{\text{ion}}/\dot{N}_{\text{crit}} = 10, 0.1$

$$J_{21} \times 10^{-21} \text{ erg/cm}^2/\text{s}/\text{Hz}/\text{str} = \frac{h\alpha \dot{N}_{\text{ion}}}{4\pi^2 R_{\text{gas}}}$$

初期天体からの紫外線輻射強度

- 球状星団を形成するようなsub-haloと光源となる天体とは力学的に異なる、光源のcollapse redshift z_c とすると

$$R_{\text{vir}} = 2^{-5/3} \left(\frac{4M}{3\pi^3 \rho_{c0}} \right)^{1/3} (1 + z_c)^{-1} \sim 10^2 \left(\frac{M}{10^6 M_\odot} \right)^{1/3} \left(\frac{20}{1 + z_c} \right) \text{pc}$$

- 初期天体から放出された紫外線光子が届く範囲は、Stromgren半径以内

$$R_S = \left(\frac{3\dot{N}_{\text{UV}}}{4\pi n_H^2(z)\alpha_B} \right)^{1/3} \sim 10^3 \left(\frac{\dot{N}_{\text{UV}}}{10^{50} \text{s}^{-1}} \right)^{1/3} \left(\frac{20}{1 + z} \right)^2 \text{pc}$$

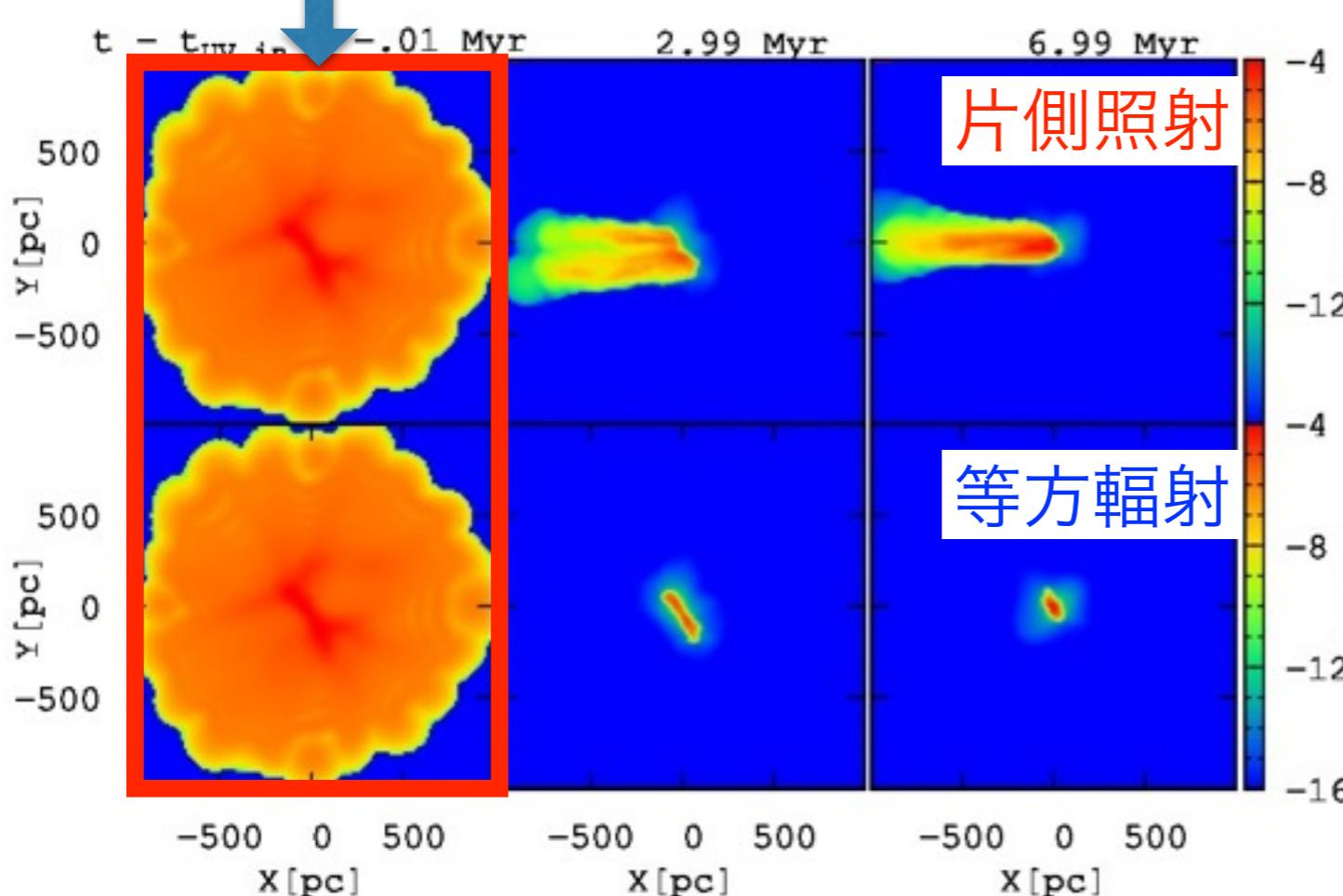
- 距離 R での輻射強度は

$$I_\nu(R) = B_\nu(T_{\text{eff}}) \left(\frac{R_*}{R} \right)^2$$

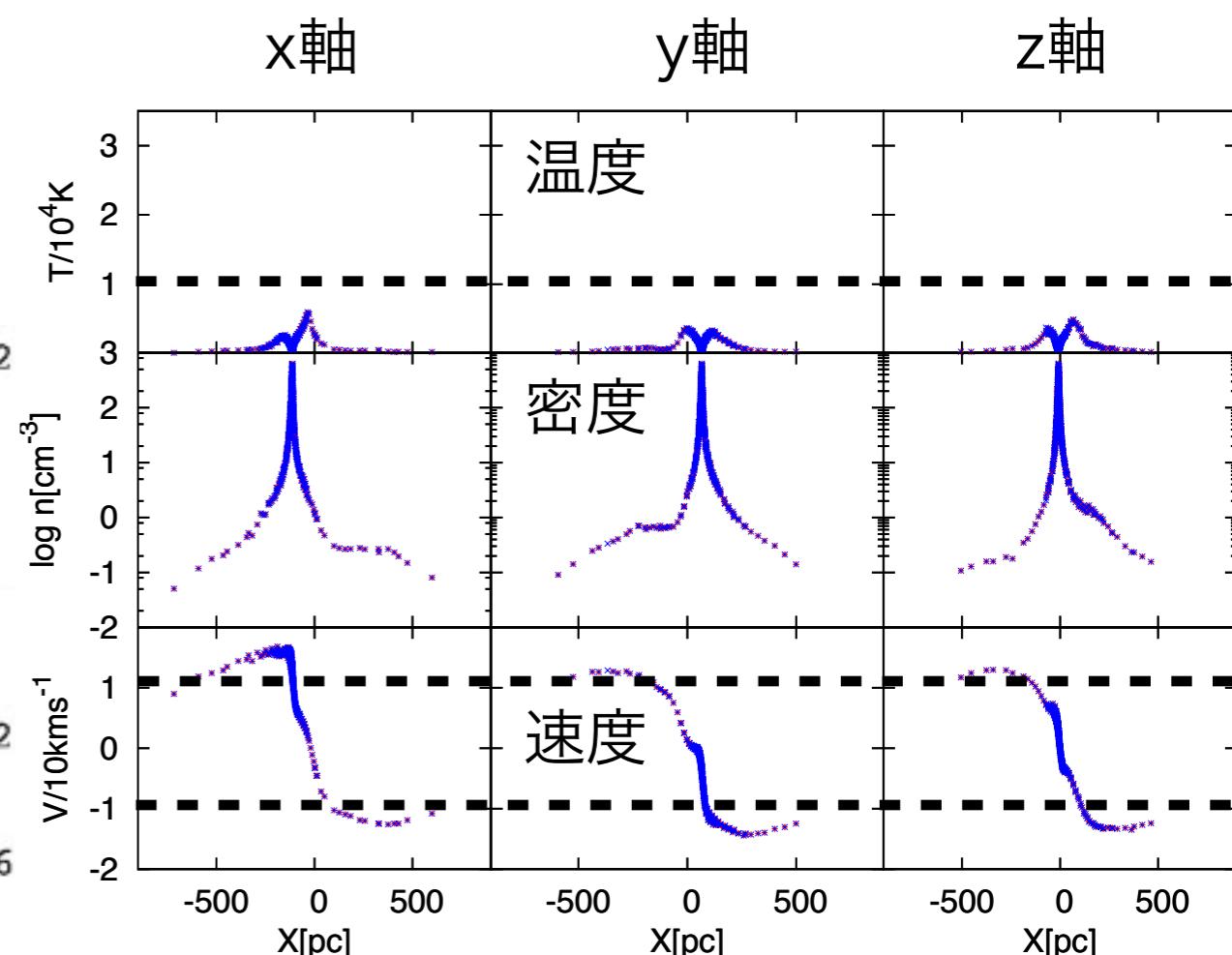
- 光源としてPop III objectを仮定した場合、輻射強度は $10^{-3} < I_{21} < 10^3$ 程度となる (Hasegawa+09)

結果：Supersonic infall

$M_{\text{ini}} = 5 \times 10^6 M_{\text{sun}}$, $z_c = 12$, $z_{\text{UV}} = 14$
 $\sim 0.65 t_{\text{dyn}}$



x,y,z軸上のT[10^4 K], n [cm $^{-3}$], V[10km s $^{-1}$]

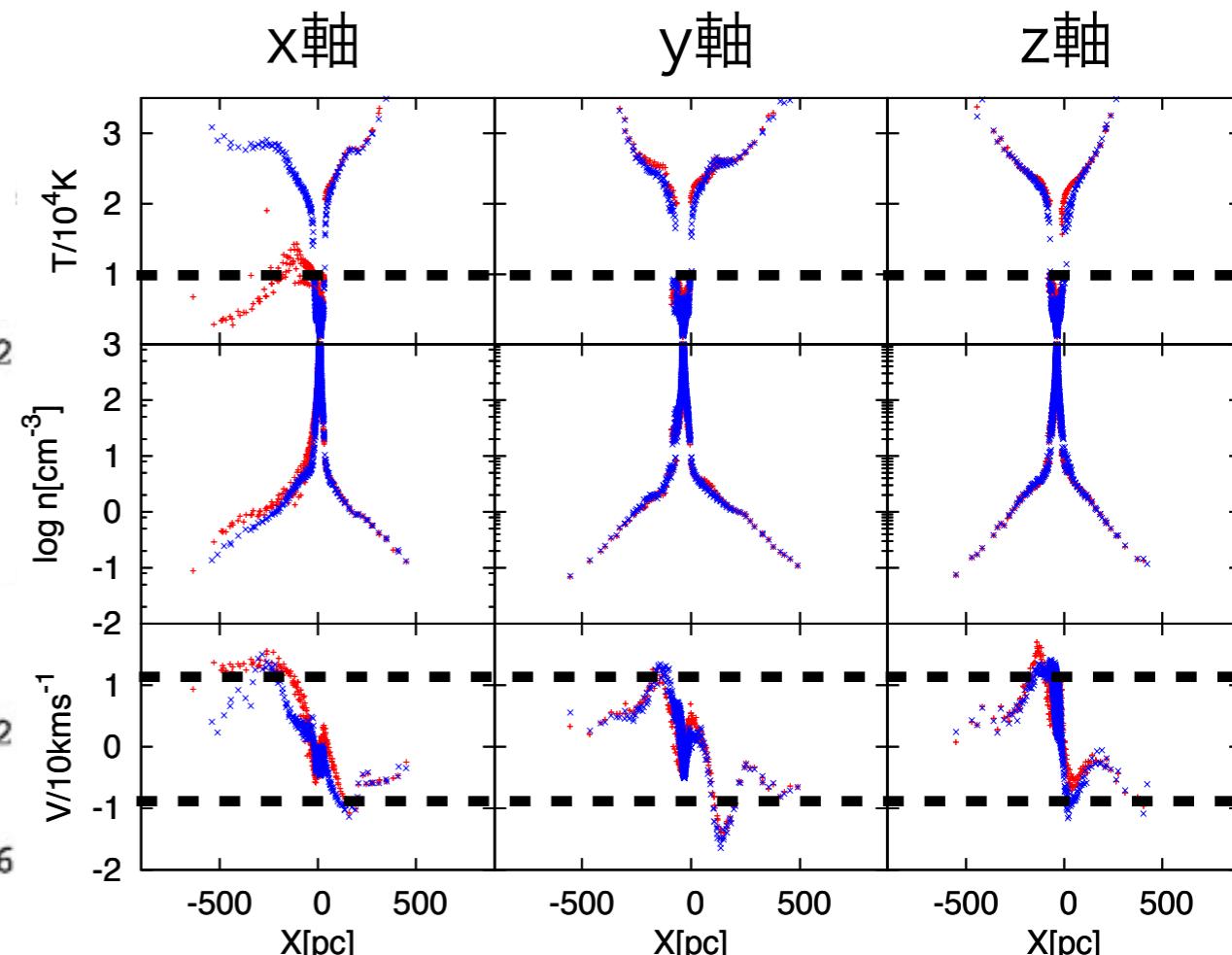
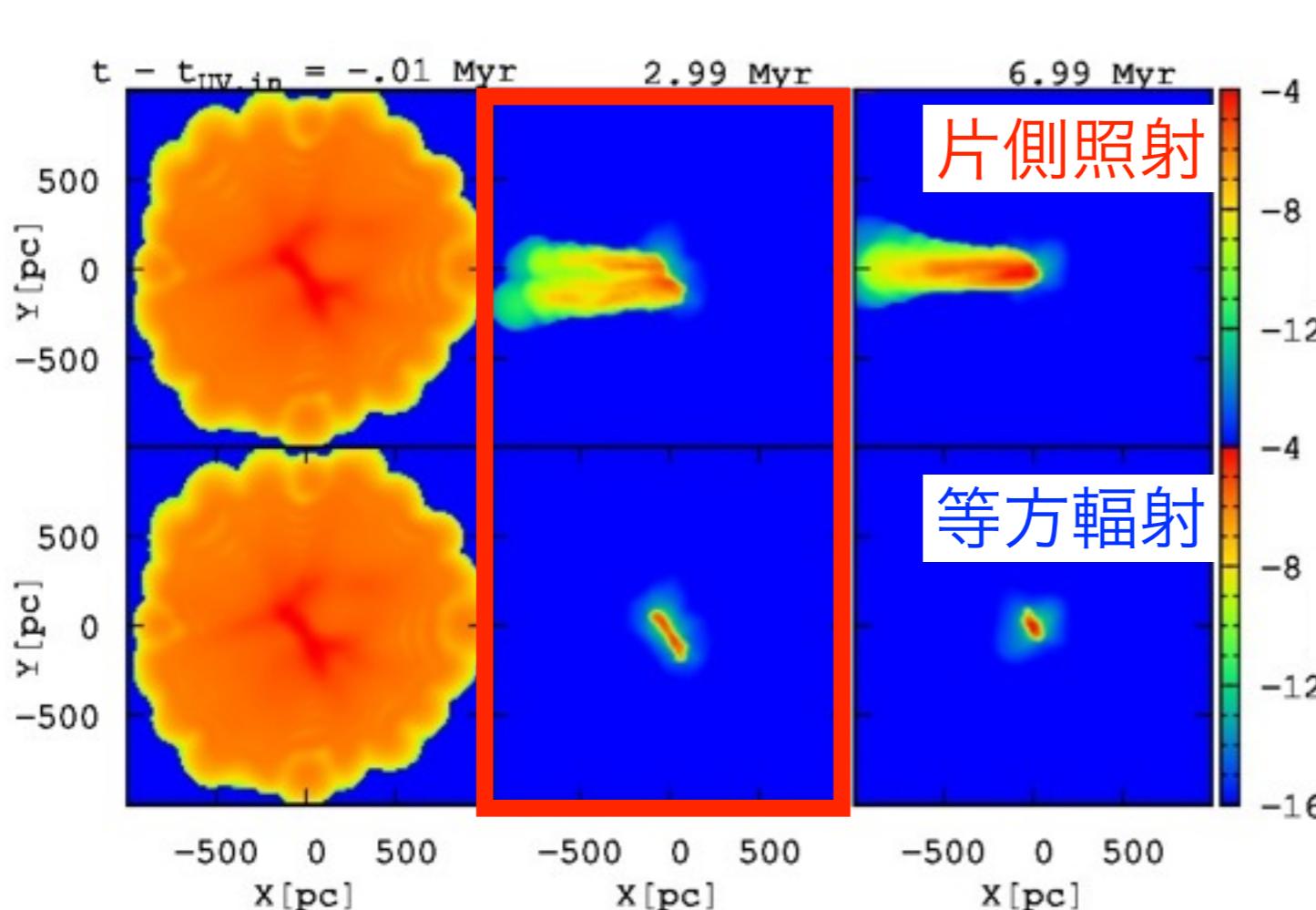


- $\dot{N}_{\text{ion}}/\dot{N}_{\text{crit}} = 10$ の強い輻射が入射
- 電離加熱($\sim 10^4$ K)+光解離
- 紫外線が有効になる段階で、収縮速度 > 10 km/s
- 電離加熱により高温となっても収縮を続けることができる

結果 : Supersonic infall

$M_{\text{ini}} = 5 \times 10^6 M_{\text{sun}}$, $z_c = 12$, $z_{\text{UV}} = 14$

x,y,z軸上の $T[10^4 \text{K}]$, $n[\text{cm}^{-3}]$, $V[10 \text{km s}^{-1}]$

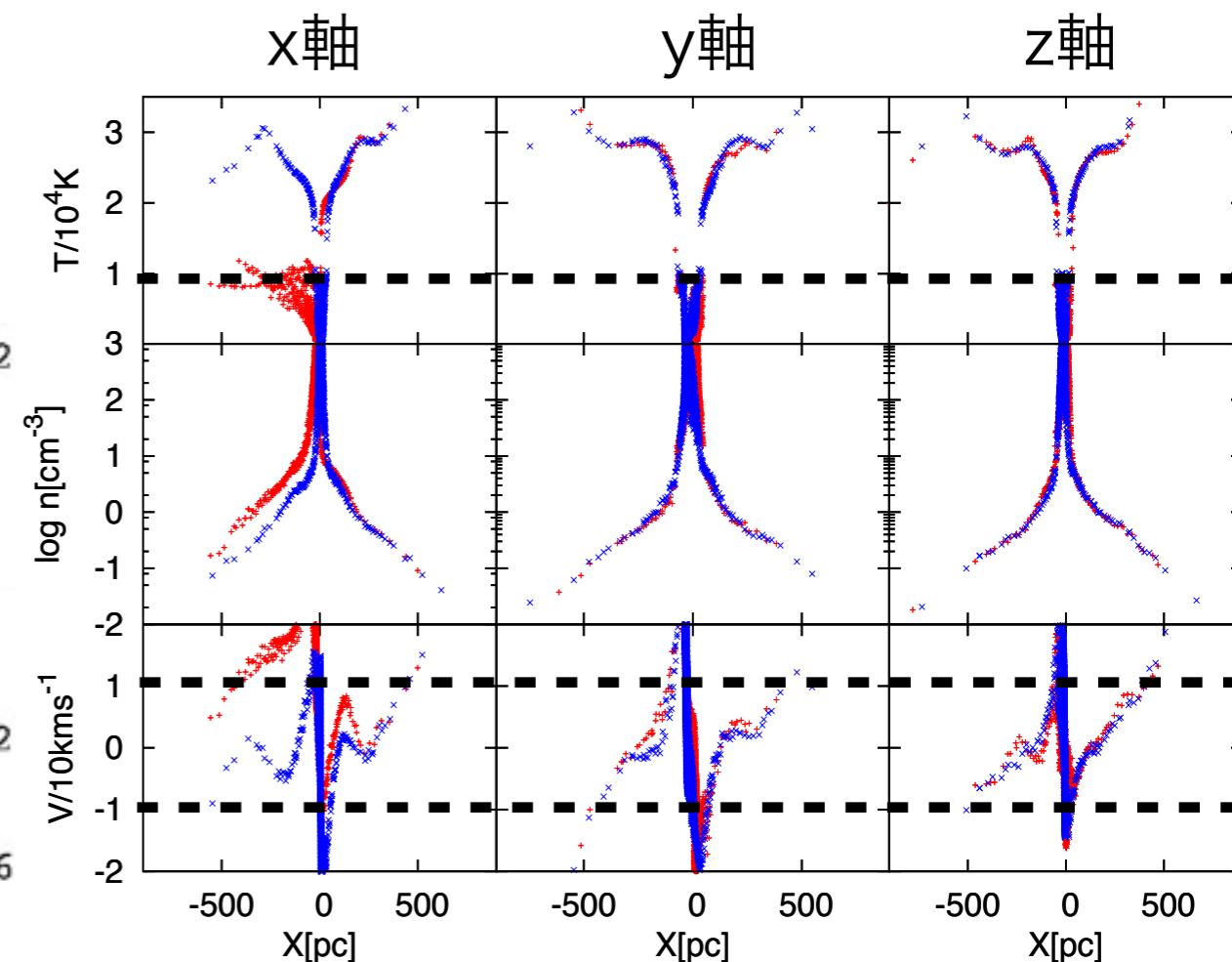
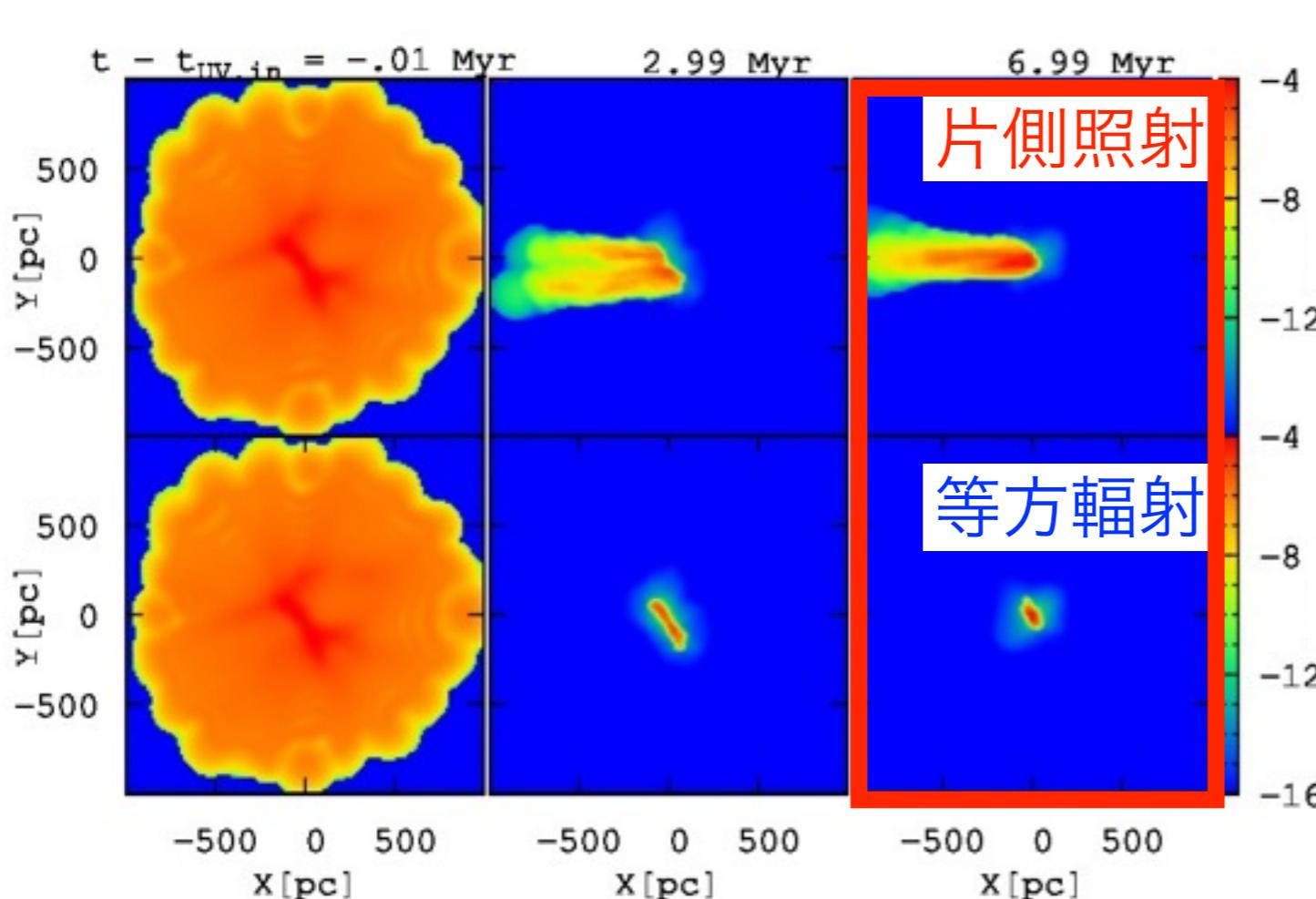


- 紫外線が有効になる段階で、収縮速度 $> 10 \text{ km/s}$
 - 電離加熱により高温となっても収縮を続けることができる
→運動エネルギーを散逸したガスから星形成されることが期待できる
- 遮蔽が実現するのはコンパクトな領域
- 片側照射の場合、日陰が形成される
 - x軸方向の収縮速度、温度は等方輻射と異なる
 - y、z軸方向については等方輻射の場合とあまり変わらない

結果 : Supersonic infall

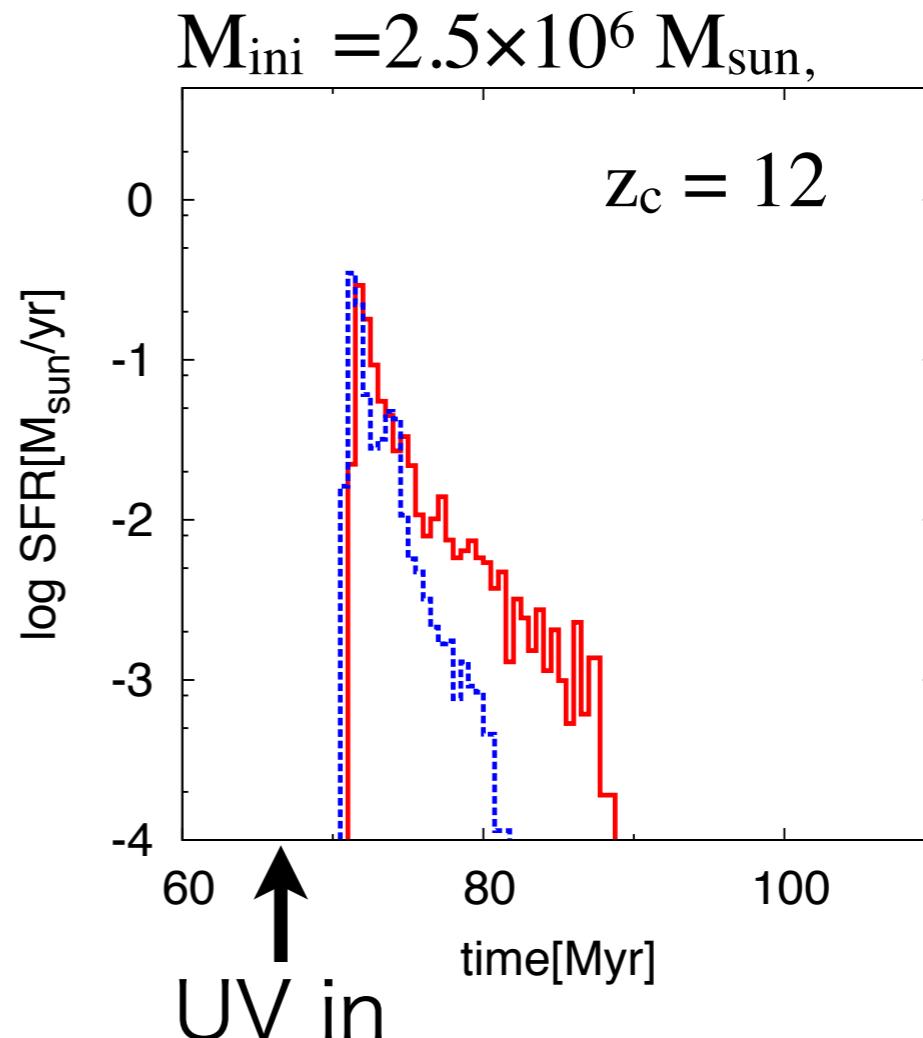
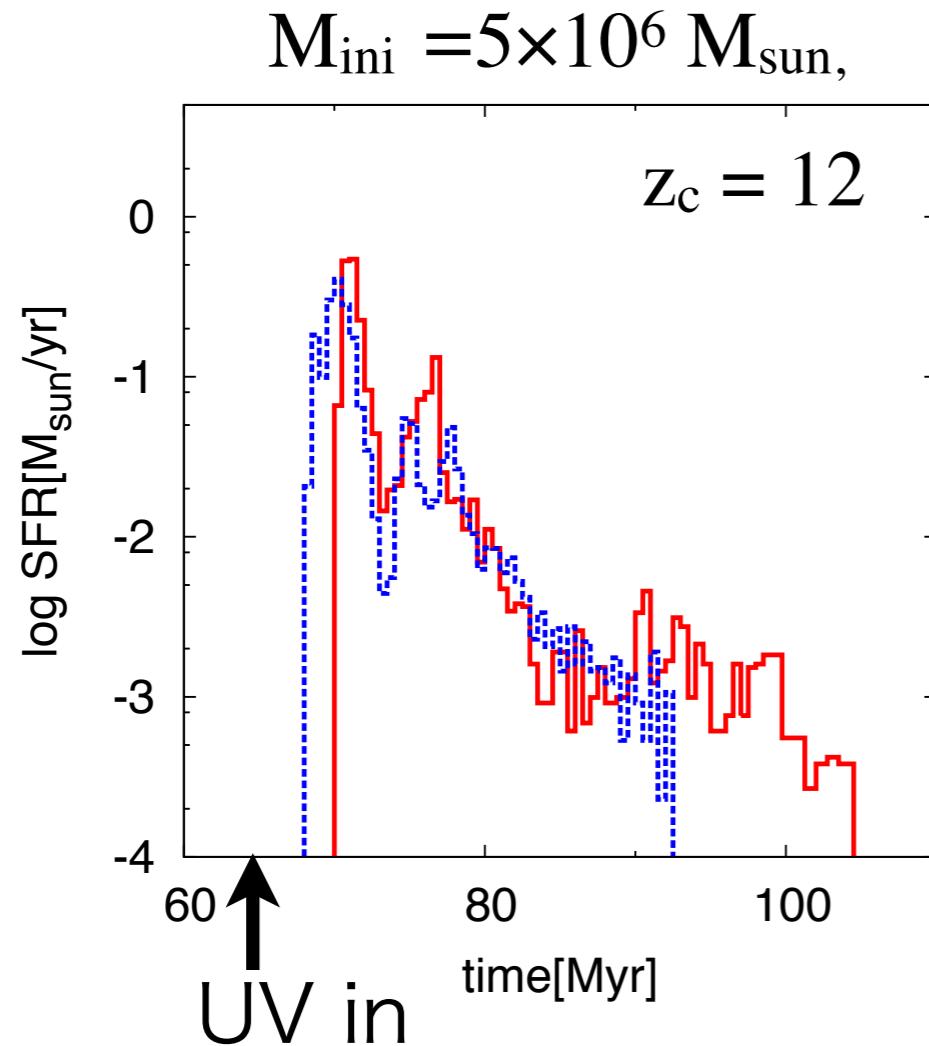
$M_{\text{ini}} = 5 \times 10^6 M_{\text{sun}}$, $z_c = 12$, $z_{\text{UV}} = 14$

x,y,z軸上の $T[10^4 \text{K}]$, $n[\text{cm}^{-3}]$, $V[10 \text{km s}^{-1}]$



- 紫外線が有効になる段階で、収縮速度 $> 10 \text{ km/s}$
 - 電離加熱により高温となっても収縮を続けることができる
→運動エネルギーを散逸したガスから星形成されることが期待できる
- 遮蔽が実現するのはコンパクトな領域
- 片側照射の場合、日陰が形成される
 - x軸方向の収縮速度、温度は等方輻射と異なる
 - y、z軸方向については等方輻射の場合とあまり変わらない

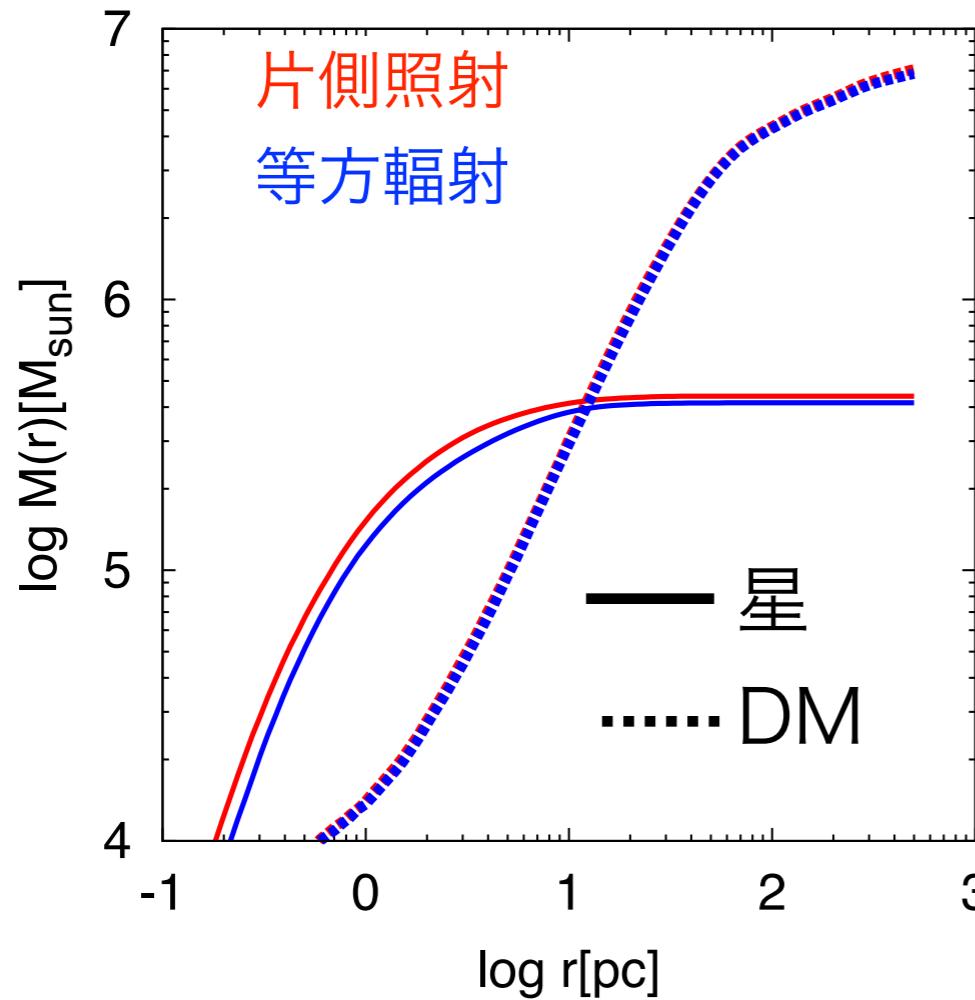
星形成史



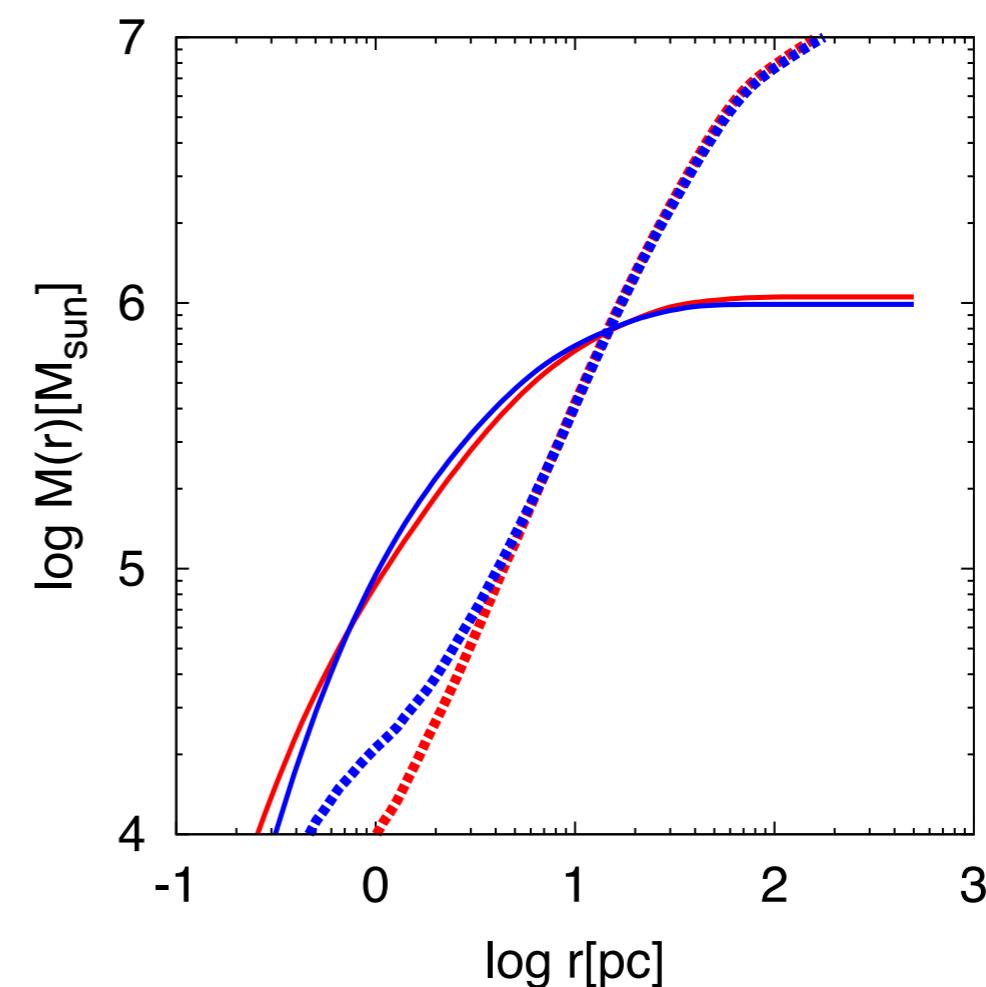
- 等方輻射
 - 遮蔽領域周辺のガスは蒸発してしまう
→ コンパクトな遮蔽領域での星形成終了後は星が形成されない
- 片側照射
 - 日陰が形成されるため、等方輻射よりも長く星を形成する

形成された星団の質量分布

$$M_{\text{ini}} = 2.5 \times 10^6 M_{\text{sun}}, z_c = 12$$



$$M_{\text{ini}} = 5 \times 10^6 M_{\text{sun}}, z_c = 12$$

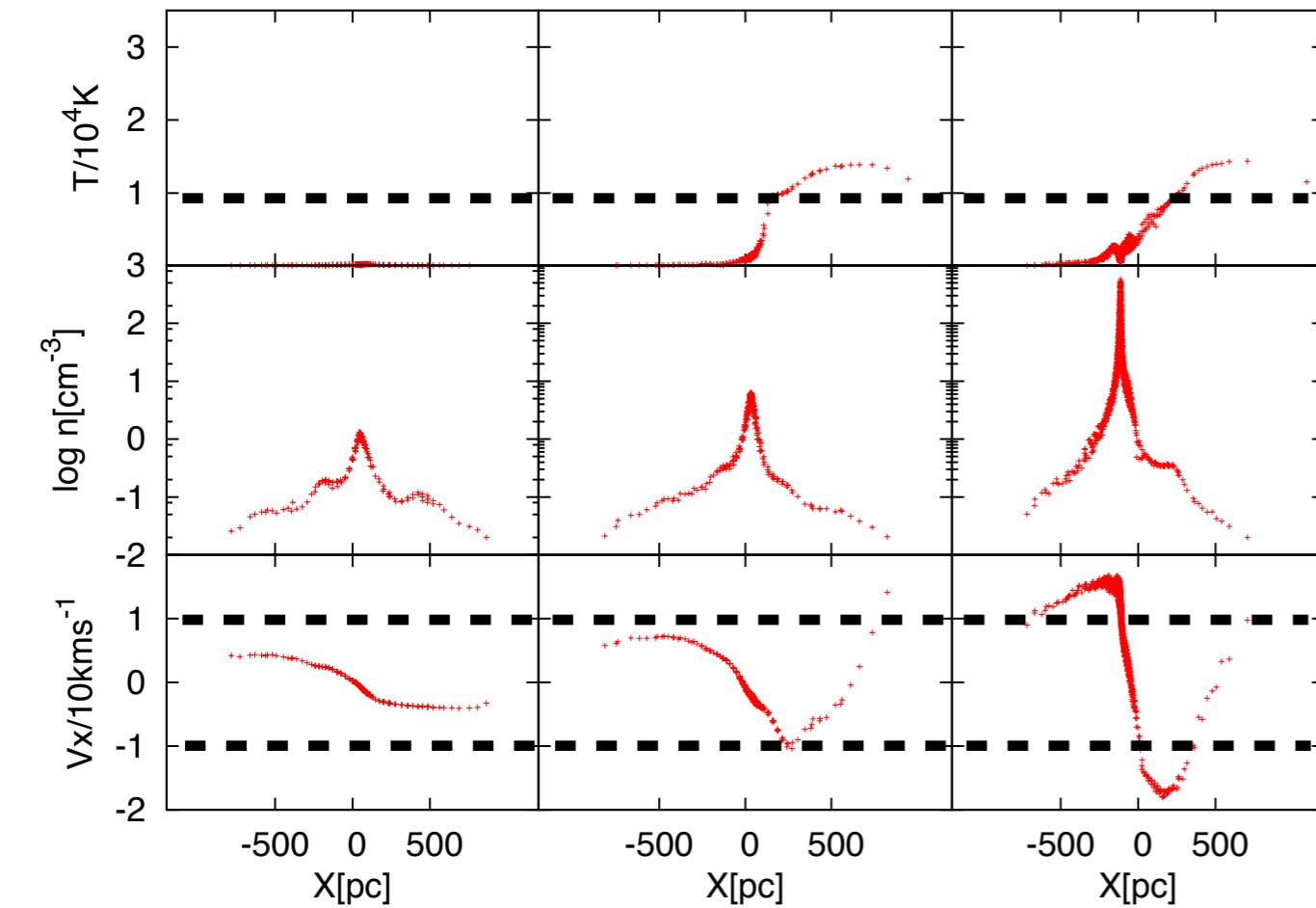
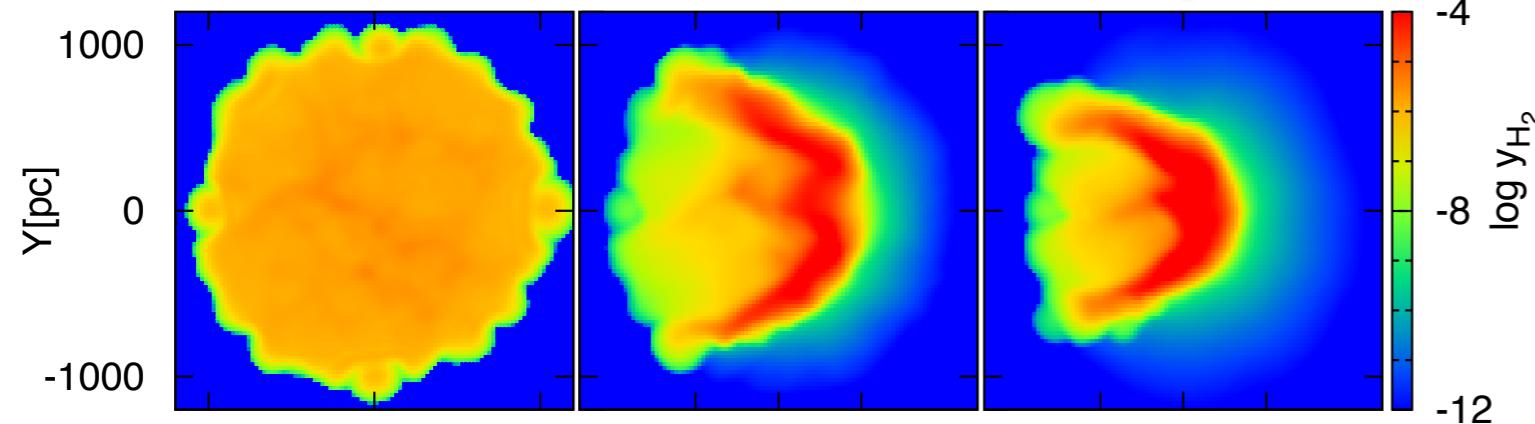


- supersonic infall
 - 電離ガスがコンパクトな領域まで収縮、星形成
 - 輻射場の非等方によらず stellar dominant な星団

prompt star formation

$M_{\text{ini}} = 5 \times 10^6 M_{\text{sun}}$, $Z_c = 12$, $Z_{\text{UV}} = 15.9$

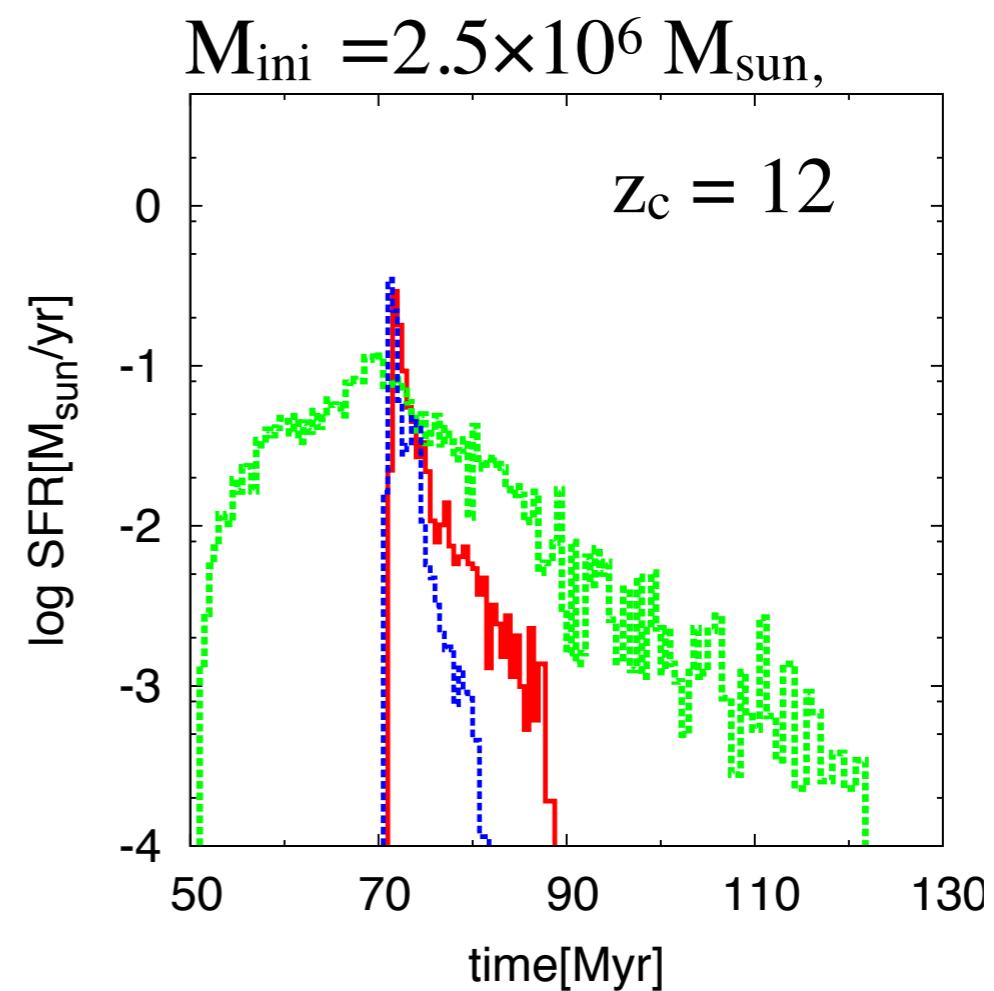
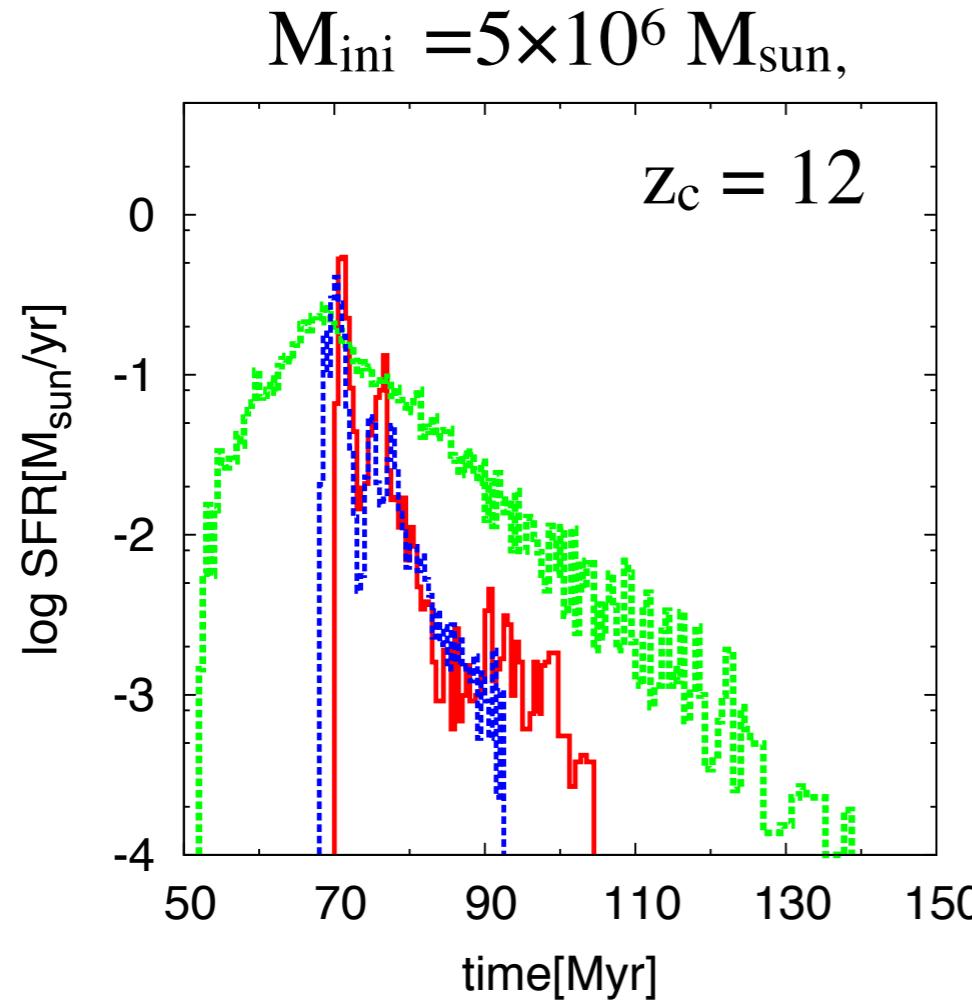
$\sim 0.65 t_{\text{dyn}}$



x軸上の温度、数密度、収縮速度

- ・ 収縮速度 $< 10 \text{ km/s}$
 - 強い外部紫外線では蒸発
- ・ $\dot{N}_{\text{ion}}/\dot{N}_{\text{crit}} = 0.1$ の弱い輻射が入射
- ・ すぐさま遮蔽領域が形成される
- ・ コンパクトではない遮蔽領域内のガスが収縮し、星を形成する
- ・ 紫外線による光電離により、水素分子が効率的に形成される
 - 早い段階で星形成
- ・ 収縮に伴うガスの運動エネルギーを散逸は、supersonic infallよりも期待できない

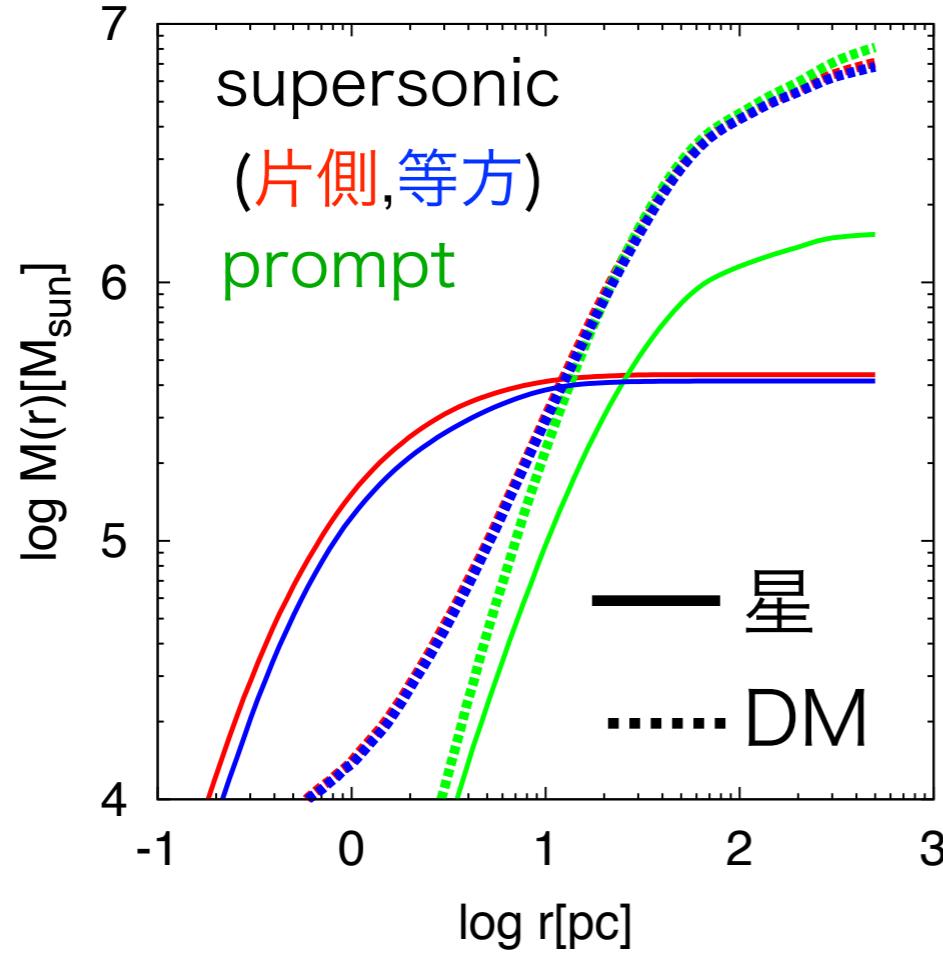
星形成史



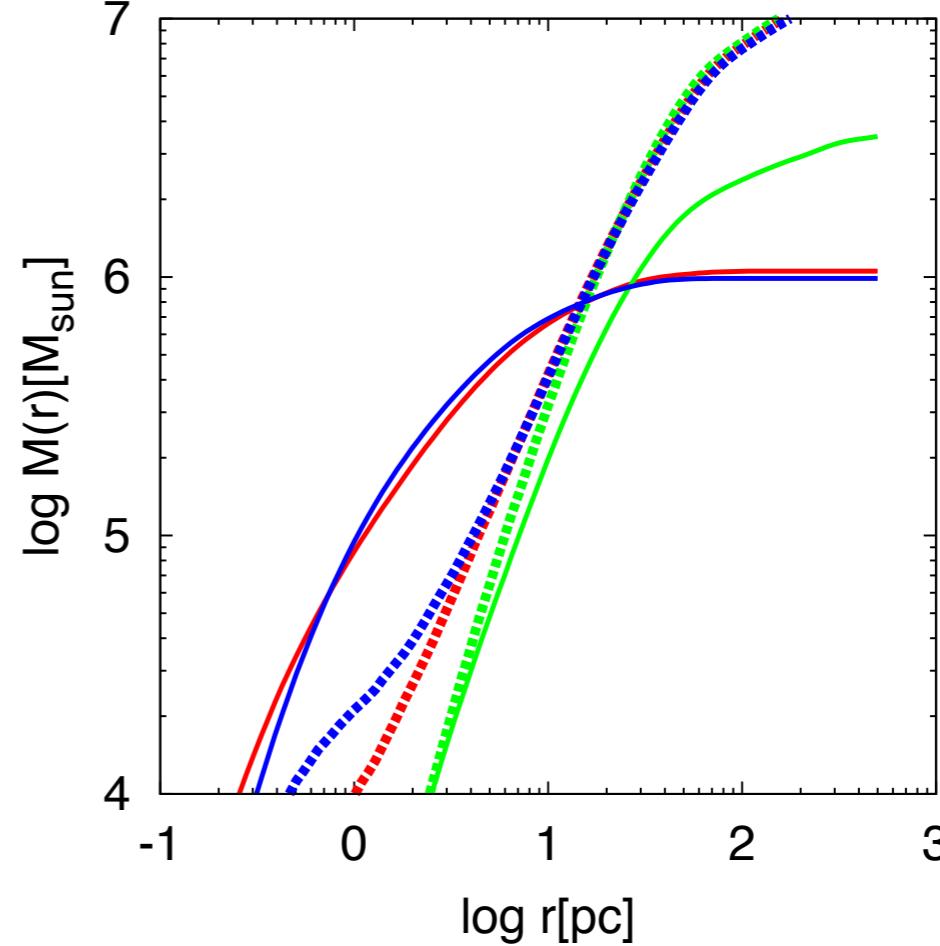
- 輻射が強いとき：
 - 紫外線を遮蔽するまでに時間がかかるため、星形成が遅れる
 - コンパクトな遮蔽領域で星を形成、星形成期間は短くなる
 - 片側照射では日陰が形成されるため、等方輻射よりも長く星を形成する
- 輻射が弱いとき：ガス雲の大半は外部紫外線を遮蔽する
 - 早い段階で星形成を開始する

形成された星団の質量分布

$$M_{\text{ini}} = 2.5 \times 10^6 M_{\text{sun}}, z_c = 12$$



$$M_{\text{ini}} = 5 \times 10^6 M_{\text{sun}}, z_c = 12$$

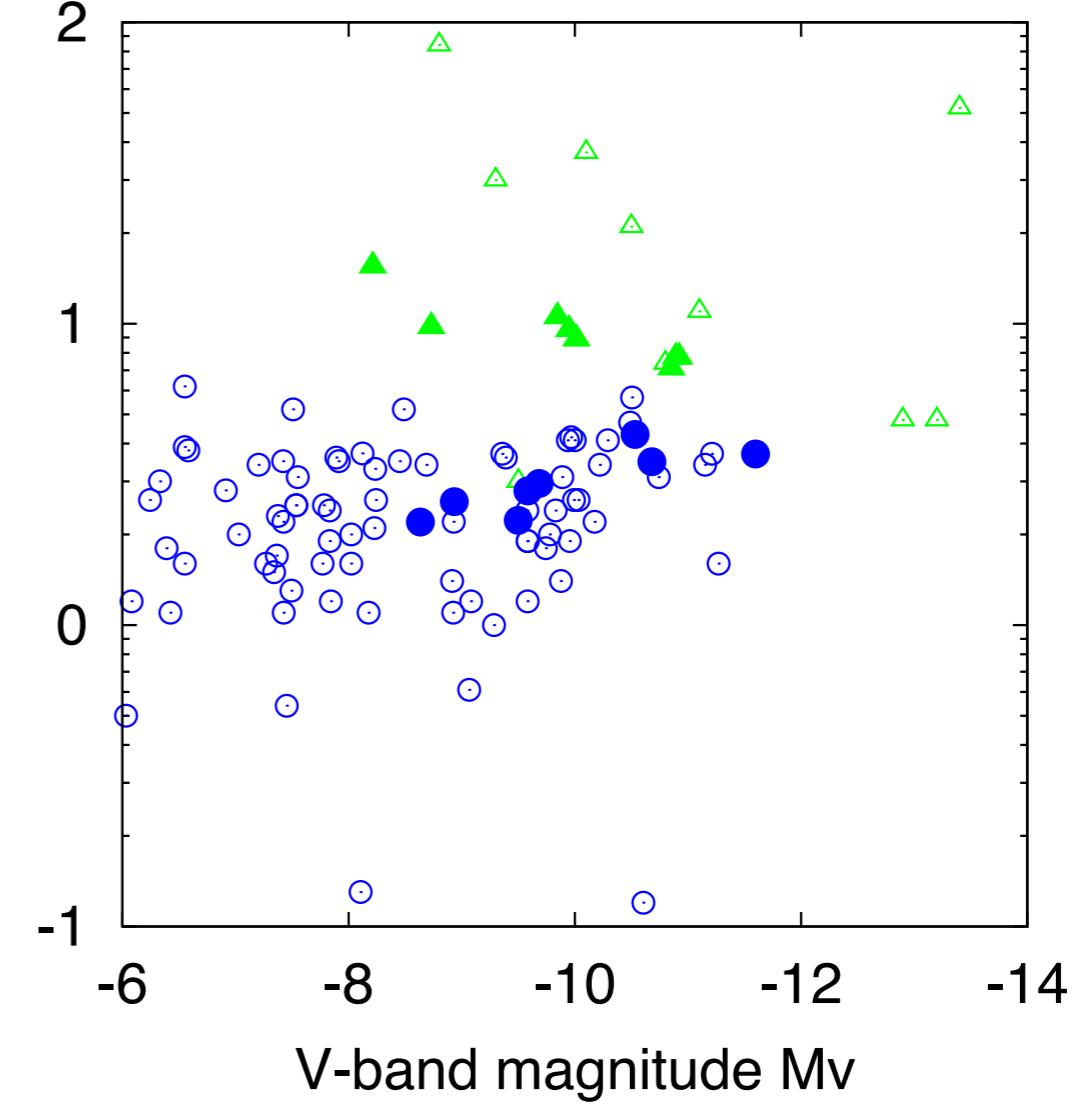
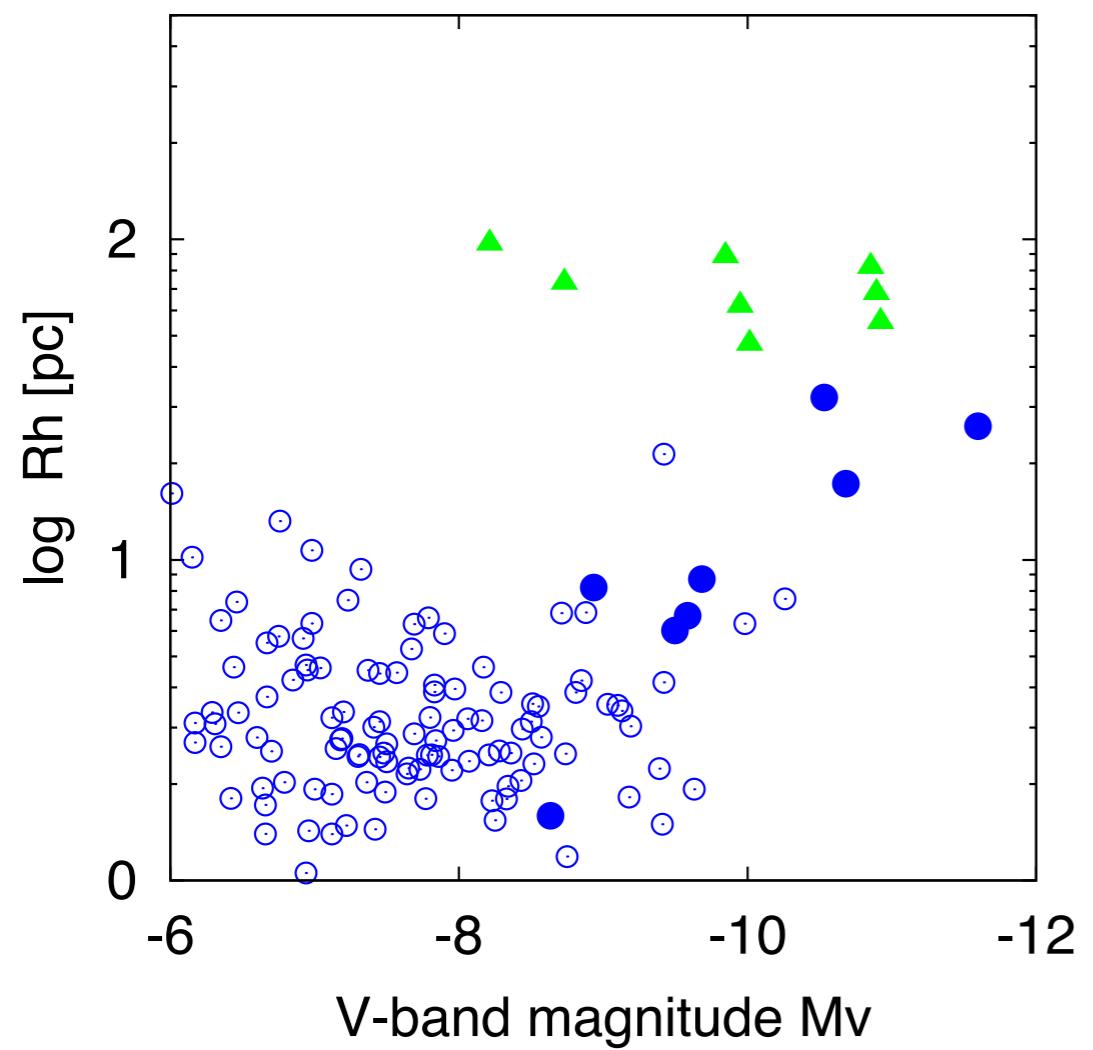


- supersonic infall : 輻射場の非等方によらず stellar dominantな星団
 - ・ 電離ガスがコンパクトな領域まで収縮、星形成
- prompt star formation : stellar dominantな星団とならない
 - ・ 収縮の早い段階で星形成、ガスの散逸が効かない

観測との比較

$M_*/L_V = 2M_{\text{sun}}/L_{\text{sun}}$ (Pryor & Meylan 1993)を仮定

mass-to-light ratioは、星団の半質量半径内に含まれる質量で評価

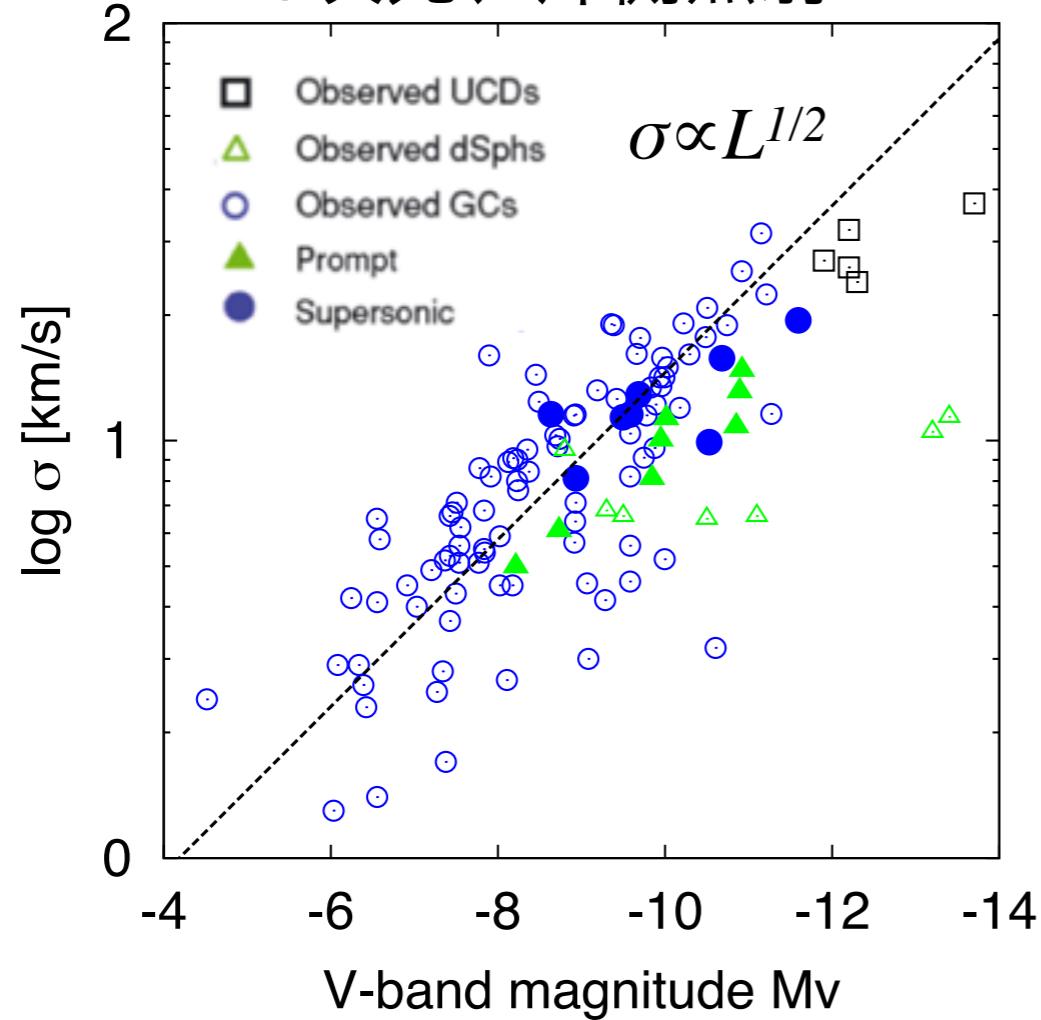


- 半質量半径 < 10 pc の星団は、prompt star formation では形成されない
- supersonic infall で形成された星団は prompt star formation に比べて半質量半径が小さく、また stellar dominant な星団となる

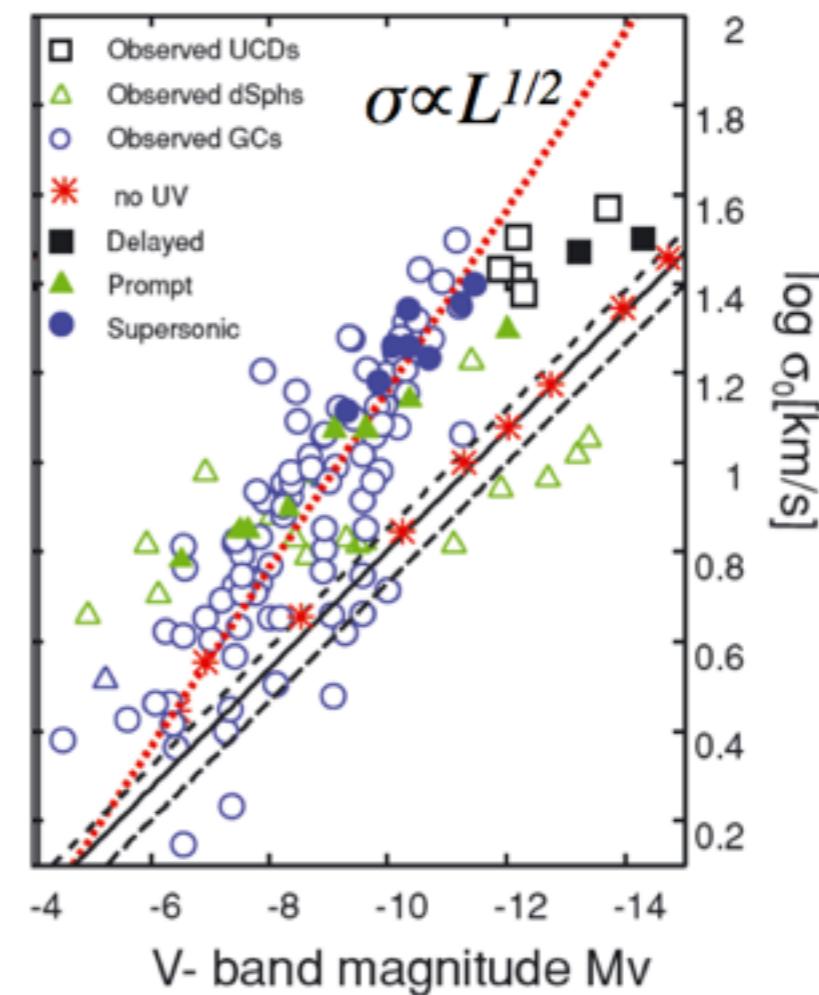
速度分散－光度関係

$M^*/L_V = 2M_{\text{sun}}/L_{\text{sun}}$ (Pryor & Meylan 1993)を仮定

3次元、片側照射



1次元球対称(Hasegawa+09)



- 1次元球対称計算と同様に、supersonic infallによって形成された星団はprompt star formationに比べて高い速度分散を持つ傾向にある
→ 背景輻射場の非等方性には影響せず、supersonic infallは球状星団形成過程を説明できる可能性がある

まとめ

- ・ 1次元球対称計算によって、強輻射場中における超音速落下モデルが球状星団の性質をよく再現する可能性が指摘されていた
→ 非等方背景輻射場中において、球状星団のようなコンパクトな星団が形成される可能性について3次元輻射流体力学計算によって調べた
- ・ 非等方背景輻射場中における超音速落下モデル
 - ・ 半質量半径 ~ 10 pc、stellar dominantな星団
 - ・ 速度分散-光度関係は球状星団の観測と矛盾しない
- ・ 輻射場の非等方性によらず、supersonic infallによる星団形成過程は球状星団の形成過程を説明するのに有効である可能性がある