

# 紫外線輻射場中の銀河円盤の分裂

須佐 元

甲南大学理工学部物理学科

# 背景紫外線輻射場 ( $> 13.6\text{eV}$ )

- 物理プロセス
  - ✓ 加熱:  $T \sim 10^4\text{ K}$
  - ✓ 電離・解離
  
- 強度 (Ly  $\alpha$  forestの観測)
  - ✓  $I_{21} < 0.01$  @  $z > 6$
  - ✓  $I_{21} = 0.1 - 1$  @  $z = 2 - 4$
  - ✓  $I_{21} = 0.01 - 0.001$  @  $z = 0$

→ 浸透すれば原始銀河ガスを加熱するには十分

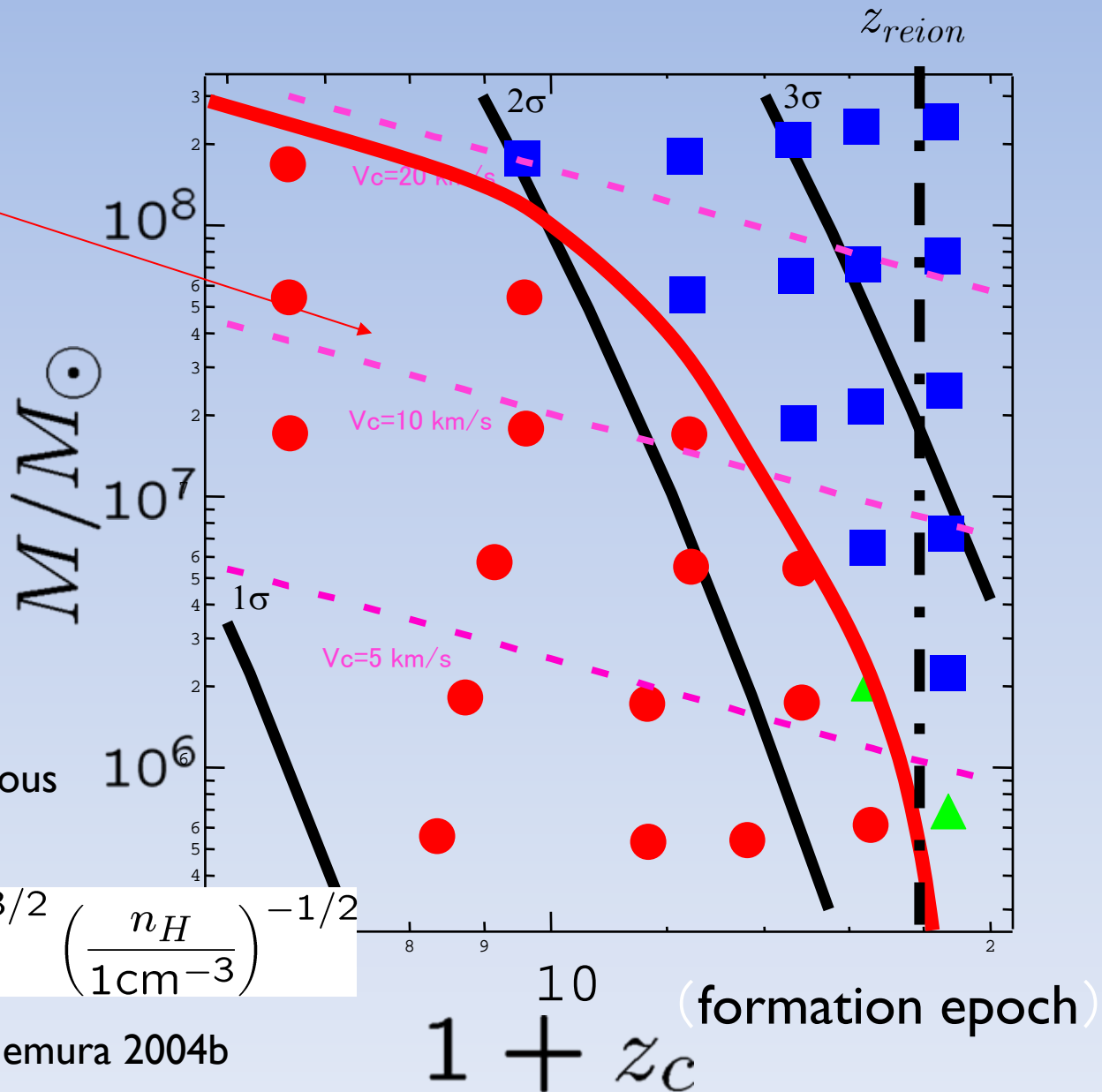
# 軽い銀河 ( $< 10^8 M_{\text{sun}}$ ) ~ 光蒸発

Failed region

$M < 10^8 M_{\text{sun}}$  and  
 $\Delta < 2\sigma$   
 $\rightarrow$  Cannot evolve into luminous galaxies

$$M_J \simeq 10^{7.5} M_{\odot} \left( \frac{T}{10^5 \text{K}} \right)^{3/2} \left( \frac{n_H}{1 \text{cm}^{-3}} \right)^{-1/2}$$

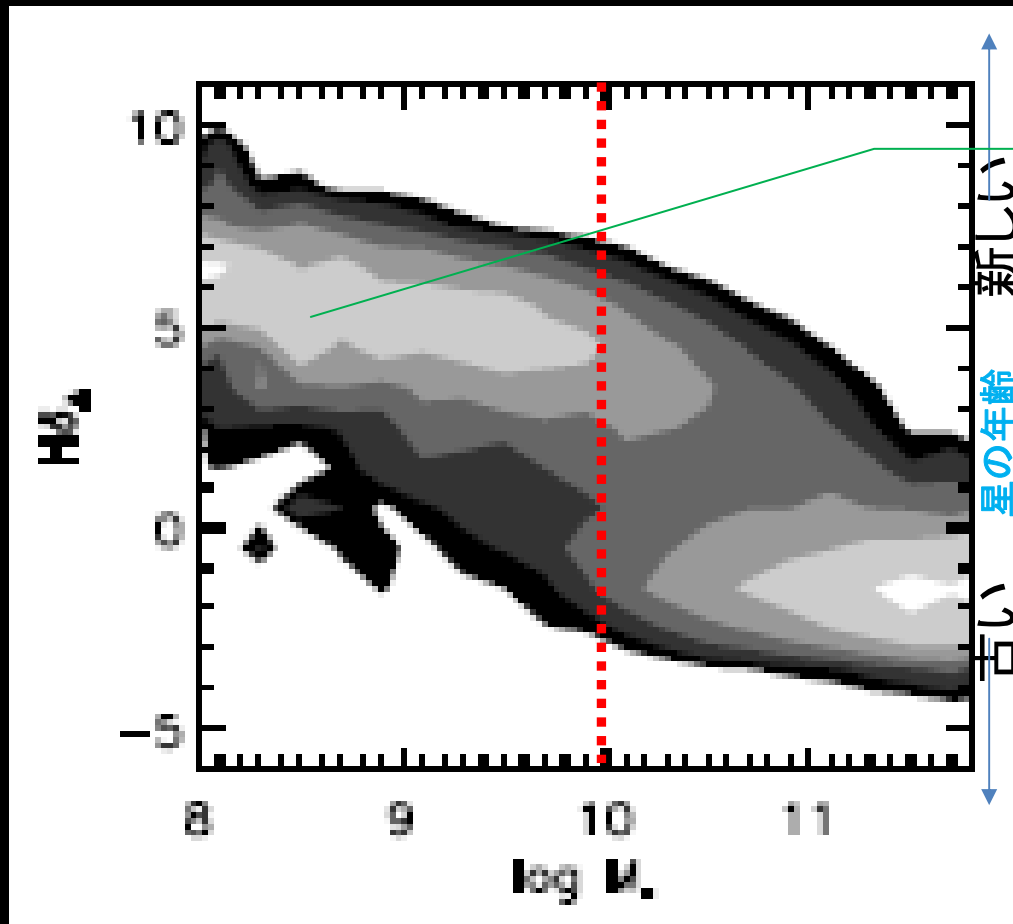
Susa & Umemura 2004b



$1 + z_c$

(formation epoch)

# 重い銀河 ( $>10^8 M_{\text{sun}}$ ) $\sim$ Downsizing?



$10^{10} M_{\text{sun}}$ 以下の小さな星質量の銀河の方が、星形成が最近になって起こっている。

単純なCDMのモデルとは違って、臨界質量よりも小さな銀河で、high- $z$ での星形成を抑制するメカニズムが必要。

紫外線加熱?

(Kauffman, G. et al, MNRAS, 341, 54, 2003)

# 研究の目標

- まず  $T_{\text{vir}} \gg 10^4\text{K}$  の DM ハロー中にある円盤銀河でも紫外線背景放射が星形成を止める場合があることを明らかにする。  
→ Downsizing ?
- 銀河形態分岐？

# 円盤銀河のモデル(初期・境界条件)

$$\Phi_{\text{ext}}(r) \equiv - \left( \frac{27}{4} \right)^{1/2} \left[ \frac{v_1^2}{(r^2 + a_1^2)^{1/2}} + \frac{v_2^2}{(r^2 + a_2^2)^{1/2}} \right]$$

$$v_1 = v_2 = 100 \text{ km s}^{-1}, \quad a_1 = 0.3 \text{ kpc}, \quad a_2 = 5 \text{ kpc}$$

Same as Wada & Norman 2007  
except rotation velocity

radiation ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓



$$H = 100 \text{ pc}$$

$$\rho_{\text{ini}} : 0.05, 0.1, 0.3 M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$$

$$I_{21} = 0 \quad \text{or} \quad 1$$

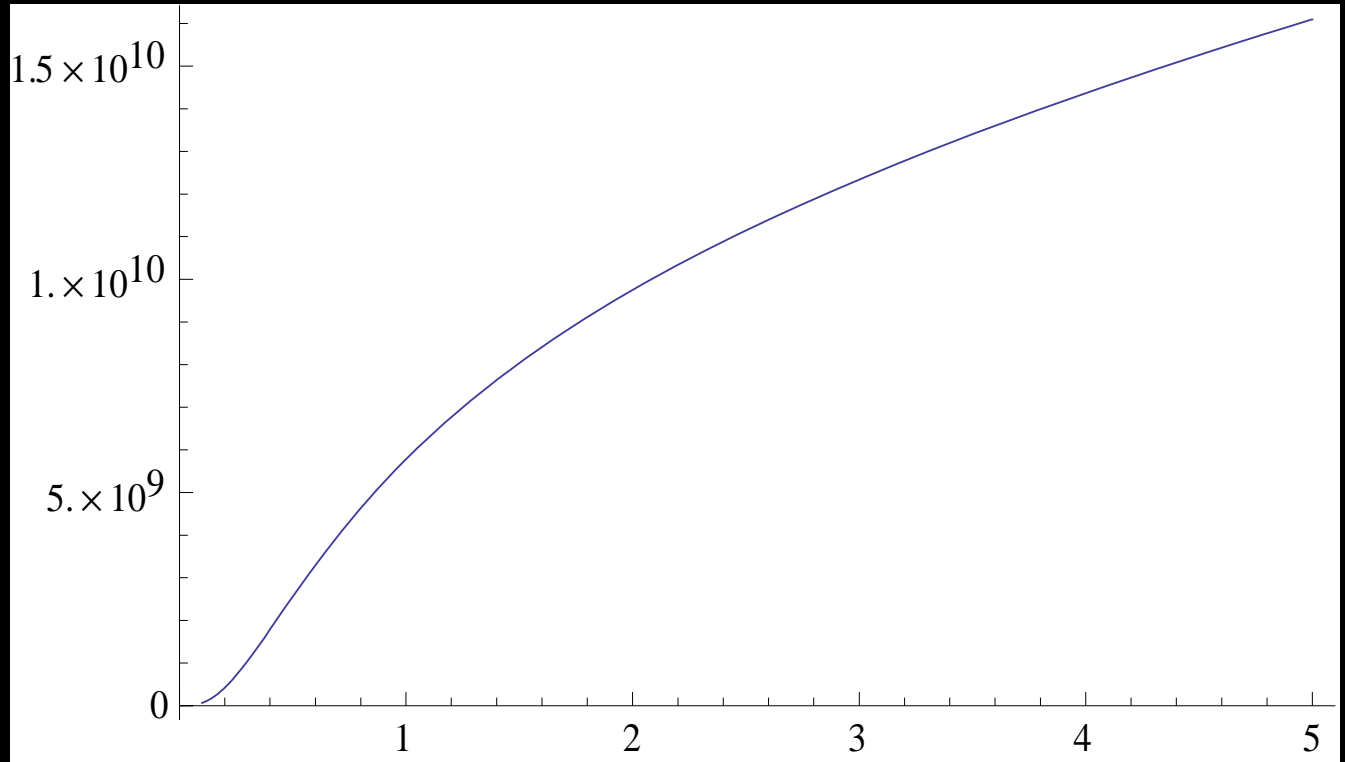
$$R_{\text{disk}} = 3 \text{ kpc}$$

radiation ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑

Uniform disk with slight perturbations

# Mass distribution of Dark Halo

$M(r)[M_{\odot}]$



$r$  [kpc]

# Parameters

TABLE 1  
COMMON PARAMETERS

symbol	numerical value employed	description
$N_{\text{nei}}$	50	Number of neighbor particles
$H_i$	100pc	Initial disk thickness
$T_i$	$10^4\text{K}$	Initial disk temperature
$T_{\text{min}}$	300K	minimum temperature

TABLE 2  
MODEL DEPENDENT PARAMETERS

Label	$I_{21}$	$\rho_i[M_{\odot}/\text{pc}^{-3}]$	simulated time	# of SPH particles	$n_{\text{H,res}}[\text{cm}^{-3}]$	$\epsilon[\text{pc}]$
A	0	0.05	300 Myr	$1.28 \times 10^6$	235	3.05
B	0	0.1	120 Myr	$2.56 \times 10^6$	235	3.05
C	0	0.3	40 Myr	$7.68 \times 10^6$	235	3.05
Ar	1	0.05	350 Myr	$1.28 \times 10^6$	235	3.05
Br	1	0.1	200 Myr	$2.56 \times 10^6$	235	3.05
Cr	1	0.3	40 Myr	$7.68 \times 10^6$	235	3.05
Bh	0	0.1	120 Myr	$1.28 \times 10^6$	58.8	6.09
Brh	1	0.1	120 Myr	$1.28 \times 10^6$	58.8	6.09

分解能の関係で最低温度を300Kに設定しているなので、小さなスケールで分裂しにくい条件で計算している。実際には100Kを下回るのでより小さなスケールで分裂が起きる。

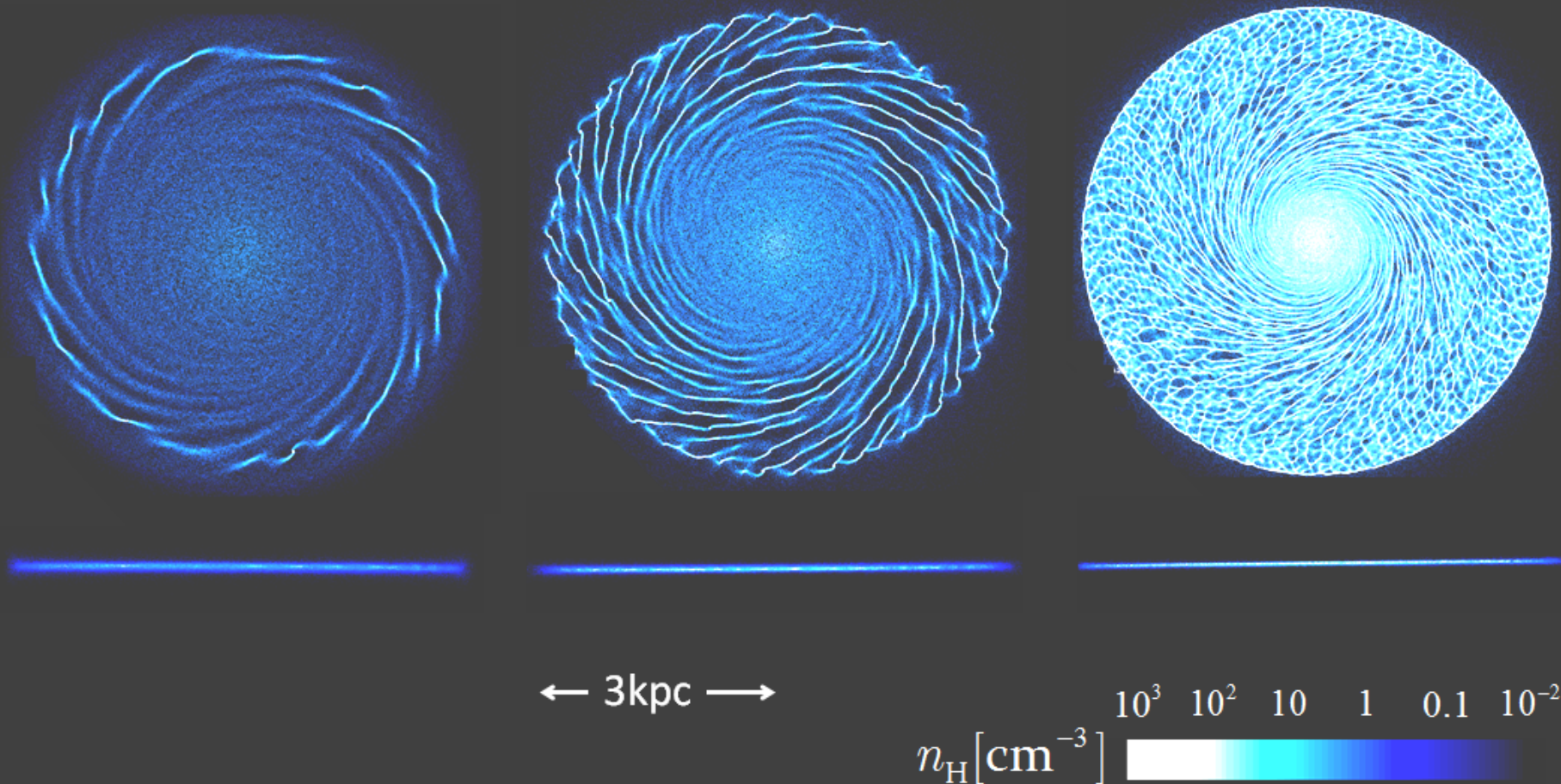


# モンタージュ: $I_{21}=0$

Model A (300Myr)

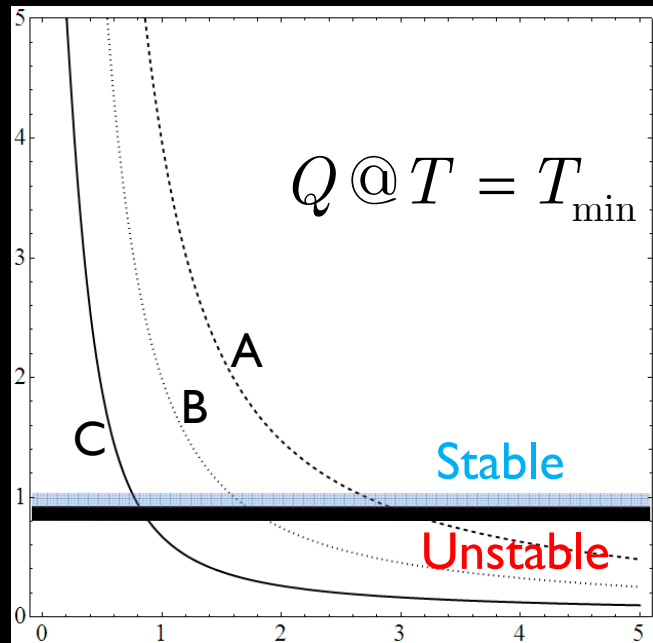
Model B (120Myr)

Model C (40Myr)



A、B、Cすべて不安定→分裂・星形成

# Q と相図 (I21=0)

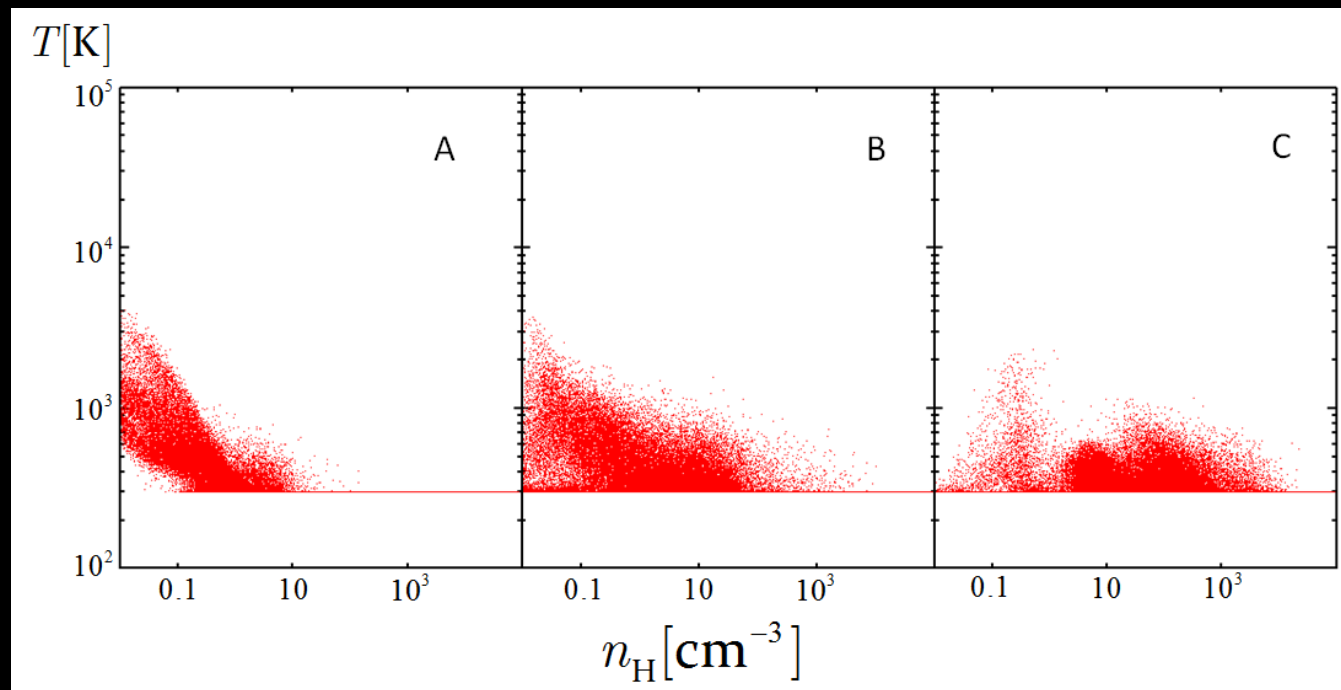


$$Q = \frac{c_s K}{\pi G \Sigma}$$

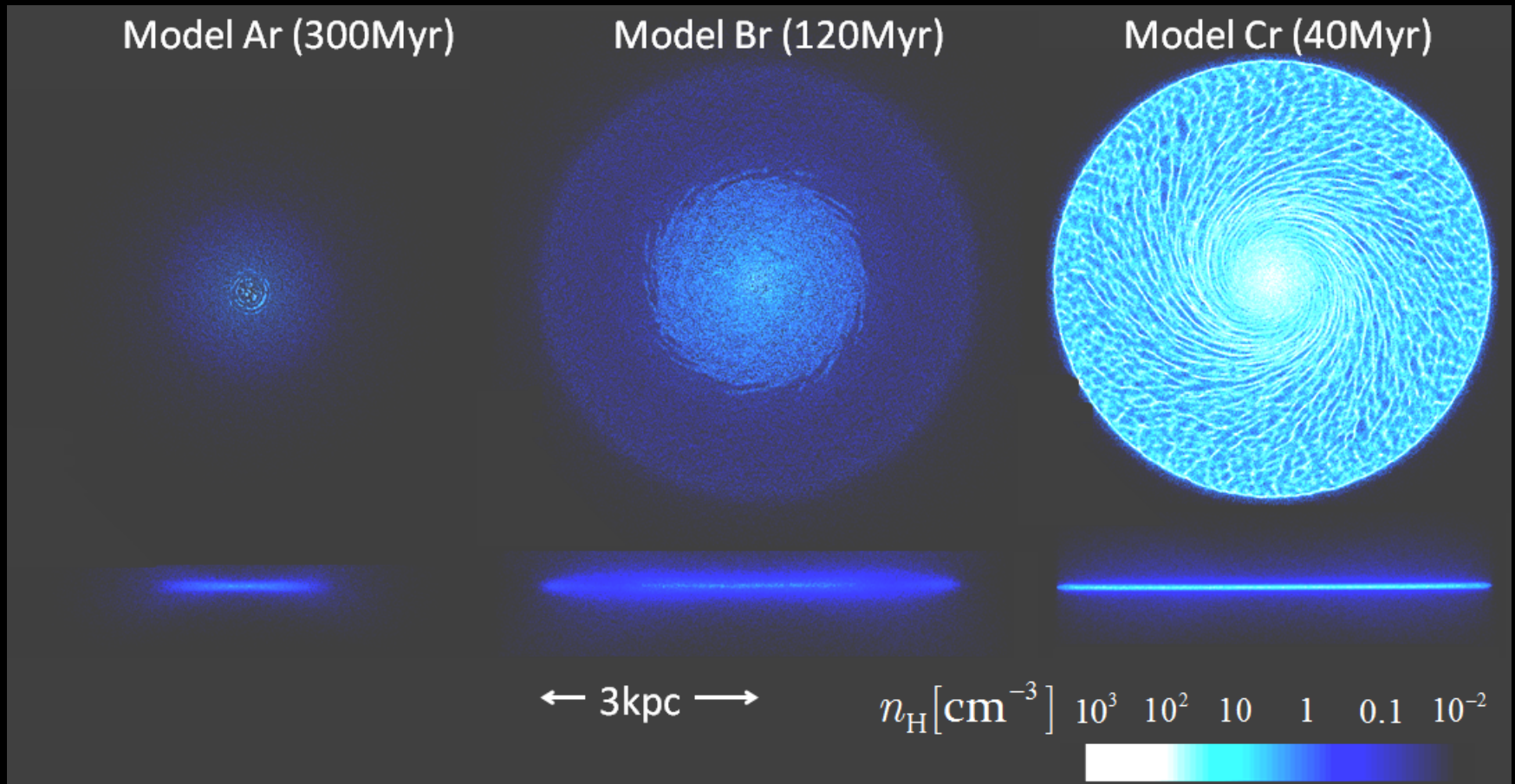
高密度領域は  
 $T \sim T_{\min}$



上のQの見積もり  
でよい。



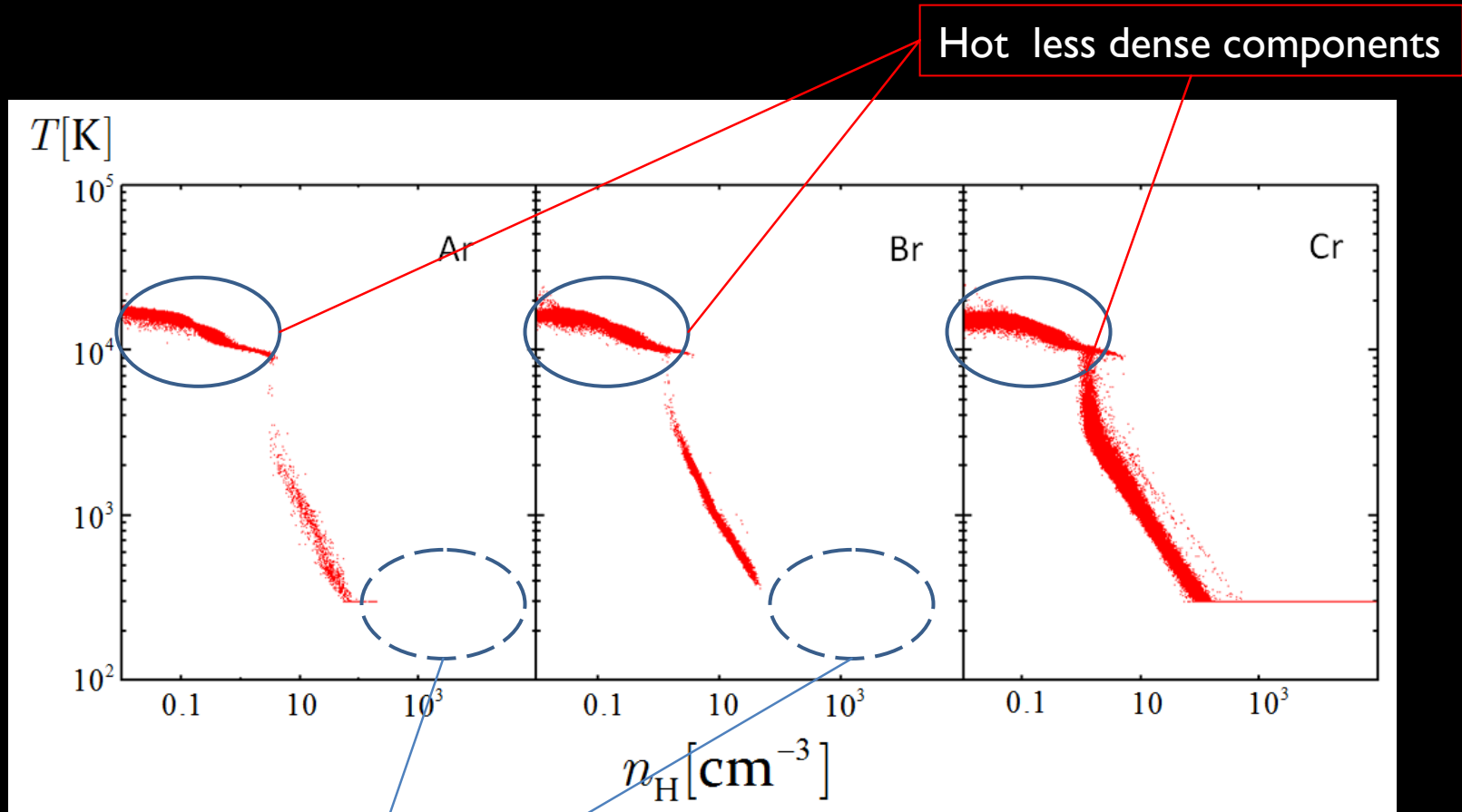
# モンタージュ: $I_{21}=1$



A, B 安定→分裂せず。星形成は強く抑制

Cは不安定→分裂・星形成

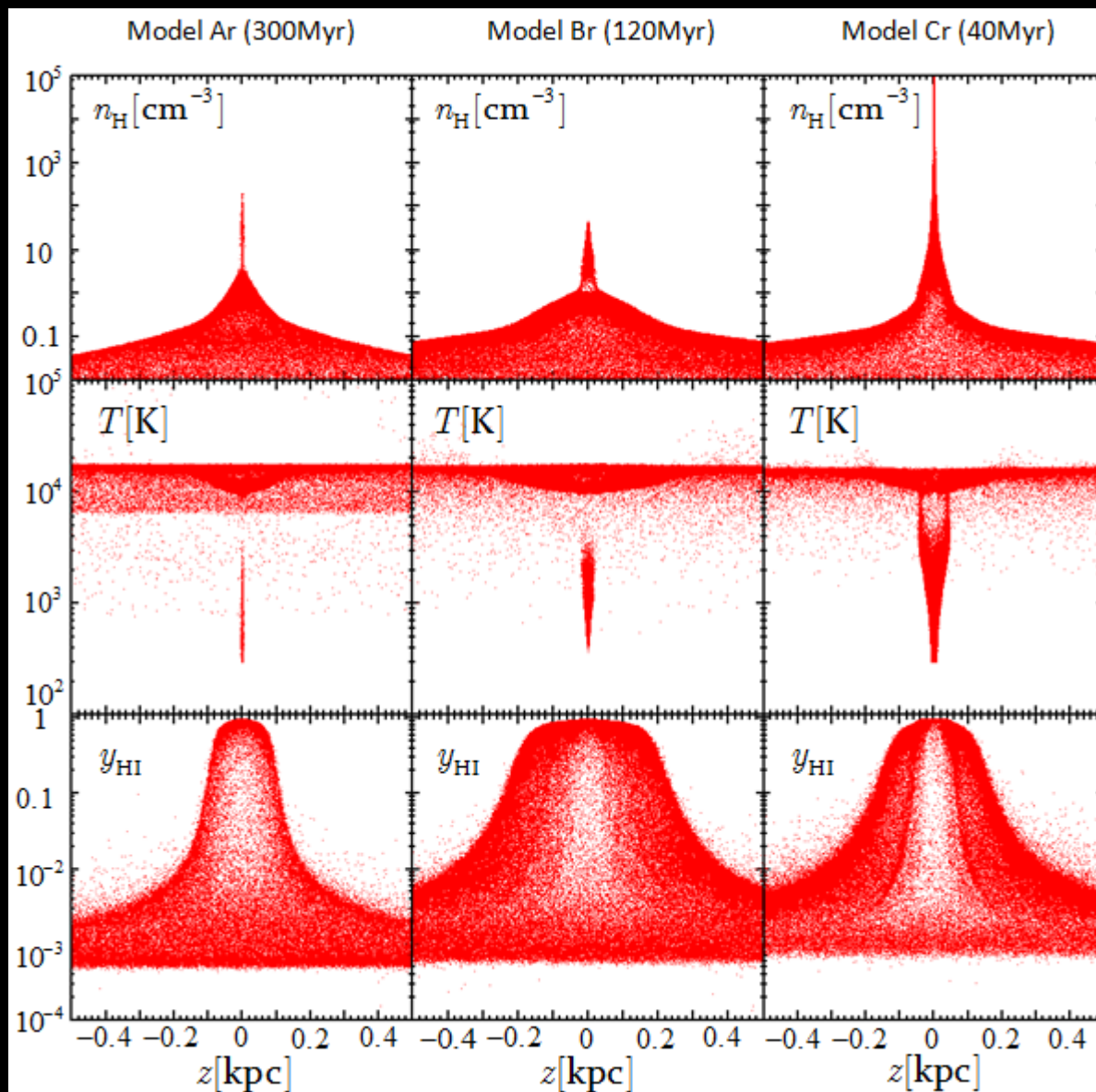
# 相図 (I21=1)



Hot less dense components

No cold dense components

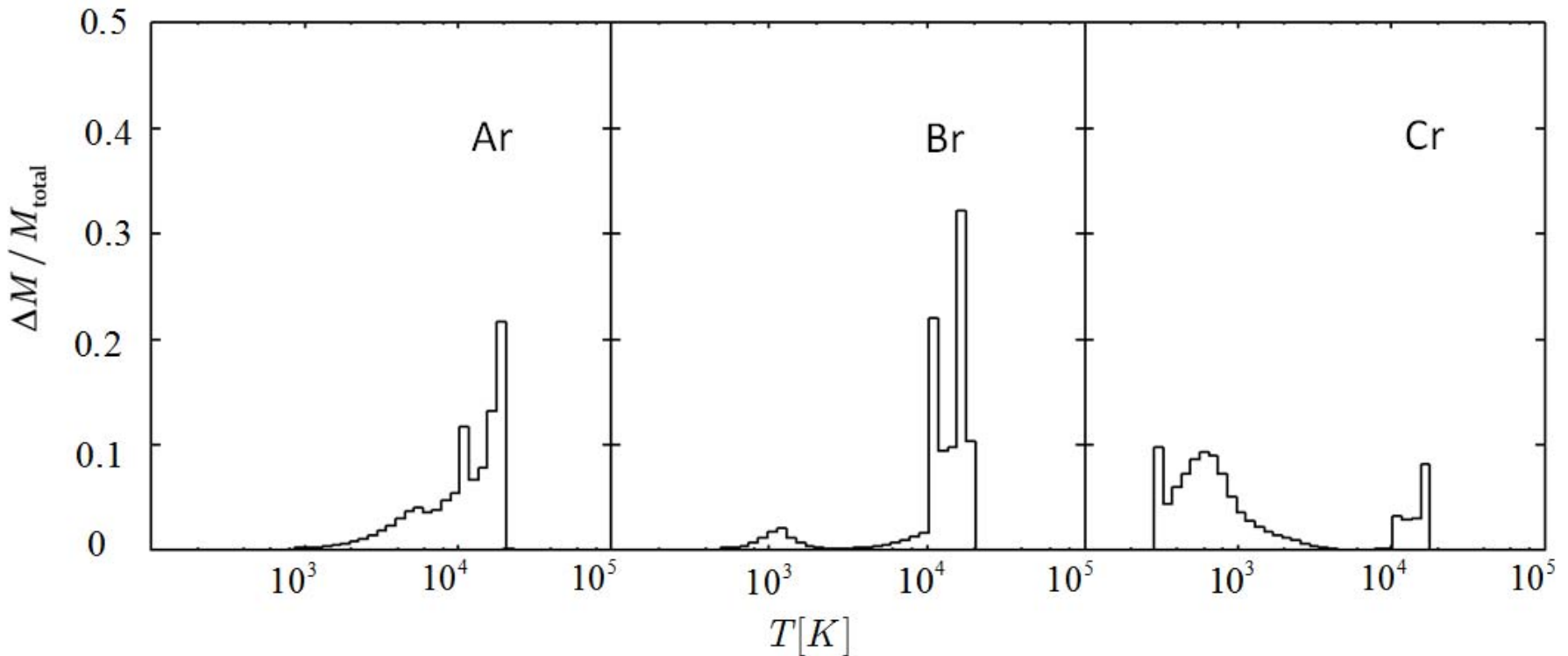
# 鉛直方向の物理量分布





# Temperature PDFs

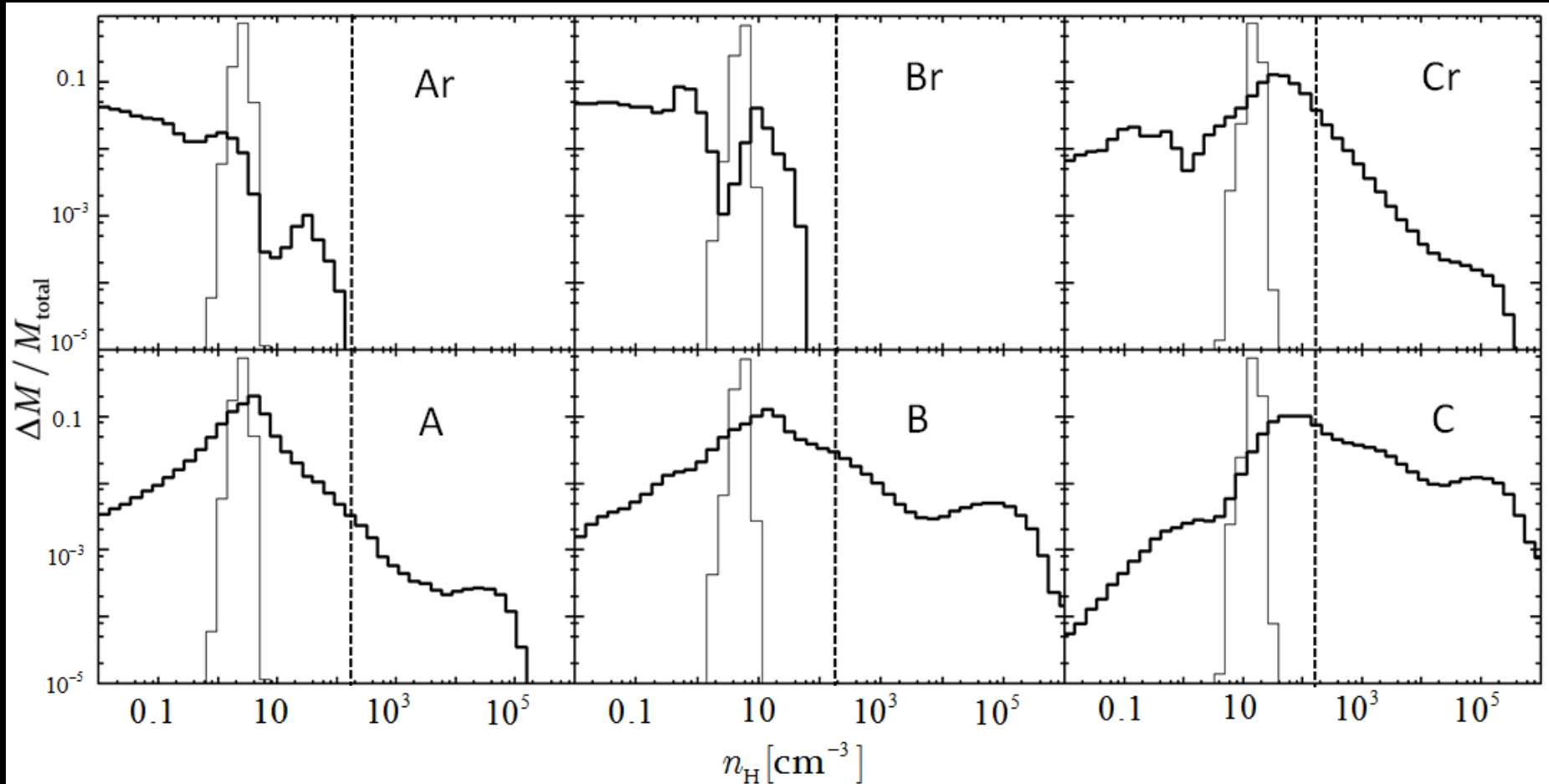
$\Delta \log T = 0.06$ あたりのガス質量の割合  $\Delta M / M_{total}$



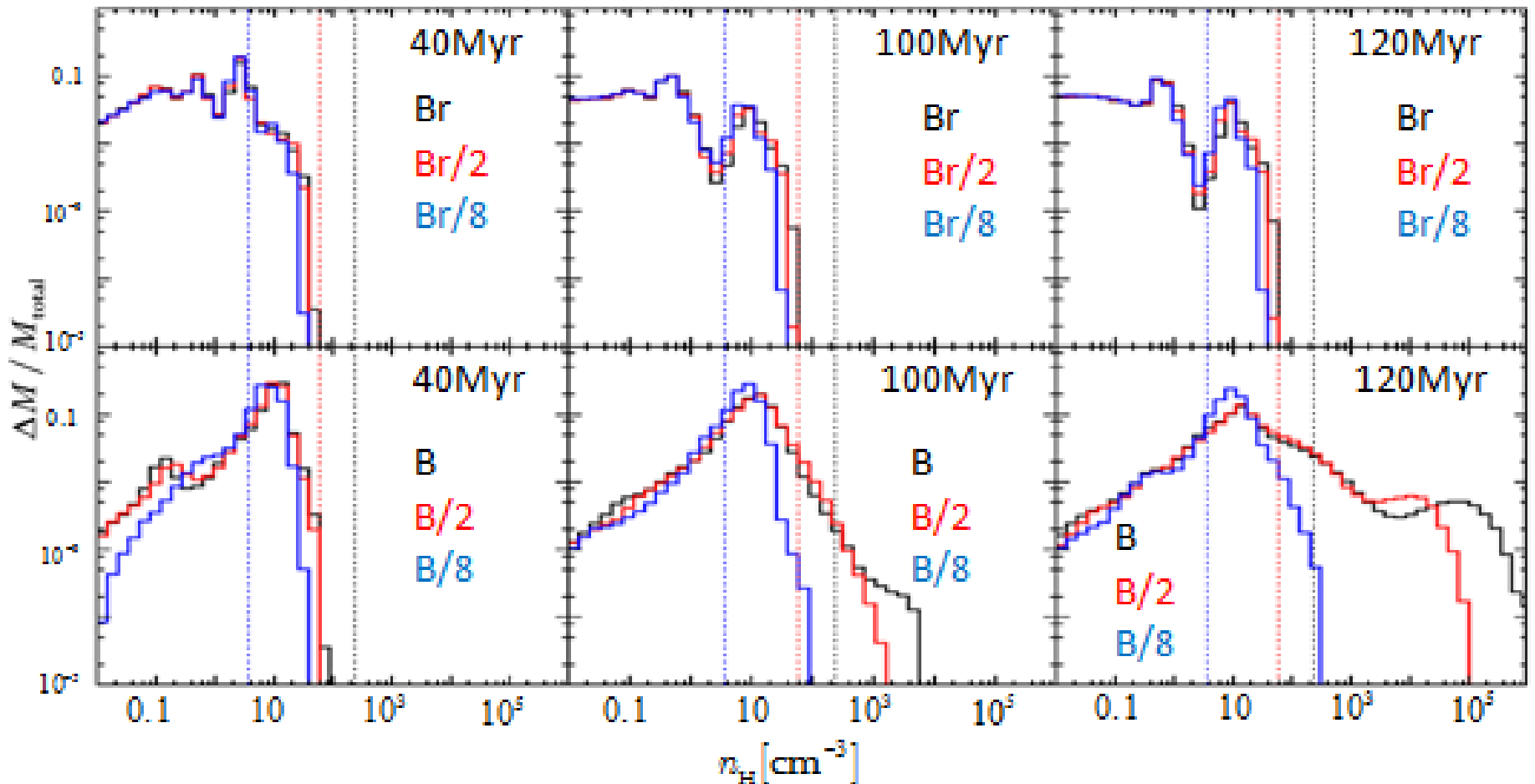
Ar, Br ではHot componentが支配的  
→ large Q → 安定

CrではCold componentが支配的  
→ small Q → 不安定

# Density PDFs



# Convergence of PDFs



Black : B , Br (canonical resolution)

Red : B/2, Br/2 (half resolution)

Blue : B/8, Br/8 (1/8 resolution)

Good agreement below resolution limit

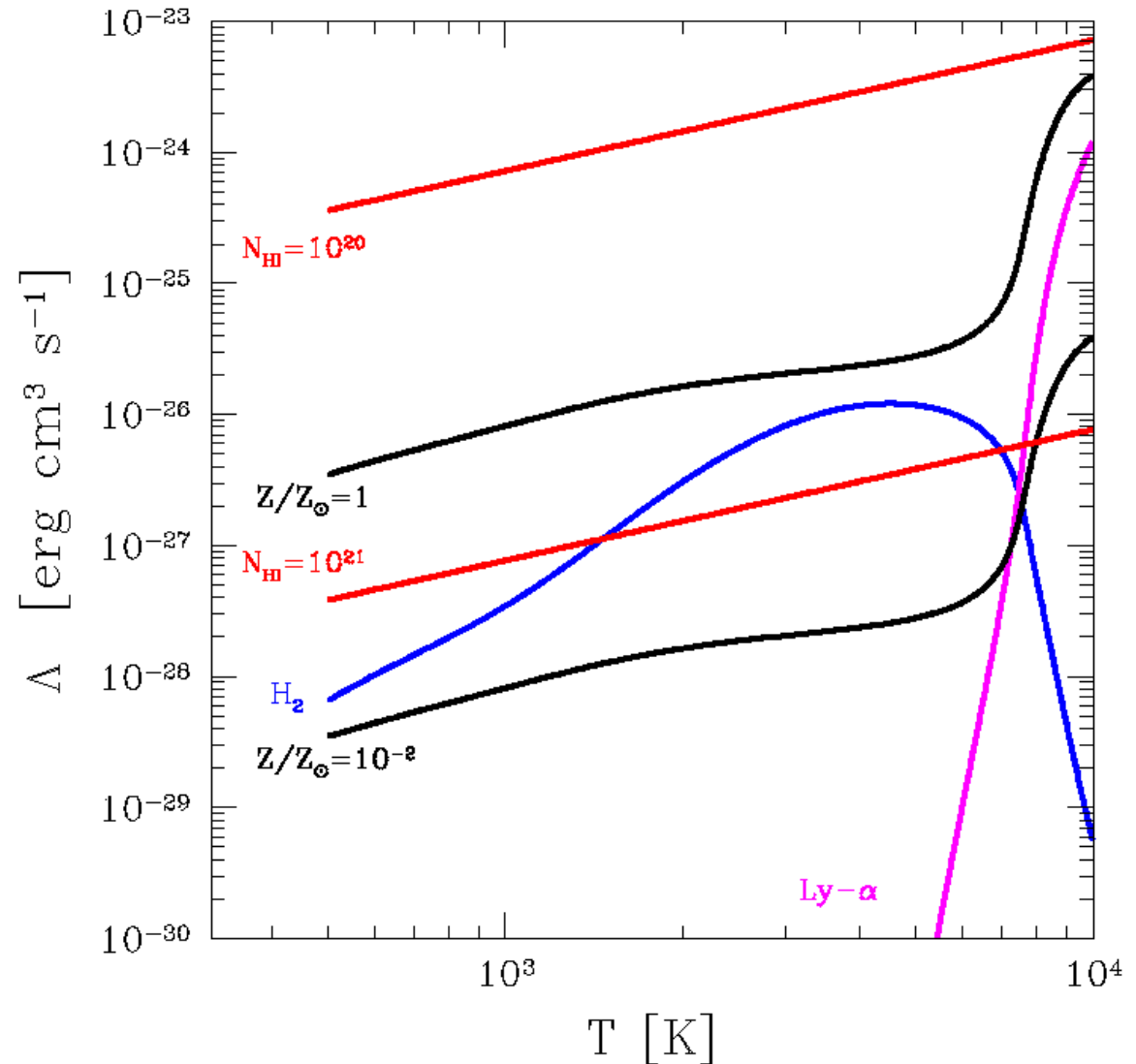


# Photo Heating

$$\begin{aligned}\Gamma_{ion} &= n_{HI} \int_{\nu_L}^{\infty} \int \frac{I_{\nu} \sigma_{\nu}}{h\nu} (h\nu - h\nu_L) d\Omega d\nu \\ &= \frac{4\pi}{3} I_{\nu_L}^{in} n_{HI} \sigma_{\nu_L} \nu_L \left( \frac{\gamma(1, \tau_{\nu_L})}{\tau_{\nu_L}} - \frac{\gamma(4/3, \tau_{\nu_L})}{\tau_{\nu_L}^{4/3}} \right) \\ &\propto \tau_{\nu_L}^{-1} \text{ (for } \tau_{\nu_L} \gg 1)\end{aligned}$$

# Cooling Function for low T

柱密度が大きいものは  
1万度以下に冷却でき  
るが柱密度が小さいと  
だめ。



# threshold column density

$$N_{\text{H,sh}} \simeq \frac{1}{y_{\text{HI}}\sigma_{\nu_{\text{L}}}} \left( \frac{2\pi I_{\nu_{\text{L}}}\sigma_{\nu_{\text{L}}}\nu_{\text{L}}}{3n_{\text{H}}\Lambda_{\text{H}_2}} \frac{\Gamma(\beta)}{1+\beta} \right)^{\frac{1}{\beta}}$$

$$I_{\nu} \propto \nu^{-\alpha}$$

$$\beta \equiv 1 + (\alpha - 1)/3.$$

Using the present assumptions ( $\alpha = 1$ ,  $I_{21} = 1$ ), we have

$$N_{\text{H,sh}} \simeq 7 \times 10^{20} \text{cm}^{-2} \left( \frac{I_{21}}{1} \right) \left( \frac{n_{\text{H}}}{1 \text{cm}^{-3}} \right)^{-1} \left( \frac{y_{\text{HI}}}{0.5} \right)^{-1} \quad (6)$$

今回の計算では  $N_{\text{H}} \sim 2 \times 10^{21} \text{cm}^{-2}$

# 局所紫外線輻射場(>13.6 eV)

- Our Galaxyの  
”diskhalo”モデル

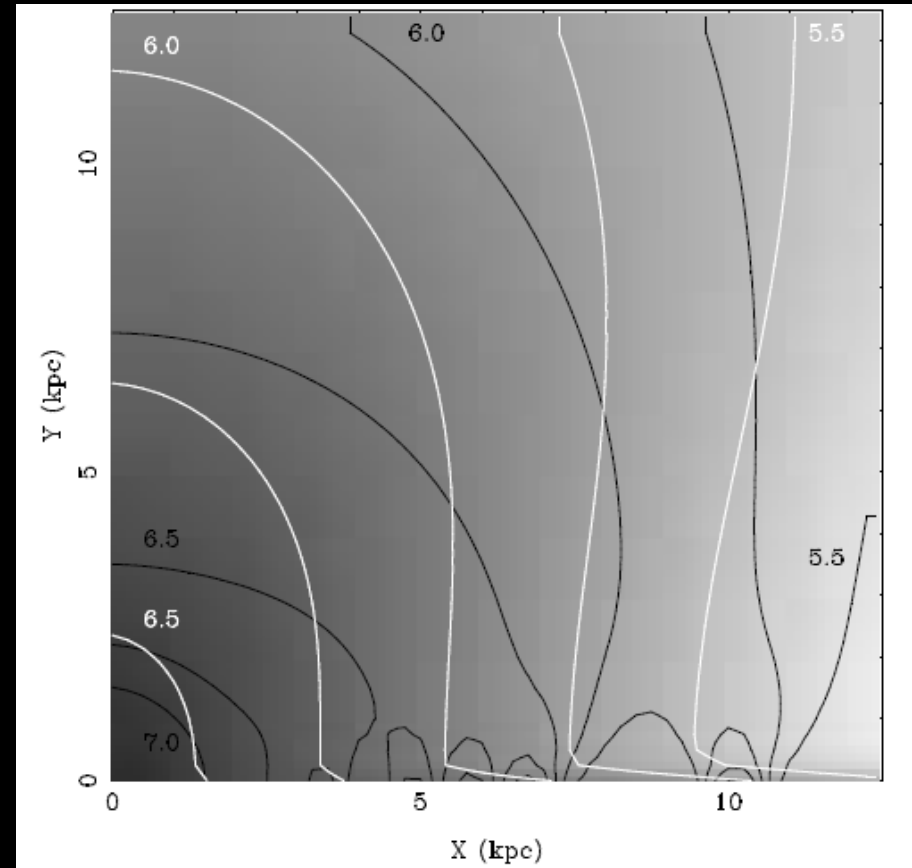
(Bland-Hawthorn & Maloney 1999, 2002)

円盤の成分+バルジの成分+  
6% escape fraction constrained  
by H $\alpha$  obs. on HVC

$$10^{5.5} - 10^7 \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$



$$I_{21} \approx 10^{-1} - 10^{0.5}$$



# @銀河形成期

- AGN

$$I_{21} \approx 10^2 \left( \frac{L_{AGN}}{10^{44} \text{ erg s}^{-1}} \right) \left( \frac{R}{10 \text{ kpc}} \right)^{-2}$$

- 階層的構造形成→円盤は強いLocal fieldにさらされる。

単純にSFRに比例すると考えると、Our Galaxyのlocal fieldの10倍～100倍の強度

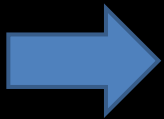
※ $I_{21} \approx 100$ ならば臨界柱密度も100倍

# Critical $N_{\text{HI}} \rightarrow \text{Mass}$

単純に円盤のバリオン質量を計算する。

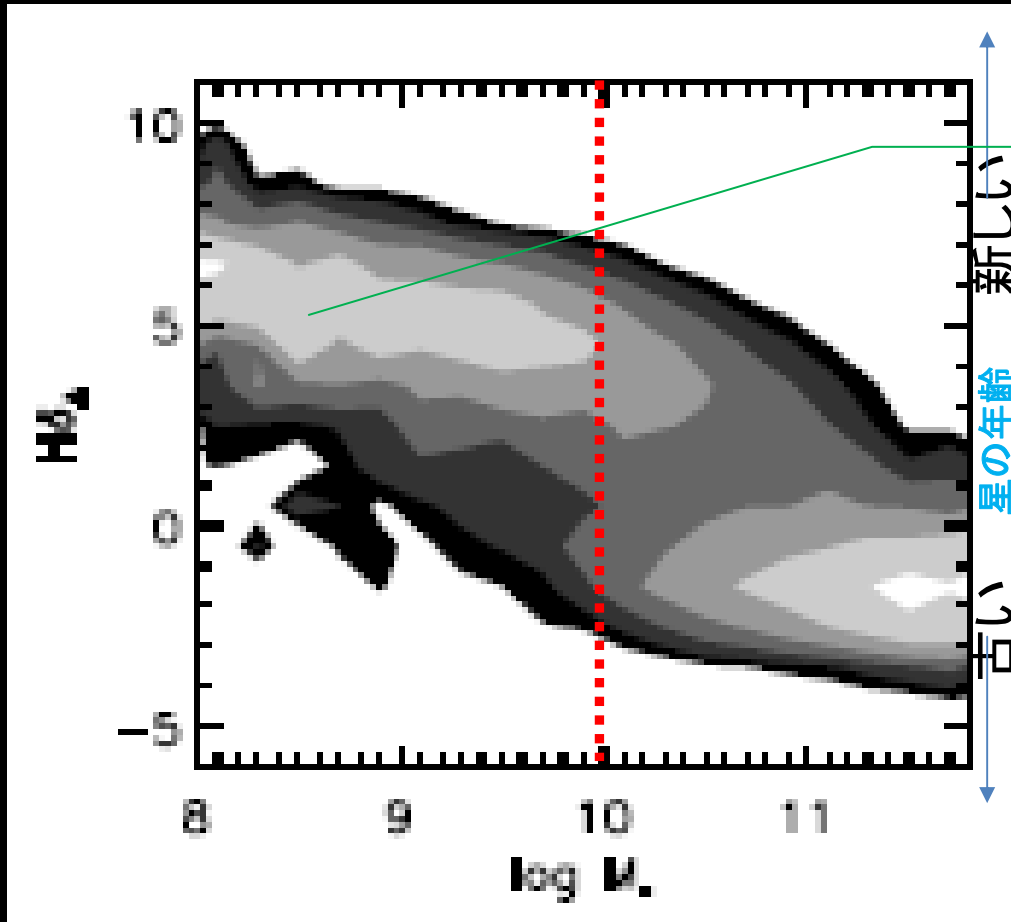
$$M = \pi R_{\text{disk}}^2 N_{\text{HI}} m_{\text{p}}$$
$$= 5 \times 10^9 M_{\odot} \left( \frac{R_{\text{disk}}}{10 \text{kpc}} \right)^2 \left( \frac{N_{\text{HI}}}{2 \times 10^{21} \text{cm}^{-2}} \right)$$

局所輻射場がさらに加わると、 $N_{\text{HI}}$ が10–100倍になるので、円盤の臨界質量も10–100倍。



Downsizingを説明 ?

# Downsizing



$10^{10} M_{\text{sun}}$ 以下の小さな星質量の銀河の方が、星形成が最近になって起こっている。

単純なCDMのモデルとは違って、臨界質量よりも小さな銀河で、high- $z$ での星形成を抑制するメカニズムが必要。

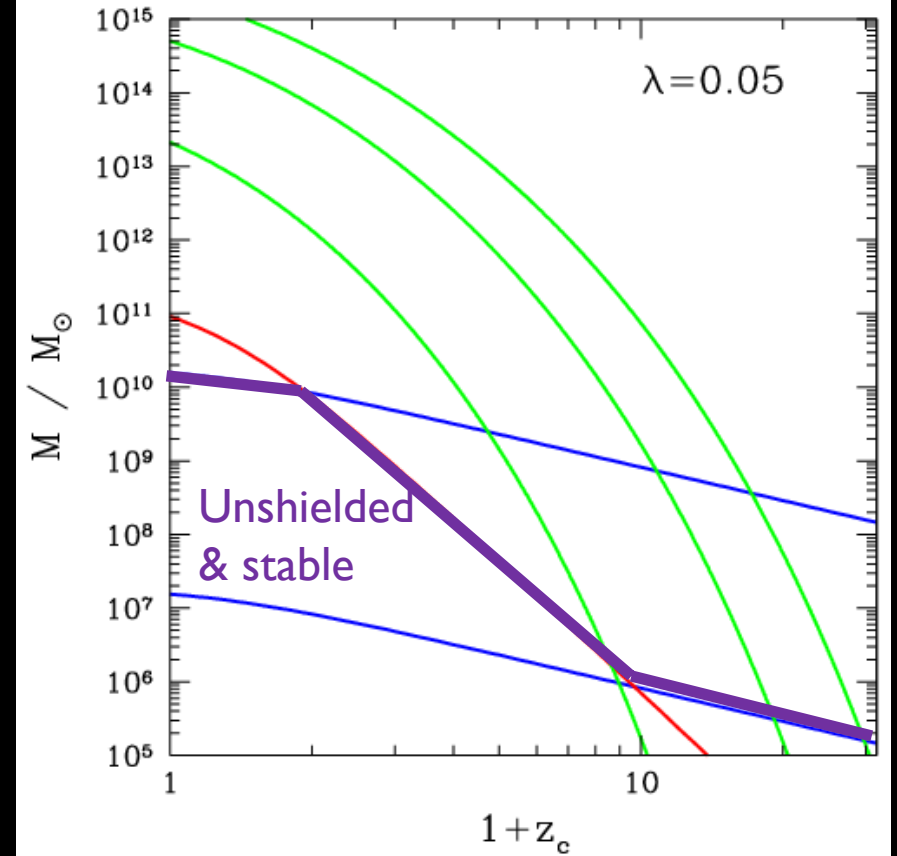
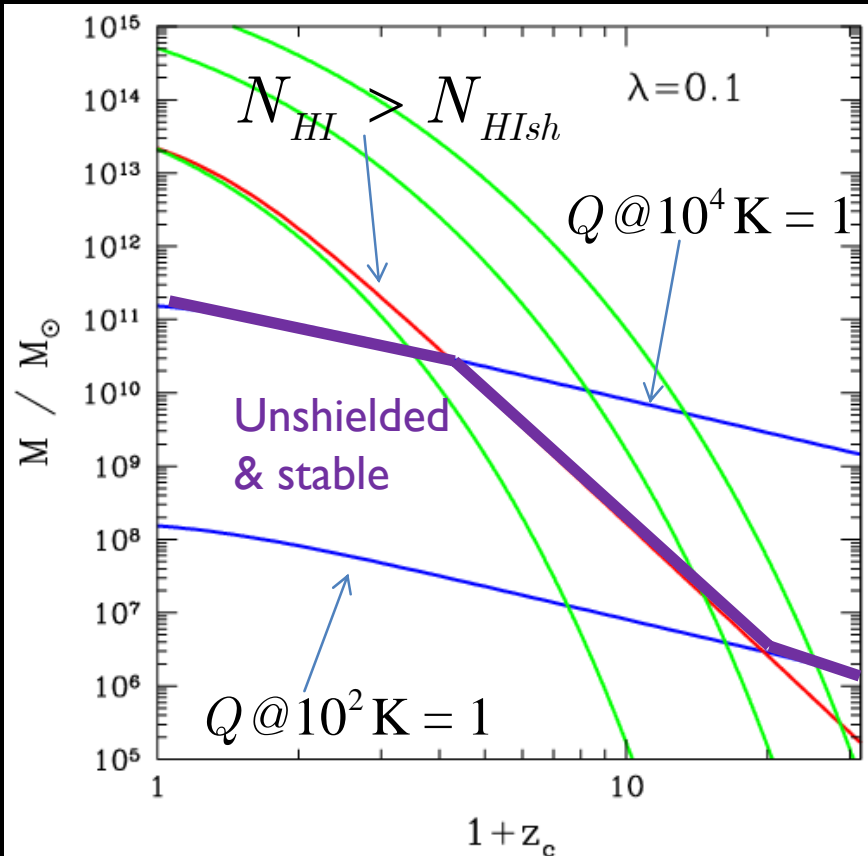
(Kauffman, G. et al, MNRAS, 341, 54, 2003)

# 宇宙論的な考察(1/2)

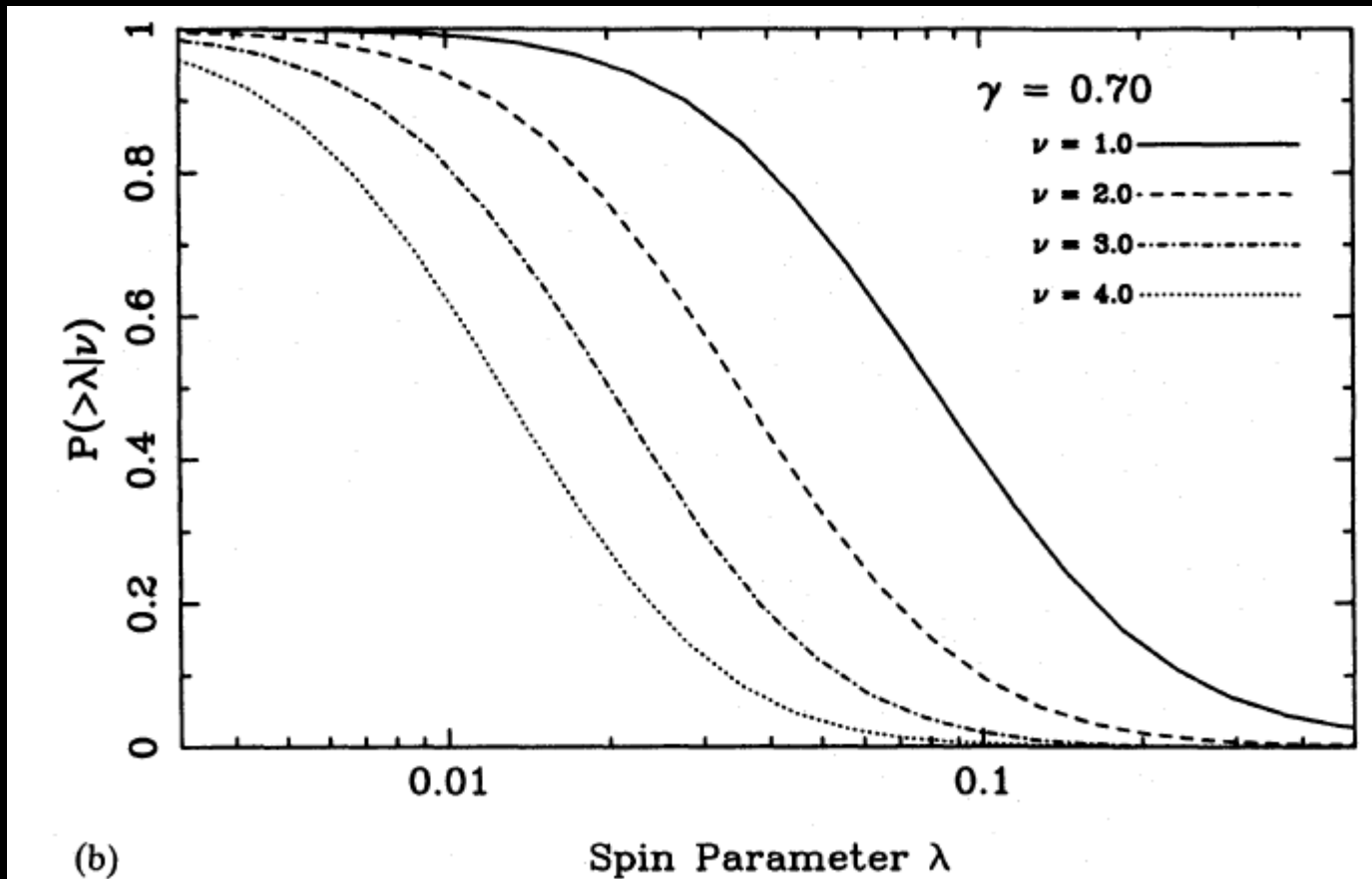
- 宇宙論的なダークハロー( $z_c$ ,  $M$ ,  $\lambda$ )
- ハロー中のバリオンの半分が一様な円盤になったとする
- 円盤は $\lambda$ で回転平衡、鉛直方向には静水圧平衡
- この円盤が $N_{\text{HIsh}}$ を超えるかどうか。
- この円盤の $r=R_{\text{disk}}/2$  で $Q$ が1を超えるかどうか。



# 宇宙論的な考察 (2/2)



# CDM宇宙のスピンパラメータ



# まとめ

- 紫外線背景放射の存在下で、円盤銀河ガスの分裂を輻射流体力学を用いた数値計算で追跡した。
- 臨界の円盤柱密度が存在し、それよりも厚い円盤では自己重力による分裂が起き、それよりも薄い円盤では、分裂が抑制されることがわかった。
- その結果、銀河形成期に $M_{\text{disk}} \sim 10^{10} M_{\text{sun}}$  程度以下の円盤銀河では星形成が抑制され、所謂 Downsizingの問題を解決することが期待される。