

$z > 100$ の極初期宇宙における 初代星の形成

伊藤 茉那, 大向 一行 (東北大学)
2023/11/20 初代星・初代銀河研究会

Outline

1. Introduction

2. Method

3. Results

4. Discussion

5. Summary

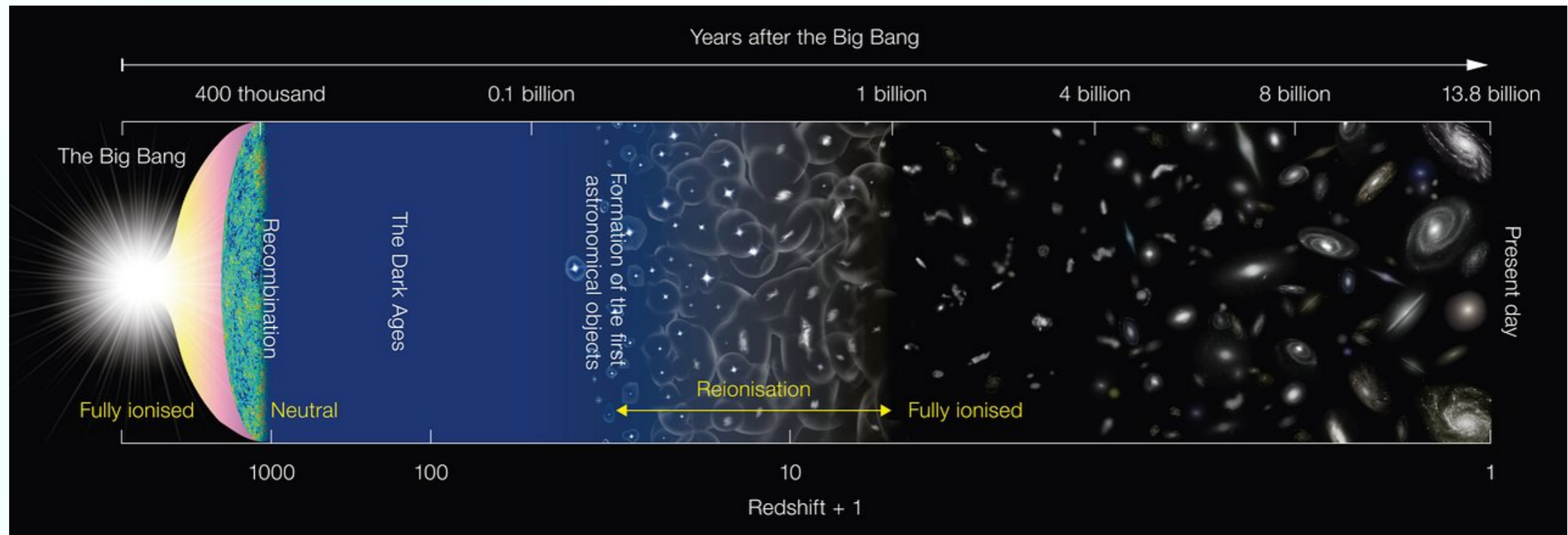
Introduction

初代星について

形成時期：一般に $z \sim 20 - 30$

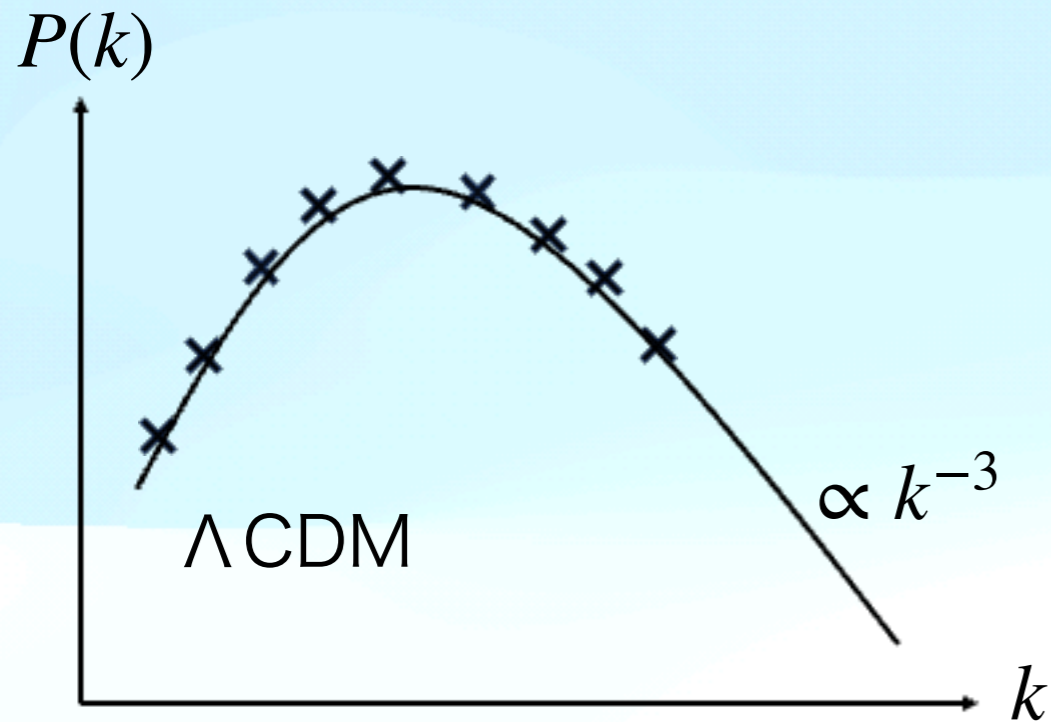
形成場所：ミニハロー ($\sim 10^6 M_{\odot}$) 中の高密度コア (数 $100 M_{\odot}$)

ゼロメタルの大質量星として誕生



研究背景と目的

Λ CDMモデル

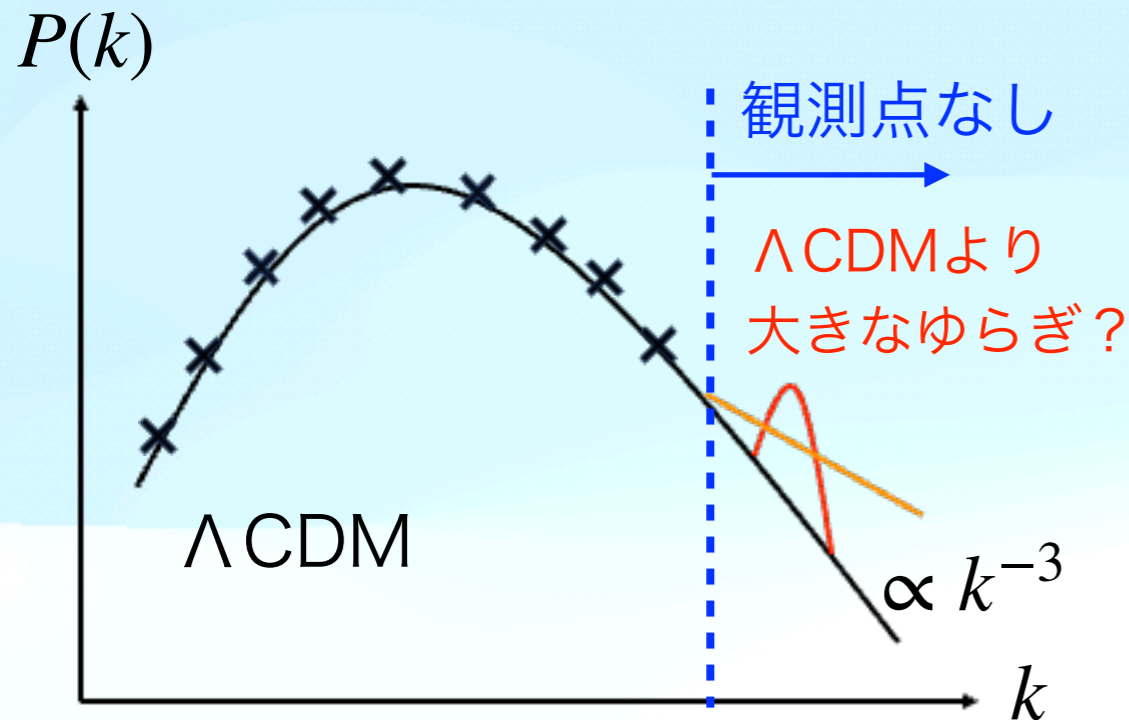


- ✓ 大スケールで観測されているゆらぎを小スケールまで外挿
- ✓ Λ CDMから得られる典型的な初代星形成時期は $z \sim 20$
 - ✓ 観測可能な初代星は $z \lesssim 60$ と言われている (Naoz et al. 2006)

ただし、銀河スケール (~ 1 Mpc) 以下のゆらぎの大きさは不明

研究背景と目的

非標準的なゆらぎスペクトルの場合



小スケールでのゆらぎが大きければ

- $z \sim 20$ より早期での星形成も可能
- JWSTの観測で見つかっている $z \sim 10$ の明るい銀河を説明できるかも

c.f. Parashari & Laha 2023; Hirano & Yoshida 2023

より高赤方偏移の初代星形成についてはあまり調べられていない

**極初期宇宙 ($z \sim 100 - 700$) において、
初代星はどのような進化過程を辿るのか？**

Outline

1. Introduction

2. Method

3. Results

4. Discussion

5. Summary

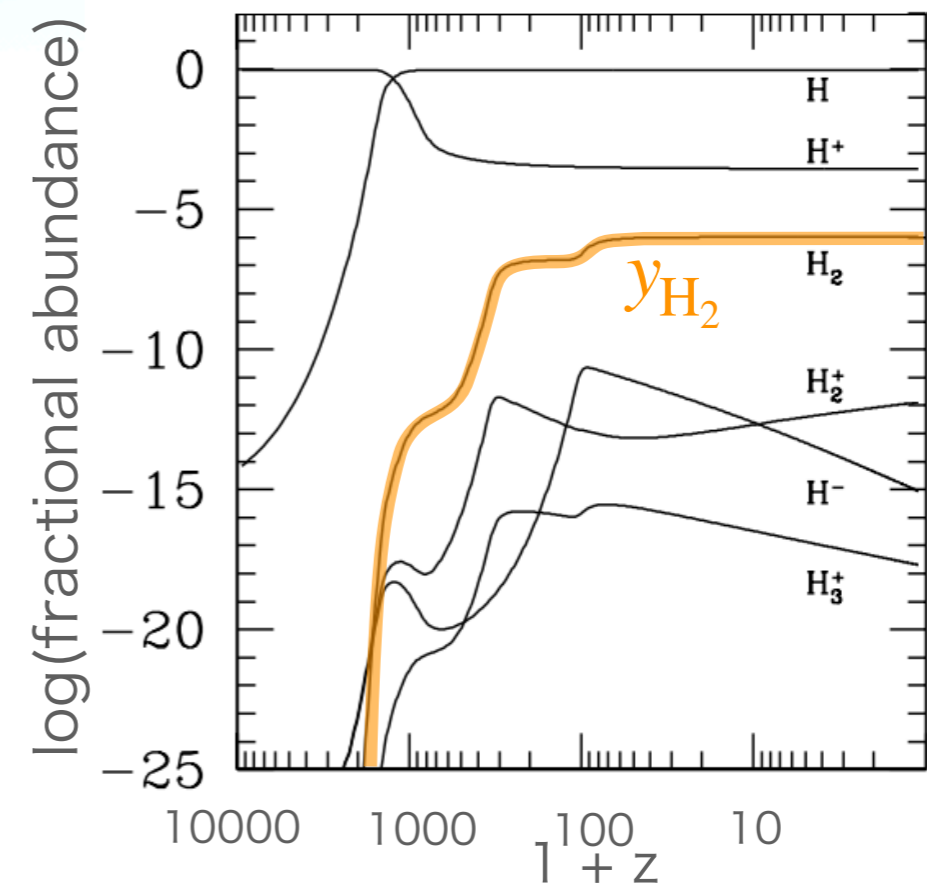
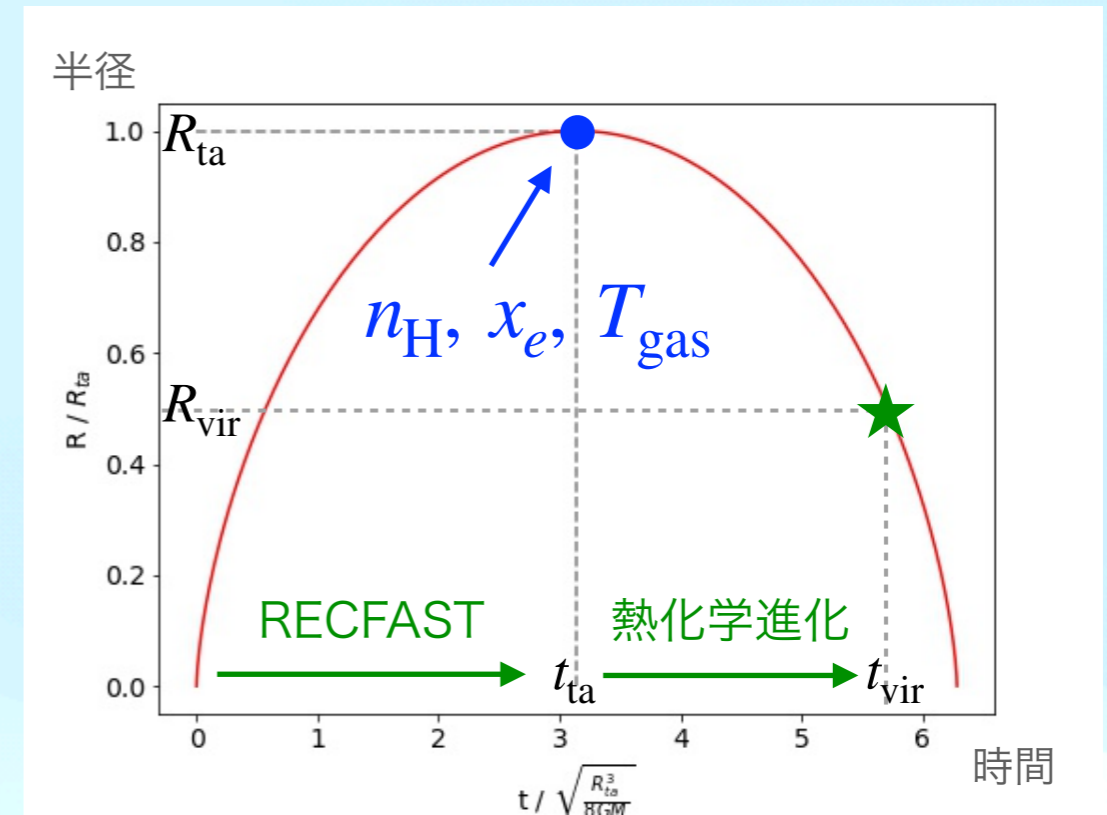
初期条件

- 水素(原子核)数密度 $n_{\text{H}}(z_{\text{ta}})$
- 電離度 $x_e(z_{\text{ta}}) = n_e/n_{\text{H}}$
- ガス温度 $T_{\text{gas}}(z_{\text{ta}})$

⇒ 宇宙再結合の計算コード
(RECFAST: Seager et al. 1999)
を改変して計算

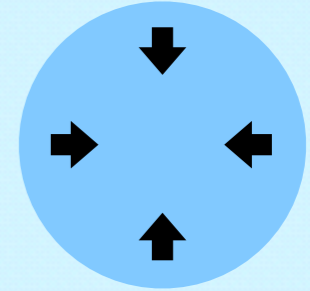
- 存在量 y_{H_2} , y_{D^+} , y_{HD}

⇒ 宇宙の一様媒質での値を用いた
(Galli & Palla 1998)



水素分子・重水素の存在量 (Galli & Palla 1998)

一様近似熱進化モデル



- 暴走的収縮過程にある星形成コアの中心領域(密度一様)の進化を解く
- Nakauchi et al. (2019) で用いられた one-zone の熱化学進化コードを使用

密度進化

$$: \frac{d\rho}{dt} = \frac{\rho}{t_{\text{ff}}}, \quad t_{\text{ff}} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}}$$

エネルギー方程式

$$: \frac{de}{dt} = -P \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\rho} \right) - \Lambda_{\text{net}}, \quad \Lambda_{\text{net}} : \text{加熱・冷却率}$$

化学組成

: 23個の化学種における化学反応・逆反応
(H, H₂, e⁻, H⁺, H⁻, D, HD etc.)

数値計算コードの改良点

高赤方偏移での熱進化を調べるため、新たにCMBの効果を実装

① CMBの輻射による加熱

$$\Lambda_{\text{net}} = \Lambda_{\text{line}} + \Lambda_{\text{cont}} + \Lambda_{\text{chem}} - \Gamma_{\text{CMB}} + \Lambda_{\text{compt}}$$

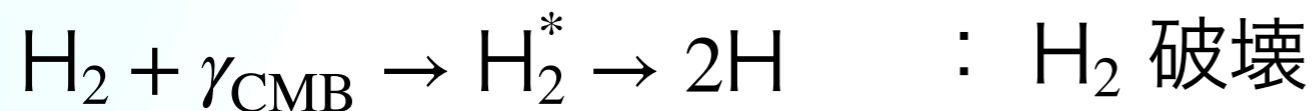
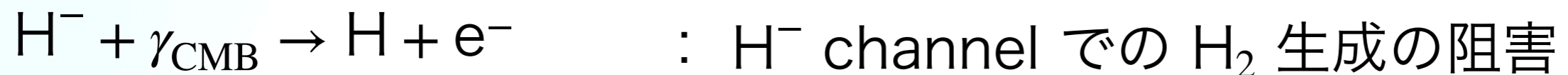
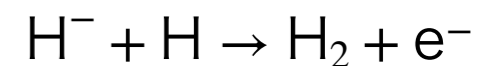
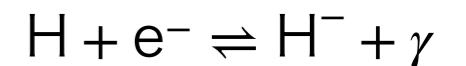
② Compton heating & cooling

③ CMB光子による光解離反応

始原ガスの冷却過程は H_2 からの輝線放射が支配的

⇒ H_2 の存在量が重要

H^- channel



Outline

1. Introduction

2. Method

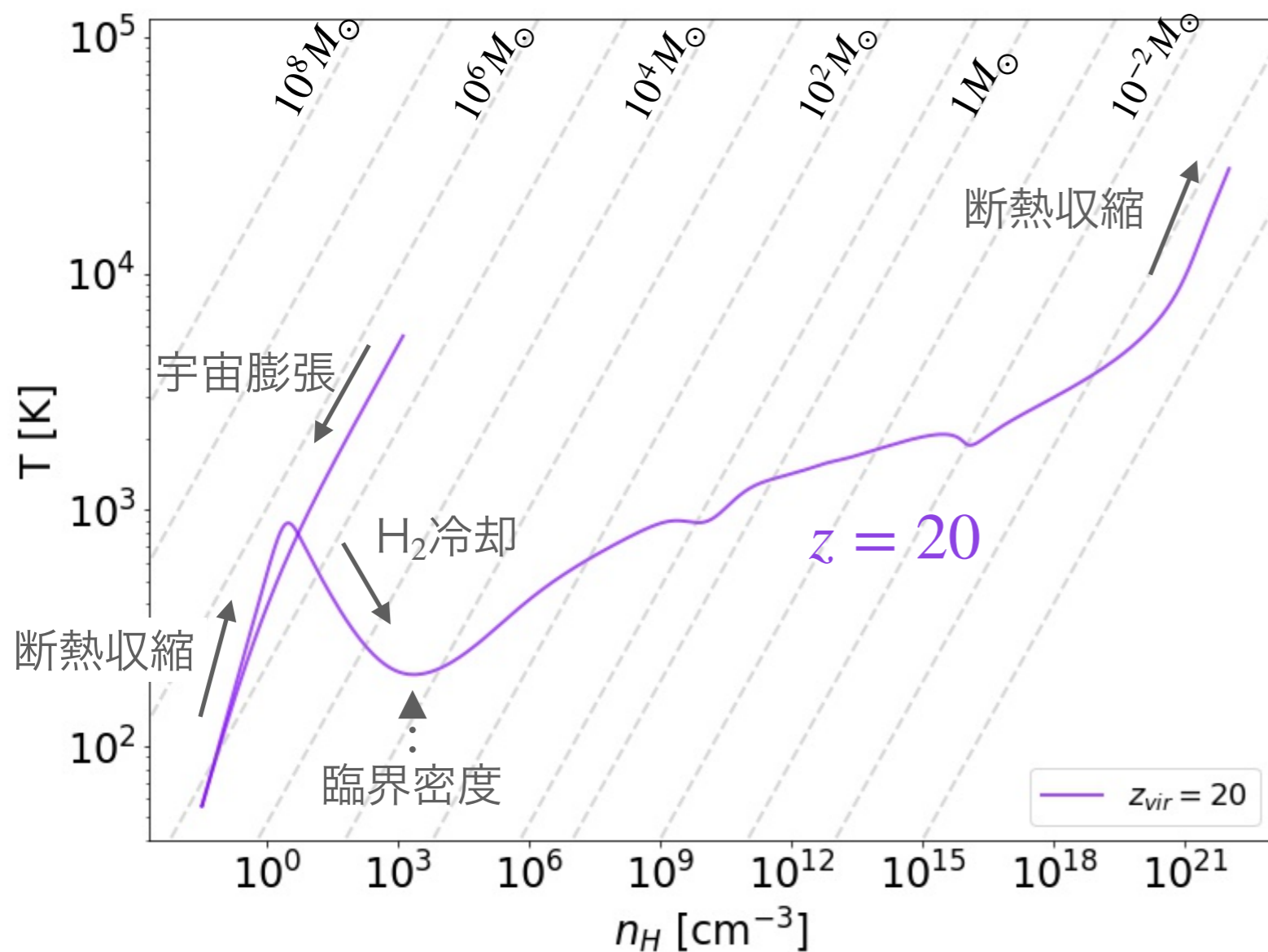
3. Results

4. Discussion

5. Summary

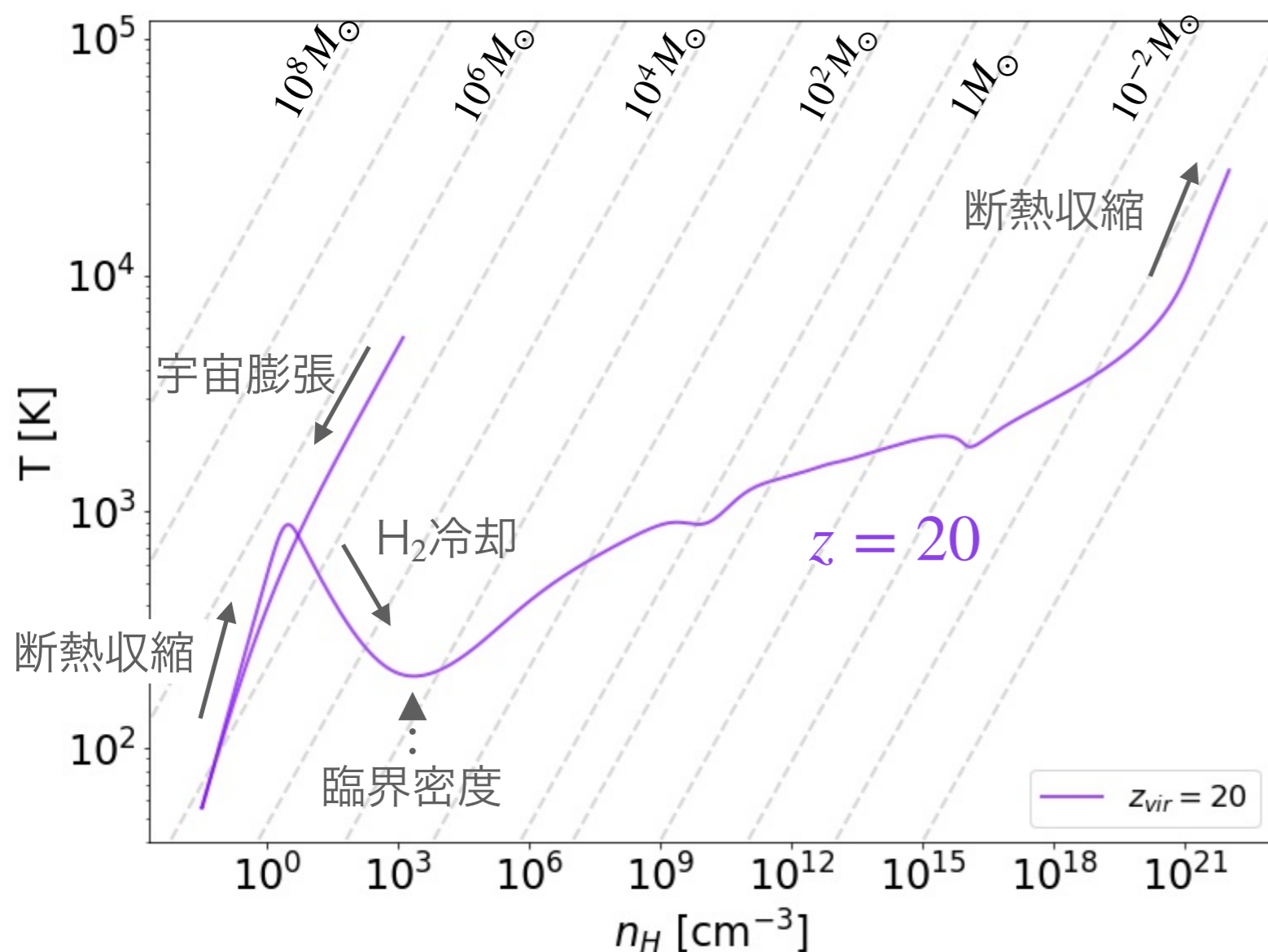
各赤方偏移での温度進化

標準的な初代星形成

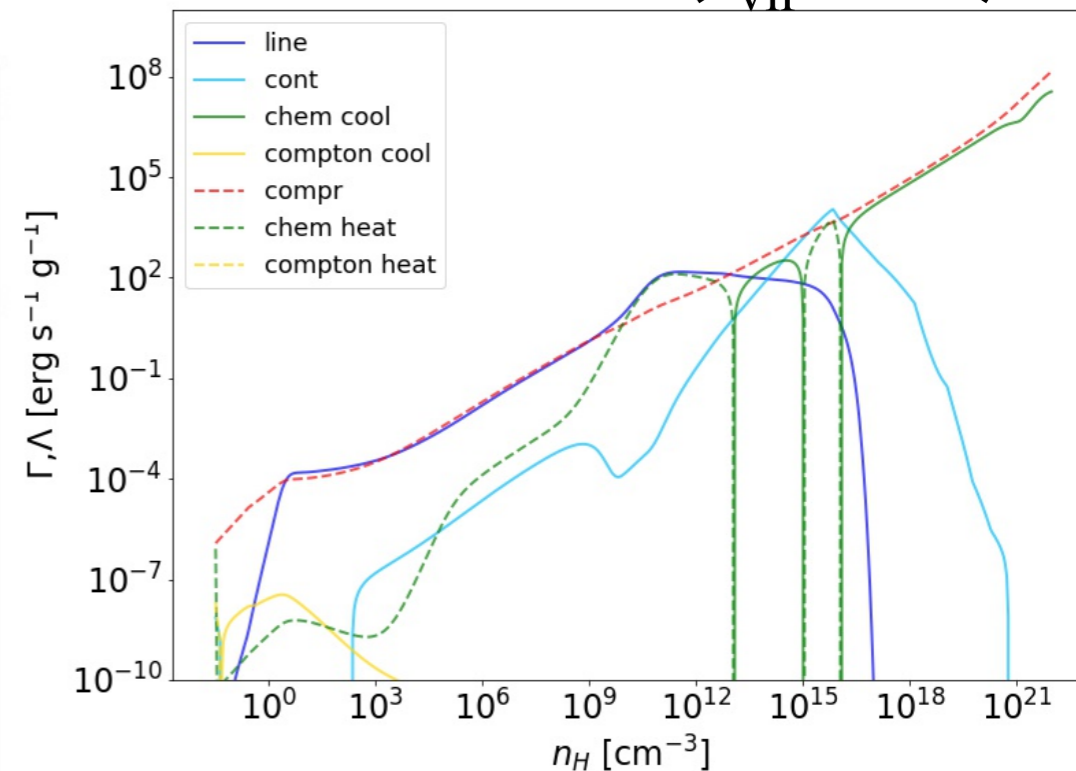


各赤方偏移での温度進化

標準的な初代星形成



加熱率・冷却率 ($z_{vir} = 20$)



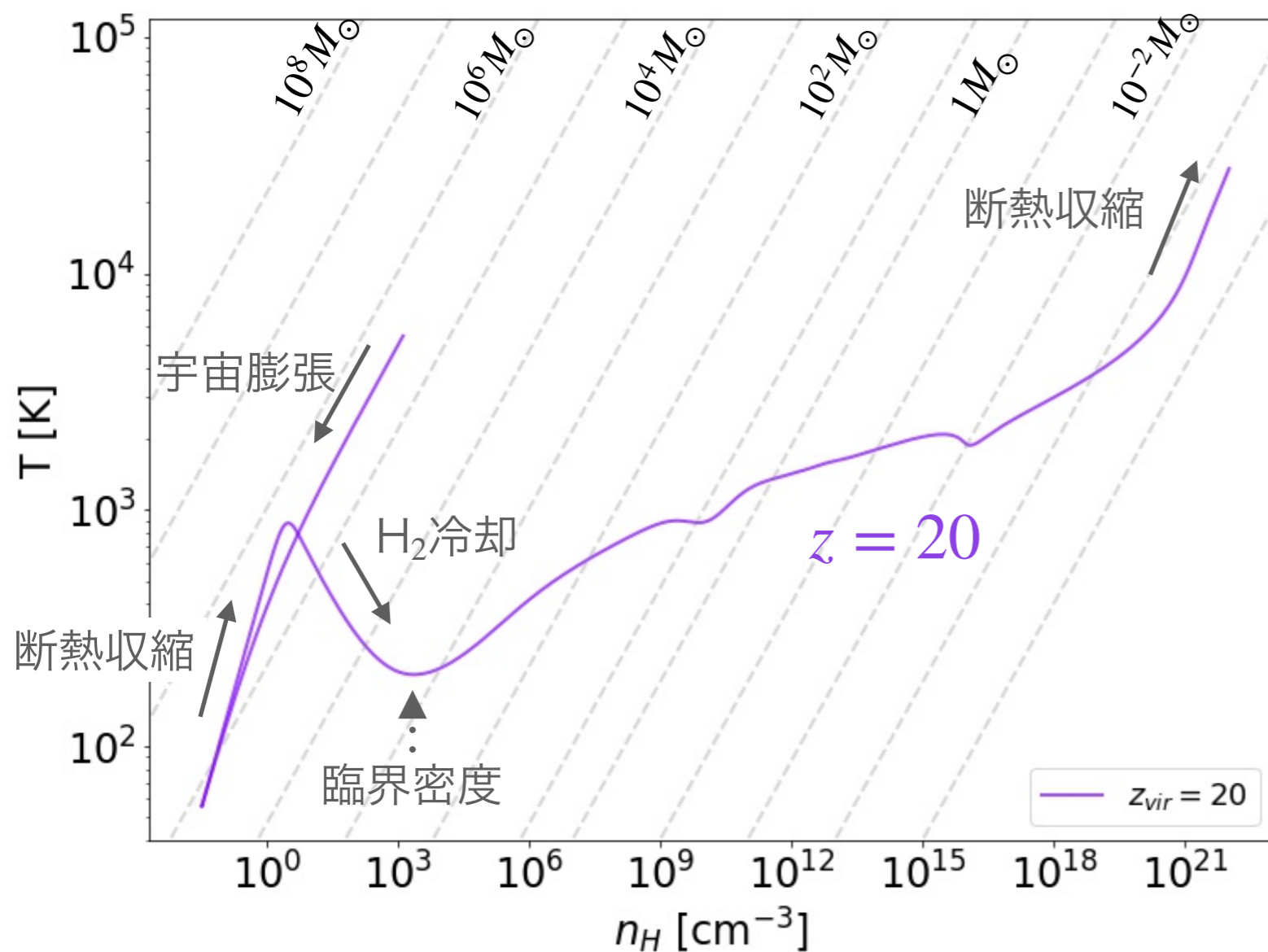
$n_H \lesssim 10^{14}\ cm^{-3}$: 輝線冷却

$10^{14} \lesssim n_H \lesssim 10^{16}\ cm^{-3}$: 連続光放射冷却

$n_H \gtrsim 10^{16}\ cm^{-3}$: 化学反応による冷却

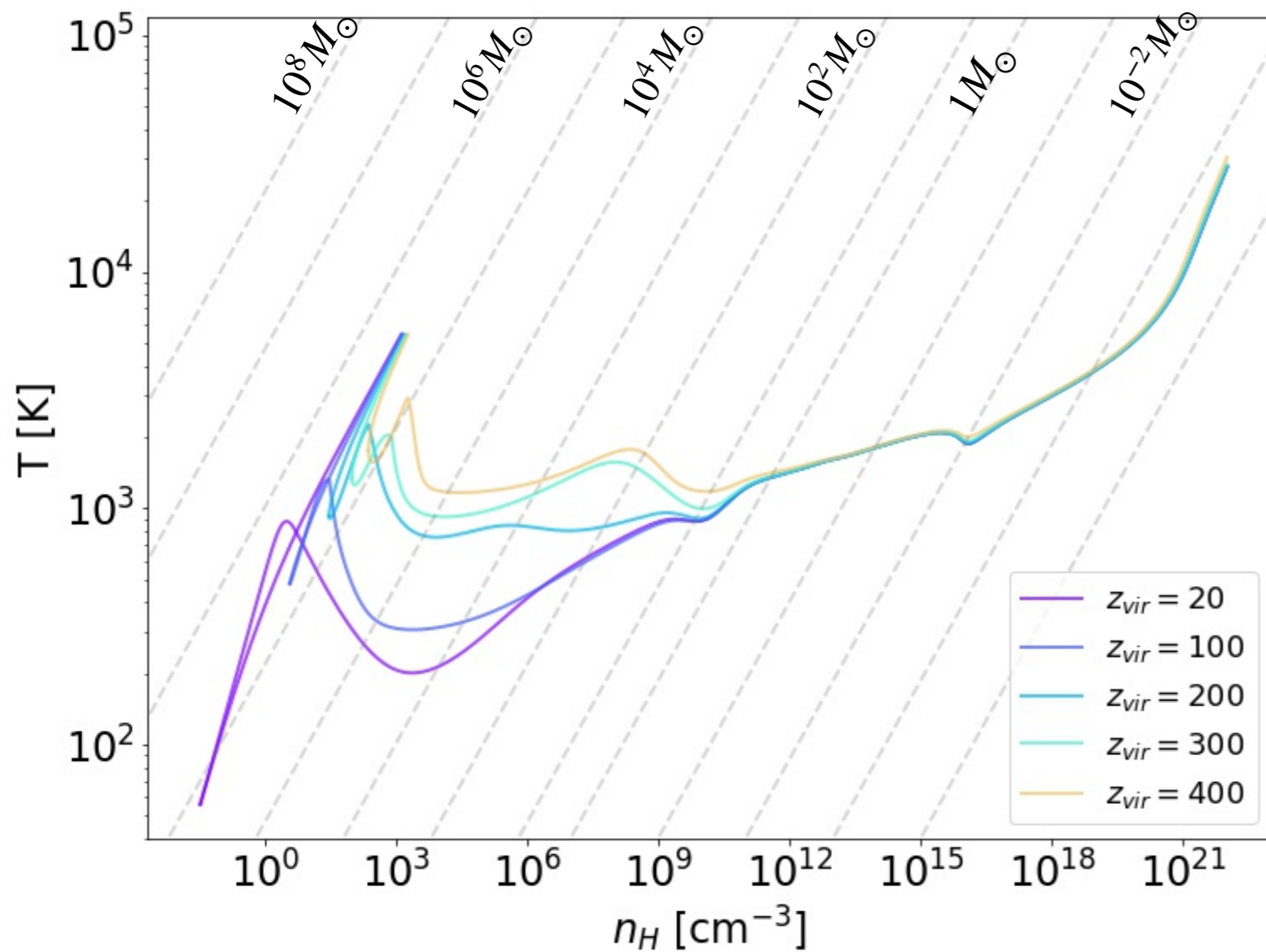
各赤方偏移での温度進化

標準的な初代星形成



各赤方偏移での温度進化

$z = 100 - 400$

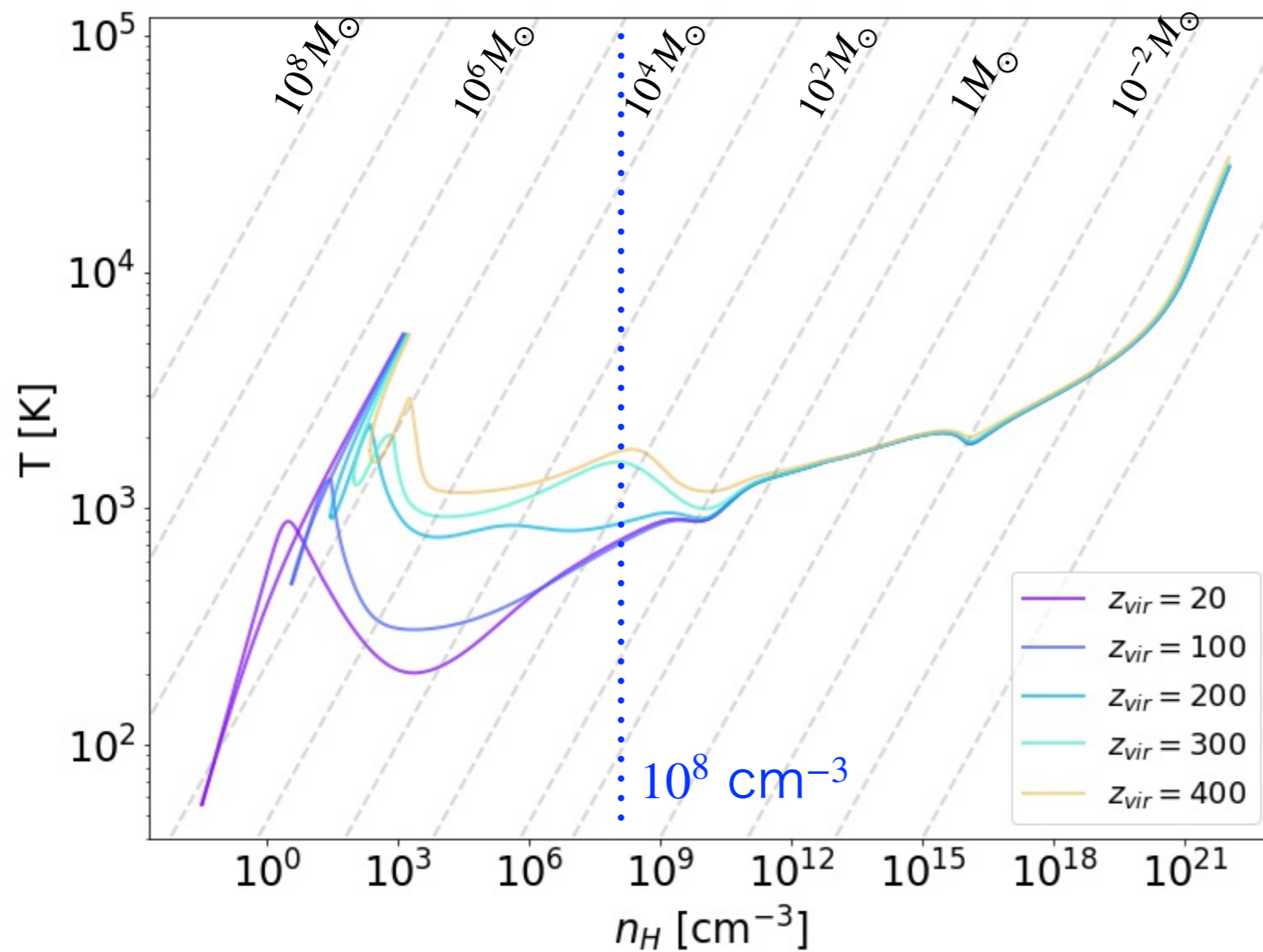


■ $z < 500$

- $n_H \lesssim 10^8 \text{ cm}^{-3}$ で標準的な熱進化より高温

各赤方偏移での温度進化

$z = 100 - 400$

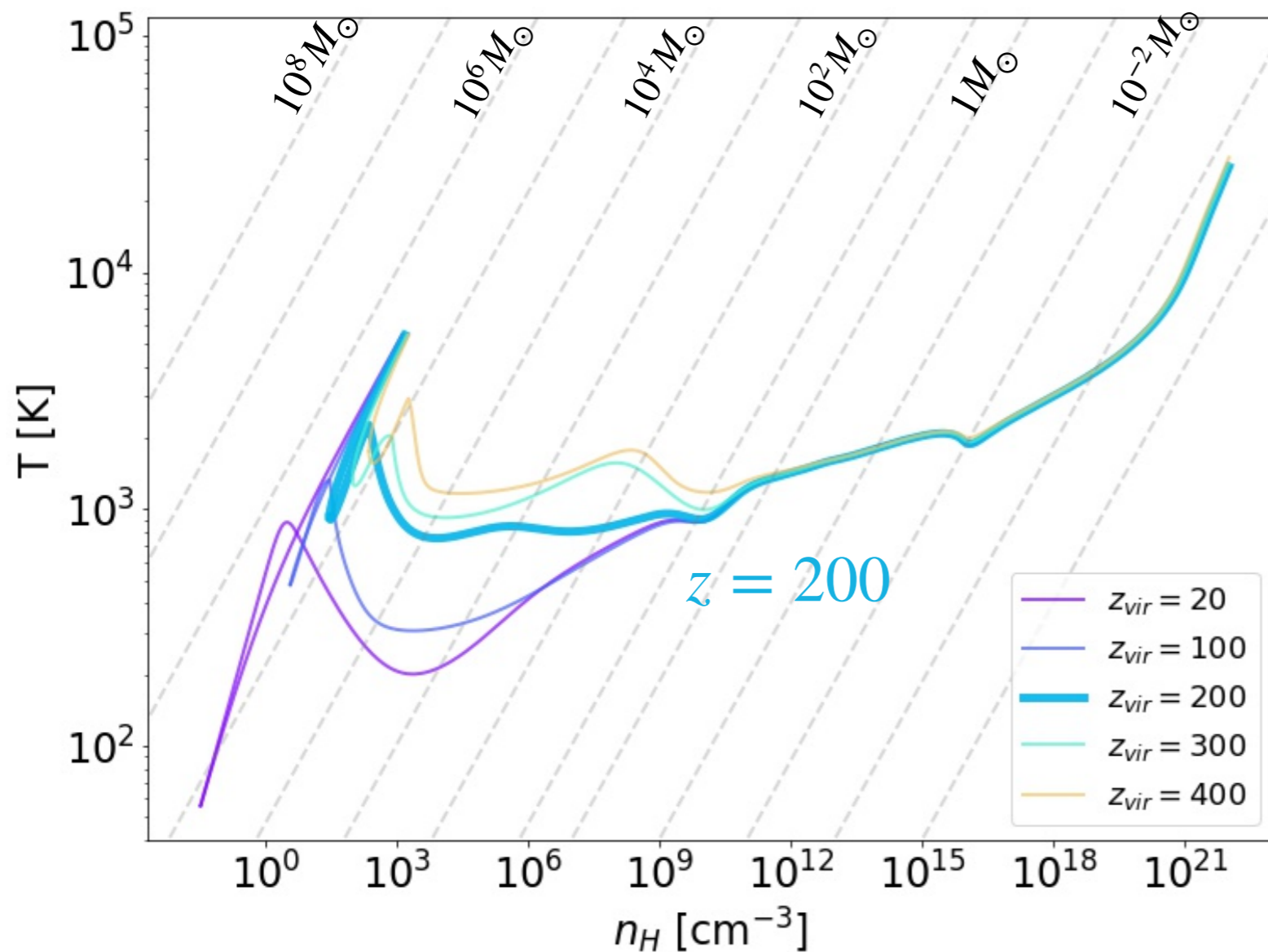


■ $z < 500$

- $n_H \lesssim 10^8 \text{ cm}^{-3}$ で標準的な熱進化より高温

各赤方偏移での温度進化

$z = 100 - 400$

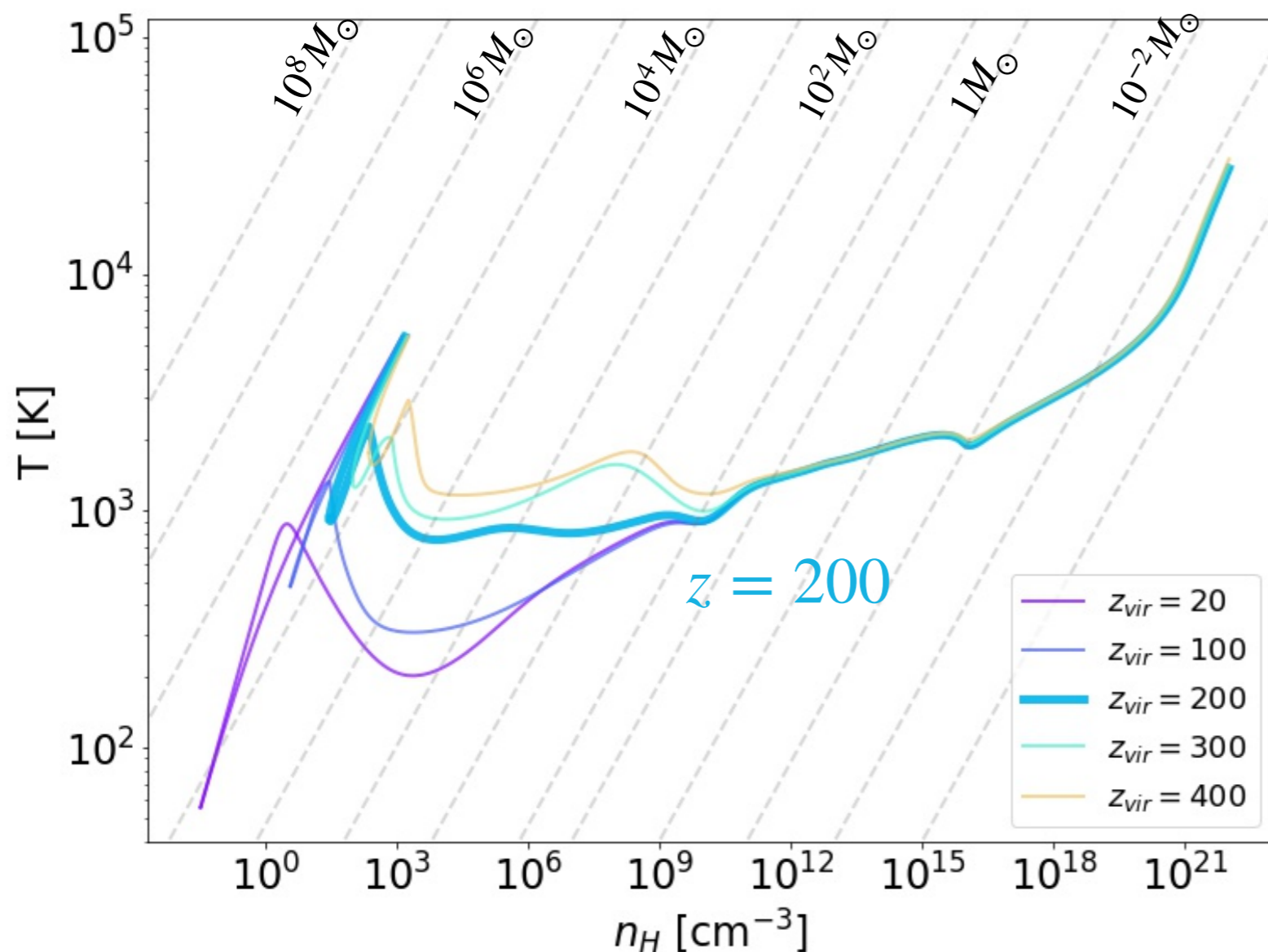


■ $z < 500$

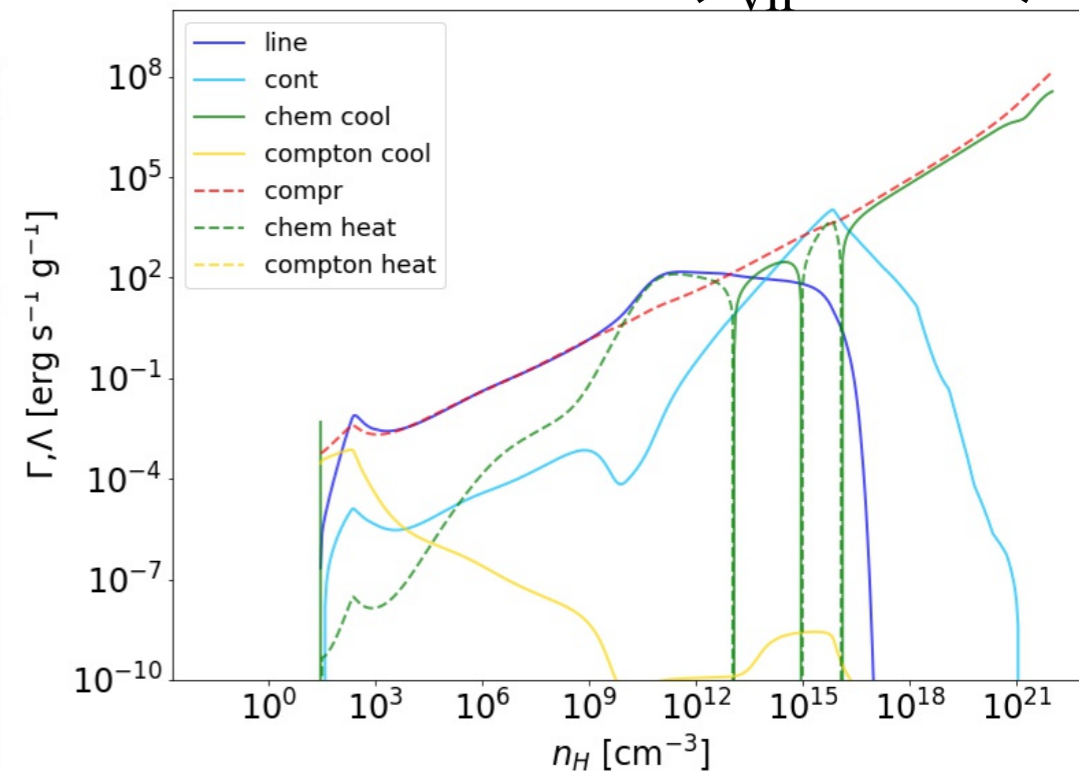
- $n_H \lesssim 10^8 \text{ cm}^{-3}$ で標準的な熱進化より高温
- 特に $z \gtrsim 200$ で顕著

各赤方偏移での温度進化

$z = 100 - 400$



加熱率・冷却率 ($z_{vir} = 200$)



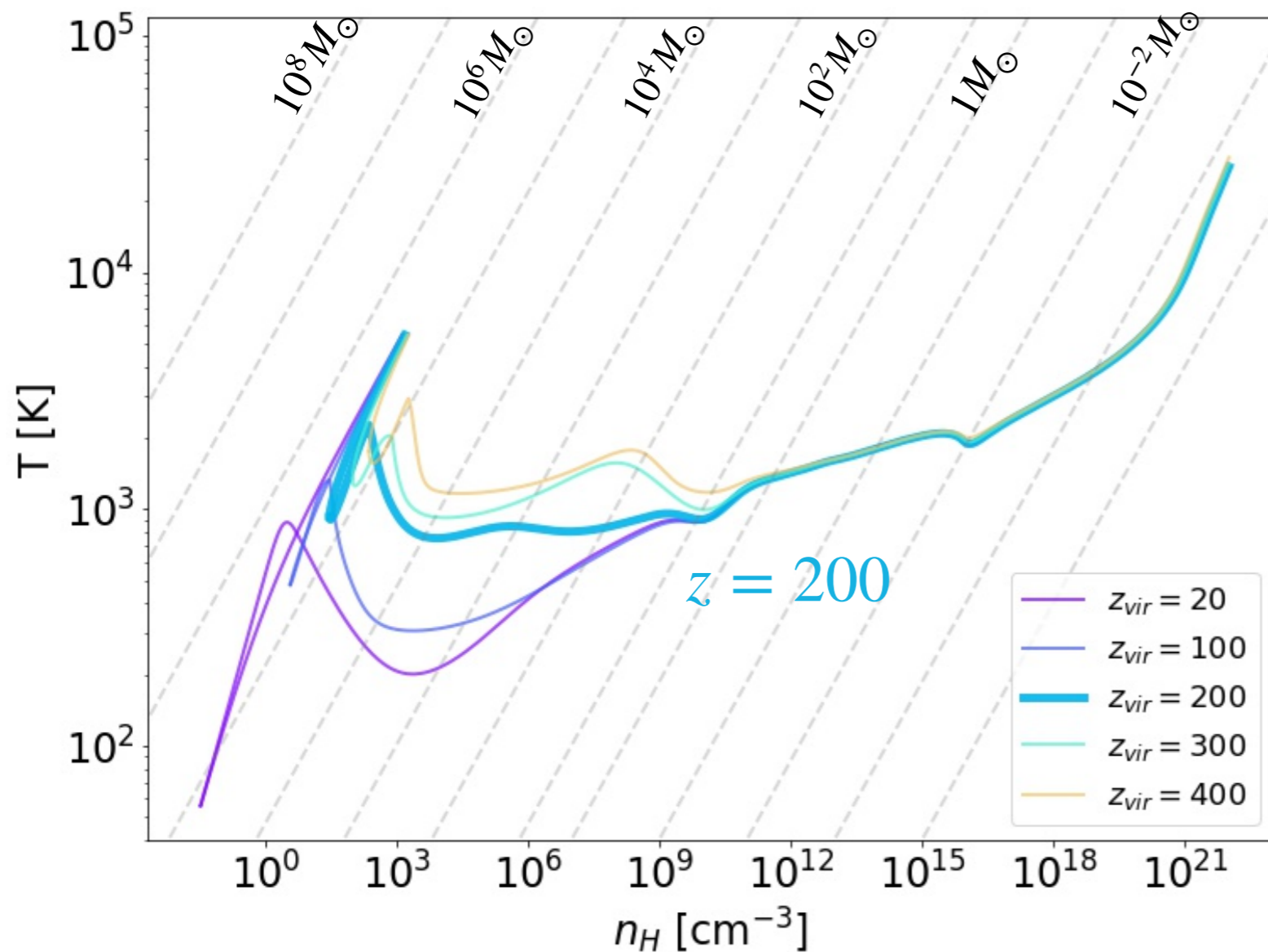
$n_H \lesssim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$: 輝線冷却

$10^{14} \lesssim n_H \lesssim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$: 連続光放射冷却

$n_H \gtrsim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$: 化学反応による冷却

各赤方偏移での温度進化

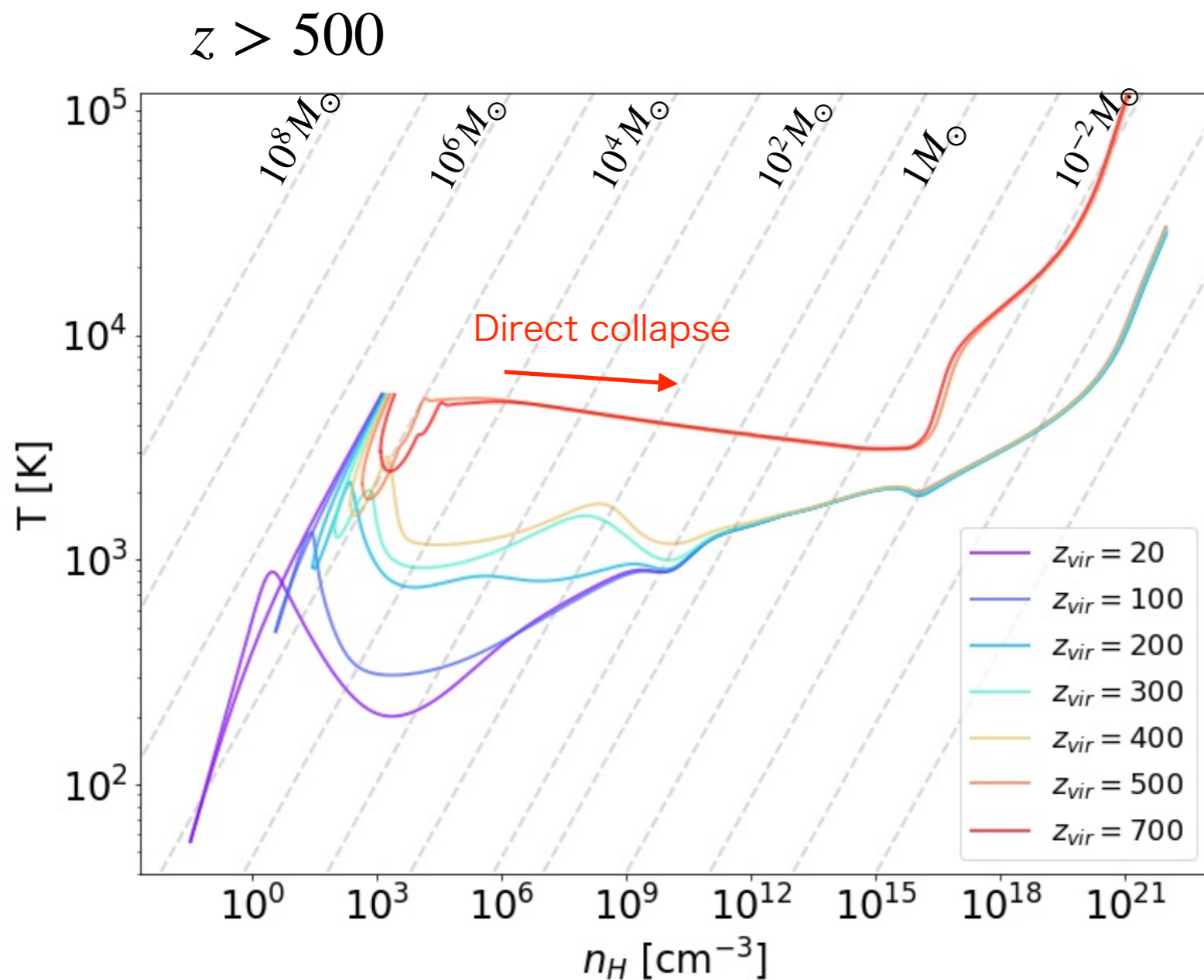
$z = 100 - 400$



■ $z < 500$

- $n_H \lesssim 10^8 \text{ cm}^{-3}$ で標準的な熱進化より高温
- 特に $z \gtrsim 200$ で顕著

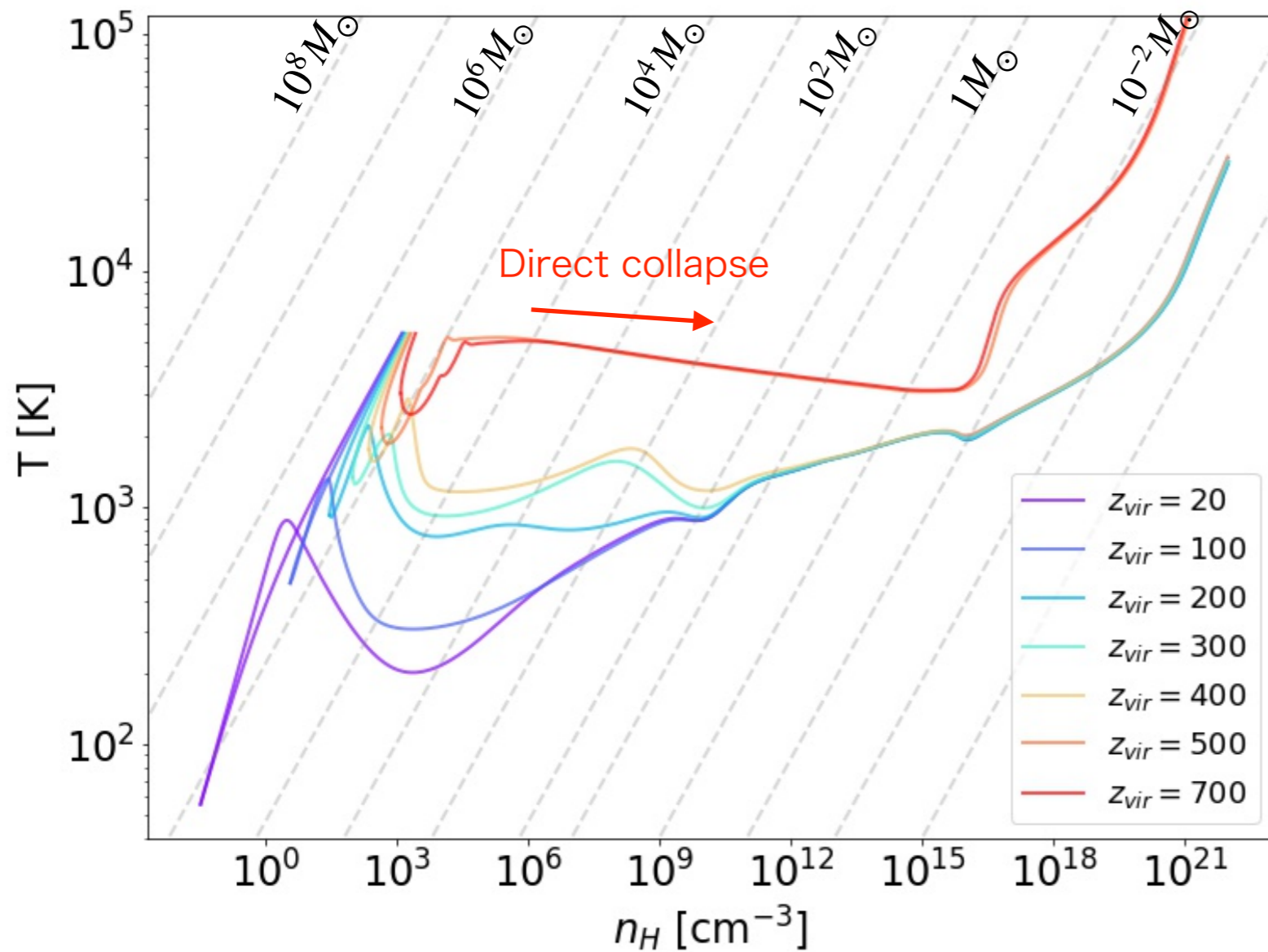
各赤方偏移での温度進化



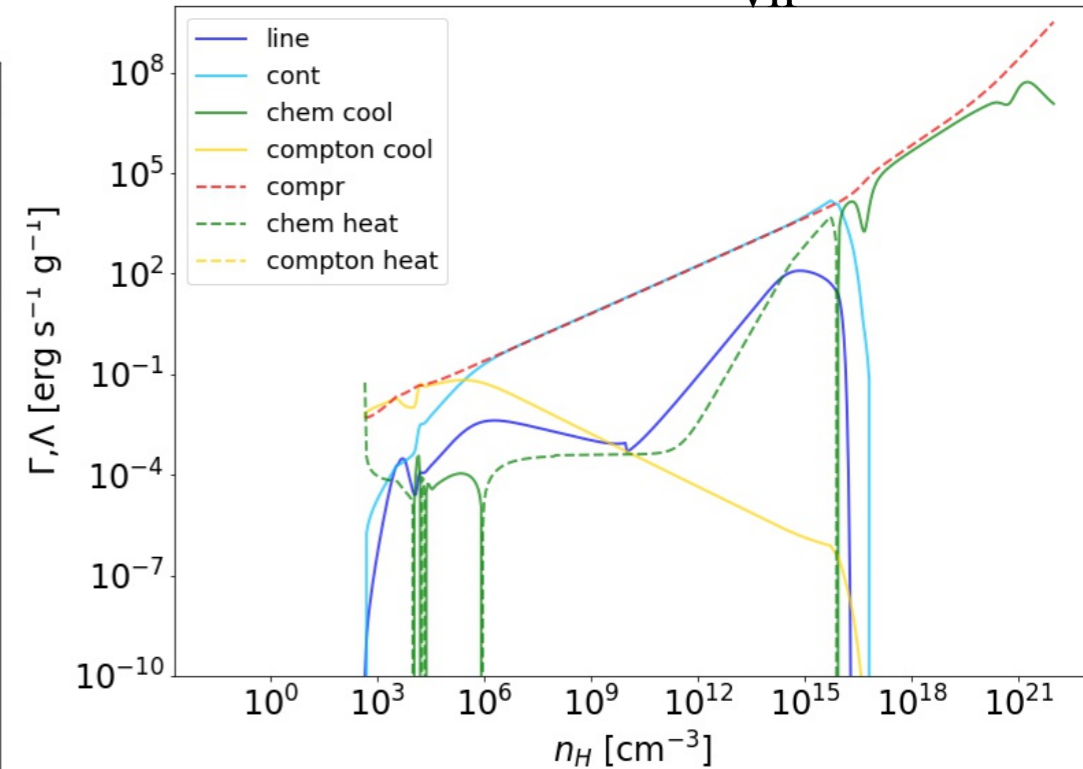
- $z < 500$
 - $n_H \lesssim 10^8 \text{ cm}^{-3}$ で標準的な熱進化より高温
 - 特に $z \gtrsim 200$ で顕著
- $z > 500$
 - 高温のままほぼ等温で進化(direct collapse)
 - H原子冷却が支配的 (H⁻のf-b emission)

各赤方偏移での温度進化

$z > 500$



加熱率・冷却率 ($z_{vir} = 500$)



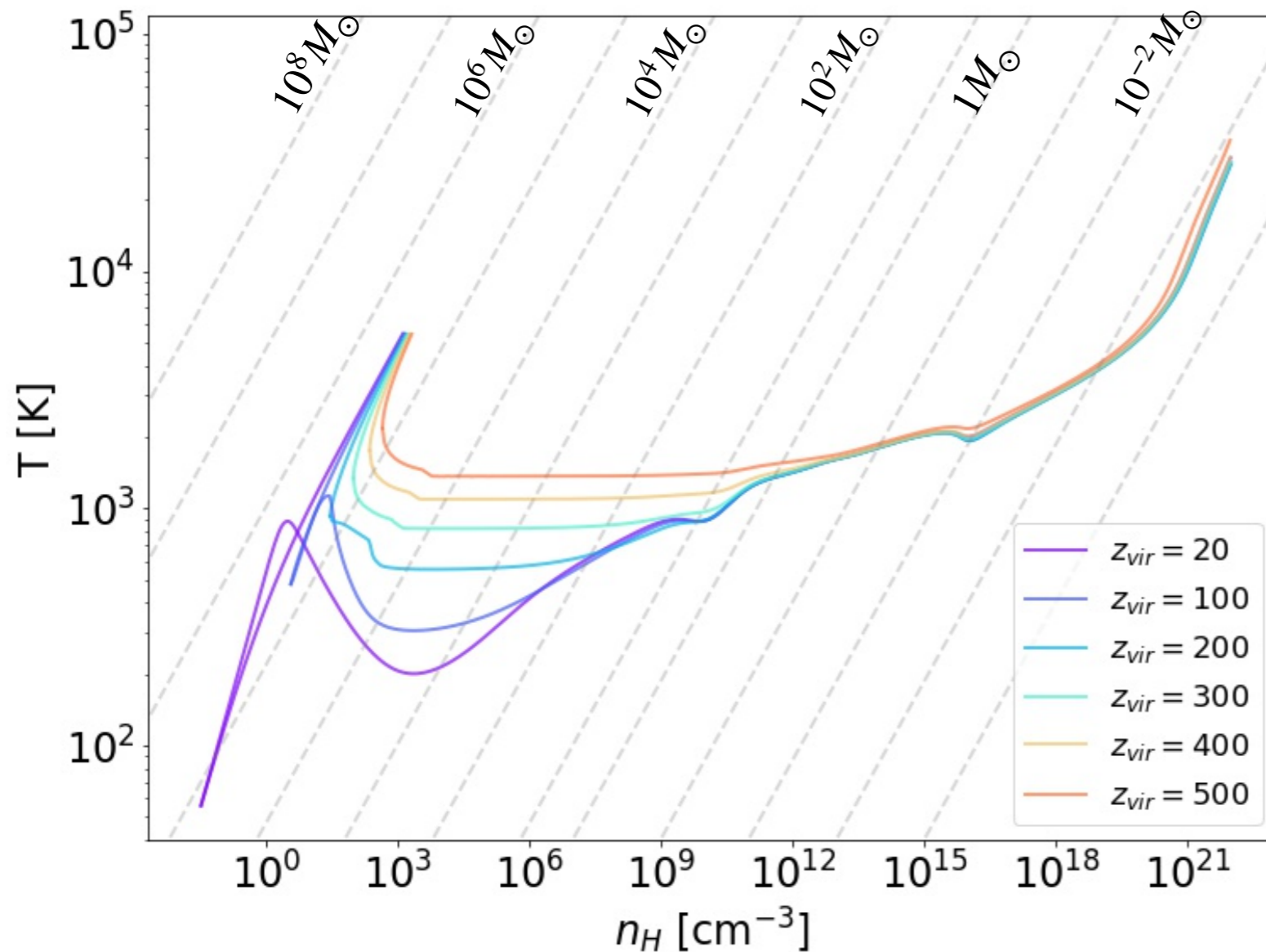
$n_H \lesssim 10^6 \text{ cm}^{-2}$: コンプトン冷却

$10^6 \lesssim n_H \lesssim 10^{16} \text{ cm}^{-2}$: 連続光放射冷却

$n_H \gtrsim 10^{16} \text{ cm}^{-2}$: 化学反応による冷却

各赤方偏移での温度進化

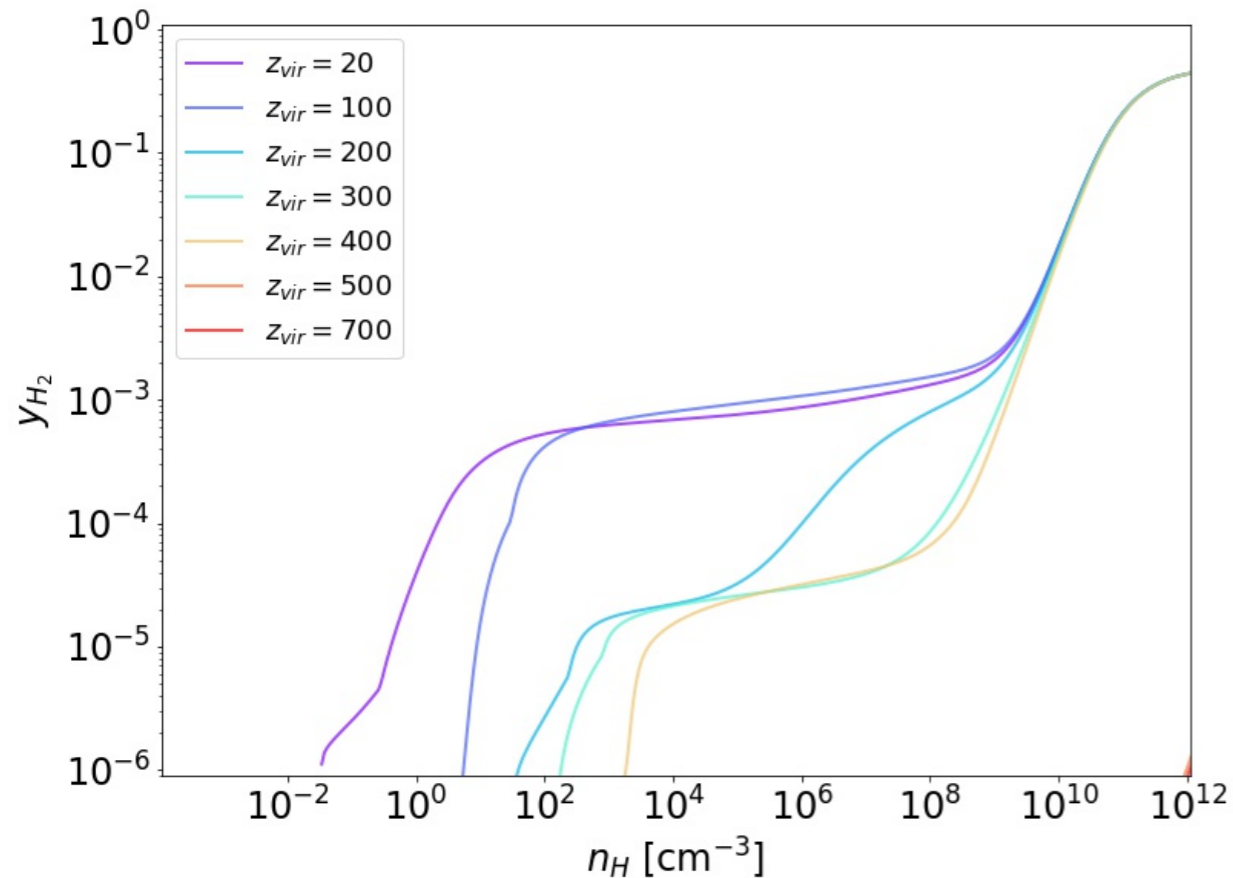
H⁻光解離なし



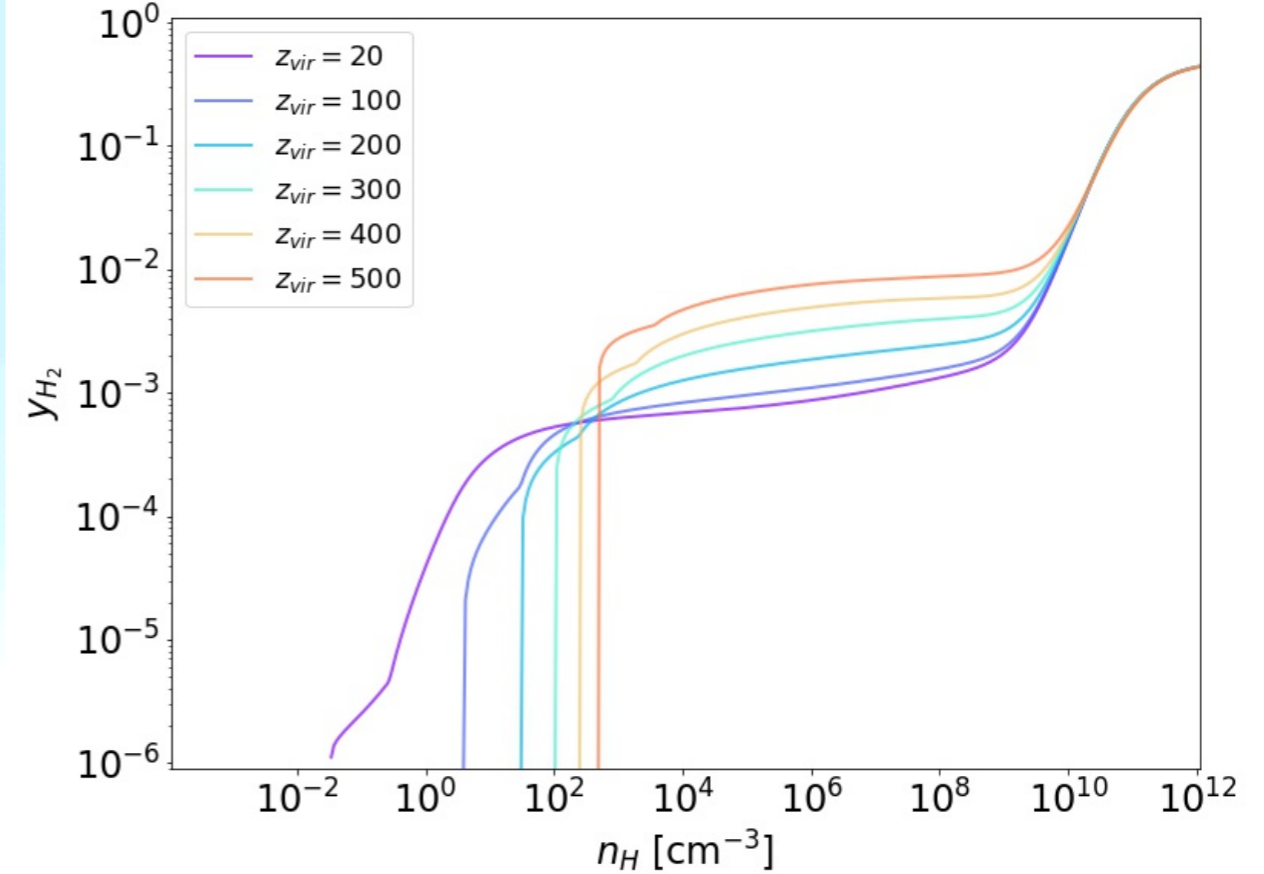
- CMBの効果のうち、H⁻の光解離反応が重要
- CMBによるH⁻の光解離がない場合、H₂生成が阻害されない ⇒ 冷却
- $n_{\text{H}} \lesssim 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ではH₂冷却によってCMB温度まで下がっている

各赤方偏移でのH₂存在量

H⁻光解離あり

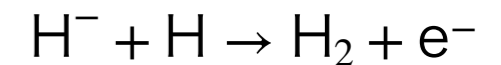
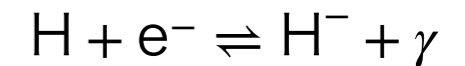


H⁻光解離なし



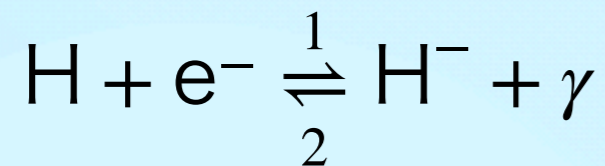
$z \gtrsim 200$ において、H⁻の光解離反応によって
H₂生成が阻害され、存在量が少なくなっている

H⁻ channel



CMBによるH⁻光解離の効果が重要になる温度

■ H⁻ channel



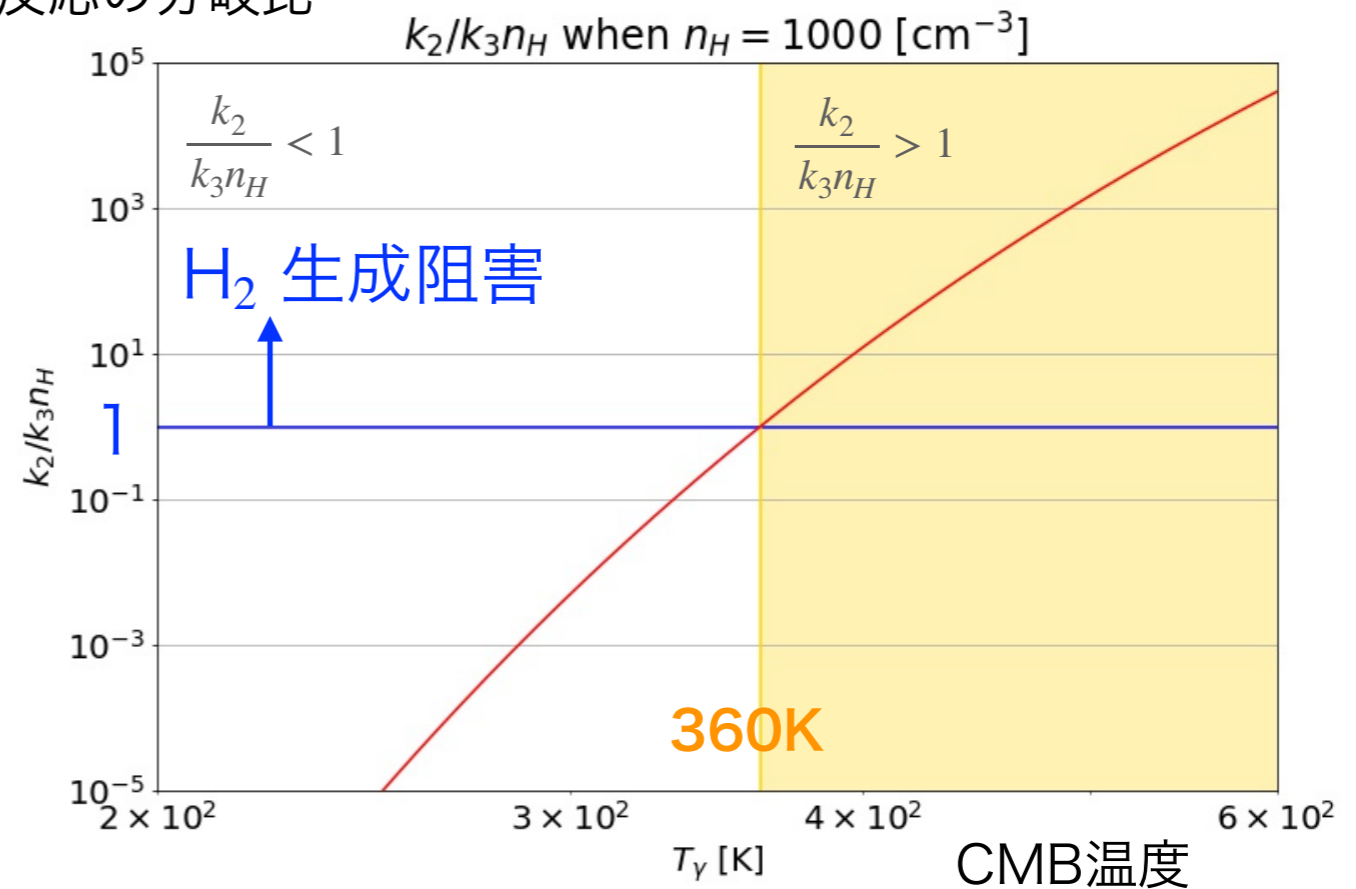
■ H₂ 生成の反応率

$$k_{\text{form}} = k_1 \times \frac{k_3 n_{\text{H}}}{k_2 + k_3 n_{\text{H}}}$$

$$\frac{k_2}{k_3 n_{\text{H}}} \gg 1 \text{ で } k_{\text{form}} \ll k_1$$

⇒ H⁻ を作っても光解離ですぐに壊れてしまい、H₂ ができない

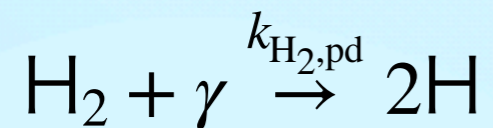
反応の分岐比



$T_{\text{CMB}} \gtrsim 360 \text{ [K]}, z \gtrsim 130$ で重要

CMBによるH₂光解離の効果が重要になる温度

■ H₂ 光解離

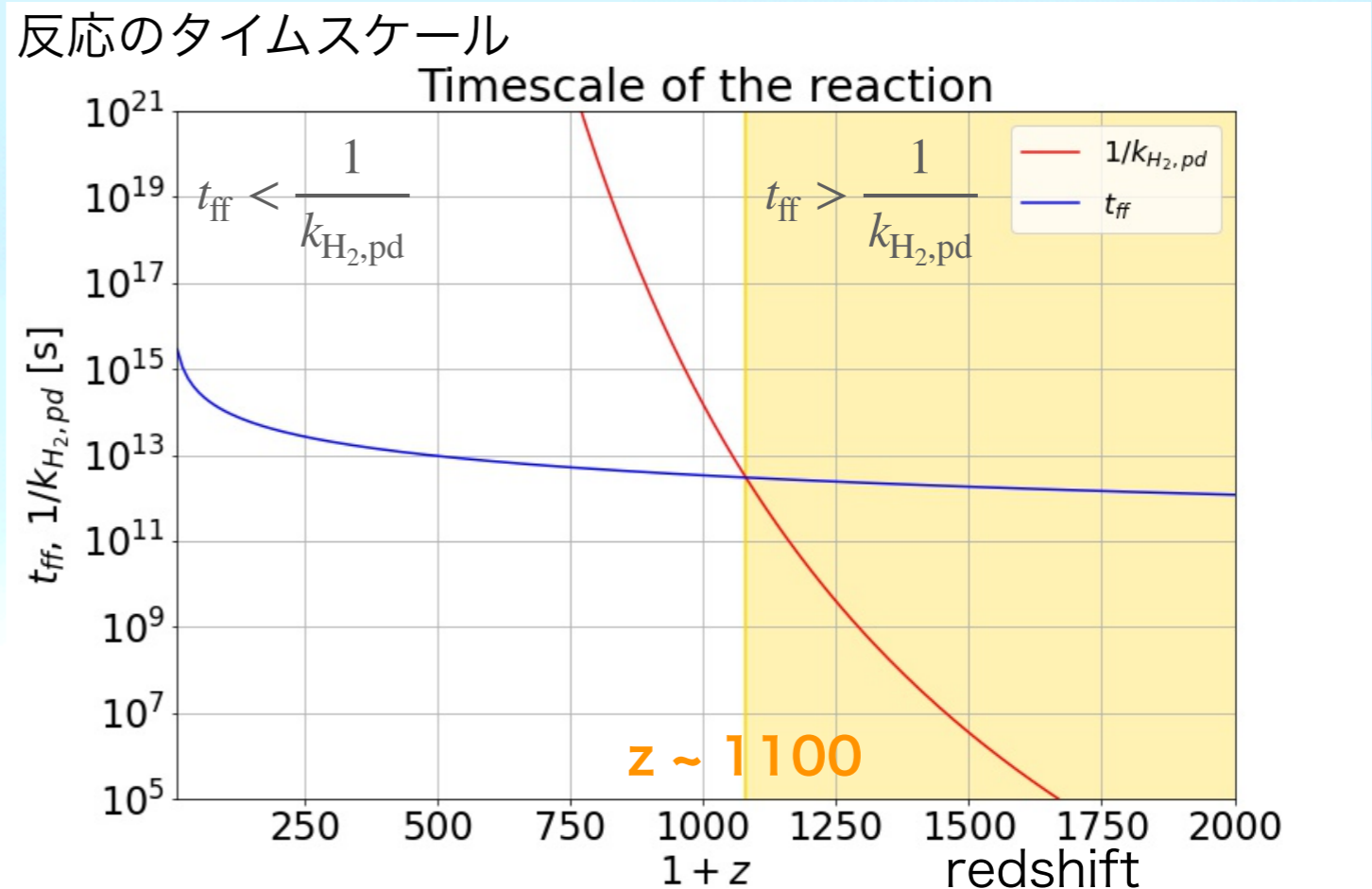


■ H₂ 生成・解離の化学平衡

$$y_{\text{H}_2, \text{form}} = k_1 n_{\text{H}} y_{\text{e}} t_{\text{ff}}$$

$$y_{\text{H}_2, \text{eq}} = \frac{k_1}{k_{\text{H}_2, \text{pd}}} n_{\text{H}} n_{\text{e}}$$

$$t_{\text{ff}} > \frac{1}{k_{\text{H}_2, \text{pd}}} \quad \text{で} \quad y_{\text{H}_2, \text{form}} > y_{\text{H}_2, \text{eq}}$$



$T_{\text{CMB}} \gtrsim 2900 \text{ [K]}, z \gtrsim 1100$ で重要

⇒ 生成された H₂ の存在量が化学平衡状態より多いと、
光解離によって H₂ を壊して平衡状態になるうとする

Outline

1. Introduction

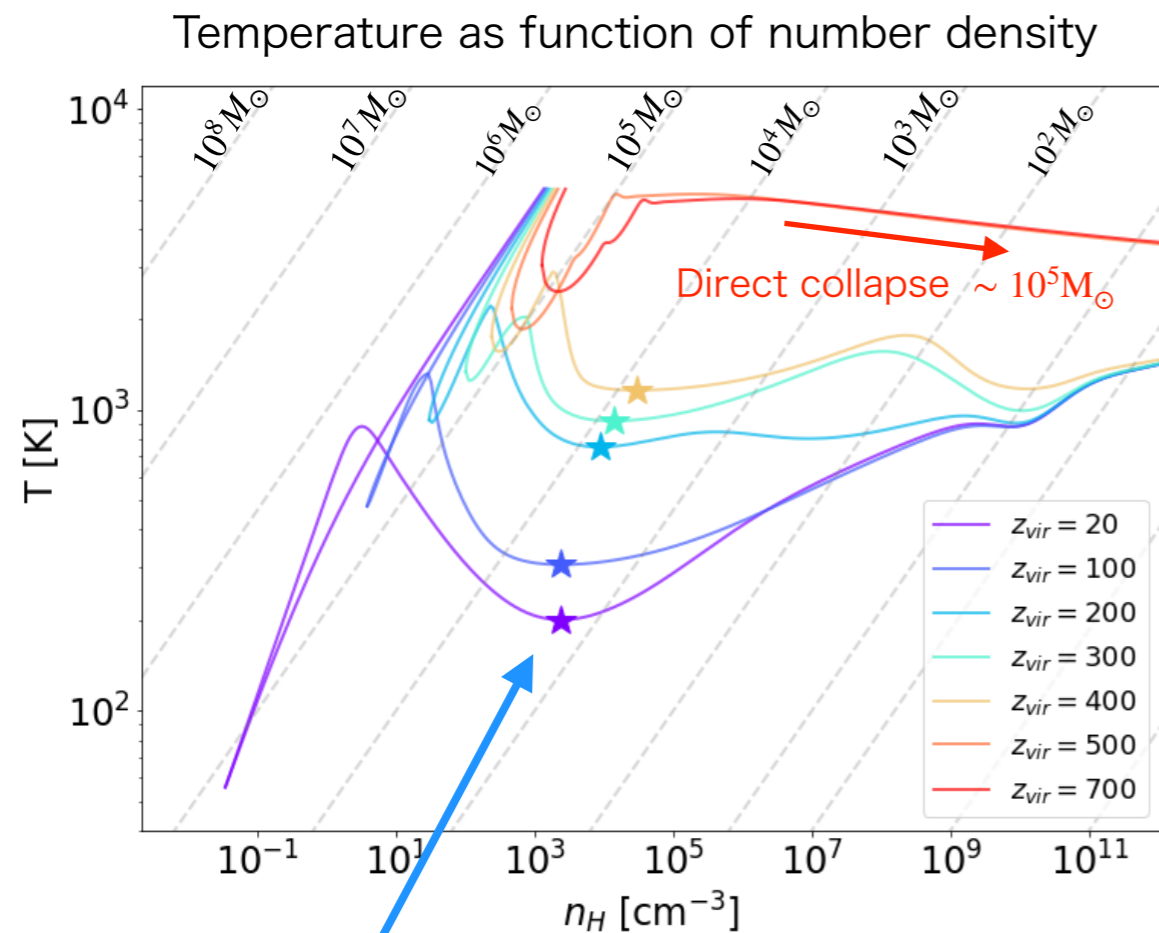
2. Method

3. Results

4. Discussion

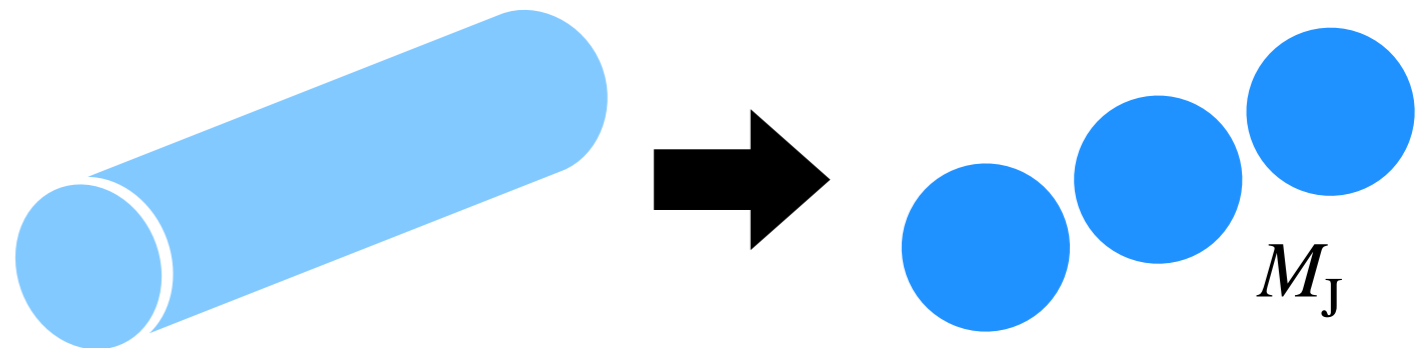
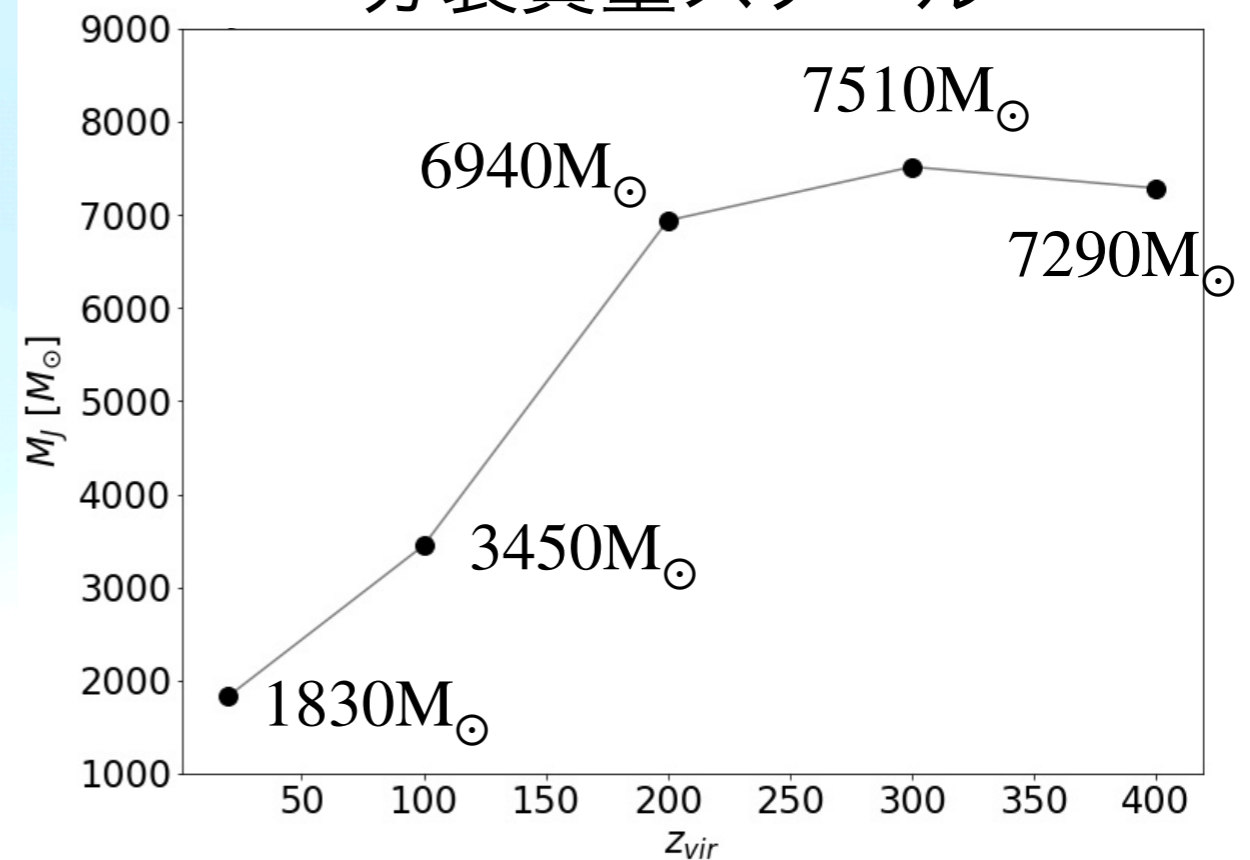
5. Summary

初代天体の分裂スケール

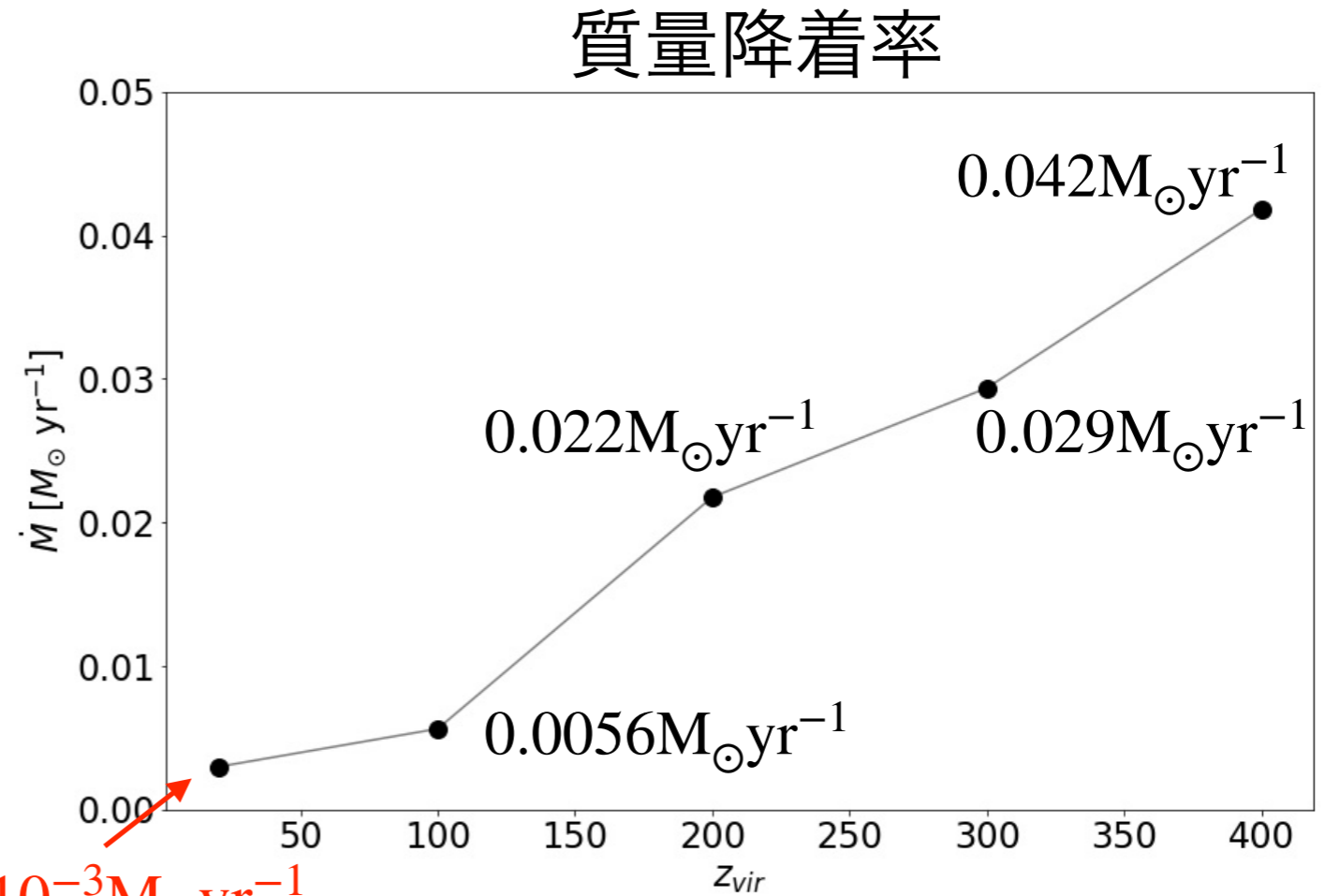
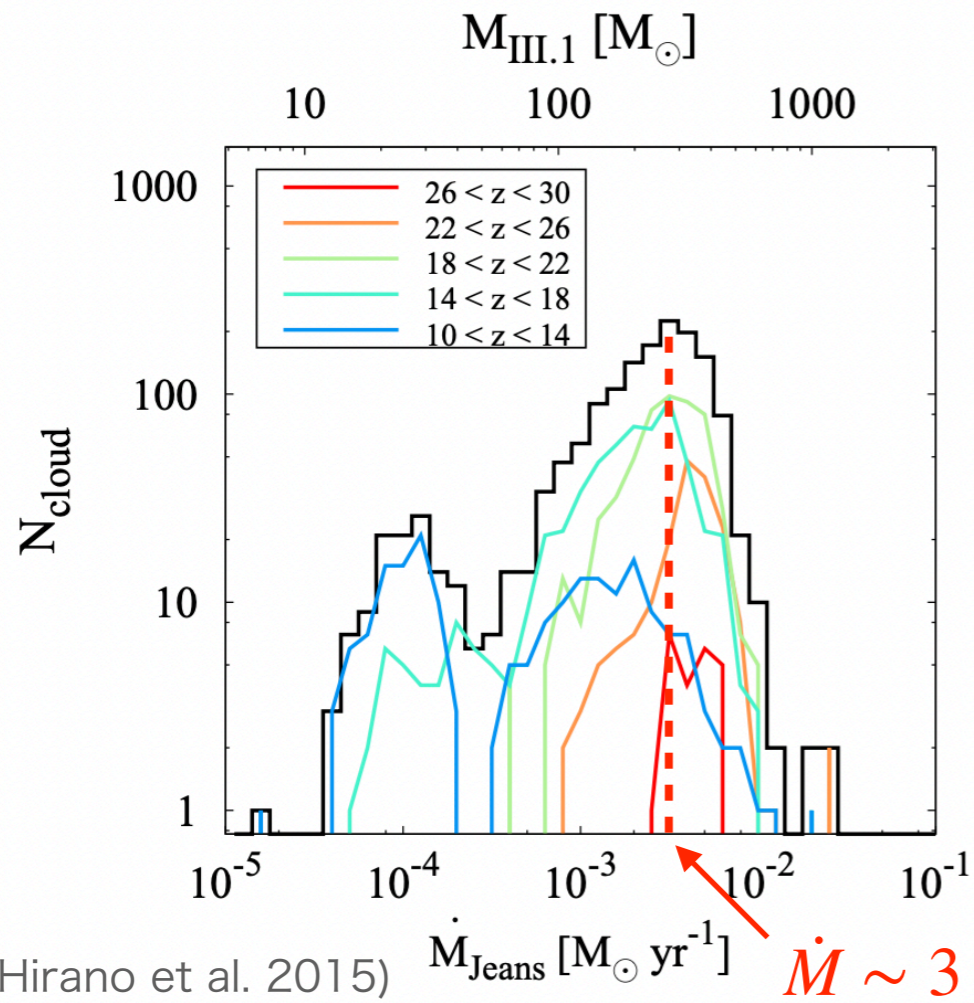


このジーンズ質量が
コア質量スケールになる

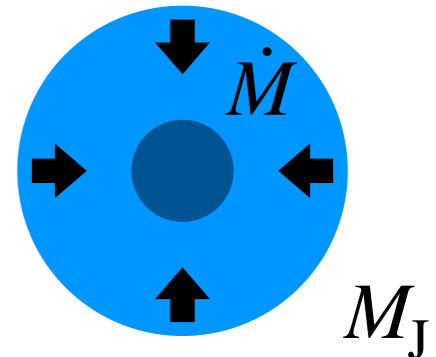
分裂質量スケール



質量降着率



$$\dot{M} \simeq \frac{M_{\text{J}}}{t_{\text{ff}}} = \phi \frac{c_s^3}{G}$$



$z = 20$ で $\dot{M} \sim 3 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ となるように $\phi = 8.06$ に設定

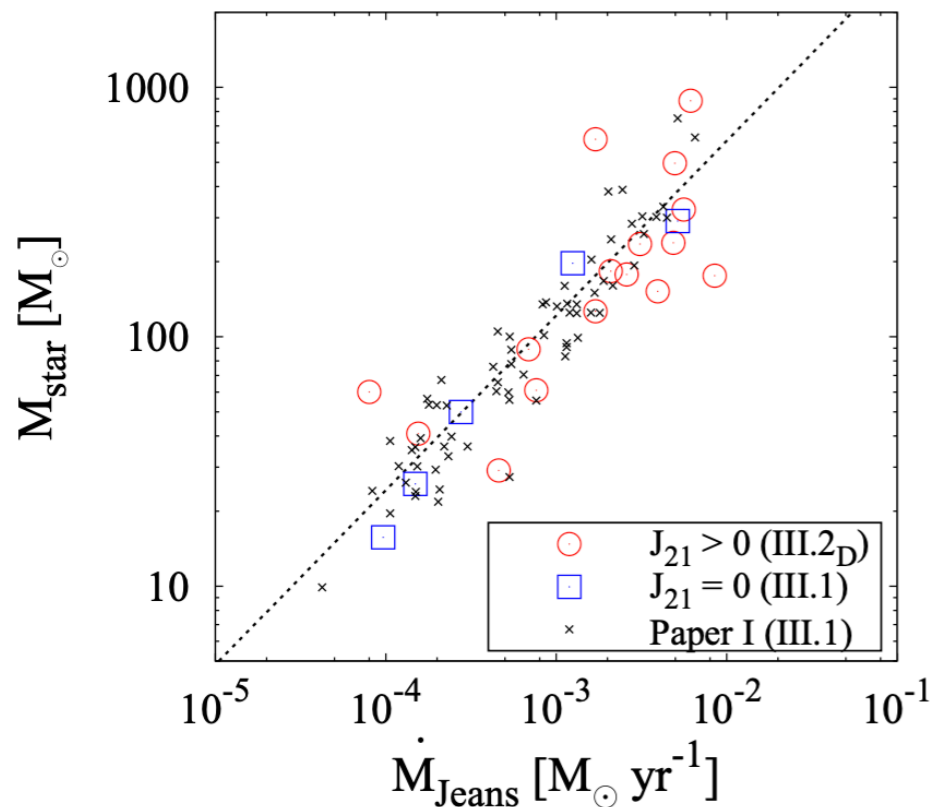
(Hirano et al. 2015)

形成される初代星の質量

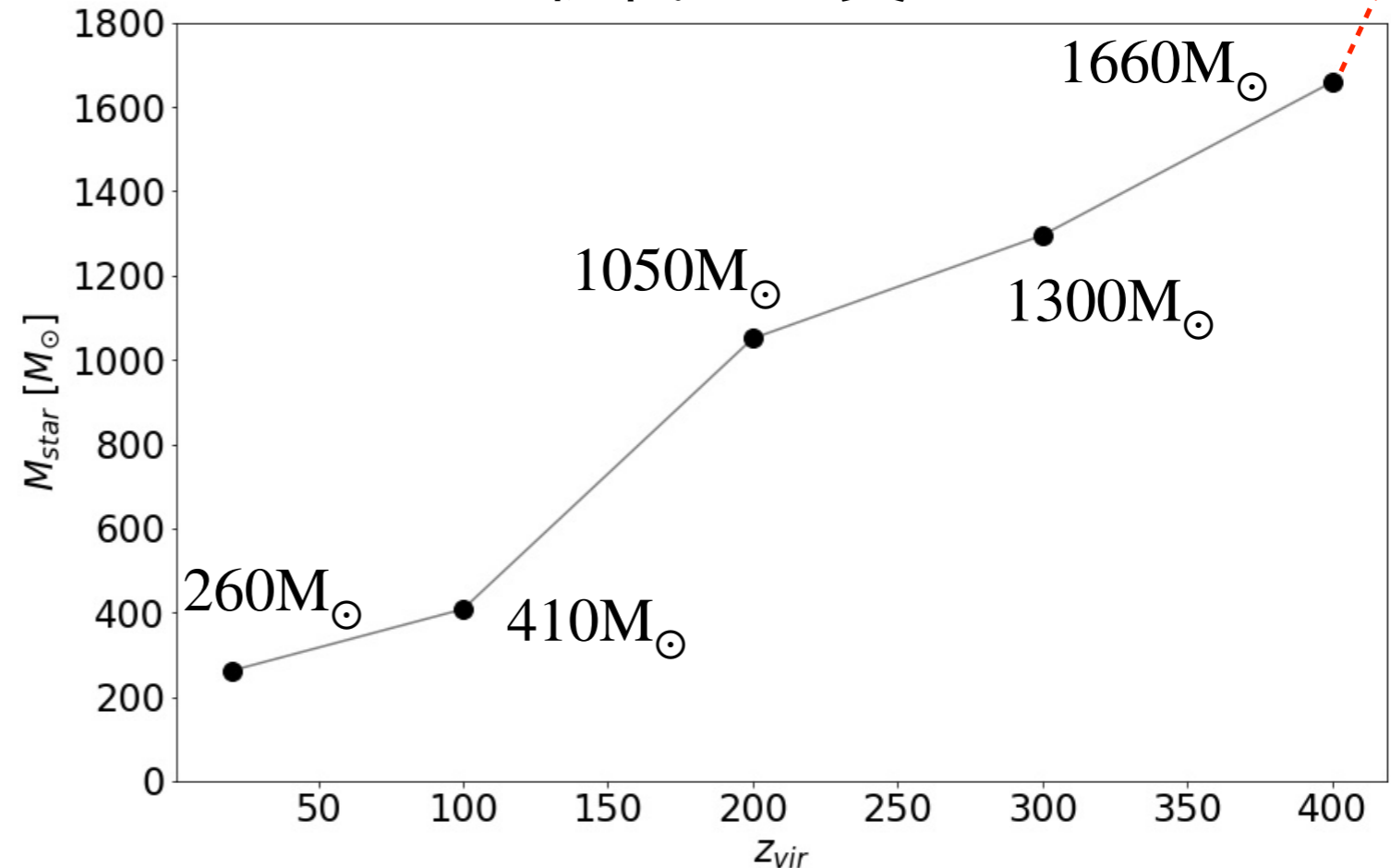
$z \gtrsim 500$: direct collapse ($\sim 10^5 M_\odot$)

Hirano et al. (2015)

$$M_{\text{III}} = 250 M_\odot \left(\frac{\dot{M}_J}{2.8 \times 10^{-3} M_\odot \text{ yr}^{-1}} \right)^{0.7}$$



初代星の質量



初代星の質量は、 $z \gtrsim 200$ で $1000 M_\odot$ を超える

高赤方偏移で形成された初代星ほど大質量になる

Outline

1. Introduction
2. Method
3. Results
4. Discussion
- 5. Summary**

Summary

$z > 100$ の極初期宇宙における初代星の進化を調べるため、CMBの効果を考えて熱進化を計算し、形成される初代星の質量を見積もった

■ $z \lesssim 130$

- ・ 標準的な初代星の進化とあまり変わらない
- ・ $M_{\text{III}} \sim 260 - 410 M_{\odot}$

■ $130 \lesssim z \lesssim 500$

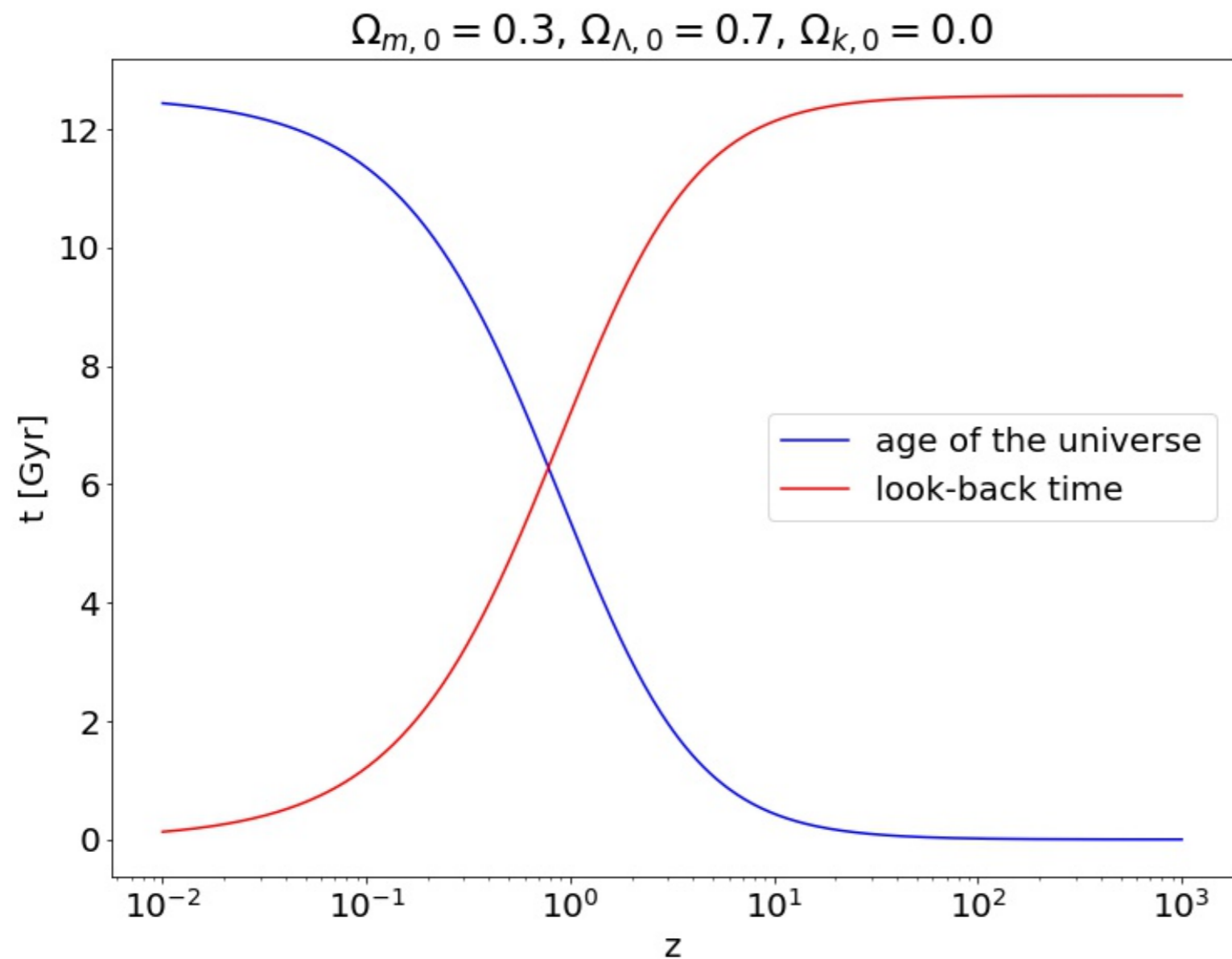
- ・ CMB光子による光解離反応によって H_2 生成が阻害される
 $\Rightarrow n_{\text{H}} \lesssim 10^8 \text{ cm}^{-3}$ で標準的な熱進化より高温
- ・ $M_{\text{III}} \sim 1050 - 1660 M_{\odot}$
- ・ 高赤方偏移で形成された初代星ほど、大質量になる傾向にある

■ $z \gtrsim 500$

- ・ H_2 冷却は効かず、H原子冷却で等温のまま収縮
 $\Rightarrow M \sim 10^5 M_{\odot}$ の超大質量星ができると考えられる (direct collapse)

Appendix

おまけ：通常の初代星の何年前？



z	Look-back time (Gyr)
20	12.4
100	12.5
200	12.5
500	12.5
700	12.5

今回考えた $z > 100$ の初代星は、典型的な初代星より約1億年早く誕生

Introduction

始原ガス雲の重力収縮

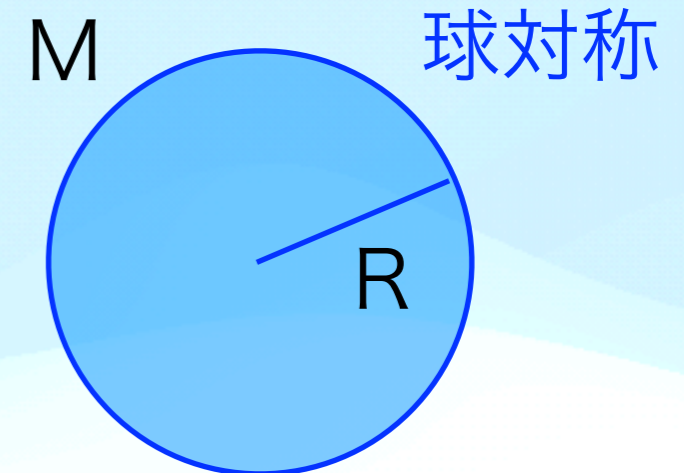
$P \propto \rho^\gamma$ を仮定すると

$$\text{重力} \quad |F_g| = \frac{GM}{R^2} \propto R^{-2}$$

$$\text{圧力} \quad |F_p| = \frac{1}{\rho} \nabla p \sim \frac{\rho^{\gamma-1}}{R} \propto R^{-3\gamma+2}$$

→ 収縮過程では $\gamma > \frac{4}{3}$ で安定 $\gamma < \frac{4}{3}$ で不安定

単原子分子理想気体(断熱)では $\gamma = \frac{5}{3}$ → 収縮を続けるには冷却が必要



Introduction

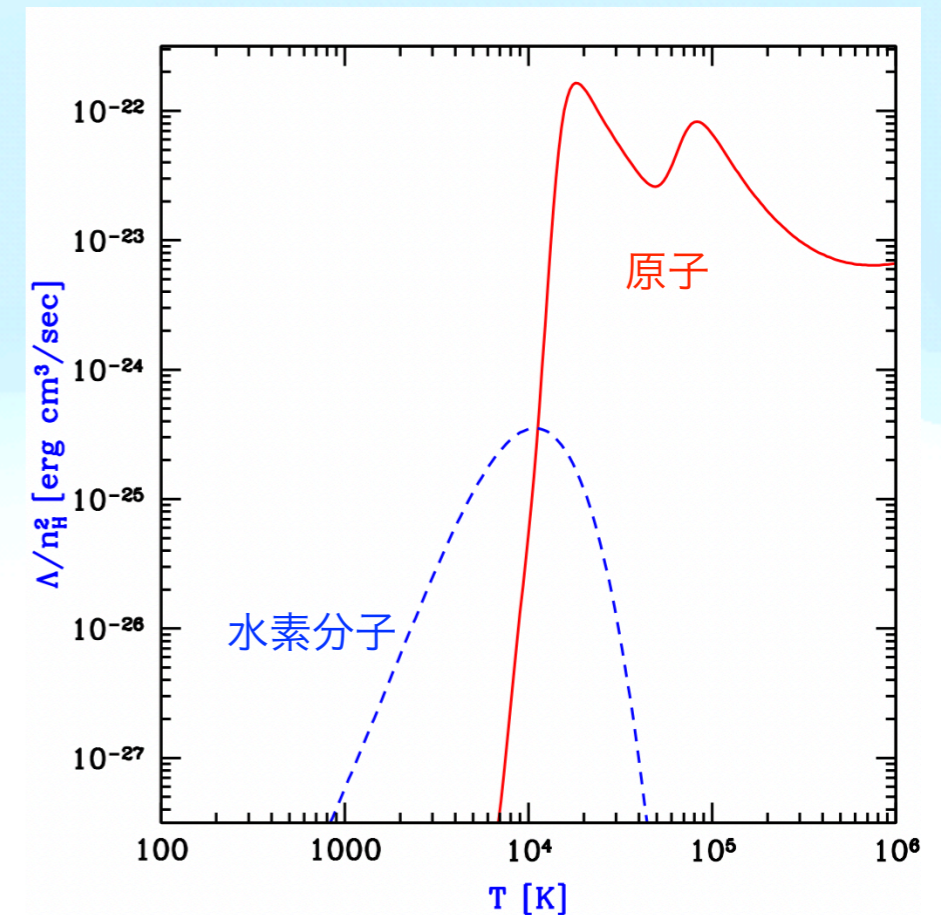
始原ガスの冷却過程

始原ガスが十分収縮して星が形成されるには、冷却によって圧力上昇を抑える必要がある

始原ガスの主な構成元素

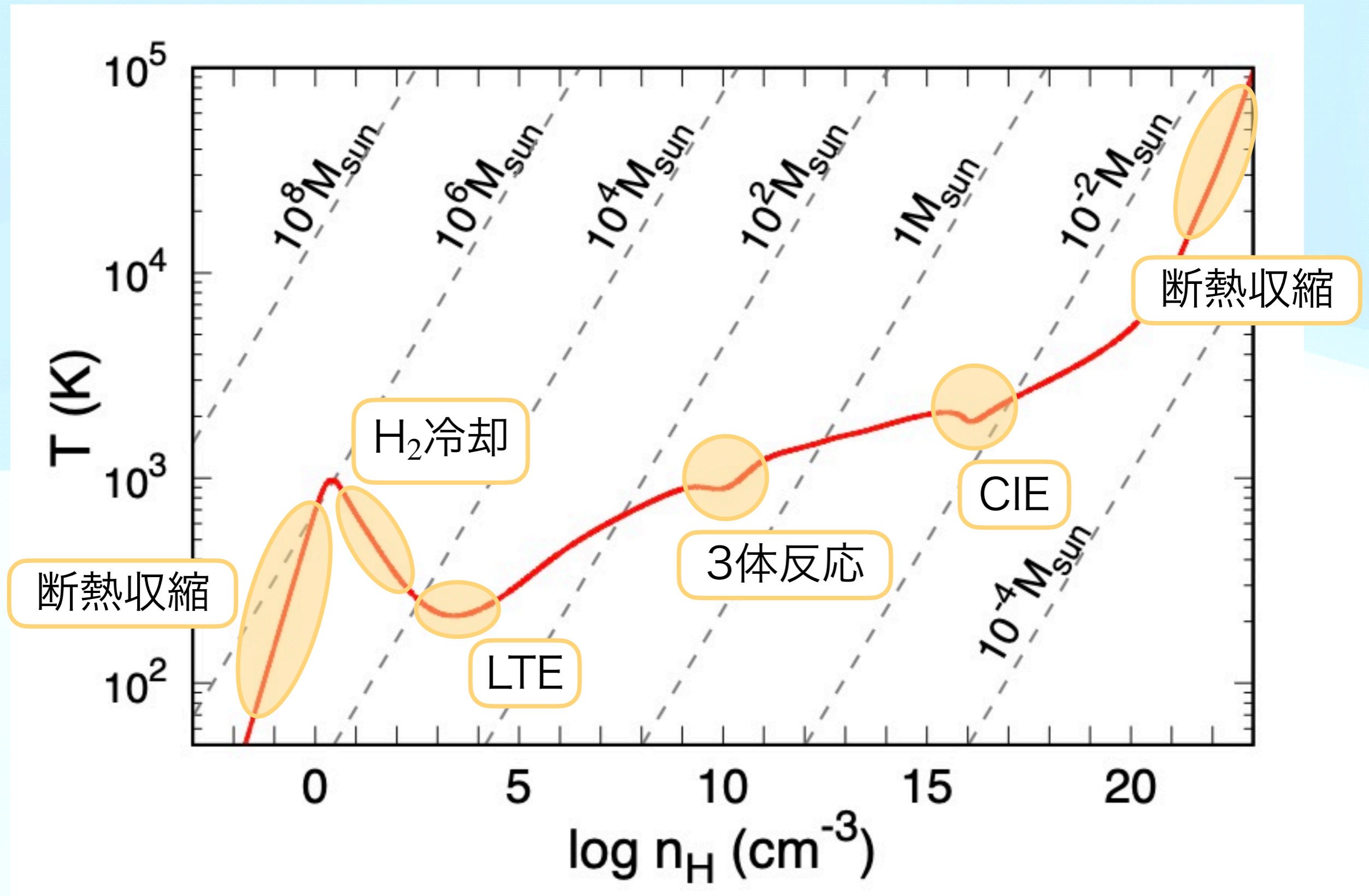
水素・ヘリウム

➔ 冷却過程は H_2 からの輝線放射が支配的



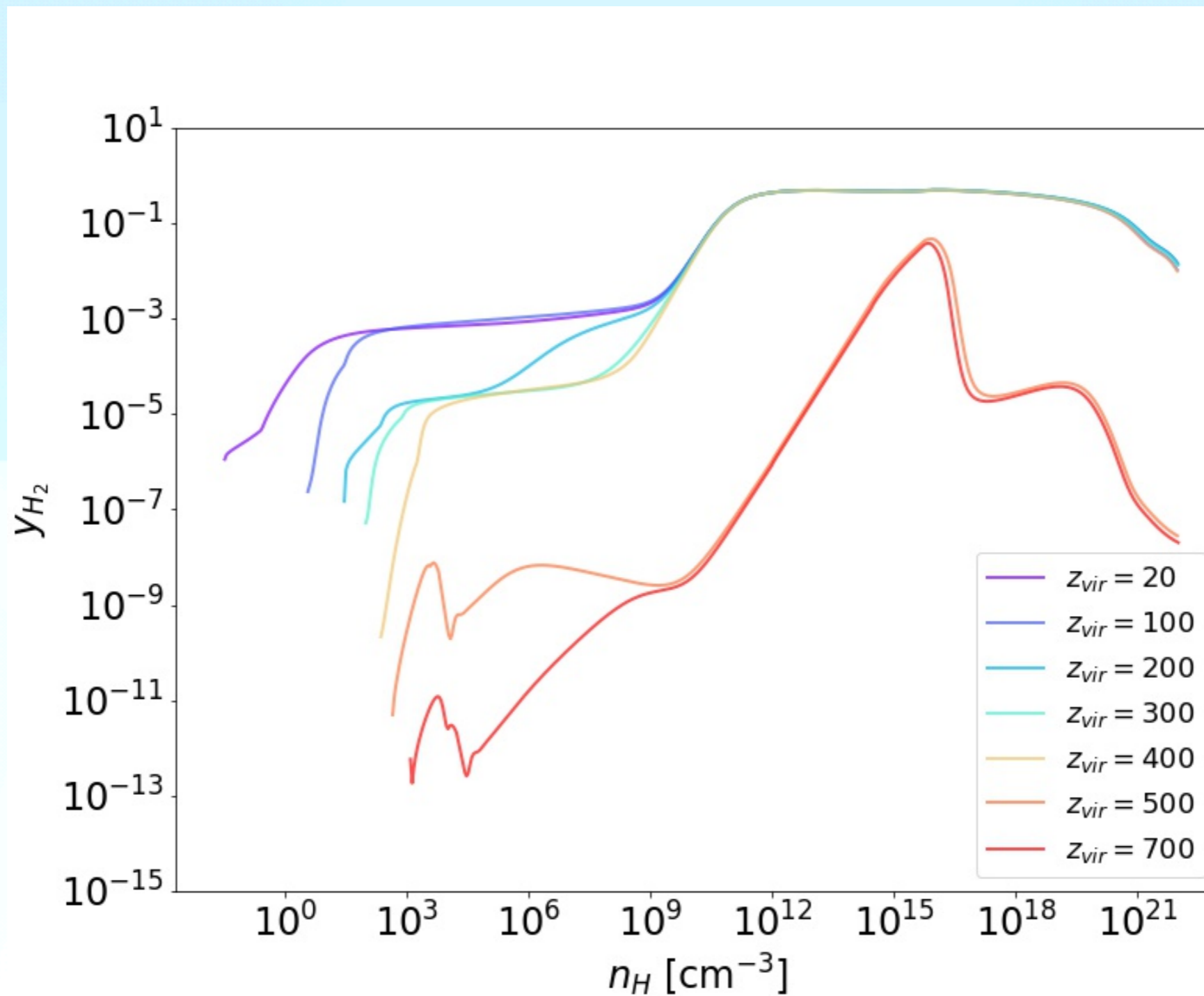
始原ガス中に存在する分子による冷却率
(Barkana & Loeb 2001)

始原ガスの熱進化



Results

各赤方偏移でのH₂存在量 (H⁻の光解離あり)



Results

各赤方偏移での H_2 存在量 (H^- の光解離なし)

