

# 原始銀河形成における フィードバック過程

北山哲

東邦大学理学部物理学科

# 銀河形成の基本要素

1. 密度ゆらぎ成長とダークマターハロー形成
2. ガスの冷却と収縮
3. 星形成
4. フィードバック(輻射、超新星爆発、金属汚染、、、) etc.

⇒ 2以降が「ループ」になる

銀河形成の理解を困難にする本質的要因

# フィードバック過程

## 1. Radiative feedback

内部ソース、背景輻射等による電離、加熱

## 2. Mechanical feedback

輻射、超新星爆発等によるガス流出、圧縮

## 3. Chemical feedback

重元素汚染、ダスト放出による組成変化

## 4. “Electro-magnetic feedback”

構造形成、銀河回転等に伴う磁場の増幅

# 輻射によるフィードバック

## 1. 電離

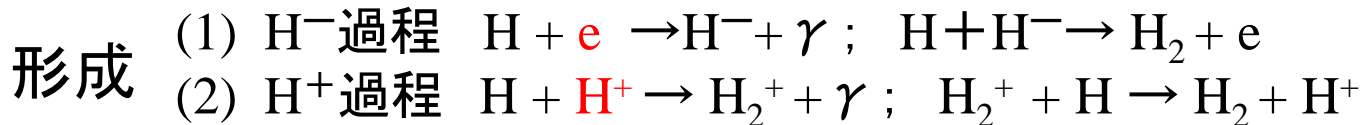
HI:  $>13.6\text{eV}$ , HeI:  $>24.6\text{eV}$ , HeII:  $>54.4\text{eV}$

## 2. 加熱 ( $\sim 10^4\text{K}$ )

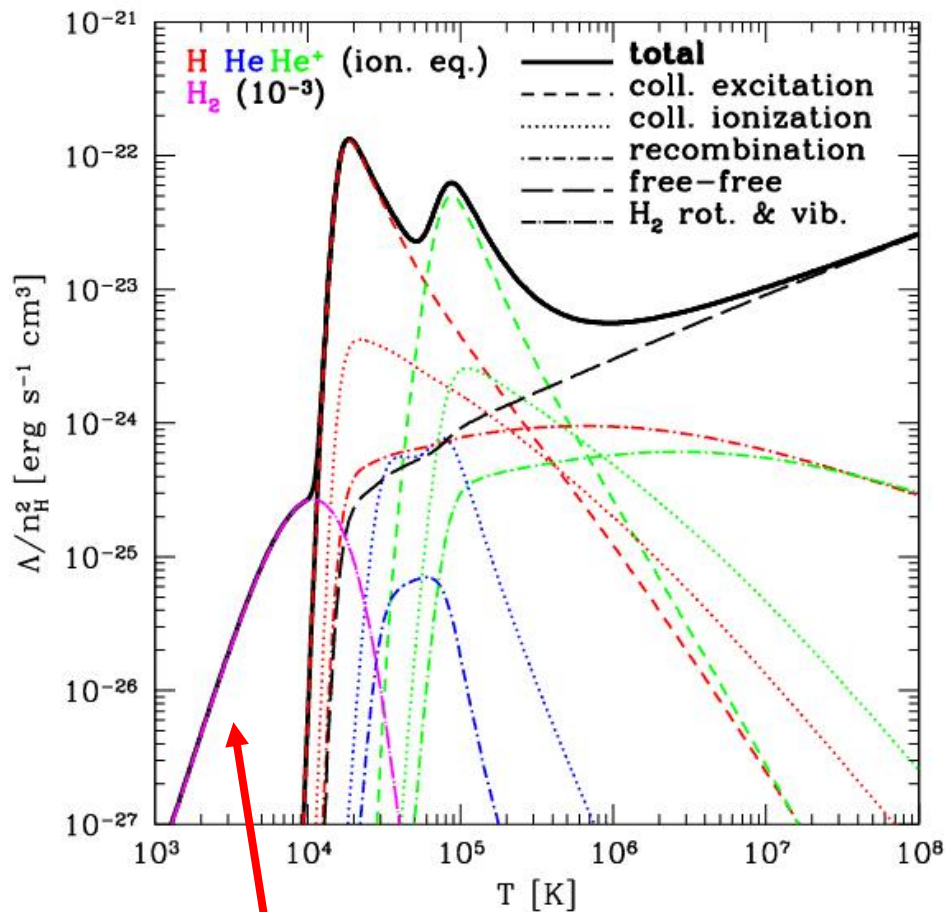
$$M_J^B = 10^8 M_\odot \left( \frac{T}{10^4 \text{ K}} \right)^{3/2} \left( \frac{n}{10^{-3} \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1/2}$$

## 3. 水素分子の形成・破壊

(状況ごとに、正負いずれにも寄与)

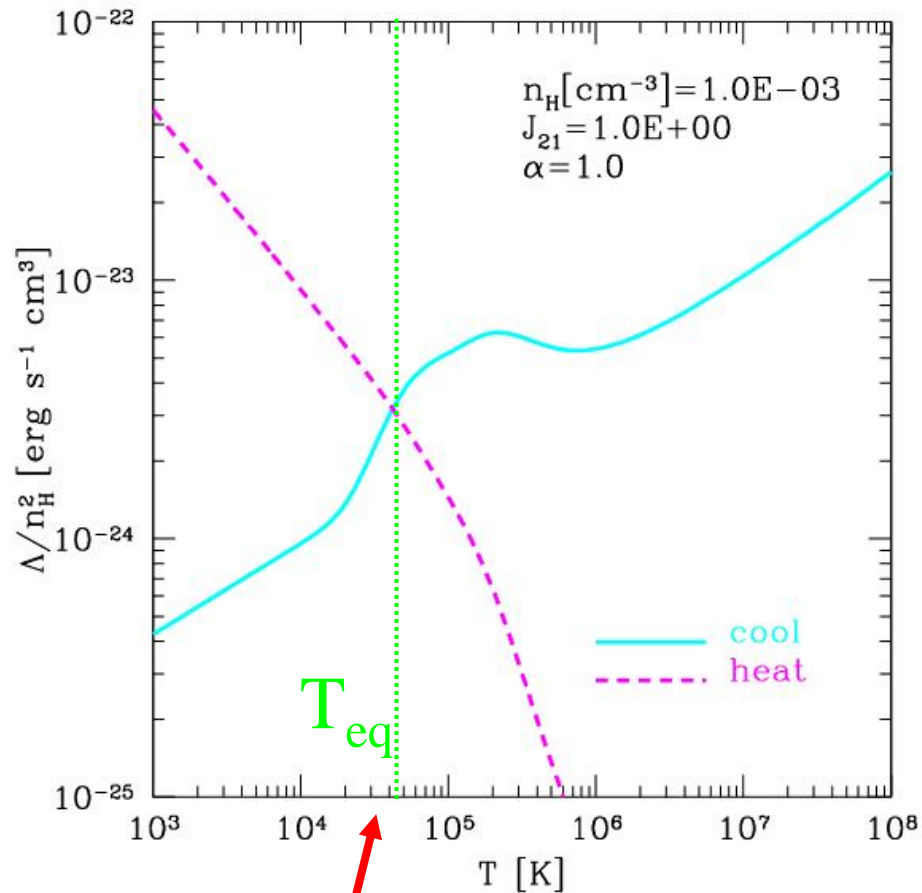


# 原始ガス(H+He)の冷却関数



UVなし

H<sub>2</sub>によってT < 10<sup>4</sup>に冷却



UVありの例

T ~ 10<sup>4</sup> K に加熱

# 輻射輸送の重要性

## 1. 電離光子の平均自由行程

$$L(\tau_{\text{H}} = 1) = 40\text{pc} \Delta^{-3} \left(\frac{1+z}{20}\right)^{-3}$$

$$\text{c.f. } R_{\text{vir}} = 340\text{pc} \left(\frac{M_{\text{halo}}}{10^7 M_{\odot}}\right)^{1/3} \left(\frac{1+z}{20}\right)^{-1}$$

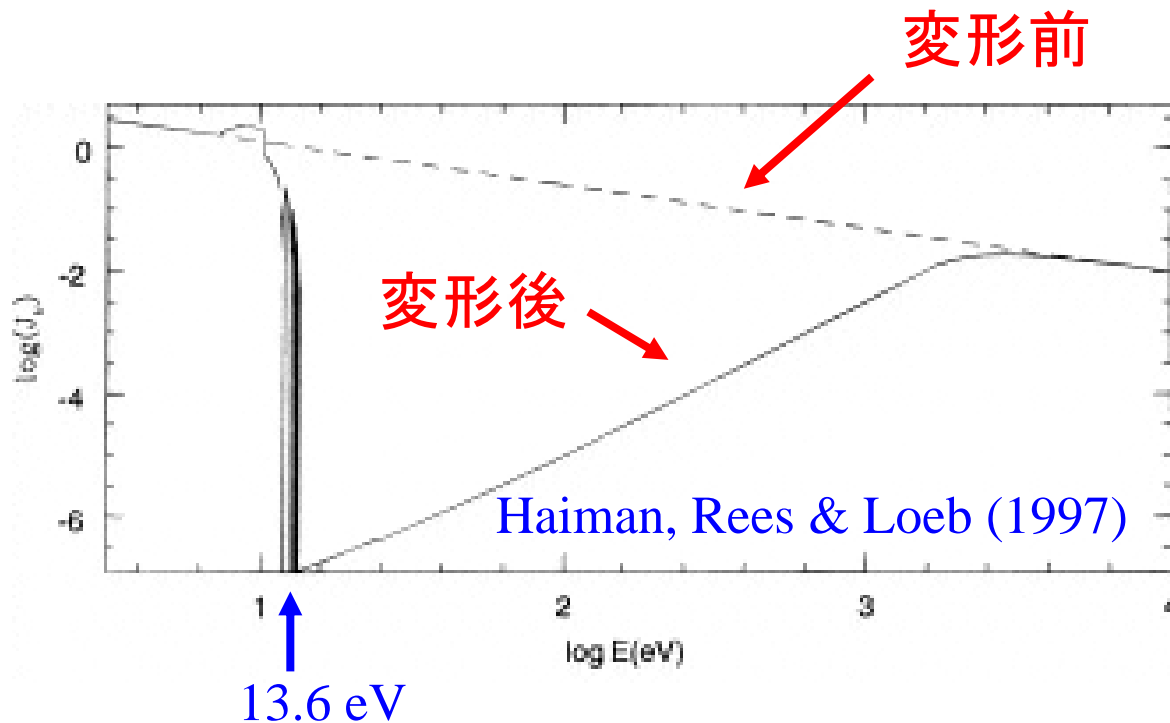
## 2. 再結合(水素)にかかる時間

$$t_{\text{rec}} = 6 \times 10^7 \text{yr} \Delta^{-3} \left(\frac{1+z}{20}\right)^{-3} \left(\frac{T}{10^4 \text{K}}\right)^{0.7}$$

$$\text{c.f. } \Delta=1 \text{ (宇宙平均)では、} z>7 \text{で } t_{\text{rec}} < t_{\text{H}}$$

特に high  $z$  では、光子の吸収・再放出が重要

# 輻射輸送による光子スペクトルの変化



$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = -I_\nu + S_\nu$$

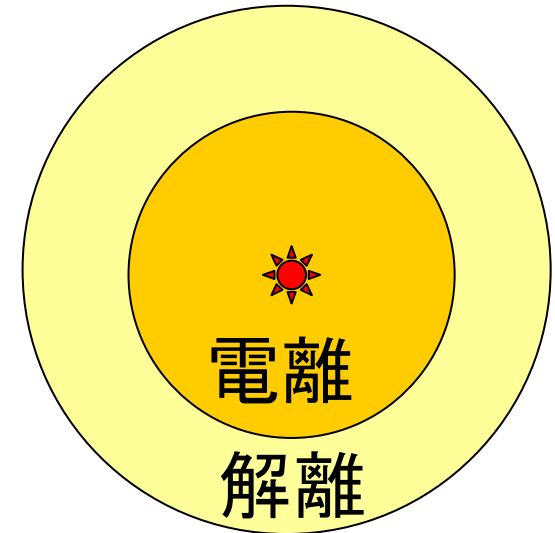
吸収 放出

電離光子 ( $E > 13.6$  eV) は遮蔽されやすい  
 $H_2$  解離光子 ( $E = 11.2 - 13.6$  eV) は遮蔽されにくい

# 大質量星による輻射フィードバック

(TK, Yoshida, Susa & Umemura 2004)

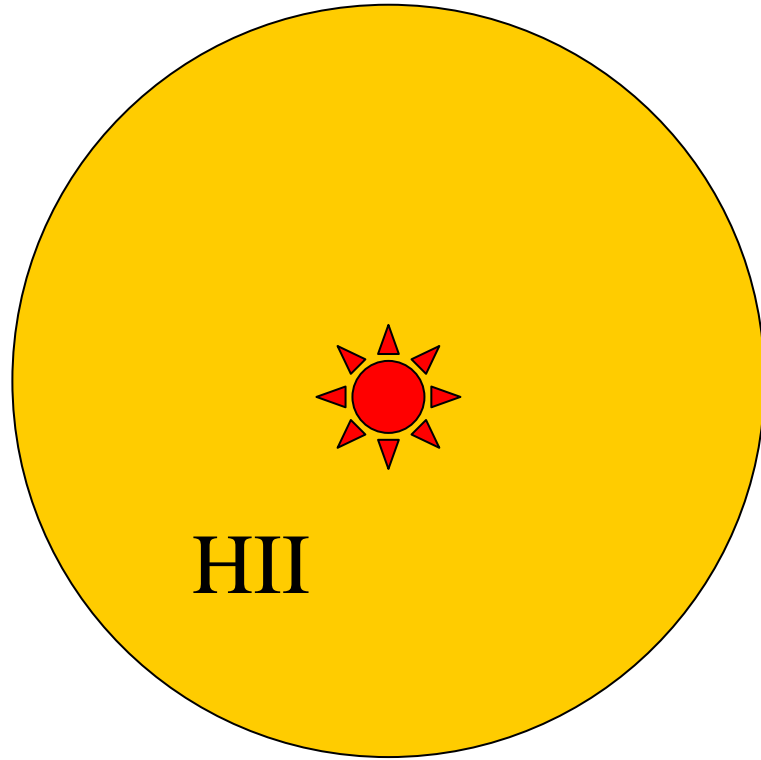
原始銀河中に形成された大質量星  
↓  
周囲のガス原子の電離、分子の解離  
↓  
**星形成の抑制**  
(cf. Omukai & Nishi 1999)  
**ガスの流出**  
**光子の脱出**



力学時間                      ~10 Myr  
大質量星の寿命            a few Myr

1. どれだけの光子、ガスが、原始銀河から脱出するか？  
宇宙再電離への寄与は？
2. 星形成はいつまで抑制されるか？  
⇒ 輻射輸送、化学反応 & 流体のダイナミクス

# HII領域の進化: 一様媒質 (1)



静的解

電離光子の放射率 = 再結合率

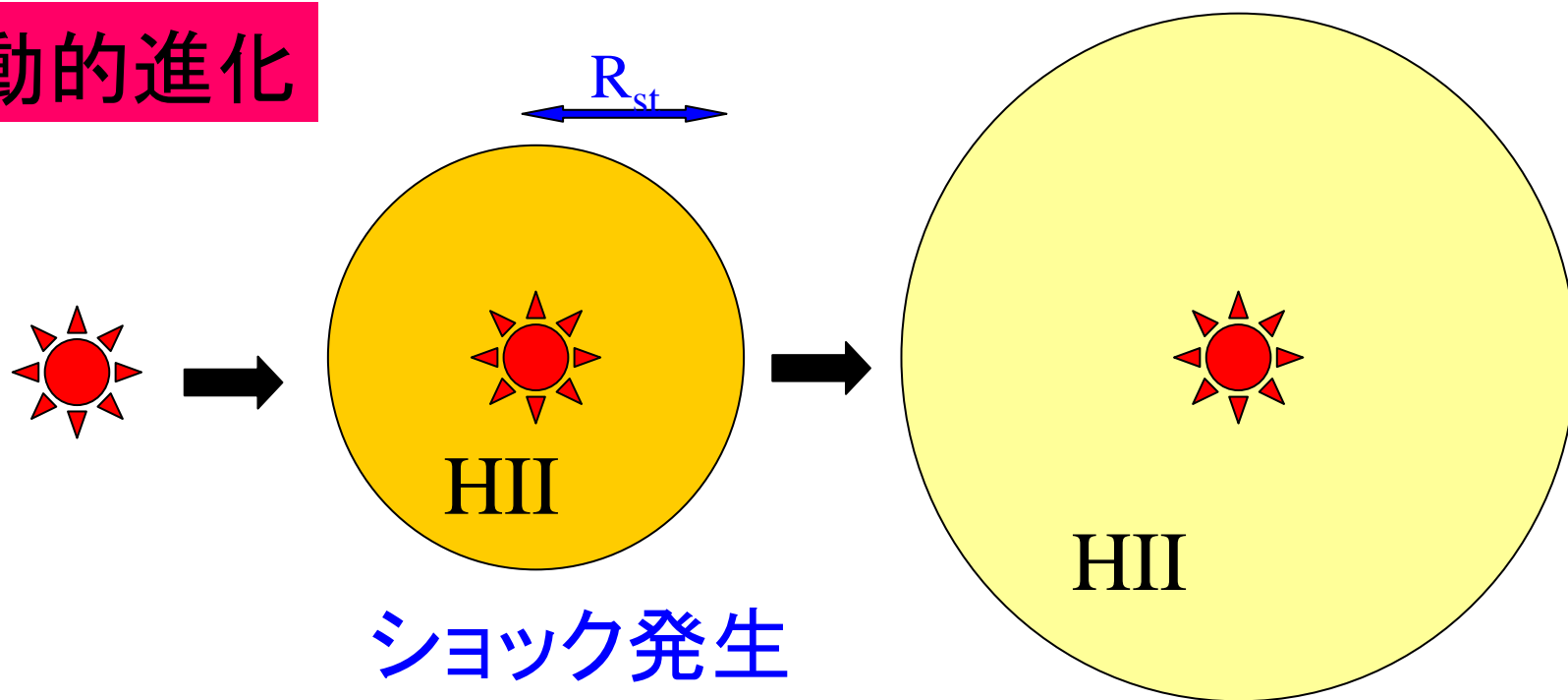


Stroemgren 球 (1939)

$$R_{\text{st}} = 150 \text{ pc} \left( \frac{\dot{N}}{10^{50} \text{ 1/s}} \right)^{1/3} \left( \frac{n_H}{1 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-2/3}$$

# HII領域の進化: 一様媒質 (2)

動的進化



$$r_{\text{ion}} < R_{\text{st}}$$

$$v_{\text{ion}} \gg c_s$$

R-type front  
高速

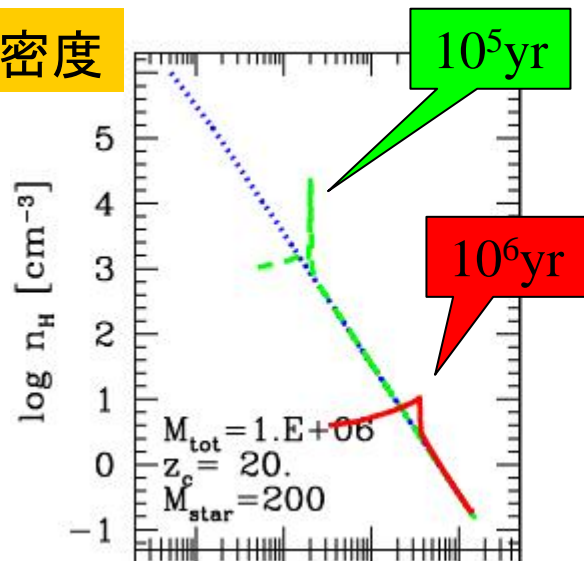
$$r_{\text{ion}} > R_{\text{st}}$$

$$v_{\text{ion}} \sim c_s (\sim 30 \text{ km/s})$$

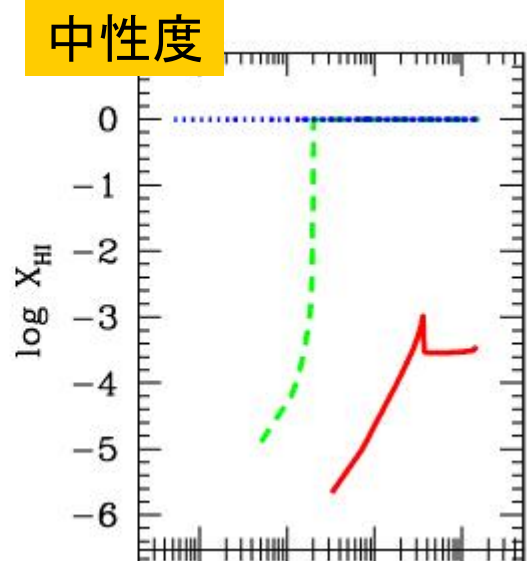
D-type front  
低速

# HII領域の進化: 一般の密度プロファイル

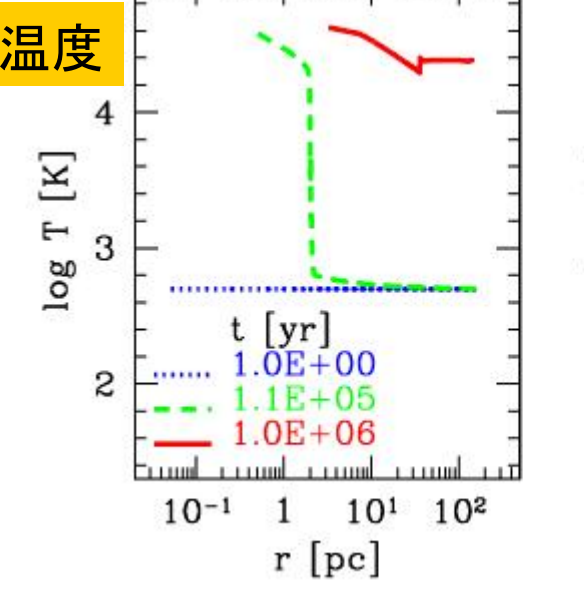
密度



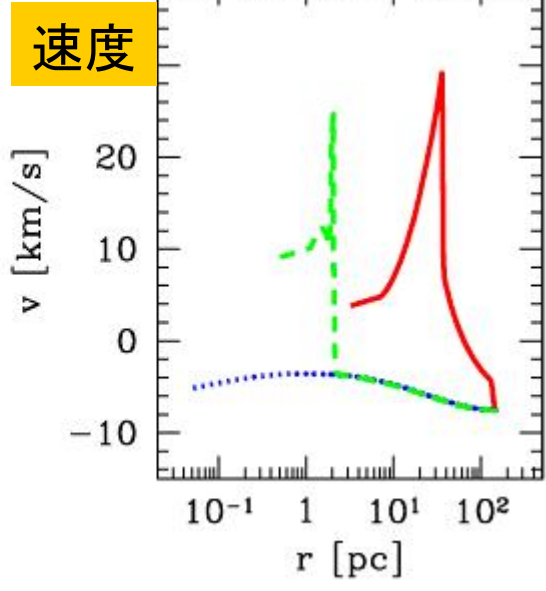
中性度



温度



速度



1次元輻射流体計算

$$M_{\text{halo}} = 10^6 M_{\text{sun}}$$

$$z_c = 20, n \propto r^{-2}$$

中心に星一つ

$$M_{\text{star}} = 200 M_{\text{sun}}$$

1. 中心部高密度

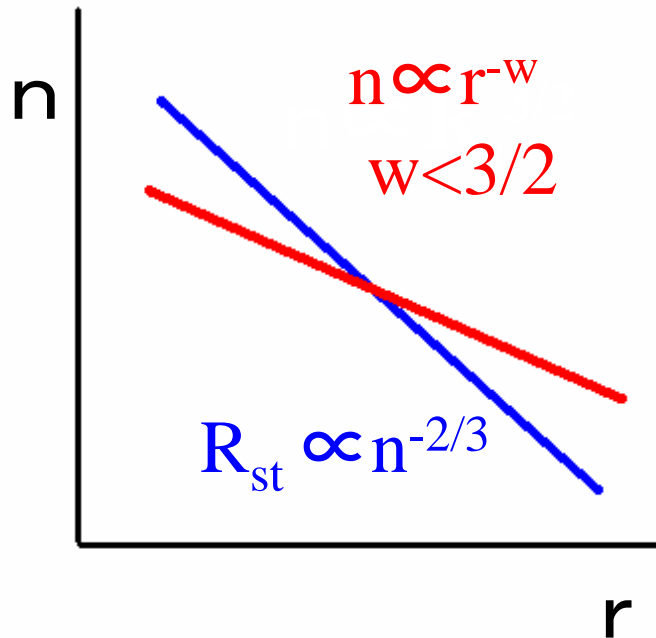
$$\rightarrow v_{\text{ion}} \sim c_s$$

2. ショックで密度減少

$$\rightarrow v_{\text{ion}} \gg c_s$$

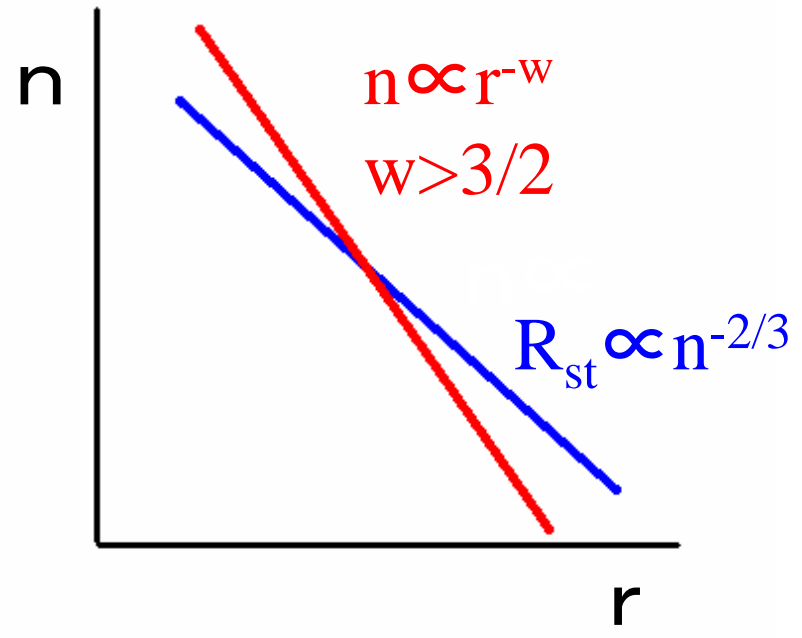
D-type  $\rightarrow$  R-type  
 低速 高速  
 (一様媒質の逆)

# 密度プロファイルとイオン化面タイプ



$$r < R_{st} \rightarrow r > R_{st}$$

R-type → D-type  
 高速 低速



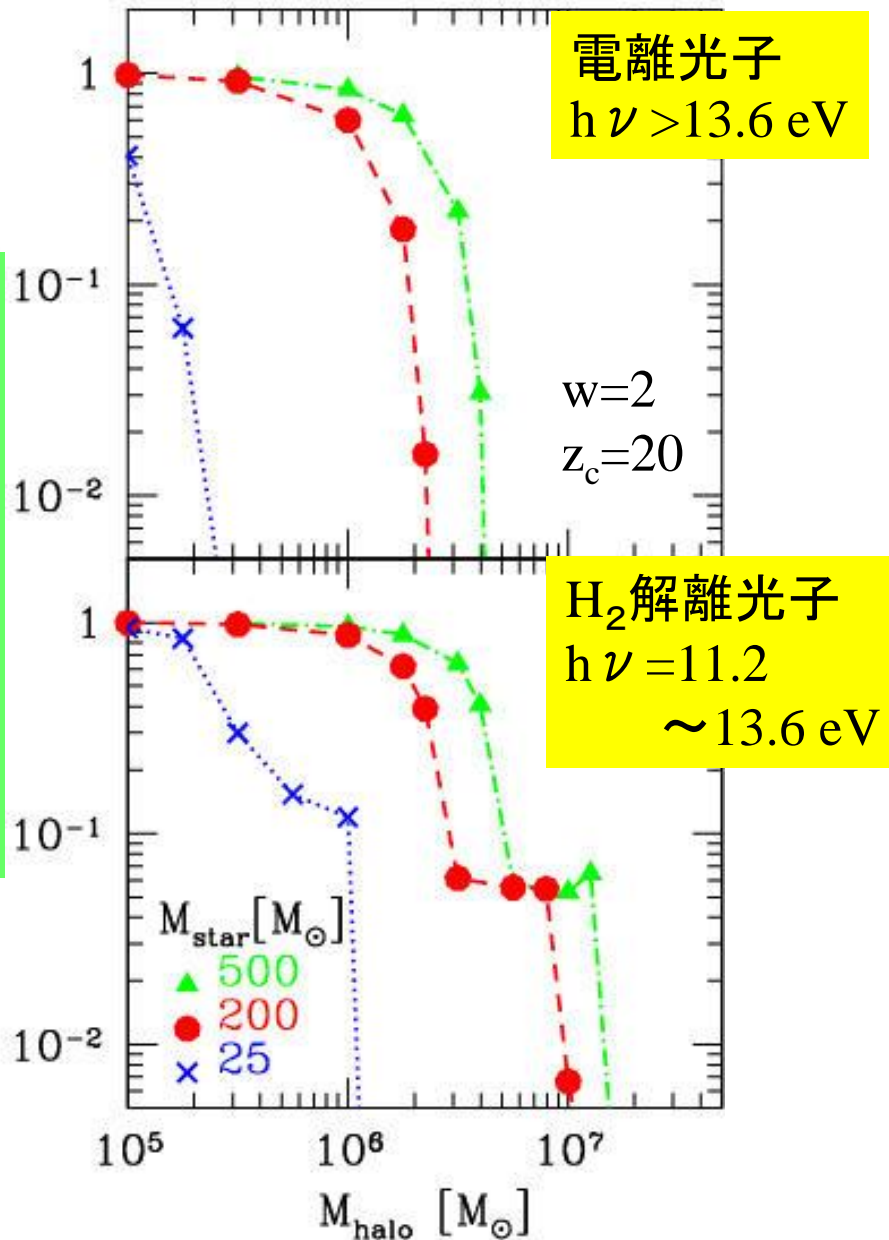
$$r > R_{st} \rightarrow r < R_{st}$$

D-type → R-type  
 低速 高速

※ D-type front の伝播距離  $\sim 10\text{pc}$  in  $\sim \text{Myr}$   
 $\rightarrow r_{\text{vir}} > 100\text{pc}$  まで電離するには、R-type が不可欠

# UV光子の脱出率

中心星の寿命内の脱出率



low mass halo

星の寿命内にD→R-type

完全電離、解離  
光子脱出率 $\sim 1$

急峻な境界

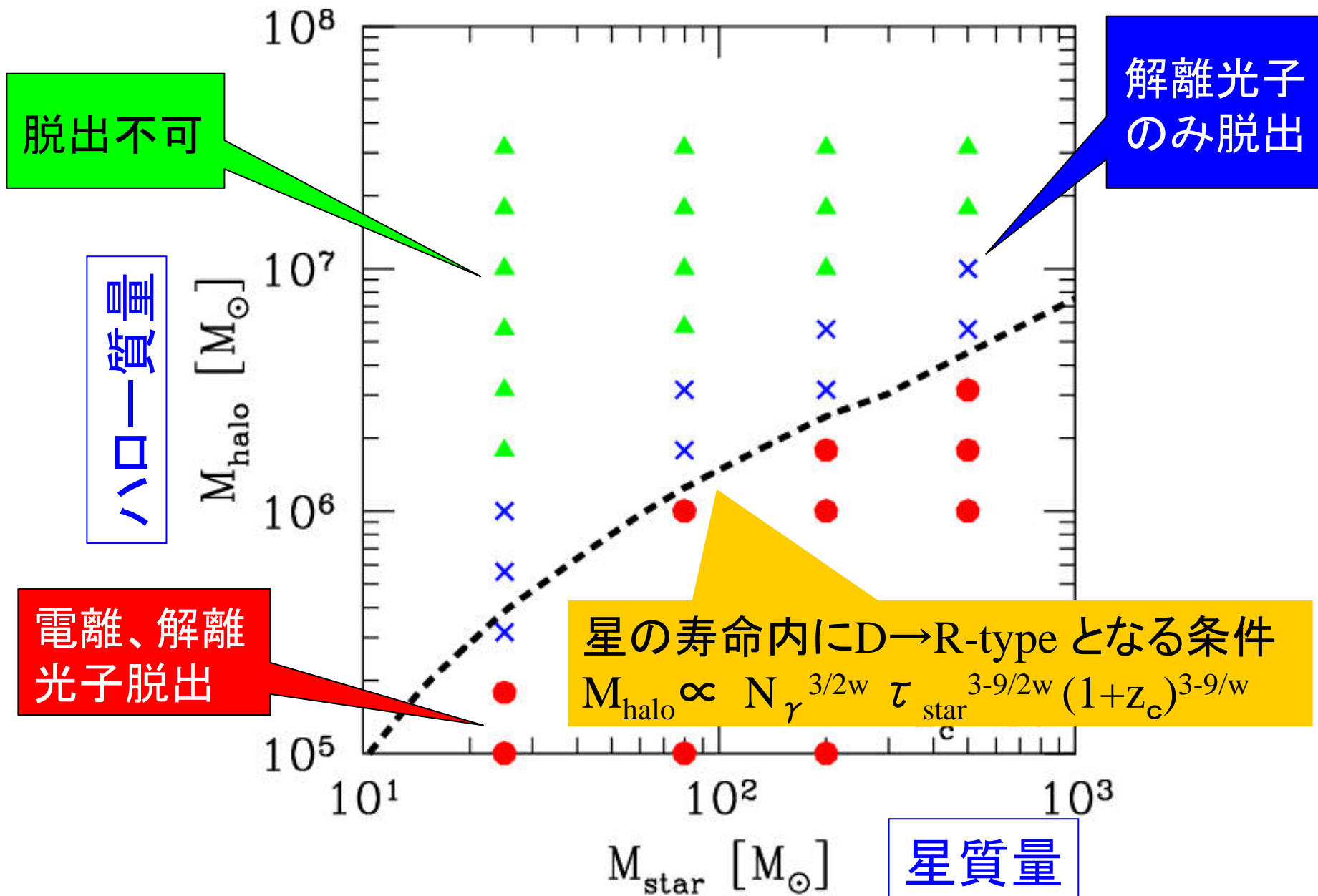
$h\nu > 13.6 \text{ eV}$

$M_{\text{crit}} \sim 10^6 M_{\text{sun}}$

$h\nu = 11.2 - 13.6 \text{ eV}$

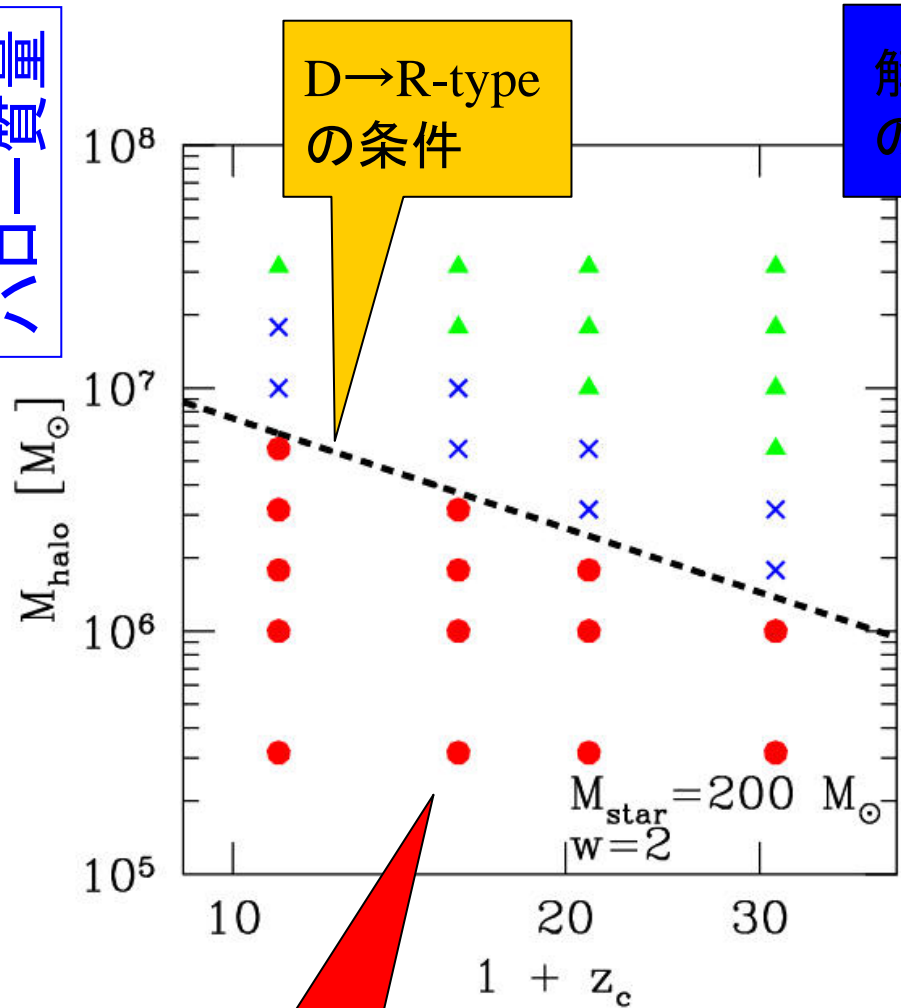
$M_{\text{crit}} \sim 10^7 M_{\text{sun}}$

# UV光子脱出の条件 (1)



# UV光子脱出の条件 (2)

ハロ質量



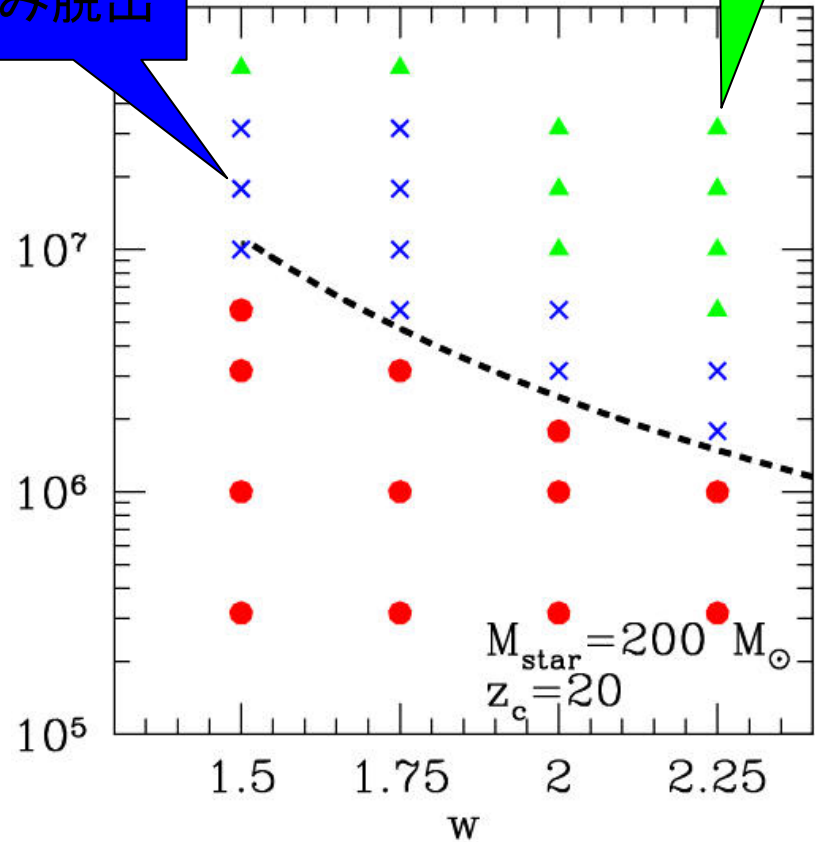
D→R-type  
の条件

解離光子  
のみ脱出

脱出不可

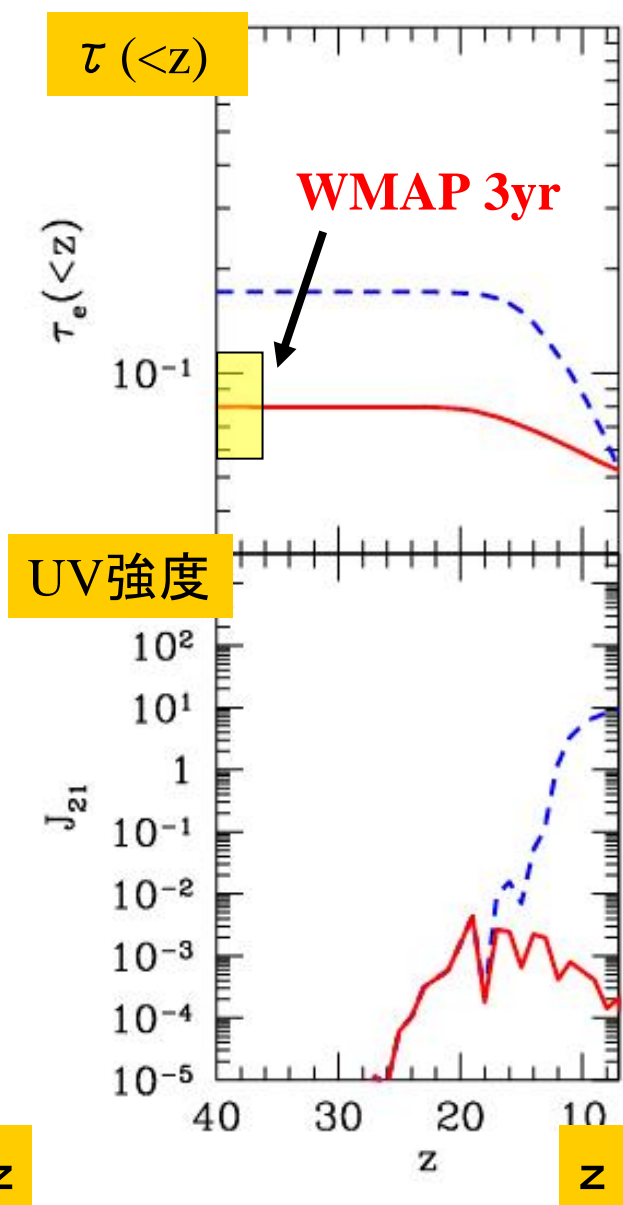
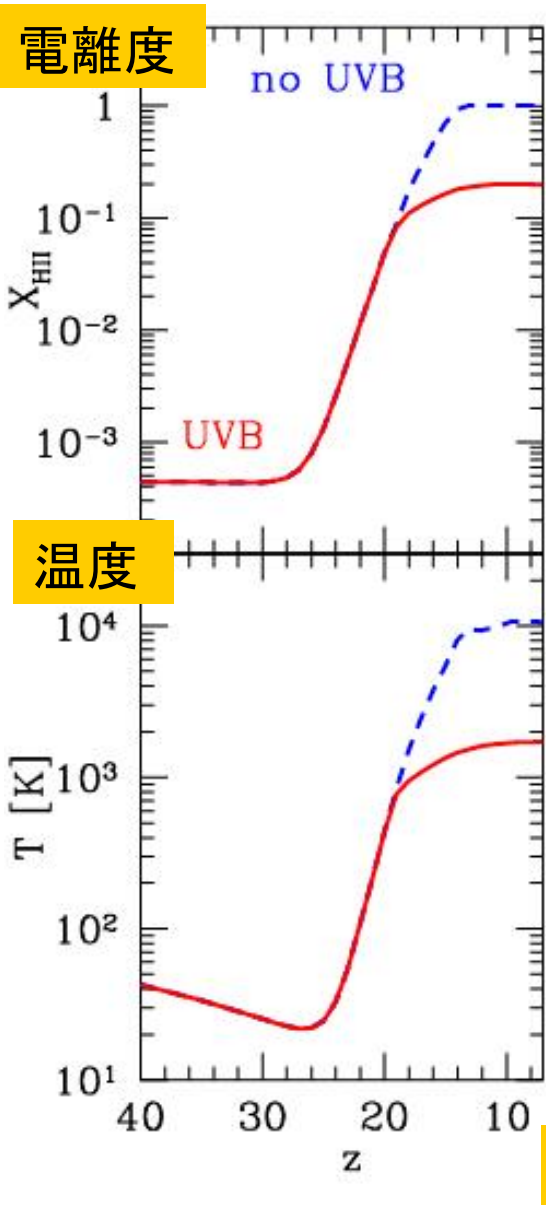
電離、解離  
光子脱出

赤方偏移



ガス分布のべき  
 $n \propto r^{-w}$

# 大質量星による再電離可能性



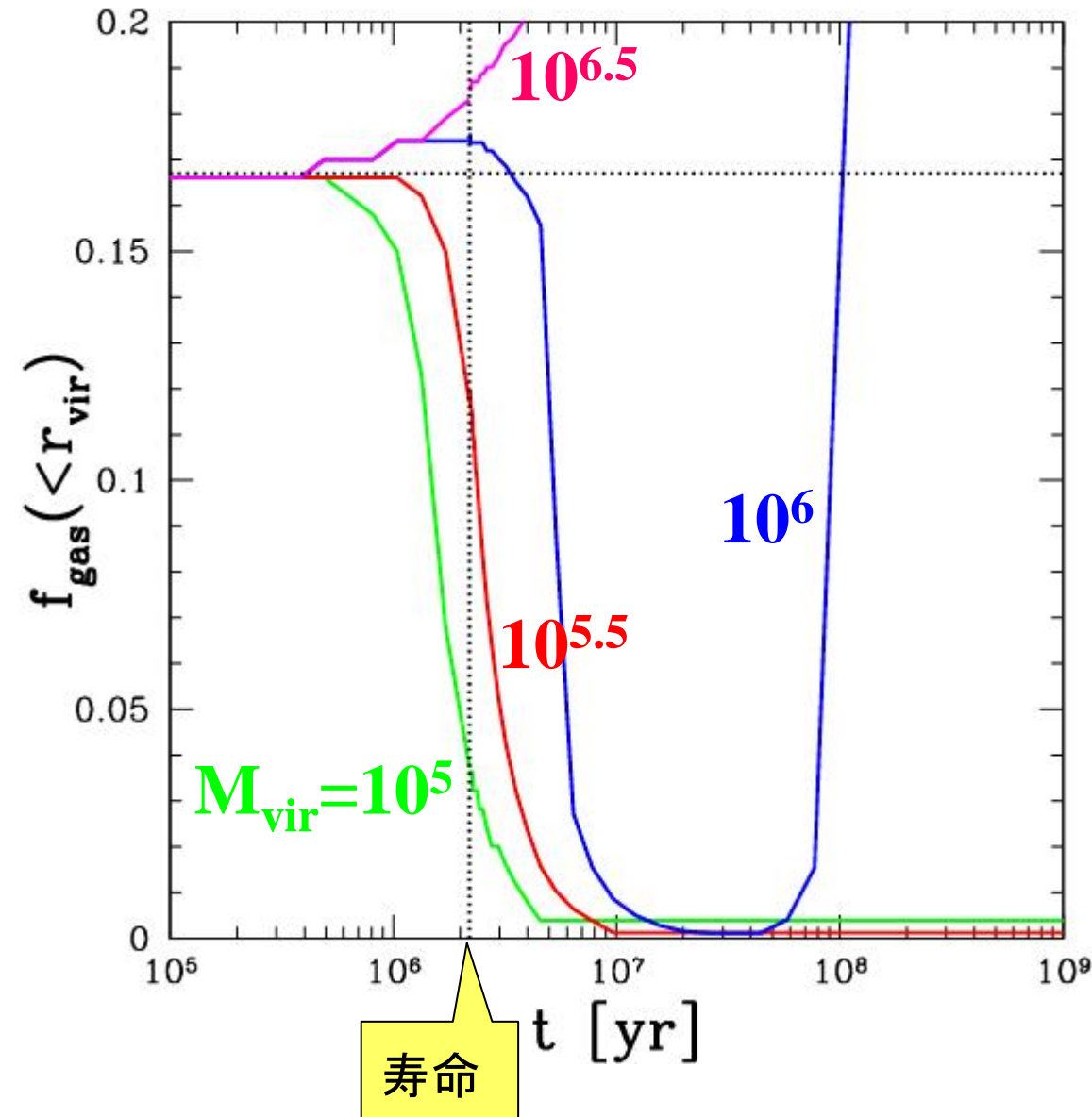
“Minimal model”

- $\text{H}_2$  冷却で星形成
- 各ハローに星一つ ( $M_{\text{star}}=200M_{\text{sun}}$ )
- **光子脱出率**
- 宇宙全体での総和 & 時間発展

**+UV背景放射による星形成阻害**

mini-halo中の大質量星は有力な再電離源

# 星の死後、BHが形成された場合：



$M_{\text{halo}} < 10^6 M_{\text{sun}}$

膨張継続

$10^7$  yr内にガス放出



halo merger ( $<10^8$  yr)

に伴い再降着



$<10^7$  yrで星形成

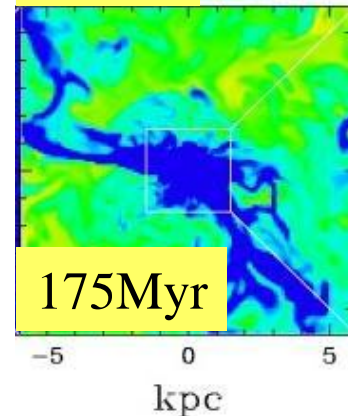
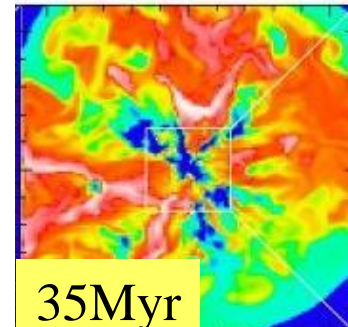
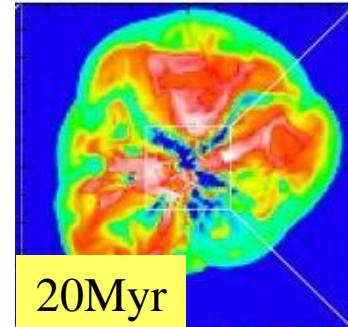
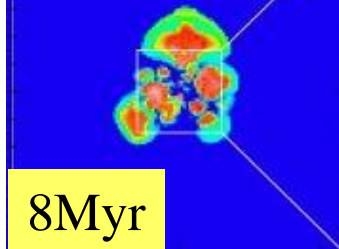
(cf. Nagakura & Omukai 2005)

# 超新星爆発によるフィードバック

ハロー中のバリオンの結合エネルギー

$$E_{\text{bind}} = 2 \times 10^{51} \left( \frac{M_{\text{halo}}}{10^7 M_{\odot}} \right)^{5/3} \left( \frac{1+z}{10} \right) \text{ erg}$$

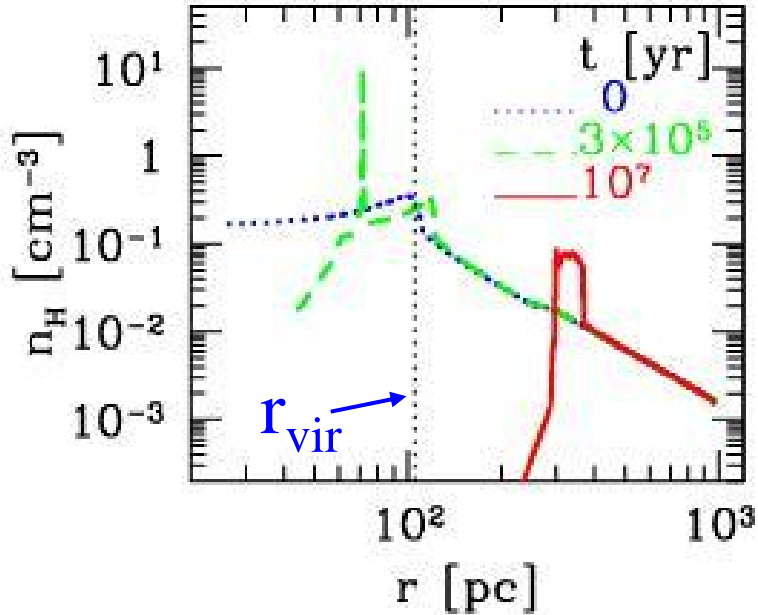
- $E_{\text{SN}} \propto M_{\text{star}} \propto M_{\text{gas}}$  なら小質量銀河ほど  $E_{\text{SN}}/E_{\text{bind}}$  大
- $E_{\text{SN}} > E_{\text{bind}}$  & 断熱的 ならば、系は破壊  
 しかし、放射冷却 ( $\propto n^2$ ) が効くと影響力低下  
 $\Rightarrow E_{\text{SN}} \gg E_{\text{bind}}$  が必要  
 初期条件、空間分解能に敏感



# 光電離と超新星の影響力

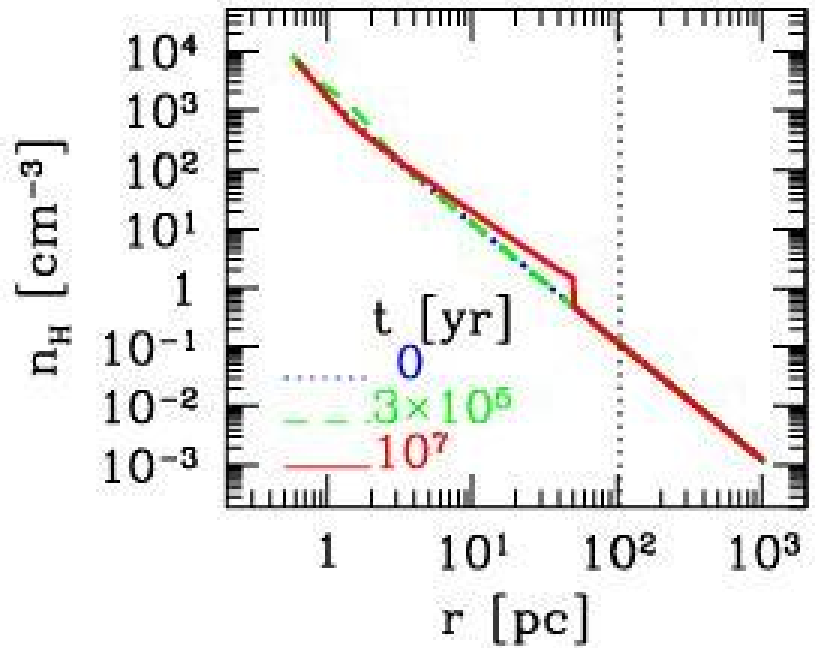
(TK and Yoshida 2005, TK et al. in prep)

$$M_{\text{halo}} = 3 \times 10^5 M_{\text{sun}} \quad z=20, \quad E_{\text{SN}} = 10^{51} \text{ erg}$$



$M_{\text{star}} = 200 M_{\text{sun}}$  によって  
HII領域が先に形成

周辺密度  $< 1 \text{ cm}^{-3}$  で爆発  
 $\sim 10^6 \text{ yr}$  でガス放出



HII領域なしの場合

高密度領域でエネルギー散逸  
 $E_{\text{SN}} \sim 100 E_{\text{bind}}$  でも飛ばない

# ガス放出の条件

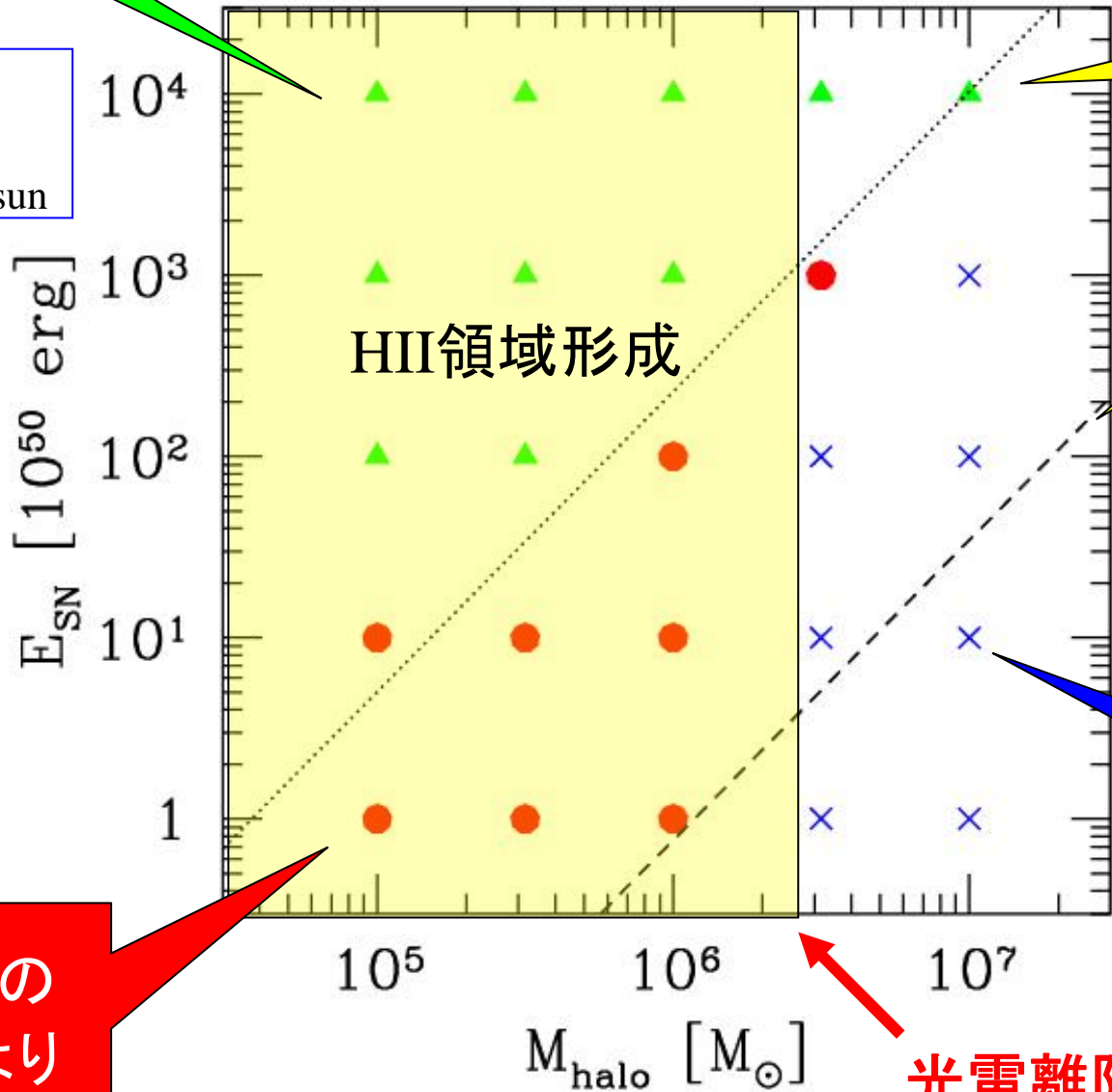
可能

$E_{\text{bind}} \times 300$

$E_{\text{bind}}$

不可能

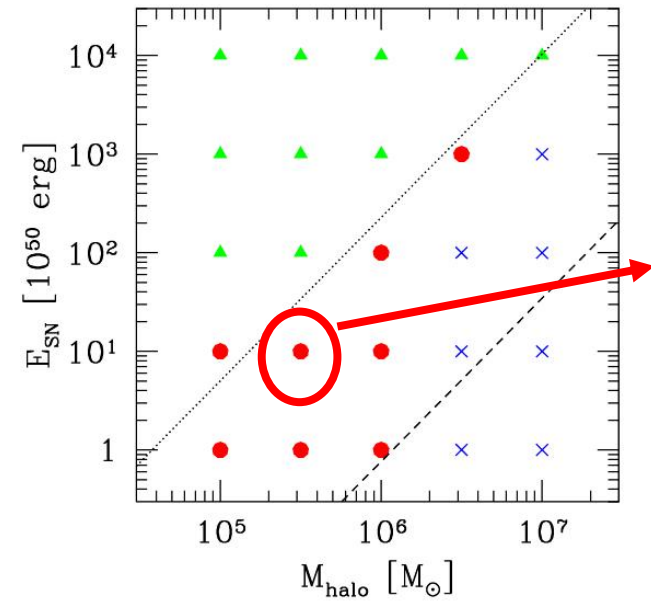
$z=20$   
 $M_{\text{star}}=200M_{\text{sun}}$



HII領域の  
形成により  
可能

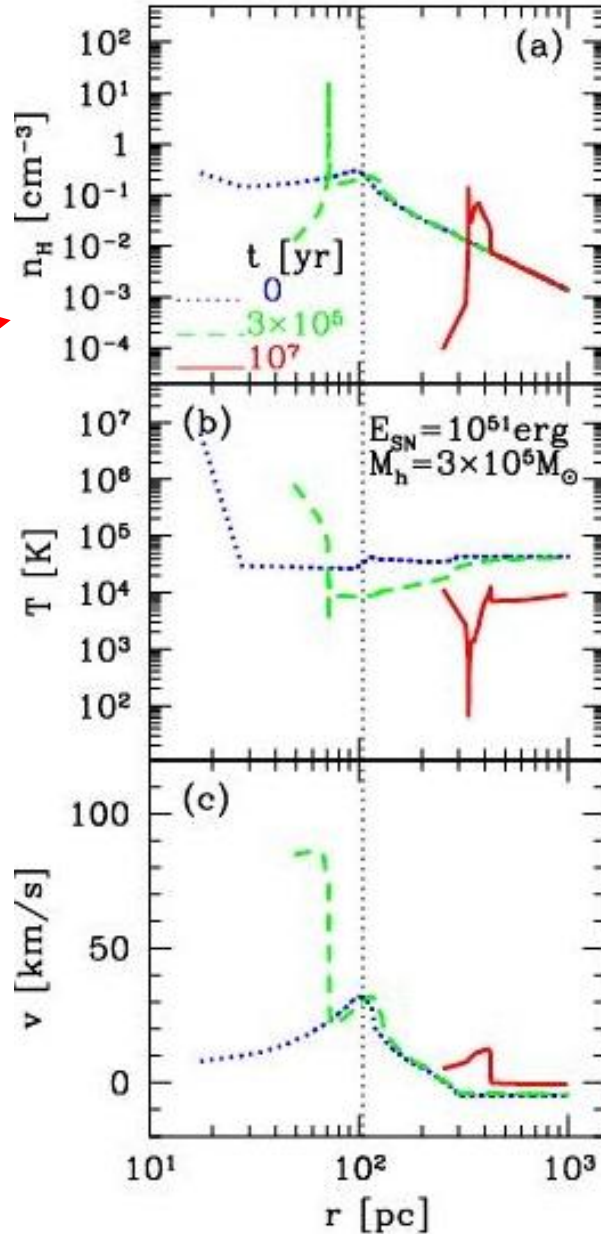
光電離限界  $\propto M_{\text{star}}^{3/4}$

# 原始SNRからの放射(1)

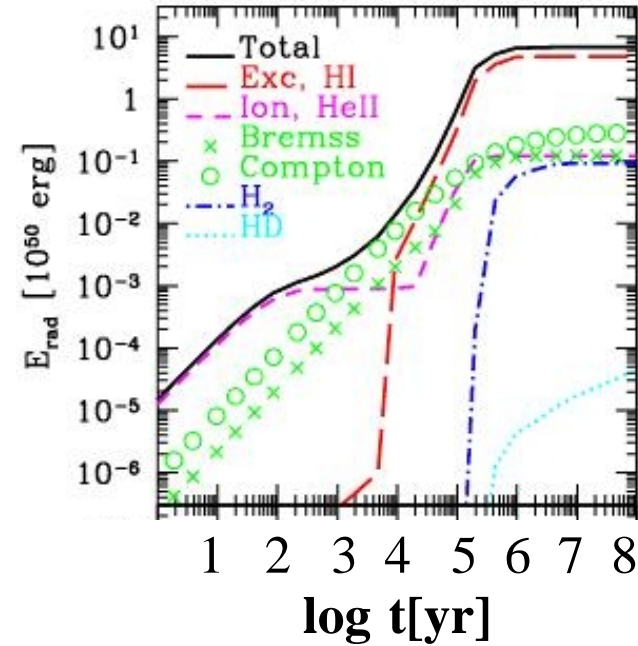


Low  $E_{SN}$

比較的遅い膨張  
Shell での冷却



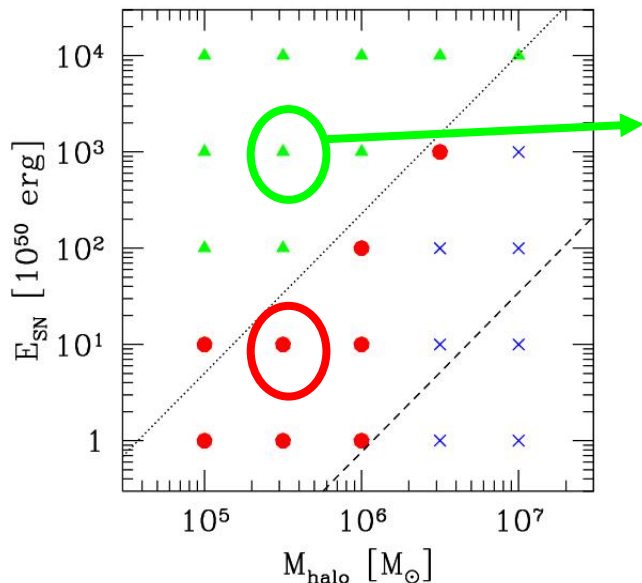
## Emitted energy



主に水素 Ly  $\alpha$   
 $\tau \sim 10^5$  yr  
 $L \sim 10^{37}$  erg/s  
 $F \sim 10^{-24}$  erg/cm<sup>2</sup>/s  
 @z=20

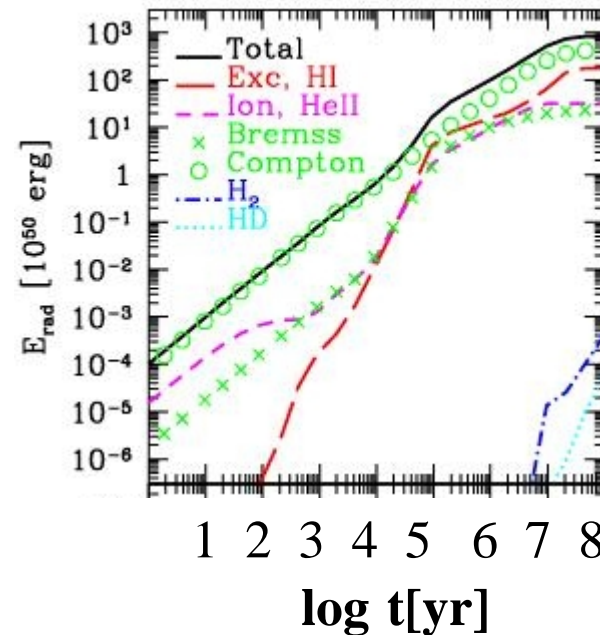
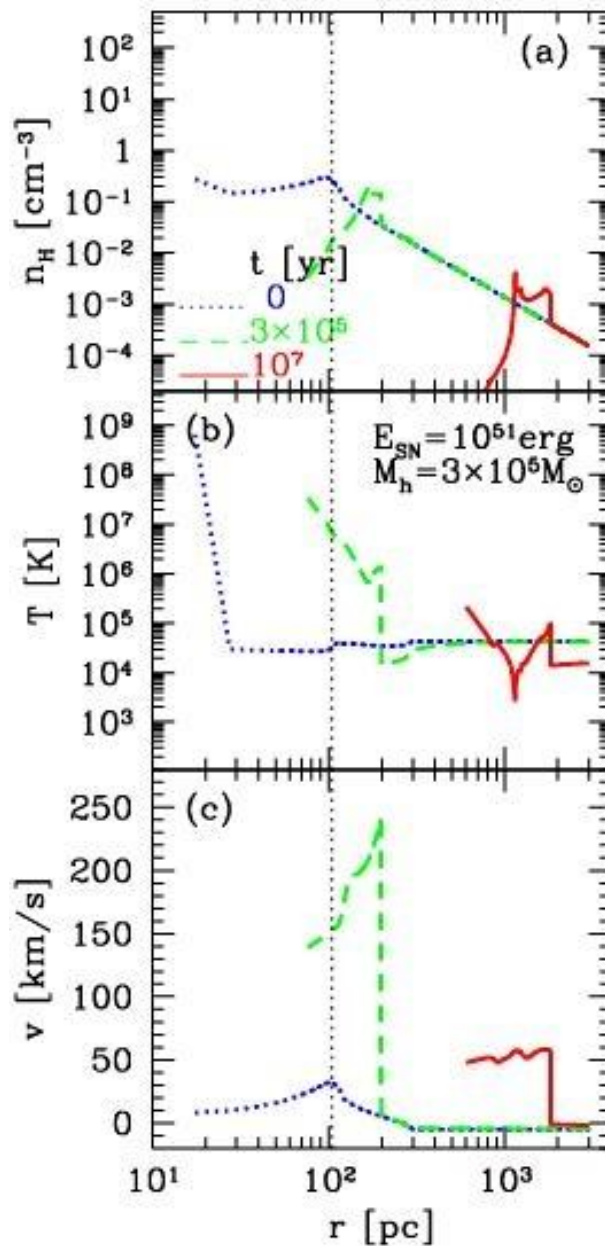
# 原始SNRからの放射(2)

## Emitted energy



High  $E_{SN}$

急激な膨張  
低密度領域での冷却



コンプトン冷却  
( $\propto n$ )  
 $\tau \sim 10^7$  yr  
 $L \sim 10^{38}$  erg/s  
 $y \sim 10^{-6}$  ( $10^4$  yr)

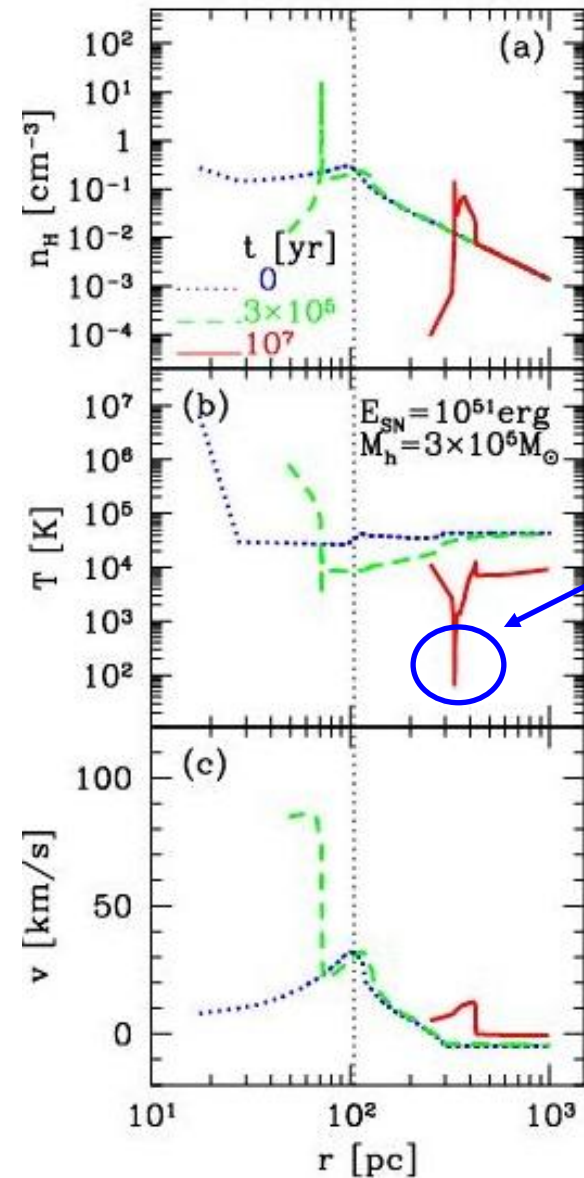
# SNシェル分裂の可能性(1)

“Blown-away” case:

$$M_{\text{halo}} = 3 \times 10^5 M_{\text{sun}}$$

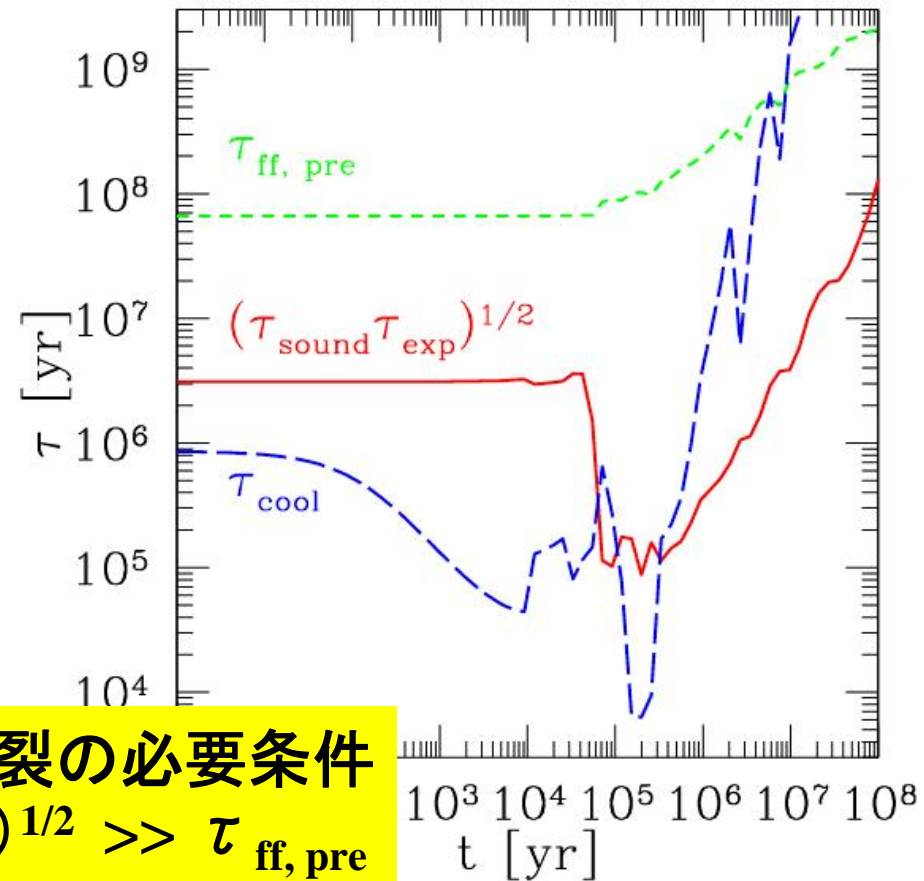
$$E_{\text{SN}} = 10^{51} \text{ erg} \sim 100 E_{\text{bind}}$$

分裂しない



$$y_{\text{H2}} > 10^{-3}$$

$$y_{\text{HD}} > 10^{-5}$$



膨張シェル分裂の必要条件

$$(\tau_{\text{sound}} \tau_{\text{exp}})^{1/2} \gg \tau_{\text{ff, pre}}$$

(Elmegreen 1994)

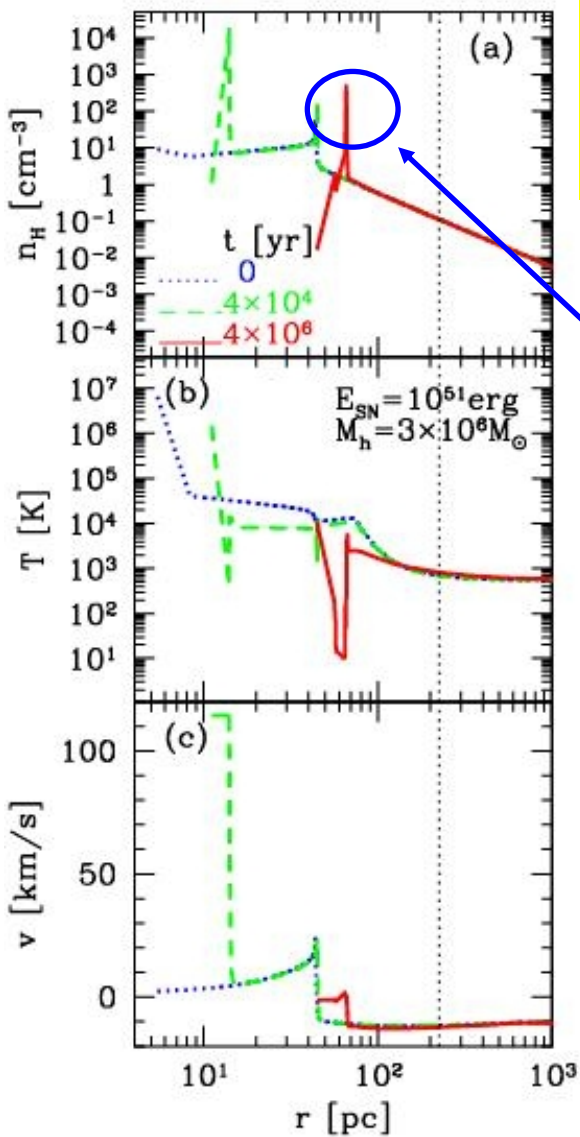
# SNシェル分裂の可能性(2)

“stalled” case:

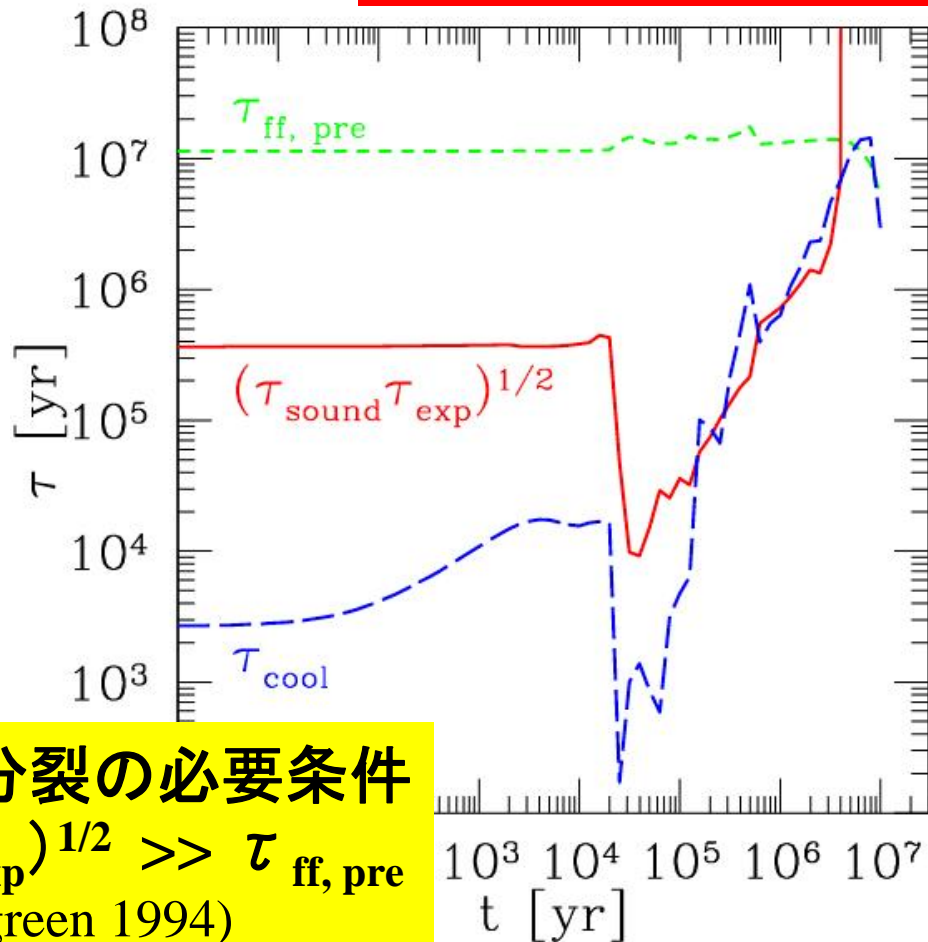
$$M_{\text{halo}} = 3 \times 10^6 M_{\text{sun}}$$

$$E_{\text{SN}} = 10^{51} \text{ erg} \sim E_{\text{bind}}$$

不安定モード存在



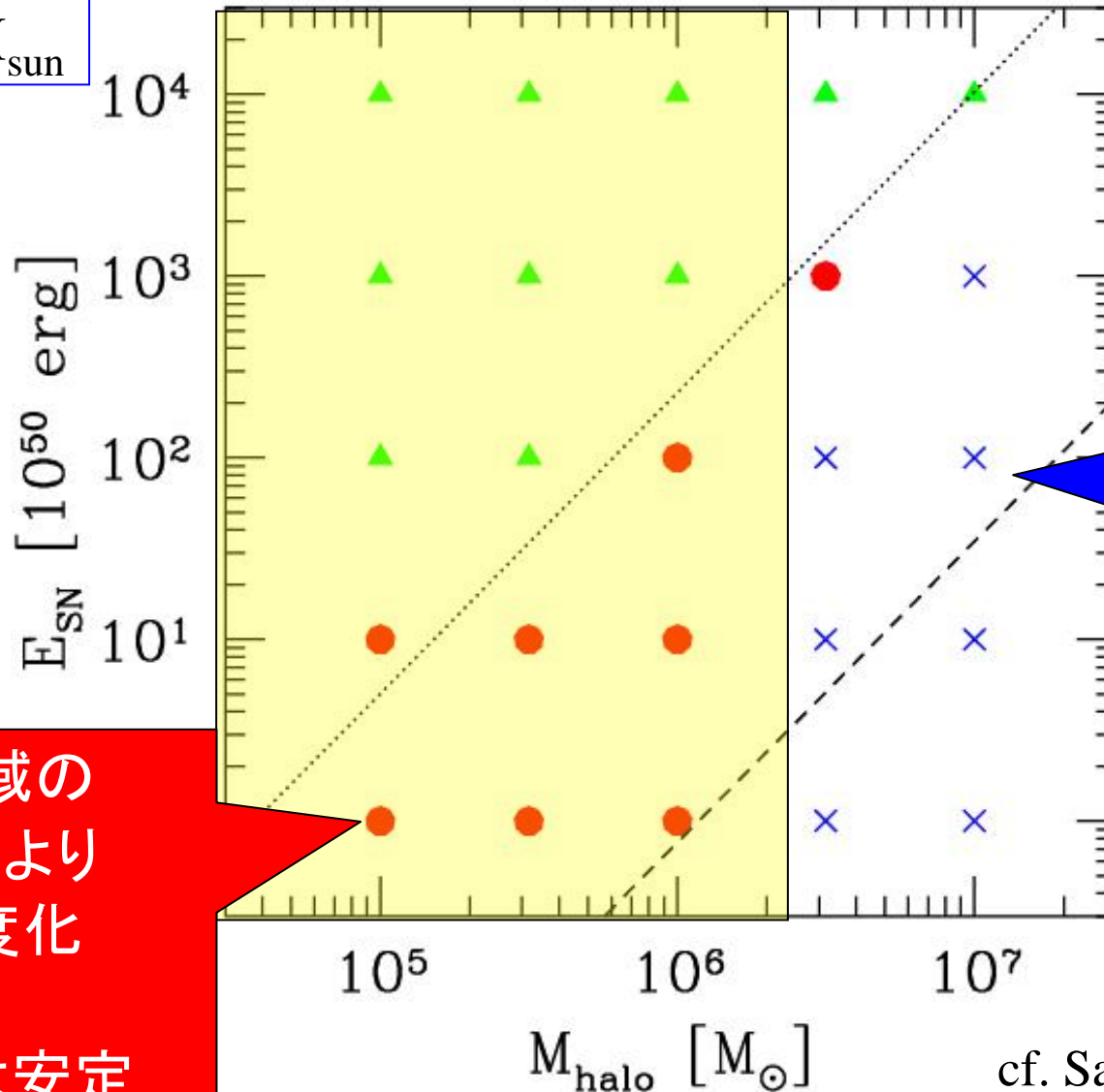
stalled after  
4Myr !



膨張シェル分裂の必要条件  
 $(\tau_{\text{sound}} \tau_{\text{exp}})^{1/2} \gg \tau_{\text{ff, pre}}$   
 (Elmegreen 1994)

# SNシェル分裂の可能性

$z=20$   
 $M_{\text{star}}=200M_{\text{sun}}$



分裂の  
可能性あり

HII領域の  
形成により  
低密度化  
↓  
シェルは安定

cf. Salvaterra et al. 2004  
Machida et al. 2005

# QSO field での LAE 分布

(Kashikawa et al. in prep.)

z=4.87

11

13

Kashikawa et al.

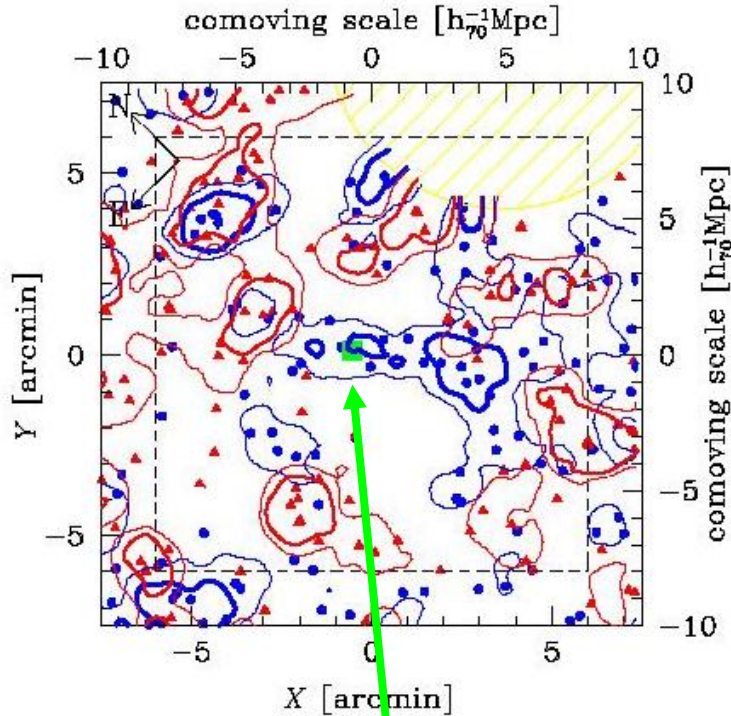


FIG. 4. — Ly $\alpha$  emission features (red triangles) and Ly $\alpha$  forest absorption features (blue squares) in a QSO field around SDSS J0211-0009 (at  $z=4.87$ ) in comoving coordinates. The density of region as indicated by curved lines. The thick red line denotes Ly $\alpha$  forest absorption in the Ly $\alpha$  forest region. The red and blue regions are contours of Ly $\alpha$  emission, except the yellow hatched region (Ly $\alpha$  forest absorption in the Ly $\alpha$  forest region).

QSO field (SDSS J0211-0009 at  $z=4.87$ )

$r < 4.5 \text{ Mpc}$  で LAE (赤) の deficit

UVによる星形成阻害?

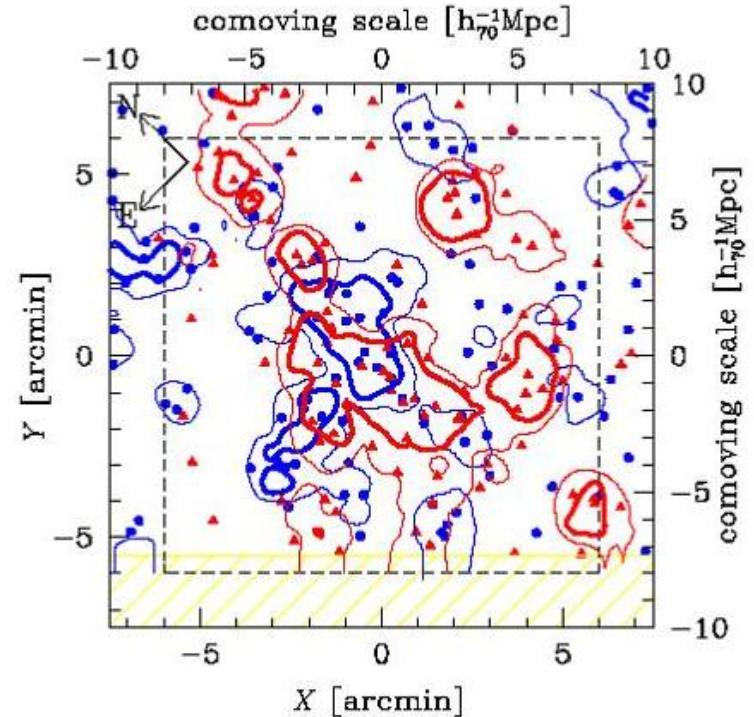


FIG. 5. — Same as Figure 4, but for the cluster field. The cluster field is shown in the dashed lines. The yellow hatched area corresponds to a Ly $\alpha$  forest field.

Cluster field

LAE(赤)とLBG(青)は強く相関

# UV輻射(外場)による星形成の阻害

$z_{\text{ta}} \sim z_{\text{vir}} (=4.87)$ に冷却可能なガス量

SDSS J0211-0009

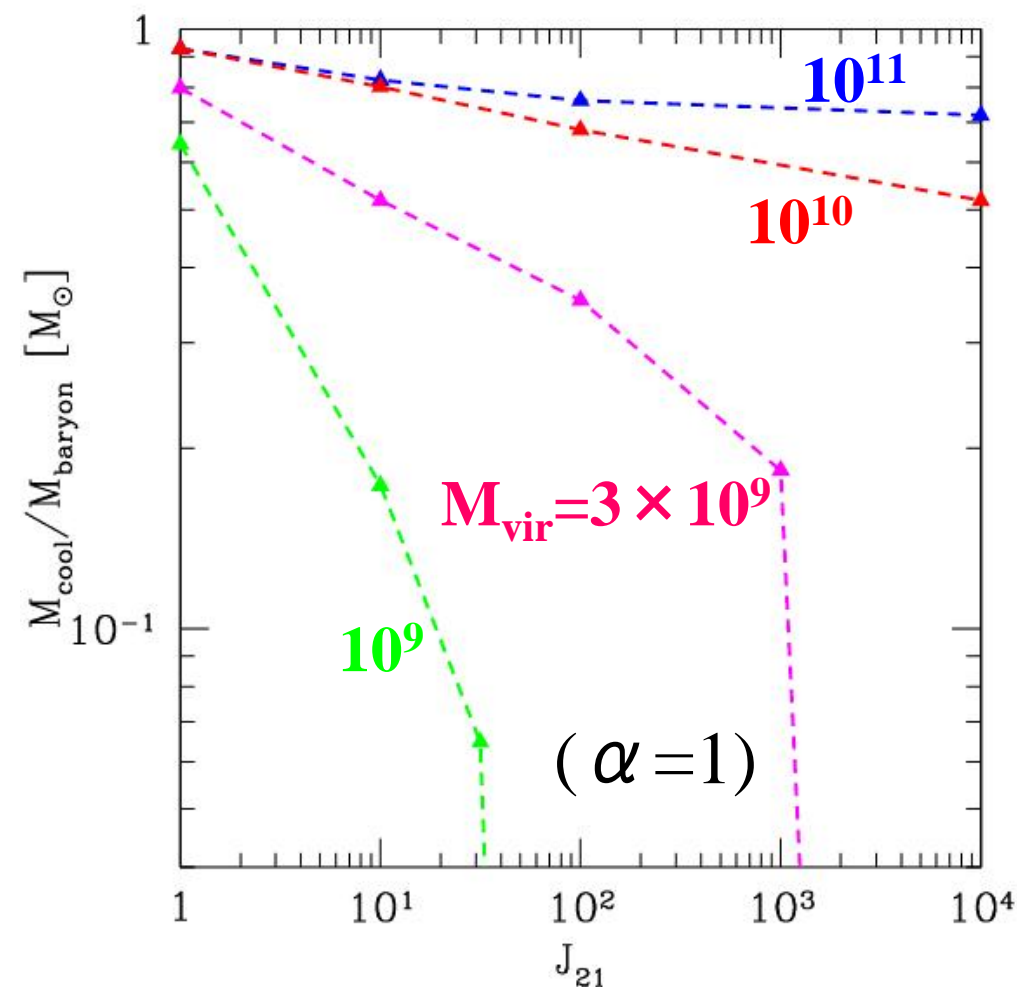
$\alpha = 0.99 \pm 0.70$

$J_{21} > 70$  at  $r < 4.5 \text{ Mpc}$

$M_{\text{vir}} < 10^{10} M_{\text{sun}}$   
でのガス冷却阻害

cf. clustering から推定  
されるLAE質量:

$M_{\text{vir}} \sim 10^{11} M_{\text{sun}}$



# まとめ

## 原始銀河形成に対する輻射、超新星爆発によるフィードバック

### 1. 大質量星 ( $> 100 M_{\text{sun}}$ ) からの輻射

$M_{\text{halo}} < 10^6 M_{\text{sun}}$  を完全電離、光子脱出率  $\sim 1$

$\Rightarrow$  宇宙再電離に有意な寄与

$10^8 \text{ yr}$  ( $\sim t_{\text{H}}$  at  $z=20$ ) 星形成停止

### 2. 超新星爆発

爆発が起こる時点での周辺環境(特に密度)に敏感

- HII 領域なし:  $E_{\text{SN}} > 300 E_{\text{b}}$  がガス放出に必要

- HII 領域あり:  $E_{\text{SN}} \sim E_{\text{b}}$  で放出 + シェルは安定

原始銀河:  $M_{\text{halo}} \sim 10^{6-7} M_{\text{sun}}$  を境に、星形成率にギャップ

### 3. QSO近傍での星形成抑制

$M_{\text{vir}} < 10^{10} M_{\text{sun}}$  at  $z=5$       LAE観測との対応は？