

# 紫外線輻射場内での 球状星団形成

筑波大学  
長谷川 賢二

初代星・銀河形成研究会 2006年9月4日～5日

@国立天文台

# 1 . Introduction

# 1.1 球状星団の特徴

GCs(globular clusters)

dSphs(dwarf Spheroidals)

・質量 $M$	$10^{4-6}M_{\odot}$
・密度 $\rho_0$	$10^{2-4}M_{\odot}\text{pc}^{-3}$
・有効半径 $r_h$	10pc (一定)
・速度分散 $\sigma$	数km/s $\sim$ 30km/s
・質量光度比	$\sim 2$ (バリオン支配的)

$10^{6-8}M_{\odot}$

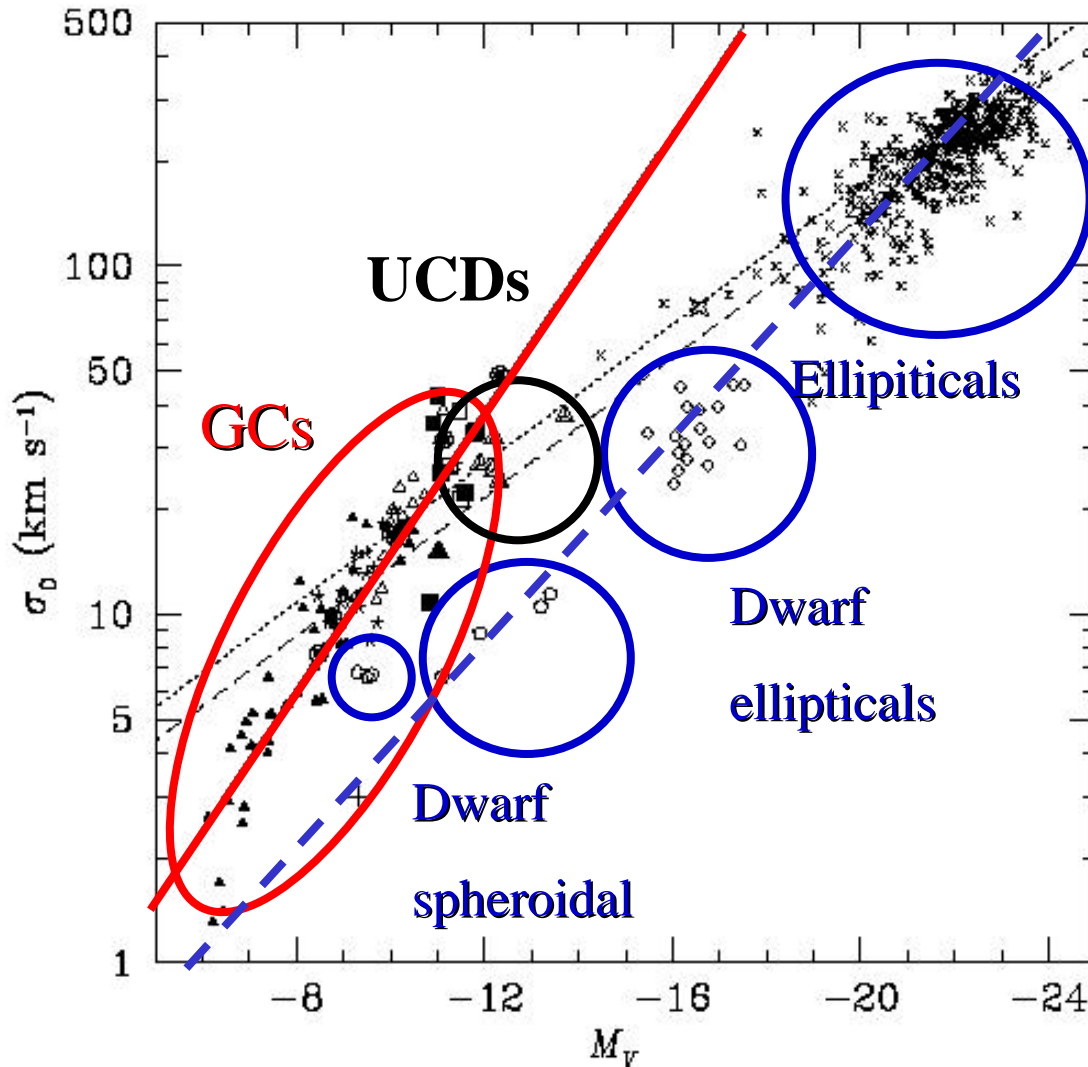
$\sim 1M_{\odot}\text{pc}^{-3}$

$\sim 0.1-1\text{kpc}$

数10km/s

10-100(DM支配的)

# 1.2 $M_V$ - $\sigma$ plane



おおよそ  $\sigma \propto L^{(1/3)}$

$M/L$ 大  $\Rightarrow$

DMが支配的

$\sigma \propto (M/R)^{(1/2)}$

$\propto L^{(1/3)}$

球状星団

▪ 速度分散 大

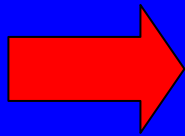
▪  $\sigma \propto L^{(1/2)}$

# 1.3 球状星団形成過程は？

## ➤ Before Host Galaxy formation

Peebles (1984), Bromm & Clark (2002), Mashchenko & Sills (2005), Saitoh et al. (2006) etc...

- CDMよる階層的形成過程でかなり早い時期に形成される.
- (少なくとも初めは) DM haloをまとっている.



- ・初期天体からの紫外線feedback
- ・観測される球状星団はDMを含まない

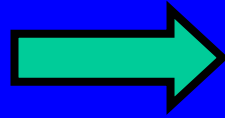
## ➤ After Host Galaxy formation

Fall & Rees (1984), Kravtsov & Gnedin (2005), etc...

- Galactic halo内で形成される.
- Shock and/or Thermal instability で高密度天体形成.

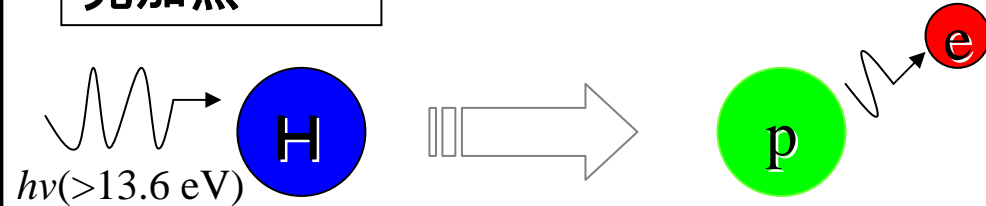
# 1.4 紫外線feedback1: 光加熱

電離による  
加熱の効果



ガスの温度は  
 $10^4\text{--}10^5\text{K}$ まで上昇

光加熱



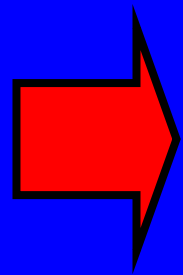
入射したエネルギー ( $h\nu$ ) と電離に使われたエネルギー ( $13.6\text{eV}$ ) の差分がガスにインプットされる。

加熱率  $\Gamma_{\text{ion}} = \int_{\nu_L}^{\infty} d\nu \int d\Omega \frac{(h\nu - h\nu_L) a_\nu I_\nu}{h\nu}$

$\nu_L$ : Lyman limit 振動数  
 $a_\nu$ : 反応断面積  
 $6.3 \times 10^{-18} (\nu_L/\nu)^3 \text{ cm}^2$

重力収縮の条件

$$\frac{k_B T}{\mu m_p} - \frac{GM}{R} < 0$$



小質量天体形成困難

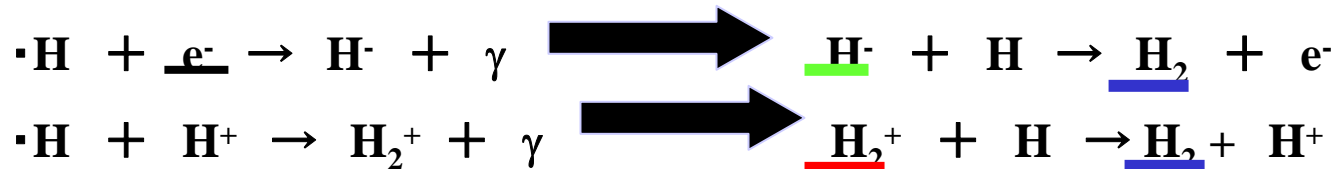
$$M_J = (\pi k_B / G m_p \mu)^{3/2} T^{3/2} \rho^{-1/2}$$

$$\approx 10^8 (T / 10^4 \text{ K})^{3/2} M_{\text{sun}}$$

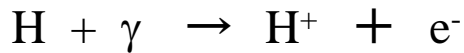
# 1.5 紫外線feedback2:水素分子形成/破壊

水素分子:原始組成ガスでは最も重要な冷却剤

形成のメインプロセス

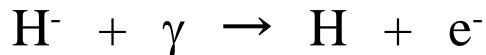


・光電離 H ( $h\nu_L=13.6\text{eV}<h\nu$ )

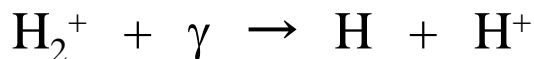


天体形成にとって  
正の影響

・光脱離  $\text{H}^-$  ( $h\nu>0.74\text{eV}$ )



・光解離  $\text{H}_2^+$  ( $h\nu>0.062\text{eV}$ )



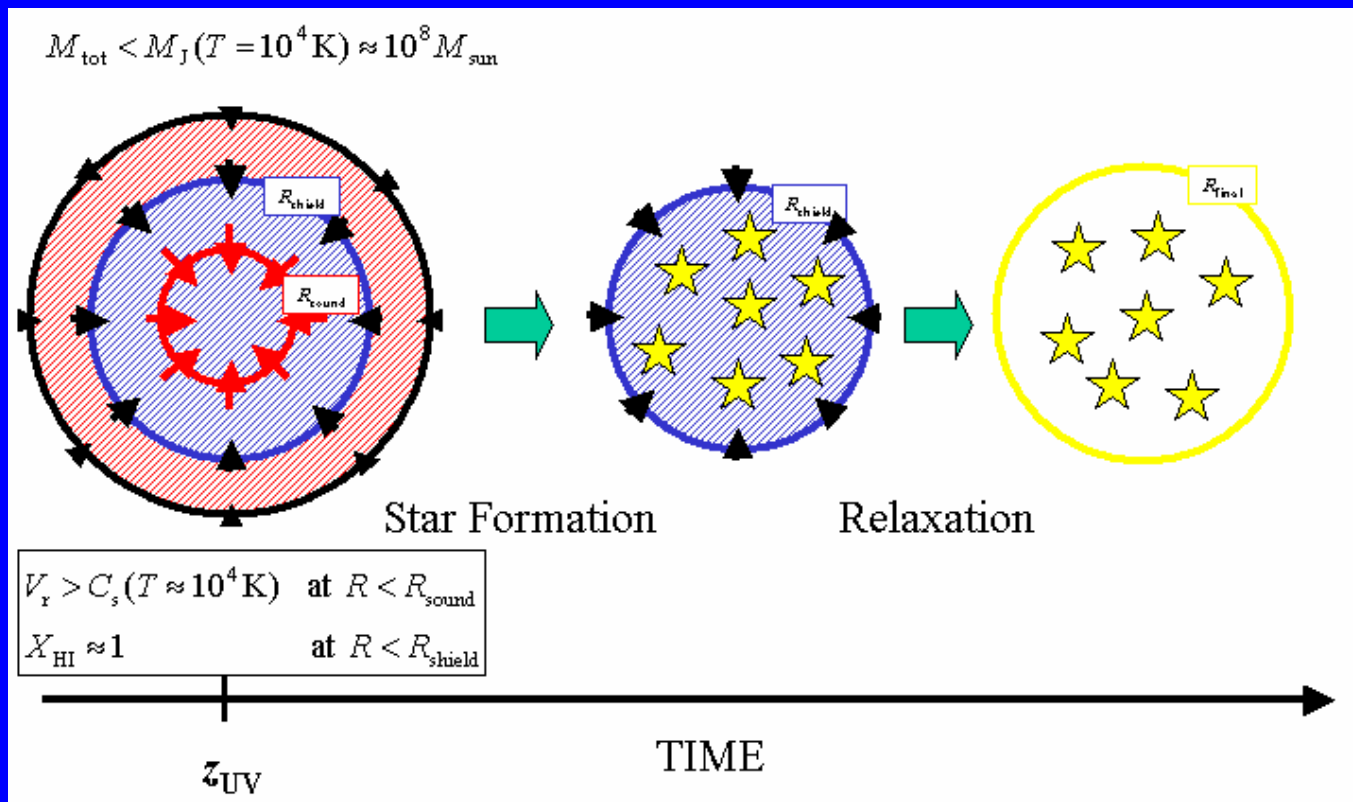
天体形成にとって  
負の影響

・光解離  $\text{H}_2$ (LWバンド:11.2~13.6)

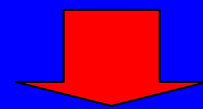


# 1.6 紫外線輻射場内での(低質量)天体形成

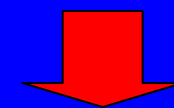
e.g. Kitayama et al. (2001), Susa & Umemura (2004)



遮蔽できた領域は、  
低温に保たれる。



$$\frac{k_B T}{\mu m_p} - \frac{GM}{R} < 0$$



**天体形成  
可能！！**

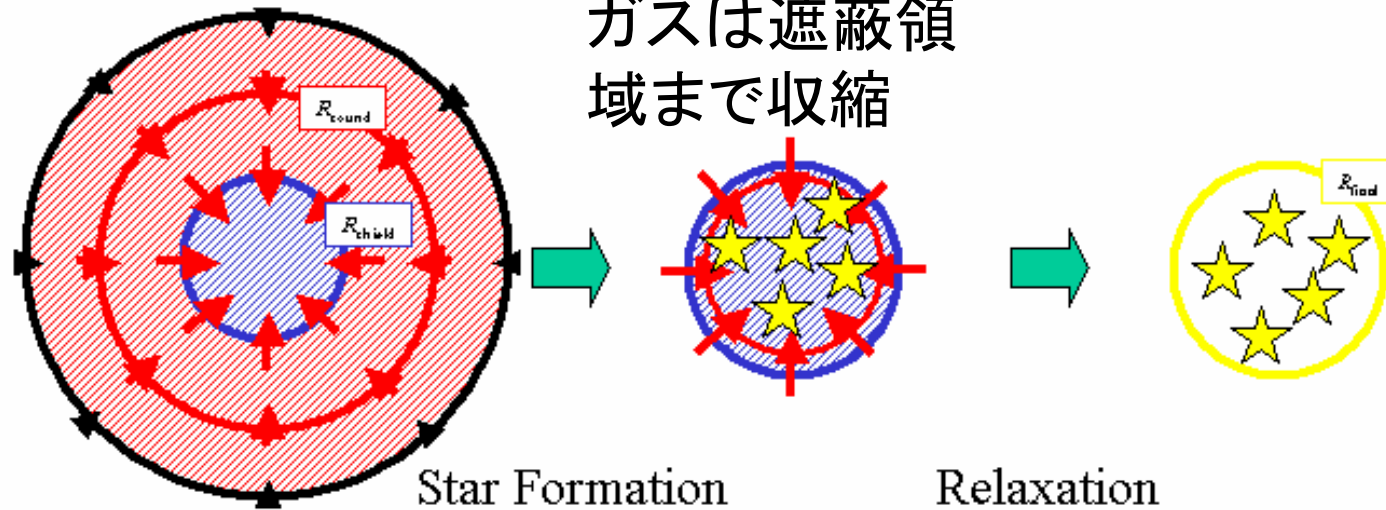
自己遮蔽臨界密度 (Tajiri & Umemura 1998)

$$n_{\text{crit}} = 3.52 \times 10^{-2} \left( \frac{M}{10^6 M_{\text{sun}}} \right)^{-1/5} I_{21}^{3/5} \text{ cm}^{-3}$$

dSph-like object  
 $I_{21}$  は  $10^{-21} \text{ erg cm}^{-2} \text{ str}^{-1} \text{ s}^{-1}$   
 で規格化した Intensity

# 1.7 新たな天体形成条件？

$$M_{\text{tot}} < M_J (T = 10^4 \text{ K}) \approx 10^8 M_{\text{sun}}$$

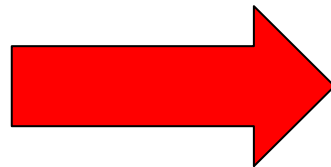


$$V_T > C_s (T \approx 10^4 \text{ K}) \quad \text{at } R < R_{\text{sound}}$$
$$X_{\text{HI}} \approx 1 \quad \text{at } R < R_{\text{shield}}$$

$z_{\text{UV}}$

TIME

エネルギー  
散逸大??



コンパクトな天体形  
成できるかも...

# 研究の目的

1.  $V_r > C_s$ である為に、天体形成可能であるという状況が本当に起こるのか？
2. その結果形成される天体は球状星団のようにコンパクトになれるのか？

# 2. 計算手法 モデル

# 2.1.1 基礎方程式

一次元球対称Lagrangian (Kitayama et al.(2001))

$\Lambda$ CDMモデル:  $\Omega_0=0.3, \Omega_b=0.05, \Lambda_0=0.7, h=0.7$

Gas dynamics

$$\frac{dm_b}{dr_b} = 4\pi r_b^2 \rho_b$$
$$\frac{d^2 r_b}{dt^2} = -4\pi r_b^2 \frac{dP}{dm_b} - \frac{GM(< r_b)}{r_b^2} + \Lambda_0 H_0^2 r_b + f_{\text{rad}}$$
$$\frac{du}{dt} = \frac{P}{\rho_b^2} \frac{d\rho_b}{dt} + \frac{\Gamma - \Lambda}{\rho_b}$$
$$P = (\gamma - 1)\rho_b u = \frac{k_B \rho_b T}{\mu m_p}$$

DM dynamics

$$\frac{d^2 r_d}{dt^2} = -\frac{GM(< r_d)}{r_d^2} + \Lambda_0 H_0^2 r_d$$

Notation ( b:baryon d:dark matter)

$k_B$ : ボルツマン定数     $m_p$ : プロトン質量

$\gamma$ : 断熱指数(=5/3)     $\mu$ : 平均分子量

$\Gamma$ : 加熱率     $\Lambda$ : 冷却率

- ・ 輻射輸送  $\Rightarrow$  加熱率、反応係数の決定
- ・ 非平衡化学反応  $\Rightarrow$  分子種の割合決定  $\Rightarrow$  冷却率決定

## 2.1.2 星の運動の追加

最終的に緩和した質量分布を知りたい！！

星形成条件

$$T < 2000 \text{ K}$$

$$V_r < 0$$

$$\frac{d\rho}{dt} > 0$$

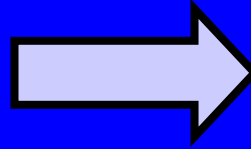
$$\frac{dT}{dt} < 0$$

ガスシェルを星シェル  
とみなして運動を計算

$$\frac{d^2 r_s}{dt^2} = -\frac{GM(< r_s)}{r_s^2}$$

## 2.2 ガスの組成

・重元素量が少なく水素分子による冷却が支配的



水素分子の形成・破壊をきちんと考慮し、重元素を無視する。

・非平衡化学反応(原始組成ガス)

e, H, H<sup>+</sup>, H<sup>-</sup>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub><sup>+</sup>の6種類のchemical network(Galli & Palla 1998)

$$\frac{dn_i}{dt} = \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^6 k_{jk} n_j n_k + \sum_{l=1}^6 \sum_{m=1}^6 \sum_{n=1}^6 k_{lmn} n_l n_m n_n$$

初期fraction

$$X_i \equiv n_i / n_H$$

$$X_e = 10^{-4}, X_{H^-} = 10^{-12}, X_{H_2} = 10^{-6}, X_{H_2^+} = 10^{-13}$$

$$X_p = X_e + X_{H^-} - X_{H_2^+}, \quad X_{HI} = 1 - X_e - X_{H^-} - X_p - 2(X_{H_2} + X_{H_2^+})$$

# 2.3 輻射輸送

各点での輻射強度、電離度、解離係数を  
知りたい！

$$\frac{dI_\nu}{ds} = \eta_\nu - \chi_\nu I_\nu \quad \text{輻射輸送方程式}$$

吸収係数:  $\chi_\nu = na_\nu$

$\alpha(1)$ : すべて再結合定数足し合わせ

放射率:  $\eta_\nu = hv\sigma\alpha^{(1)}n_e n_p / 4\pi$  ( $\sigma = (\alpha^{(1)} - \alpha^{(2)}) / \alpha^{(1)}$ )

$\alpha(2)$ : ground state 以外の足し合わせ

recombinationのうち基底状態におちたもの (isotropic, coherent scattering)

光電離率:  $k_{ion} = \int_{\nu_L}^{\infty} d\nu \int d\Omega \frac{a_\nu I_\nu}{h\nu}$

光加熱率:  $\Gamma_{ion} = \int_{\nu_L}^{\nu_L} d\nu \int d\Omega \frac{(h\nu - h\nu_L) a_\nu I_\nu}{h\nu}$

H-光脱離 ( $0.74\text{eV} < h\nu$ )、H<sub>2</sub><sup>+</sup>光解離 係数 ( $0.062\text{eV} < h\nu$ ) → optically thin

$$k_i = \int_{\nu_i}^{13.6\text{eV}} d\nu \int d\Omega \frac{a_{i,\nu} I_\nu}{h\nu}$$

光脱離cross section: Tegmark et al.(1997)

光解離cross section: Stancil(1994)

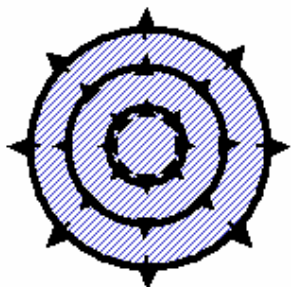
H<sub>2</sub>解離係数:  $k_{\text{H2dis}} = 1.13 \times 10^8 F_{\text{LW}} [\text{s}^{-1}]$  (Draine and Bertoldi 1996)

$F_{\text{LW}} = F_{\text{LW,ex}} f_{\text{shield}}$  : LWバンド(11.2~13.6eV)の平均輻射Flux

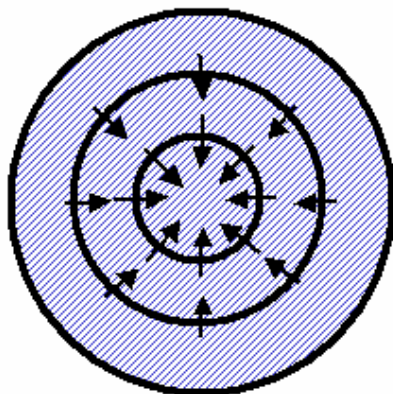
$F_{\text{LW,ex}}$ : 12.4eVでの入射Flux  $f_{\text{shield}} = \min[1, (N_{\text{H2}}/10^{14})^{-0.75}]$

# 2.4 計算手順

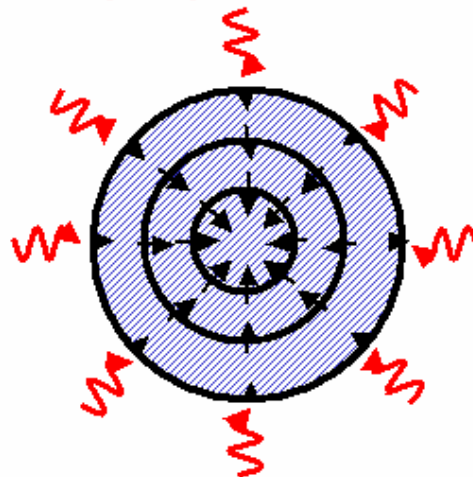
The cloud expands on the Hubble flow



The cloud turnaround.

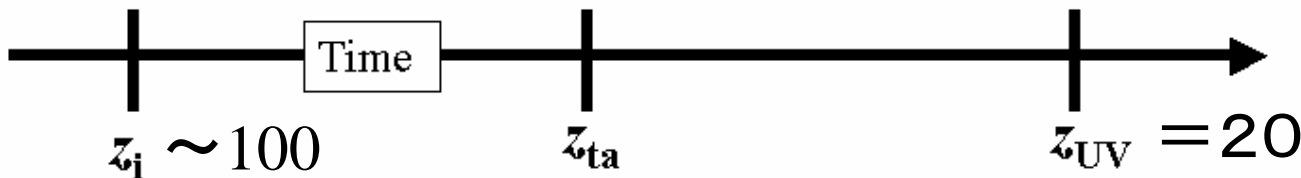


The contracting cloud is exposed by UV radiation!!



We start the simulation when the cloud is still liner regime.

We expose the UV radiation to the cloud.



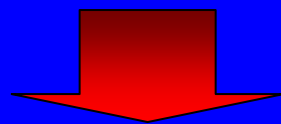
入射する輻射強度

Pop III object 周囲の輻射場を仮定

Pop III star

$$M=100M_{\odot}$$

$$T_*=10^5\text{K}$$



$$10^{-3} < I_{21} < 10^3$$

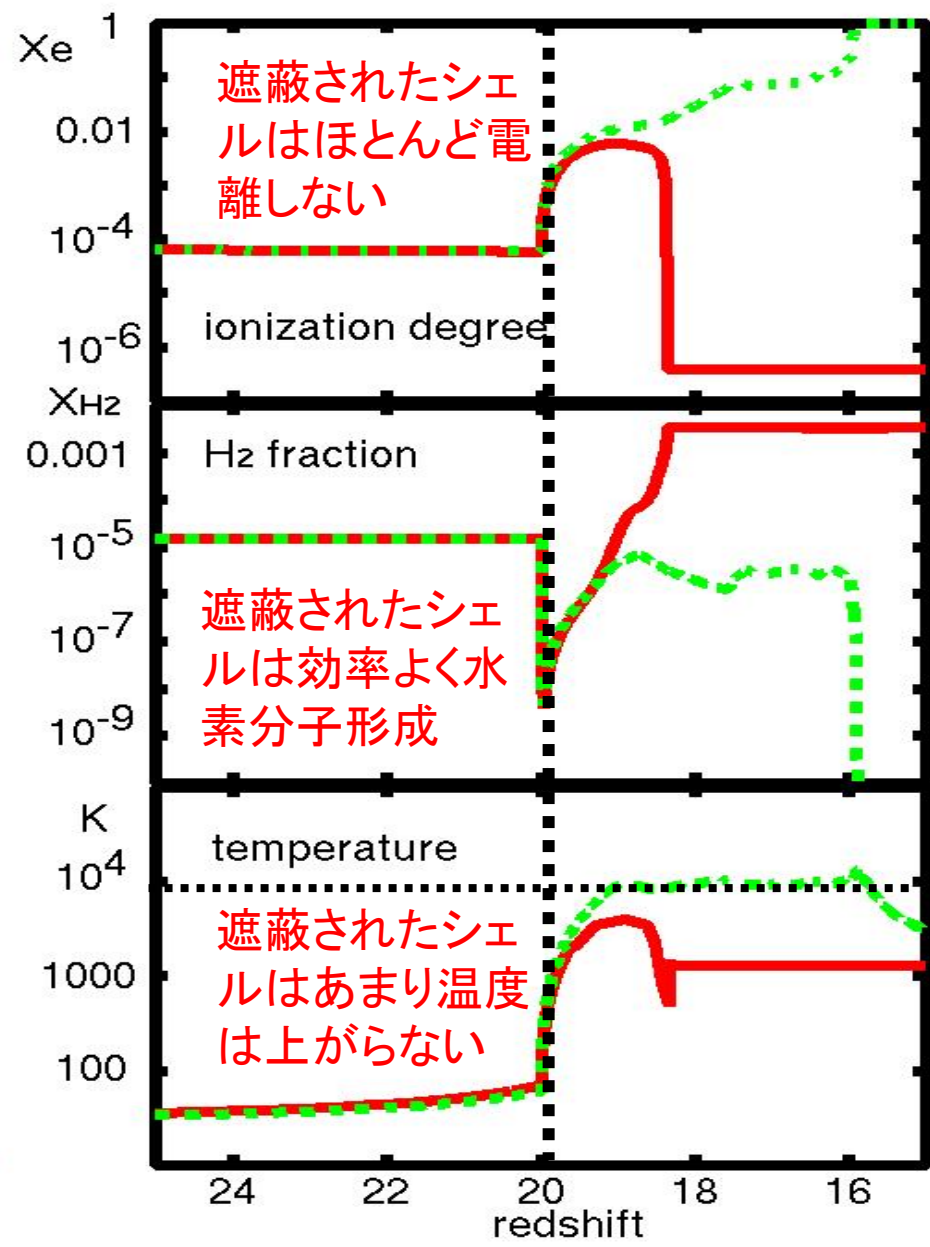
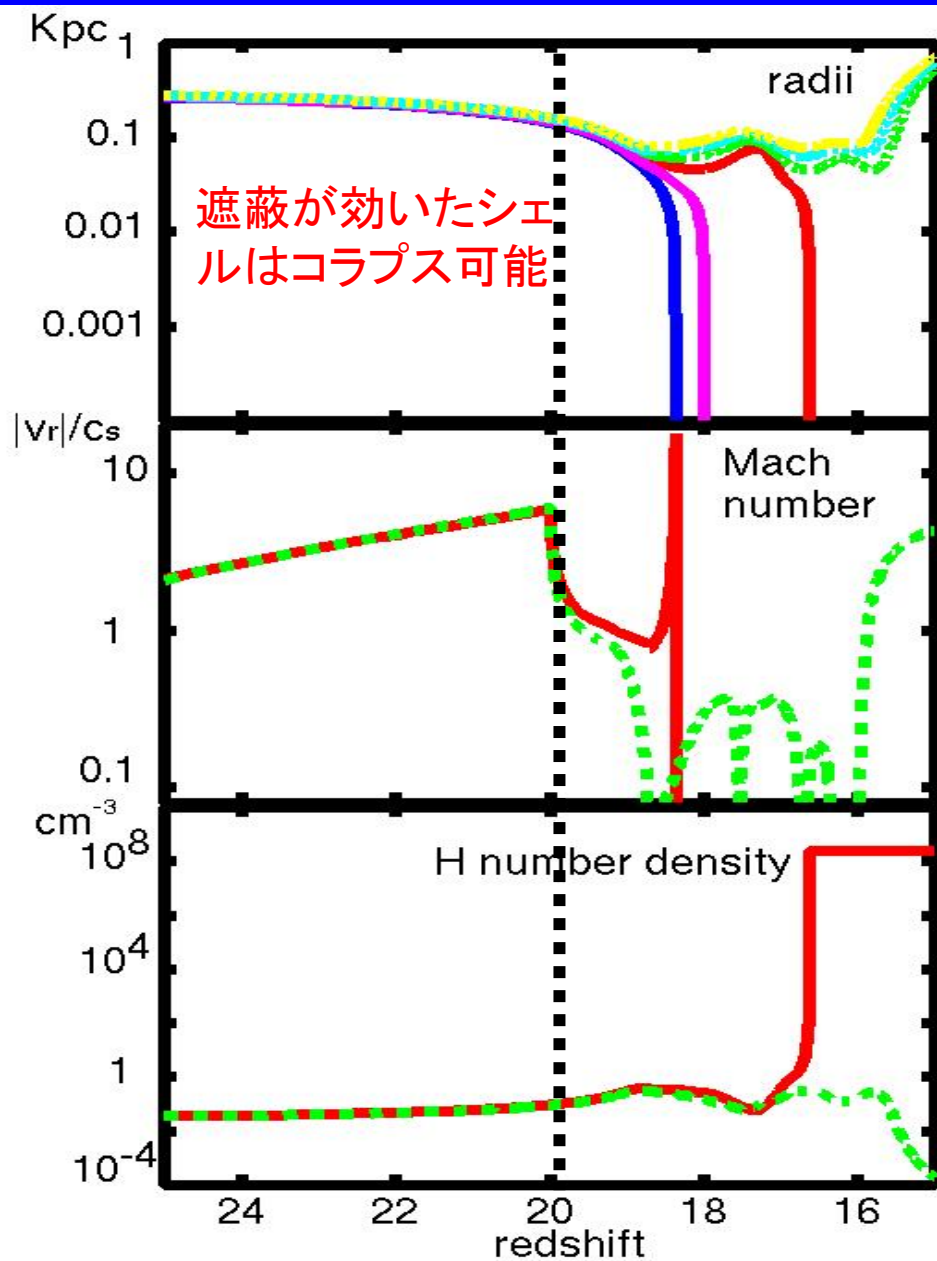
線形段階から計算開始

周りからUV線入射

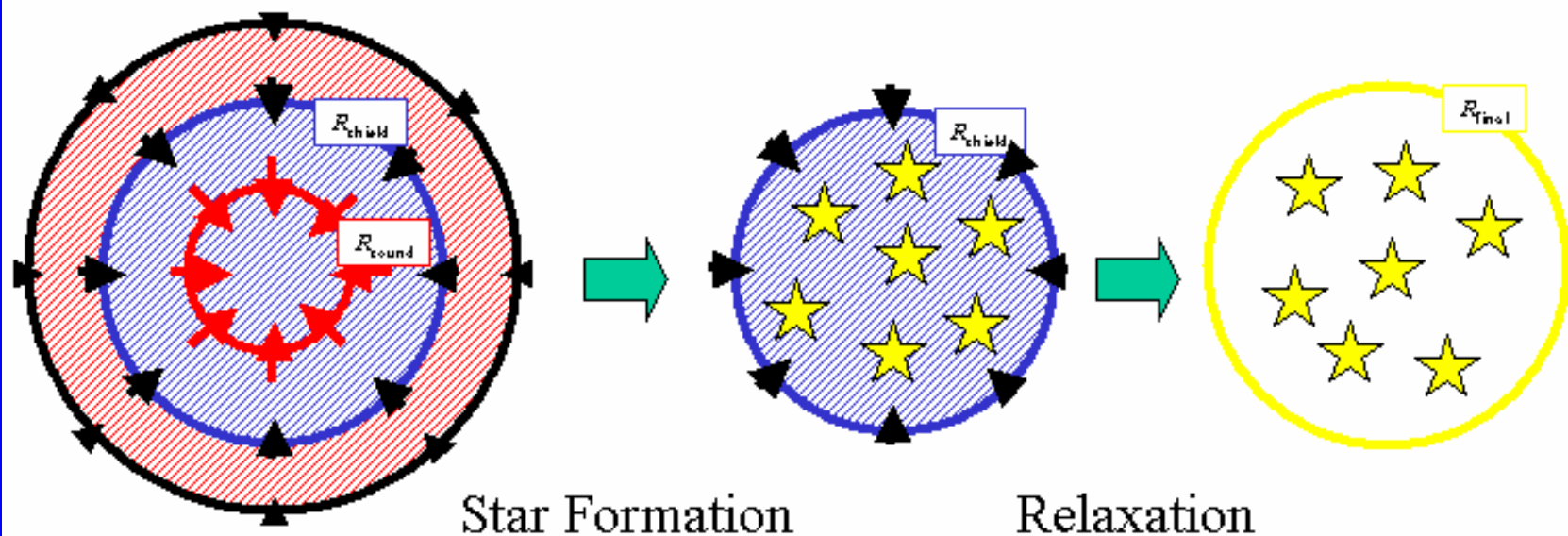
# 3. 計算結果

# 紫外線が弱い場合(自己遮蔽効果が効いた場合)

( $M_b=10^6 M_\odot$ ,  $z_c=7$ ,  $z_{UV}=20$ ,  $I_{21}=0.01$ )



$$M_{\text{tot}} < M_J(T = 10^4 \text{ K}) \approx 10^8 M_{\text{sun}}$$



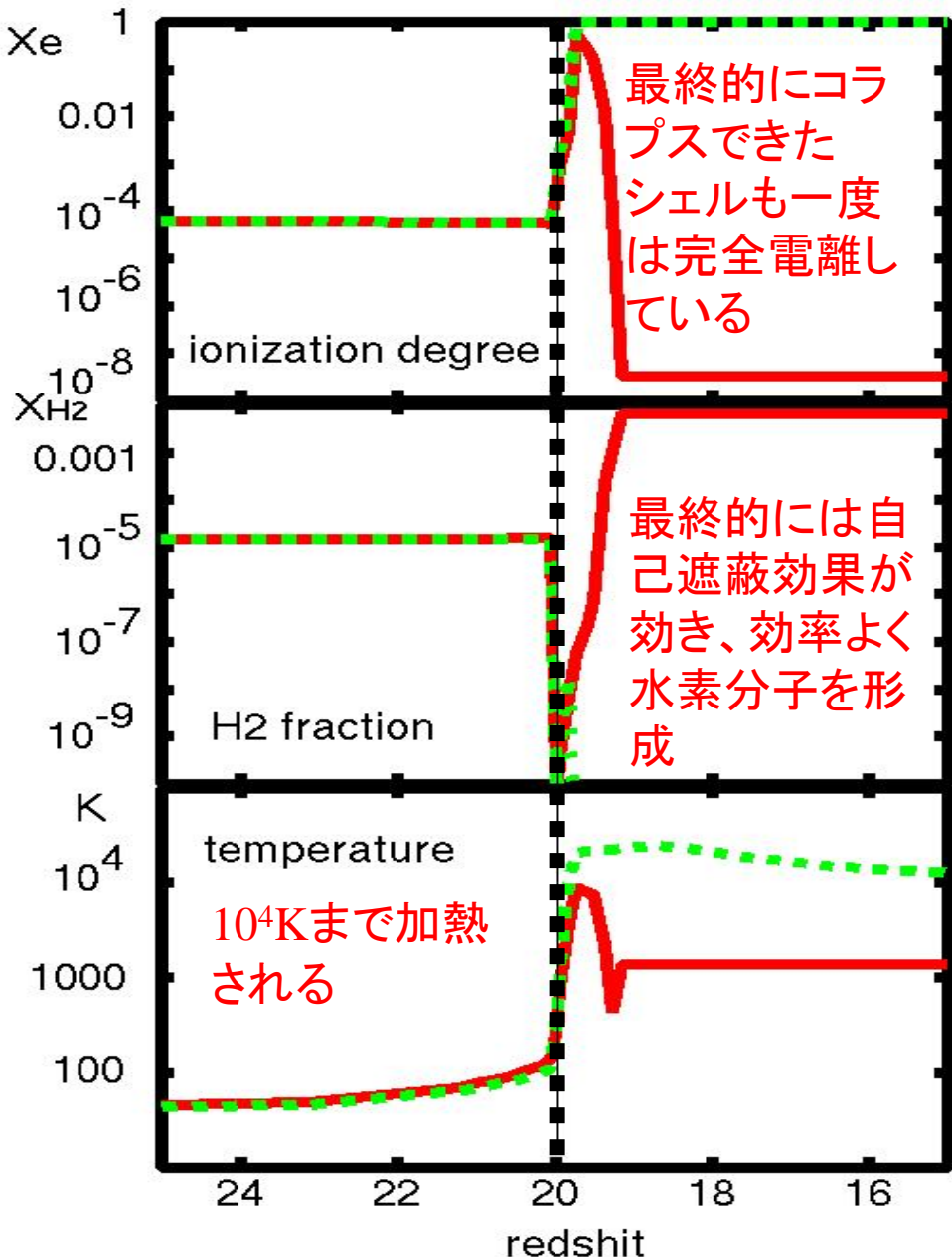
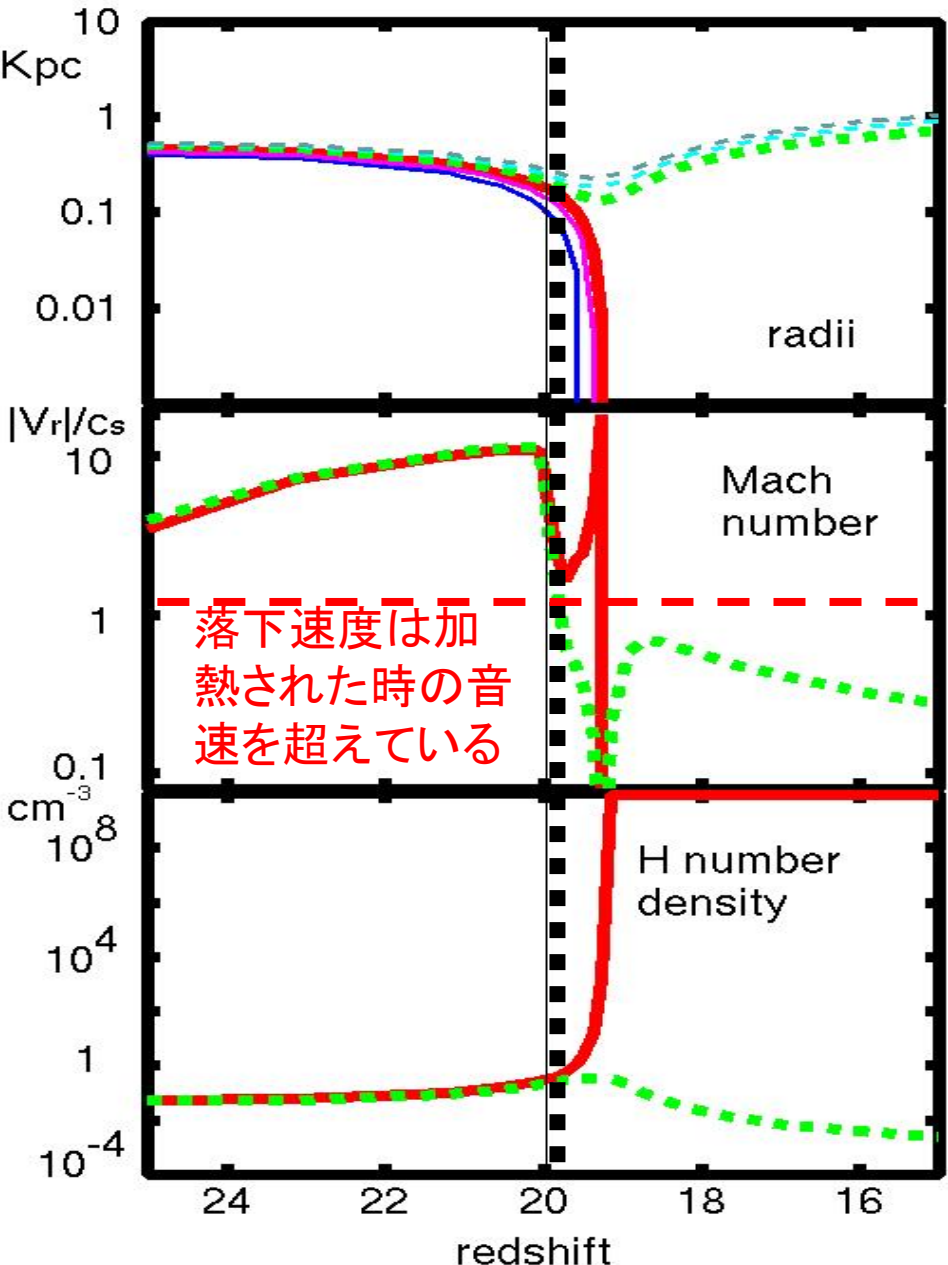
$V_r > C_s (T \approx 10^4 \text{ K})$	at $R < R_{\text{sound}}$
$X_{\text{HI}} \approx 1$	at $R < R_{\text{shield}}$

$z_{\text{UV}}$

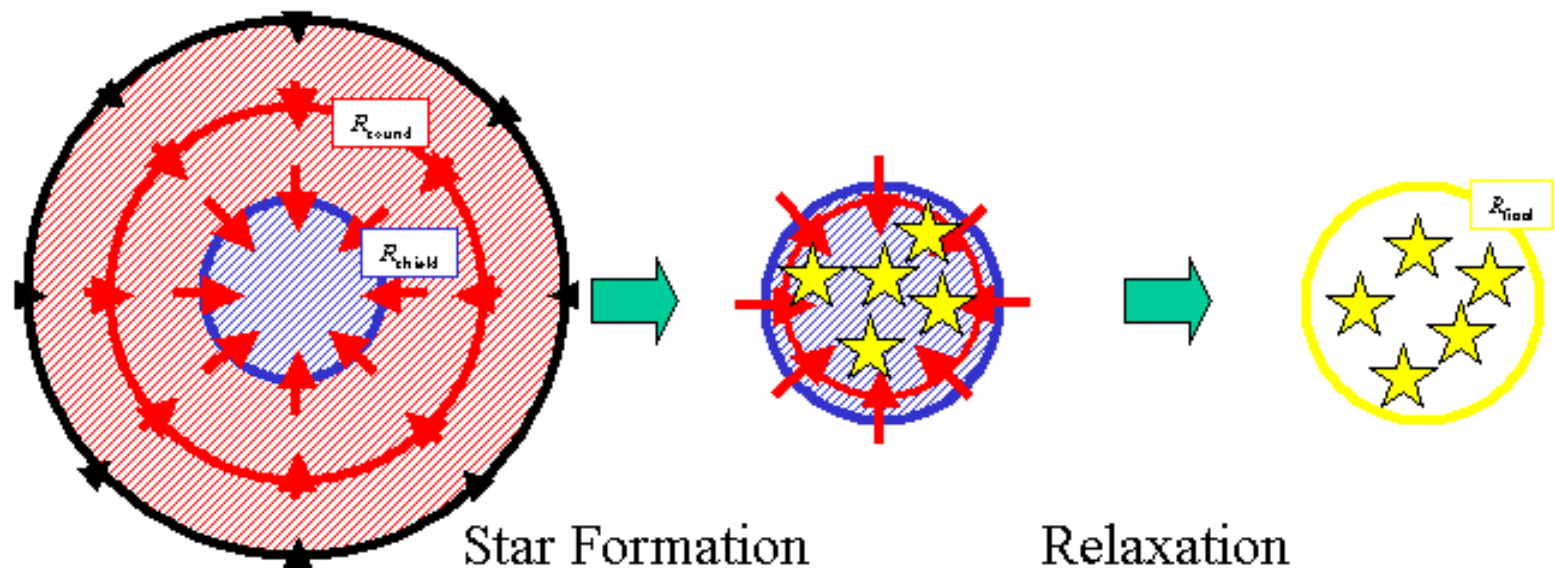
TIME

# 紫外線が強い場合 (落下速度が音速を超えているもの)

$(M_b = 10^7 M_\odot, z_c = 7, z_{UV} = 20, I_{21} = 100)$



$$M_{\text{tot}} < M_J(T = 10^4 \text{ K}) \approx 10^8 M_{\text{sun}}$$



$$V_r > C_s (T \approx 10^4 \text{ K}) \quad \text{at } R < R_{\text{sound}}$$
$$X_{\text{HI}} \approx 1 \quad \text{at } R < R_{\text{shield}}$$

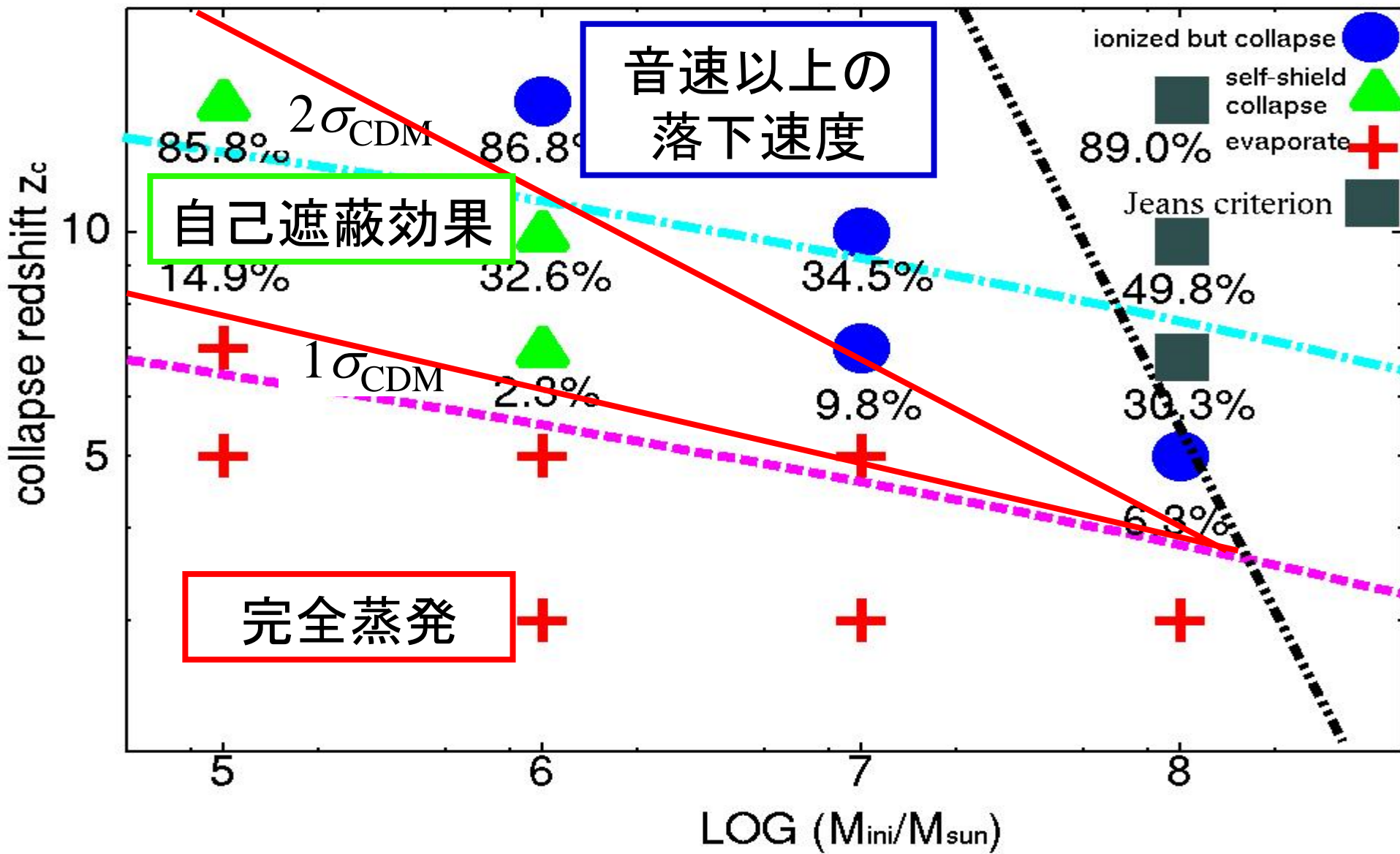
$z_{\text{UV}}$

TIME

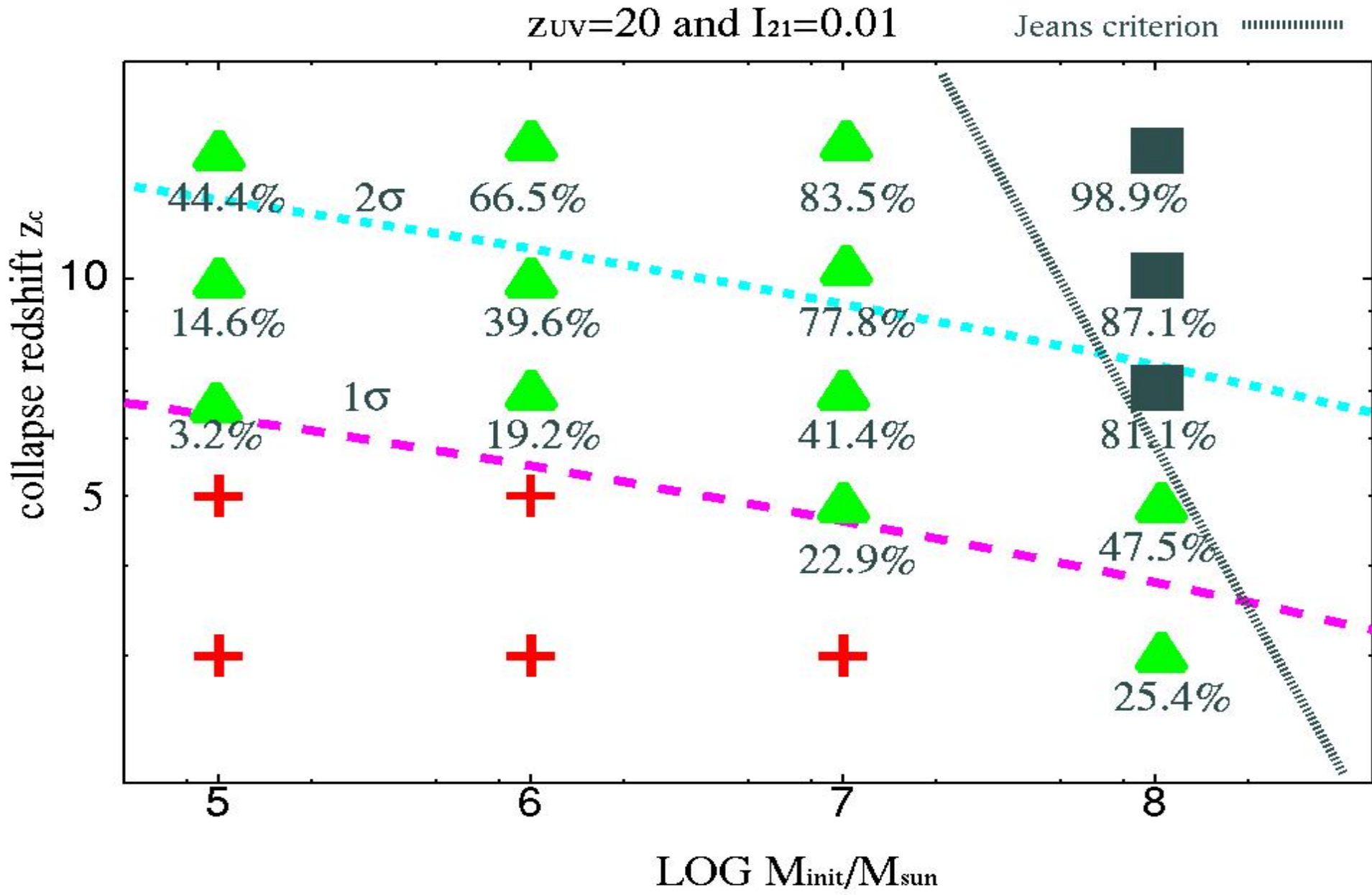
# 計算結果: 紫外線が強い場合

$z_{UV}=20$  and  $l_{21}=100$

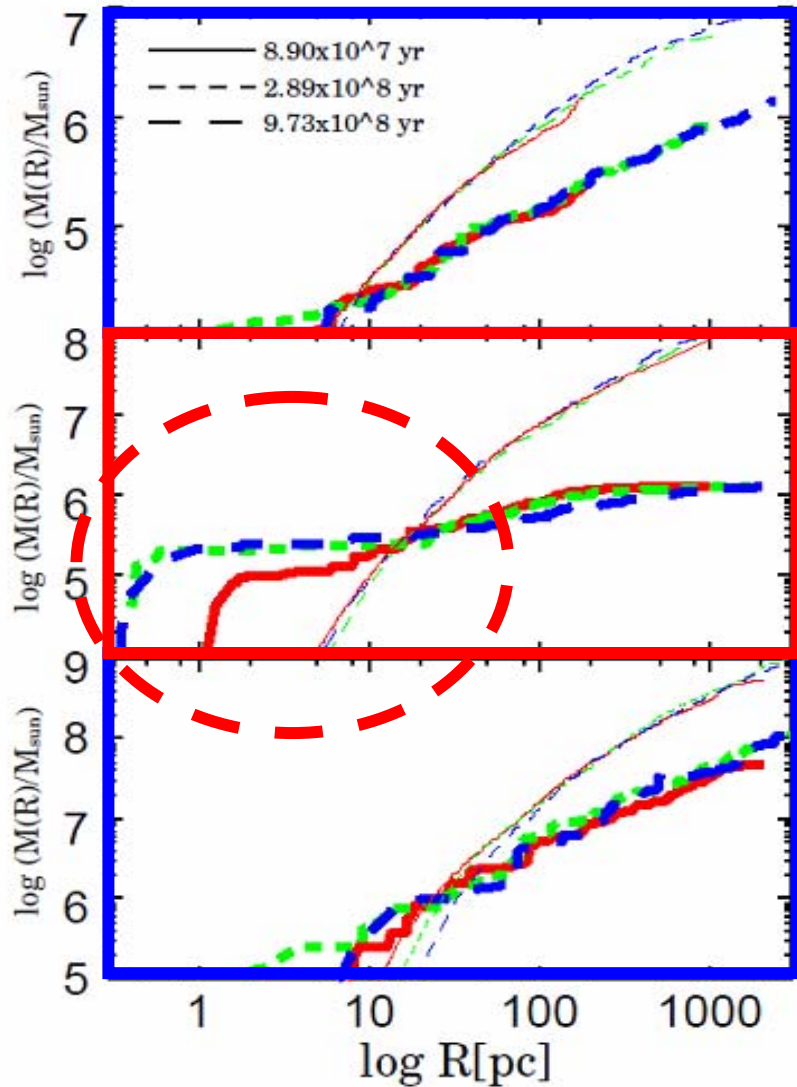
Jeans criterion  $\cdots\cdots\cdots$



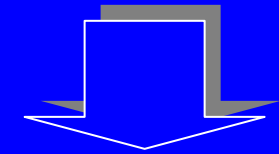
# 計算結果: 紫外線が弱い場合



# 計算結果・質量分布

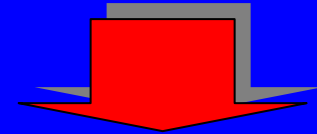


DMが支配的かつ低密度な天体が形成される



dSphのような天体

中心に高密度なバリオン成分を持った天体が形成される



球状星団のような天体？

ただし DM含む

# その後・・・Tidal stripping

Bromm & Clark (2003), Saitoh et al. (2006) etc...

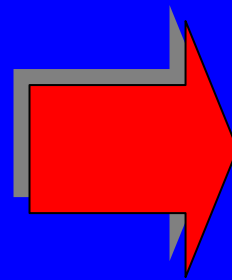
広がったDM haloは母銀河との潮汐相互作用によって剥ぎ取られ最終的には中心の星成分だけが残る。

潮汐半径の見積もり

$$\frac{Gm(< r_t)^2}{r_t^2} \approx \frac{2GM_G m(< r_t) r_t}{R_G^3}$$

母銀河の質量 $M_G$ ：  
 $10^{11}M_\odot$  (point mass)

銀河中心からの距離 $R_G$ ：  
3～10kpc



今回のSimulation  
から得られた質量  
分布の潮汐半径

30 pc ~ 100pc

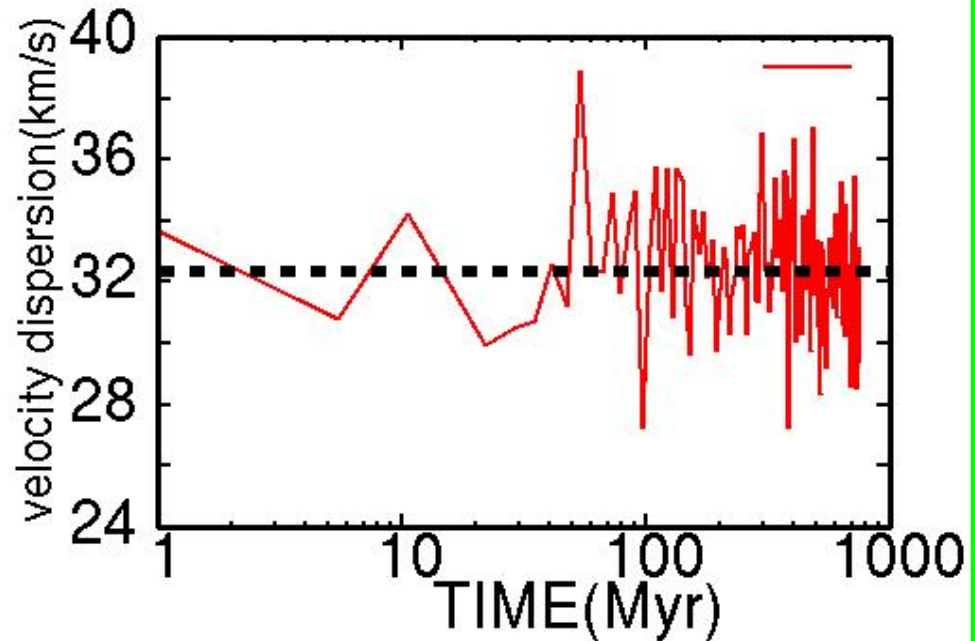
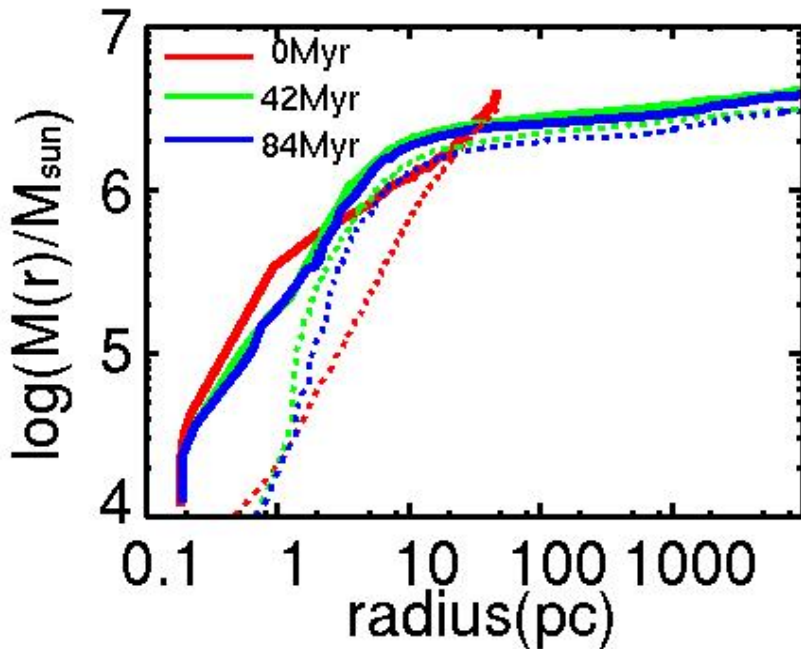
# 剥ぎ取りを受けた後の進化

## 音速以上の落下速度をもっていた場合

- ・有効半径 :  $R_h \sim 10\text{pc}$
- ・最終的な速度分散:  $\sim 30\text{ km/s}$
- ・トータル質量とバリオン質量の比:  $M_{\text{tot}}/M_* = 1.58$

⇒  $M/L$  小

Globular cluster 的!?



# $M_V - \sigma$ plane (simulation and observations)

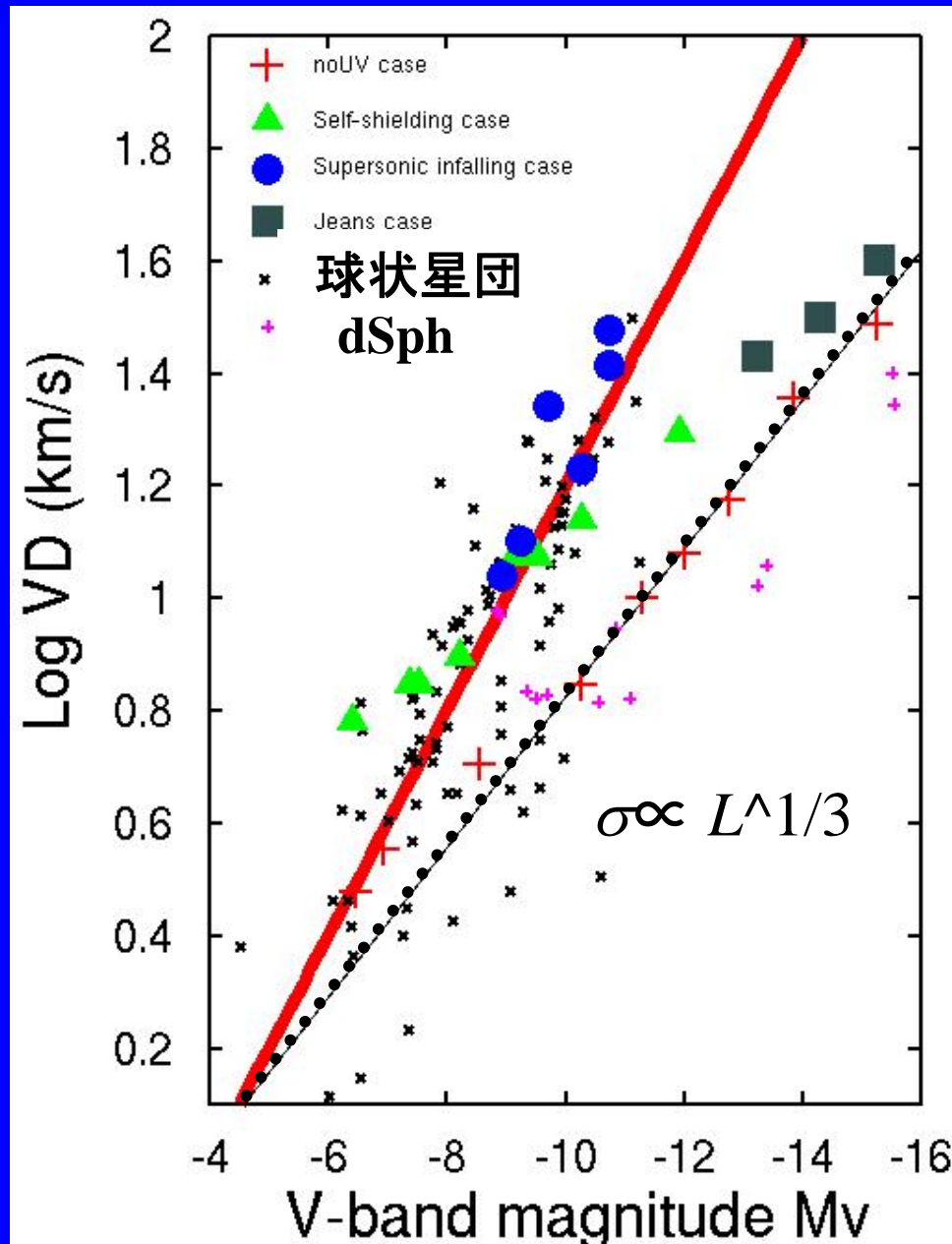
● は質量が重いほどエネルギー散逸大

傾きが1/3よりも急になる

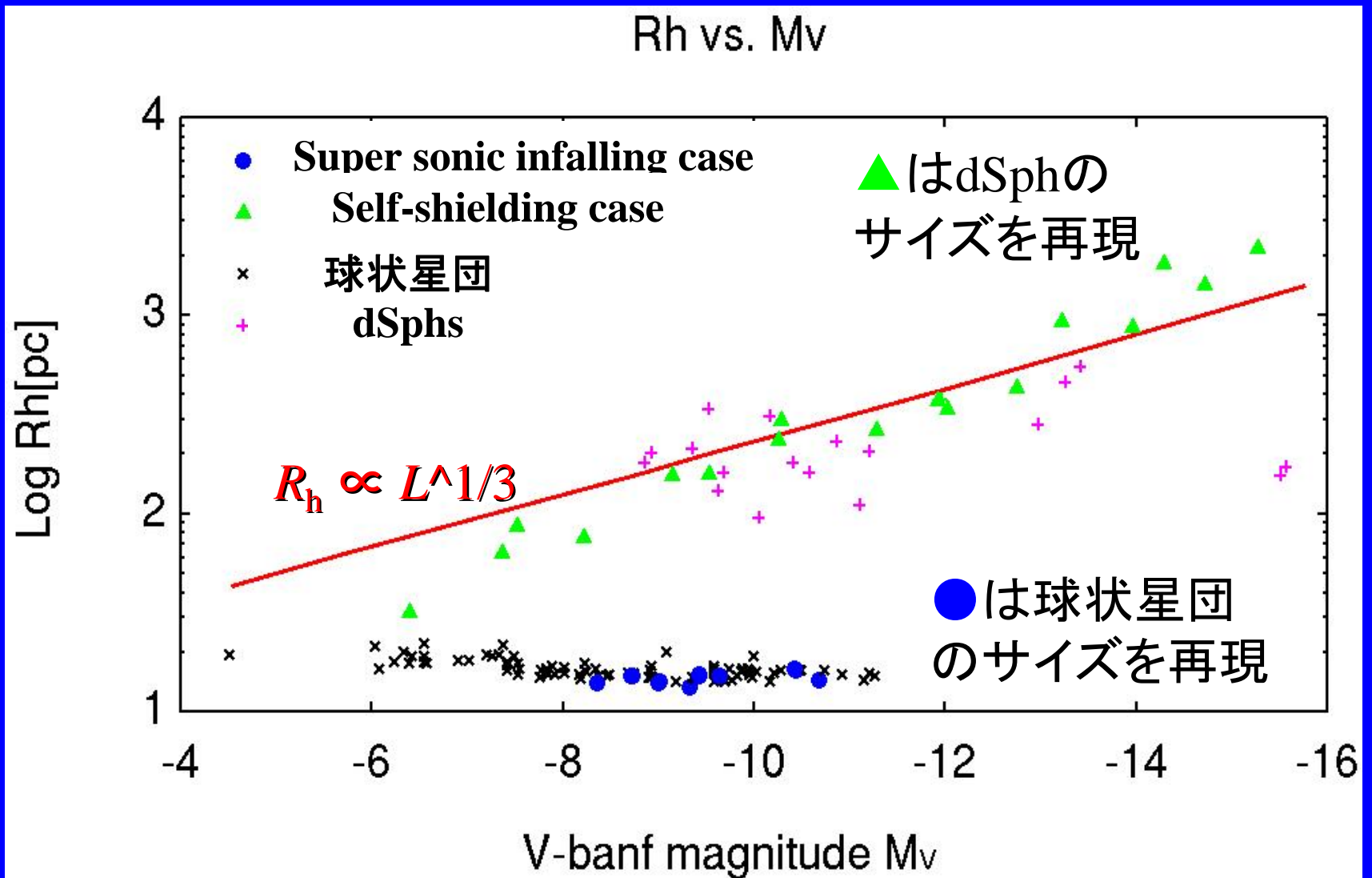
■ は大きなエネルギー散逸を起こさない

速度分散の上限値が存在

$\sigma_{\max} \sim 30 \text{ km/s}$   
 観測される球状星団の速度分散の最大値とほぼ一致



# $M_V$ vs. $R_h$ (simulation and observation)



4. Summary

And

Discussion

# 紫外線輻射場内での低質量天体形成をsimulate

弱輻射場 ( $I_{21} < 0.1$ )

&

1-2 $\sigma$  peak

自己遮蔽効果  
による天体形成

dSphsのような  
天体を形成

強輻射場 ( $I_{21} > 1$ )

&

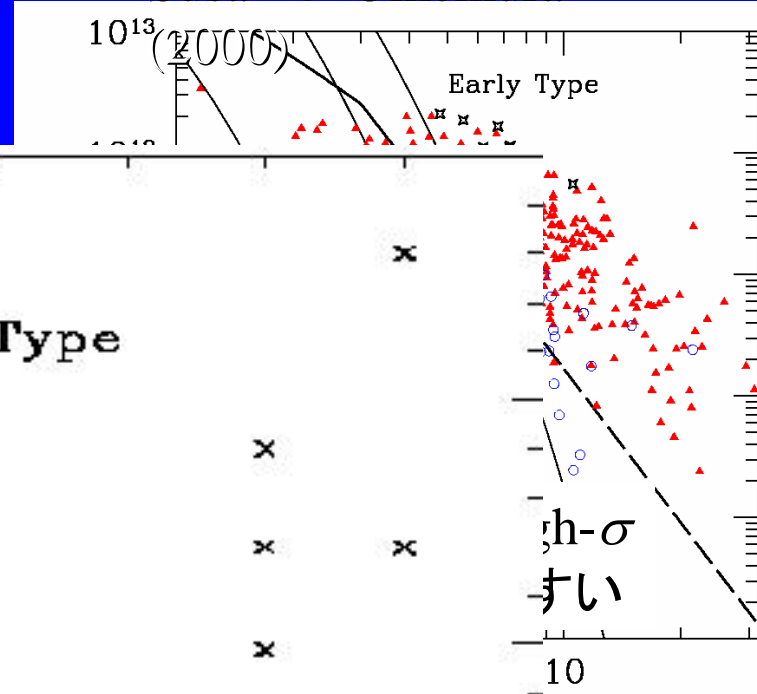
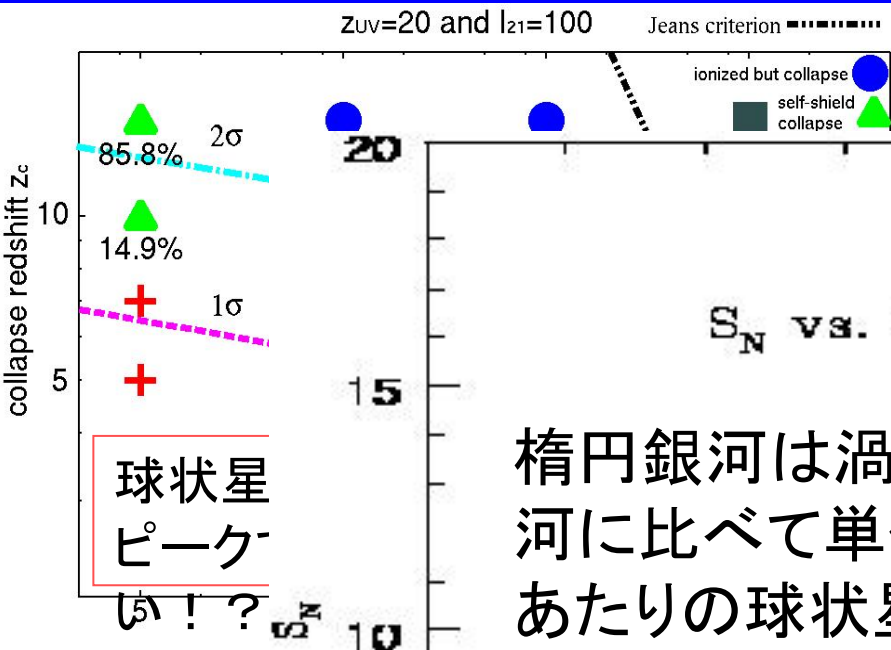
~2 $\sigma$  peak 以上

超音速ガス落下  
による天体形成

球状星団のよ  
うな天体を形成

# 球状星団形成と銀河形成

Susa & Umemura



S<sub>N</sub> vs. Galaxy Type

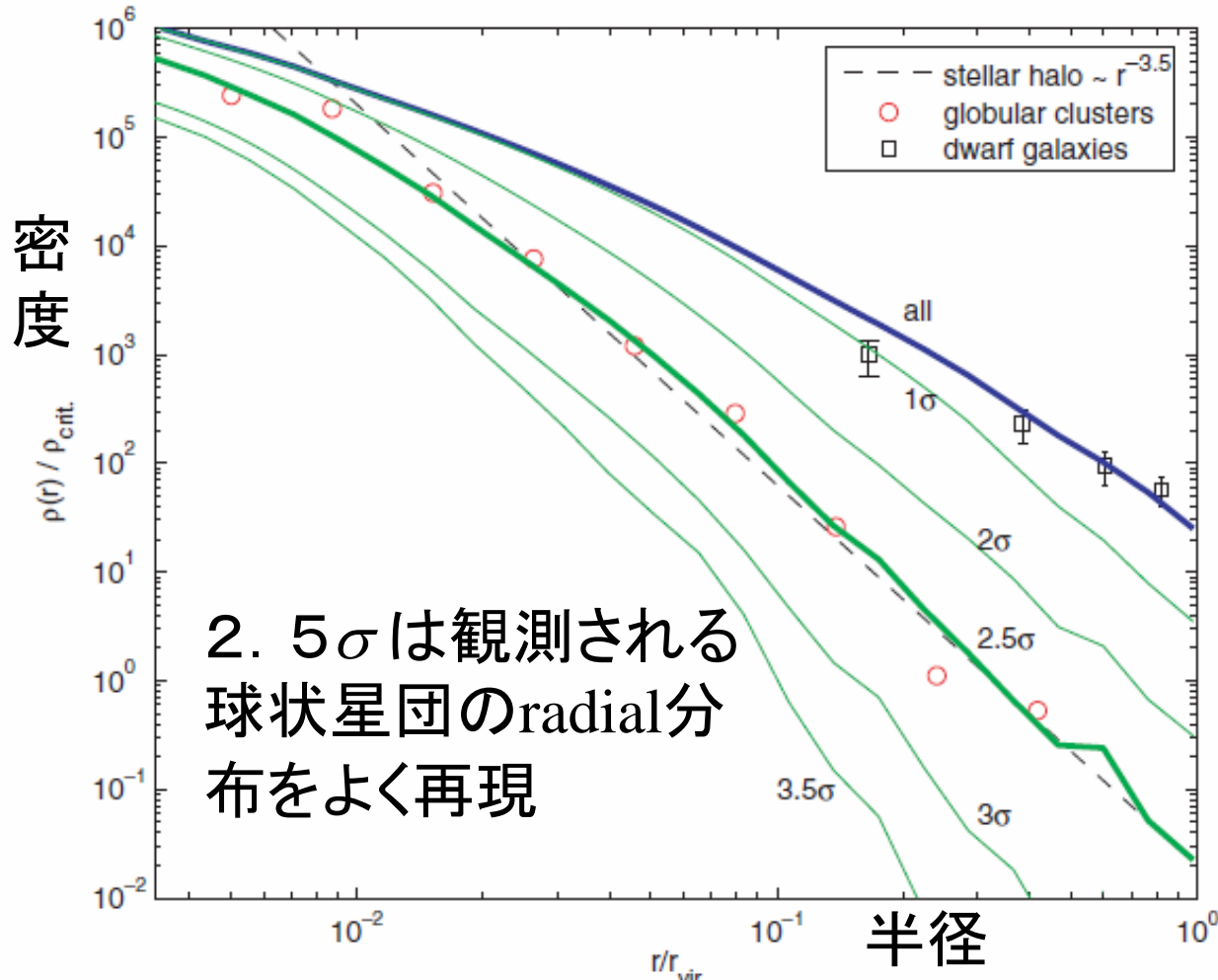
楕円銀河は渦巻き銀河に比べて単位光度あたりの球状星団数がfactor 3ほど多い

Harris  
1991

# Host galaxy halo 内での球状星団分布

Moore et al. (2006)

High- $\sigma$  peak で生まれたhaloほど  
より銀河中心に集中した分布になる



本研究の結果

2 $\sigma$ 以上で球状星  
団が形成される  
ことを示唆

母銀河内の球状星  
団分布を再現可  
能？

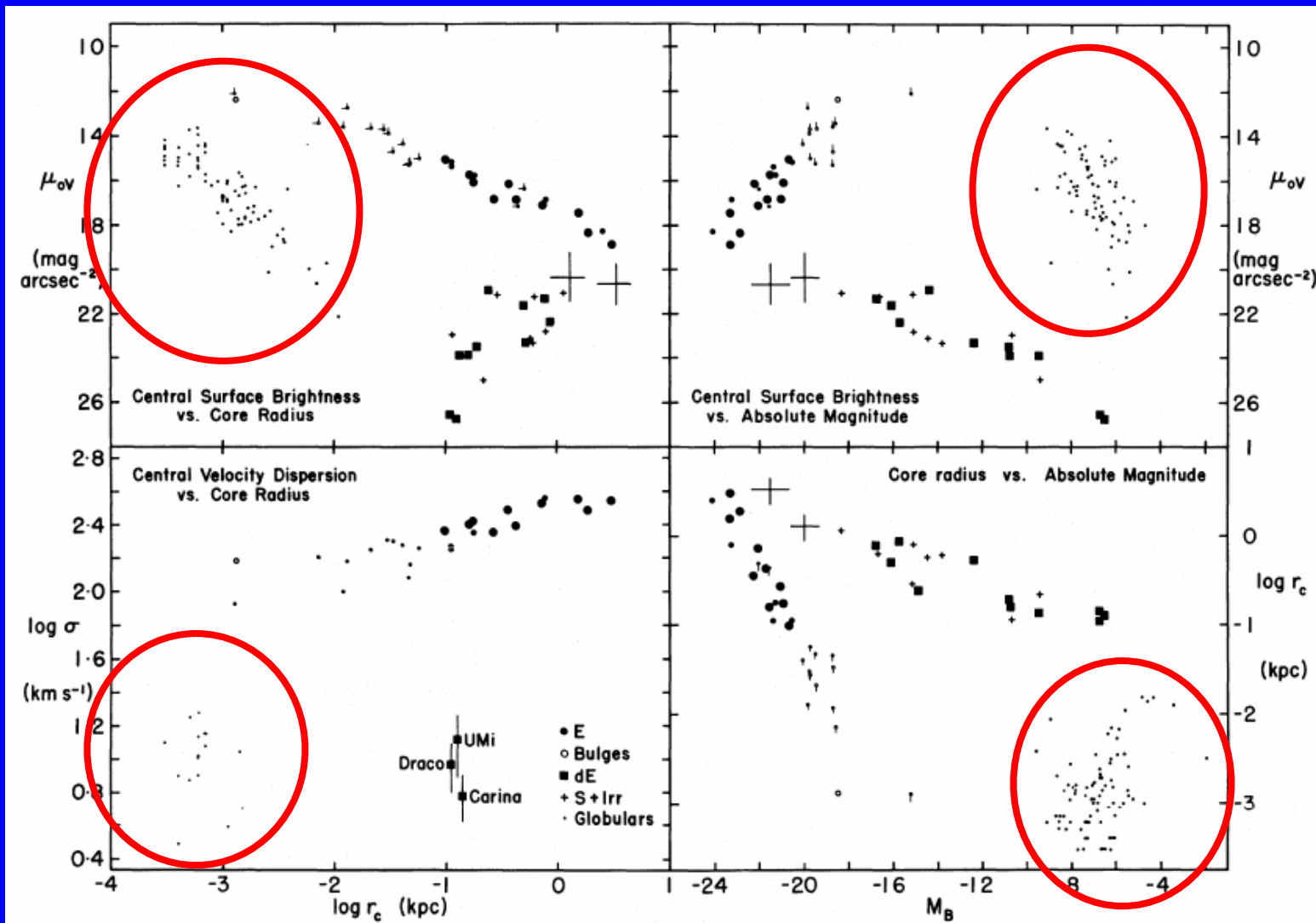
# Fundamental Plane

表面輝度

速度分散

表面輝度

コア半径



コア半径

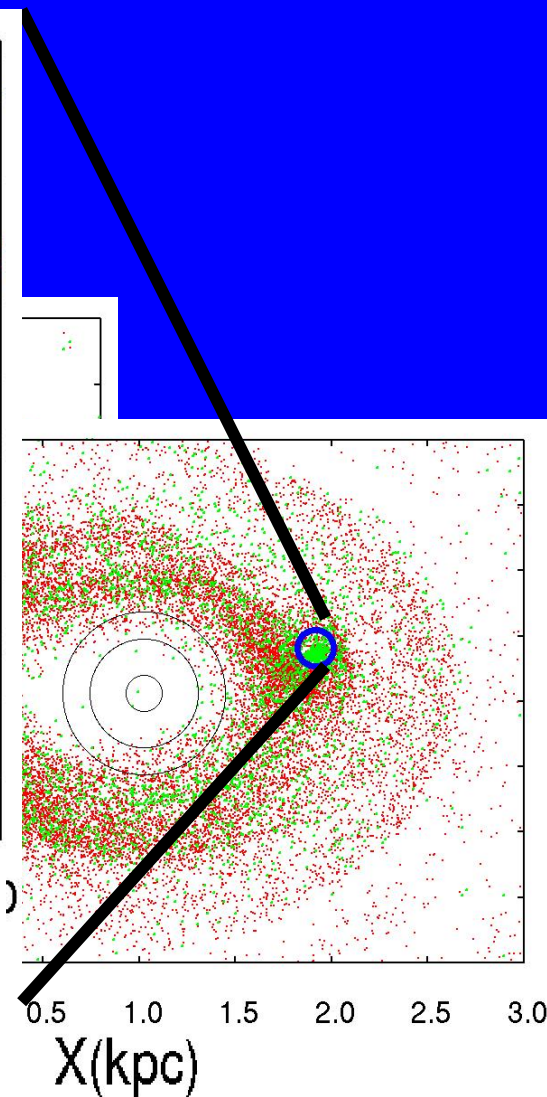
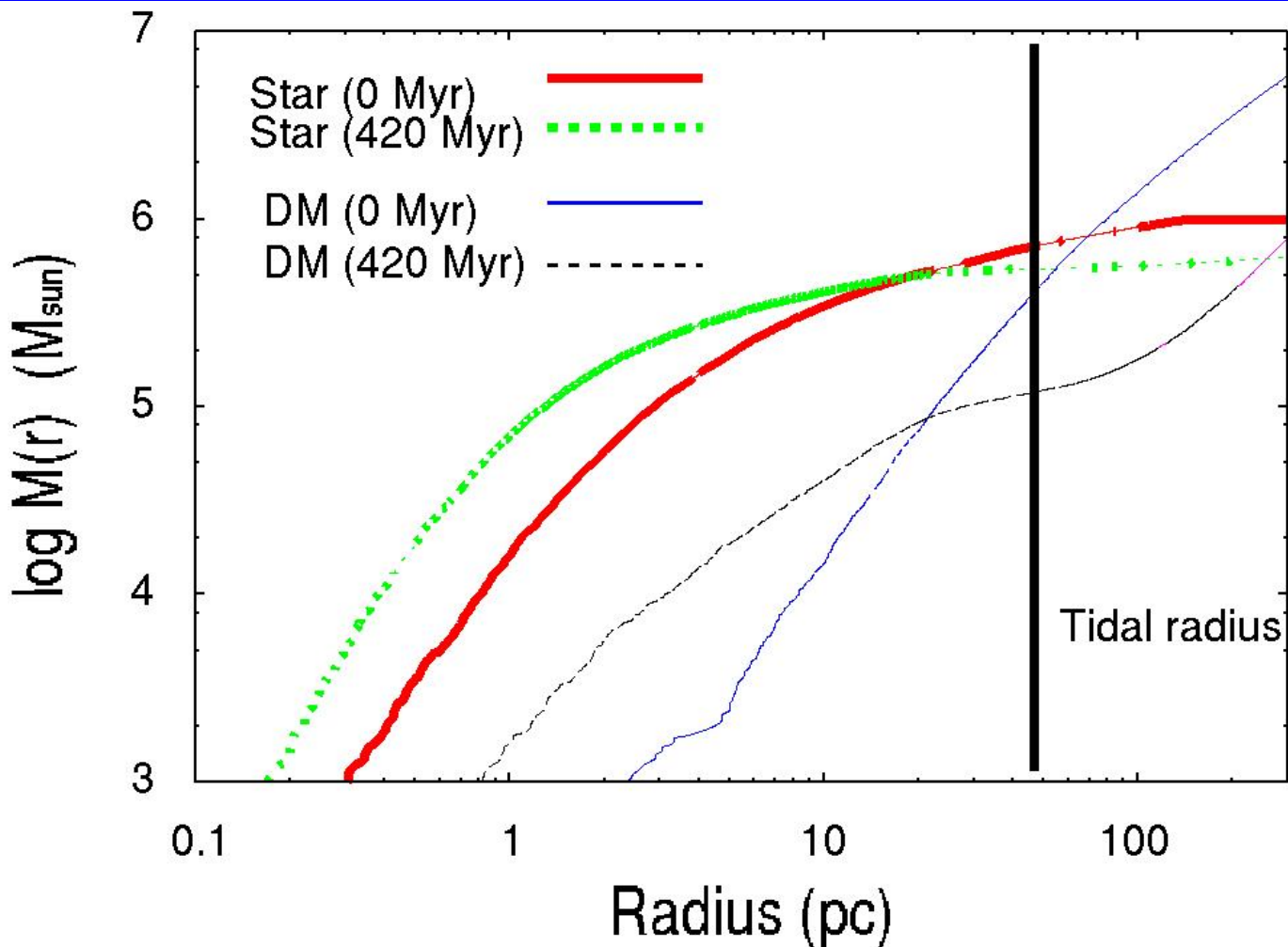
絶対等級

Kormendy (1985)

# Tidal stripping計算結果

・初期分布は1D simulation の結果を使う

・ $M_{\text{host}} = 10^9 M_{\odot}$ ,  $R_{\text{host}} = 1\text{kpc}$ , circular orbit



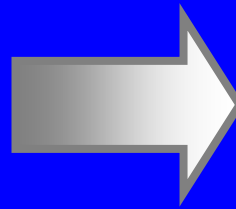
## 等級(V-band)の導出

今回の計算で最終的に星になれた質量

・観測される球状星団の質量光度比(可視光)

(Pryor and Meylan 1993)

$$\frac{M_{GC}}{L_V} = 2 \frac{M_{sun}}{L_{sun}}$$



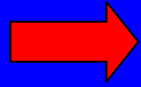
$$\frac{L_V}{L_{sun}} = \frac{1}{2} \frac{M_{fin}}{M_{sun}}$$

・観測と直接比較しやすいように光度⇒絶対等級変換(V-band)

$$M_V = -2.5 \log_{10} \frac{L_V}{L_{sun}} + 4.72$$

## Stromgren sphere

$$N_u = \frac{4\pi}{3} R_s^3 n_H^2 \alpha^{(2)}$$



$$R_s = \left( \frac{3N_u}{4\pi n_{c0}^2 (1+z)^6 \alpha^{(2)}} \right)^{1/3}$$

## Virialized radius

$$R_{vir} = \frac{1}{2} R_{max} = \frac{1}{2} \left( \frac{4}{3\pi^3} \frac{M}{\rho_{c0}} \right)^{1/3} \frac{1}{2^{2/3}} (1+z_c)^{-1}$$

## エディントン光度

$$L_{ed} = 1.3 \times 10^{38} \left( \frac{M_*}{M_{sun}} \right) M_* = 100 M_\odot, R_* = 1.72 \times 10^{12} [\text{cm}]$$



$$T_* = 5 \times 10^4 \text{K}$$

環境

# 速度分散と光度の初期質量依存性

自己遮蔽効果を考慮した最終的な質量

$$M_{\text{fin}} = M_{\text{ini}} - \underline{36^{1/3} \pi^{4/3} I_{\nu} n^{-5/3} \alpha^{(2)} m_{\text{p}}^{1/3} M_{\text{ini}}^{2/3}}$$

一様密度  
を仮定

質量減少による変化

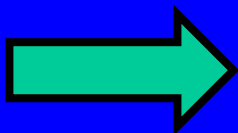
速度分散

$$\Delta\sigma = \sigma_{\text{ini}} - \sigma_{\text{fin}} \propto M_{\text{ini}}^{1/3} - (M_{\text{ini}} - AM_{\text{ini}}^{2/3})^{1/3}$$

光度

$$\Delta L = L_{\text{ini}} - L_{\text{fin}} \propto \underline{AM}_{\text{ini}}^{2/3}$$

輻射強度、密度に  
依存する係数



$$(\Delta\sigma)^3 < \Delta L$$

質量減少すると傾  
きが緩やかになる

## 2.3 Thermal process

### 加熱過程

光電離加熱: 
$$\Gamma_{ion} = \int_{\nu_L}^{\infty} d\nu \int d\Omega \frac{(h\nu - h\nu_L) a_\nu I_\nu}{h\nu}$$

### 冷却過程

- ・熱的制動放射冷却
- ・衝突電離冷却
- ・コンプトン冷却
- ・再結合放射冷却
- ・衝突解離冷却
- ・水素原子冷却
- ・水素分子(振動-回転)冷却

- ・各位置での輻射強度
- ・各分子種のfraction

の情報が必要！


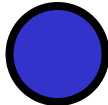

# 形成される天体の半径と速度分散(予想)

エネルギー散逸量(simulation)

ビリアル定理

ビリアル半径

速度分散

輻射強度 初期質量	$I_{21}=100$	No UV
$M_{ini} = 10^6 M_{sun}$	$R_{vir} = \underline{12 pc}$ $M_{fin} = 10^5 M_{sun}$  $\sigma = \sqrt{\frac{GM_{fin}}{R_{vir}}} = \underline{6km/s}$	$R_{vir} = 160pc$ $M_{fin} \sim M_{ini}$ $\sigma = \sqrt{\frac{GM_{fin}}{R_{vir}}} = 5km/s$
$M_{ini} = 10^7 M_{sun}$	$R_{vir} = \underline{7.7 pc}$ $M_{fin} = 2 \times 10^6 M_{sun}$  $\sigma = \sqrt{\frac{GM_{fin}}{R_{vir}}} = \underline{27km/s}$	$R_{vir} = 344pc$ $M_{fin} \sim M_{ini}$ $\sigma = \sqrt{\frac{GM_{fin}}{R_{vir}}} = 11km/s$
$M_{ini} = 10^8 M_{sun}$	$R_{vir} = \underline{44 pc}$ $M_{fin} = 3 \times 10^7 M_{sun}$  $\sigma = \sqrt{\frac{GM_{fin}}{R_{vir}}} = \underline{44km/s}$	$R_{vir} = 747pc$ $M_{fin} \sim M_{ini}$ $\sigma = \sqrt{\frac{GM_{fin}}{R_{vir}}} = 24km/s$

