

初代星研究会(1/24)

初期宇宙における始原ガス雲と 巨大ブラックホール

東大吉田研M2 鄭昇明

Motivation: Super Massive Black Hole at high- z

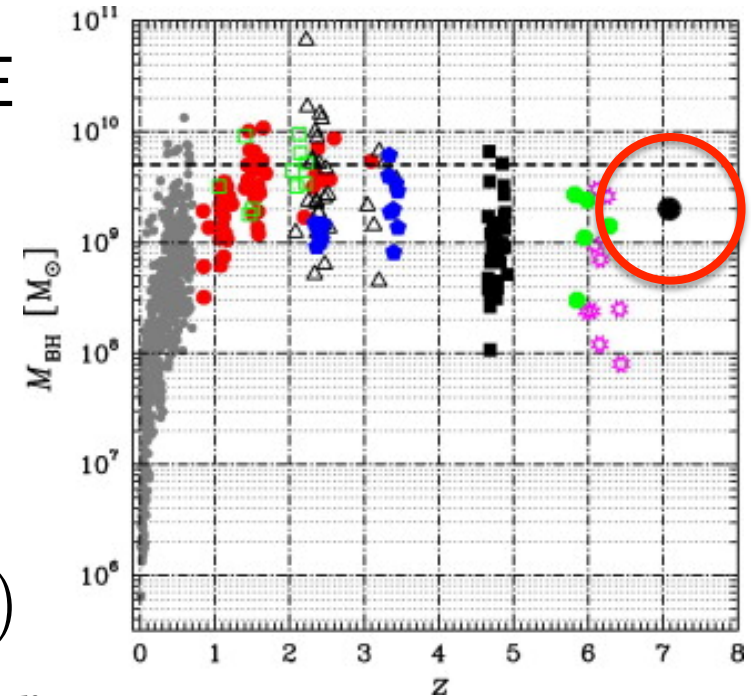
- high- z ($z \sim 7$)で $10^9 M_\odot$ のBHが存在

$\Rightarrow$ 0.8 Gyrのうちに $10^9 M_\odot$ のBHを作るプロセス？

- Eddington rateで降着させると...

$$\dot{M} \propto M \quad \Rightarrow \quad M = M_{\text{ini}} \exp(t/t_E)$$

where $t_E \sim 4 \times 10^7 \text{ yr}$



(Marziani et al. 2011)

- PopII $\Rightarrow M_{\text{ini}} = 1 M_\odot \Rightarrow$ 時間が足りない
- PopIII $\Rightarrow M_{\text{ini}} = 100 M_\odot \Rightarrow$ 0.6Gyrで $10^9 M_\odot$ に到達。 しかし...

いくつかの問題点

- Eddington rateでの降着を維持するのは難しい
 1. 数々のfeedback

Photo-ionization: (Yoshida. 2006),
(Alvarez et al. 2009)
 2. BH merger

非対称なBH merger $\Rightarrow$ BH ejection (Blecha & Loeb. 2008)
- 1つの解決策(可能性)
 - いきなり大きなmassをもったBHの種を作れば...

Direct Collapse

- 周囲の銀河からの強い紫外光

⇒ H₂分子が解離される。

⇒ H₂ Coolingがinefficientに⇒ 赤線のように進化

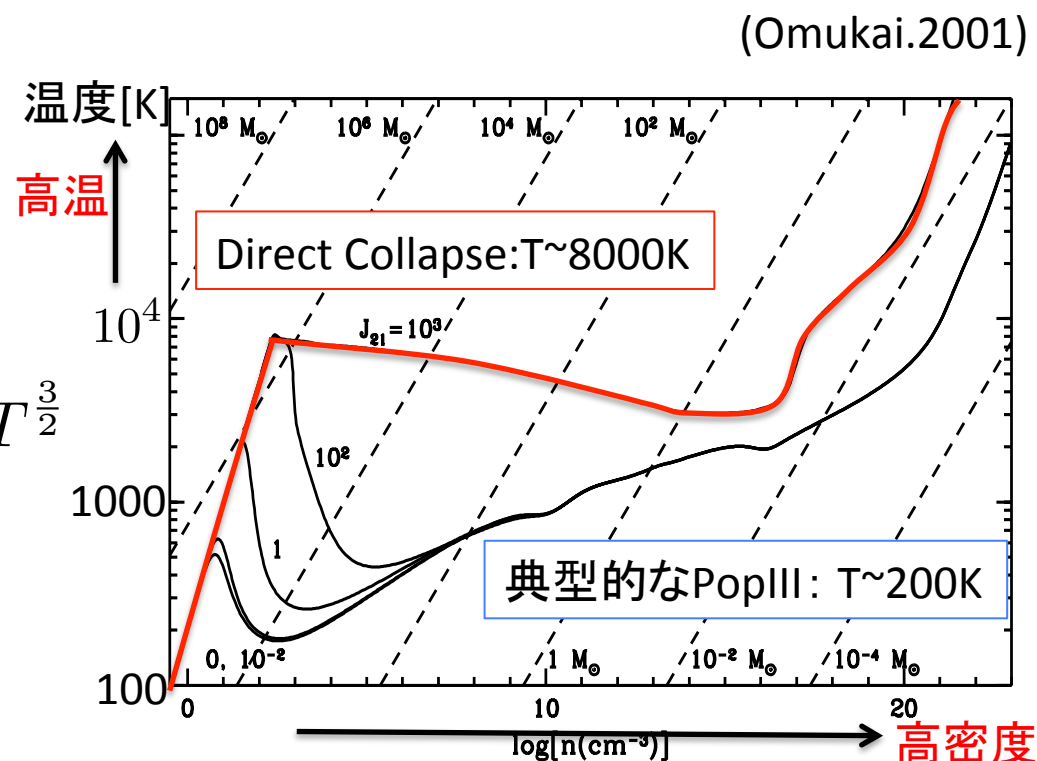
1. 等温で進化

⇒ 分裂が起こりにくい

2. 高い降着率

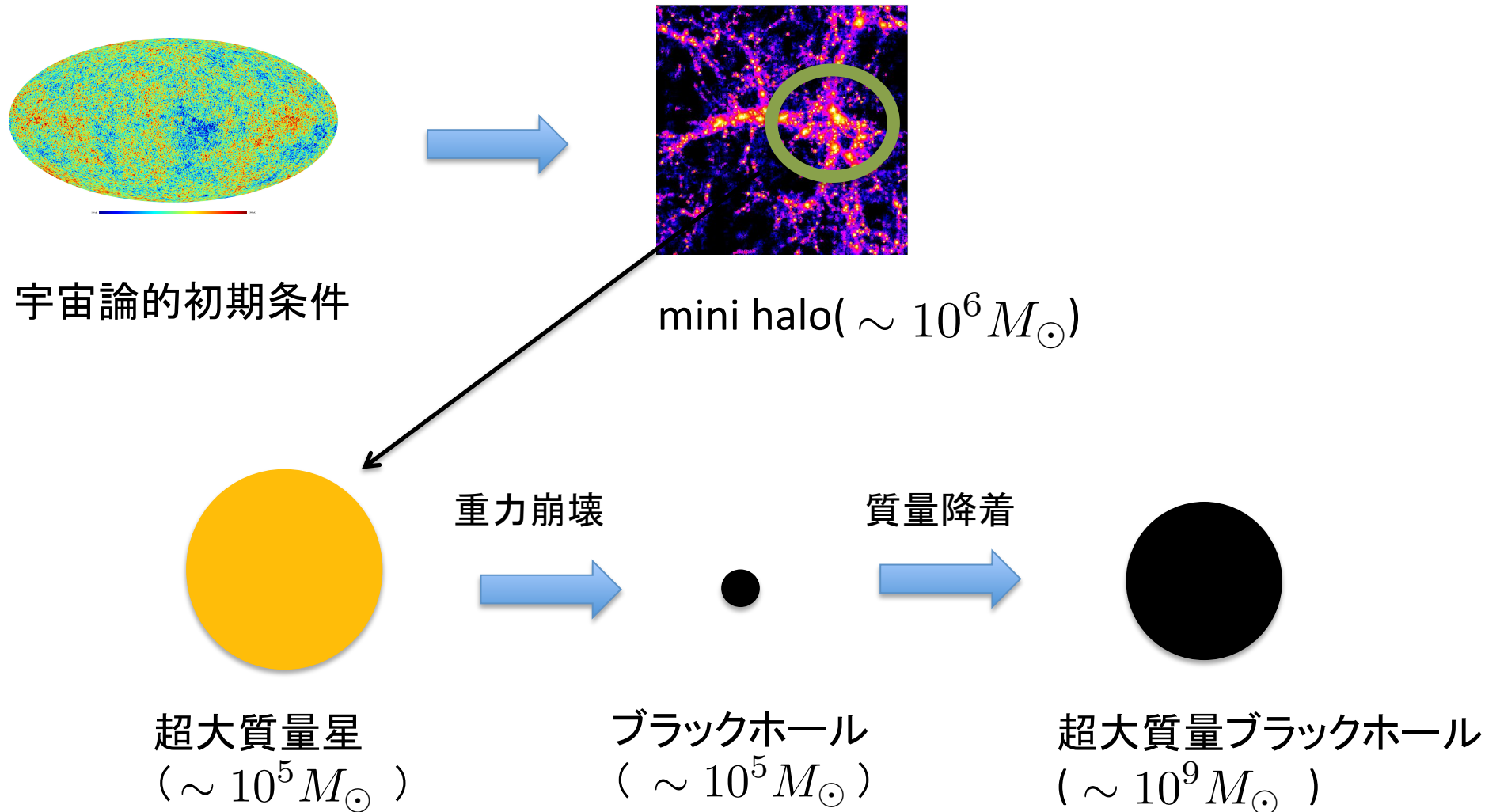
$$\dot{M} \sim M_J/t_{\text{ff}} \sim c_s^3/G \propto T^{\frac{3}{2}}$$

⇒ 降着率 : $1 M_{\odot}/\text{yr}$



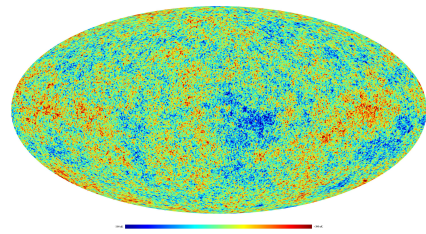
輻射強度を変化させたときのガス雲の進化

Direct Collapse シナリオ

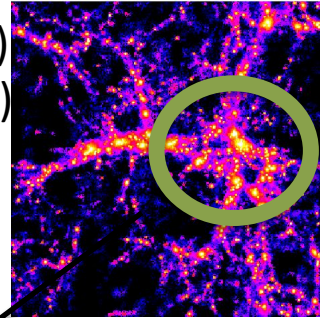


Direct Collapse シナリオ

今回



(Agarwal et al. 2012)
(Johnson et al. 2013)



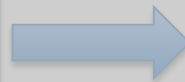
mini halo ($\sim 10^6 M_{\odot}$)

宇宙論的初期条件



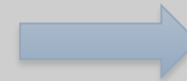
超大質量星
($\sim 10^5 M_{\odot}$)

重力崩壊

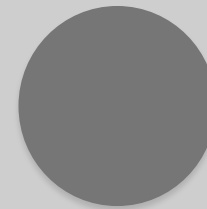


ブラックホール
($\sim 10^5 M_{\odot}$)

質量降着



超大質量ブラックホール
($\sim 10^9 M_{\odot}$)



本研究の目的

1. Direct Collapse haloが本当に存在するか？

⇒宇宙論的シミュレーション

⇒DC候補ハローの分布

2. ガス雲から星に至るまで

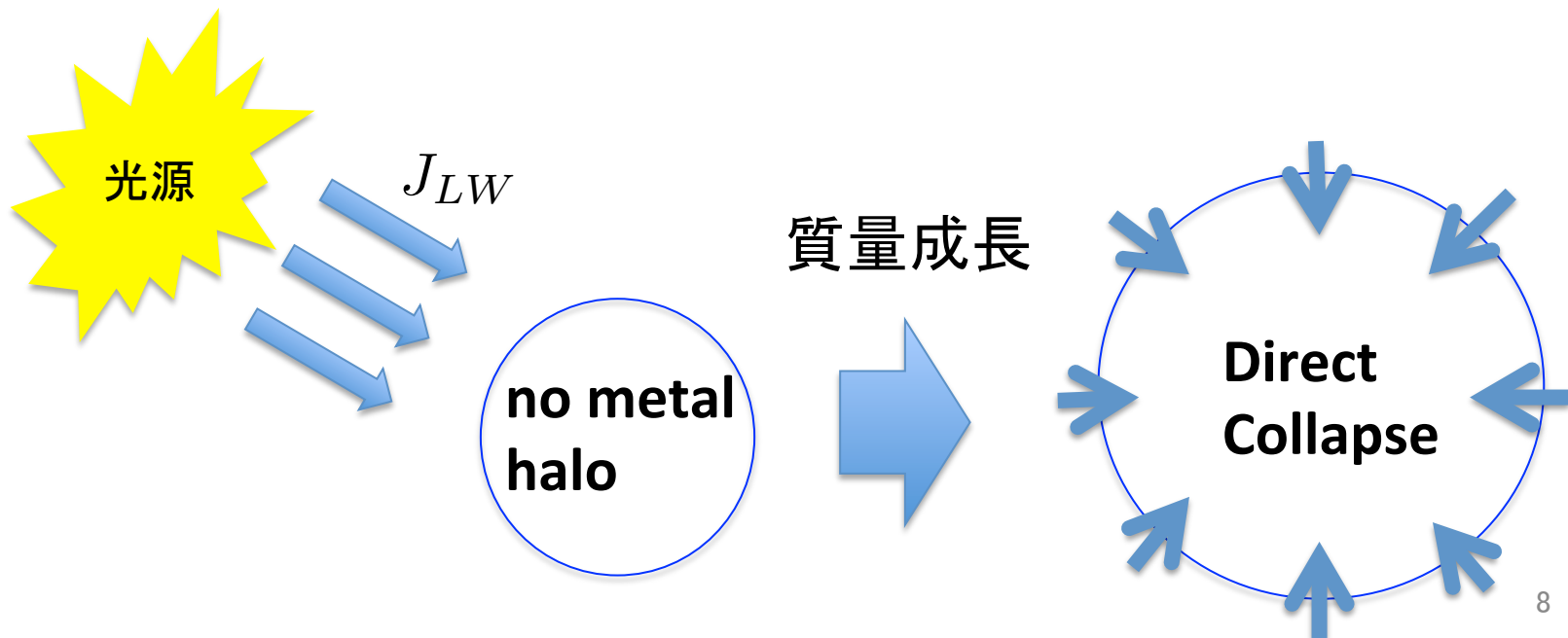
⇒流体シミュレーション

⇒本当にDirect Collapseするか？

先行研究は1まで、本研究では実際の**ガス雲の進化**も計算する。

Direct Collapseを起こす条件

1. 重元素汚染されていない
2. 非常に強い輻射($J_{\text{LW}} > J_{\text{crit}}$)
3. 非常に重い($T_{\text{vir}} \geq 8000\text{K}$, $M_{\text{halo}} \sim 10^6 M_{\odot}$)



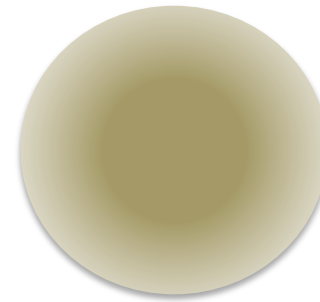
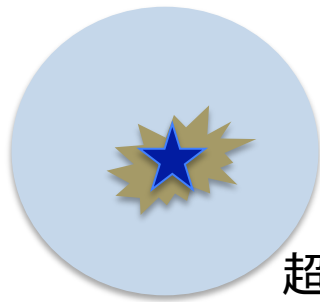
Direct Collapseを起こす条件

1. 重元素汚染されていない (過去に星形成してない)

⇒ halo内部で星形成が起こると、超新星爆発により重元素がまき散らされる。

⇒ 輝線・ダスト冷却

⇒ 低質量($\sim 1M_{\odot}$)になってしまう



ハロー全体が
金属汚染される

2. 非常に強い輻射 ($J_{LW} > J_{crit}$)

3. 非常に重い ($T_{vir} > 8000K$)

Direct Collapseを起こす条件

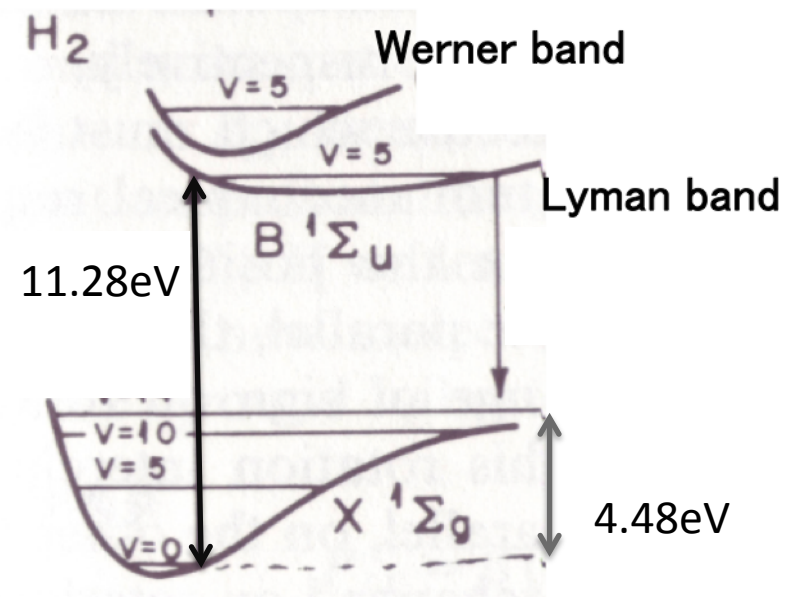
1. 重元素汚染されていない
2. 非常に強い輻射場 ($J_{\text{LW}} > J_{\text{crit}}$)
 - H₂の解離 $\Rightarrow$ 11.2eV ~ 13.6eV (Lyman – Werner band)
 - $J_{\text{LW}} \geq 30 \sim 10^4$
(H⁻の解離も影響)

$$J_{\text{crit}} = \begin{cases} 1000 \text{ (for PopIII)} \\ 100 \text{ (for PopII)} \end{cases}$$

(Shang et al. 2010)

単位 $J_{21} = 10^{-21} \text{erg/s/cm}^2/\text{Hz/str}$

3. 非常に重い ($T_{\text{vir}} > 8000\text{K}$)



H₂分子のエネルギー準位(Spitzer)

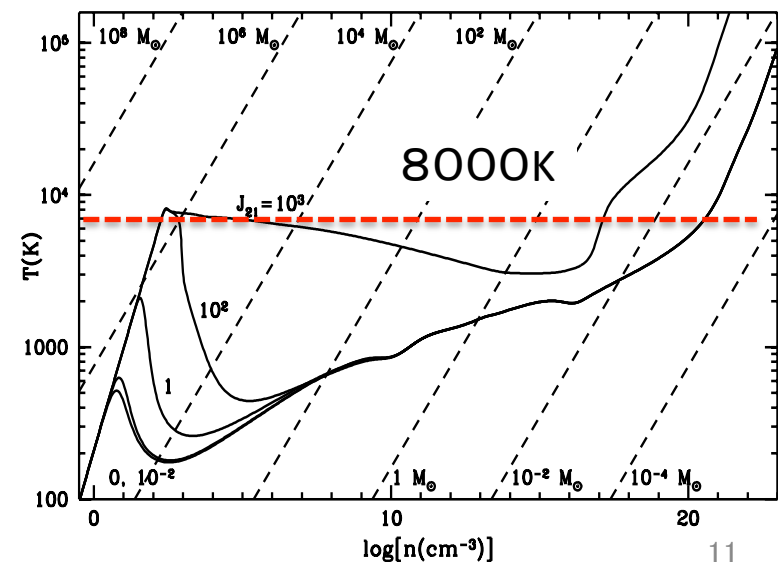
Direct Collapseを起こす条件

1. 重元素汚染されていない
2. 周囲の星から非常に強い輻射を受けている
3. 非常に重い ($T_{\text{vir}} \geq 8000\text{K}$ 、 $M_{\text{halo}} \sim 10^6 M_{\odot}$)

Direct Collapse halo: 冷却剤のH₂がほとんど存在しない。

(Omukai. 2001)

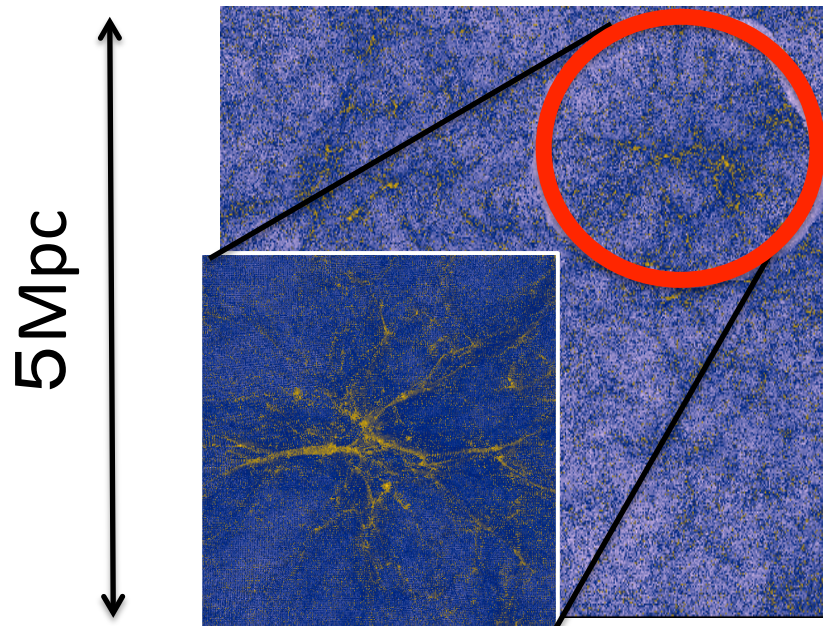
- ➡ 断熱収縮
- ➡ 8000Kまで加熱
- ➡ HのLy α 輝線により冷却



Direct Collapse候補halo

- N体計算 -> DC候補ハローを探す。
- DM分布より輻射場 (J_{LW}) を与える。

N体シミュレーション(DM only)



クラスタリング領域をZoom-In

Zoom-In領域: 半径600kpc

粒子数: 2048^3 (effective)

1粒子の質量: $\sim 1.2 \times 10^3 M_{\odot}$

分解能: $\sim 1.2 \times 10^5 M_{\odot}$

(> 100粒子 / halo)

Direct Collapse候補halo

解像度 $\simeq 10^5 M_{\odot} \Rightarrow$ Mini halo ($\simeq 10^5 M_{\odot}$) を分解可能
 $\Rightarrow$ ダークマターハローにおいて、
PopIII形成(重元素汚染)が起きたかどうか分かる。

DC候補ハローの条件

1. 重元素汚染されていない (星形成してない)
2. 周囲の星から非常に強い輻射を受けている
3. 非常に重い ($T_{\text{vir}} \geq 8000\text{K}$)

輻射場の計算

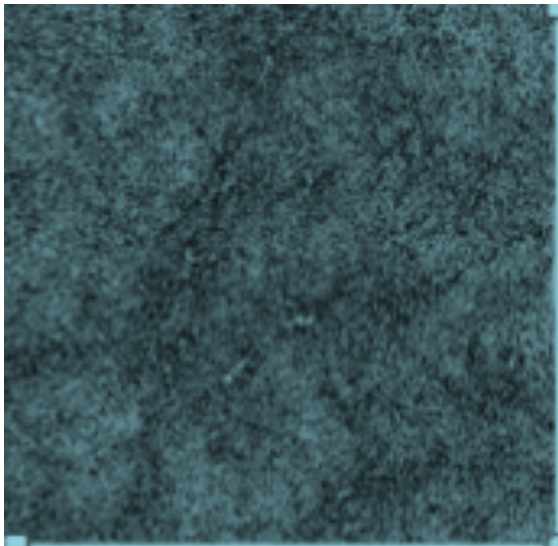
- ある瞬間においてDM haloは ϵ_{duty} の割合で光っている。

ϵ_{duty} : (星形成のタイムスケール)/(Hubble time)

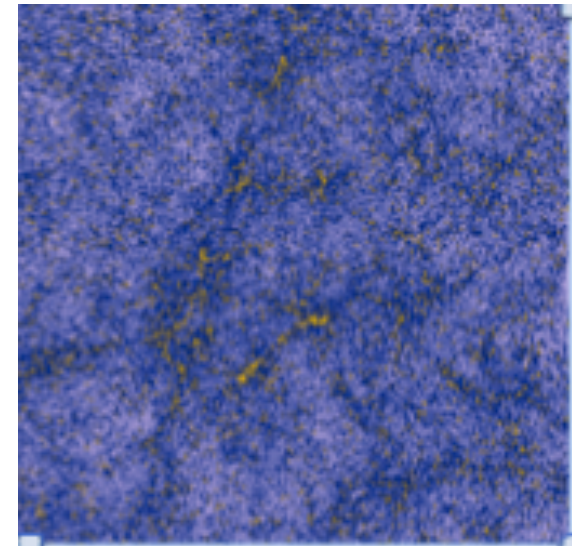
~ 0.2

- 輻射強度 (Iliev et al. 2006) t_s : 星の寿命

$$J_{\text{LW}} \sim 1.5 \times 10^2 \left(\frac{f_\gamma}{250} \right) \left(\frac{M_{\text{halo}}}{10^8 M_\odot} \right) \left(\frac{20 \text{ Myr}}{t_s} \right) \left(\frac{1 \text{ kpc}}{r} \right)^2$$



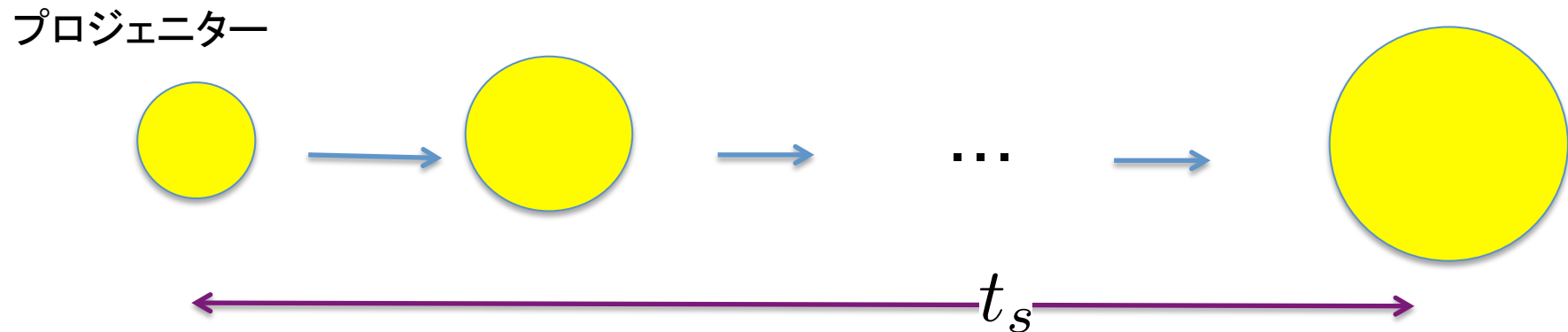
一部のハローに
luminosityを
与える。



輻射場の計算

- ビリアライズして間もないハローに光源をおく。

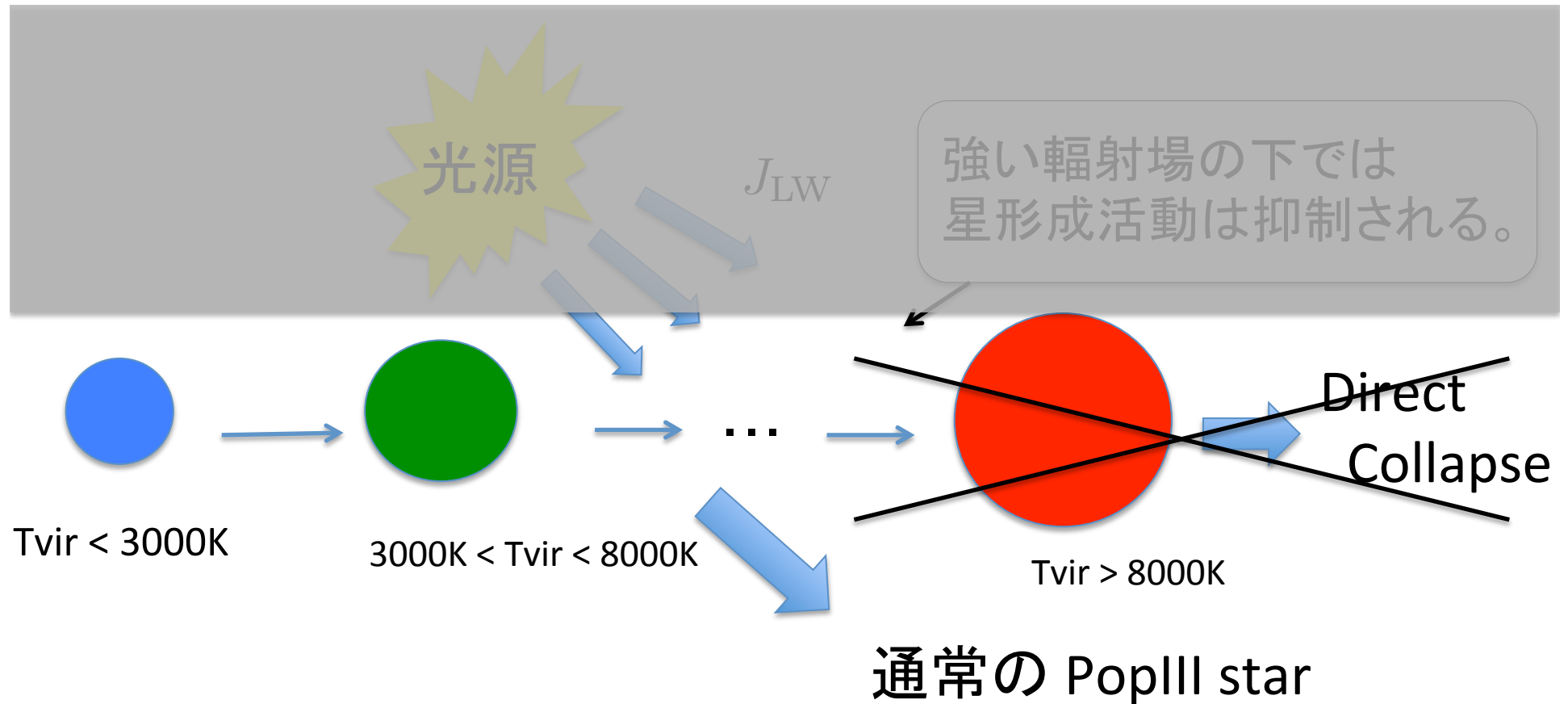
⇒ プロジェニターの質量との比が小さいものから順に ϵ_{duty} の割合のハローが光っていると考える。



(t_s : 星形成のタイムスケール～数千万年)

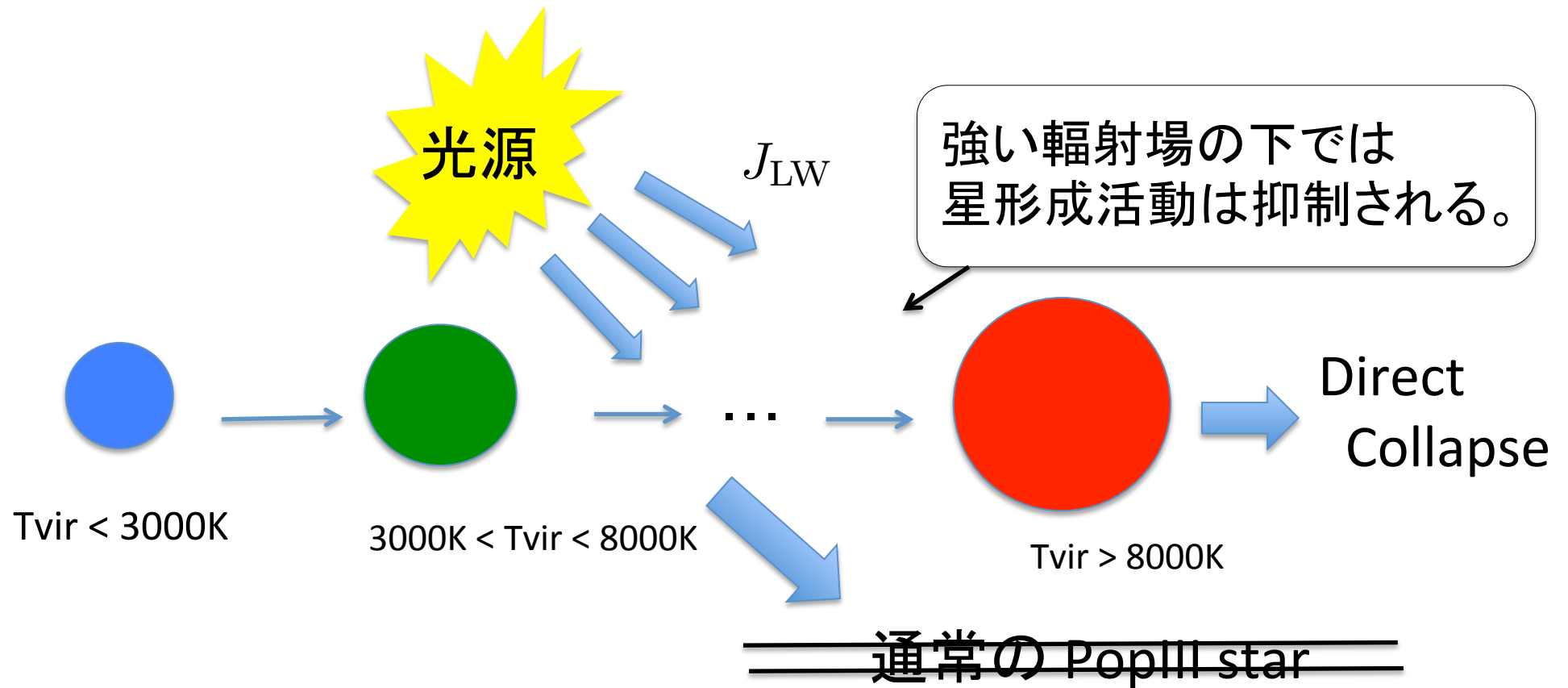
DC候補haloの探索

- DC候補ハロー ⇒ 光源ハローの近傍に存在

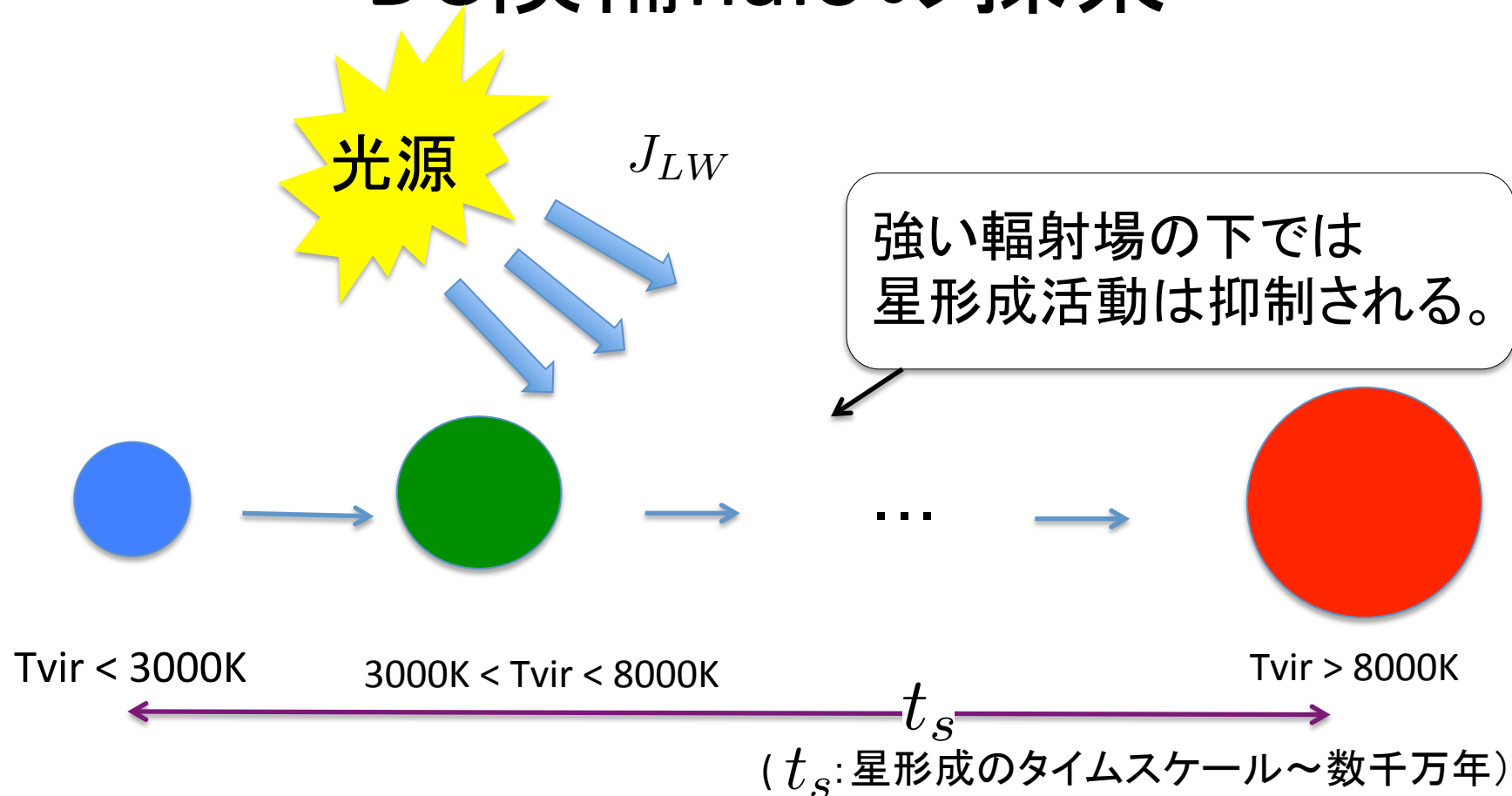


DC候補haloの探索

- DC候補ハロー $\Rightarrow$ 光源ハローの近傍に存在



DC候補haloの探索



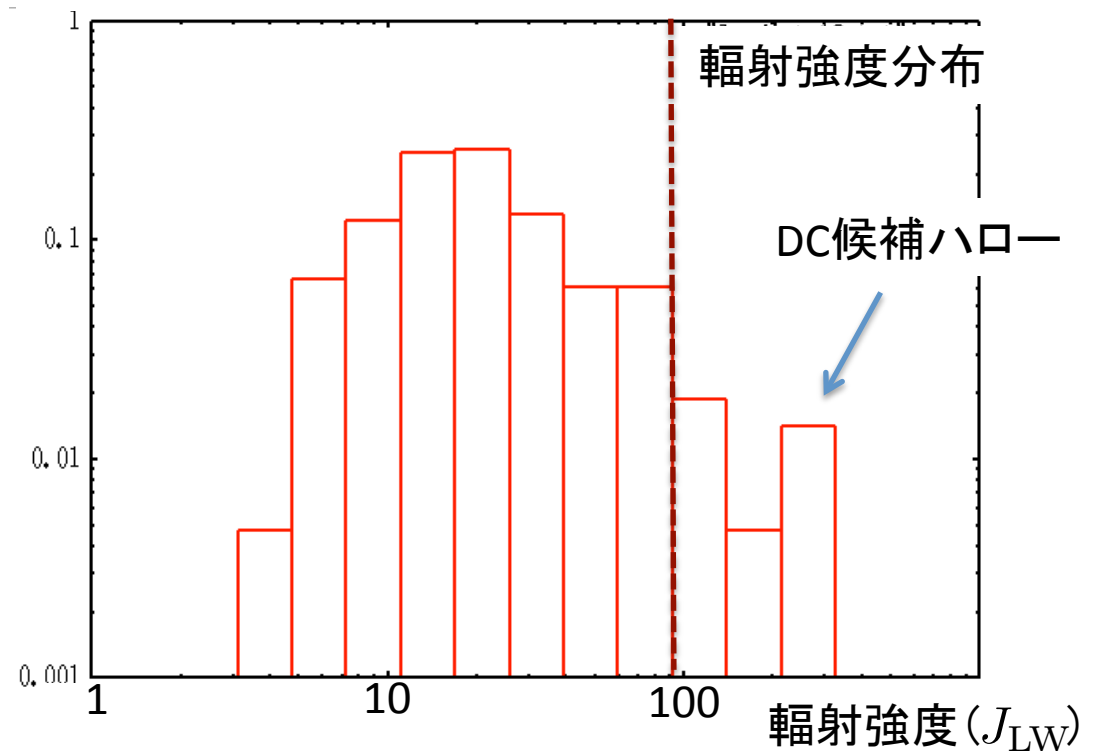
- 光源の近くで急成長したハローを探す。
⇒ t_s の間にビリアル温度が
3000K → 8000K になったハロー

DCBH候補halo

- 星形成タイムスケール(t_s)への依存性を調べる。

t_s	5000 万年	6000 万年	7000 万年	8000 万年
候補の数	3	4	7	11

t_s が大きい程、成長時間に余裕があるため候補の数は増える。



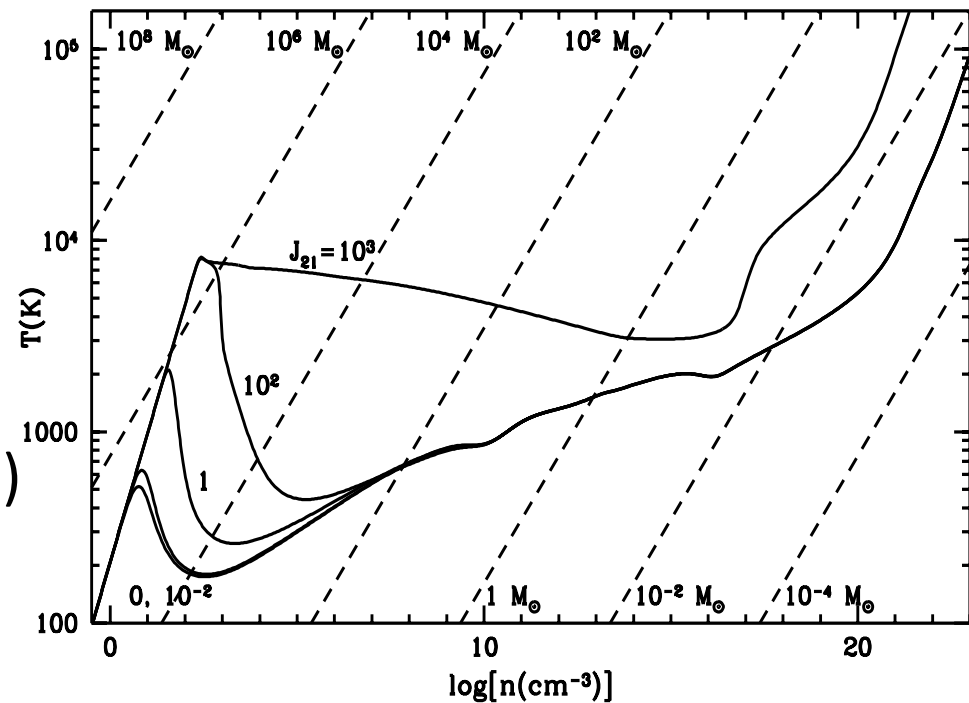
DC候補haloにおけるガス雲の進化

- 目的: DC haloにおけるガス雲の進化。原始星に至るまでの過程を計算(したい)。

- setup

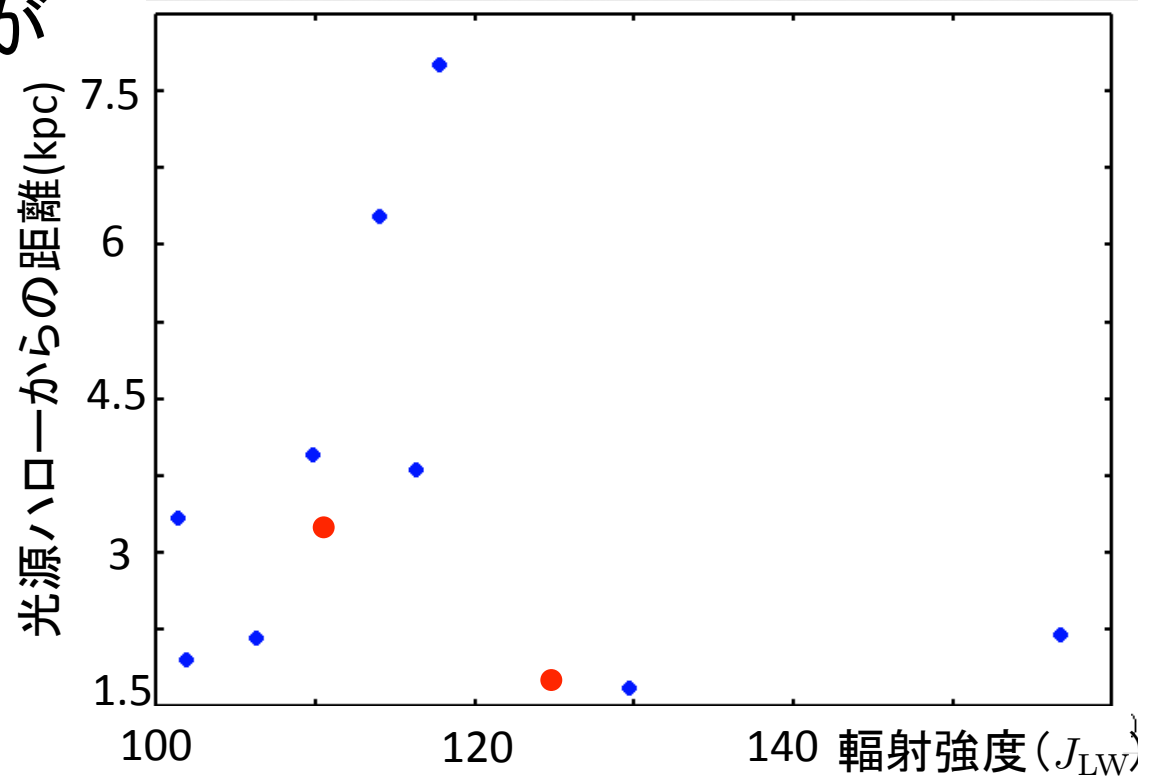
- Gadget3 (Nbody+SPH)
- Baryon入り流体計算
- 始原的化学反应
(Yoshida et al. 2006; 2007)
- 局所的ー様輻射場(J_{LW})

(Omukai. 2001)

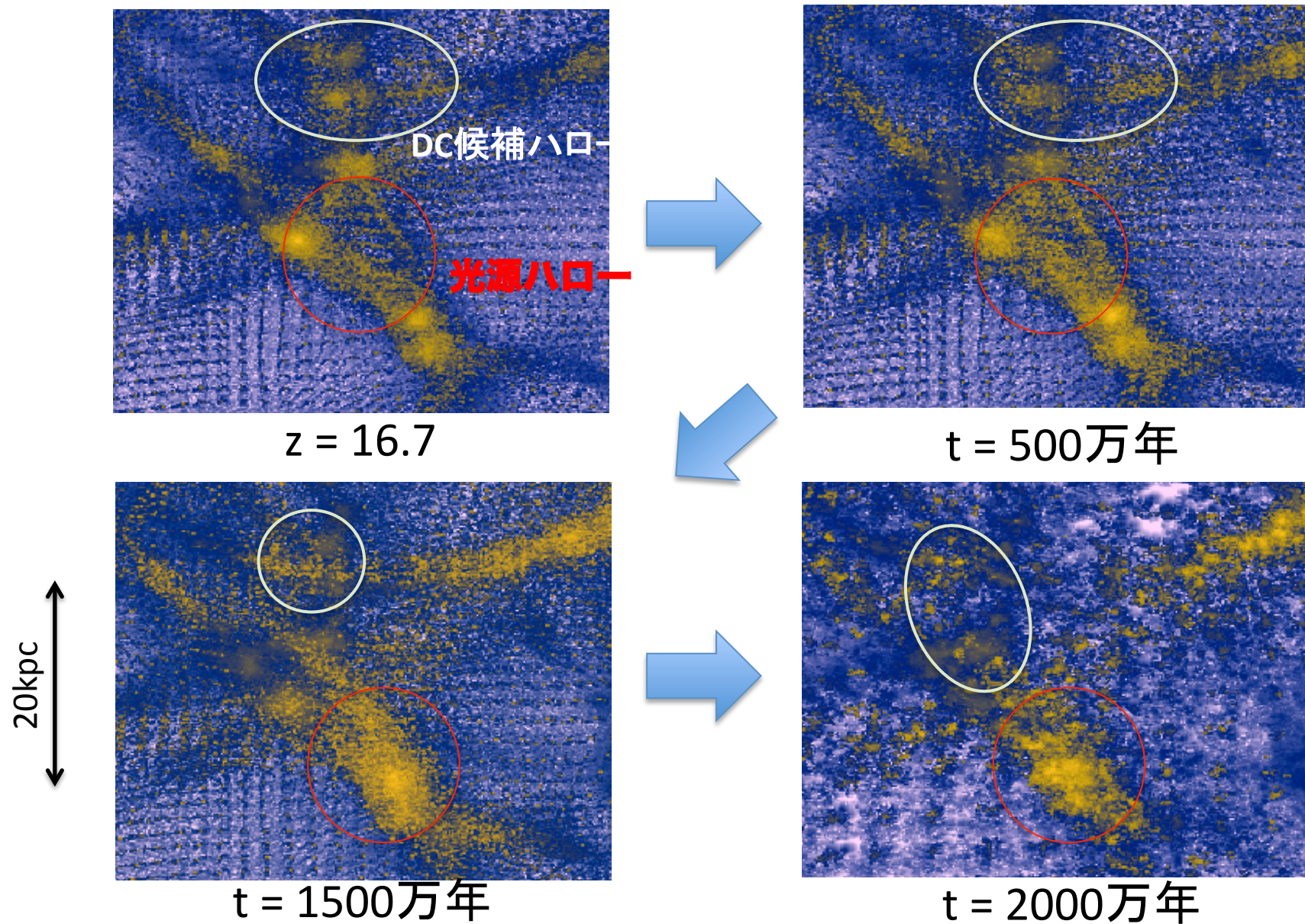


DC候補haloにおけるガス雲の進化

- DC候補ハロー $\Rightarrow$ 11個 ($t_s = 8000$ 万年)
- 最初にcollapseする2例について計算
 $\Rightarrow$ いずれの場合もDirect Collapseせず
 $\Rightarrow$ 光源ハローと距離が近いのが原因



DC候補ハローの進化

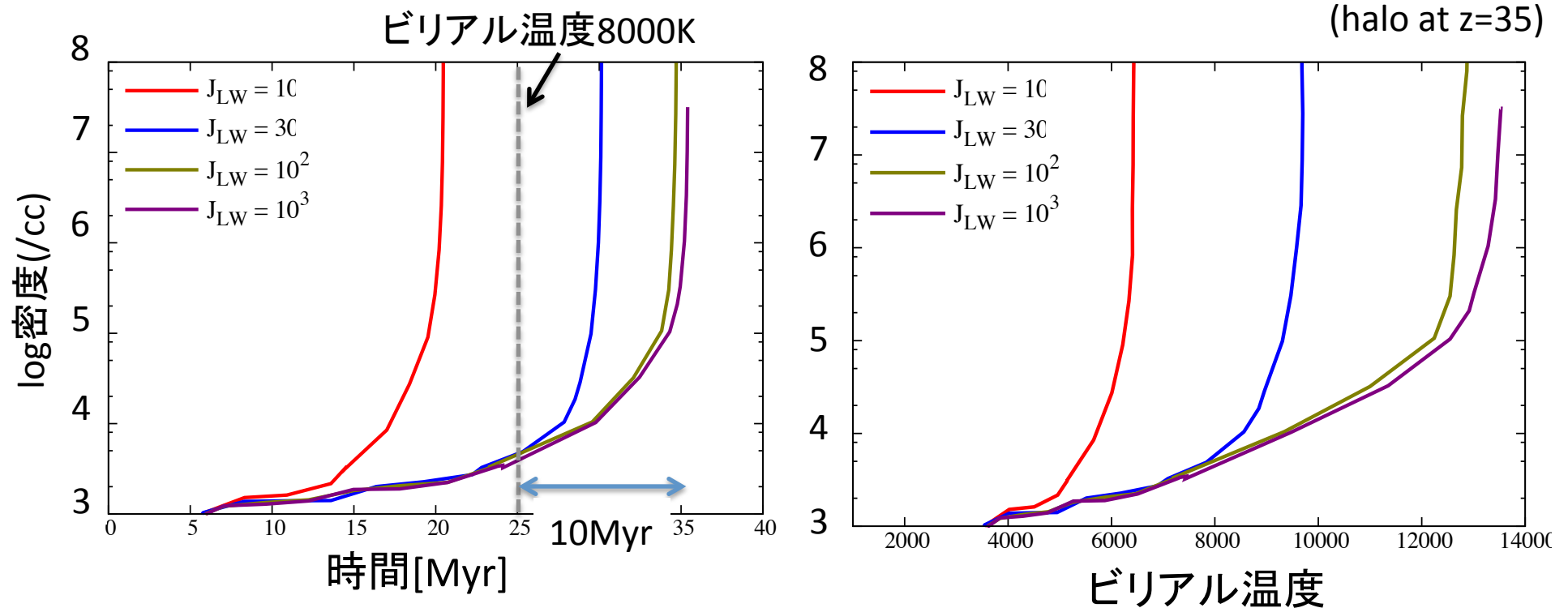


Direct Collapseを起こさなかった原因

1. DC候補ハローは激しくmergerを起こしている。⇒ビリアライズするのが遅れる。
2. 近傍の光源ハローの潮汐力による、変形・分裂
3. 強い輻射場によりガス雲の崩壊が遅れる。

Discussion

3. 強い輻射場によりガス雲の崩壊が遅れる。



$\Rightarrow T_{\text{vir}} = 8000\text{K}$ に達しても、崩壊にはさらに1000万年程かかる。

まとめ

1. ダークマター分布から輻射場をモデル化し、
DC候補ハローを探索。
⇒DC候補ハローの数 $< 11 \text{個}/(5 \text{Mpc})^3$
⇒先行研究とconsistent
2. DC候補ハローにおけるガス雲の進化を計算
⇒2例について計算
⇒いずれもDirect Collapseせず、光源ハロー
とmergeしてしまう

