

宇宙再電離史の観測による 原始曲率揺らぎの制限

2022 観測的宇宙論ワークショップ

2022年12月13日

箕田鉄兵 (University of Melbourne),

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

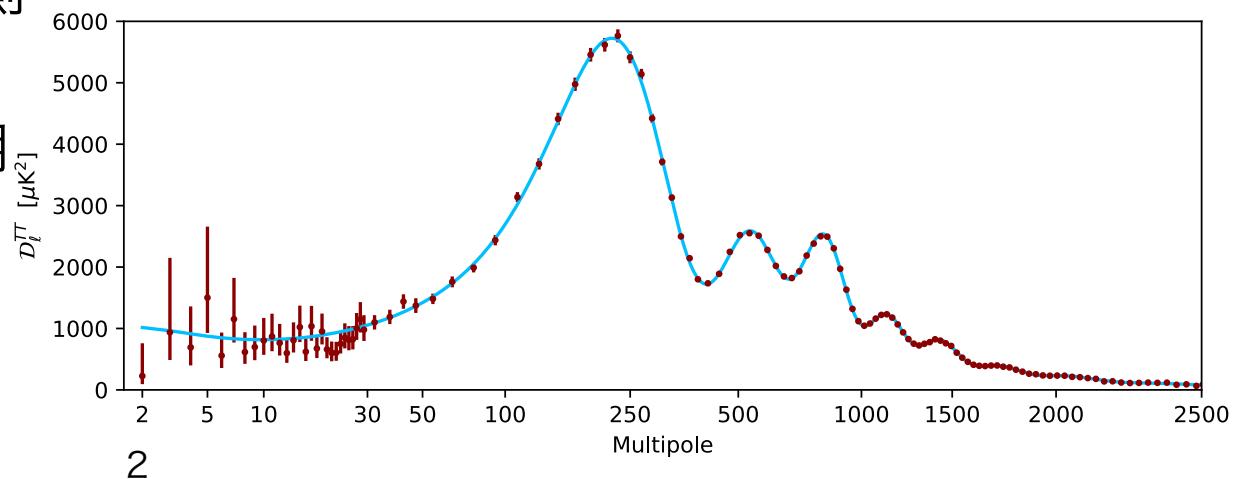
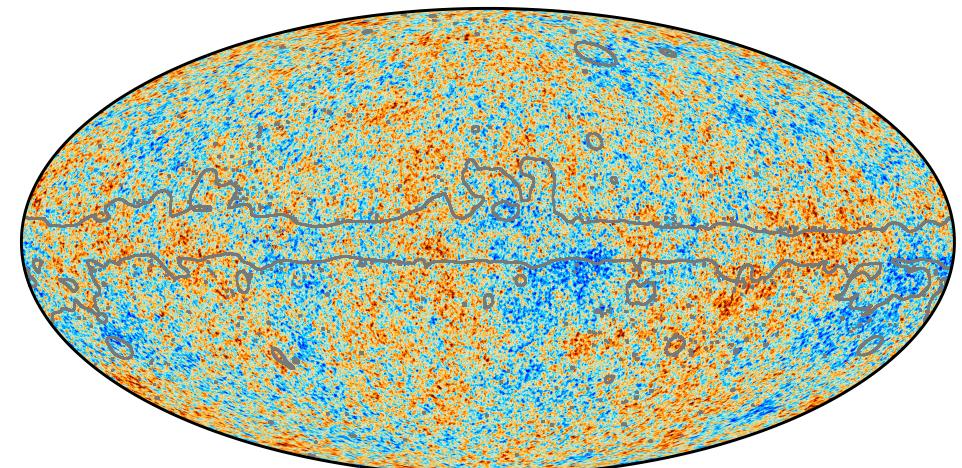
> 原始曲率揺らぎの存在が示唆

断熱揺らぎ（波数の単一べき）で精度
よく説明

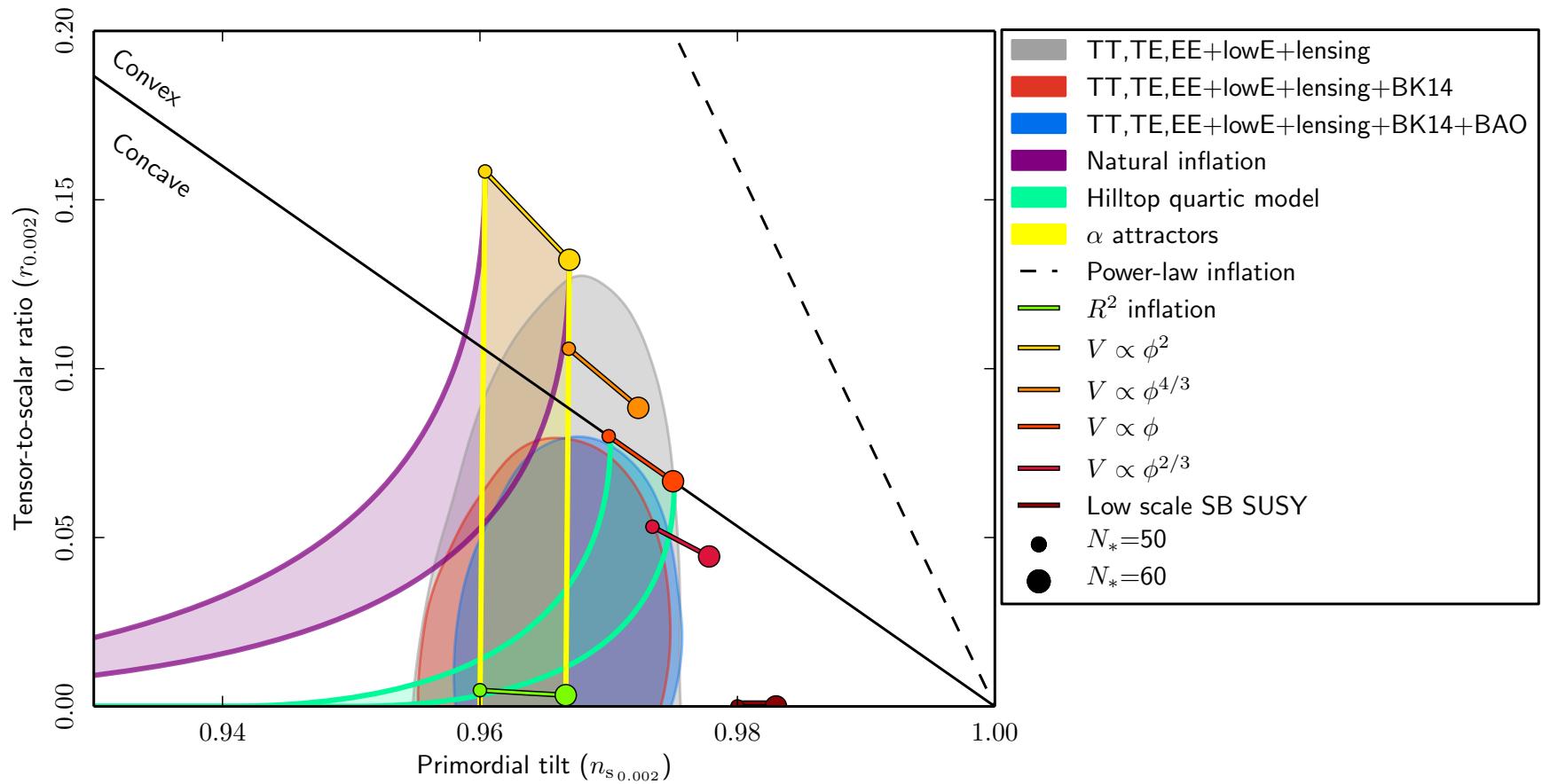
原始曲率揺らぎの性質の詳細な観測

> 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



原始曲率揺らぎとインフレーション



Planck 2018

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

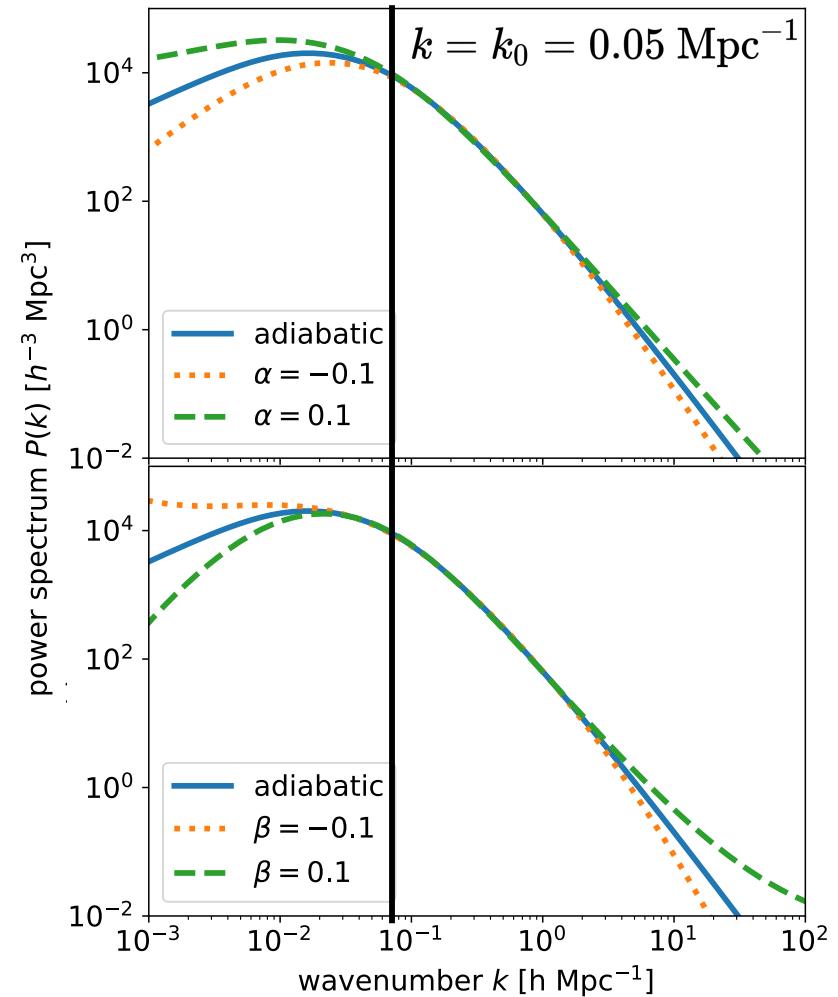
> 原始揺らぎに特徴的なふるまい

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

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



ランニングパラメータの制限

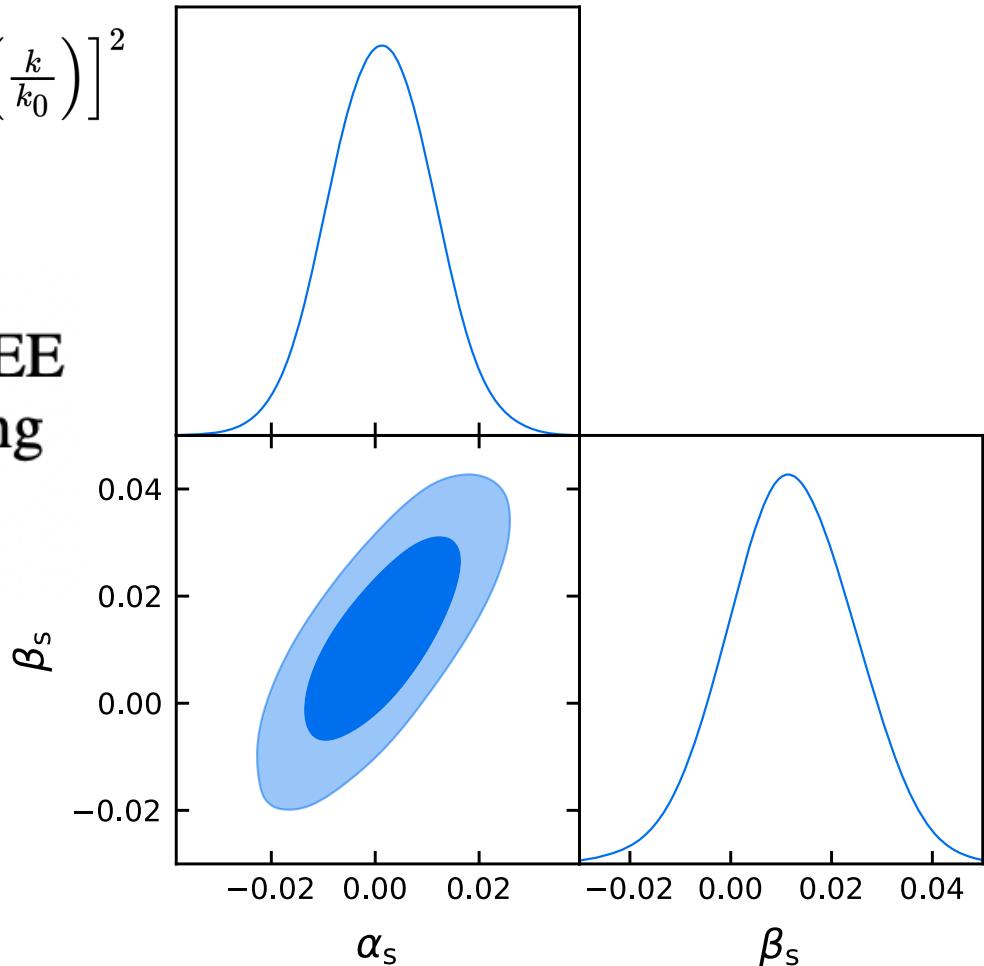
$$\mathcal{P}(k) = A_s \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_s - 1 + \frac{1}{2}\alpha_s \ln\left(\frac{k}{k_0}\right) + \frac{1}{6}\beta_s \left[\ln\left(\frac{k}{k_0}\right) \right]^2}$$

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

Planck 2018の結論：
単一幕乗で無矛盾である

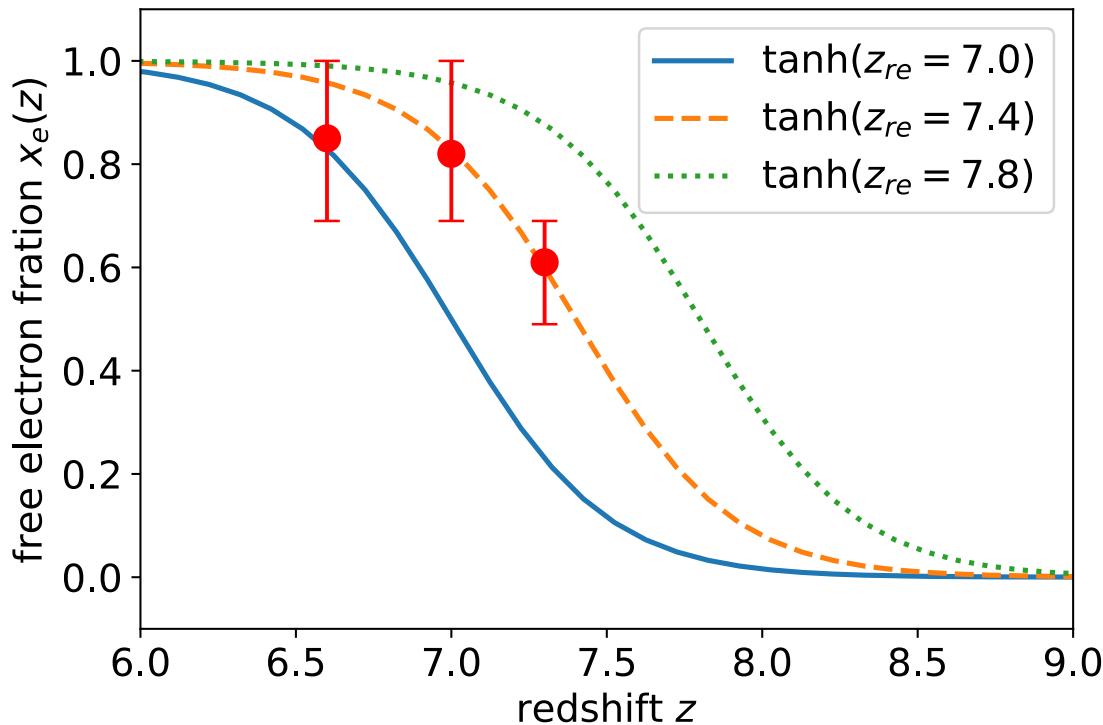
$$0.008 \text{ Mpc}^{-1} \lesssim k \lesssim 0.1 \text{ Mpc}^{-1}$$

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

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

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} :

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

再電離史の理論計算

(2) 星形成率

$$\dot{M}_*(M_h, z) = \frac{M_*}{t_* H(z)^{-1}}$$

t_* : 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-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

$$f_{\text{esc}}(M_{\text{halo}}) = f_{\text{esc},10} \left(\frac{M_{\text{halo}}}{10^{10} M_\odot} \right)^{\alpha_{\text{esc}}},$$

特に影響の大きいパラメータ：
 $M_{\text{turn}}, f_{\text{esc},10}, f_{*,10}$

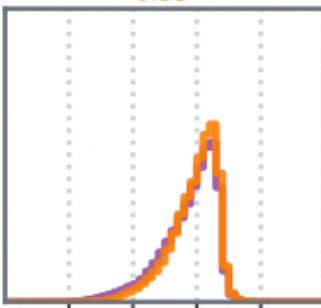
再電離史への天体物理的影响

21cmFASTの天体物理パラメータへの制限 (宇宙論パラメータの不定性は含まない)

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

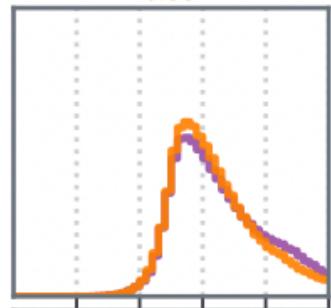
$$\log_{10} f_{*,10} =$$

$$-1.24^{+0.20}_{-0.38} (-1.20) \\ -1.21^{+0.17}_{-0.33} (-0.99)$$



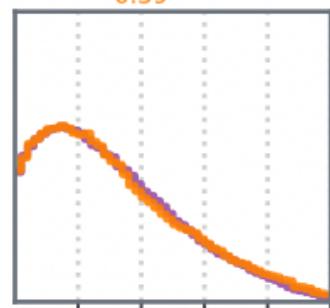
$$\log_{10} f_{\text{esc},10} =$$

$$-1.11^{+0.59}_{-0.36} (-1.31) \\ -1.15^{+0.54}_{-0.33} (-1.53)$$

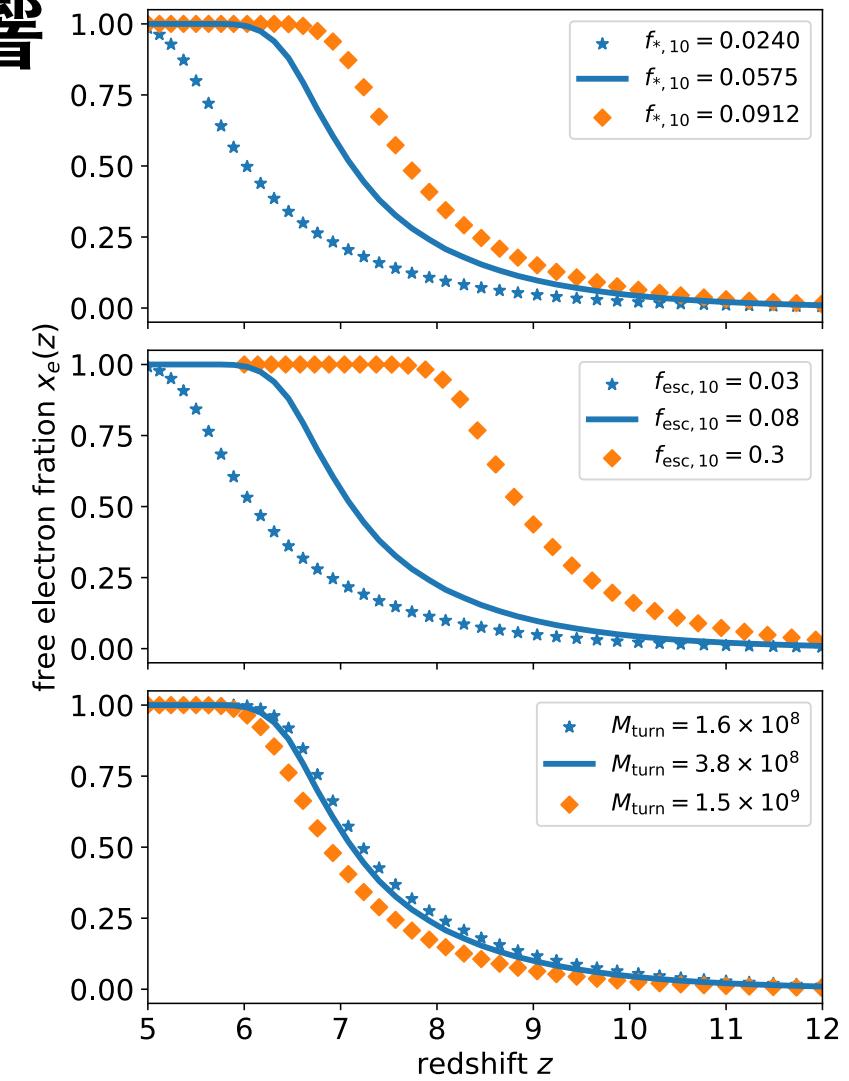


$$\log_{10} [M_{\text{turn}} / M_{\odot}] =$$

$$8.58^{+0.59}_{-0.38} (8.09) \\ 8.59^{+0.64}_{-0.39} (8.01)$$



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



21cmFASTのフィッティング関数

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

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

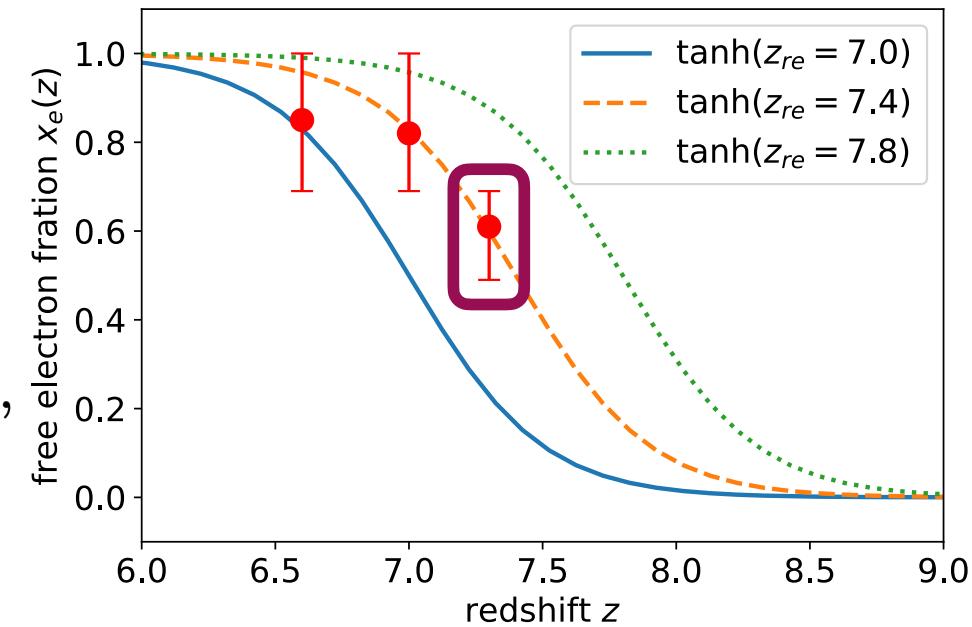
$$A = 8.43\alpha_s + 11.41\beta_s,$$

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

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

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

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



Fitting errorの平均は ~0.02
SILVERRUSHの観測エラーは ~0.2

MCMC解析

Flat prior:

$$-0.2 < \alpha < 0.2$$

$$-0.2 < \beta < 0.2$$

Planck prior:

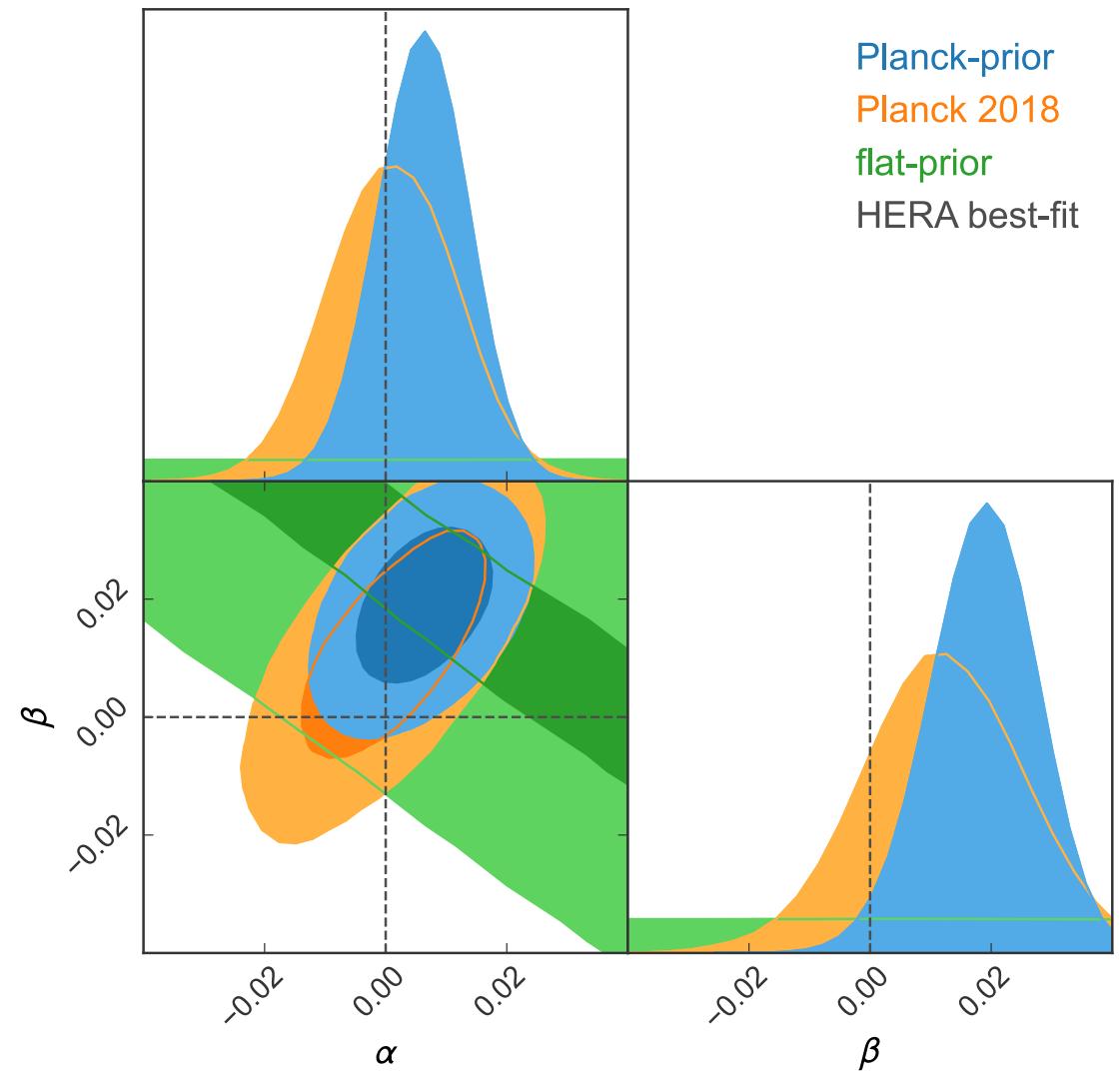
2D gaussian on alpha and beta,
with Planck 2018 covariance matrix

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:

$$-0.2 < \text{alpha} < 0.2$$

$$-0.2 < \text{beta} < 0.2$$

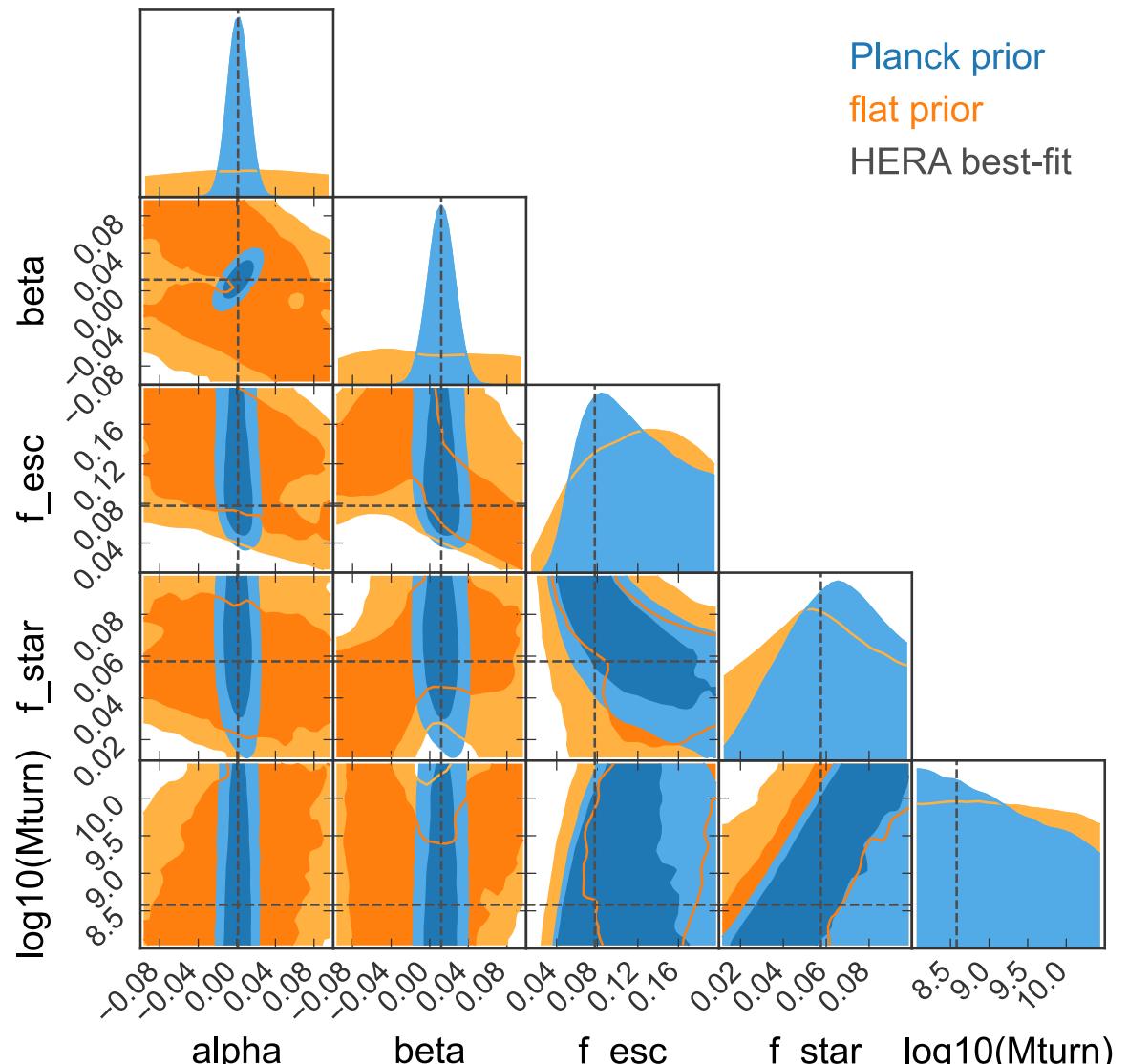
$$0.001 < \text{fesc} < 0.4$$

$$0.001 < \text{fstar} < 0.4$$

$$7.0 < \log M < 10.5$$

Planck prior:

2D gaussian on alpha and beta



MCMC解析

Flat prior:

$$-0.2 < \text{alpha} < 0.2$$

$$-0.2 < \text{beta} < 0.2$$

$$0.001 < \text{fesc} < 0.4$$

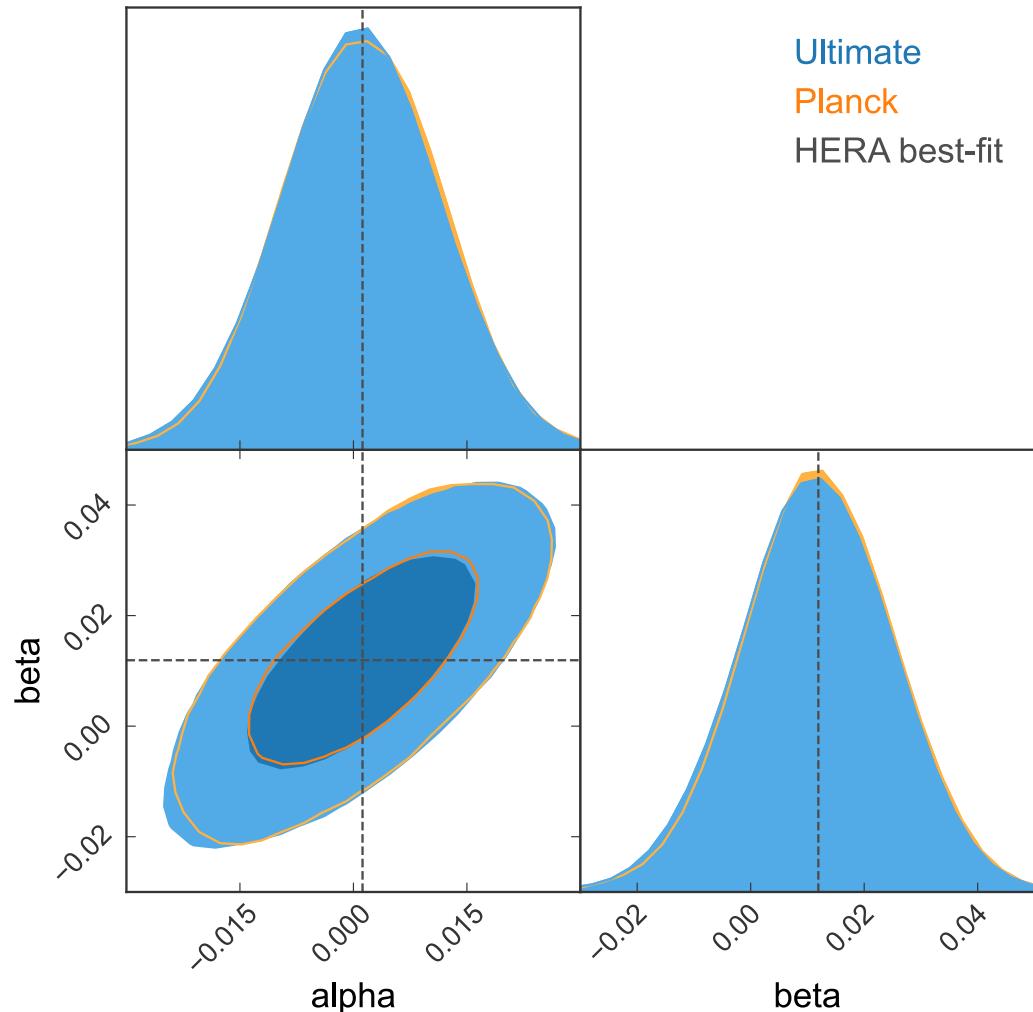
$$0.001 < \text{fstar} < 0.4$$

$$7.0 < \log M < 10.5$$

Planck prior:

2D gaussian on alpha and beta

Runningの制限はほとんど変わらず。
astroの制限には有用かも？



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 > データのアップデートなど
- 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} の指數など)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. arXiv:2112.15135)