

輻射流体計算による初代星周囲の 21-cm線シグナルの見積もり

第4回SKA研究会「銀河進化と遠方宇宙」@アーデンホテル阿蘇

名古屋大学宇宙論研究室 (C研)

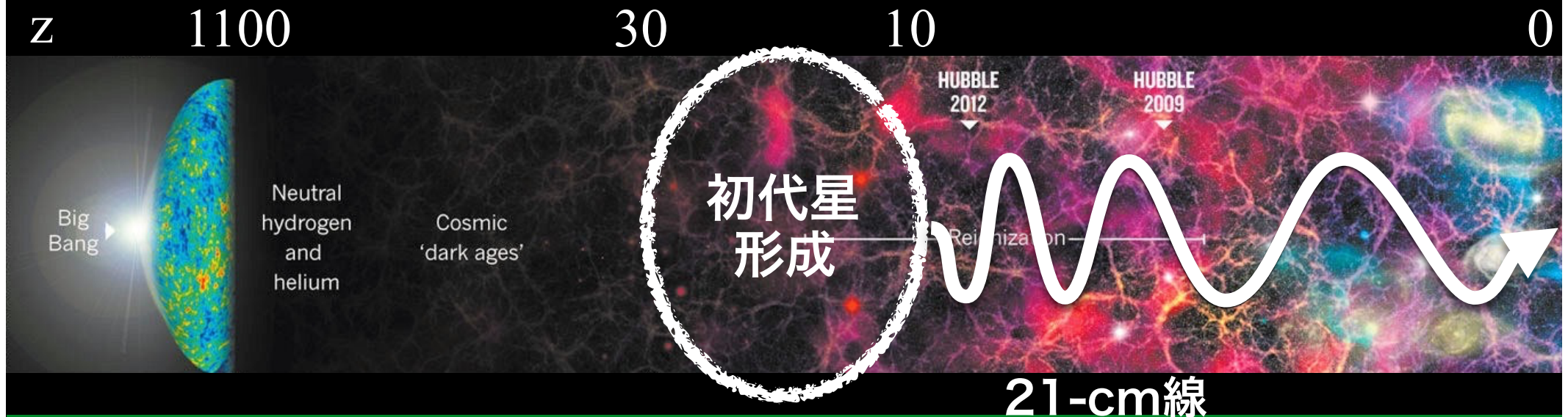
M1 田中 俊行

共同研究者: 長谷川 賢二 (名古屋大学), 矢島 秀伸 (東北大学)

1. 導入

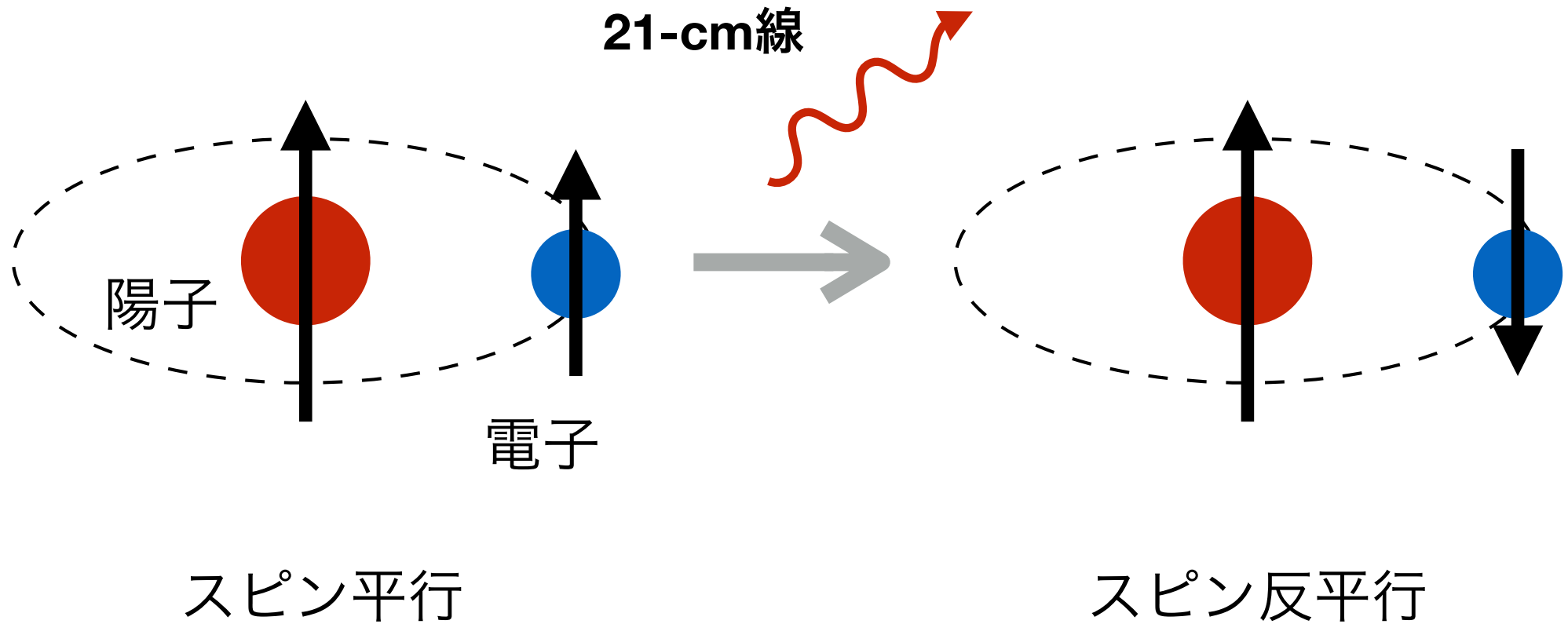
■ モチベーション

SKAに代表される次世代電波干渉計によって、初代星周辺からの21-cm線シグナルが観測されることが期待されている。その次世代観測のデータ解析のためにも、初代星がどのように見えるのかを予言する必要がある。



■21-cm線

中性水素の超微細構造由来の放射



■ スピン温度 T_S

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{g_1}{g_0} \exp\left(-\frac{E_{10}}{k_B T_S}\right)$$

n : 数密度 g : 自由度 0 : スピン反平行のラベル
 E_{10} : 超微細構造の準位間のエネルギー差 1 : スピン平行のラベル

スピン温度を決める3つの物理過程

- CMB光子との相互作用
- H, p, e との衝突
- Ly α 光子との相互作用 (WF 効果)

$$T_S^{-1} = \frac{T_{\text{CMB}}^{-1} + (x_\alpha + x_c) T_{\text{gas}}^{-1}}{1 + x_\alpha + x_c}$$

x_α x_c : Ly α と衝突の結合定数

■ 輝度温度: 21-cm線の観測量

$$\delta T_b \approx 9 f_{\text{HI}} (1 + \delta_{\text{HI}}) (1 + z)^{1/2} \left[\frac{T_S - T_{\text{CMB}}(z)}{T_S} \right] \text{ [mK]}$$

Furlanetto (2006)

δT_b は3つの物理量で決まる

中性度 : f_{HI}

密度 : $\delta_{\text{HI}} = \frac{\rho_{\text{HI}} - \bar{\rho}_{\text{HI,IGM}}}{\bar{\rho}_{\text{HI,IGM}}}$

スピン温度 : T_S

■ 輝度温度: 21-cm線の観測量

$$\delta T_b \approx 9 f_{\text{HI}} (1 + \delta_{\text{HI}}) (1 + z)^{1/2} \left[\frac{T_S - T_{\text{CMB}}(z)}{T_S} \right] \text{ [mK]}$$

Furlanetto (2006)

δT_b は3つの物理量で決まる

中性度 : f_{HI}

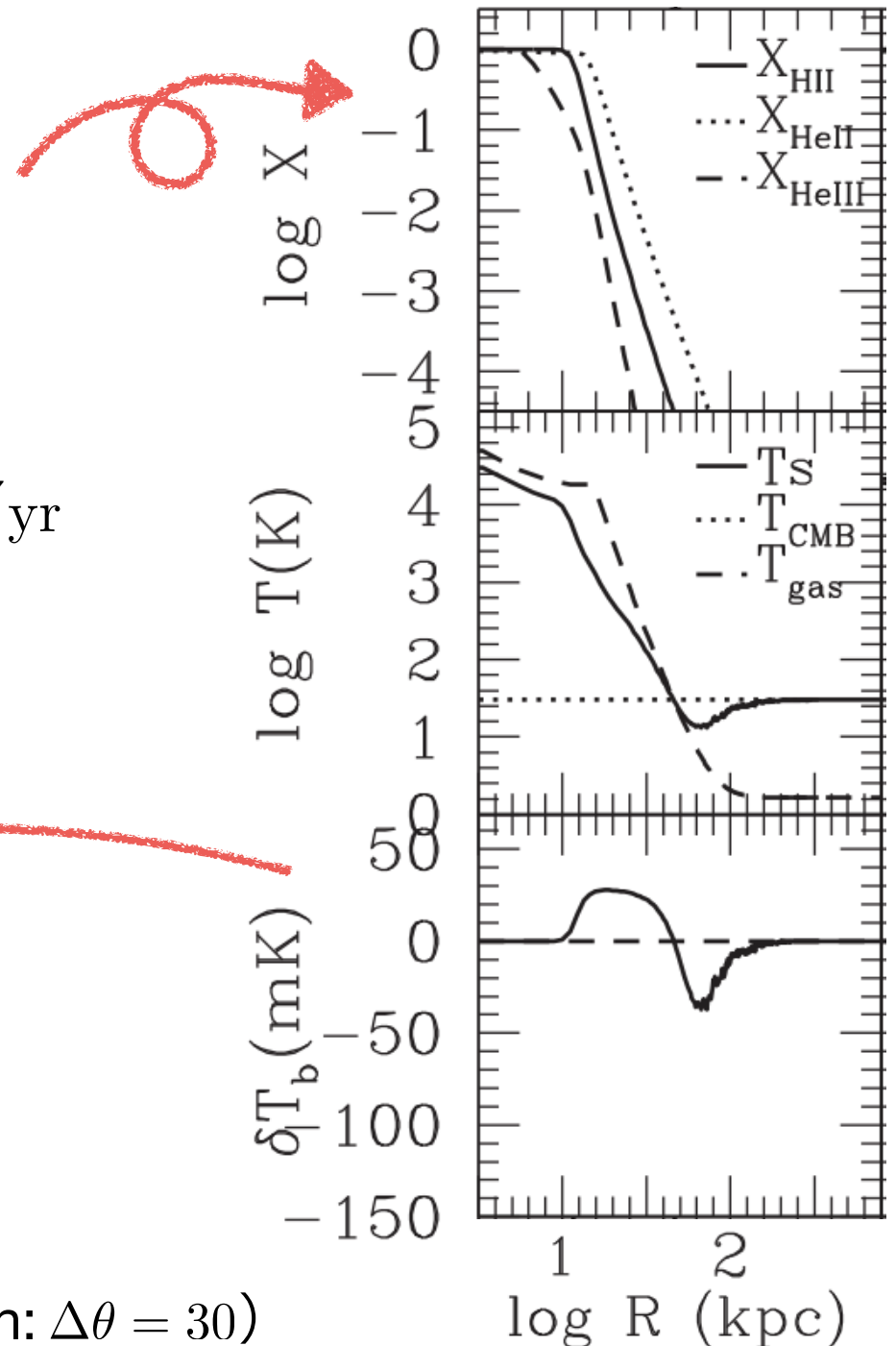
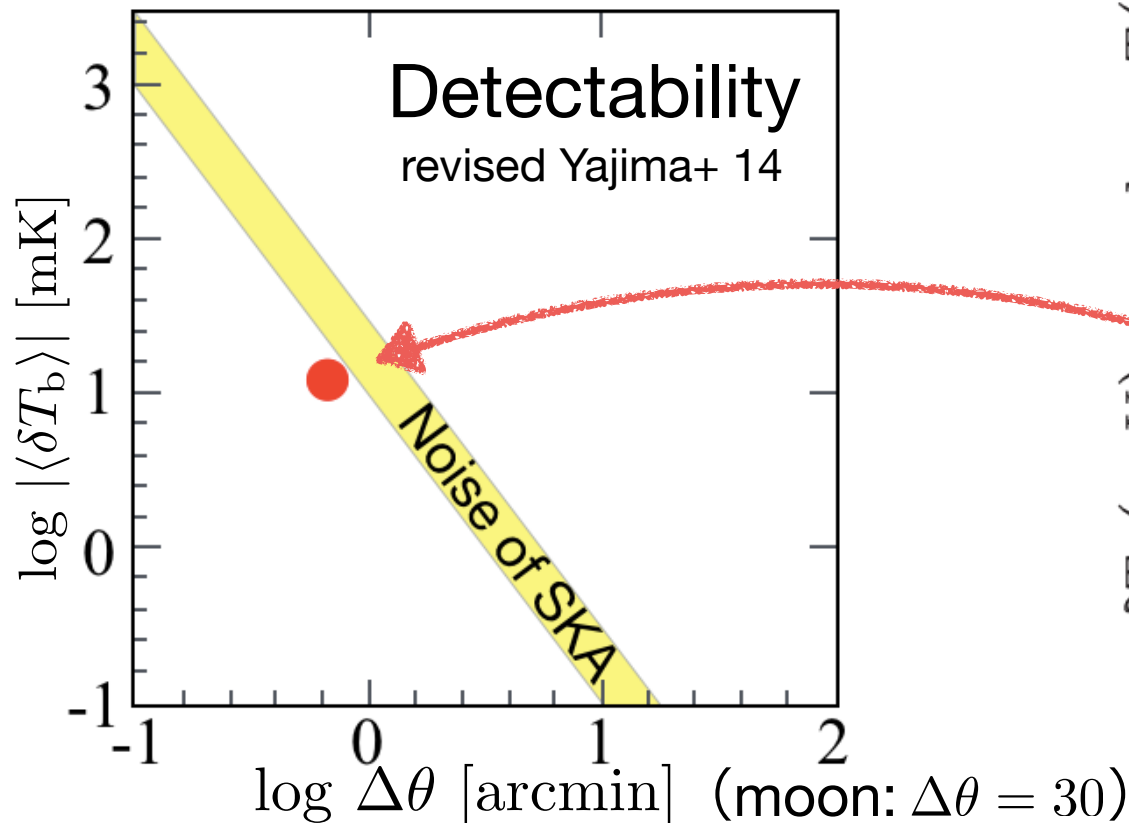
密度 : $\delta_{\text{HI}} = \frac{\rho_{\text{HI}} - \bar{\rho}_{\text{HI,IGM}}}{\bar{\rho}_{\text{HI,IGM}}}$

スピン温度 : T_S

輻射流体シミュレーション

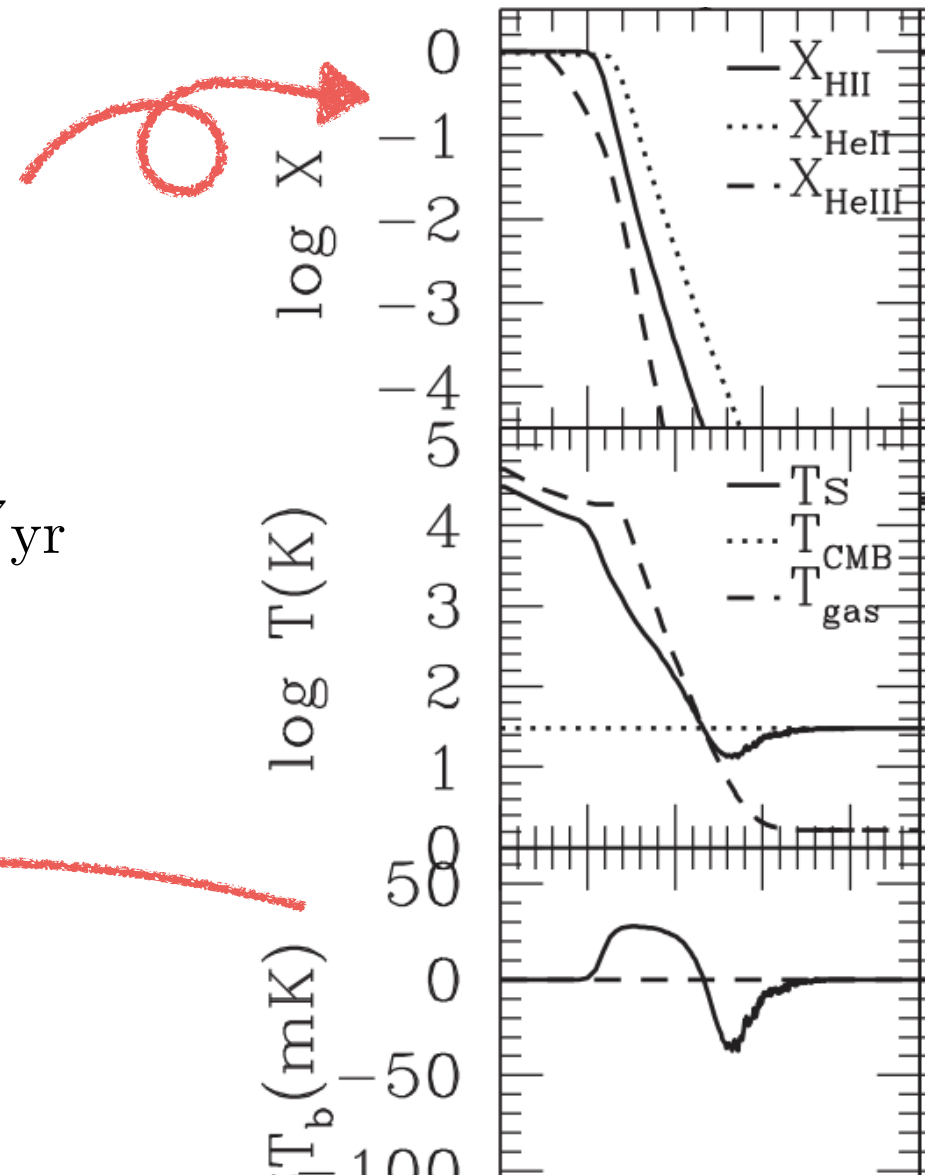
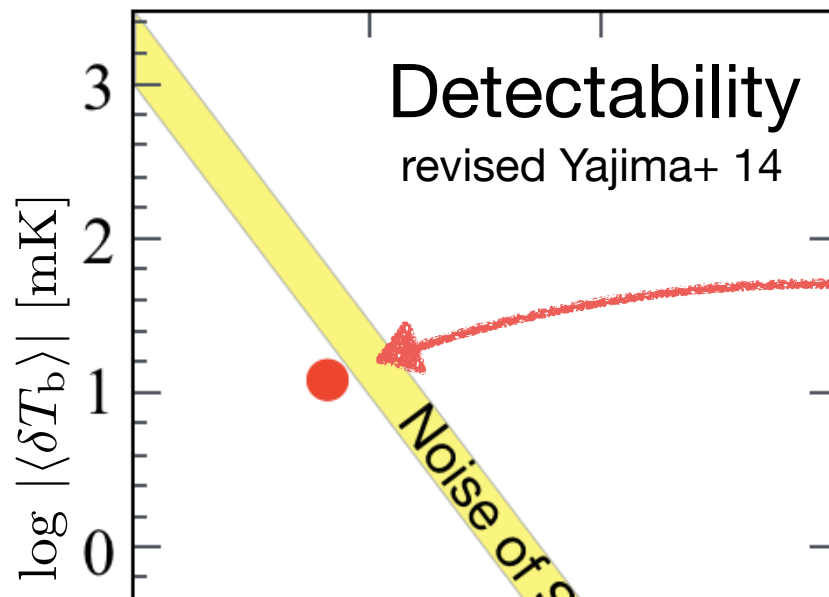
■ 先行研究 Yajima+ 2014

- 1次元輻射輸送シミュレーション
- 静的かつ一様な IGM
- 光子脱出率 = 0.5
- Ly α の輻射輸送
- $z = 10$ $M_{\text{star}} = 200M_{\odot}$ $t_{\text{evo}} = 10^7 \text{yr}$



■ 先行研究 Yajima+ 2014

- 1次元輻射輸送シミュレーション
- 静的かつ一様な IGM
- 光子脱出率 = 0.5
- Ly α の輻射輸送
- $z = 10$ $M_{\text{star}} = 200M_{\odot}$ $t_{\text{evo}} = 10^7 \text{yr}$



本研究: ガスの運動と初期密度プロファイルを考慮する

より現実的に!

2. シミュレーションセットアップ

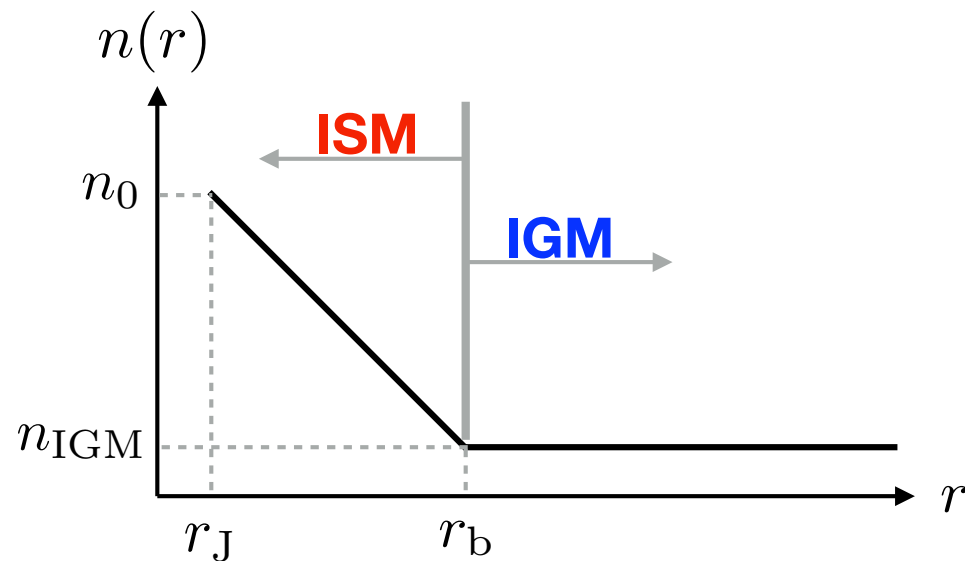
■ ハローの初期密度プロファイル

$$n(r) = \begin{cases} n_0 (r_J/r)^2 & (r \leq r_b) \\ n_{\text{IGM}}(z) & (r > r_b) \end{cases}$$

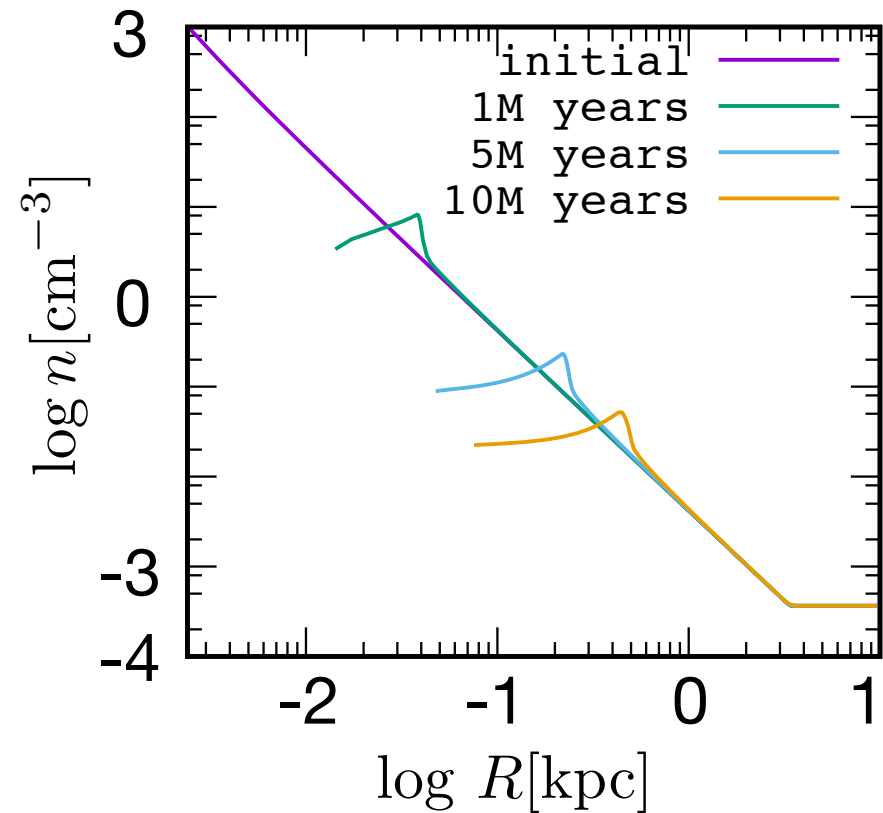
$$r_J = 2.034[\text{pc}] \quad r_b = 3.304[\text{kpc}]$$

$$n_0 = 10^3[\text{cm}^{-3}]$$

$$n_{\text{IGM}}(z = 10) = 3.66 \times 10^{-4}[\text{cm}^{-3}]$$



数密度分布の時間発展



3. 結果

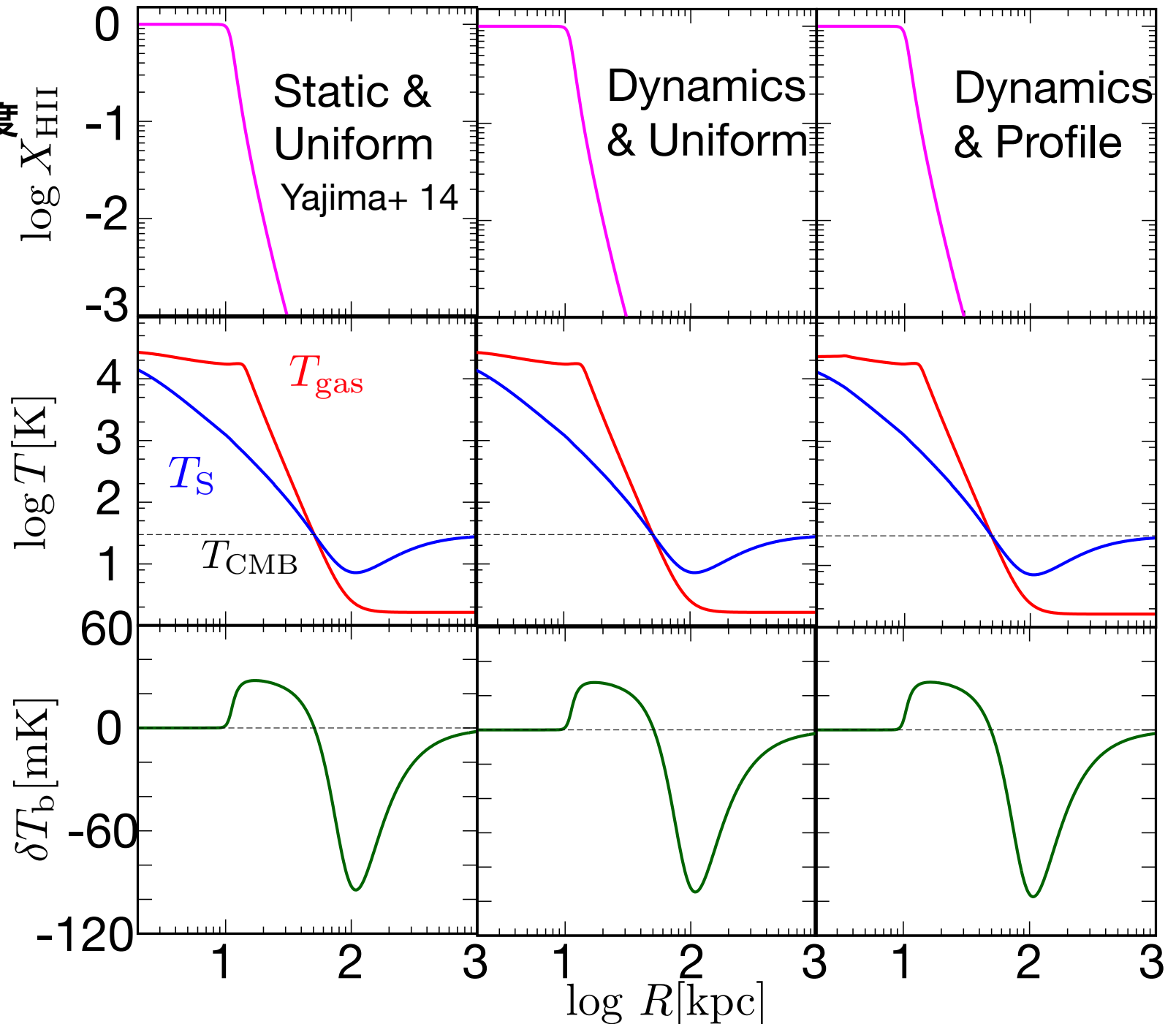
ガスの運動と初期密度
プロファイルの影響

$$z = 10$$

$$t_{\text{evo}} = 10^7 \text{ yr}$$

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

10⁷年計算した場合、ガスの運動と初期密度プロファイルを考慮してもあまり変化が見られなかった。つまり、Yajima+ 2014のセットアップは良い近似になっていることがわかった。



3. 結果

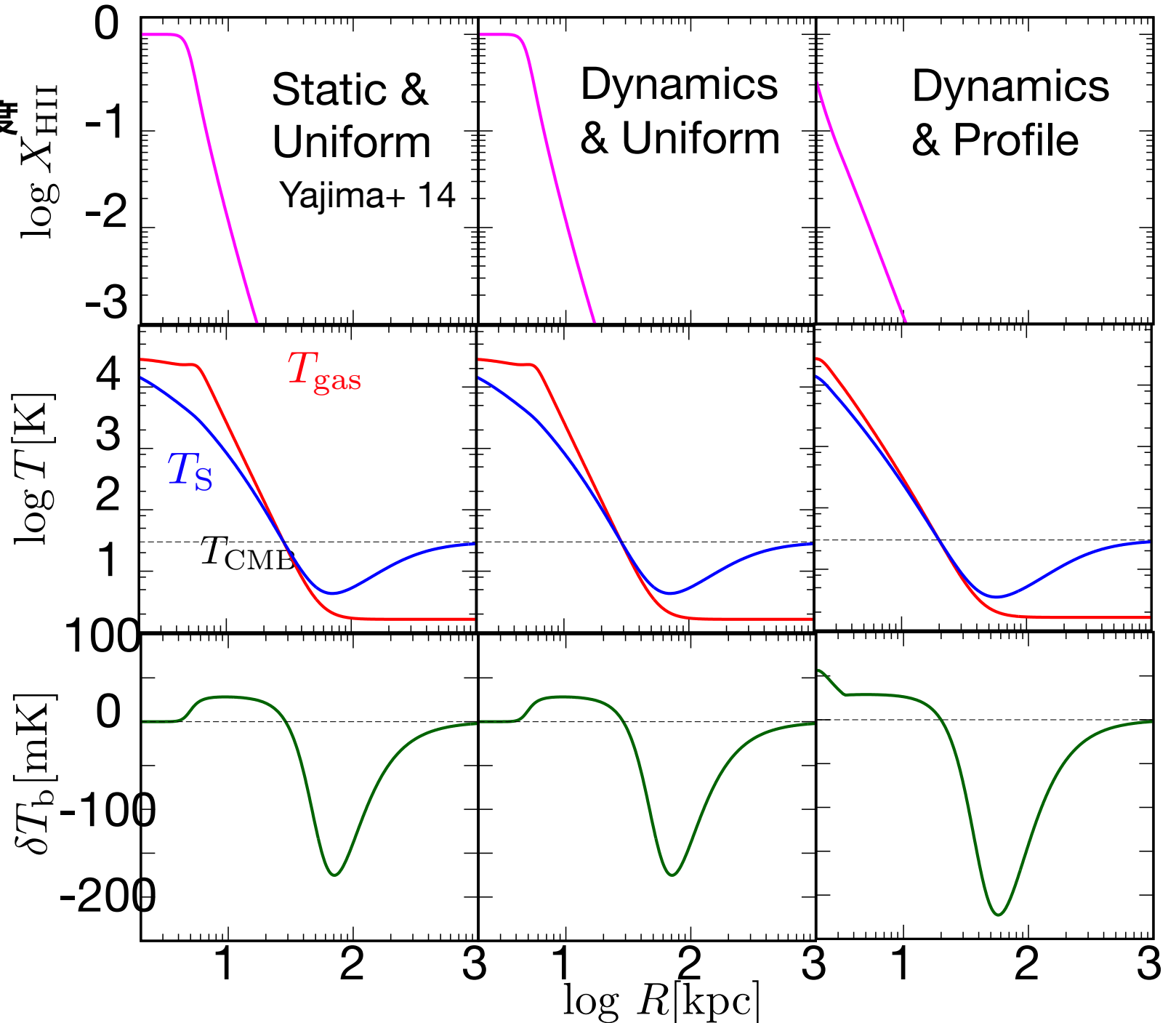
ガスの運動と初期密度
プロファイルの影響

$$z = 10$$

$$t_{\text{evo}} = 10^6 \text{ yr}$$

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

星の寿命程度である**10⁶年**の計算では、ガスの運動と初期密度プロファイルを考慮した場合、ISM内が電離しきらず、IGMの加熱が効きにくくなるので、**より深い吸収線が見られた。**



3. 結果

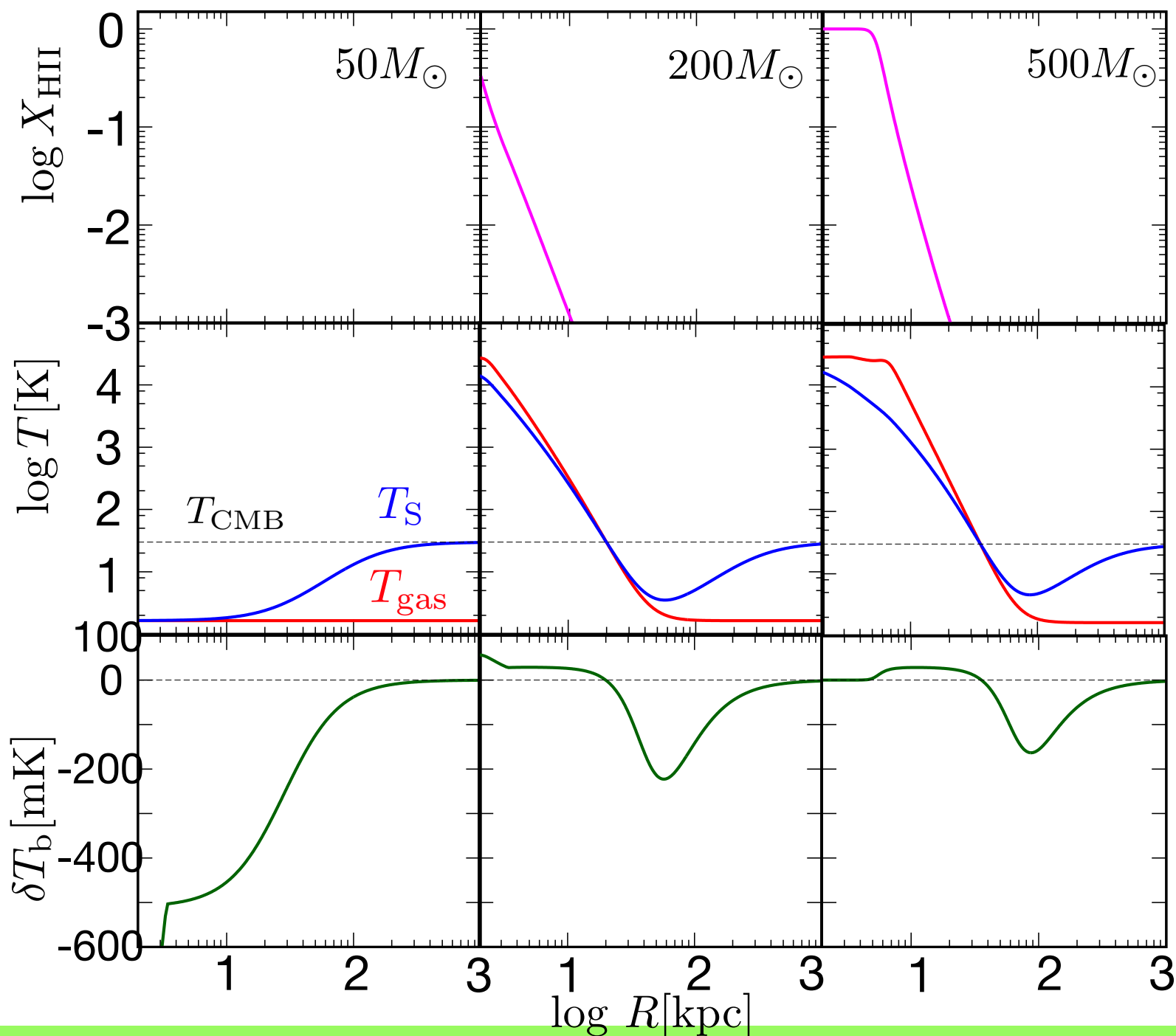
星の質量依存性

$$z = 10$$

$$t_{\text{evo}} = 10^6 \text{ yr}$$

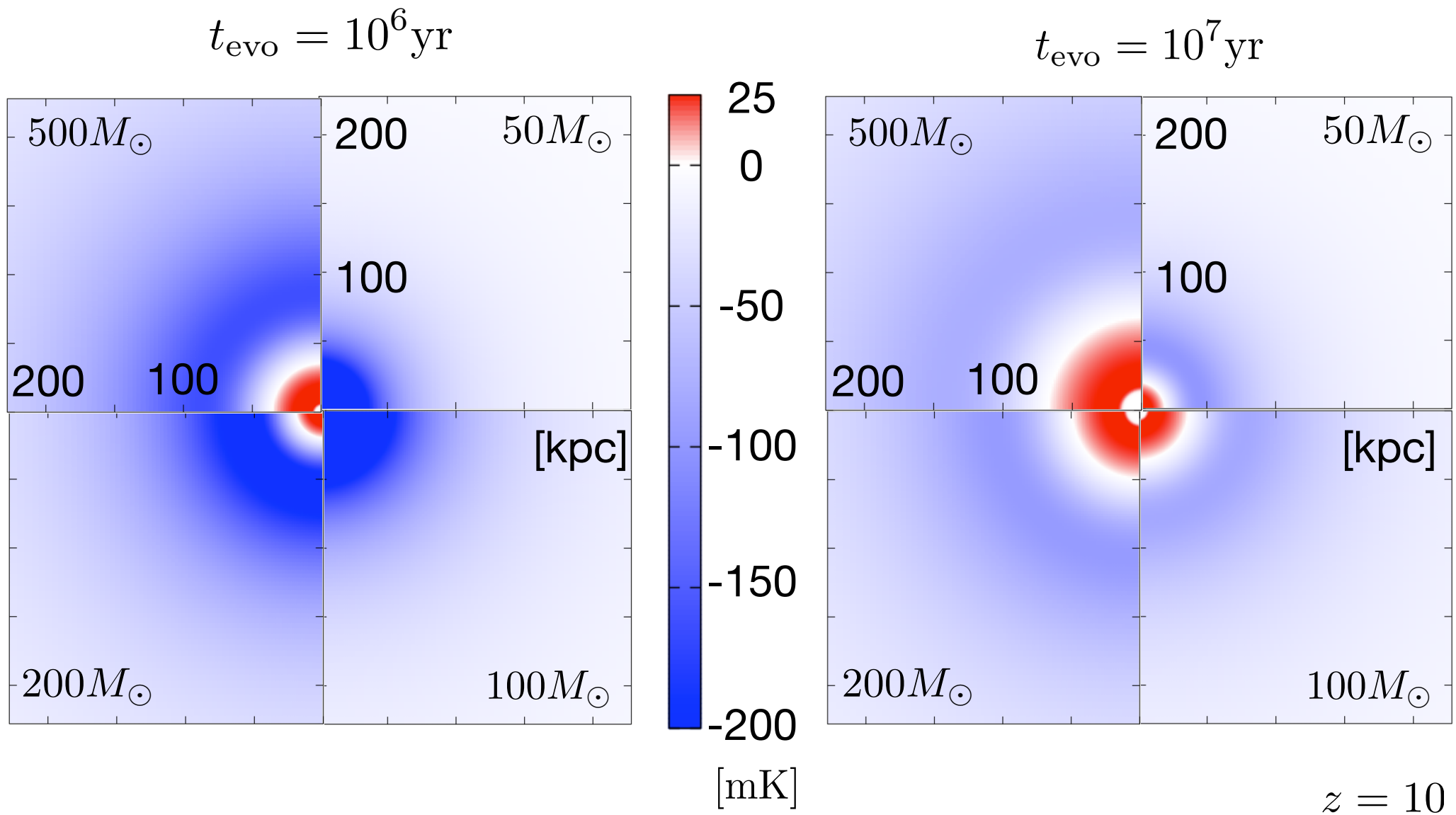
50Msolarでは、電離波面が内側にとどまり、加熱も比較的効かないため、**内側に非常に深い吸収線が見られる。**

500Msolarでは、200Msolarと比べて**電離波面は広がり、吸収線の底は浅くなる。**



3. 結果

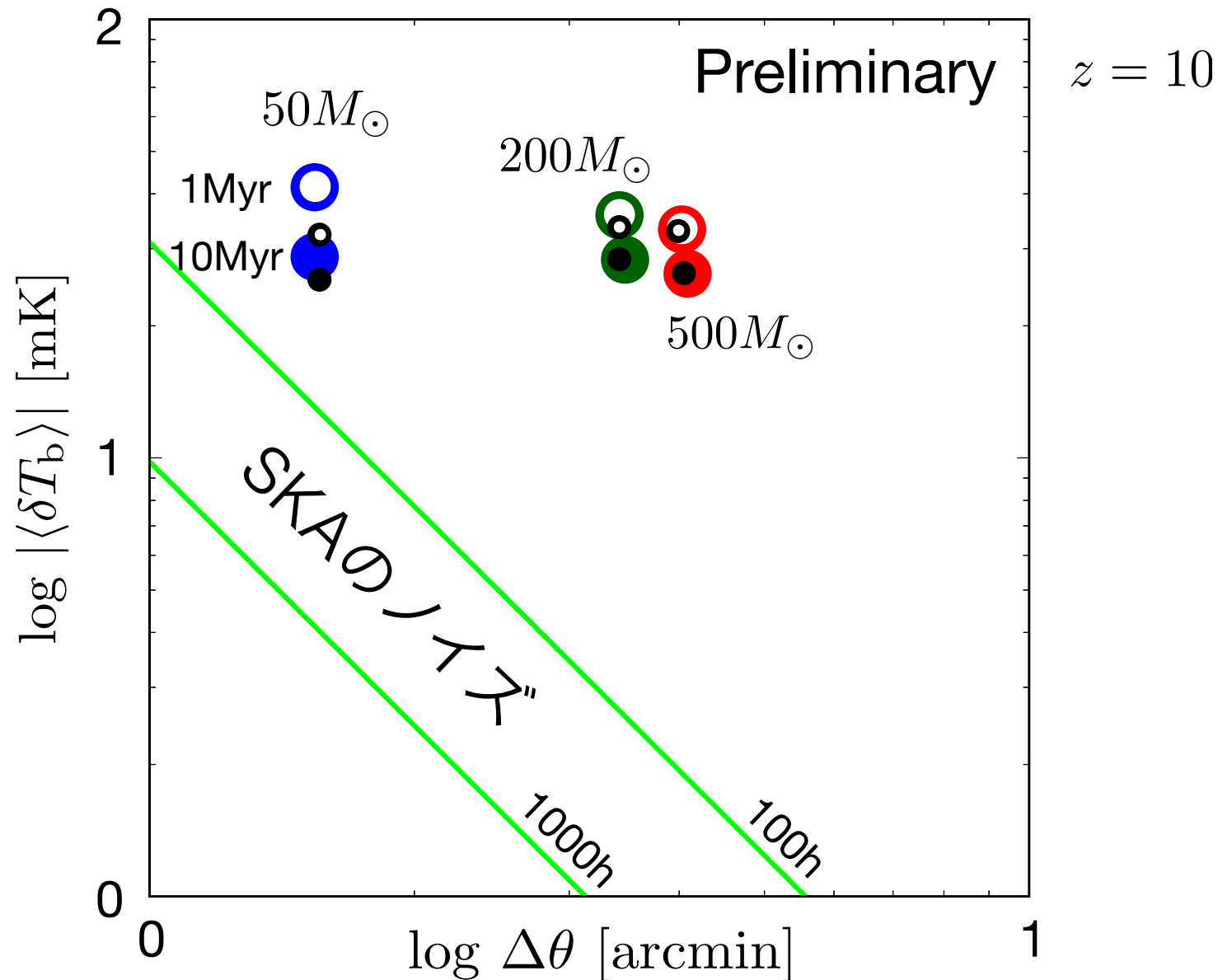
■ 初代星周囲の輝度温度分布と質量依存性



3. 結果

■ 観測可能性

本研究の結果 (カラーのシンボル) は
先行研究のセット
アップ (黒のシンボル) に比べて、**観測可能性が高くなる方向に効く。**
また、**低質量ほど時間変化が大きい。**



furlanetto 2009

$$\Delta T \sim 20[\text{mK}] \left(\frac{10^4 \text{m}^2}{A_{\text{eff}}} \right) \left(\frac{10 \text{arcmin}}{\Delta \theta} \right)^2 \left(\frac{1+z}{10} \right)^{4.6} \left(\frac{\text{MHz}}{\Delta \nu} \frac{100 \text{h}}{t_{\text{int}}} \right)^{1/2}$$

4. まとめ

- ガスの運動とガスの初期密度プロファイルを考慮して、輻射流体シミュレーションを行った。

- **計算時間依存性**

- 10^7 年の計算では、先行研究と比較して、あまり変わらなかった。

- Yajima+14のセットアップは良い近似であることがわかった。

- 10^6 年の計算では、まだ加熱が十分効いていない段階にあるため、より深い吸収線が見られた。

- **星の質量依存性**

- 低質量では電離波面があまり進まず($50M_{\odot}$ で ~ 20 pc), その外側に深い吸収線領域が見られる。

- 大質量では電離波面が広がり, 吸収線の底は浅くなる。

- **観測可能性**

- 先行研究より観測可能性が大きくなる。