

Minoda, T., Yoshiura, S., and Takahashi, T., “Impact of the primordial fluctuation power spectrum on the reionization history”, Physical Review D, vol. 108, no. 12, APS, 2023.

原始曲率揺らぎが 宇宙再電離に与える影響

日本天文学会2024年春季年会

2024年3月13日

箕田鉄兵 (Tsinghua University 清華大学),

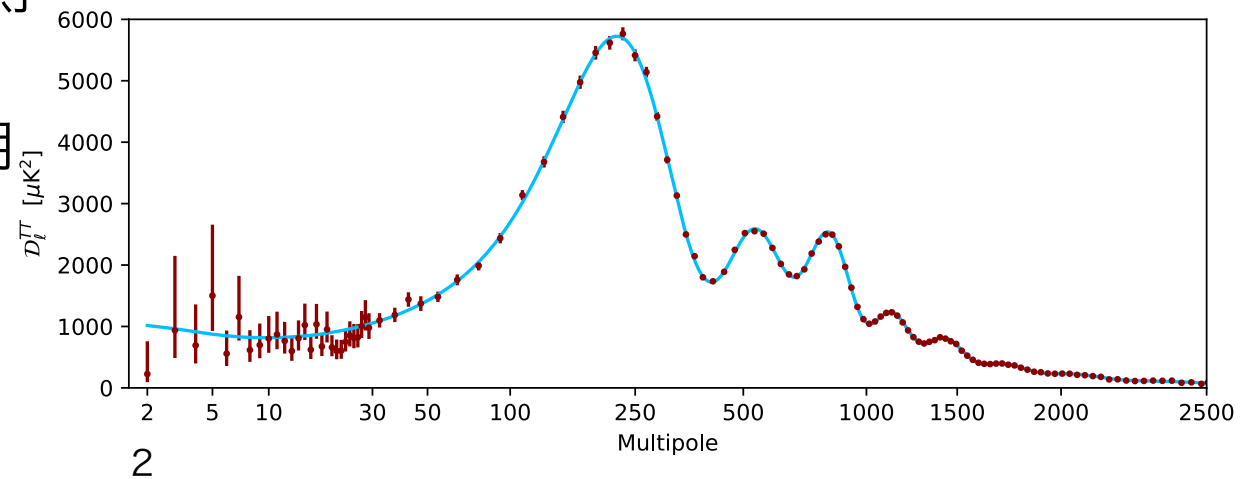
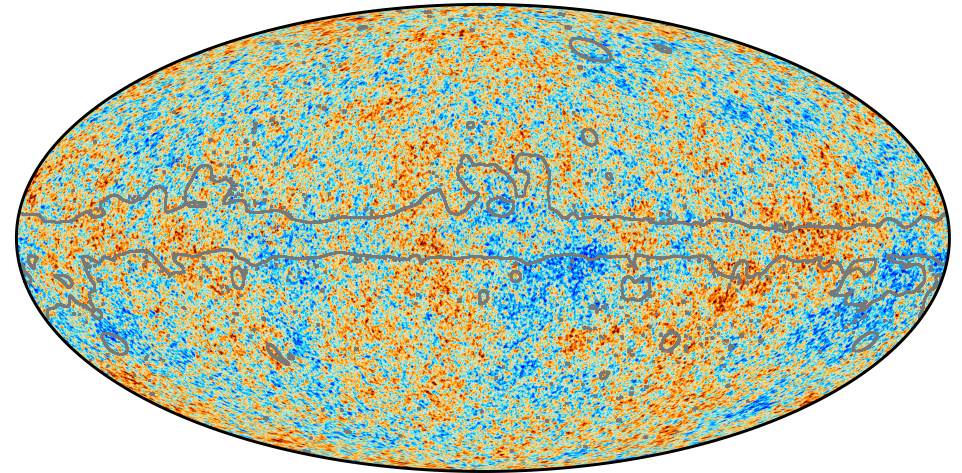
吉浦伸太郎 (国立天文台) 高橋智 (佐賀大)

原始曲率揺らぎ

CMBの温度揺らぎの観測など
＞ 原始曲率揺らぎの存在が示唆

断熱揺らぎ（波数の単一べき）で精度
よく説明

原始曲率揺らぎの性質の詳細な観測
＞ 初期宇宙のゆらぎ生成機構
（インフレーションモデル）の解明



原始曲率揺らぎの定式化

さまざまなインフレーションモデル

> 原始揺らぎに特徴的なふるまい

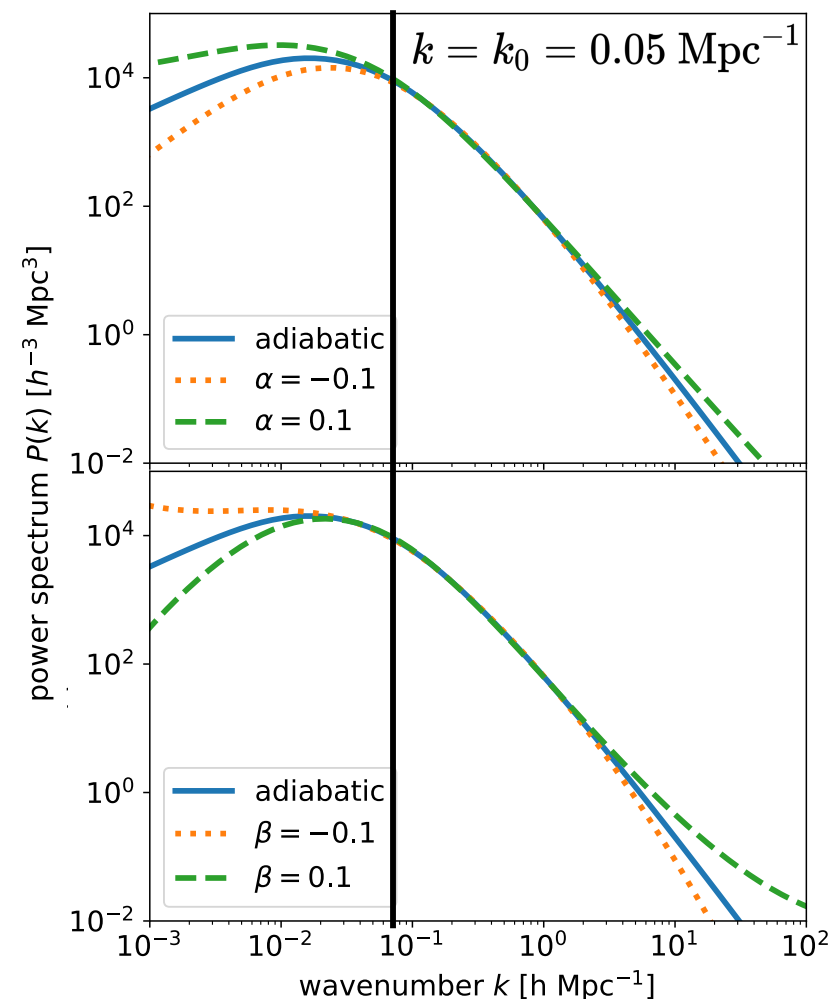
等曲率揺らぎ、テンソルモードのスペクトル

インフラトンのポテンシャル、スローロールパラメータ

本研究ではランニングスペクトルを議論

$$\mathcal{P}(k) = A_s \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_s - 1 + \frac{1}{2} \alpha_s \ln \left(\frac{k}{k_0} \right) + \frac{1}{6} \beta_s \left[\ln \left(\frac{k}{k_0} \right) \right]^2}$$

3



ランニングパラメータの制限

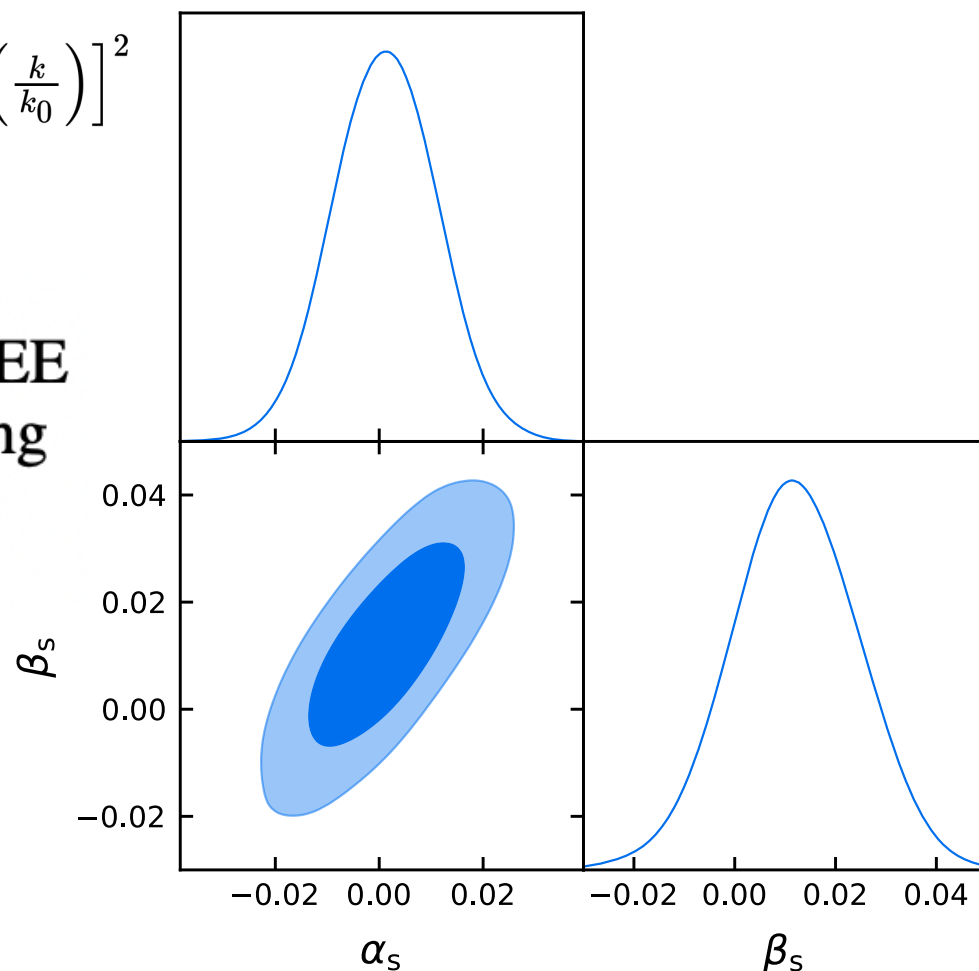
$$\mathcal{P}(k) = A_s \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_s - 1 + \frac{1}{2} \alpha_s \ln \left(\frac{k}{k_0} \right) + \frac{1}{6} \beta_s \left[\ln \left(\frac{k}{k_0} \right) \right]^2}$$

$$\left. \begin{aligned} \beta_s &= 0.009 \pm 0.012, \\ \alpha_s &= 0.0011 \pm 0.0099, \\ n_s &= 0.9647 \pm 0.0043, \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} 68\%, \text{ TT, TE, EE} \\ +\text{lowE+lensing} \\ +\text{BAO.} \end{array}$$

Planck 2018の結論：
単一冪乗で無矛盾である

$$0.008 \text{ Mpc}^{-1} \lesssim k \lesssim 0.1 \text{ Mpc}^{-1}$$

より小さいスケールではどうか？



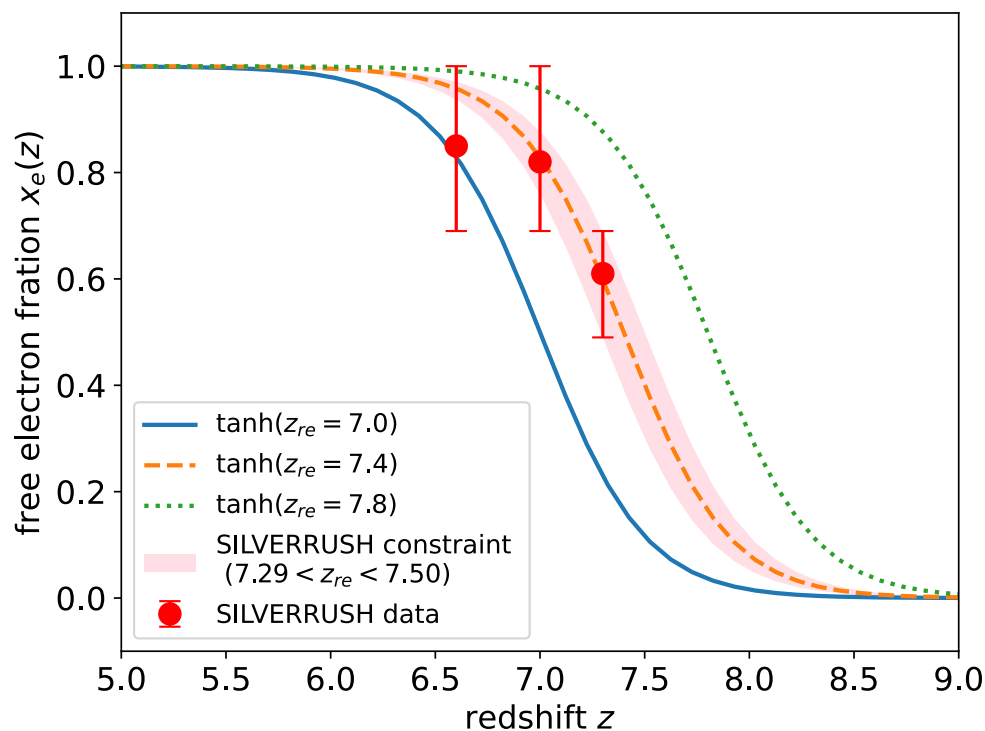
原始揺らぎの新たなプローブ: 再電離史

$$x_e(z, z_{\text{re}}) = \frac{1}{2} \left[1 + \tanh \left(\frac{y(z_{\text{re}}) - y(z)}{\Delta y} \right) \right],$$

$$y(z) = (1 + z)^{2/3},$$

$$\Delta y = 3/2(1 + z_{\text{re}})^{1/2} \Delta z$$

$$\Delta z = 0.5$$



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL

OPEN ACCESS

SILVERRUSH. XI. Constraints on the Ly α Luminosity Function and Cosmic Reionization at $z = 7.3$ with Subaru/Hyper Suprime-Cam

Hinako Goto¹ , Kazuhiro Shimasaku^{1,2} , Satoshi Yamanaka^{3,4} , Rieko Momose¹ , Makoto Ando¹, Yuichi Harikane^{5,6} , Takuya Hashimoto⁷ , Akio K. Inoue^{4,8} , and Masami Ouchi^{5,9,10}

Published 2021 December 24 • © 2021. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

[The Astrophysical Journal, Volume 923, Number 2](#)

Citation Hinako Goto *et al* 2021 *ApJ* 923 229

DOI 10.3847/1538-4357/ac308b

再電離史の理論計算

A. Mesinger, S. Furlanetto, & R. Cen (2011), MNRAS, 411, 955

準数値計算コード“21cmFAST”を拡張する

再電離史を決定する重要な量：

星形成率

(1) UV光度関数

$$\phi(M_{\text{UV}}) = \left(f_{\text{duty}} \frac{dn}{dM_{\text{h}}} \right) \left| \frac{dM_{\text{h}}}{dM_{\text{UV}}} \right|$$

ハローの形成史
初期条件（曲率揺らぎ）
宇宙論パラメータ

Duty cycle is
parametrized by M_{turn} :

$$f_{\text{duty}} = \exp\left(-\frac{M_{\text{turn}}}{M_{\text{h}}}\right)$$

再電離史の理論計算

(2) 星形成率

$$\dot{M}_*(M_h, z) = \frac{M_*}{t_* H(z)^{-1}} \quad t_* : \text{ハッブル時間に対する星形成の典型的な時間}$$

(3) 星質量-ハロ一質量関係

$$\frac{M_*}{M_h} = f_{*,10} \left(\frac{M_h}{10^{10} M_\odot} \right)^{\alpha_*} \left(\frac{\Omega_b}{\Omega_m} \right)$$

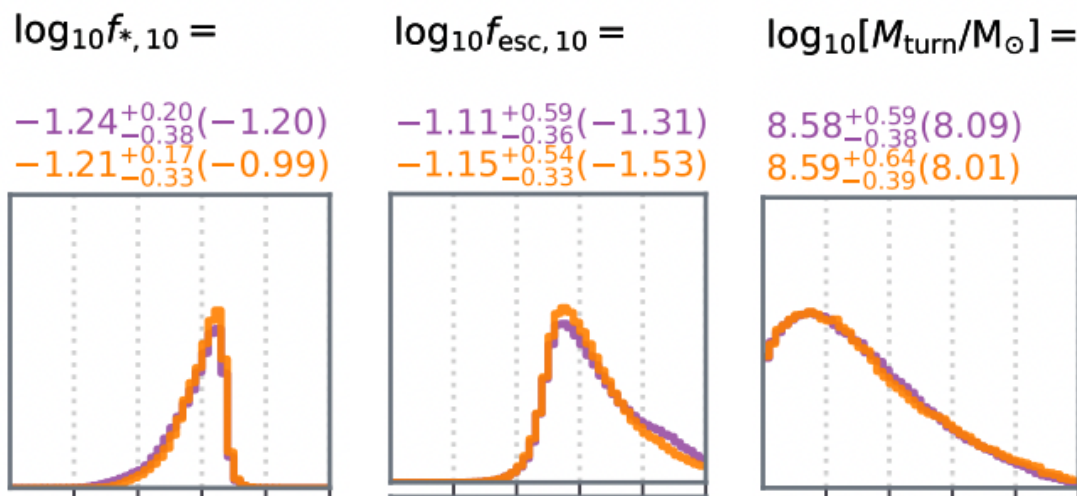
(4) 電離光子脱出率

$$f_{\text{esc}}(M_{\text{halo}}) = f_{\text{esc},10} \left(\frac{M_{\text{halo}}}{10^{10} M_\odot} \right)^{\alpha_{\text{esc}}}, \quad \text{特に影響の大きいパラメータ: } M_{\text{turn}}, f_{\text{esc},10}, f_{*,10}$$

21cmFASTを用いた電離史の計算

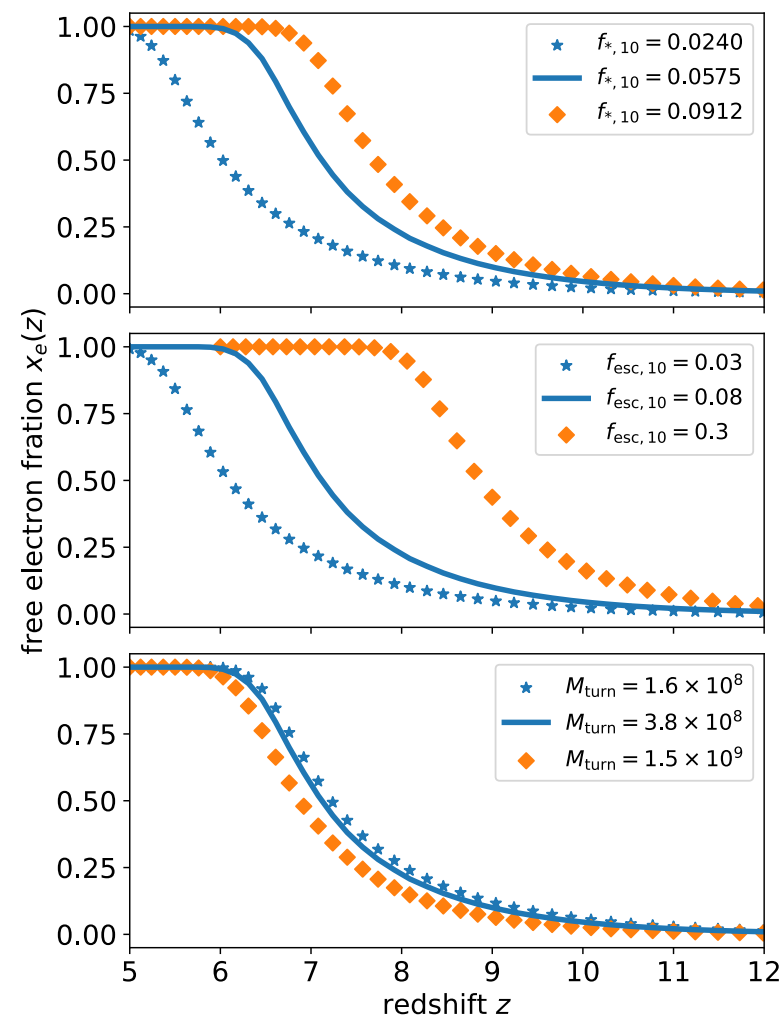
先行研究で与えられた天体物理パラメータへの制限をpriorの範囲として計算を行った。

HERA 21cm PS + galaxy UV LFs
+ QSO dark fraction + CMB optical depth



Abdurashidova, Z. et al. 2022, ApJ, 924, 51.

8



21cmFASTのフィッティング関数

$$x_e(z = 7.3) = \min(1.0, \tilde{x}_{e,7.3}),$$

$$\tilde{x}_{e,7.3} = \left\{ 0.421e^A + B \left[\left(\frac{f_{*,10}}{0.058} \right)^C - 1.0 \right] + D \log \left(\frac{M_{\text{turn}}}{3.8 \times 10^8 M_\odot} \right) \right\} \left(\frac{f_{\text{esc},10}}{0.078} \right)^E,$$

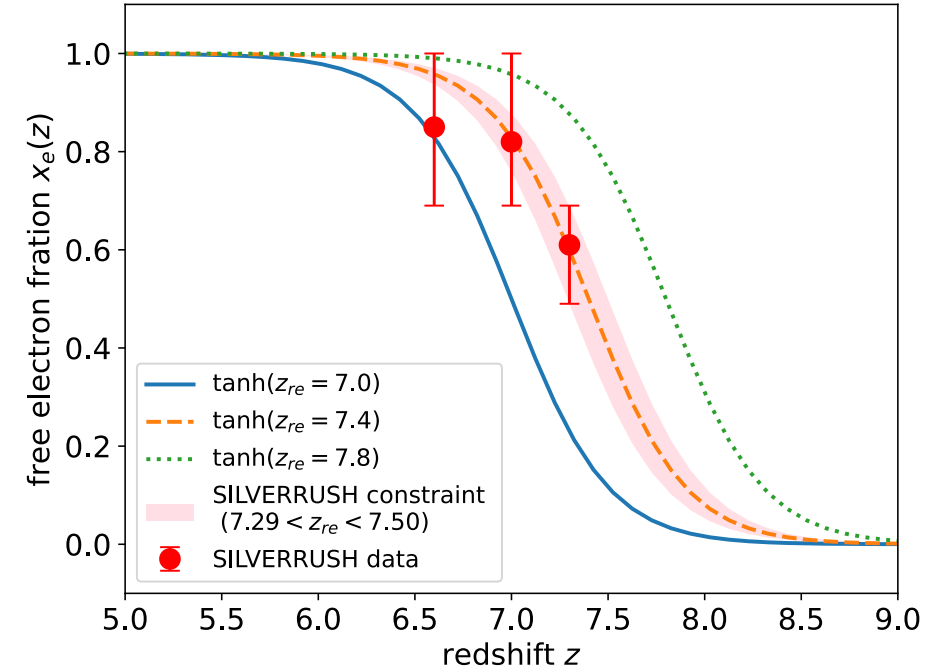
$$A = 8.43\alpha_s + 11.41\beta_s,$$

$$B = 4.00\alpha_s + 7.75\beta_s + 0.38,$$

$$C = -5.24\alpha_s - 12.04\beta_s + 1.34,$$

$$D = -0.7\alpha_s - 1.20\beta_s - 0.07,$$

$$E = -3.11\beta_s + 1.08.$$



Fitting errorの平均は ~ 0.02

SILVERRUSHの観測エラーは ~ 0.2

$$0.49 \leq x_e \leq 0.69 \text{ at } z = 7.3.$$

$$7.29 \leq z_{\text{re}} \leq 7.50$$

MCMC解析 (astroを固定)

Flat prior:

$$-0.2 < \alpha < 0.2$$

$$-0.2 < \beta < 0.2$$

Planck prior:

2D gaussian on alpha and beta,
with Planck 2018 covariance matrix

Planck 2018

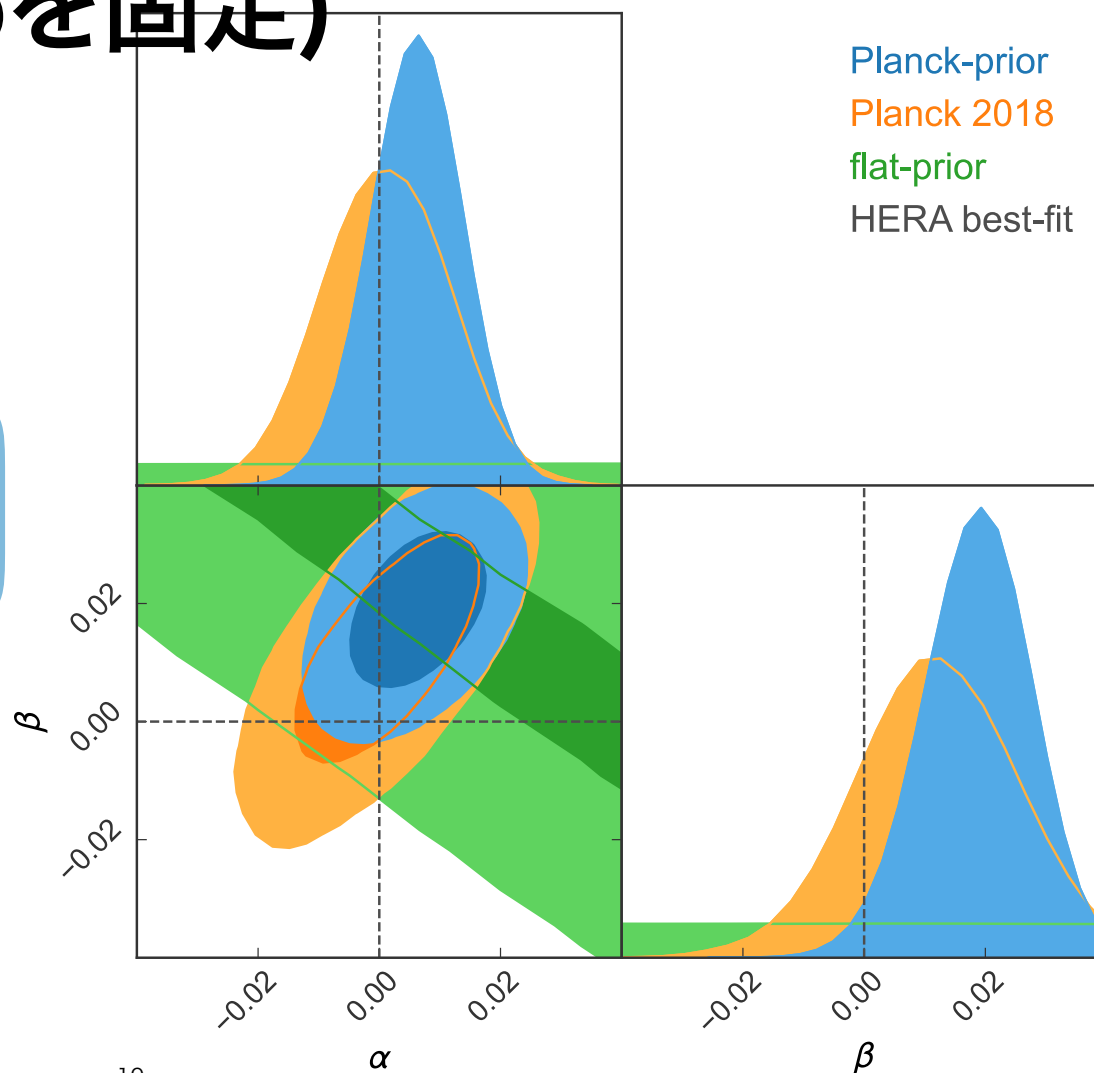
$$\alpha_s = 0.0011 \pm 0.0099,$$

$$\beta_s = 0.009 \pm 0.012,$$

Our results

$$\alpha_s = 0.006^{+0.007}_{-0.007}$$

$$\beta_s = 0.019^{+0.008}_{-0.009}$$



MCMC解析

Flat prior:

$-0.2 < \alpha < 0.2$

$-0.2 < \beta < 0.2$

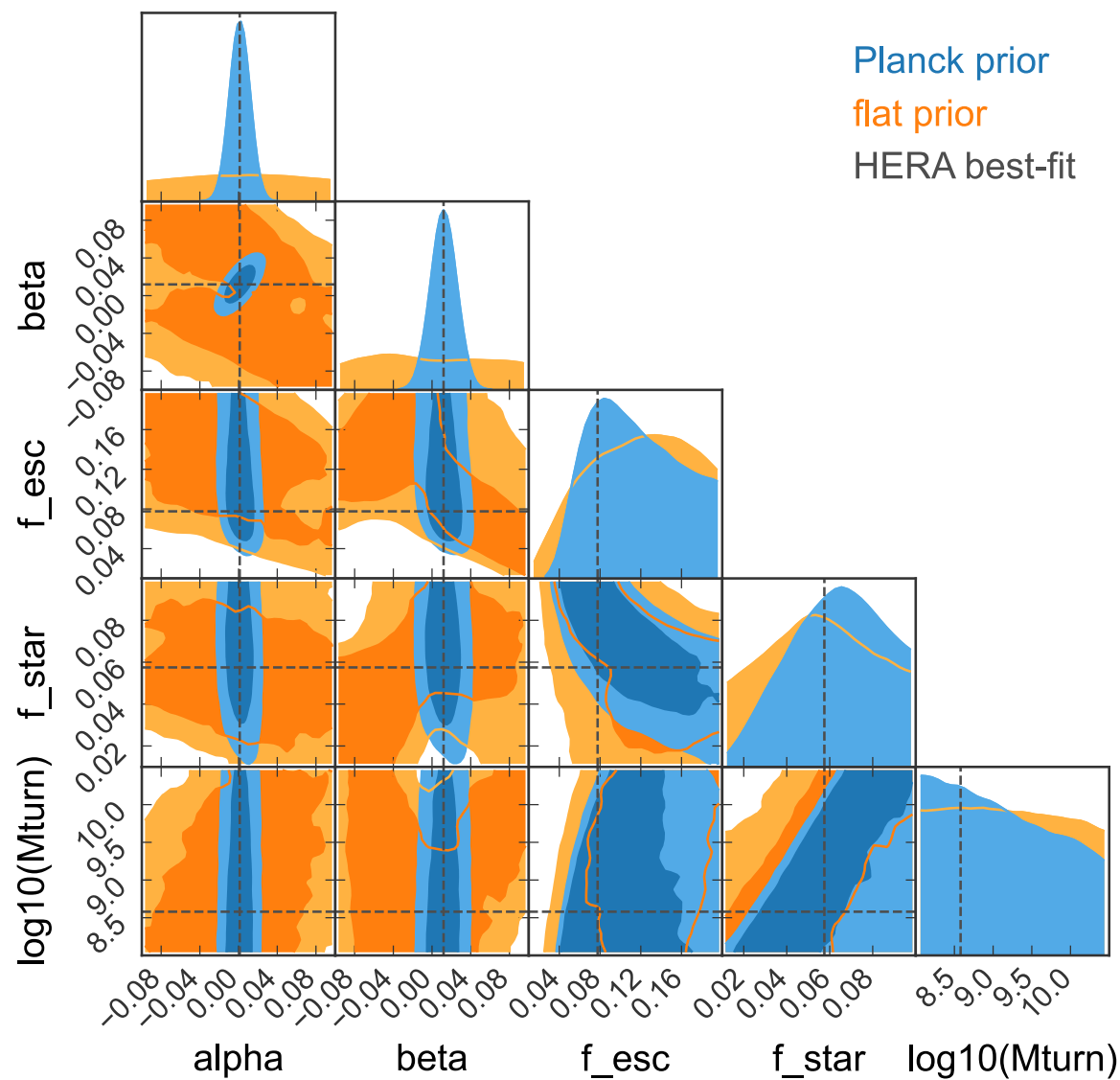
$0.001 < f_{\text{esc}} < 0.4$

$0.001 < f_{\text{star}} < 0.4$

$7.0 < \log M < 10.5$

Planck prior:

2D gaussian on α and β



MCMC解析

Flat prior:

$-0.2 < \alpha < 0.2$

$-0.2 < \beta < 0.2$

$0.001 < f_{\text{esc}} < 0.4$

$0.001 < f_{\text{star}} < 0.4$

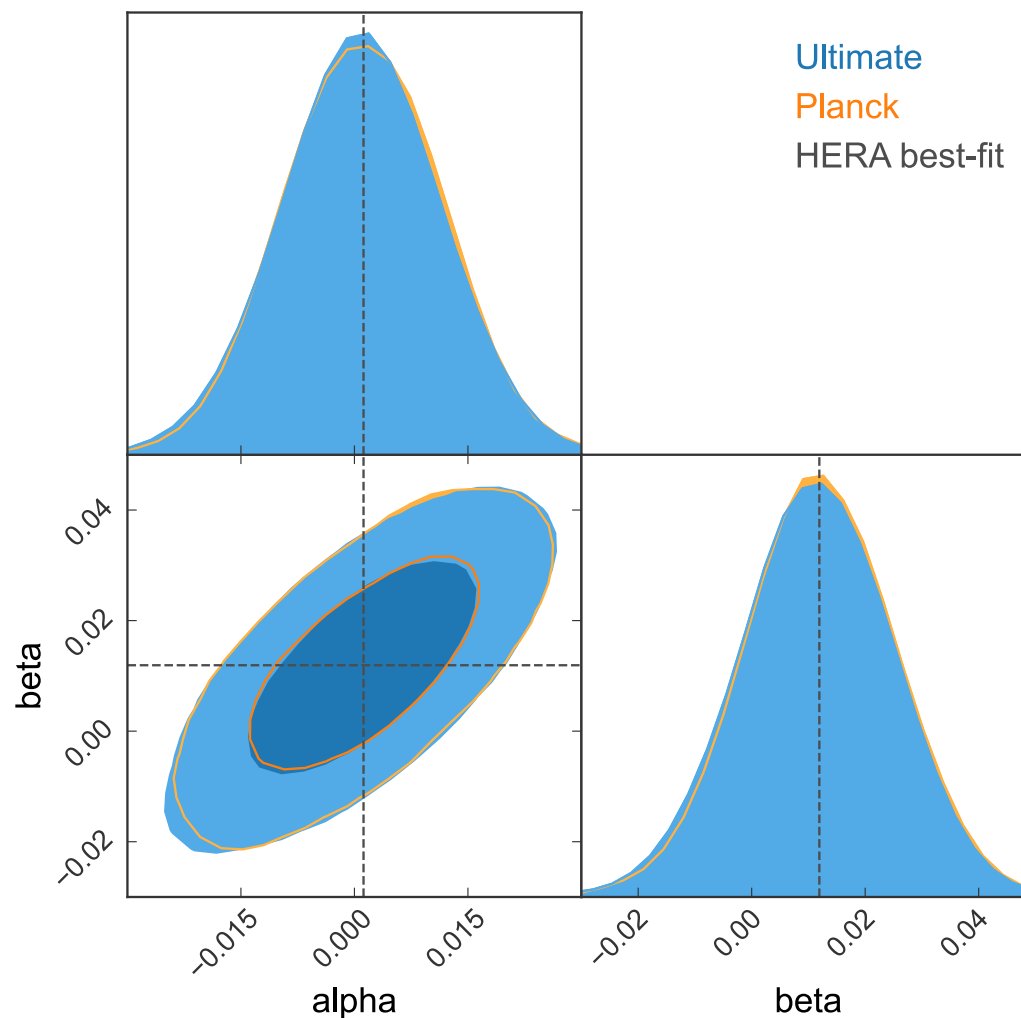
$7.0 < \log M < 10.5$

Planck prior:

2D gaussian on α and β

Planck 単独の制限とほとんど変わらず。

astroの制限/将来観測では有用かも？

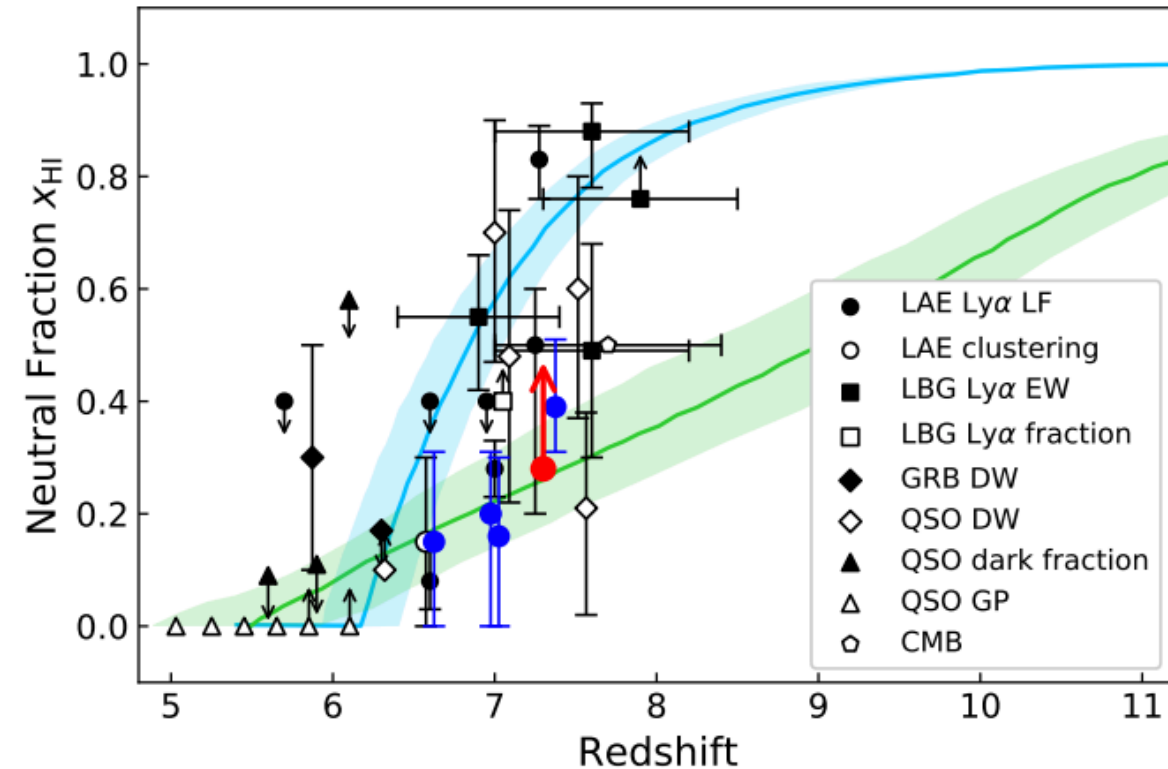


Future issues

- JWSTなどの高赤方偏移銀河やAGNの観測で再電離・宇宙の夜明けが明らかになりつつある > JWST, SKAの観測などによるデータのアップデート
- その他の宇宙論パラメータ、天体物理パラメータ (f_{star} , f_{esc} の指数など) との縮退
- Global signalを用いた制限との比較 (escape fractionよりもX線加熱に sensitive, c.f. Minoda+ (2022) PRD, vol. 105, no. 8, arXiv:2112.15135)

H. Goto, et al., (2021) Astrophysical Journal, vol. 923, no. 2

L. C. Keating, J. S. Bolton, F. Cullen, M. G. Haehnelt, E. Puchwein, and G. Kulkarni, (2023) arXiv.2308.05800.



SILVERRUSHのLy α LFの観測を用いた
水素中性率の制限

JWSTのdamping wingの観測を
用いた水素中性率の制限

