

ミニワークショップ：21cm線によるサイエンス

開催場所: 名古屋大学 ES総合館6F (ES635) & Zoom

開催趣旨

中性水素21cm線によるサイエンスはこの10年で大きく進展した。MWAやLOFARの先行研究に加え、HERAによるパワースペクトル観測から、21cm線による遠方宇宙の探査が本格化している。さらに、2018年にEDGESで報告された吸収線の結果はいまだに議論が続いており、さまざまな理論モデルの提案や、追観測の実験が活発に行われている。また、今後5~10年で21cm線によるサイエンスは質的な転換期を迎えるだろう。例えば、SKA1 Lowの建設は順調に進んでおり、高感度な21cm線の観測がこれから5年程度で開始される予定である。さらに、近年では、宇宙開発の活発化に伴って、月面に展開するアンテナ群による極低周波での21cm線の観測が構想されるなど、21cm線の観測は今後ますますの発展が見込まれる。そこで、未来の21cm線研究に参画できるように、若手を中心に21cm線によるサイエンスを議論する場を設け、将来のさまざまな観測を見据えた議論を行いたい。本ミニワークショップでは装置や赤方偏移を限定せず、さまざまな21cm線に関わる観測・理論の発表を通して、参加者同士の活発な議論が行われることを期待する。また、進行中の研究についての講演でもアイデアベースの講演でも歓迎する。

本ワークショップでは将来の月面天文台やSKA1 Lowによる21cm線観測を見据え、観測の現状や将来の展望を議論するセッションを設ける。当該分野の重要論文を共有し、ざっくばらんに議論したい。

暗黒時代グローバルシグナルを用いた宇宙論パラメータ推定に向けて



箕田鉄兵 (University of Melbourne)

吉浦伸太郎（国立天文台） 高橋智（佐賀大） 山内大介（神奈川大学）

スピン温度と水素ガスの物理状態

スピン温度 T_{spin} を決定する物理量:

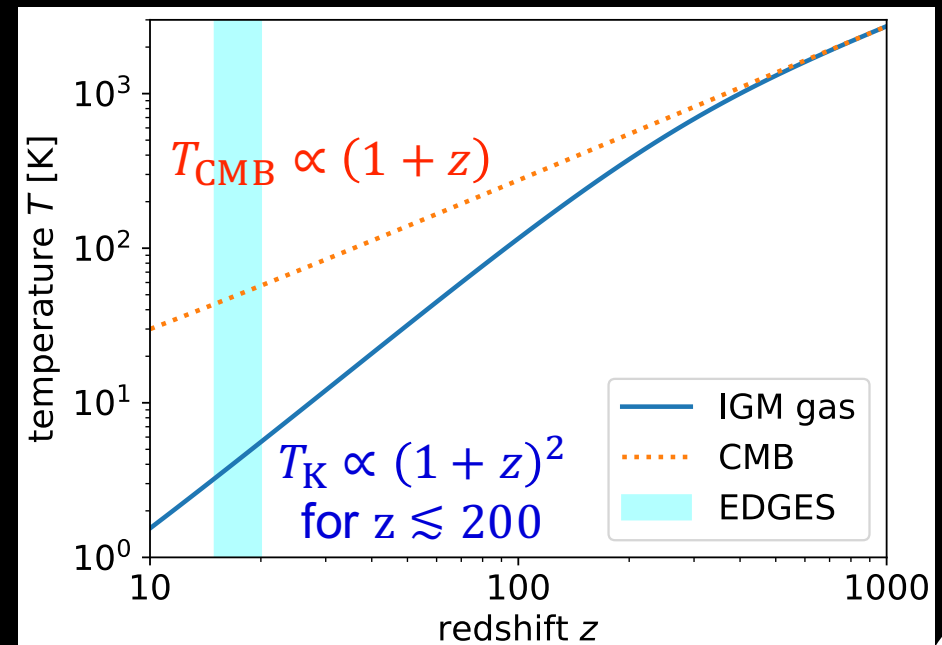
- ガスの(運動学的な)温度 T_K
- CMBの温度 T_{CMB}

主要な物理過程:

- ガス同士の衝突
- Ly- α 光子とガスの相互作用
- CMB光子とガスの相互作用

形式的に

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



スピン温度と水素の物理状態

スピン温度の進化史

1. CMBが脱結合

2. ガス同士の衝突

$$T_K \cong T_{\text{spin}} \leq T_{\text{CMB}}$$

3. CMBによる励起

$$T_K < T_{\text{spin}} < T_{\text{CMB}}$$

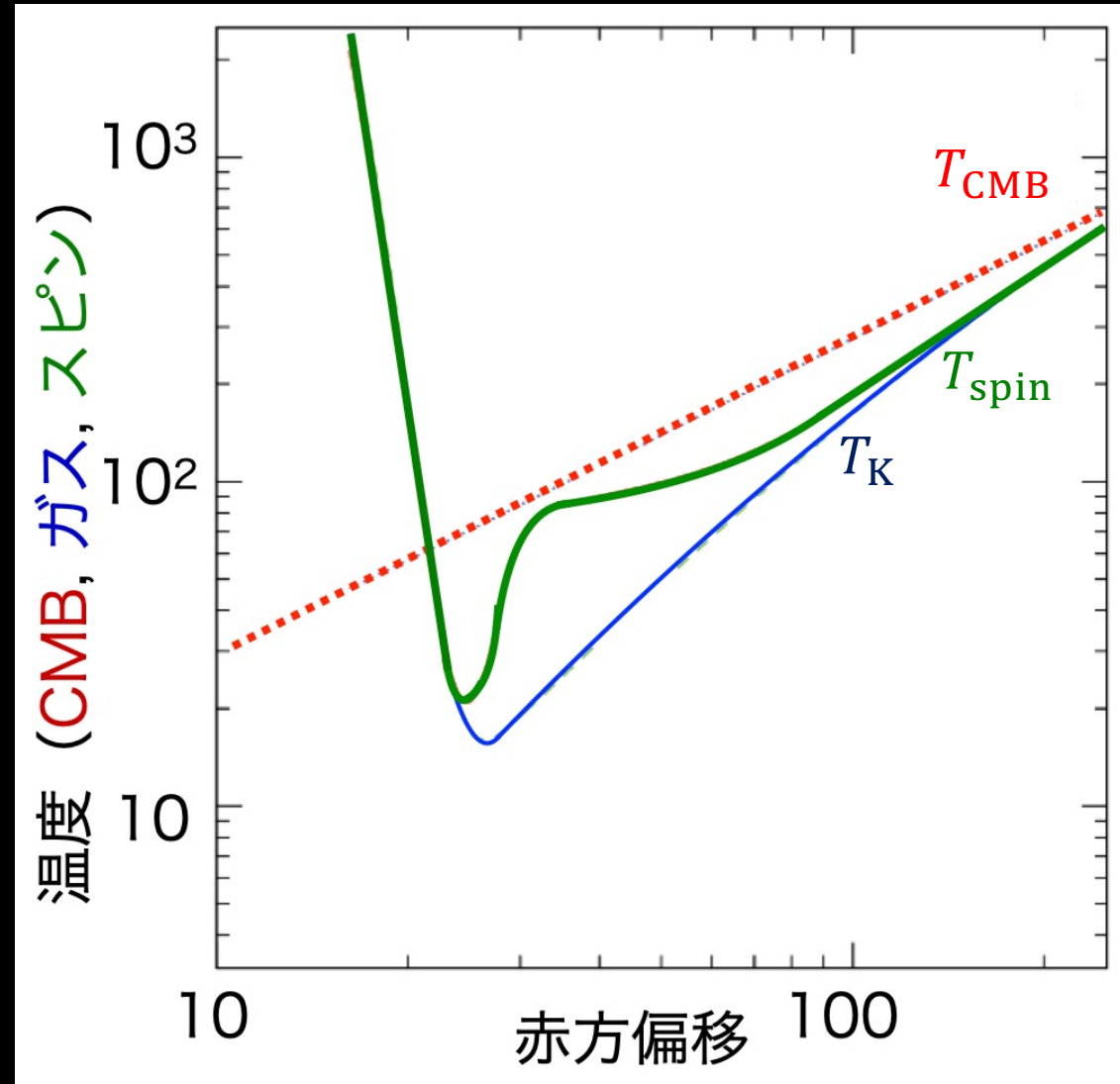
4. 初代星由来のLy α

$$T_K \leq T_{\text{spin}} < T_{\text{CMB}}$$

5. 紫外線、X線加熱

6. 再電離

$$T_K \cong T_{\text{spin}} > T_{\text{CMB}}$$



02

スピン温度と水素の物理状態

スピン温度の進化史

1. CMBが脱結合

2. ガス同士の衝突

$$T_K \cong T_{\text{spin}} \leq T_{\text{CMB}}$$

3. CMBによる励起

$$T_K < T_{\text{spin}} < T_{\text{CMB}}$$

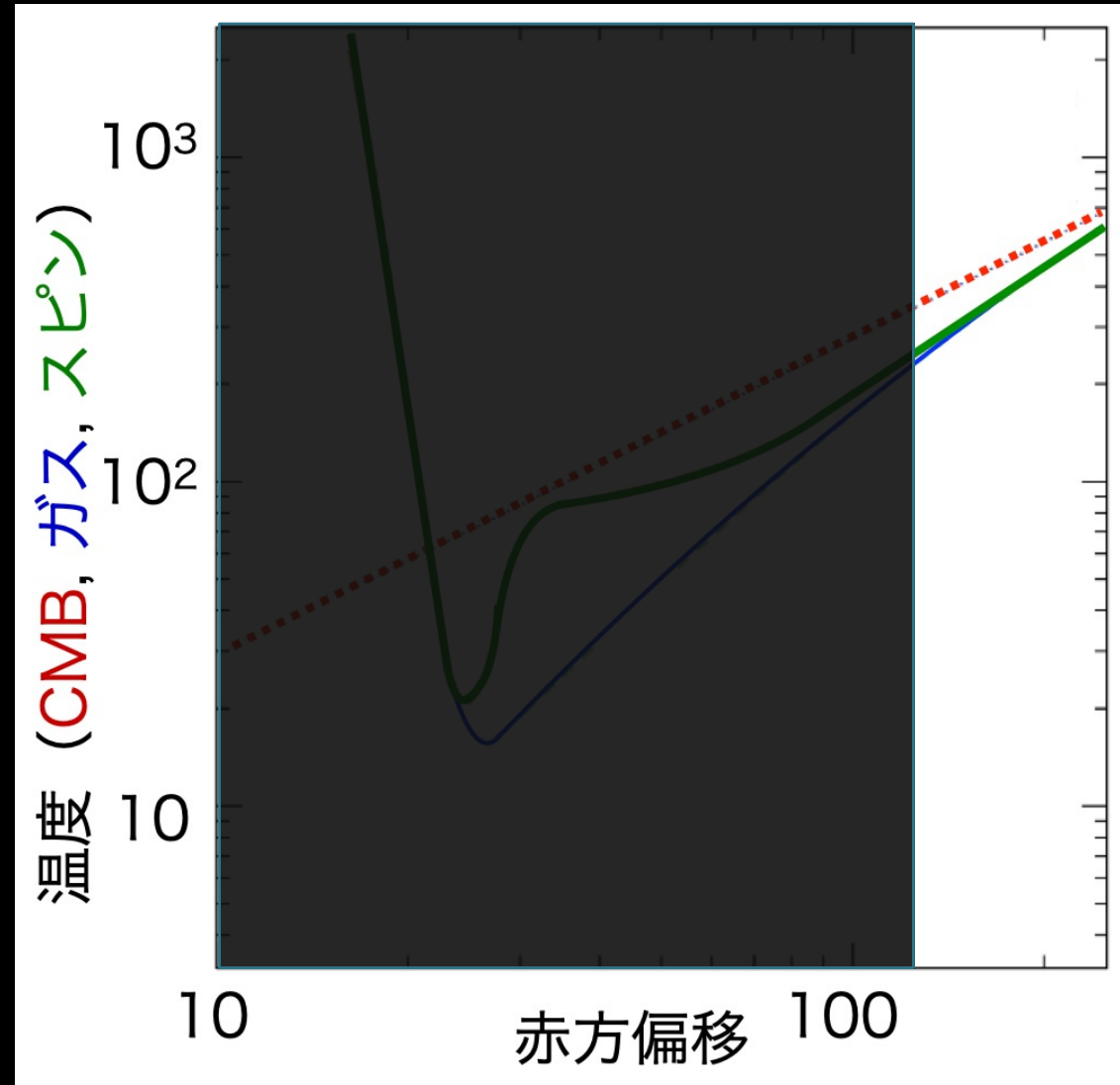
4. 初代星由来のLy α

$$T_K \leq T_{\text{spin}} < T_{\text{CMB}}$$

5. 紫外線、X線加熱

6. 再電離

$$T_K \cong T_{\text{spin}} > T_{\text{CMB}}$$



03

スピン温度と水素の物理状態

スピン温度の進化史

1. CMBが脱結合

2. ガス同士の衝突

$$T_K \cong T_{\text{spin}} \leq T_{\text{CMB}}$$

3. CMBによる励起

$$T_K < T_{\text{spin}} < T_{\text{CMB}}$$

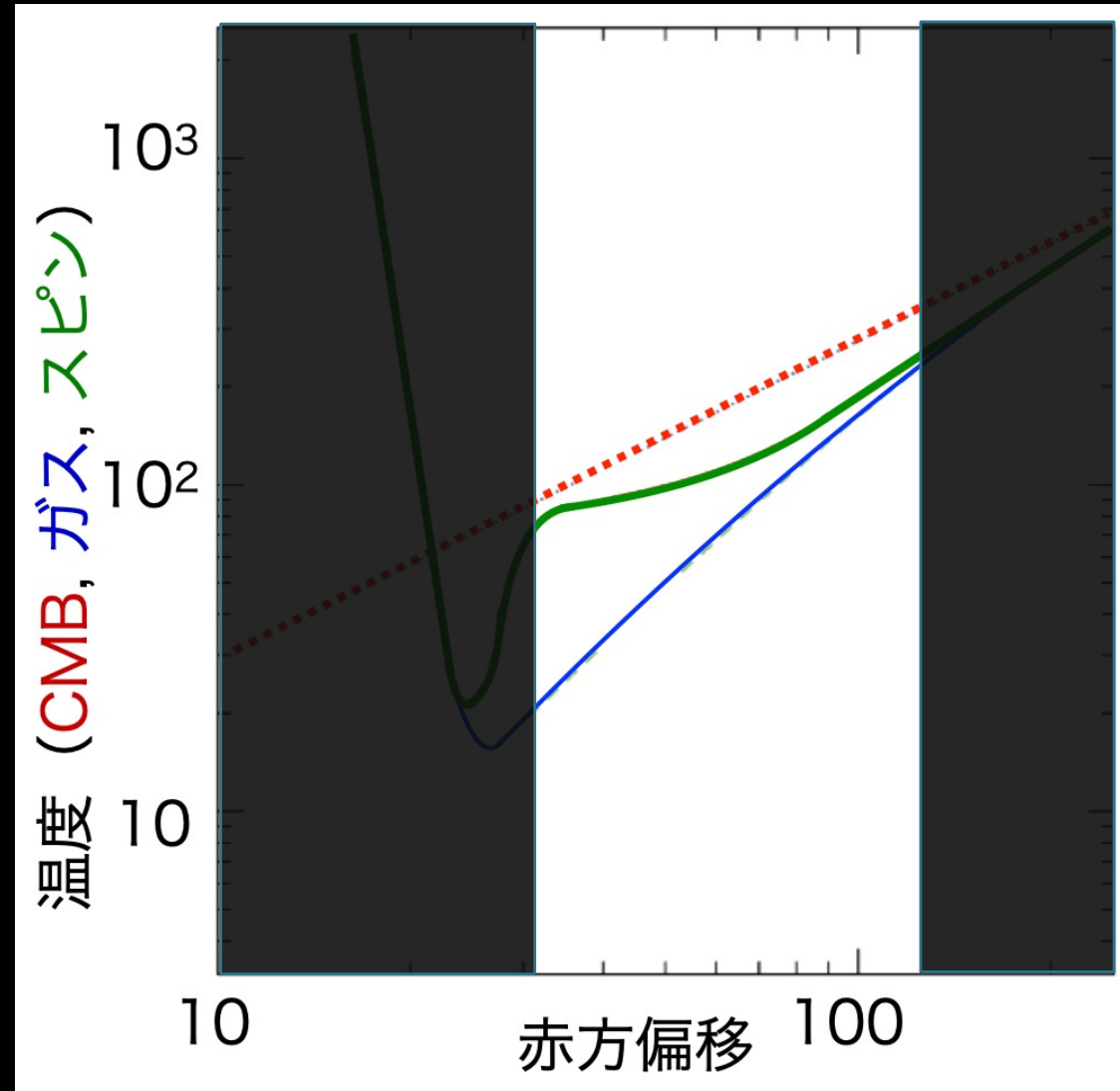
4. 初代星由来のLy α

$$T_K \leq T_{\text{spin}} < T_{\text{CMB}}$$

5. 紫外線、X線加熱

6. 再電離

$$T_K \cong T_{\text{spin}} > T_{\text{CMB}}$$



スピン温度と水素の物理状態

スピン温度の進化史

1. CMBが脱結合

2. ガス同士の衝突

$$T_K \cong T_{\text{spin}} \leq T_{\text{CMB}}$$

3. CMBによる励起

$$T_K < T_{\text{spin}} < T_{\text{CMB}}$$

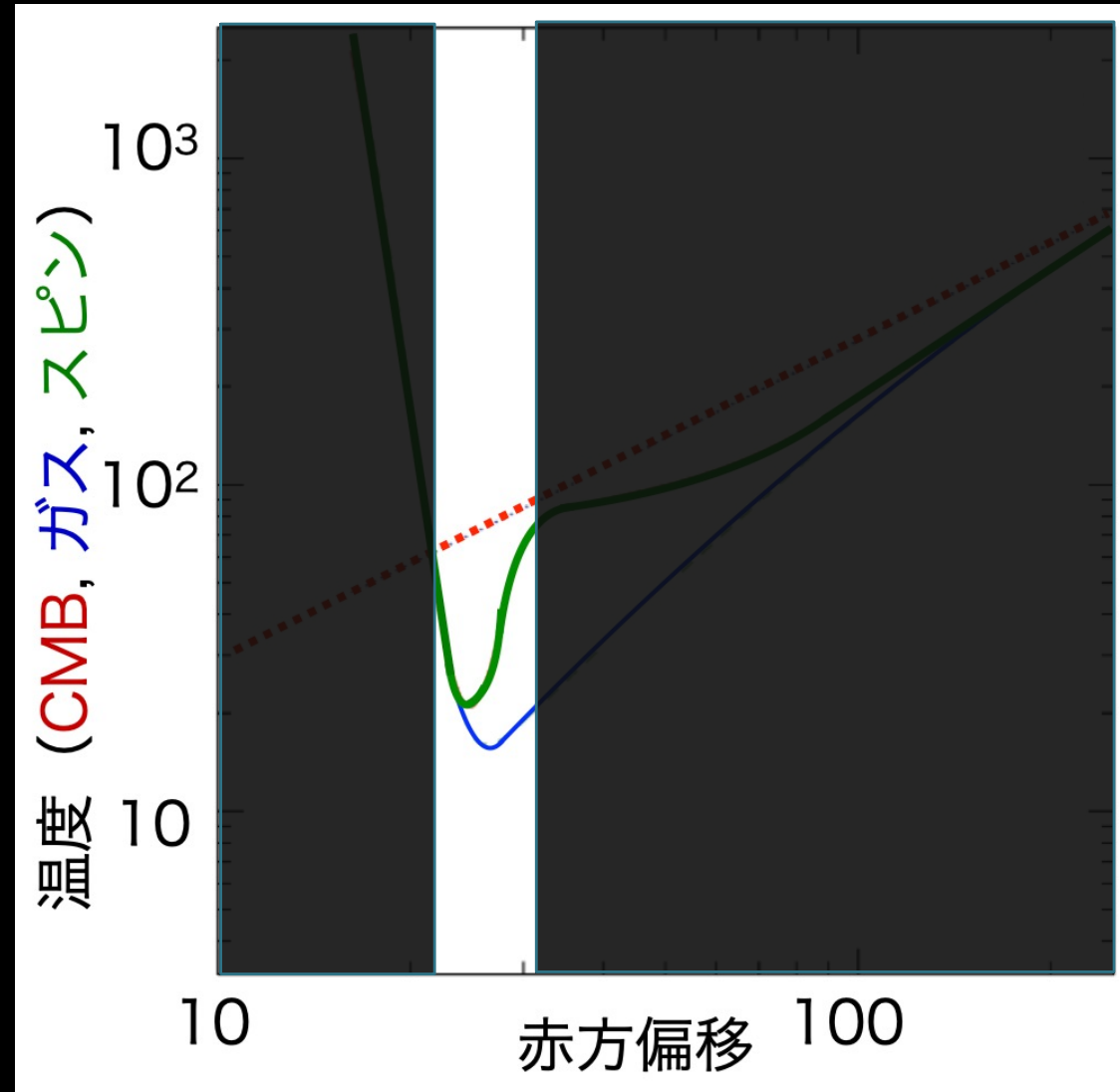
4. 初代星由来のLy α

$$T_K \leq T_{\text{spin}} < T_{\text{CMB}}$$

5. 紫外線、X線加熱

6. 再電離

$$T_K \cong T_{\text{spin}} > T_{\text{CMB}}$$

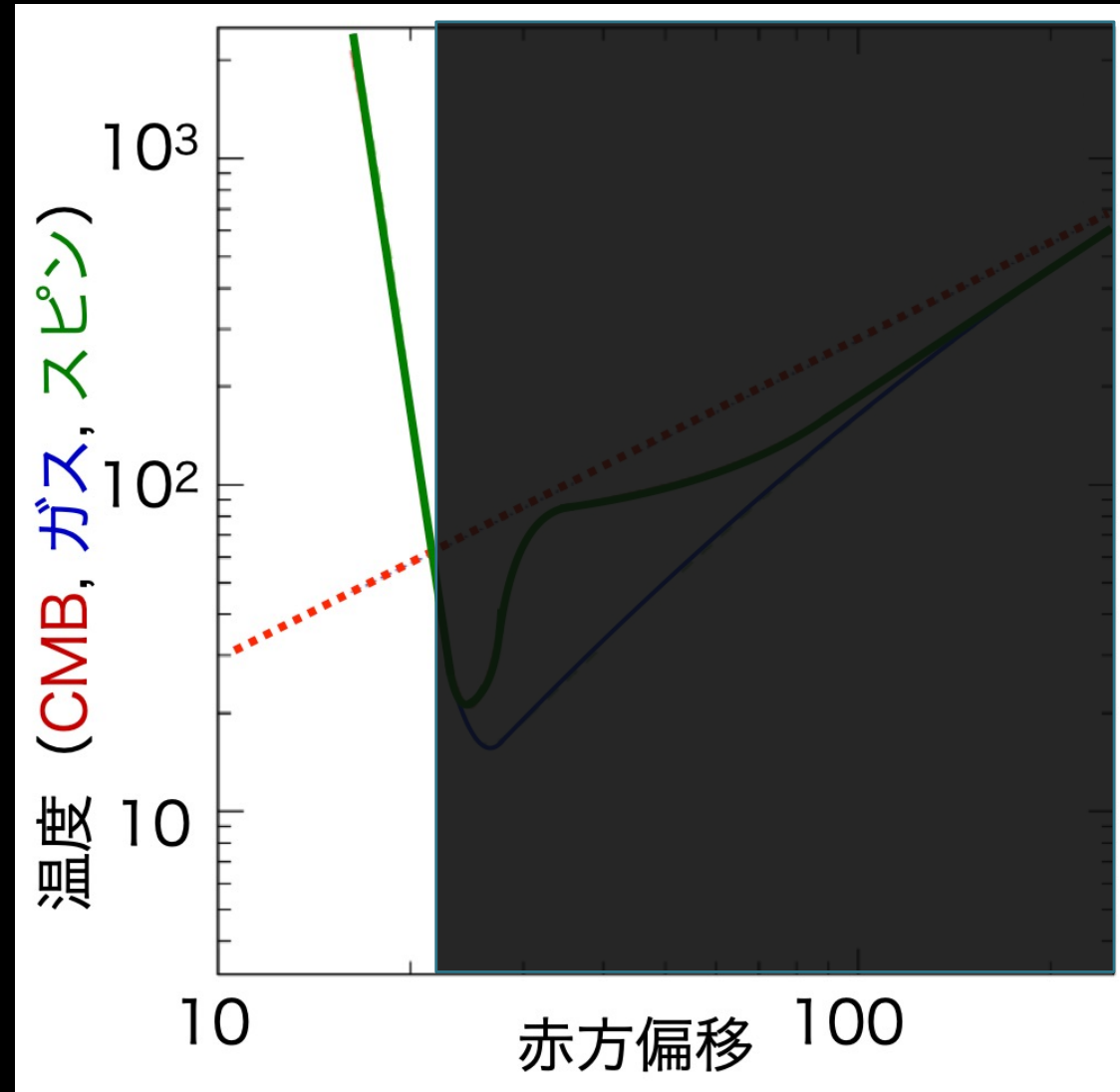


05

スピン温度と水素の物理状態

スピン温度の進化史

1. CMBが脱結合
2. ガス同士の衝突
 $T_K \cong T_{\text{spin}} \leq T_{\text{CMB}}$
3. CMBによる励起
 $T_K < T_{\text{spin}} < T_{\text{CMB}}$
4. 初代星由来のLy α
 $T_K \leq T_{\text{spin}} < T_{\text{CMB}}$
5. 紫外線、X線加熱
6. 再電離
 $T_K \cong T_{\text{spin}} > T_{\text{CMB}}$



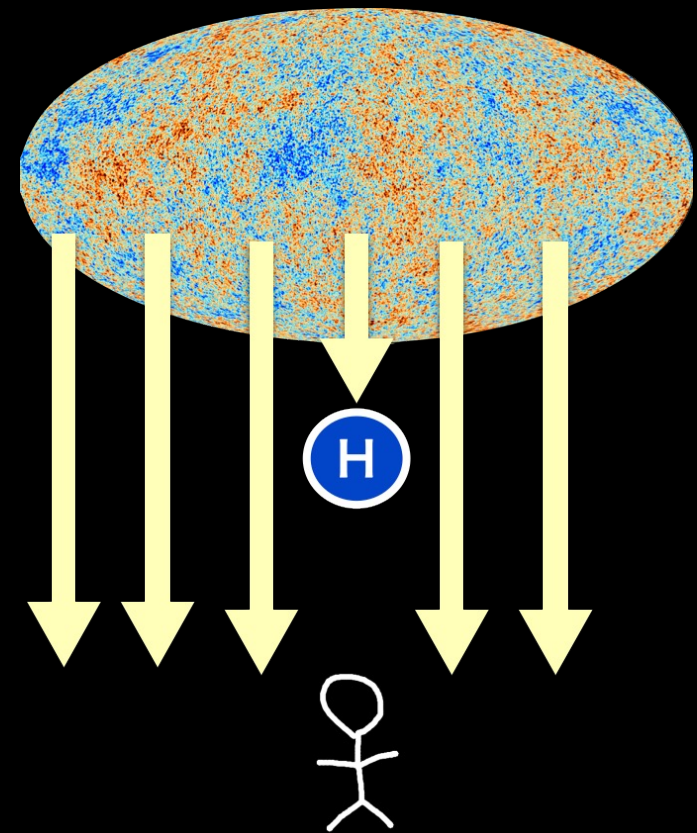
21cm線グローバルシグナル

観測量: 輝度温度

$$\delta T_b \simeq 27 x_{\text{HI}} \left(1 - \frac{T_{\text{CMB}}}{T_{\text{spin}}} \right) \left(\frac{1+z}{10} \right)^{1/2} [\text{mK}]$$

輝線: $T_K \geq T_{\text{spin}} \geq T_{\text{CMB}}$

吸収線: $T_K \leq T_{\text{spin}} \leq T_{\text{CMB}}$



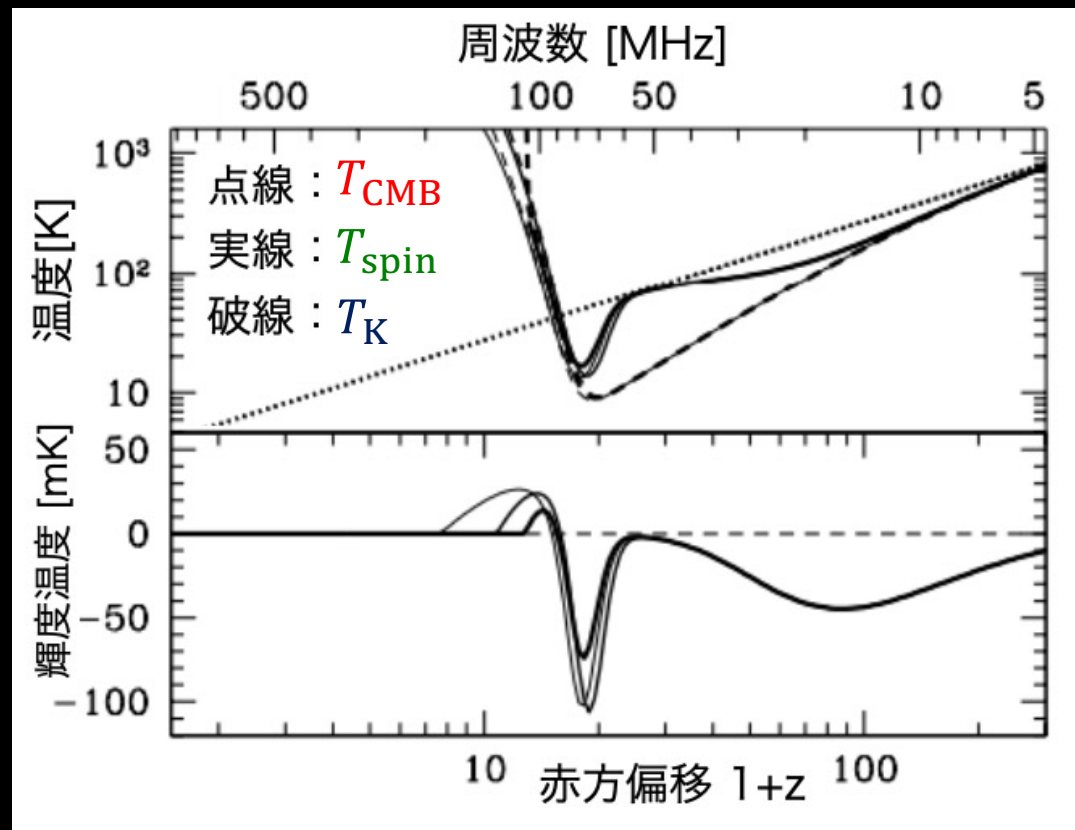
21cm線グローバルシグナル

観測量: 輝度温度

$$\delta T_b \simeq 27 x_{\text{HI}} \left(1 - \frac{T_{\text{CMB}}}{T_{\text{spin}}} \right) \left(\frac{1+z}{10} \right)^{1/2} [\text{mK}]$$

輝線: $T_K \geq T_{\text{spin}} \geq T_{\text{CMB}}$

吸収線: $T_K \leq T_{\text{spin}} \leq T_{\text{CMB}}$



21-cm線グローバルシグナルの理論予測
(Pritchard and Loeb, 2008, PRD, 78, 103511.)

21cm線グローバルシグナル

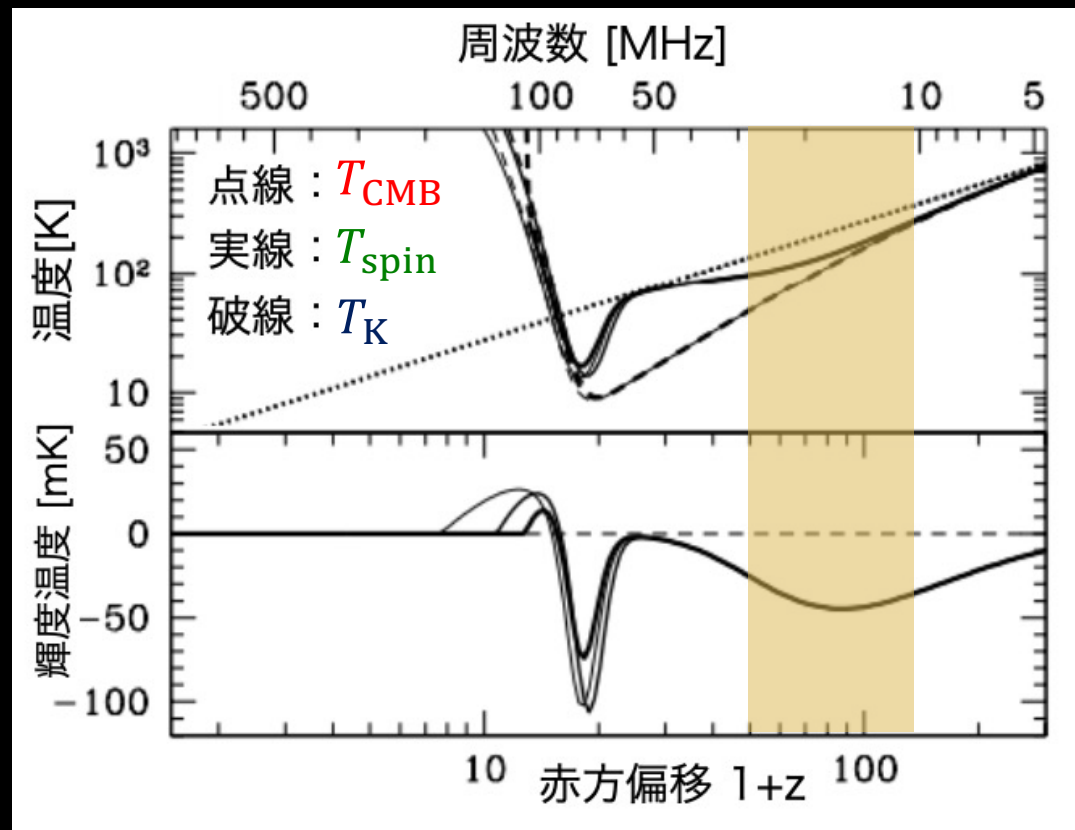
観測量: 輝度温度

$$\delta T_b \simeq 27 x_{\text{HI}} \left(1 - \frac{T_{\text{CMB}}}{T_{\text{spin}}} \right) \left(\frac{1+z}{10} \right)^{1/2} [\text{mK}]$$

輝線: $T_K \geq T_{\text{spin}} \geq T_{\text{CMB}}$

吸収線: $T_K \leq T_{\text{spin}} \leq T_{\text{CMB}}$

赤方偏移 ~ 50 - 150 ,
周波数 ~ 10 - 30 MHzで
吸収線の存在が予測
> 検出はない(暗黒時代)



21-cm線グローバルシグナルの理論予測
(Pritchard and Loeb, 2008, PRD, 78, 103511.)

21cm線グローバルシグナル

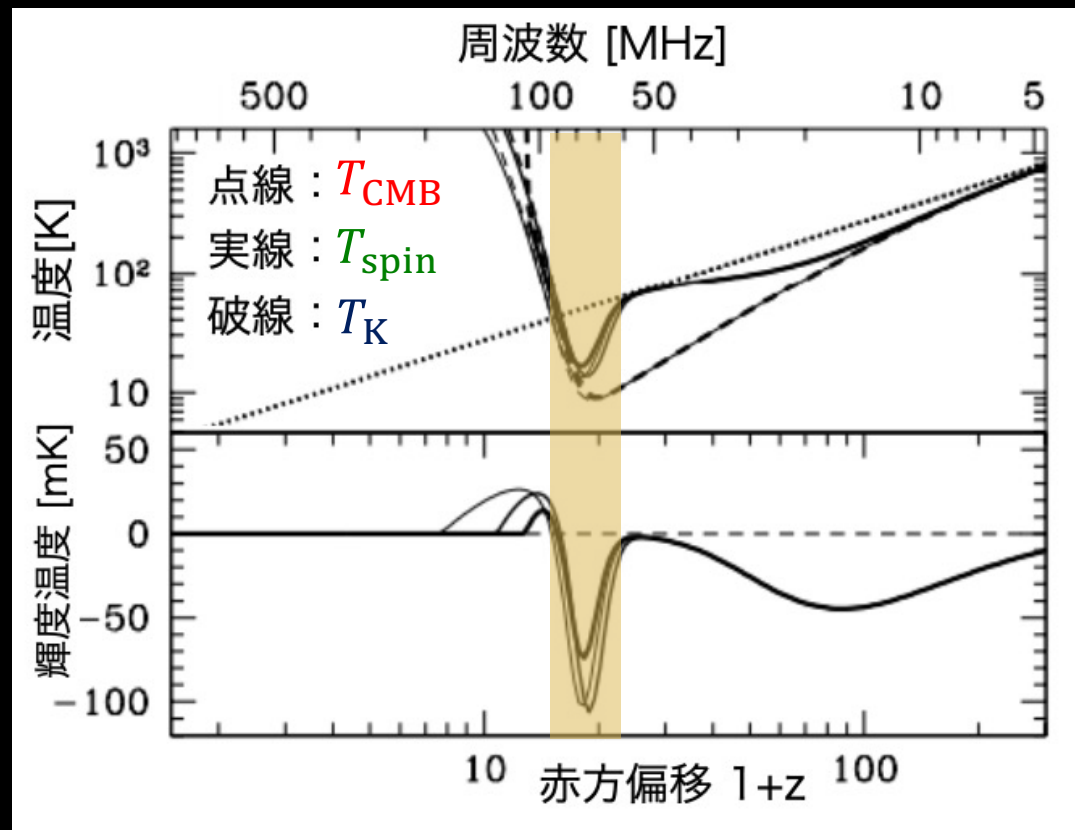
観測量: 輝度温度

$$\delta T_b \simeq 27 x_{\text{HI}} \left(1 - \frac{T_{\text{CMB}}}{T_{\text{spin}}} \right) \left(\frac{1+z}{10} \right)^{1/2} [\text{mK}]$$

輝線: $T_K \geq T_{\text{spin}} \geq T_{\text{CMB}}$

吸収線: $T_K \leq T_{\text{spin}} \leq T_{\text{CMB}}$

赤方偏移 ~ 20 ,
周波数 ~ 80 MHzで
強い吸収線の存在が示唆
> 実際に検出が報告?

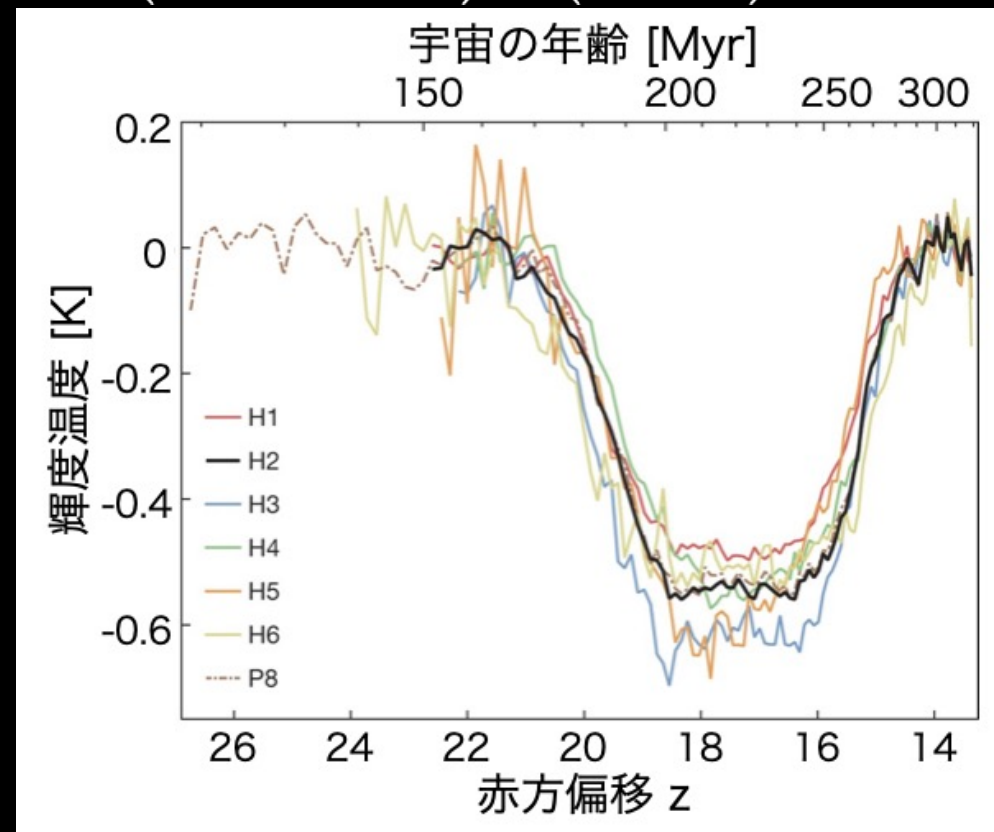


21-cm線グローバルシグナルの理論予測
(Pritchard and Loeb, 2008, PRD, 78, 103511.)

21cm線グローバルシグナル

観測量: 輝度温度

$$\delta T_b \simeq 27 x_{\text{HI}} \left(1 - \frac{T_{\text{CMB}}}{T_{\text{spin}}} \right) \left(\frac{1+z}{10} \right)^{1/2} [\text{mK}]$$



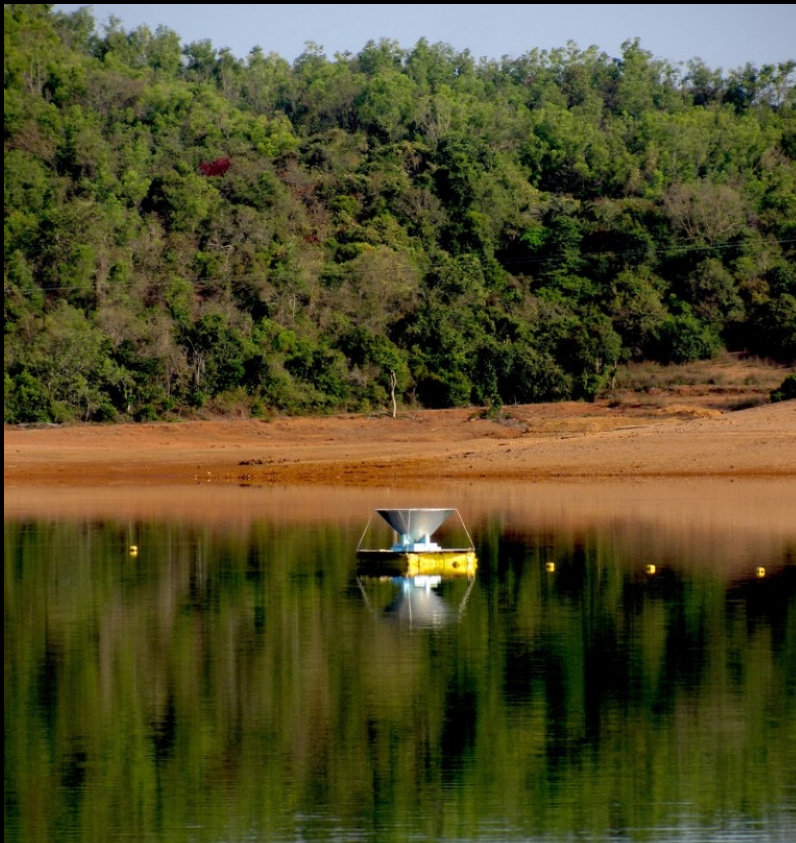
Experiment to Detect the Global EoR Signature
(EDGES, <https://www.colorado.edu/>)

報告された21-cm線グローバルシグナル
(Bowman et al., 2018 Nature, 555, 67)

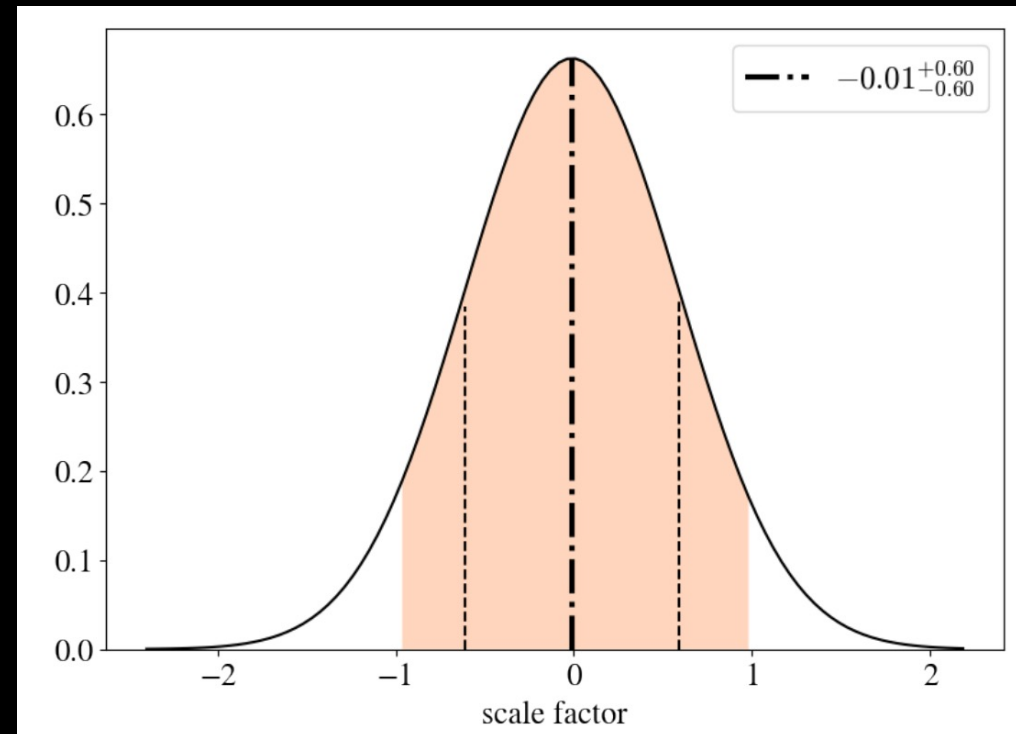
21cm線グローバルシグナル

観測量: 輝度温度

$$\delta T_b \simeq 27 x_{\text{HI}} \left(1 - \frac{T_{\text{CMB}}}{T_{\text{spin}}} \right) \left(\frac{1+z}{10} \right)^{1/2} [\text{mK}]$$



Credit: Ravi Subrahmanyan



SARAS 3で与えた吸収線の深さに対する制限
(Singh et al. 2022, Nature Astronomy, 6, 607)

小まとめ

- ✓ 21cm線グローバルシグナルとして、暗黒時代($z \sim 100$)とCosmic Dawn ($z \sim 20$)の2種類の吸収線が期待される
- ✓ 暗黒時代の方は観測例がない(地上観測は困難、月面天文台?)
- ✓ Cosmic Dawnは観測例が少なく、結果も食い違っている(解析手法に大きく依存しそう、c.f.)
- ✓ いずれにせよ将来観測が熱望される
=> 暗黒時代のグローバルシグナルから宇宙論の制限へ?

IGMの温度進化

$$\frac{dT_{\text{gas}}}{dt} = \frac{x_e}{1+x_e} \frac{8\rho_{\text{CMB}}\sigma_{\text{T}}}{3m_e c} (T_{\text{CMB}} - T_{\text{gas}}) - 2HT_{\text{gas}}$$

Compton散乱による効果

宇宙膨張

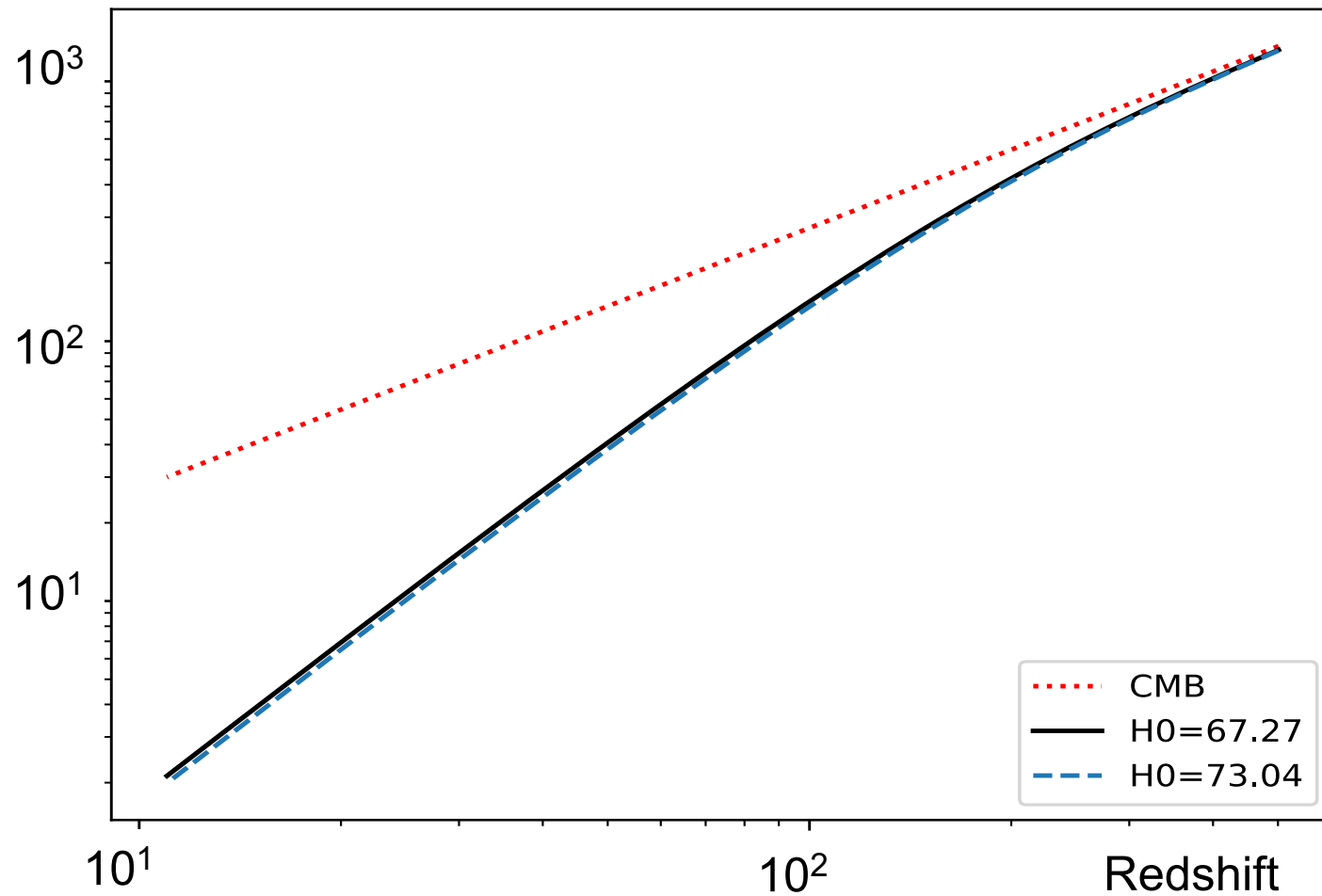
$$T_{\text{spin}}^{-1} = \frac{T_{\text{CMB}}^{-1} + (x_{\alpha} + x_c)T_K^{-1}}{1 + x_{\alpha} + x_c}$$

暗黒時代であれば
Ly α 係数は無視できる

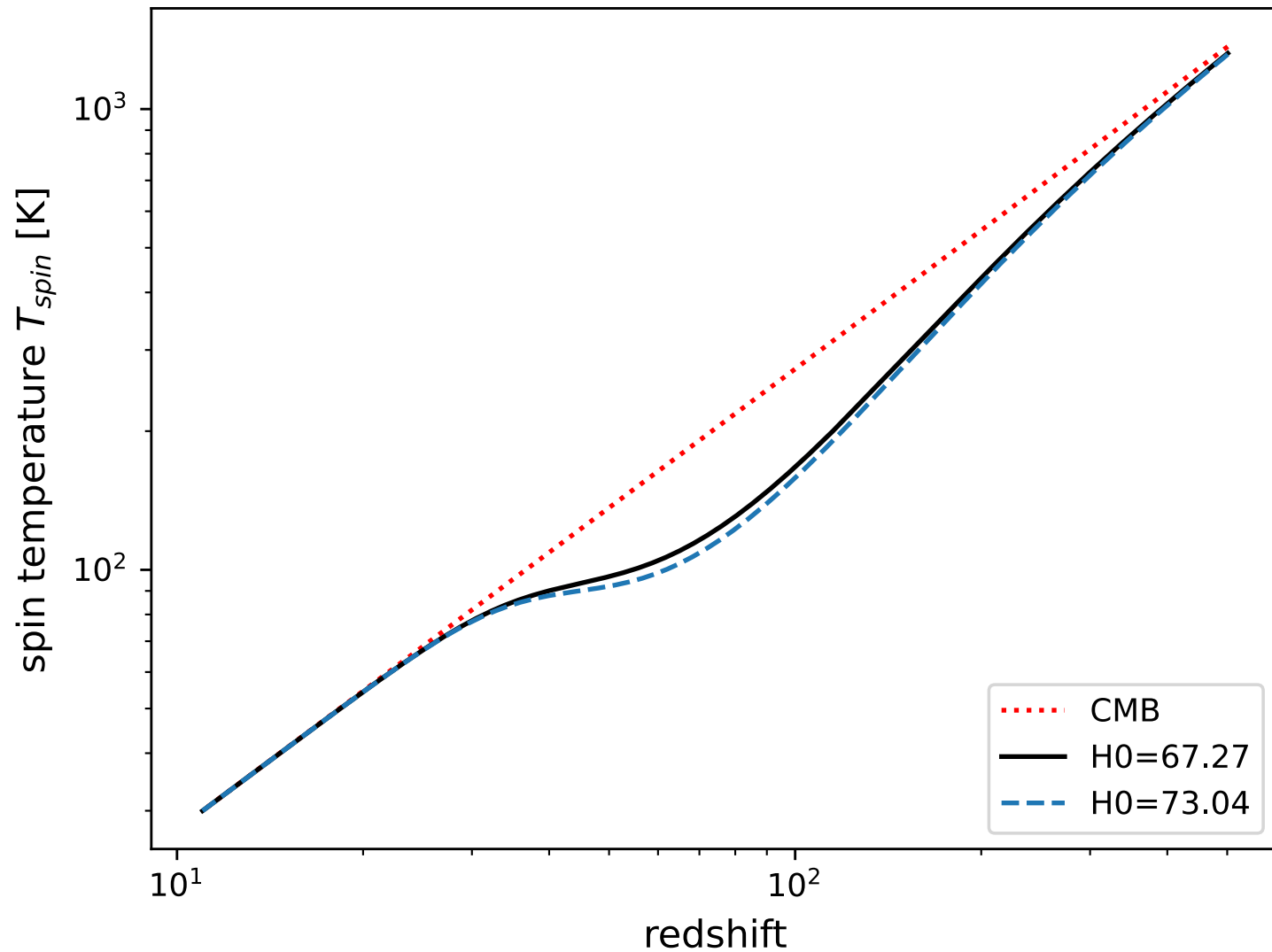
$$x_c = \frac{0.0628 \text{ K}}{A_{10}T_{\text{CMB}}} \left[n_{\text{HI}}\kappa_{1-0}^{\text{HH}}(T_K) + n_e\kappa_{1-0}^{\text{eH}}(T_K) + n_p\kappa_{1-0}^{\text{pH}}(T_K) \right]$$

宇宙論パラメータの依存性

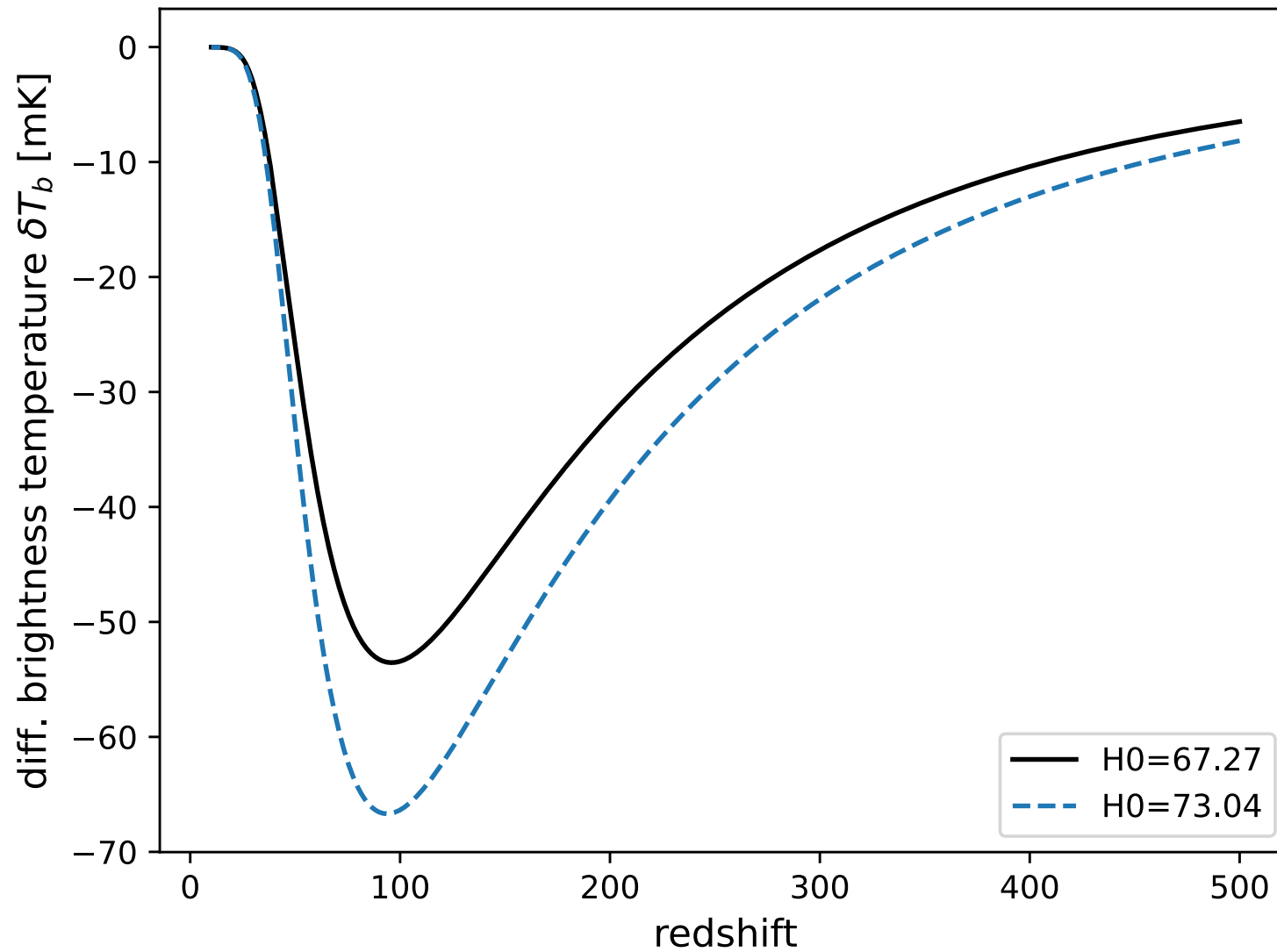
Temperature [K]



宇宙論パラメータの依存性



宇宙論パラメータの依存性



IGMの電離度進化

$$\frac{dT_{\text{gas}}}{dt} = \frac{x_e}{1+x_e} \frac{8\rho_{\text{CMB}}\sigma_{\text{T}}}{3m_e c} (T_{\text{CMB}} - T_{\text{gas}}) - 2HT_{\text{gas}}$$

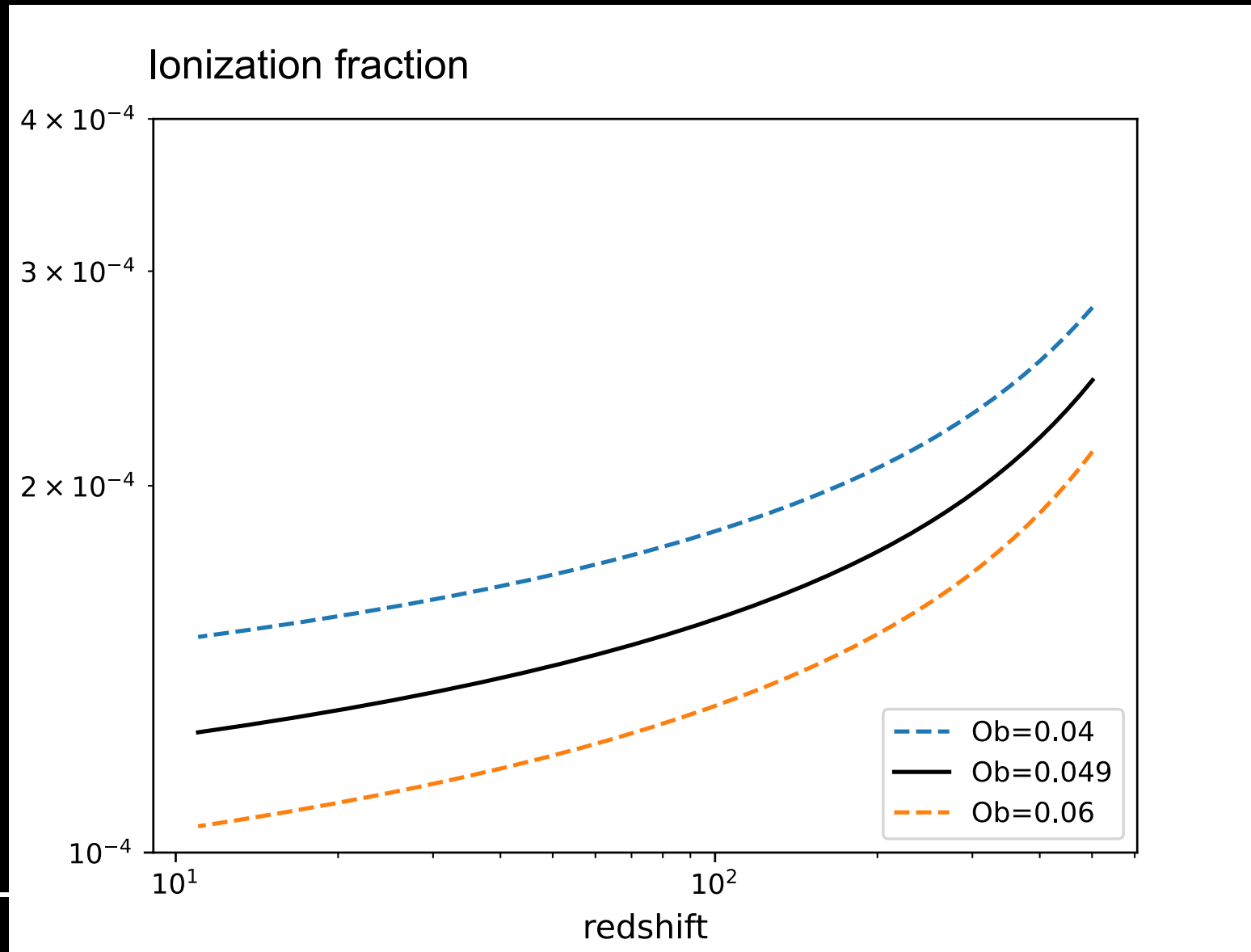
衝突再結合

CMBによる光電離

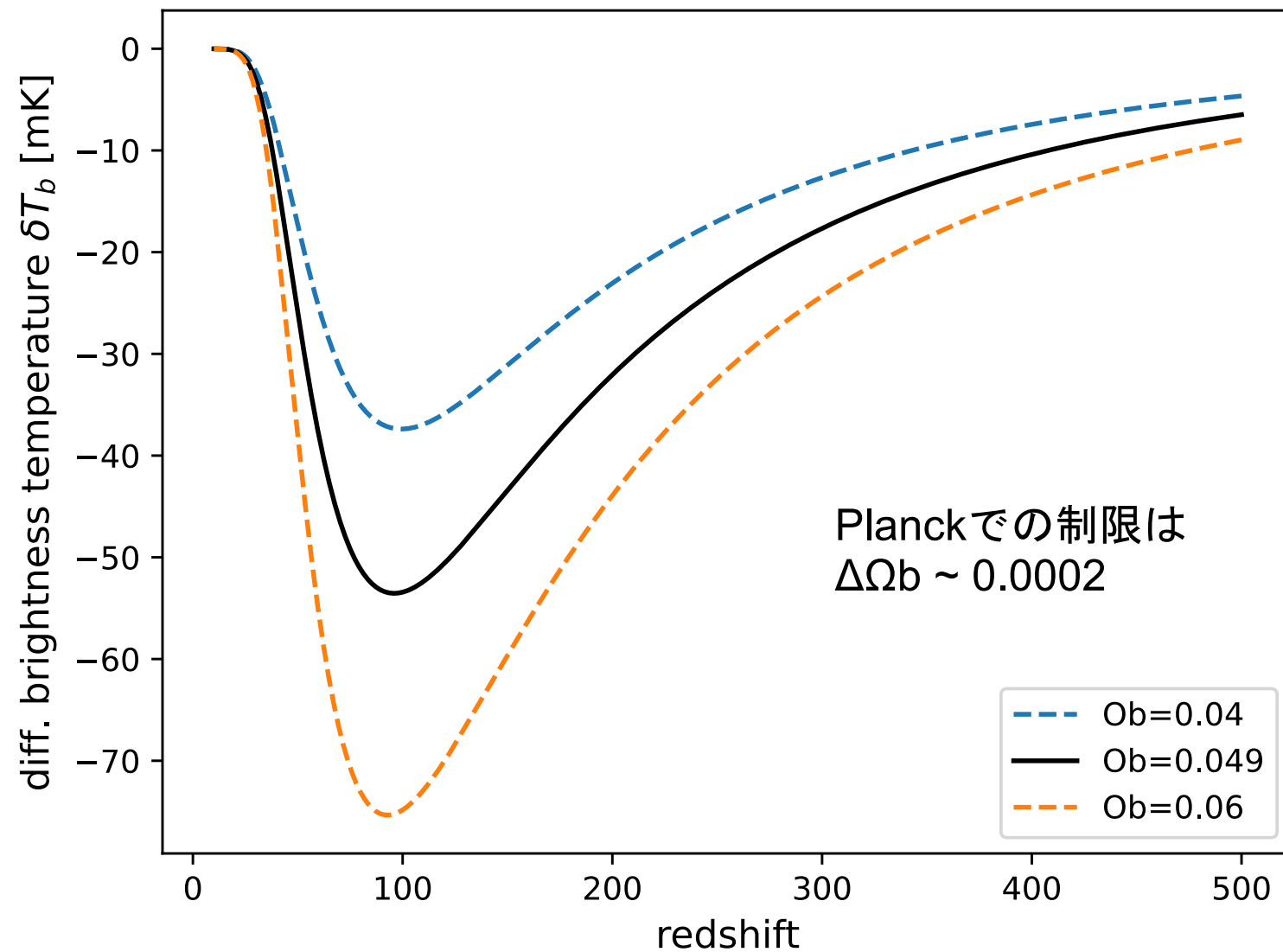
$$\frac{dx_e}{dz} \propto \frac{x_e^2 n_{\text{H}} \alpha_{\text{B}} - \beta_{\text{B}} (1 - x_e) e^{-h_{\text{P}} \nu_{2s} / k_{\text{B}} T_{\text{M}}}}{H(z)(1+z)}$$

バリオン密度にも依存する？

宇宙論パラメータの依存性



宇宙論パラメータの依存性



将来観測での決定精度

Table 3.1-1. Baseline FARSIDE specifications.

Quantity	Value
Antennas	128 × 100 m length dipoles (100 kHz – 2 MHz), 128 × 5 m length dipoles (1-40 MHz)
Frequency Coverage	100 kHz – 40 MHz (1400 × 28.5 kHz channels)
Field of View (FWHM)	> 10,000 deg ²
Spatial Resolution	10 degrees @ 200 kHz / 10 arcminutes @ 15 MHz
Antenna efficiency	6.8×10^{-6} @ 200 kHz / 9.5×10^{-5} @ 15 MHz
System Temperature ^{a,b}	1.0×10^6 K @ 200 kHz / 2.7×10^4 K @ 15 MHz
Effective Collecting Area ^c	~ 12.6 km ² @ 200 kHz / 2,240 m ² @ 15 MHz
System Equivalent Flux Density (SEFD)	230 Jy @ 200 kHz / 2.8×10^4 Jy @ 15 MHz
1 σ Sensitivity ^b (60 seconds; bandwidth = $\nu/2$)	93 mJy @ 200 kHz ^d / 1.3 Jy (1.2 K) @ 15 MHz
1 σ Sensitivity ^b (1 hour; bandwidth = $\nu/2$)	12 mJy @ 200 kHz ^d / 170 mJy (160 mK) @ 15 MHz
1 σ Sensitivity ^b (1000 hours; bandwidth = $\nu/2$)	230 μ Jy ^e @ 200 kHz ^d / 3.8 mJy (5.2 mK) @ 15 MHz

^a System temperature includes contribution from the sky and ground due to the absence of a ground screen.

^b These values have been updated from the Astro 2020 report due increased fidelity in the front-end design (see §3.5).

^c Effective area is impacted by loss of gain into the ground due to absence of a ground screen. Antenna efficiency not included.

^d Sensitivity calculations at 200 kHz assume night time conditions.

^e Deep confusion-free integrations are possible < 3 MHz due to the absence of extragalactic sources.

まとめ

- ✓ 暗黒時代($z \sim 100$) 21cm線グローバルシグナルの計算コードを作成中 (今後MCMCなどによるパラメータ推定などを実装予定)
- ✓ 10mK 程度の測定誤差を仮定すれば、 H_0 や Ω_B を10%程度で決定できそう
- ✓ Cosmic Dawnの観測に比べて、astroの影響がほとんどないので宇宙論モデルの制限としての高い有用性が期待できる。
- ✓ 標準的な宇宙論パラメータの制限としてはCMBなどに比べて弱いかもしれないが、独立な制限が得られるはず
- ✓ IGMの熱史に対する非標準的なモデルについて新たな制限が得られるかも?? (ex. 原始磁場、PBH, DM対消滅 etc...)