

Studying 21 cm power spectrum with 1-point statistics

based on Shimabukuro et al astro-ph/1412.3332

島袋隼士(名古屋大学&熊本大学)

吉浦伸太郎(熊本大学)

高橋慶太郎(熊本大学)

市來淨與(名古屋大学)

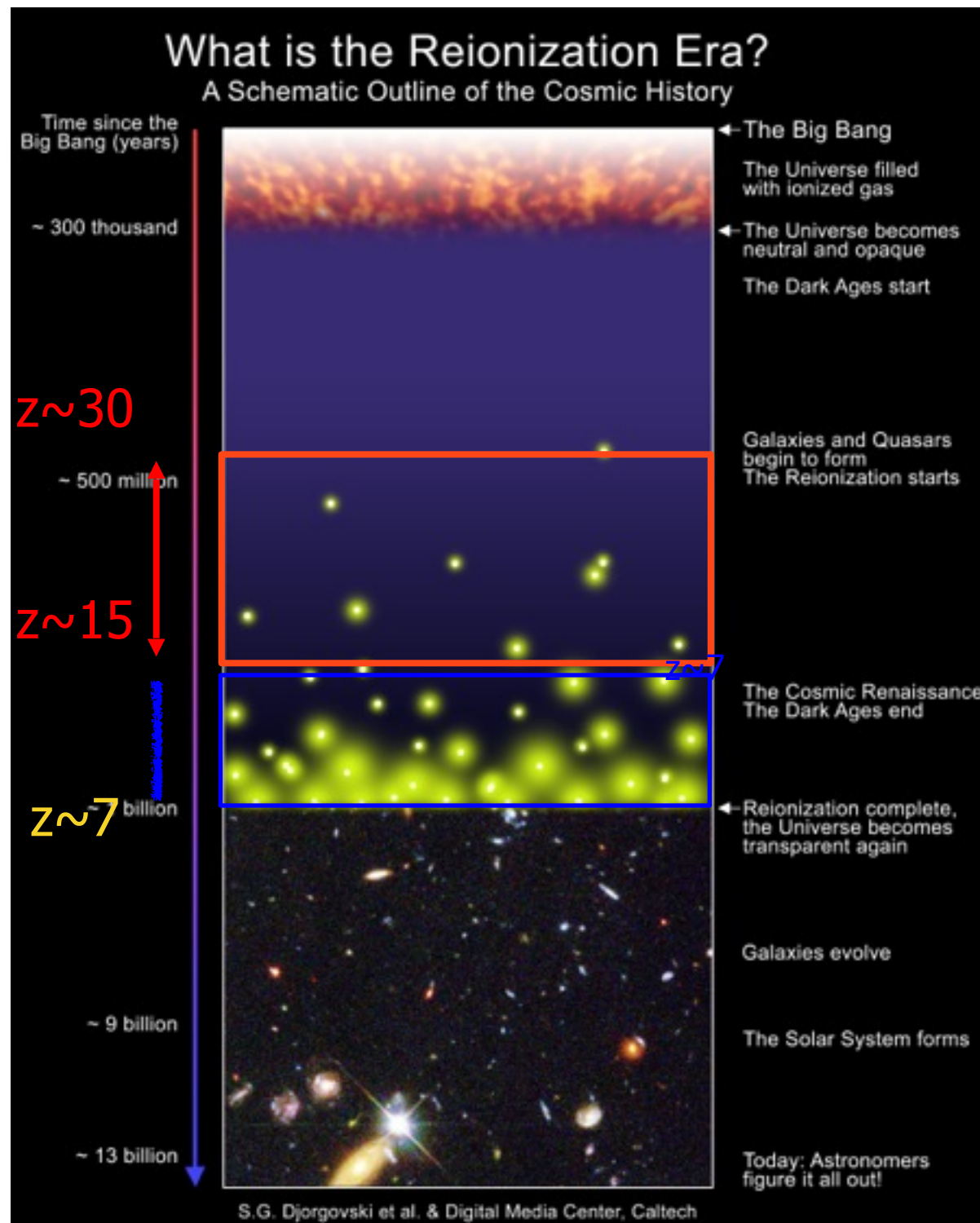
横山修一郎(立教大学)

Outline

- Introduction
- Evolution of 21 cm power spectrum
- One-point statistics of spin temperature & brightness temperature
- Summary

Introduction

Introduction



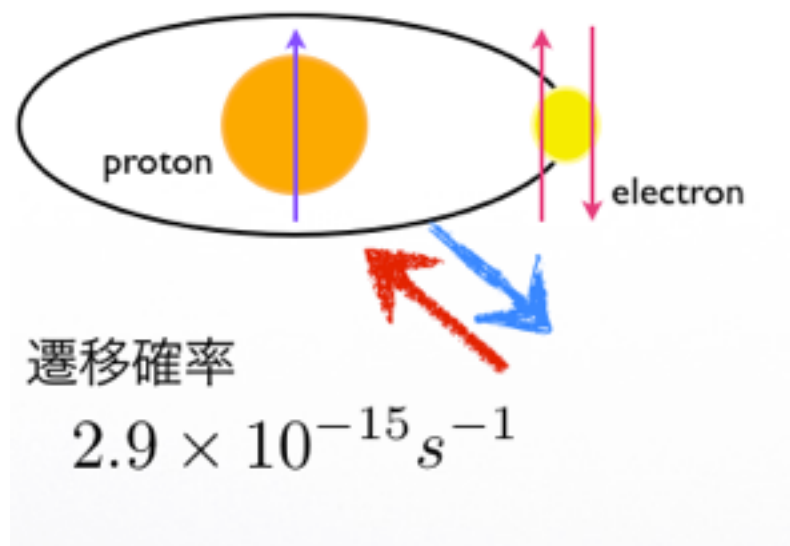
○ $z > 30$ ・ ・ Dark age
構造形成が起きていない時代。

○ $15 < z < 30$ ・ ・ Cosmic dawn
初期天体が形成され始め、天体
物理学的な効果が効き始める。

○ $7 < z < 15$ ・ ・ Epoch of
Reionization (EoR)
星や銀河からのUVによって、
水素が電離する。

Introduction

○21 cm line radiation



水素の超微細構造により、21 cm radiationが生じる。

Spin temperature

$$\frac{n_1}{n_0} = 3 \exp\left(-\frac{h\nu_{21}}{kT_S}\right)$$

釣り合いの条件より

$$T_S^{-1} = \frac{T_{\text{CMB}}^{-1} + x_\alpha T_\alpha^{-1} + x_K T_K^{-1}}{1 + x_\alpha + x_K}$$

○CMB

○Ly-alpha photon

○IGM

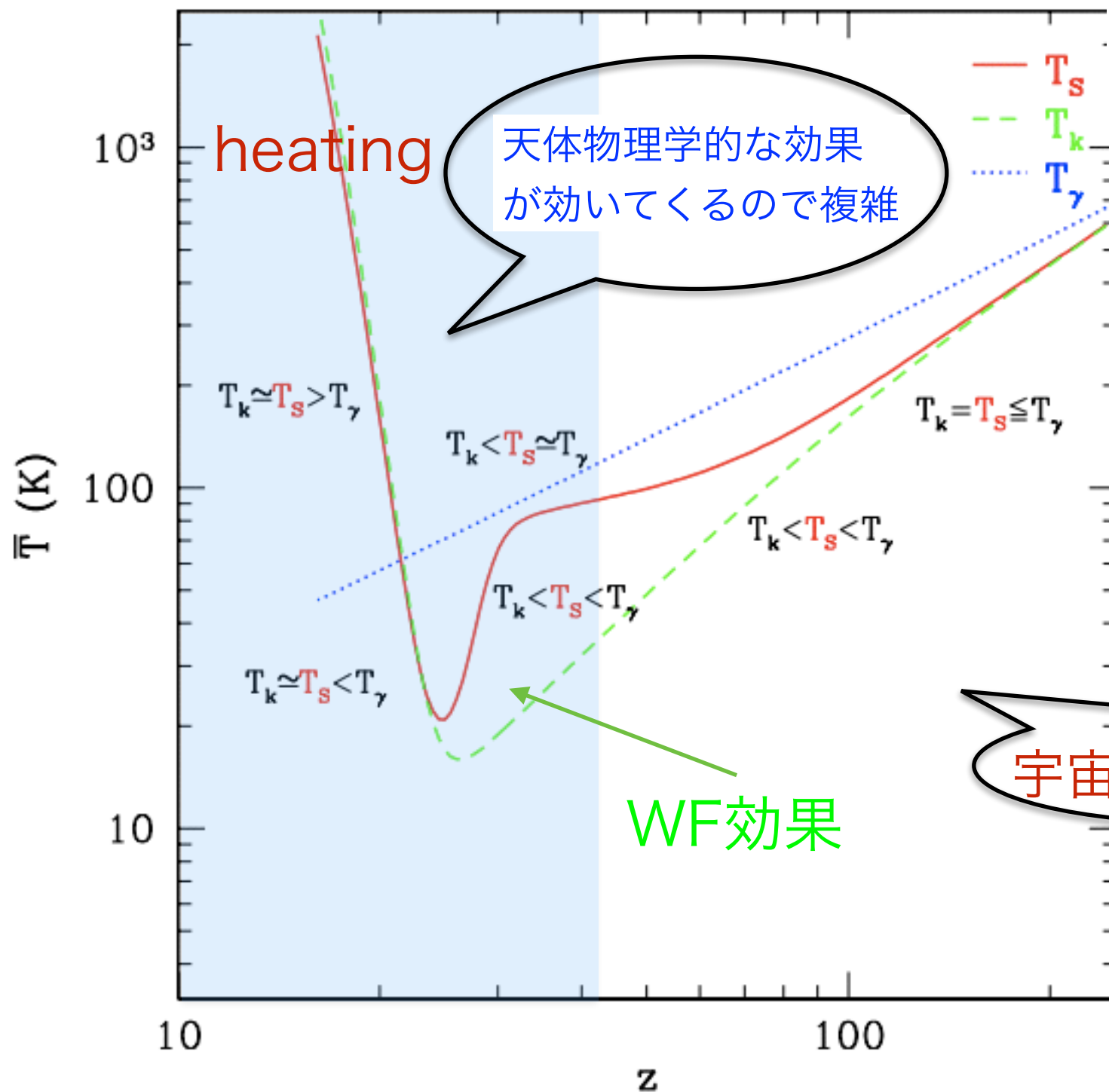
との相互作用で決まる。

Introduction

Thermal history

田代さんトーク

$$T_S^{-1} = \frac{T_{\text{CMB}}^{-1} + x_\alpha T_\alpha^{-1} + x_K T_K^{-1}}{1 + x_\alpha + x_K}$$



Wouthuysen-Field(WF)効果

天体からのLy-alpha photonの放射によって、spin temperatureとIGMのkinetic temperatureがカップリングする。

宇宙論で決まる

Mesinger et al 2010

Introduction

Thermal history

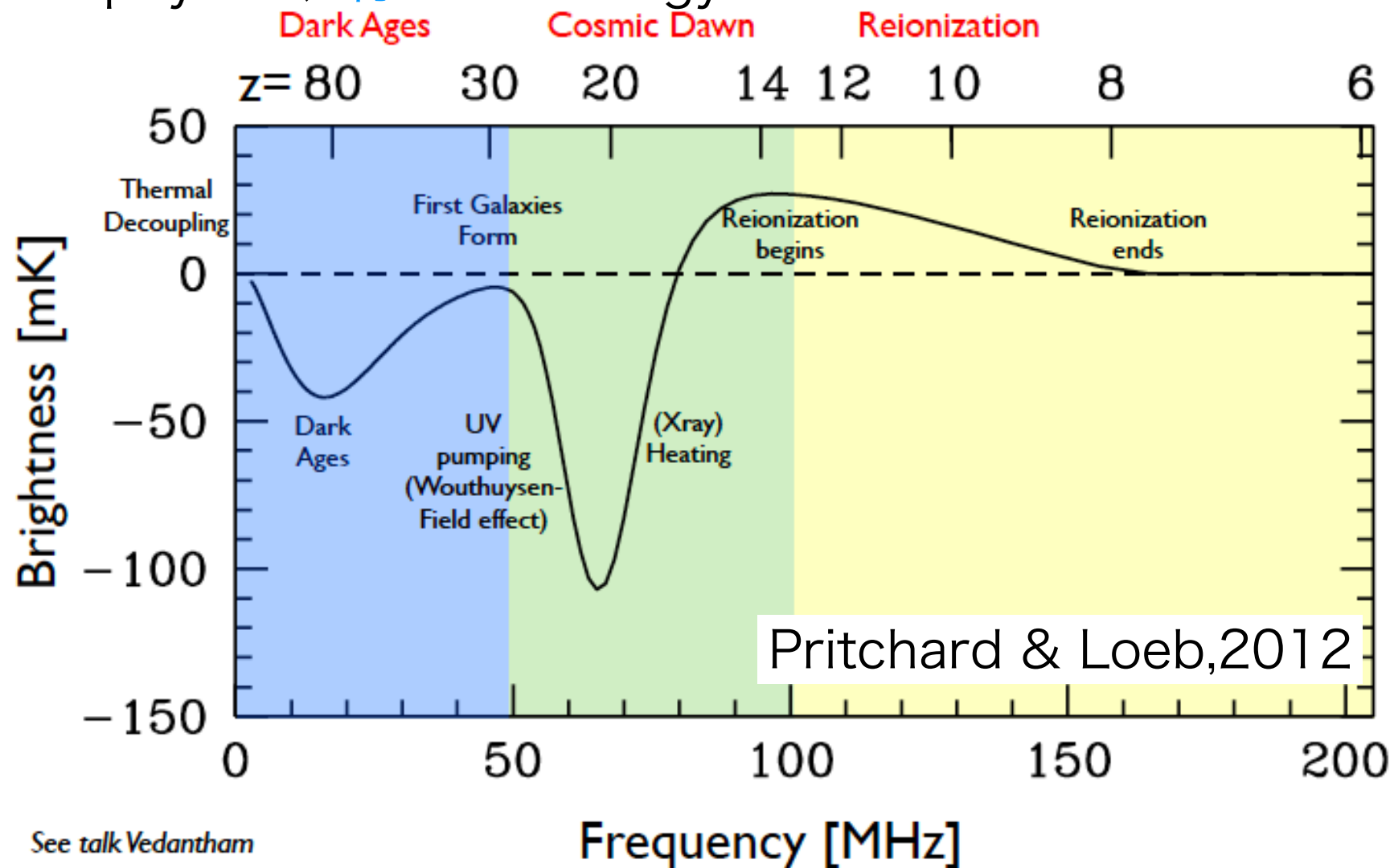
○ Brightness temperature

田代さんトーク

$$\delta T_b(\nu) = \frac{T_S - T_\gamma}{1+z} (1 - e^{-\tau_{\nu 0}})$$

$$\sim 27 \underbrace{(x_H)}_{\text{赤}} \underbrace{(1 + \delta_m)}_{\text{青}} \left(\frac{H}{\underbrace{dv_r/dr}_{\text{青}} + H} \right) \left(1 - \underbrace{\frac{T_\gamma}{T_S}}_{\text{赤}} \right) \left(\frac{1+z}{10} \frac{0.15}{\Omega_m h^2} \right)^{1/2} \left(\frac{\Omega_b h^2}{0.023} \right) [\text{mK}].$$

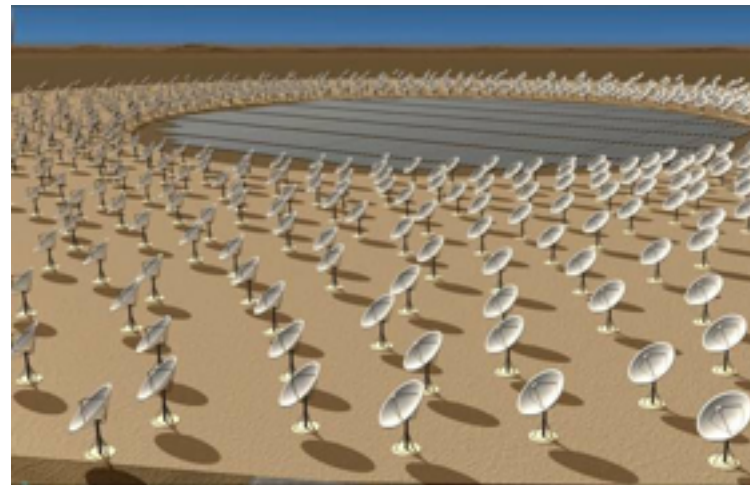
赤 : astrophysics、青 : cosmology



See talk Vedantham

Constraints

- ・ EoR開始時期や、その期間の情報を知るためには、中性水素からの21cm線の観測が有効。
- ・ SKAによる観測計画が現在進んでいる。(2020年~ SKA 1始動予定. 集光面積: $\sim \text{km}^2$, 視野: $5^\circ \times 5^\circ$, 分解能: 1分角)



- ・ SKA1 (SKAの10%程度のスペック)では、まずは、21cm線の揺らぎの統計的性質を探る。→Power spectrum

$$\langle \delta(\mathbf{k}) \delta^*(\mathbf{k}') \rangle = (2\pi)^3 \delta(\mathbf{k} + \mathbf{k}') P(k)$$

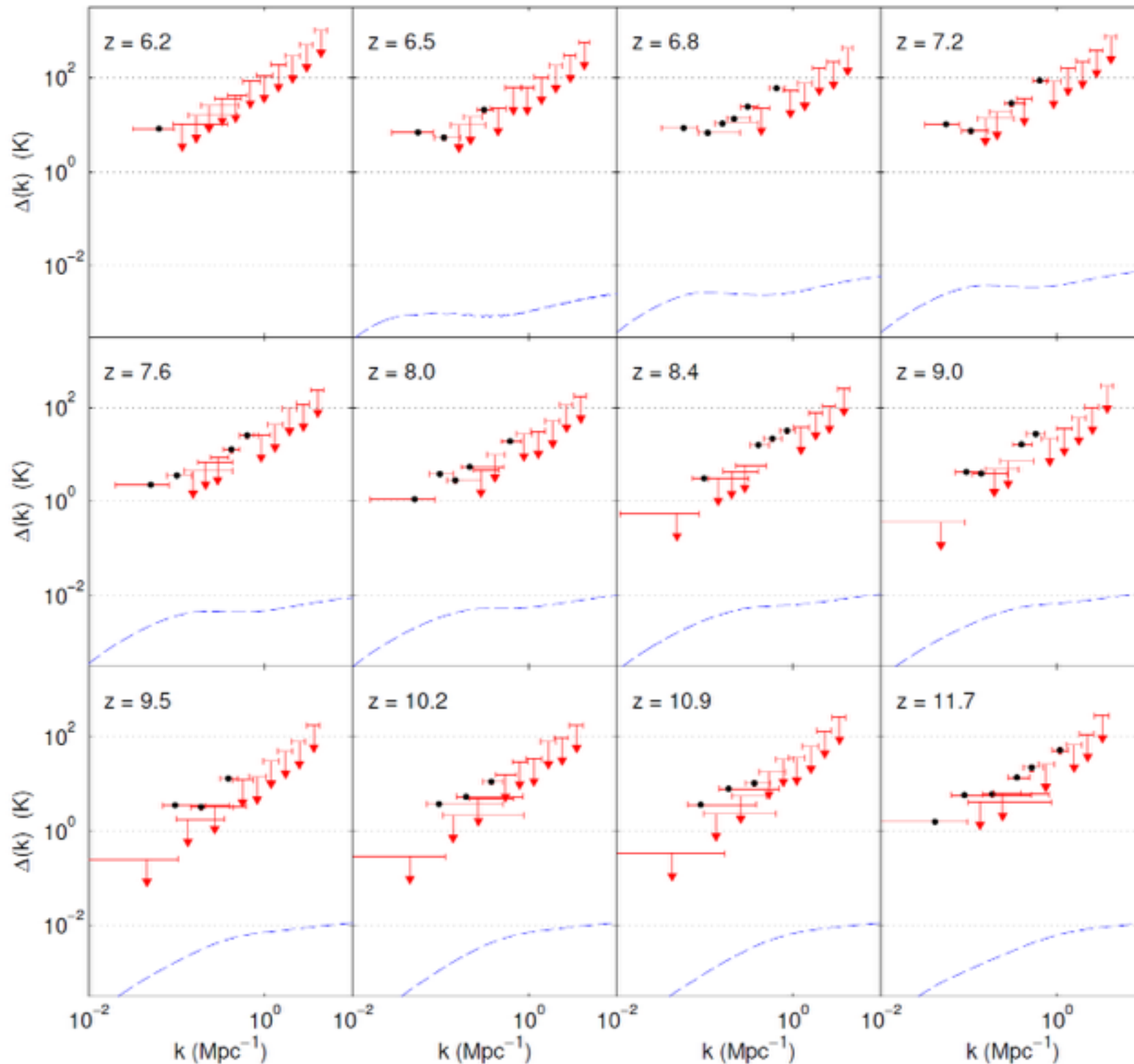
Constraints

MWA観測データ (Dillon et al 2013)

MWAでの21cm power spectrumへの制限。

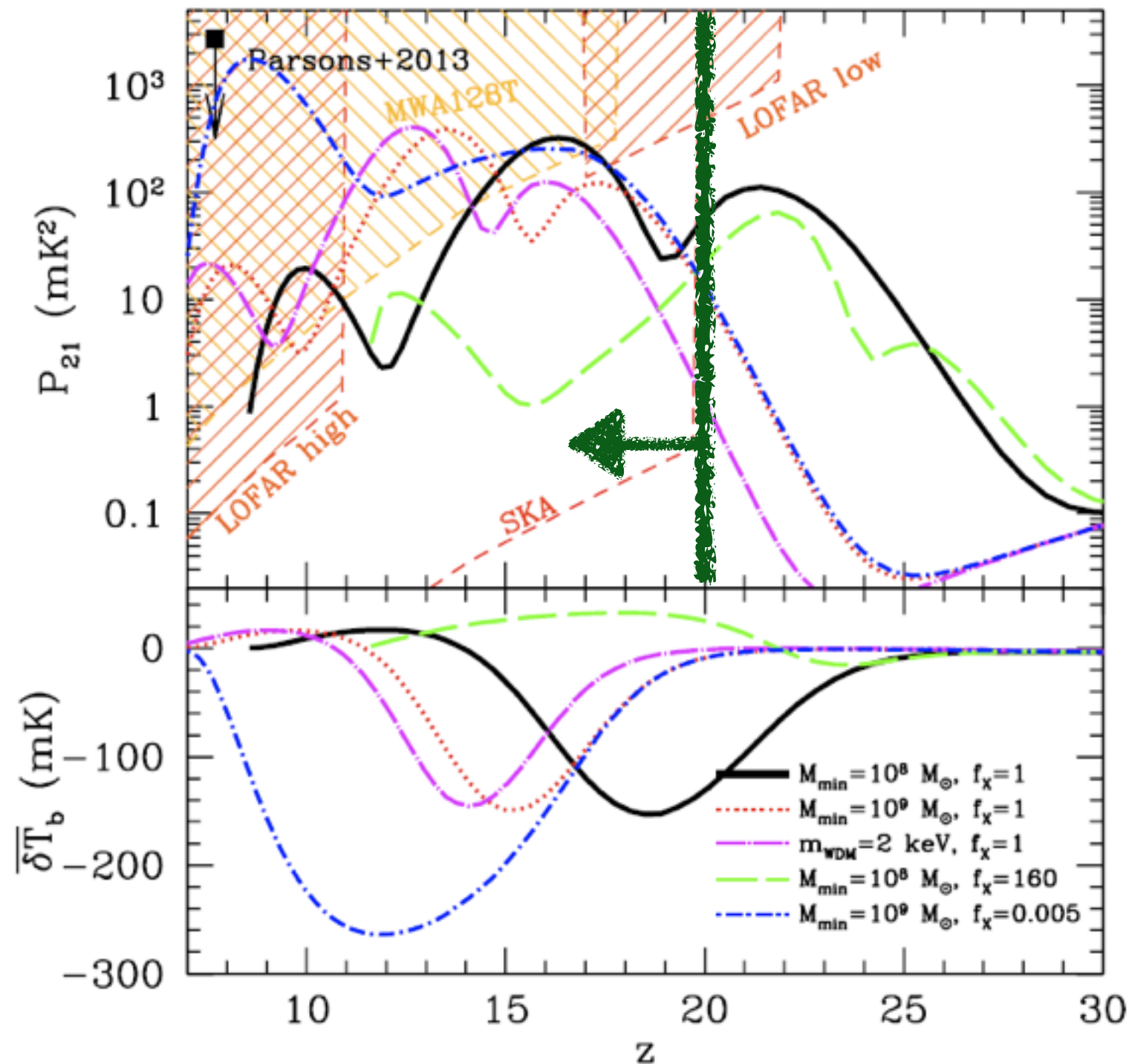
横軸：波数

あと2桁。温度にした
ら、あと1桁の感度が
求められる。



power spectrum

Mesinger et al 2013 $k=0.1 \text{ Mpc}^{-1}$



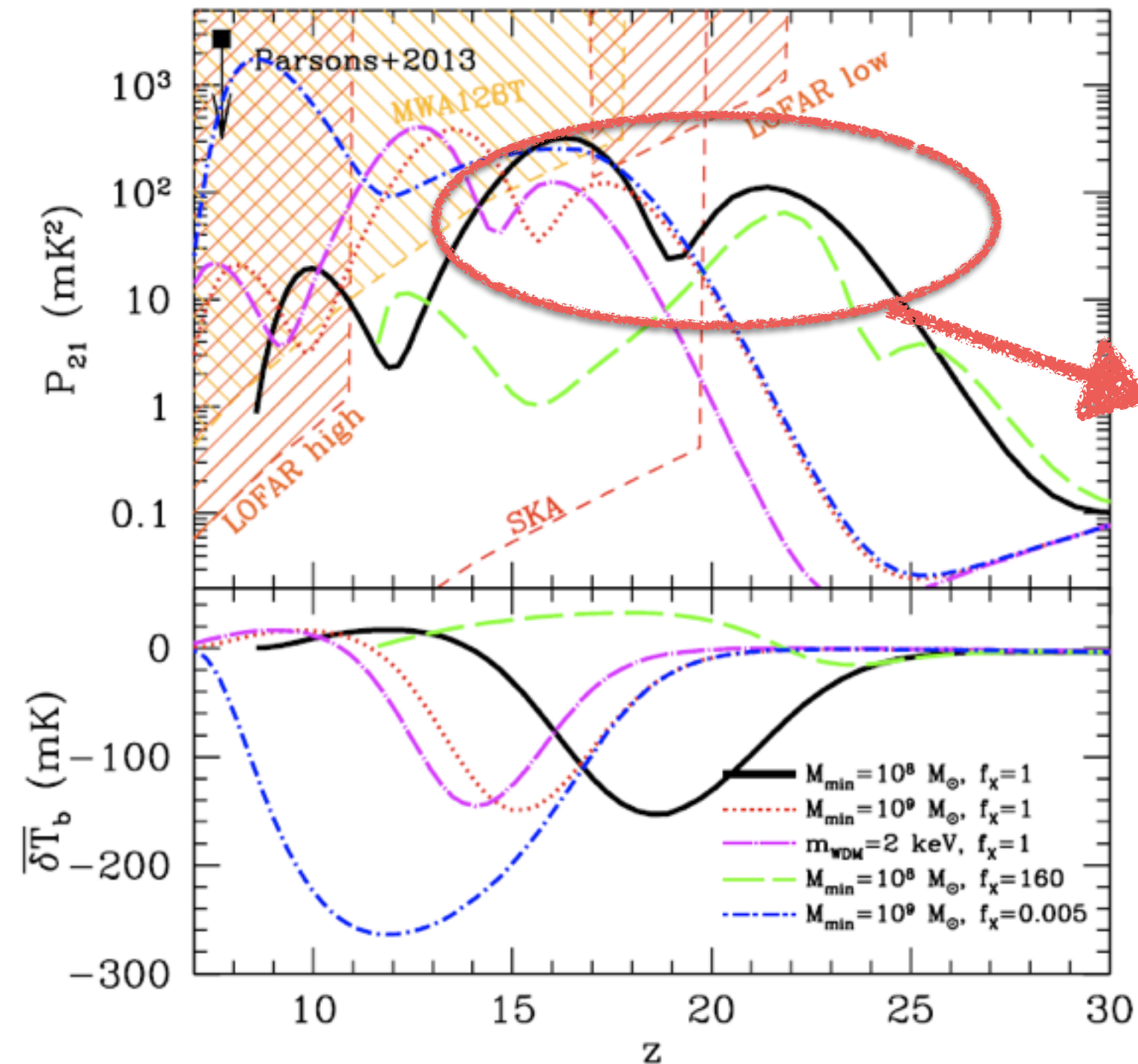
EoR historyごとのpower spectrumとsensitivity

Path finder(MWA , LOFAR)では、EoR historyのモデルによっては、21cm power spectrumは観測可能。

SKAではpower spectrumの観測によりモデルの区別が可能 ($z < 20$)

power spectrum

Mesinger et al 2014 $k=0.1 \text{ Mpc}^{-1}$



EoR以前でのpower spectrumに現れるピークの物理的解釈を詳しく知りたい。

→power spectrumの componentや1点統計を考えて、物理的な詳細を調べる。

Evolution of 21 cm power spectrum

Method

今回は、brightness temperatureのmapを作成するのに
[21cmFAST](#) (Mesinger et al 2010)を使用。(200Mpc³, 300³ grid)

○密度揺らぎの計算はZel'dovich近似

+

○イオン化率の時間発展や、heatingのプロセスはanalyticなmodelを使用。
(Furlanetto & Loeb, 2004)

○パラメータとして動かせるのは、イオン化効率や、星から出るUV光子やX線光子の量など。

Decomposed 21 cm power spectrum

各揺らぎからの寄与を見る。

brightness temperatureを平均値＋揺らぎに展開

$$\delta T_b = (\overline{\delta T_b})(1 + \delta_m)(1 + \delta_{x_H})(1 + \delta_\eta)$$

$$\eta = 1 - T_\gamma/T_S$$

各々のpower spectrumを計算

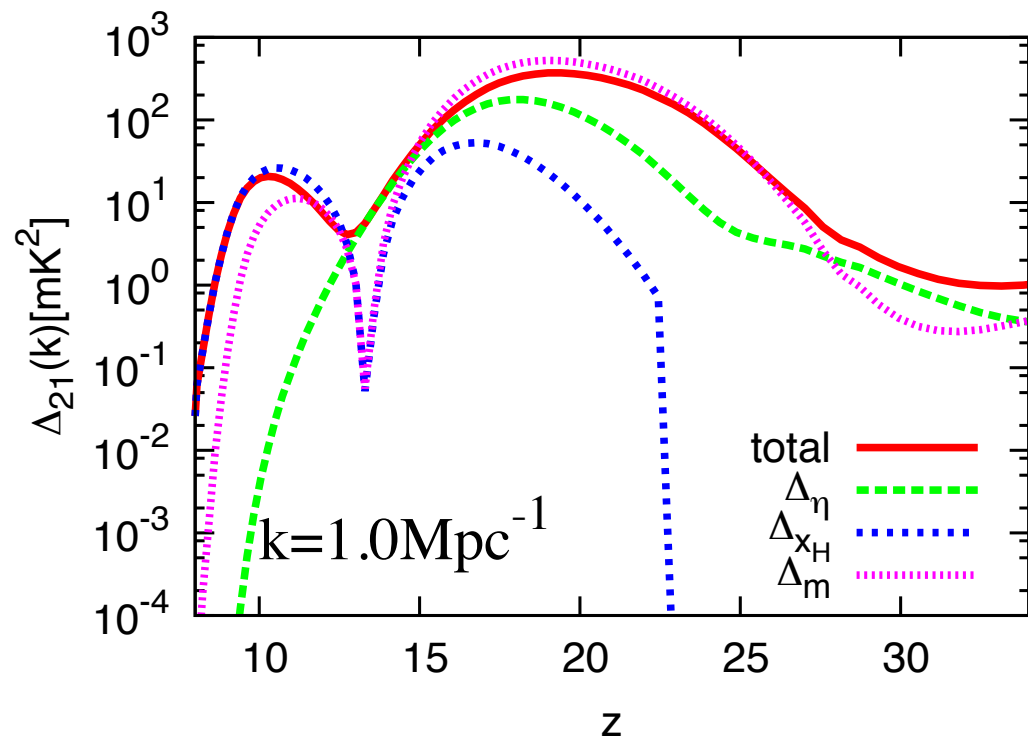
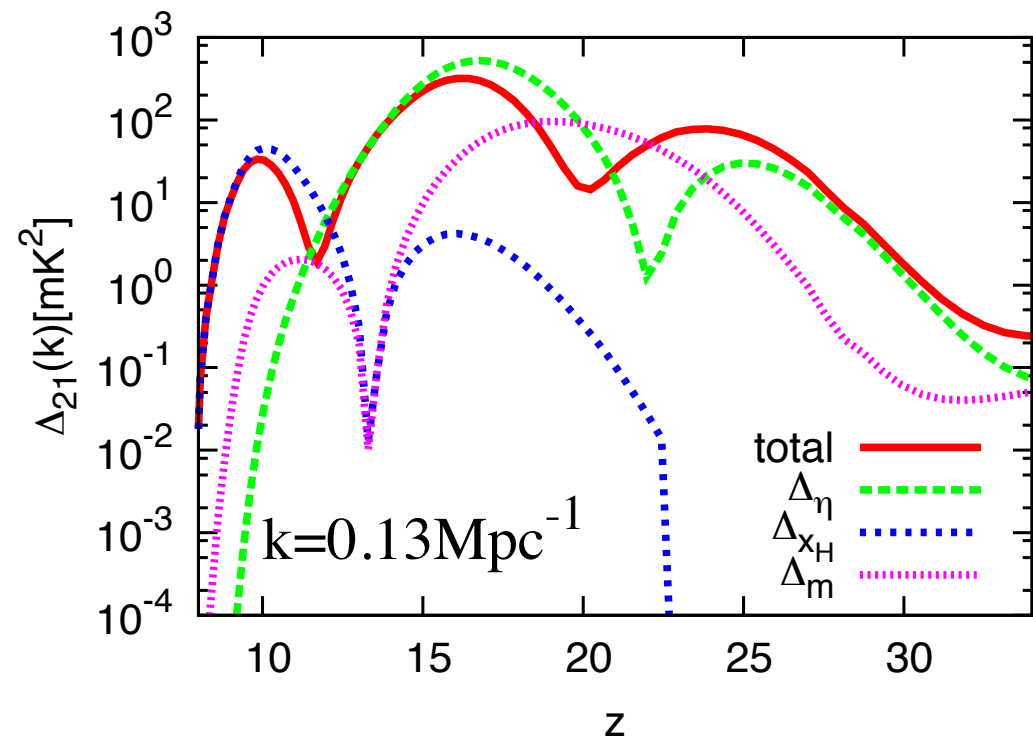
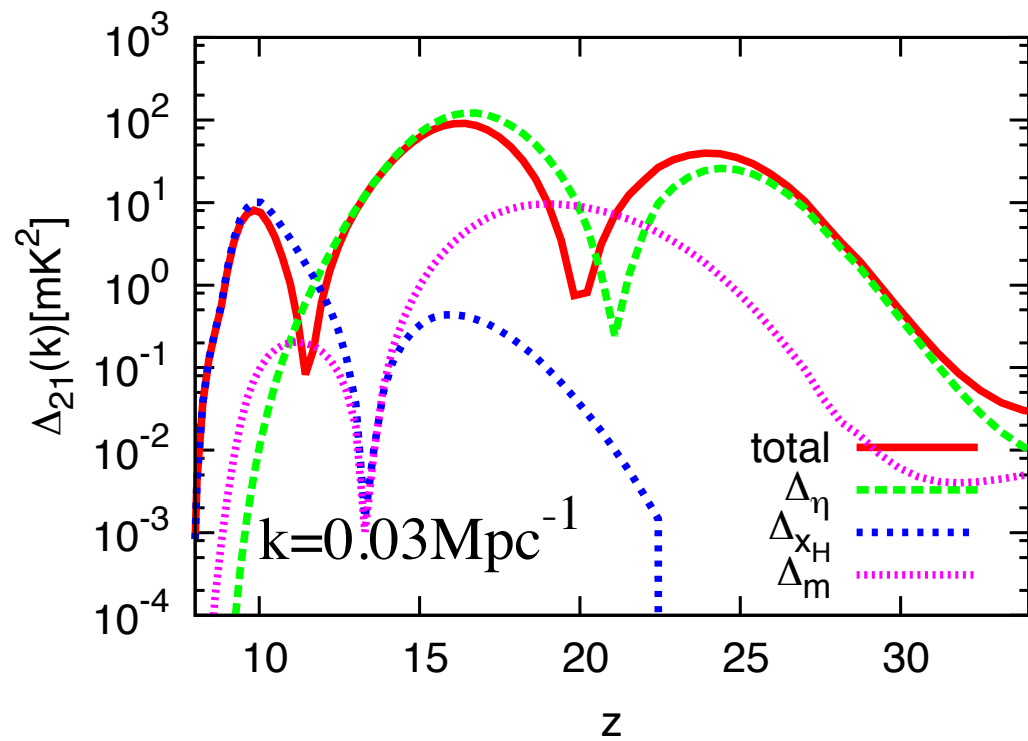
$$\langle \delta_m(\mathbf{k})\delta_m(\mathbf{k}') \rangle = (2\pi)^3 \delta(\mathbf{k} + \mathbf{k}') P_m(\mathbf{k}).$$

$$\langle \delta_H(\mathbf{k})\delta_H(\mathbf{k}') \rangle = (2\pi)^3 \delta(\mathbf{k} + \mathbf{k}') P_{x_H}(\mathbf{k}).$$

$$\langle \delta_\eta(\mathbf{k})\delta_\eta(\mathbf{k}') \rangle = (2\pi)^3 \delta(\mathbf{k} + \mathbf{k}') P_\eta(\mathbf{k}).$$

各揺らぎは
21cmFASTで計算
(Mesinger et al
2010)。

Decomposed 21 cm power spectrum

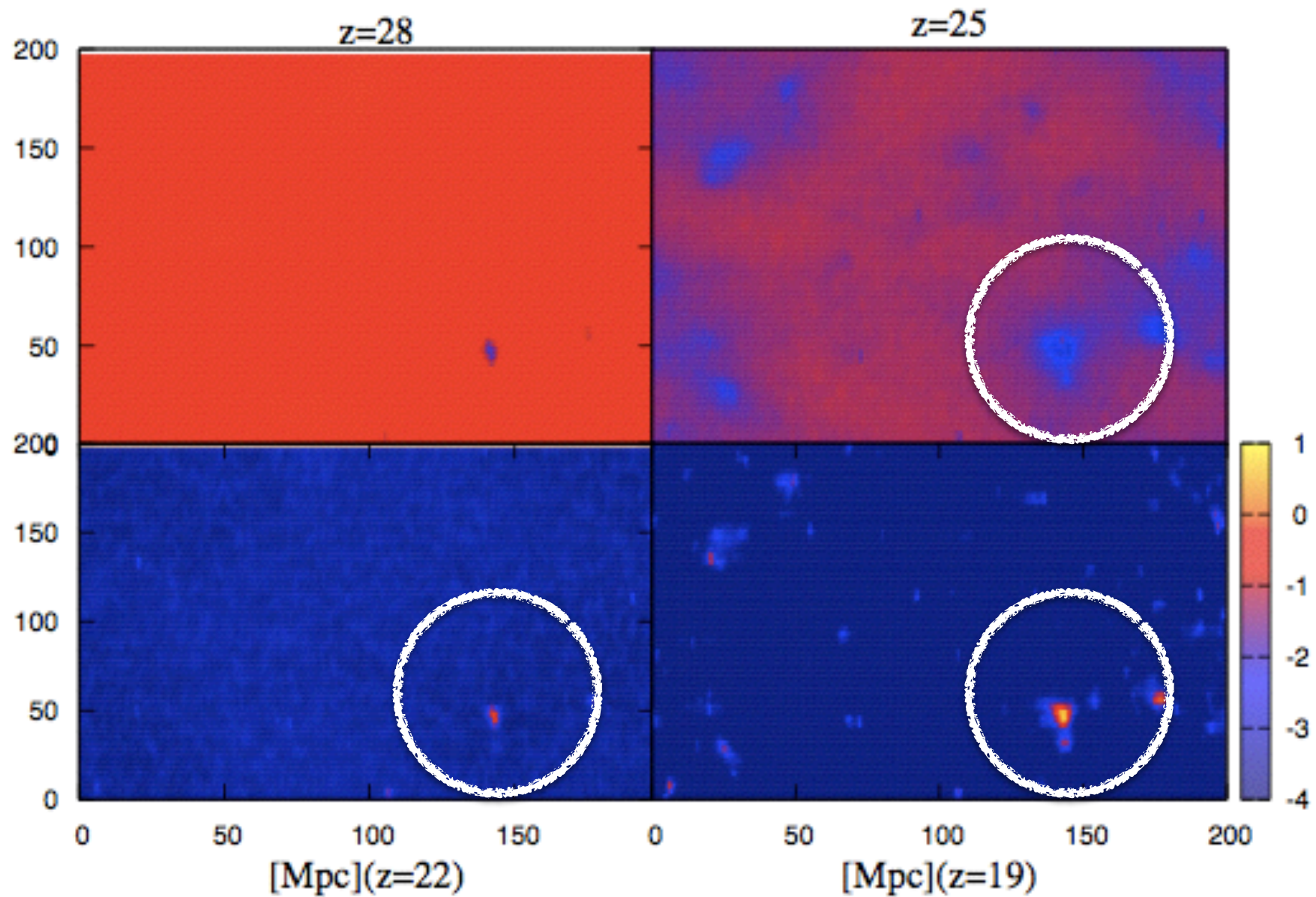


EoR以前では、 η による揺らぎがeffective。 η に注目する。
→ WF effect, X-ray heating

EoRでは $x_{\{H\}}$ による揺らぎが dominant

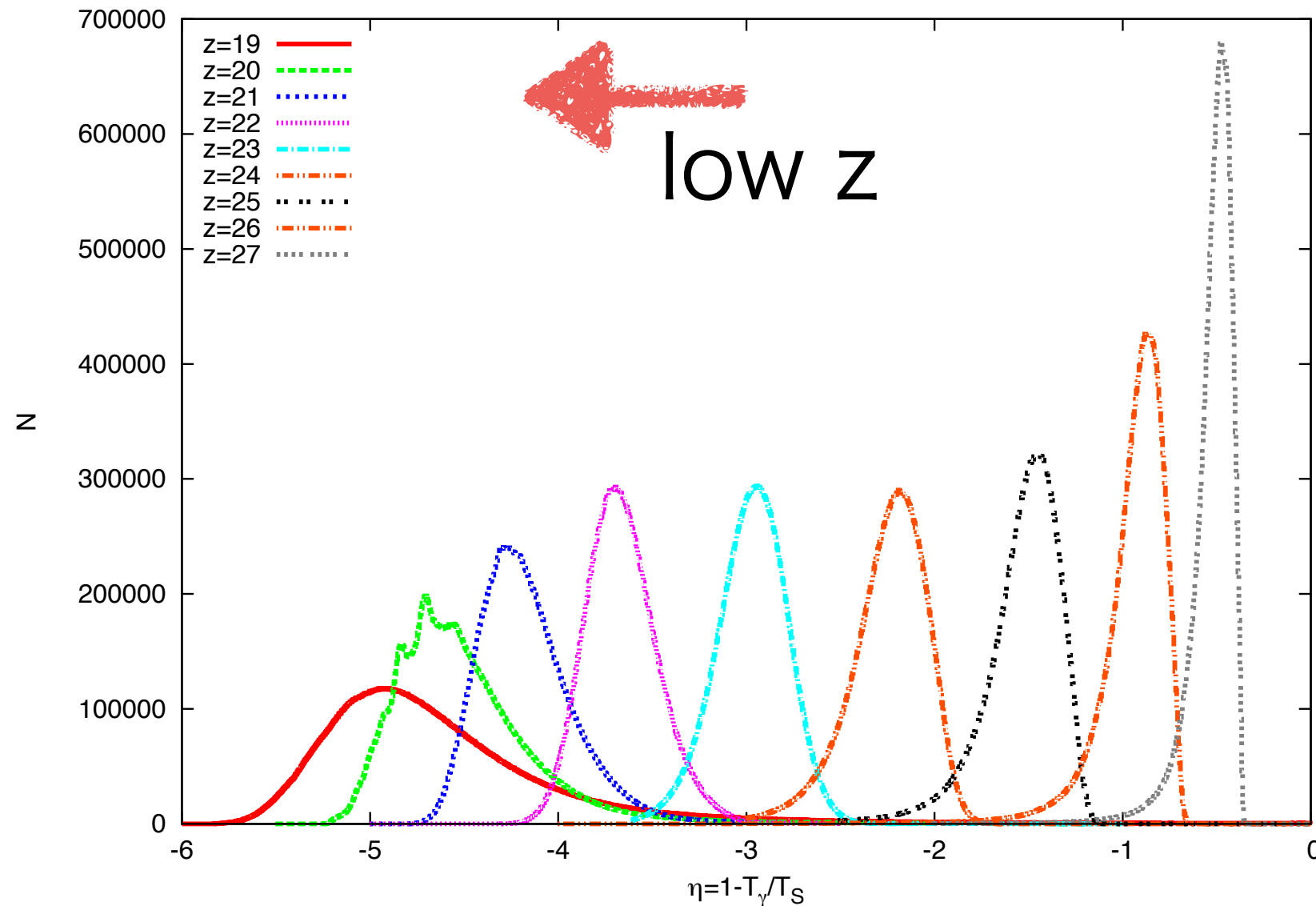
One-point statistics

Evolution of η



UV source周辺で、WF効果が始まった後、X-ray heatingが起きている様子が見られる。

Distribution of η



- $z > 25$ で low η 側の tail が伸びていく。→ WF 効果。
- X-ray heating が始まると、gaussian 分布に近づく。
- さらに加熱が進むと、high η 側の tail が伸びる。

Variance and skewness

○variance and skewness

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X - \bar{X}]^2$$

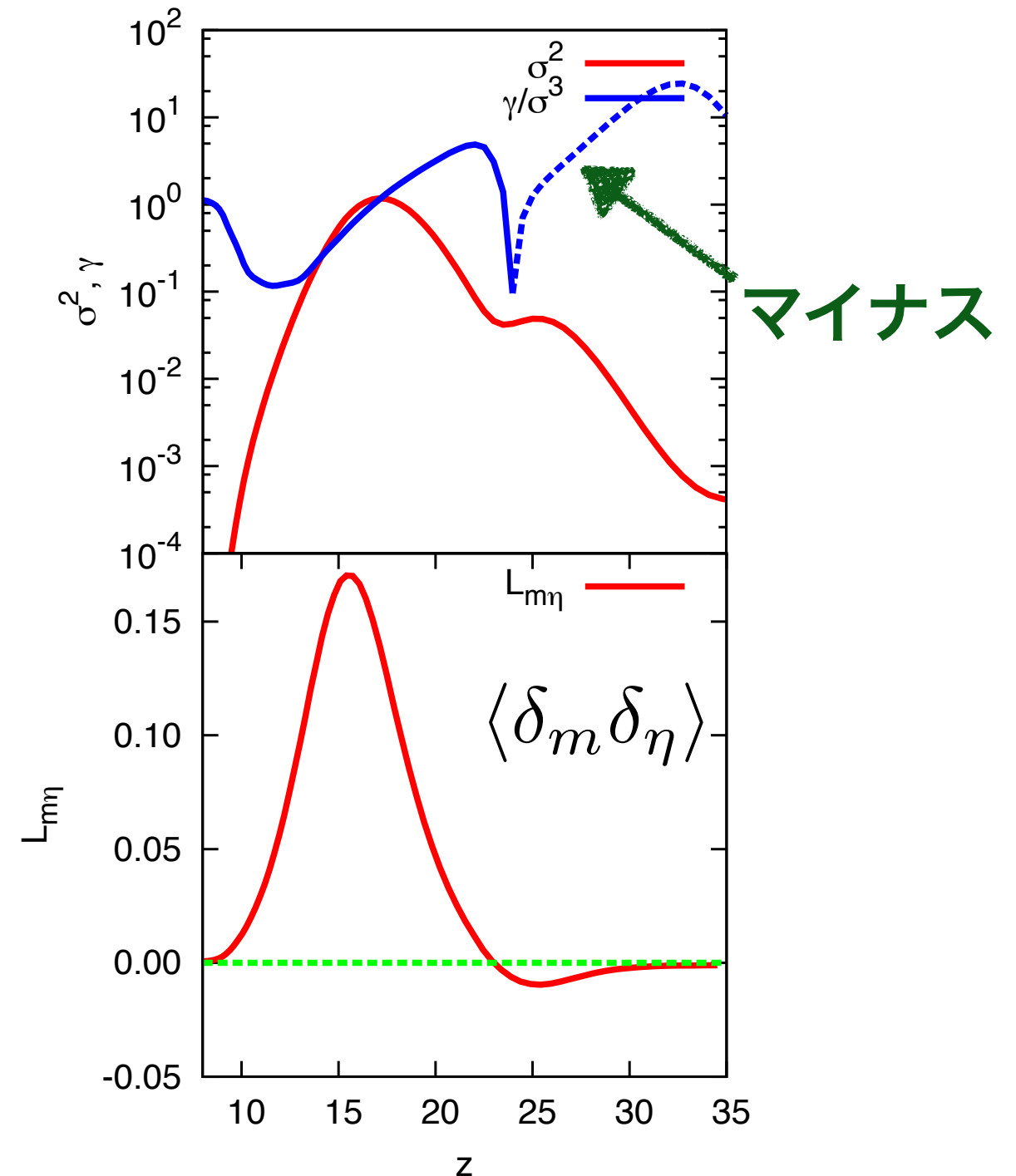
$$\gamma = \frac{1}{N\sigma^3} \sum_{i=1}^N [X - \bar{X}]^3$$

tailが左側→マイナス

tailが右側→プラス

○variance→tailの長さを反映

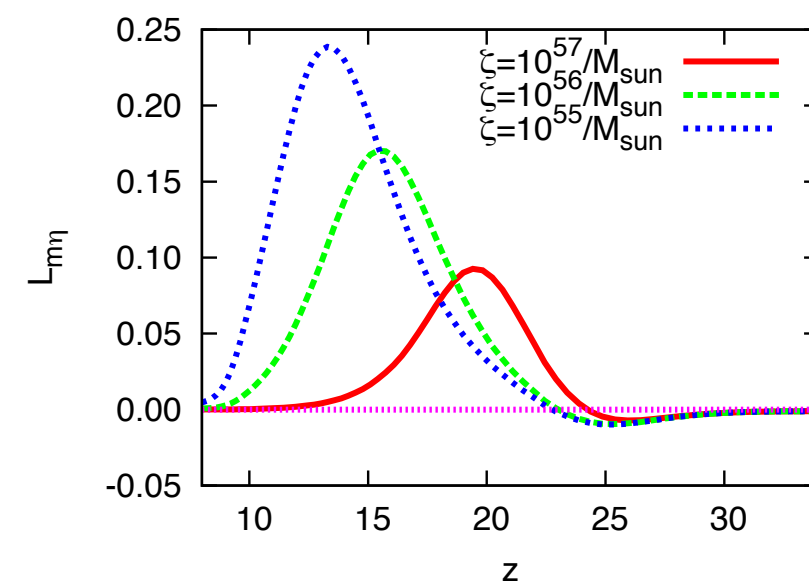
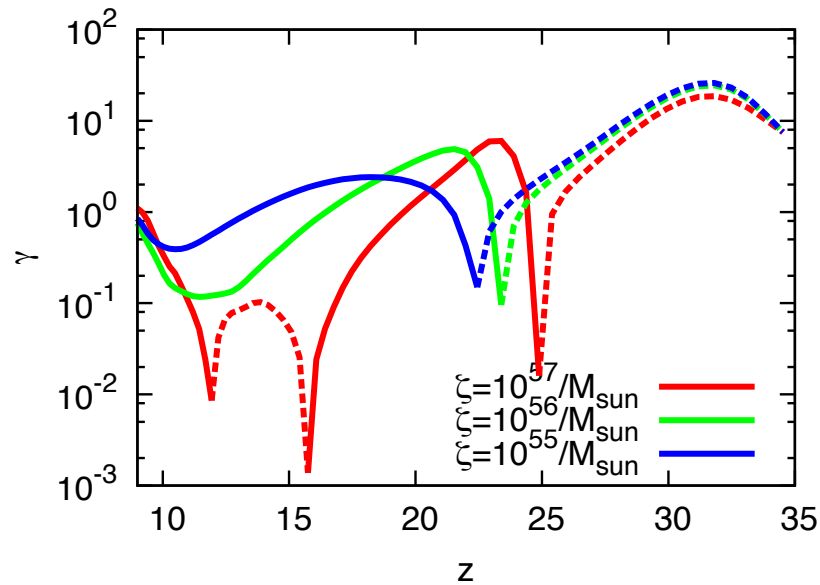
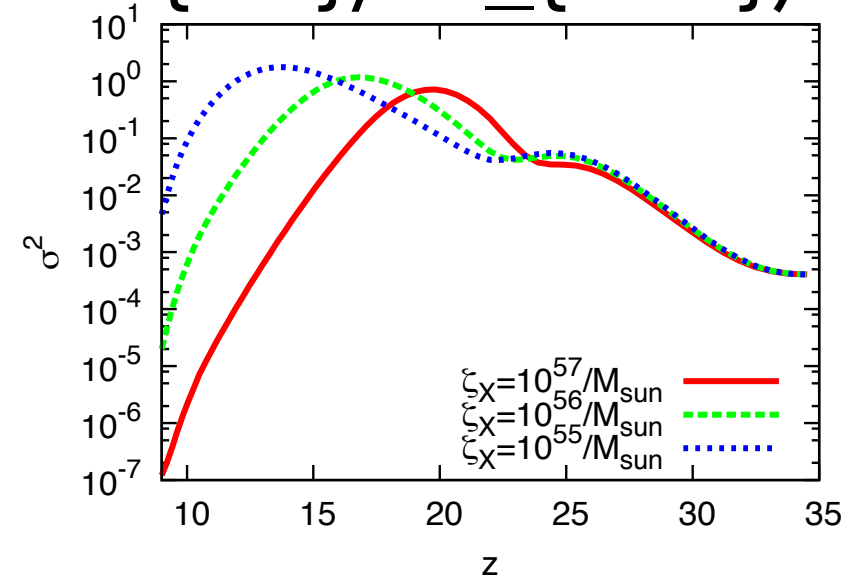
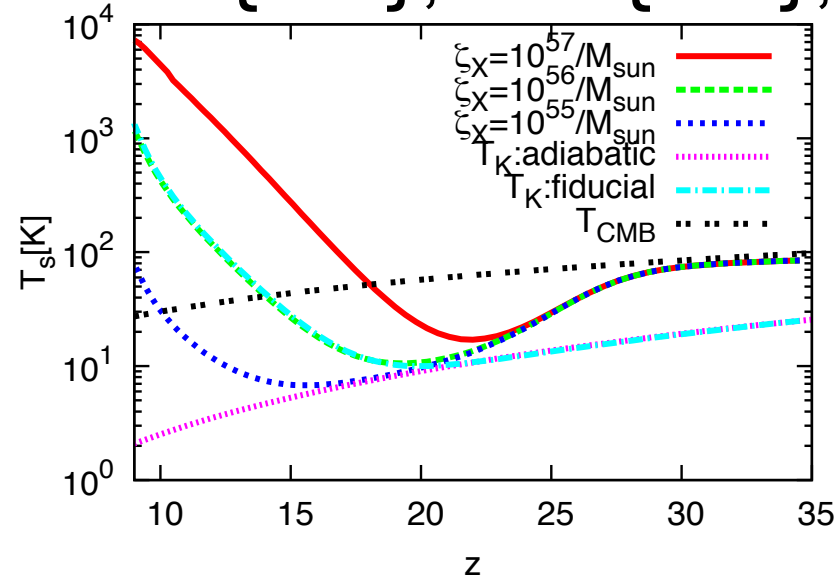
○skewness→WF効果、X-ray heatingで符号が変わる。



Various X-ray models

太陽質量あたりのX-ray photonの数を変化させる。

($\zeta_X = 10^{57}, 10^{56}, 10^{55} / M_{\text{sun}}$)



varianceやskewnessのピーク的位置がシフト→モデルの区別

Variance and skewness of brightness temperature

実際の観測量はbrightness temperature

variance

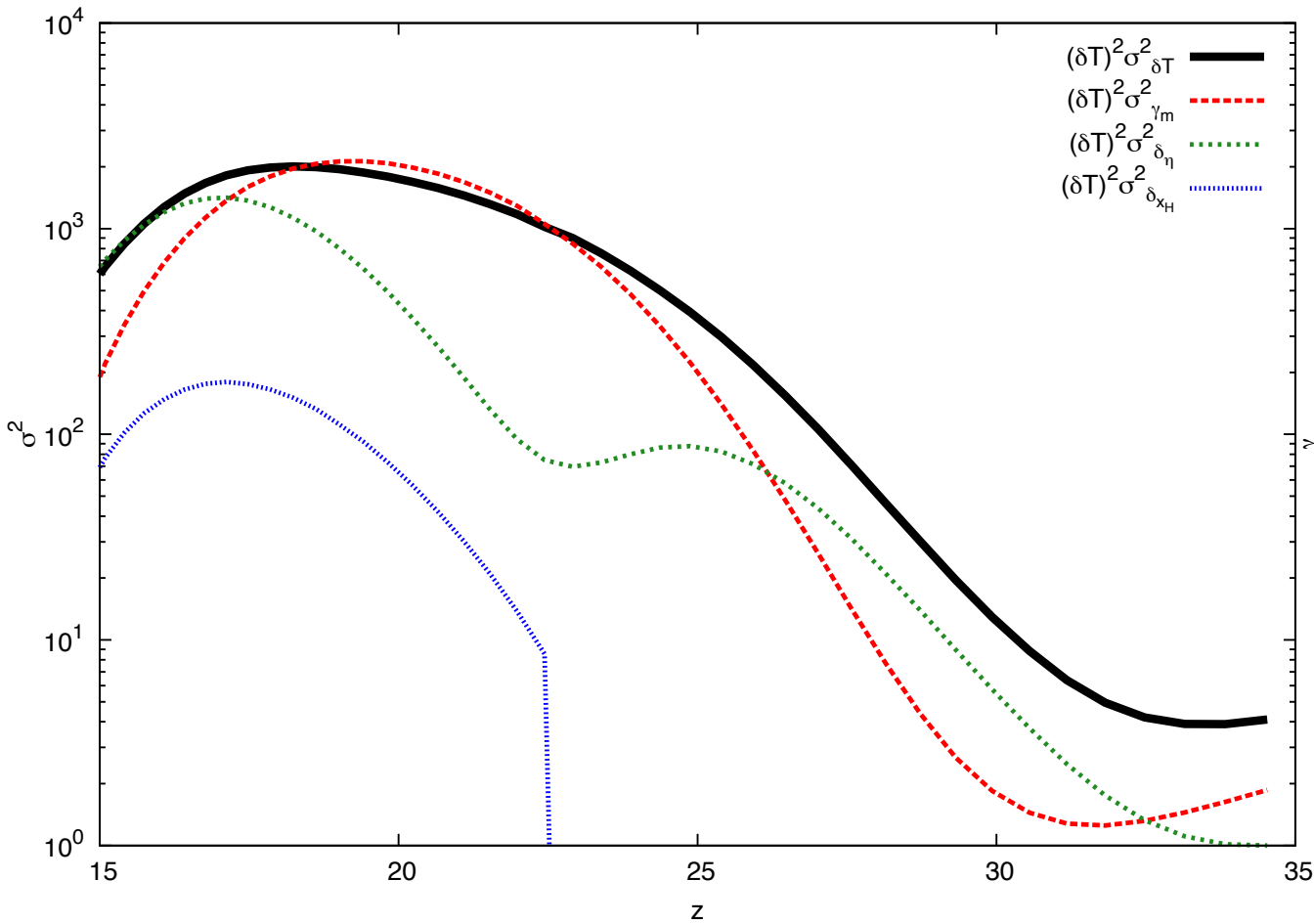
$$\sigma_{\delta T} = (\overline{\delta T})^2 \left[\sigma_{\delta_m} + \sigma_{\delta_\eta} + \sigma_{\delta_{x_H}} + \langle \delta_m \delta_\eta \rangle + \langle \delta_m \delta_{x_H} \rangle + \langle \delta_\eta \delta_{x_H} \rangle + O(\delta^3) \right].$$

skewness

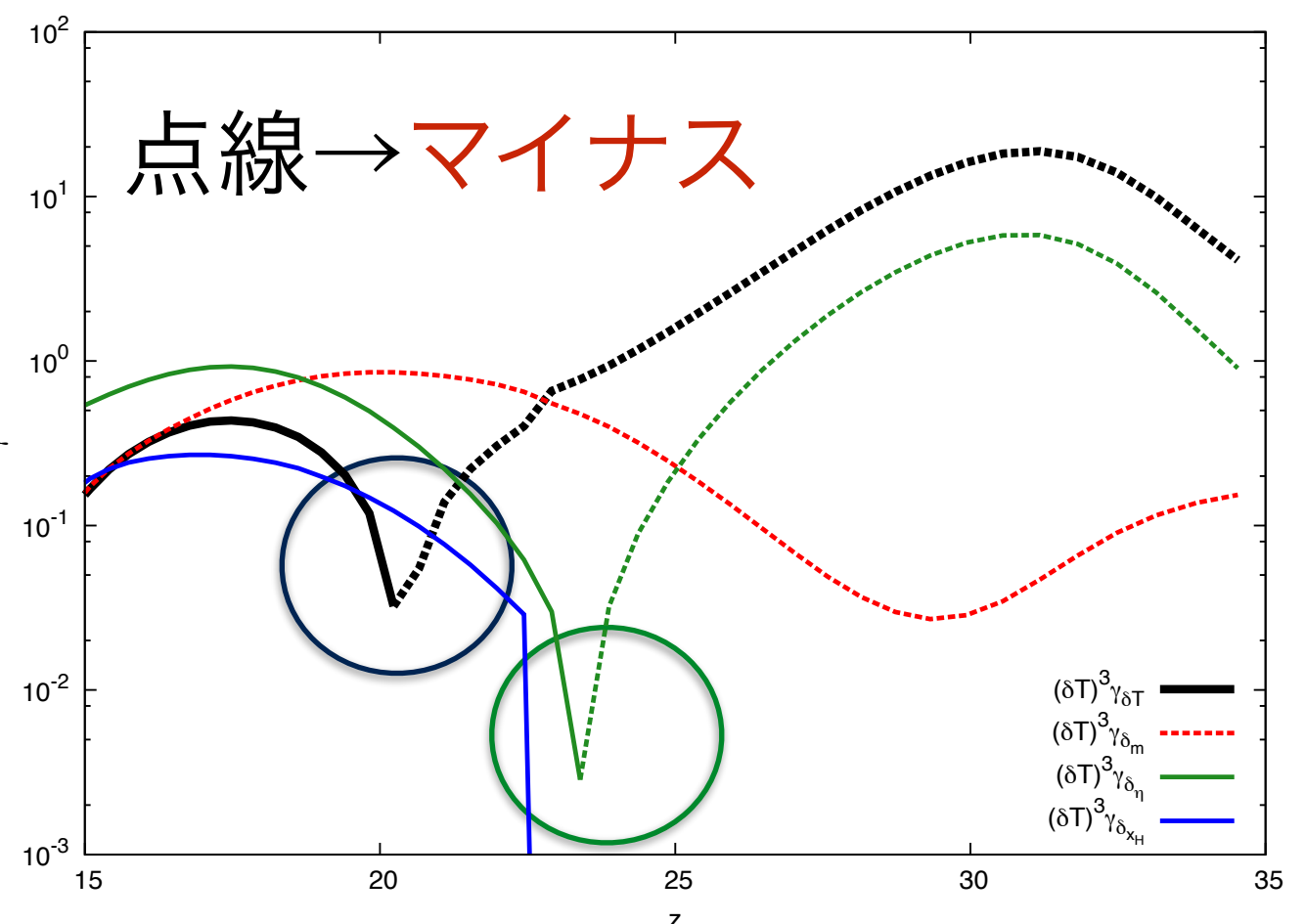
$$\gamma_{\delta T} = (\overline{\delta T})^3 \left[\gamma_{\delta_m} + \gamma_{\delta_\eta} + \gamma_{\delta_{x_H}} + \langle \delta_m \delta_\eta \delta_{x_H} \rangle \right. \\ \left. + 3(\langle \delta_m^2 \delta_\eta \rangle + \langle \delta_m^2 \delta_{x_H} \rangle + \langle \delta_\eta^2 \delta_{x_H} \rangle + \langle \delta_m \delta_\eta^2 \rangle + \langle \delta_m \delta_{x_H}^2 \rangle + \langle \delta_\eta \delta_{x_H}^2 \rangle) + O(\delta^4) \right]$$

variance&skewnessの成分のauto-correlation termをプロット。

variance



skewness



○ skewnessの符号変化の位置が η と δT で異なる。

→ matterの揺らぎによる

○ skewnessでは中性水素率の寄与がvarianceと比べて大きい。

○ 線形項だけでは、fullのvariance, skewnessに一致しない

→ 高次の項を考える必要有り。

Summary

- ・ 1 pt statisticsを用いて21 cm power spectrumの物理的解釈を行った。
- ・ 21 cm power spectrumを各componentに分解し、EoR以前では、spin temperatureの寄与が大きい事を確認。
- ・ power spectrumの振る舞いを理解するために1点統計を用いた。
- ・ skewnessはWF効果やX-ray heatingで符号を変えるので、indicatorとして使える。
- ・ power spectrumや1点統計を考える際、高次の項を無視したため評価する必要がある。→bispectrumなど。(Shimabukuro et al in prep)