

21cm観測で探る初代星形成

矢島 秀伸 (大阪大学)

共同研究者: 長峯健太郎(阪大)、Sadegh Khochfar
(Edinburgh)、Yuexing Li (Penn State)

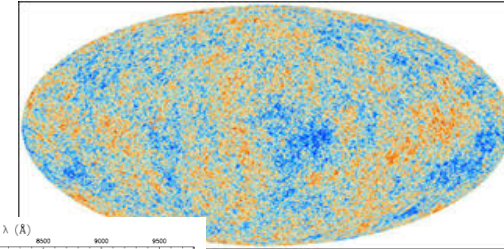
宇宙再電離

観測から分かっている事

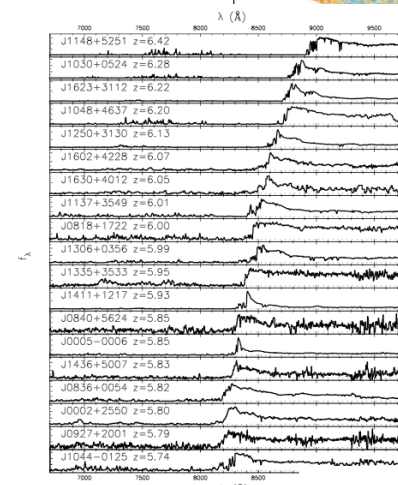
- * Thomson scattering optical depth $\sim 0.09 \rightarrow z_{\text{re}} \sim 11$ (CMB観測より)
- * 再電離終了時期 $z \sim 6-7$ (クエーサー観測より)
- * $z \sim 6-7$ の銀河周りの中性度 (LAEsやGRB観測より)

理論研究における不定性

- * 初代星の星形成率、初期質量関数
- * PopIII \rightarrow PopII星への遷移
- * 初代銀河の星形成率
- * 電離光子の脱出率
- * 銀河内ブラックホールの形成、成長

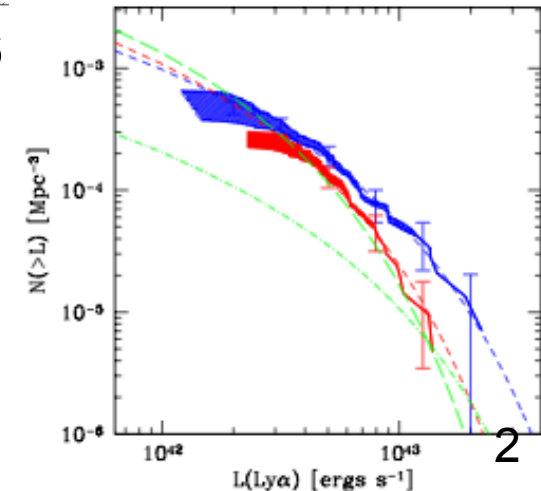


Planck2015

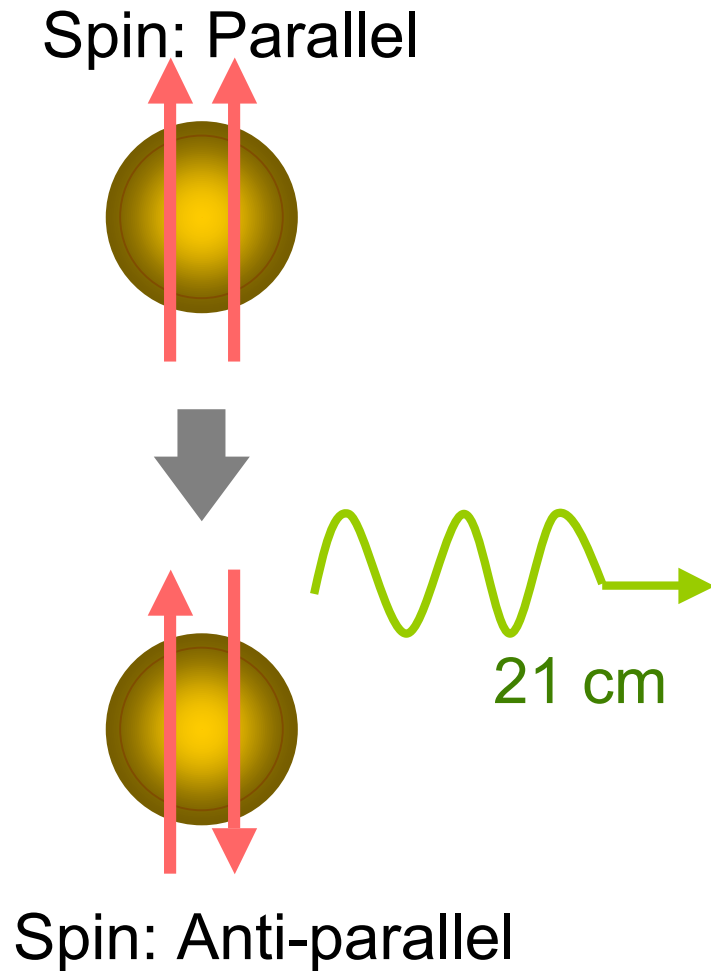


Kashikawa+2011

Fan+2006



21cm 線



Differential brightness temperature

$$\delta T_b = 28.1 \text{mK} \cdot \chi_{\text{HI}} (1 + \delta) \left(\frac{1+z}{10} \right)^{1/2} \frac{T_S - T_{\text{CMB}}}{T_S}$$

(Furlanetto+2006)

Key:

宇宙全体の電離史

中性水素の温度進化

紫外線輻射場 → スピン温度

スピン温度

$T_s \sim T_{\text{gas}}$ と近似される事が多い

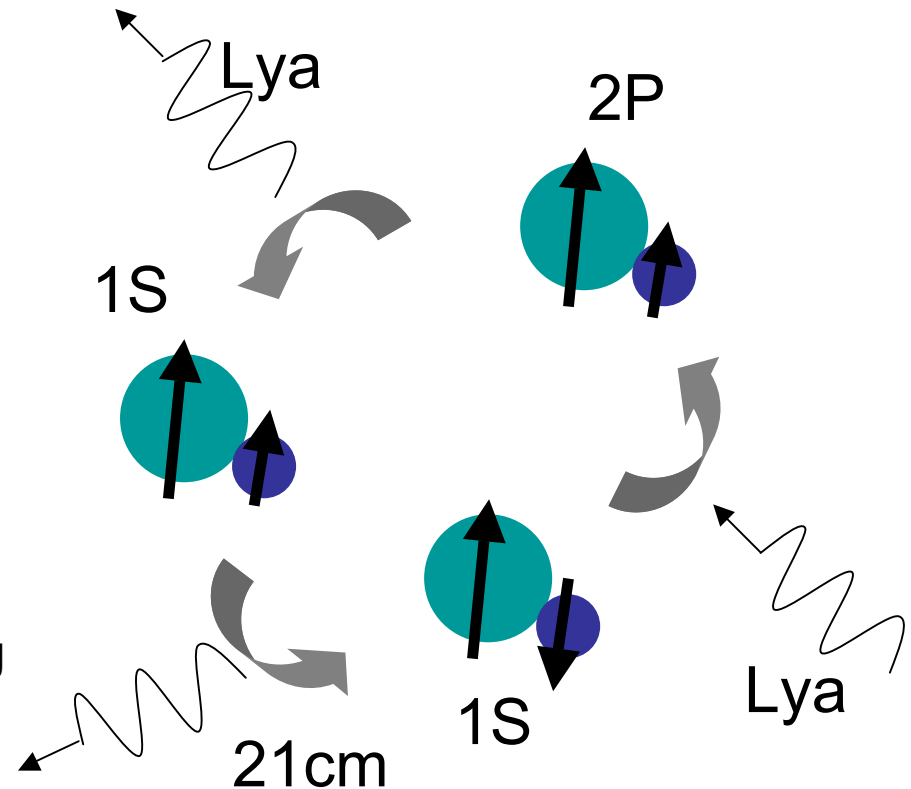
Spin temperature

$$T_s^{-1} = \frac{T_{\text{CMB}}^{-1} - x_C T_K^{-1} - x_\alpha T_C^{-1}}{1 + x_C + x_\alpha}$$

$$\frac{n_{\uparrow\uparrow}}{n_{\uparrow\downarrow}} = 3 \exp\left(-\frac{h\nu_{21}}{kT_s}\right)$$

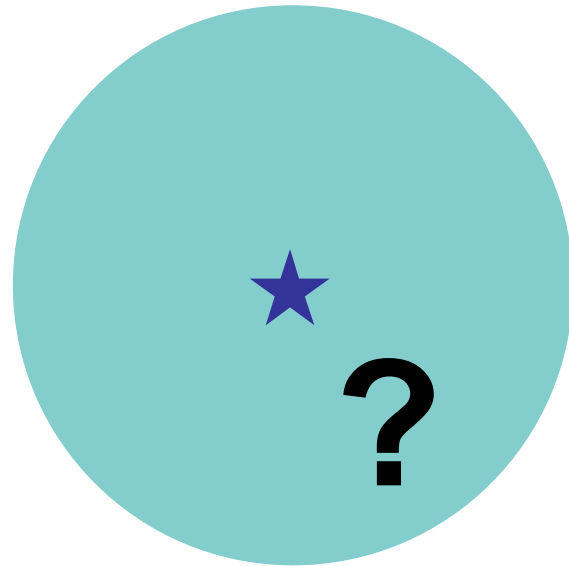
x_C : Coupling coefficient by gas collision

x_α : Coupling coefficient by Ly α scattering



ライマンアルファ光子による散乱が頻繁に起きていればスピン温度はガス温度、起きていなければCMB温度となる

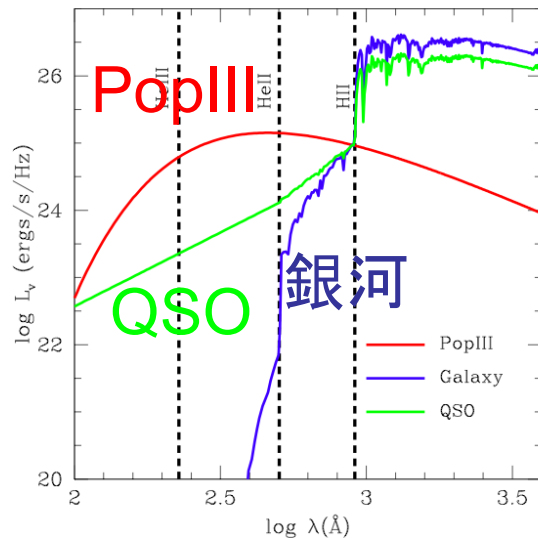
初代星や銀河の周りの21cm線
はどのような構造になるのか？
観測による検出可能性は？



モデル(1次元球対称シェル)



赤方偏移: 7、10、20
 年齢: $10^6 - 10^8$ yr



電離度進化

$$\frac{d\chi_{\text{HI}}}{dt} = -\Gamma_{\text{HI}}^{\gamma} - \Gamma_{\text{HI}}^{\text{C}}\chi_{\text{HI}}n_e + \alpha_{\text{B}}\chi_{\text{HII}}n_e$$

+ヘリウム電離

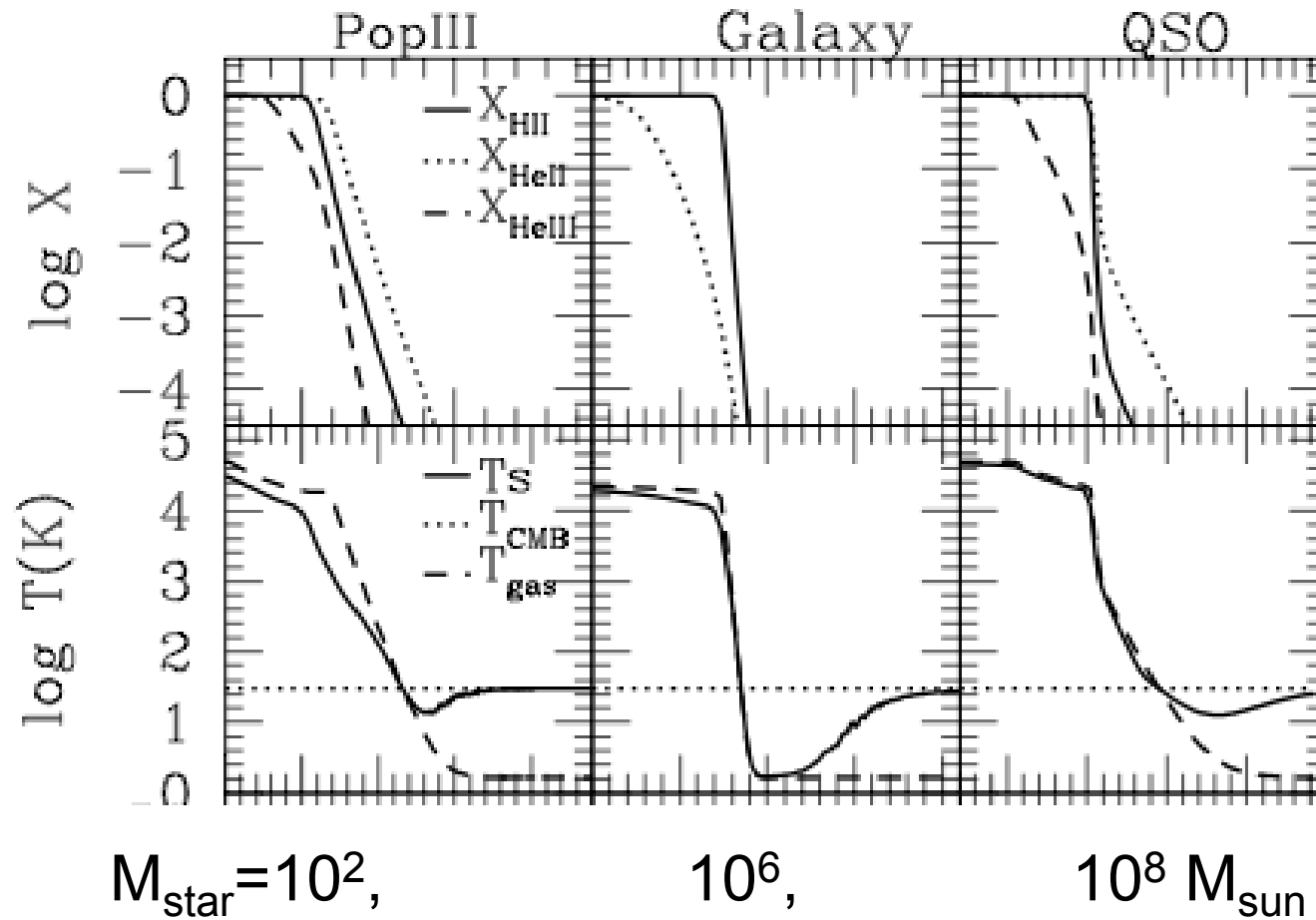
温度進化

$$\frac{dT_{\text{HI}}}{dt} = \frac{2}{3k_{\text{B}}n_{\text{H}}} \left[k_{\text{B}}T_{\text{HI}} \frac{dn_{\text{H}}}{dt} + \Gamma - \Lambda \right]$$

ライマンアルファ光度

$$L_{\text{Ly}\alpha} = \int_{912}^{1216} P_{\text{abs}} f_{\text{conv}} L_{\lambda} d\lambda + 0.68h\nu_{\alpha} (1 - f_{\text{esc}}) \dot{N}_{\text{Ion}} + 0.68h\nu_{\alpha} \alpha_{\text{B}} n_{\text{HII}} n_e V_{\text{HII}}$$

電離、温度構造



PopIII、QSO周りは
ハードなスペクトルに
よりヘリウム2階電離

PopIII、QSO周りは高
温から低温領域に緩
やかに遷移

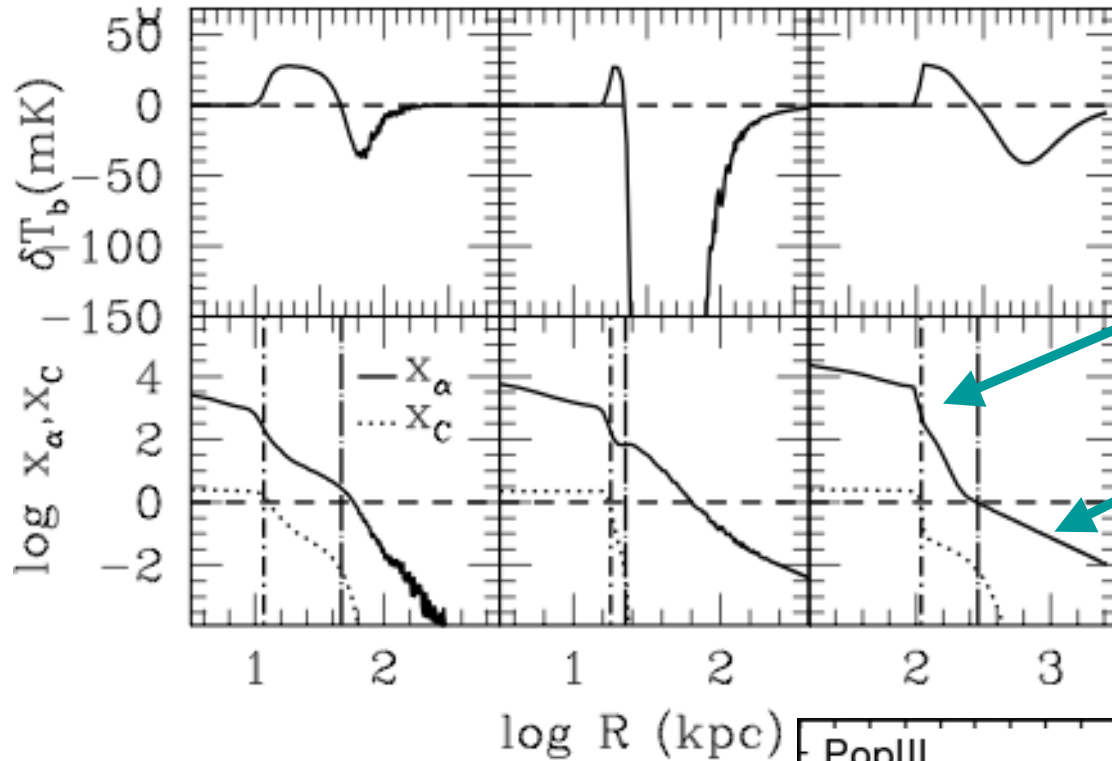
$M_{\text{star}} = 10^2,$

$10^6,$

$10^8 M_{\text{sun}}$

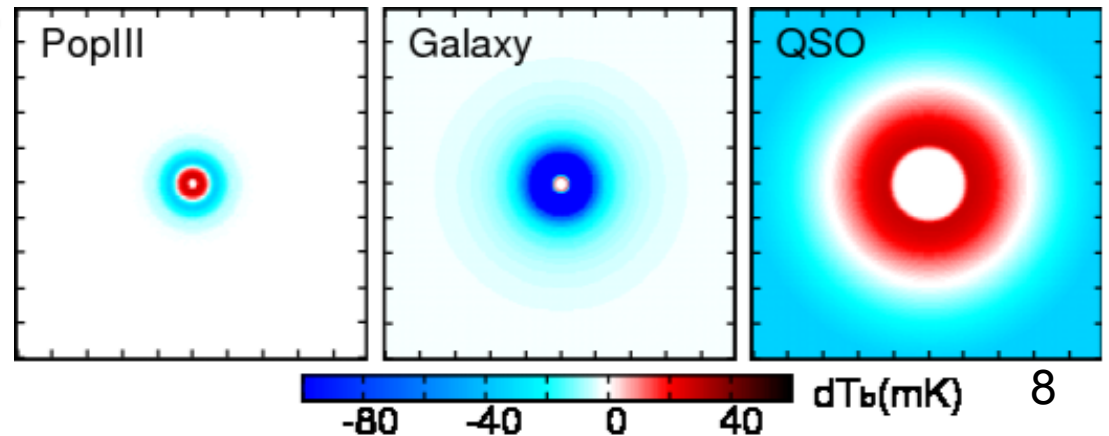
($z=10$)

スピン温度、21cmシグナル

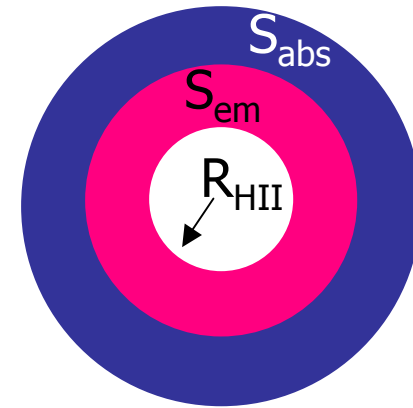
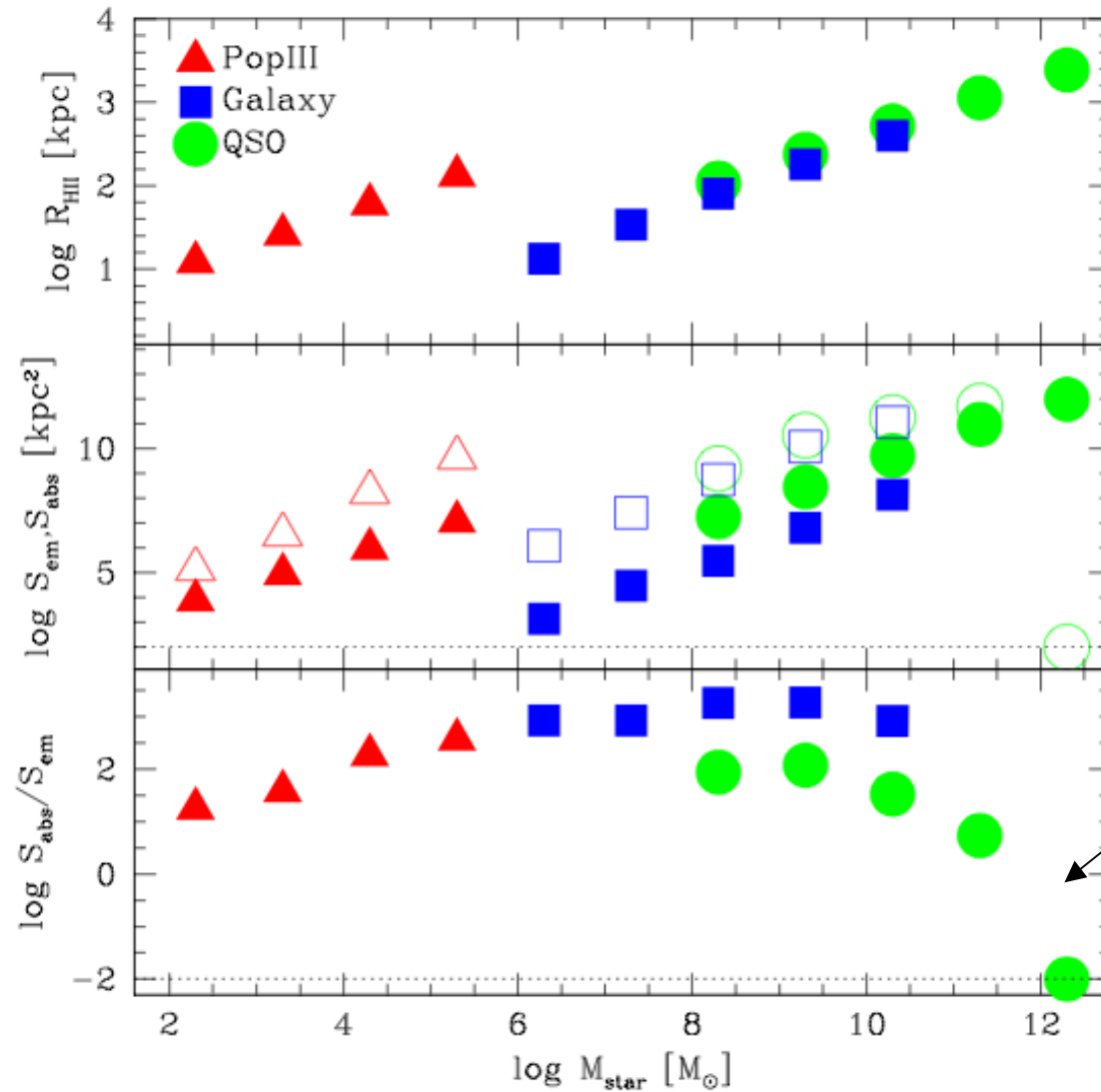


近傍はハローからの
Ly α 輝線放射による

遠方は星からの紫外線連
続波
(Lymanシリーズで捕まっ
て、カスケードディケイ
-> Ly α)

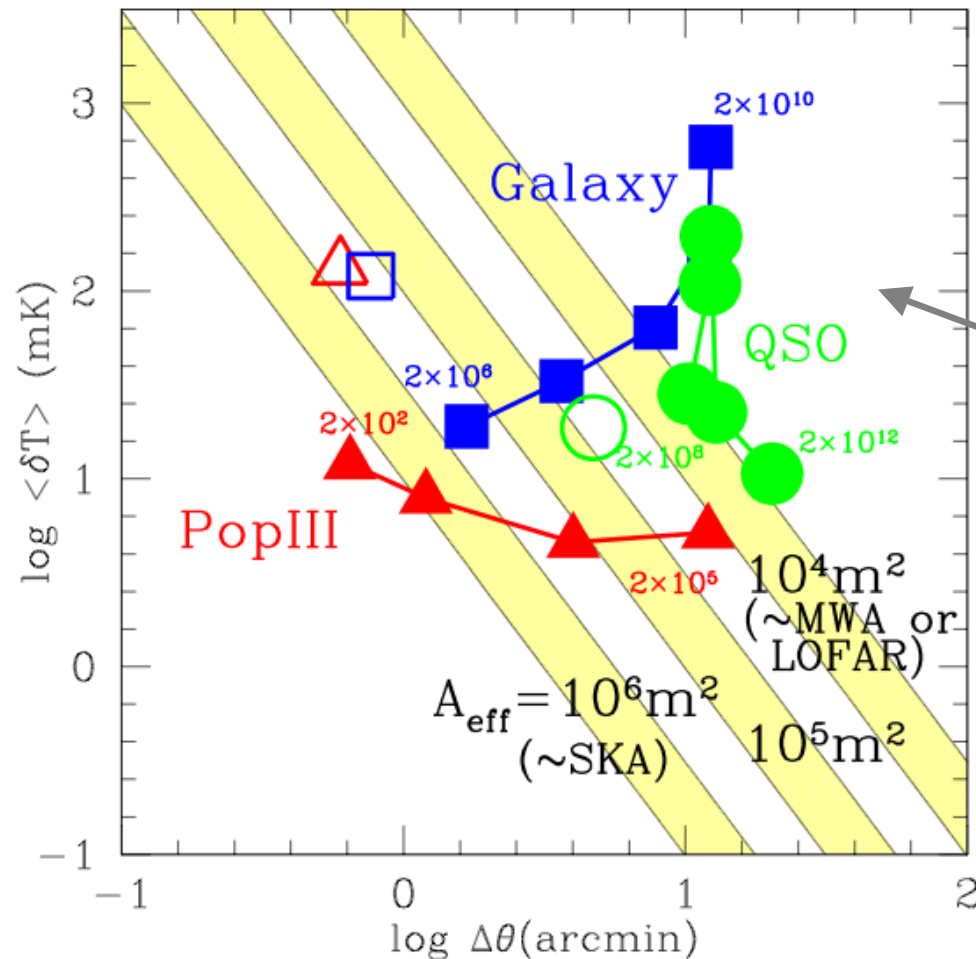


質量依存性



紫外線が低温領域に
伝播出来ずに吸収領
域が小さくなる

Detectability



大質量銀河、クエーサー周りの
21cm線は 10^4 m^2 クラスの
望遠鏡でも検出可能

初代星はSKAを用いても一
つ一つは分解出来ない

宇宙全体の平均的な進化について

モデル

*平均的な電離度 (Barkana&Loeb2001)

$$\frac{dQ_{\text{HII}}}{dt} = \frac{1}{n_{\text{H}}^0} \dot{n}_{\text{Ion}} - \alpha_{\text{B}} C (1+z)^3 n_{\text{H}}^0 Q_{\text{HII}}$$

*温度進化

$$\frac{dT_{\text{HI}}}{dt} = \frac{2}{3k_{\text{B}}n_{\text{H}}} \left[k_{\text{B}}T_{\text{HI}} \frac{dn_{\text{H}}}{dt} + \Gamma_{\text{X}} \right]$$

*超新星爆発によるX線加熱

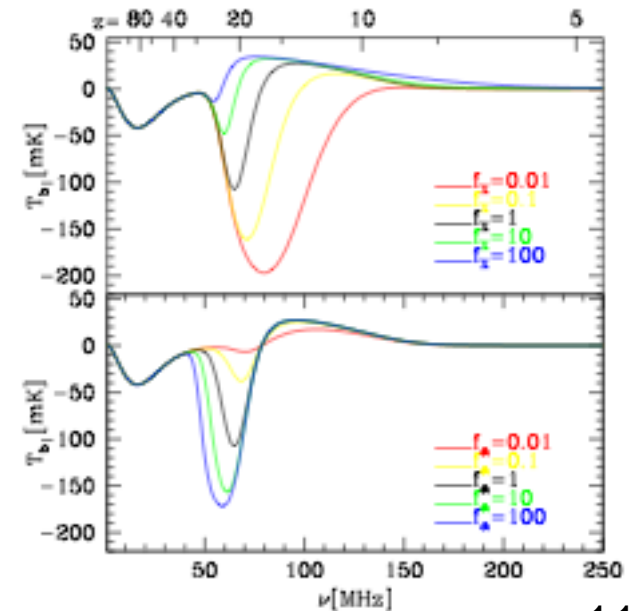
$$L_{\text{X}}^{\text{SNe}} = 1.6 \times 10^{40} f_{\text{e}} \left(\frac{\epsilon_{\text{e}}}{0.05} \frac{v_{\text{SN}}}{0.01 M_{\text{sun}}^{-1}} \frac{E_{\text{SN}}}{10^{51} \text{erg}} \frac{SFR}{1 M_{\text{sun}}/\text{yr}} \right) \text{erg/s}$$

*ライマンアルファ光放射率

$$\epsilon_{\text{Ly}\alpha} = \epsilon_{\text{Rec}}^{\text{ISM}} + \epsilon_{\text{Rec}}^{\text{IGM}} + \epsilon_{\text{cont}}^{\text{Star}}$$

先行研究

Pritchard&Loeb(2010)



星形成史

- Kistler+2013 (GRBより)
- 銀河観測より:
- ▲ Bouwens+2012
- Oesch+2013,2014
- Zheng+2012; Coe+2013

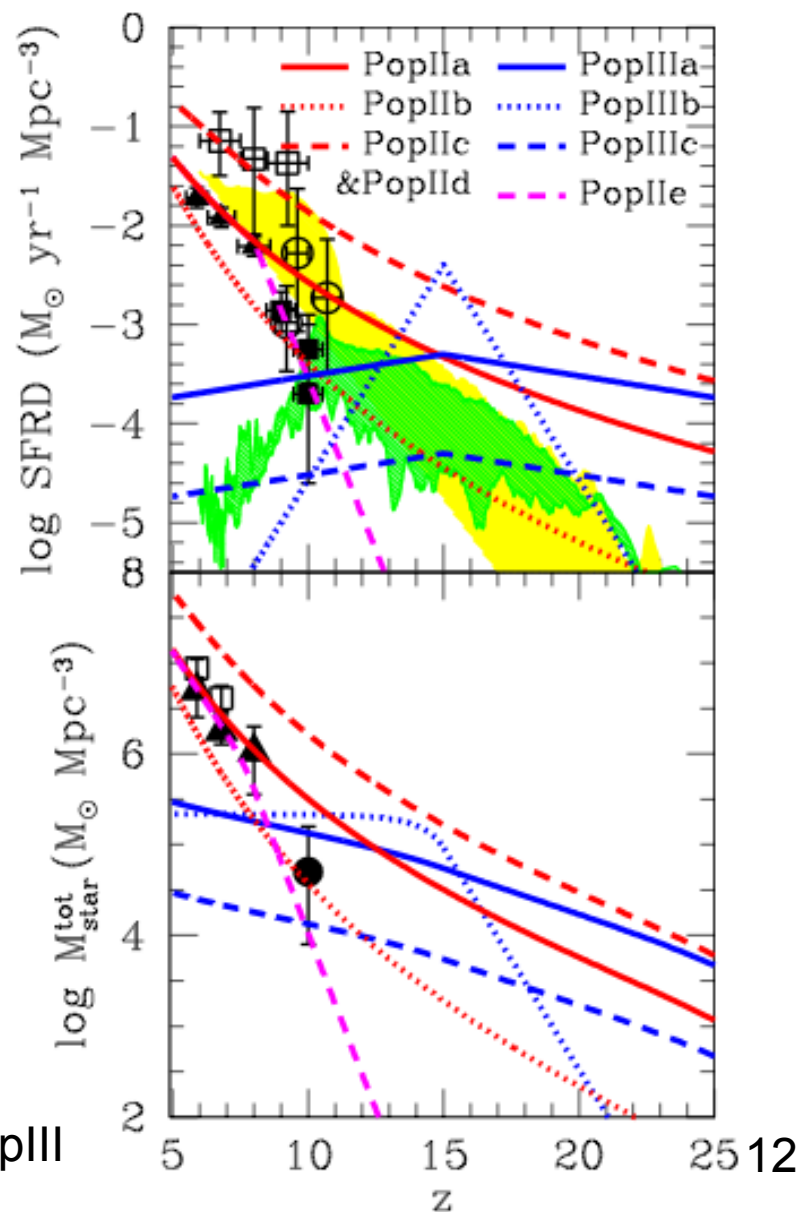
観測に対するフィッティング

$$\dot{M}_{\text{PopII}} = \frac{(a+bz)h}{\left[1+\left(\frac{z}{c}\right)^d\right]} M_{\text{sun}} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3} \quad (\text{Bouwens+2011})$$

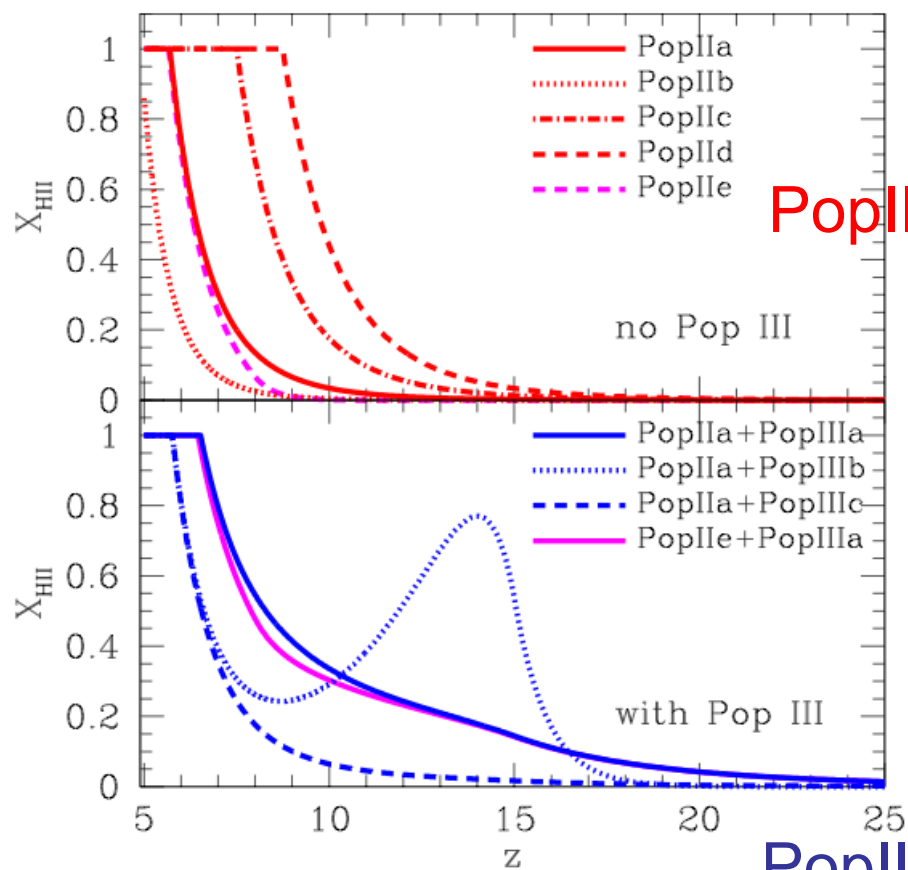
$$\dot{M}_{\text{PopIII}} = A \times \exp(-|z-15|/B) M_{\text{sun}} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$$

(a-d, A,B: パラメータ)

IMF: $0.1-100M_{\text{sun}}$ for PopII, $10-500M_{\text{sun}}$ for PopIII

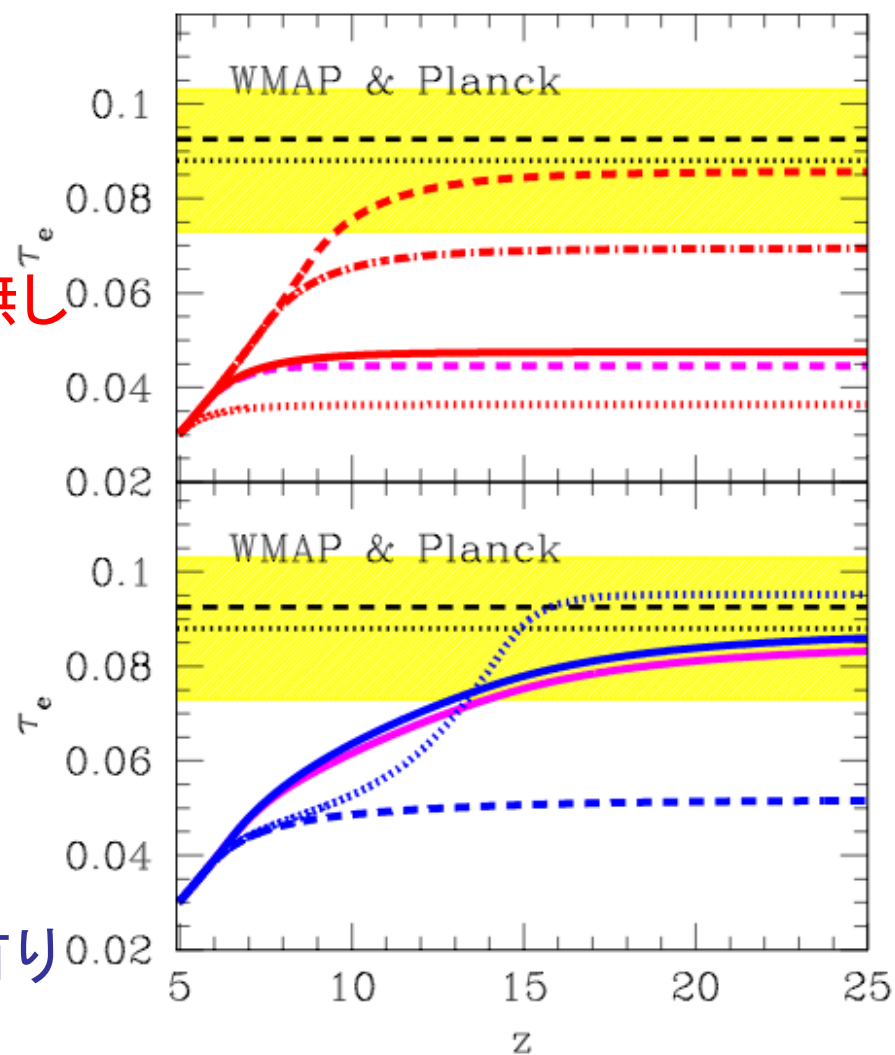


再電離史

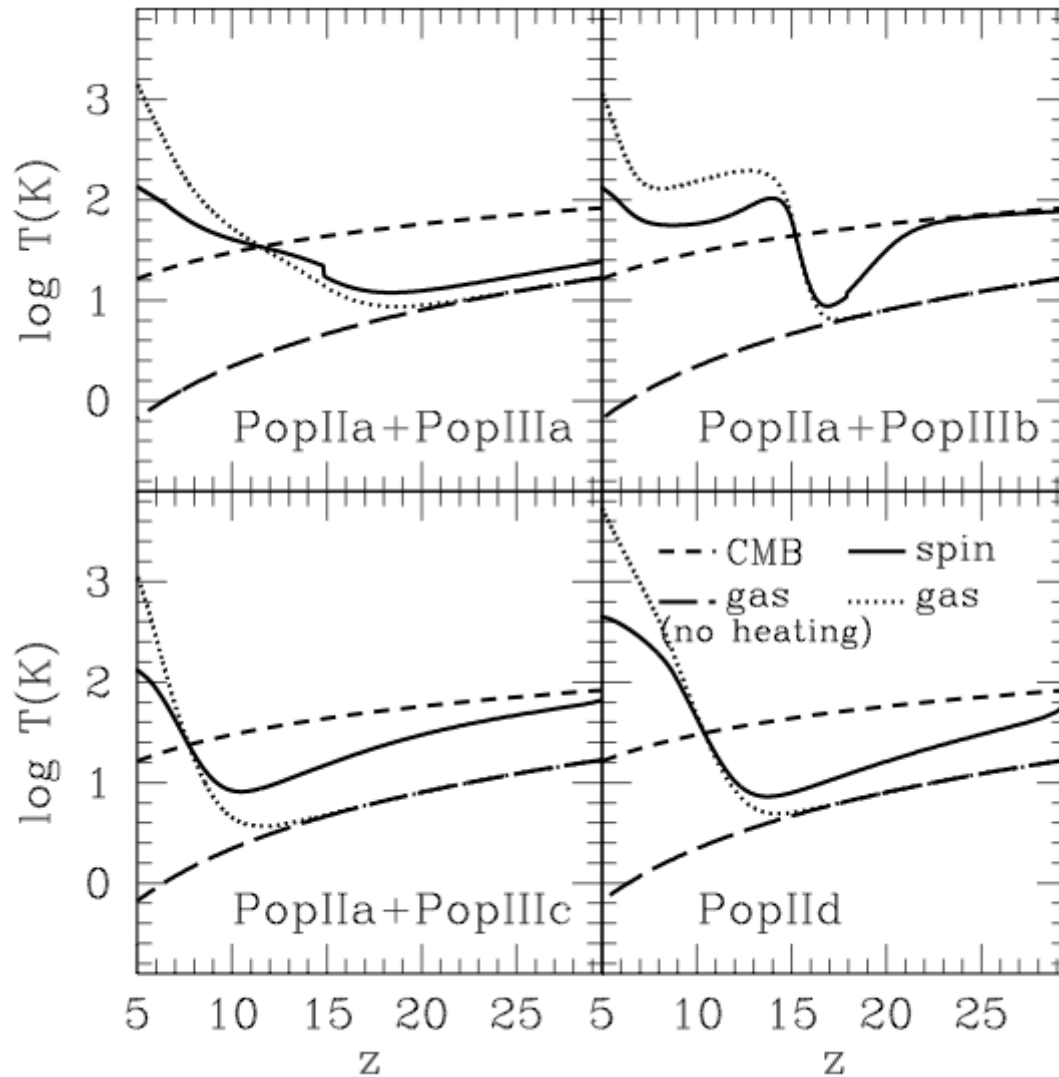


PopIII無し

PopIII有り



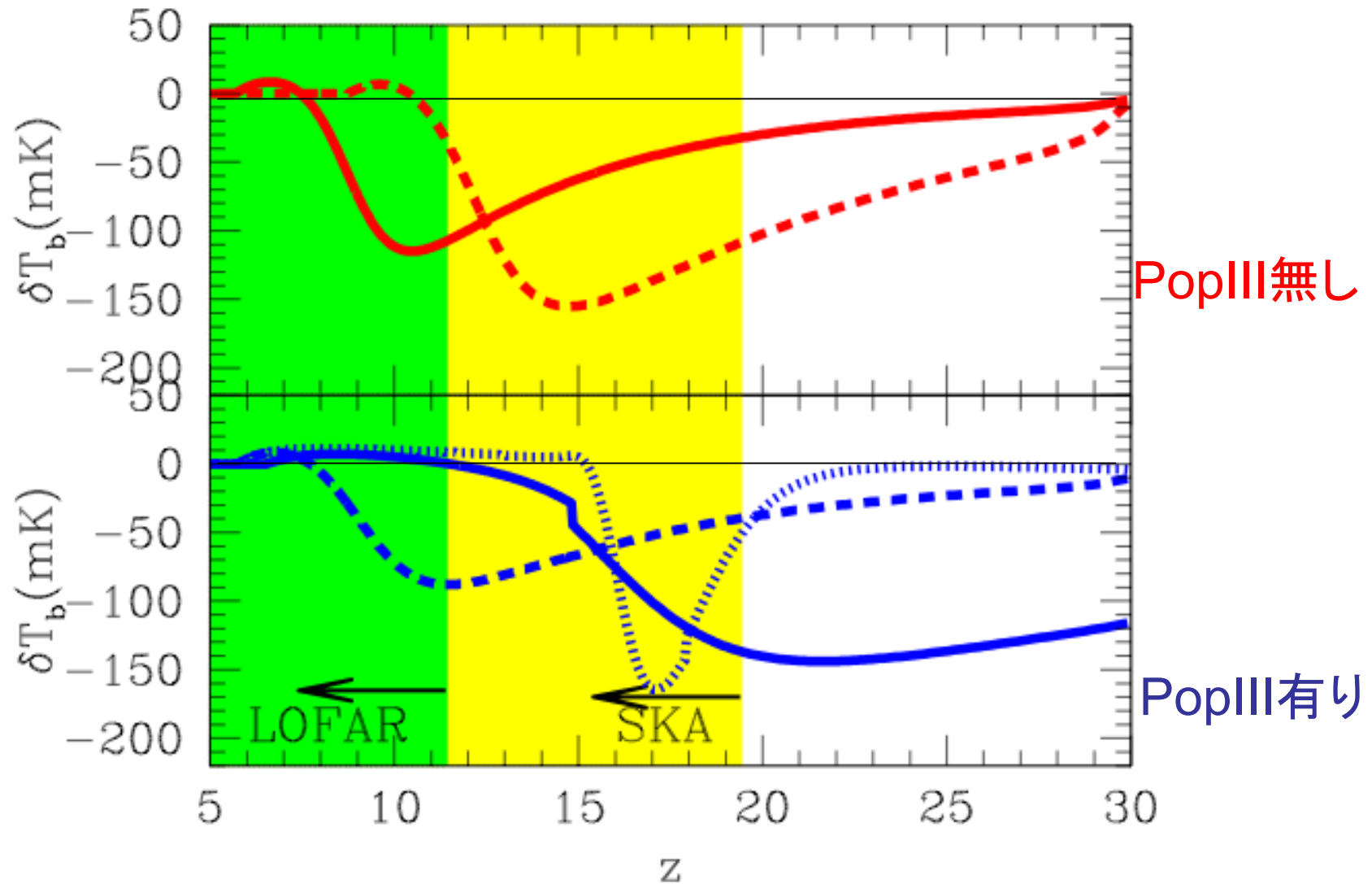
スピン温度史



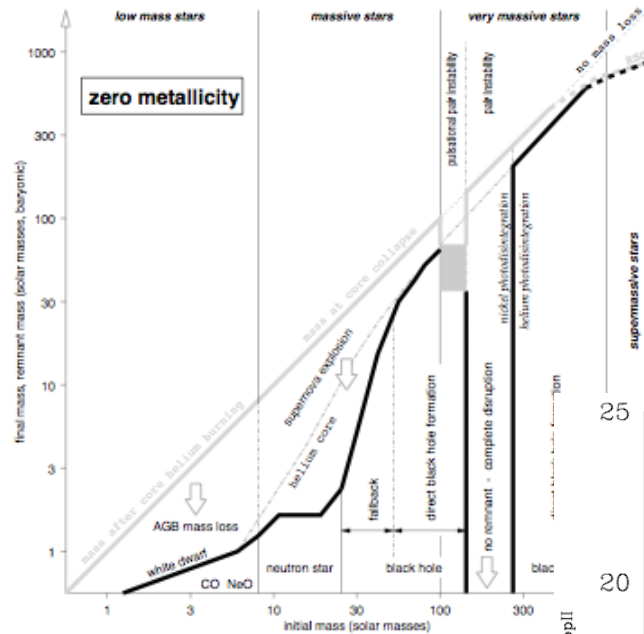
星形成が大きくなっていくと、ガス温度がCMBを超え、ライマンアルファ散乱でスピン温度もCMB温度から外れていく
 → 21cmシグナルはポジティブへ

- スピン温度
- ガス温度
- — ガス温度(加熱無し)
- — — CMB温度

21cm線シグナル

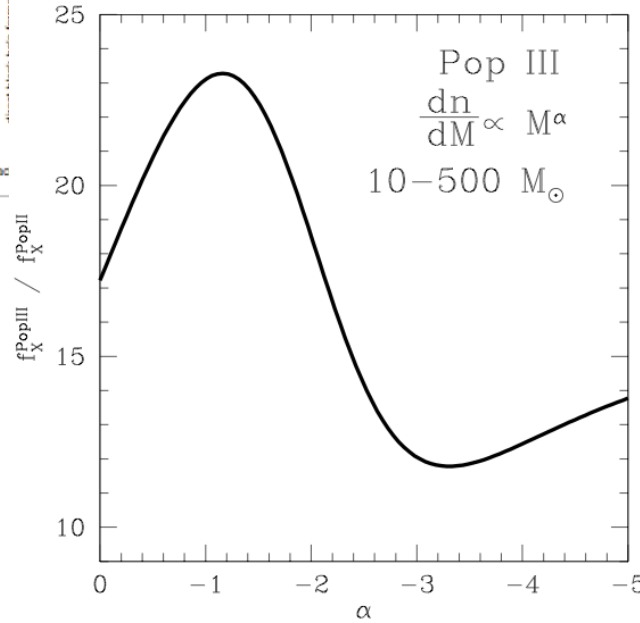


初代星IMFへの依存性

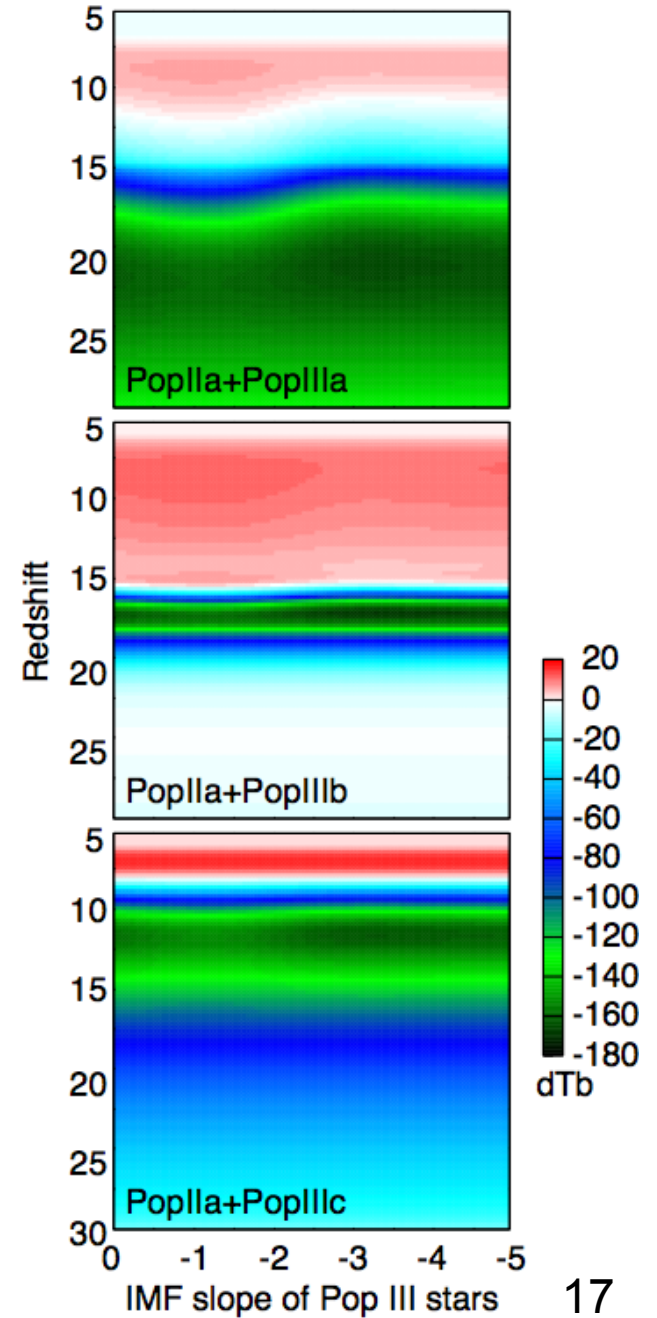


Heger+2002

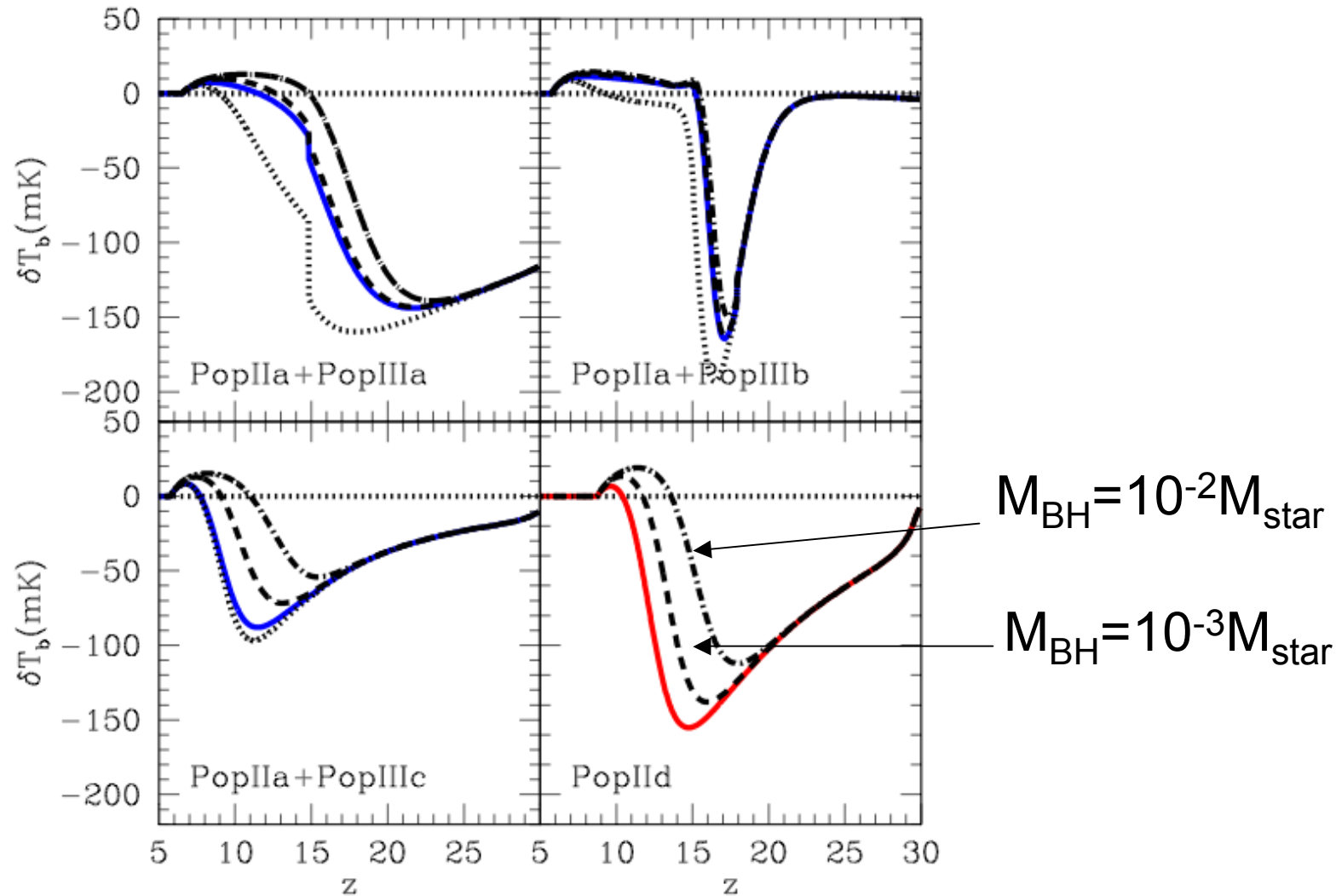
電離光子数は変わらないが、X線加熱率はIMFによって変わる



21cm線シグナルはあまりIMFによらない



ブラックホールを入れてみる



まとめ

初代星、銀河、クエーサー周りの21cm線の構造を1次元球対称モデルで調べた

初代星、クエーサーはhigh-energy photonによりポジティブシグナルのリング構造が作られる、銀河の場合はネガティブシグナル領域が広がる

SKAやLOFARによって大質量銀河、クエーサー周りの21cm線リング構造が検出されるかも

宇宙全体の平均的な電離史、21cm線シグナルは、初代星星形成率が極端に大きい場合、小さい場合はSKAによる観測で区別出来る

初代星の初期質量関数に対する依存性は大きくない