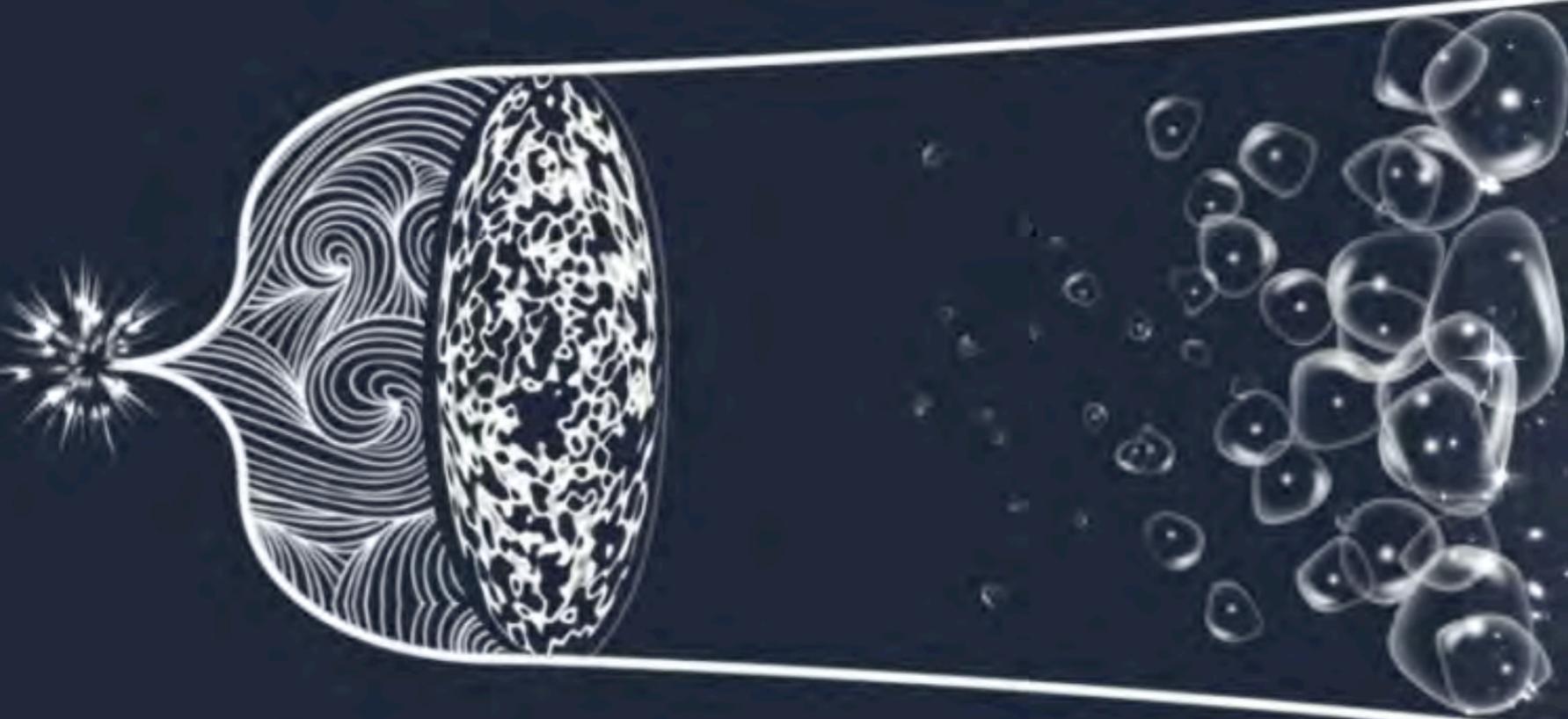
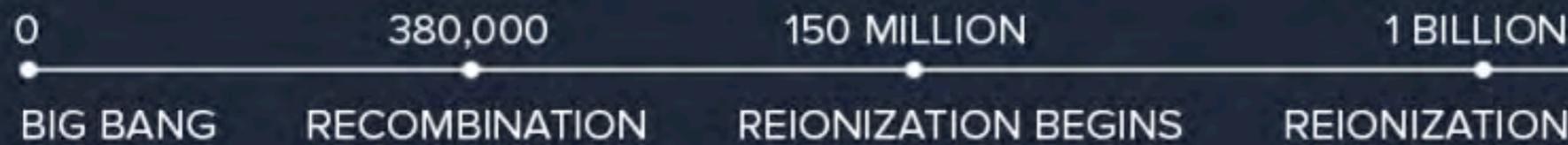




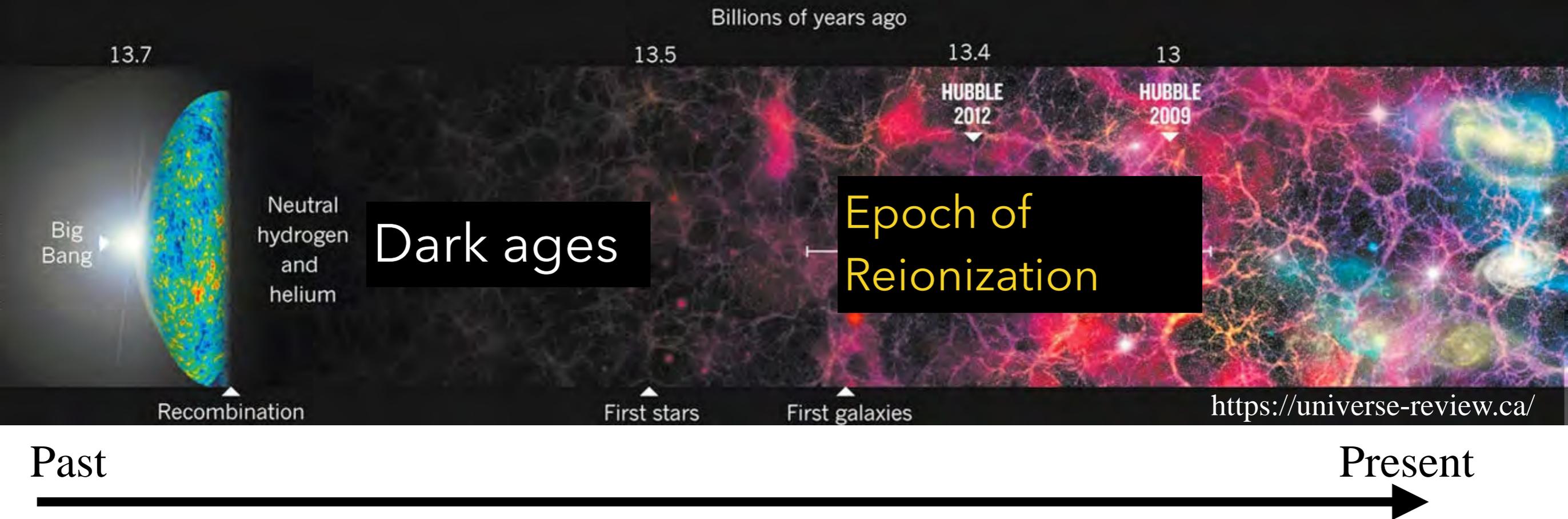
# SKAで探る宇宙再電離期



島袋隼士 (云南大学・SWIFAR)



# 宇宙の歴史

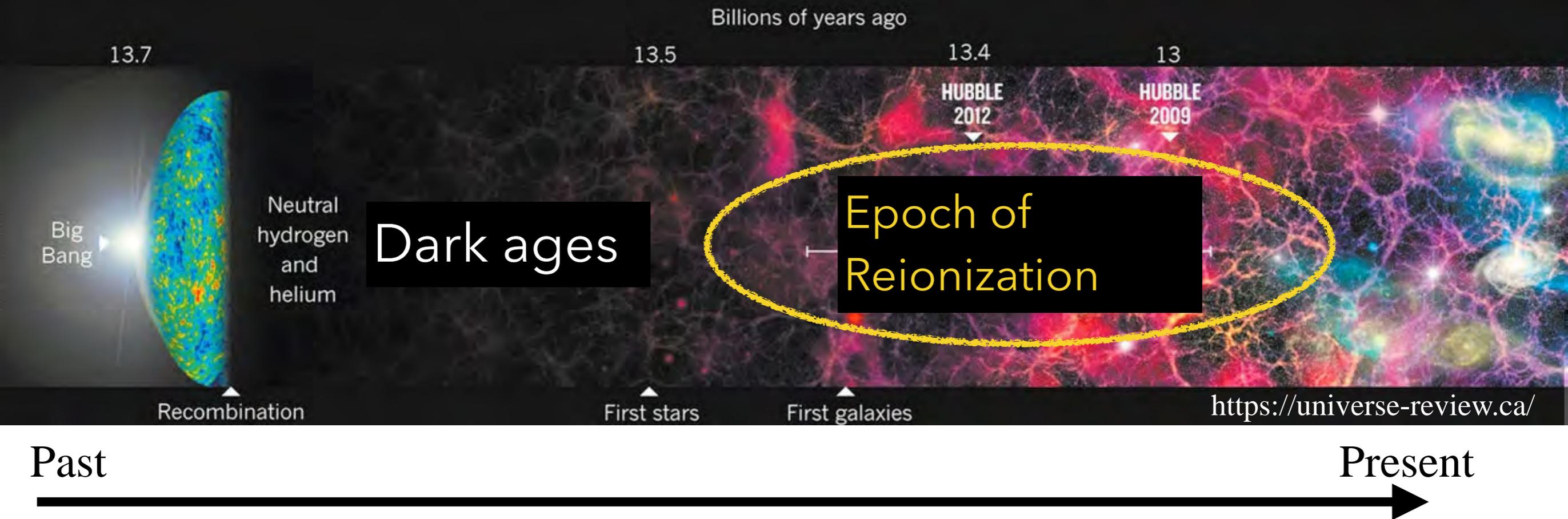


宇宙暗黒時代 (Dark Ages) . . . 星や銀河の存在しない真っ暗な時代

宇宙の夜明け (Cosmic Dawn) . . . 宇宙最初の星や銀河が作られる ( $z \sim 20-30$ ).

宇宙再電離期 (Epoch of Reionization, EoR) . . . 銀河からの紫外線光子によってIGM (銀河間物質) 中の水素が電離 ( $z \sim 6-15$ ).

# 宇宙の歴史



宇宙暗黒時代 (Dark Ages) . . . 星や銀河の存在しない真っ暗な時代

宇宙の夜明け (Cosmic Dawn) . . . 宇宙最初の星や銀河が作られる ( $z \sim 20-30$ ).

宇宙再電離期 (Epoch of Reionization, EoR) . . . 銀河からの紫外線光子によってIGM (銀河間物質) 中の水素が電離 ( $z \sim 6-15$ ).



[www.eso.org](http://www.eso.org)

Credit: M. Alvarez, R. Kaehler and T. Abel

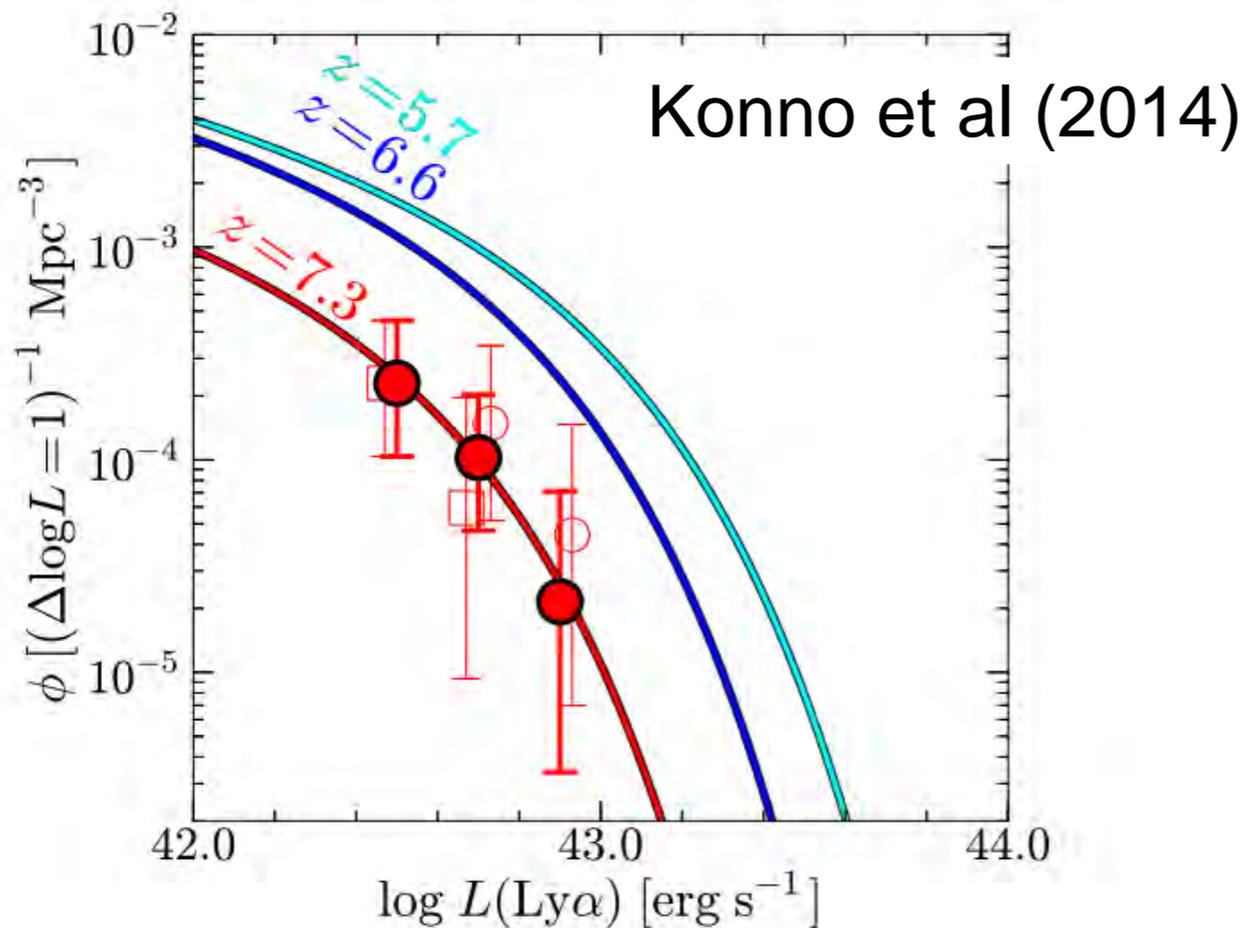


[www.eso.org](http://www.eso.org)

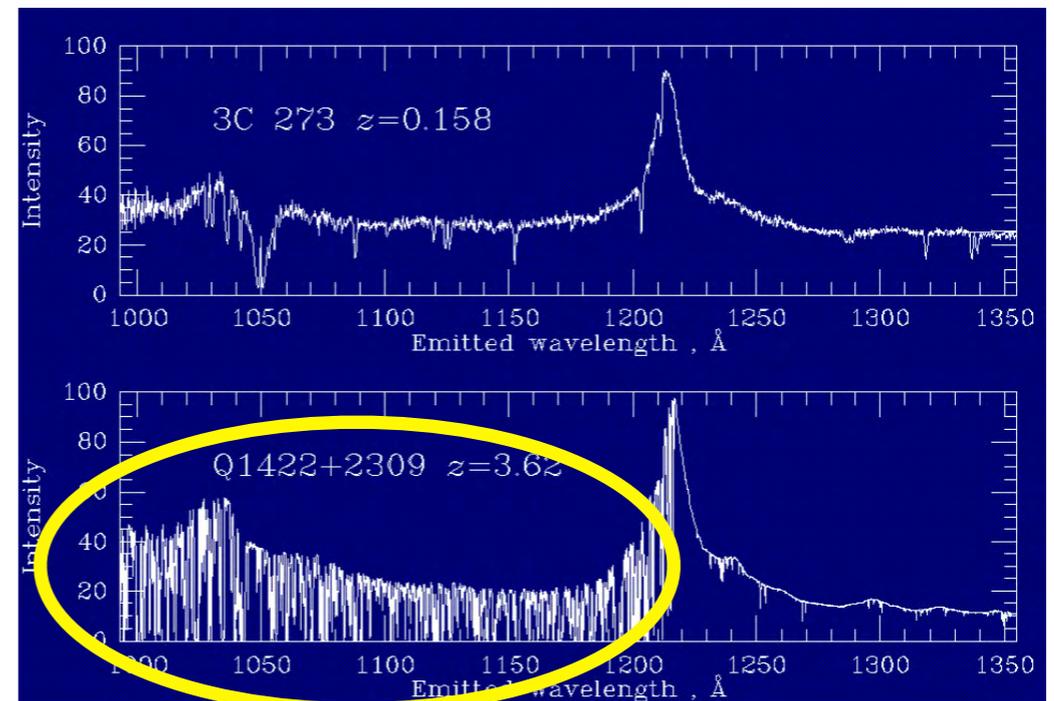
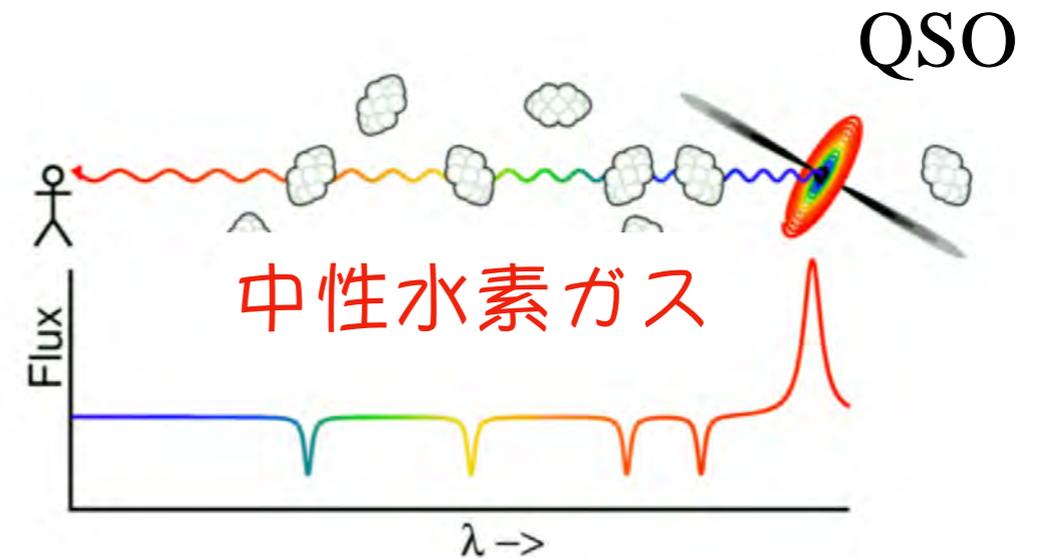
Credit: M. Alvarez, R. Kaehler and T. Abel

# 現在の観測的制限

- Lyman alpha emitter galaxies (LAE)



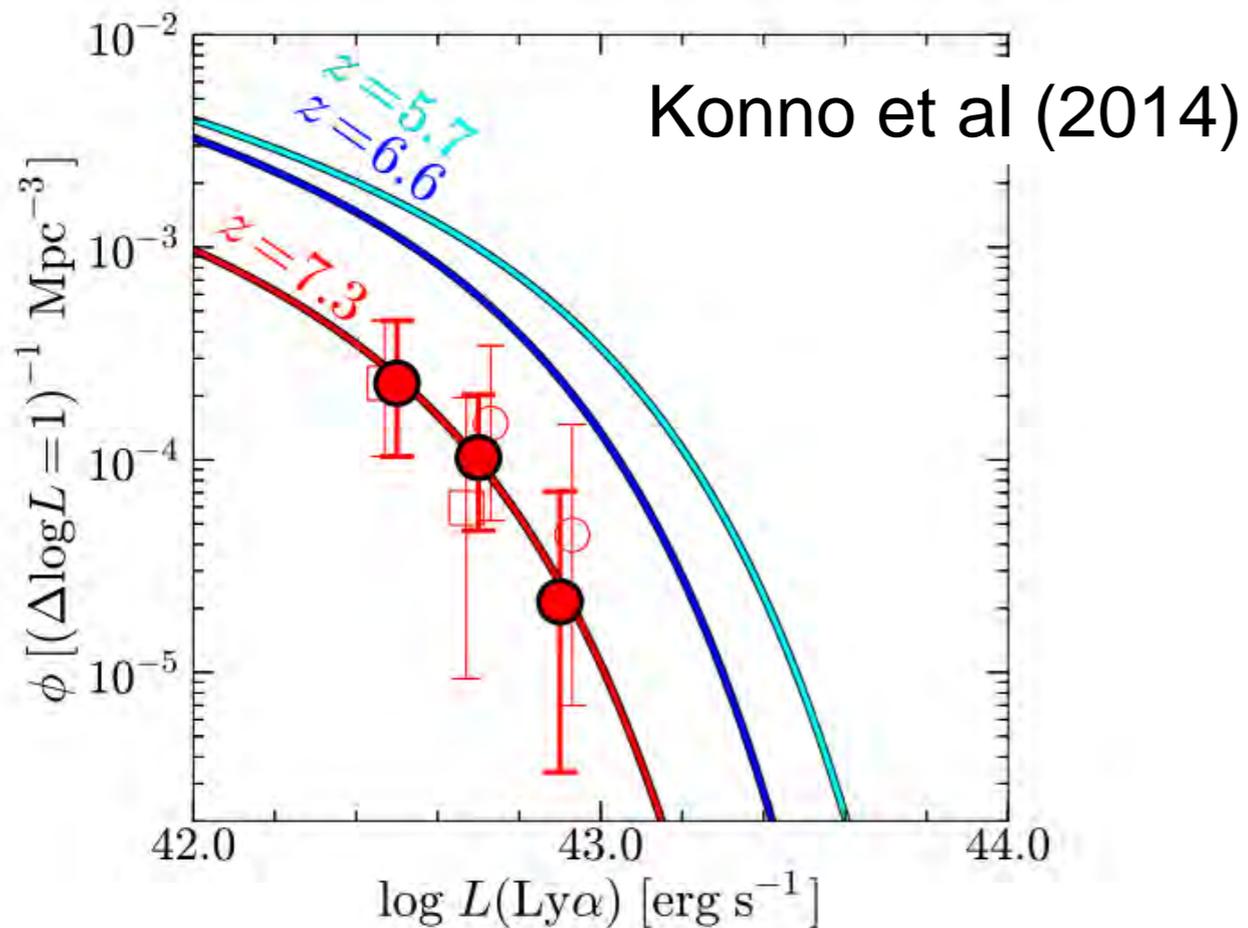
- Lyman alpha forest



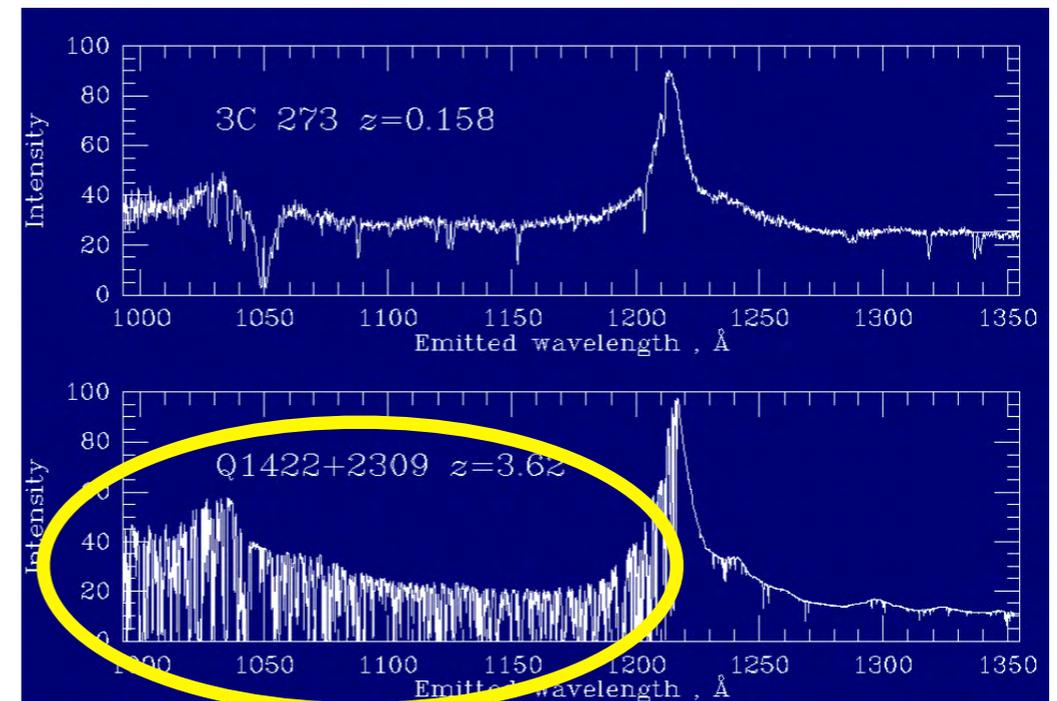
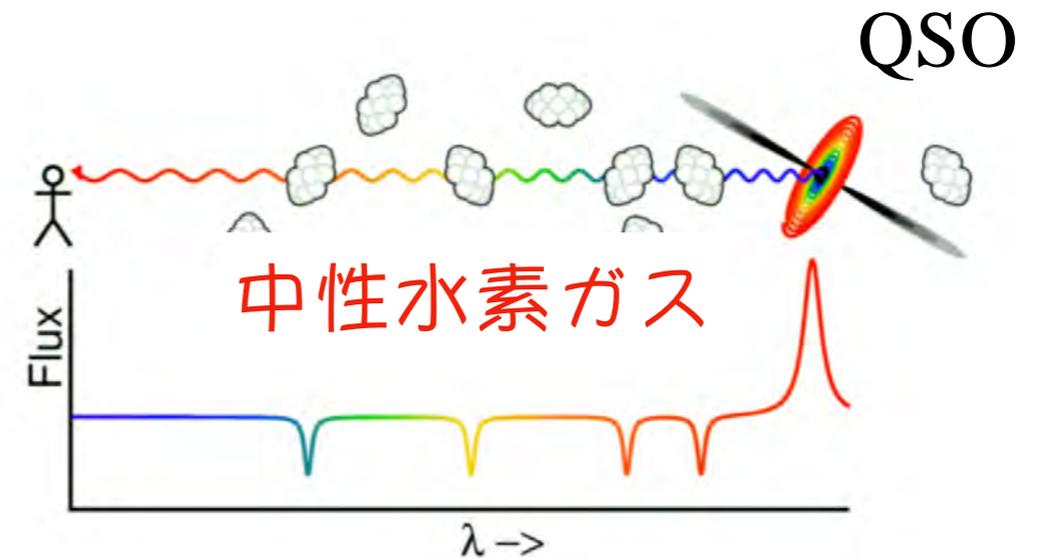
- CMB-electron Thomson scattering

# 現在の観測的制限

- Lyman alpha emitter galaxies (LAE)



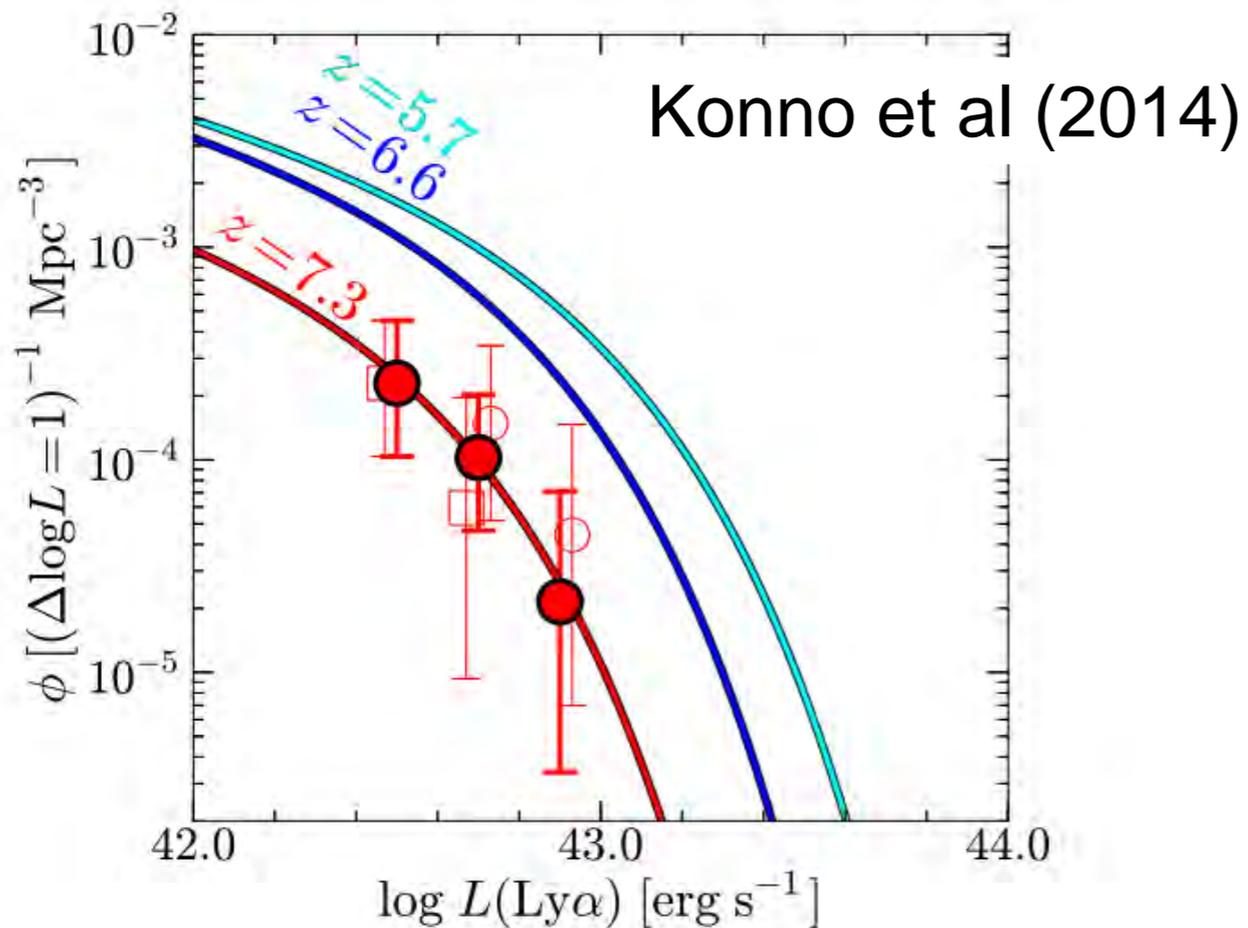
- Lyman alpha forest



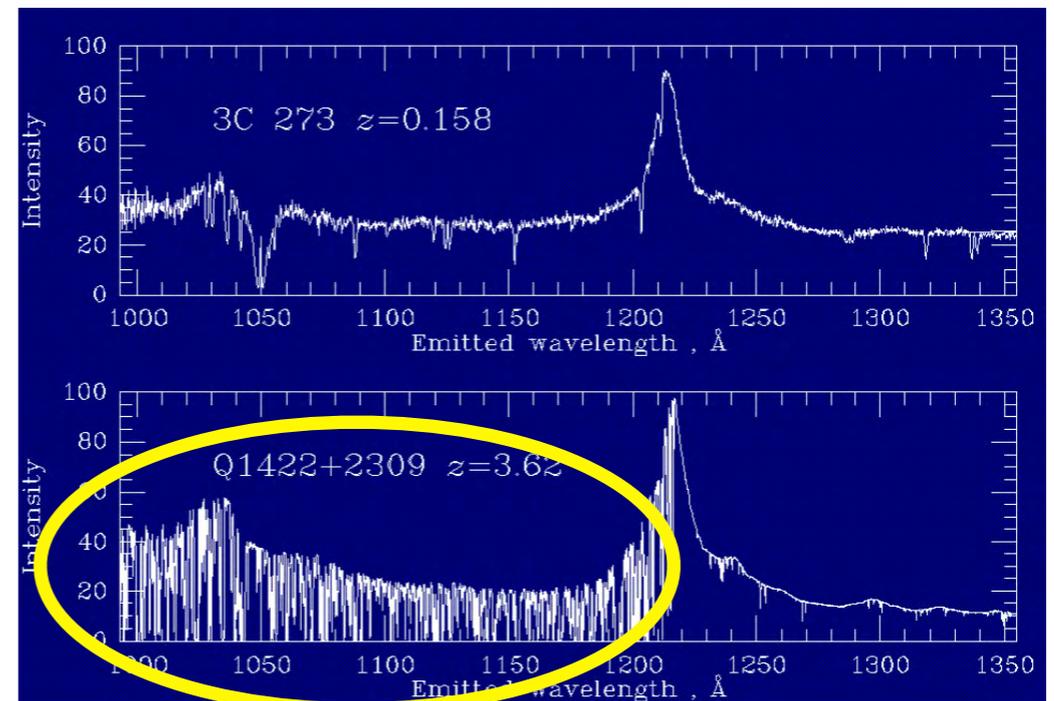
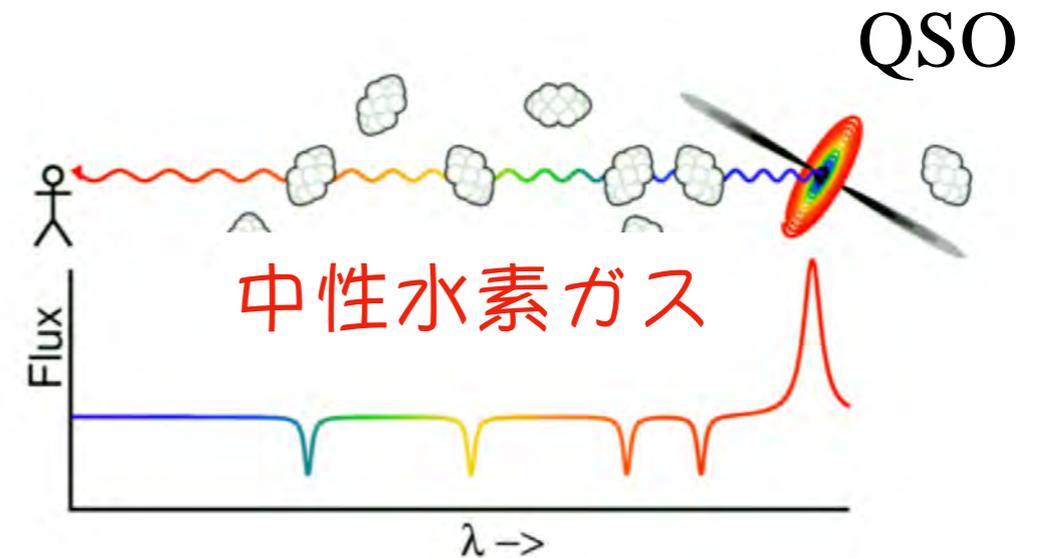
- CMB-electron Thomson scattering

# 現在の観測的制限

- Lyman alpha emitter galaxies (LAE)



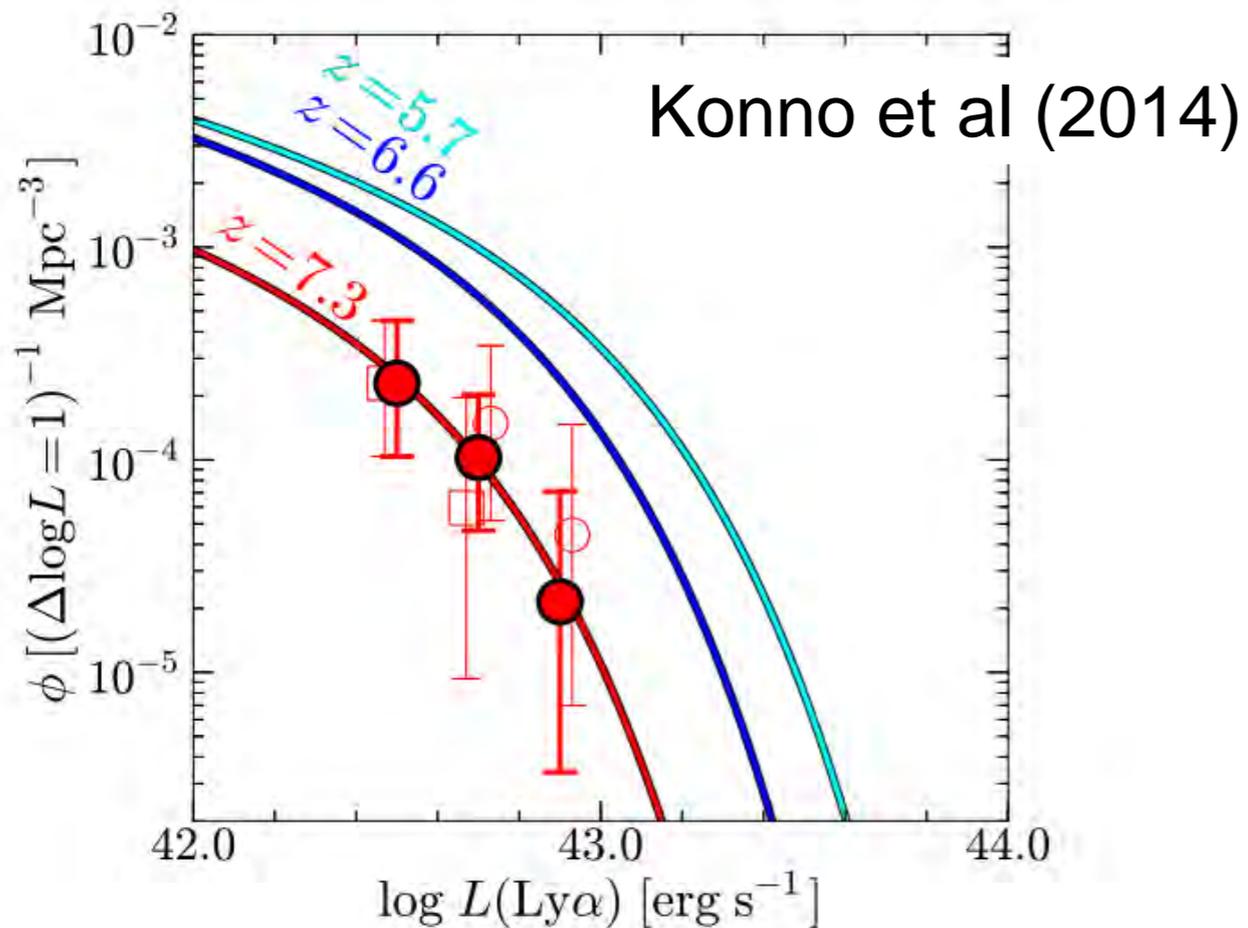
- Lyman alpha forest



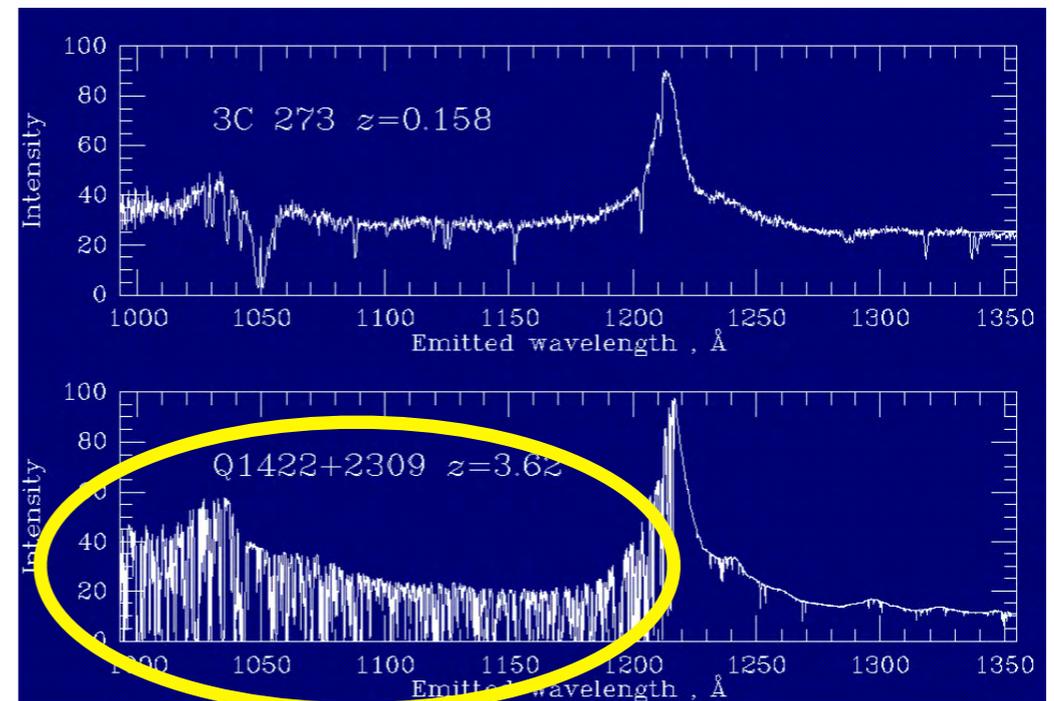
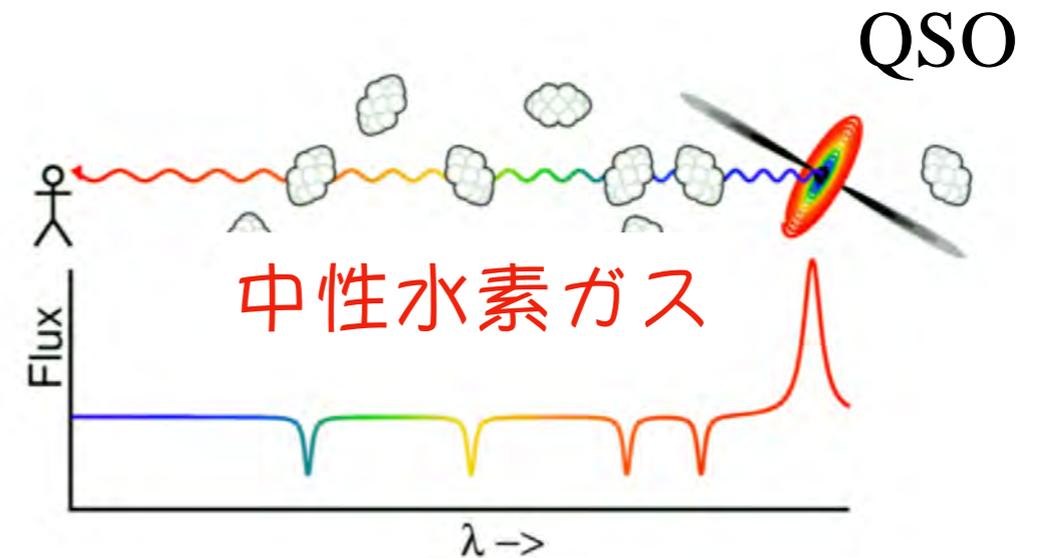
- CMB-electron Thomson scattering

# 現在の観測的制限

- Lyman alpha emitter galaxies (LAE)



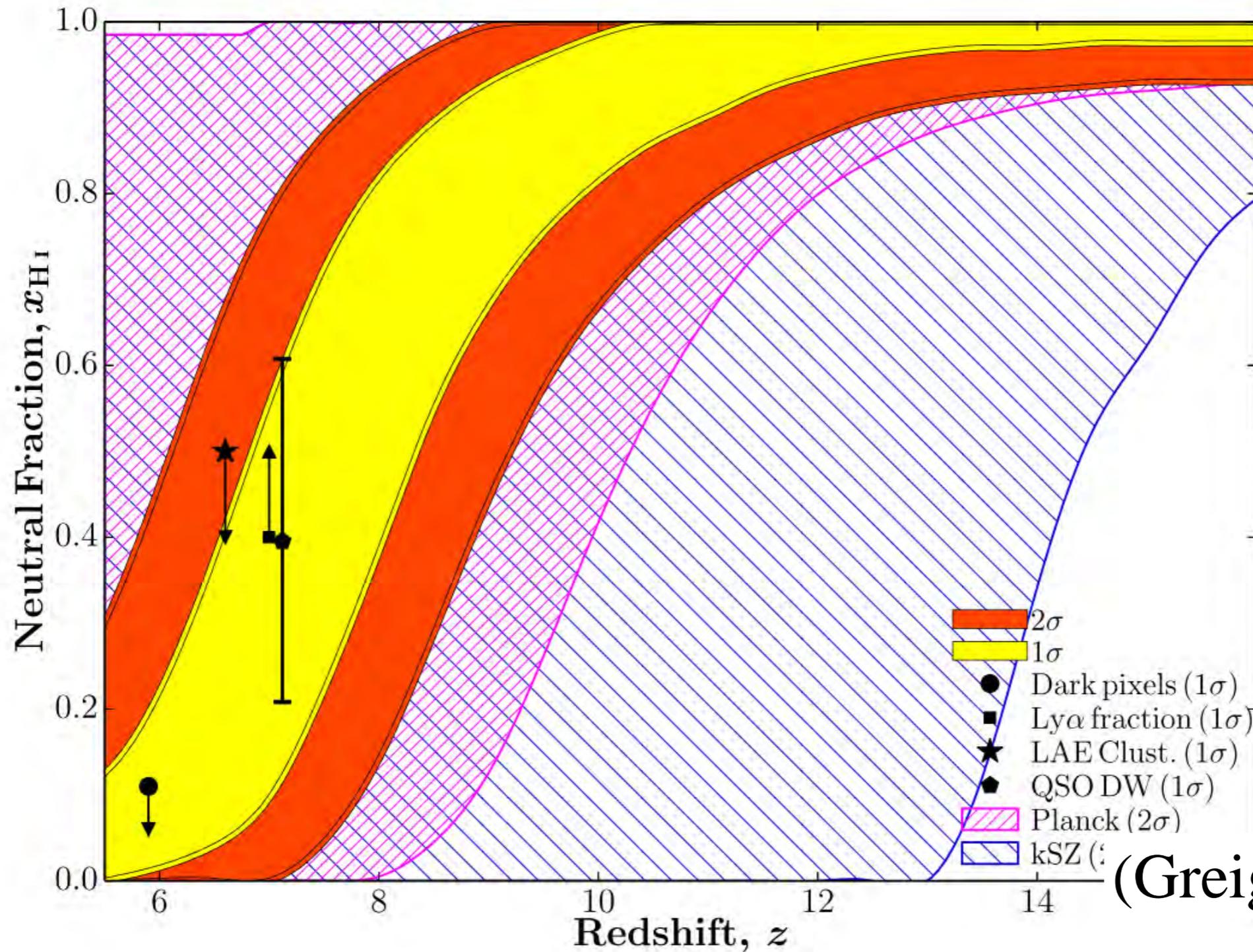
- Lyman alpha forest



- CMB-electron Thomson scattering

# 観測が示唆すること

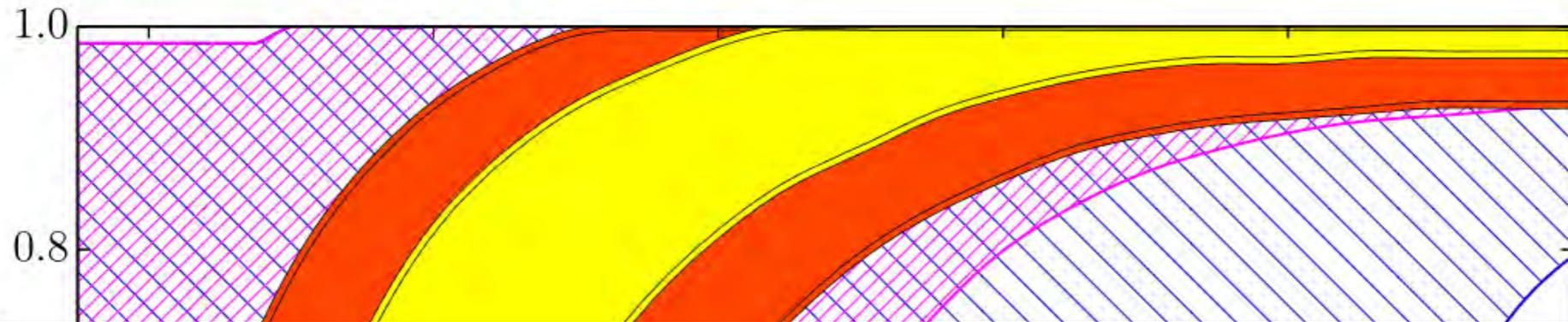
平均的な中性水素率の時間進化（グローバルヒストリー）についての示唆を与える



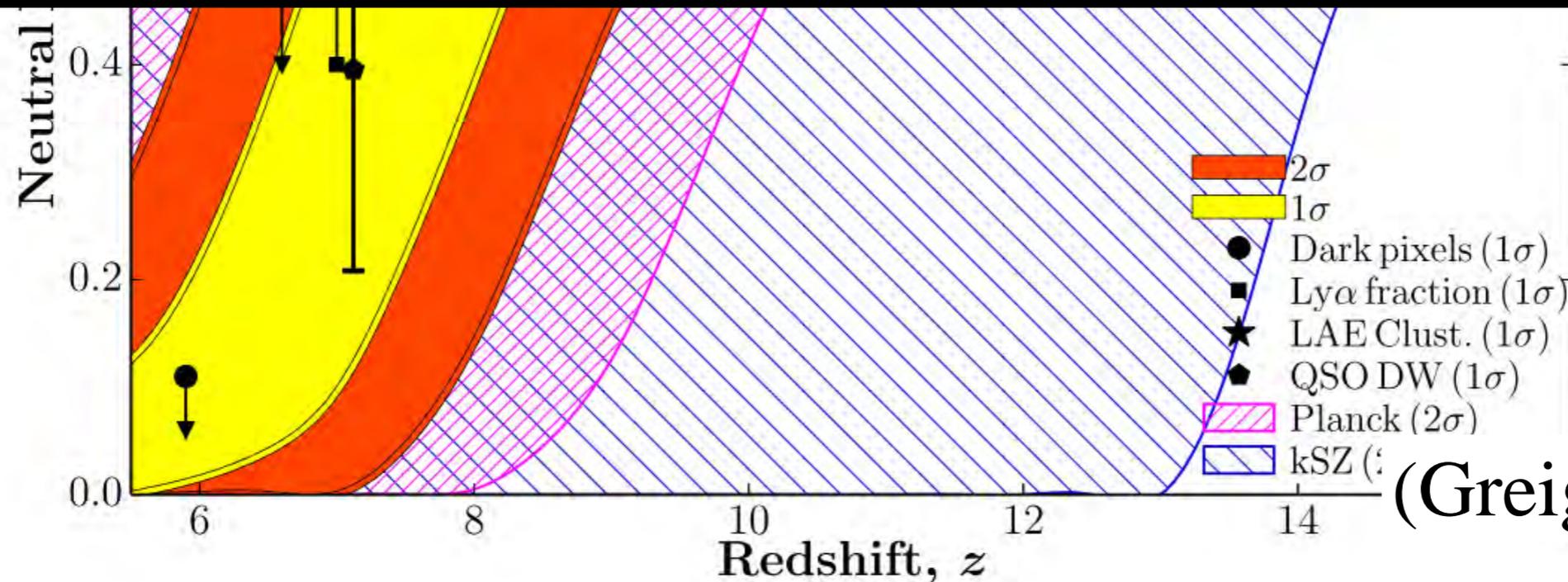
(Greig et al 2017)

# 観測が示唆すること

平均的な中性水素率の時間進化（グローバルヒストリー）についての示唆を与える



現在の観測は中性水素率のグローバルな進化（とりわけ再電離終盤）しか教えてくれない



(Greig et al 2017)

再電離期、さらには宇宙の夜明け・暗黒時代について、  
グローバルヒストリーを超えてより詳しく知りたい。

(例)

•イオン化バブルの空間的性質（トポロジー等）や時間  
進化

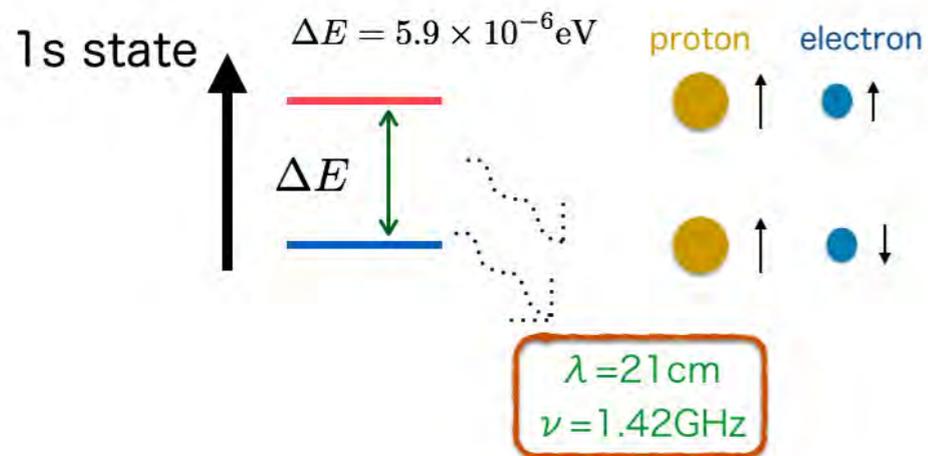
•再電離源は何？

•銀河形成や進化と再電離の関係

などなど

# 21cm線

- **21cm線放射** : 超微細構造によって、IGM中の中性水素は21cm線を放射する。



$z=6$  (EoR)  $\rightarrow$  1.5m or 202 MHz

$z=20$  (cosmic dawn)  $\rightarrow$  4.4m or 68MHz

電波帯域!

## • 輝度温度 (21cm signal)

赤 : 宇宙論 青 : 天体物理

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

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

IGM中の21cm線を使えば、中性水素の3次元分布を赤方偏移に沿ってトモグラフィ的に観測できる

# 現在進行中の観測装置



- **MWA** (Australia)
- $z=6-11.4$
- 角度分解能 :  $\sim$ 数分角
- 集光面積 :  $3500 \text{ m}^2$



- **LOFAR** (Netherlands)
- $z=7-12$
- 角度分解能 :  $\sim$ 数十秒角
- 集光面積 :  $35000 \text{ m}^2$

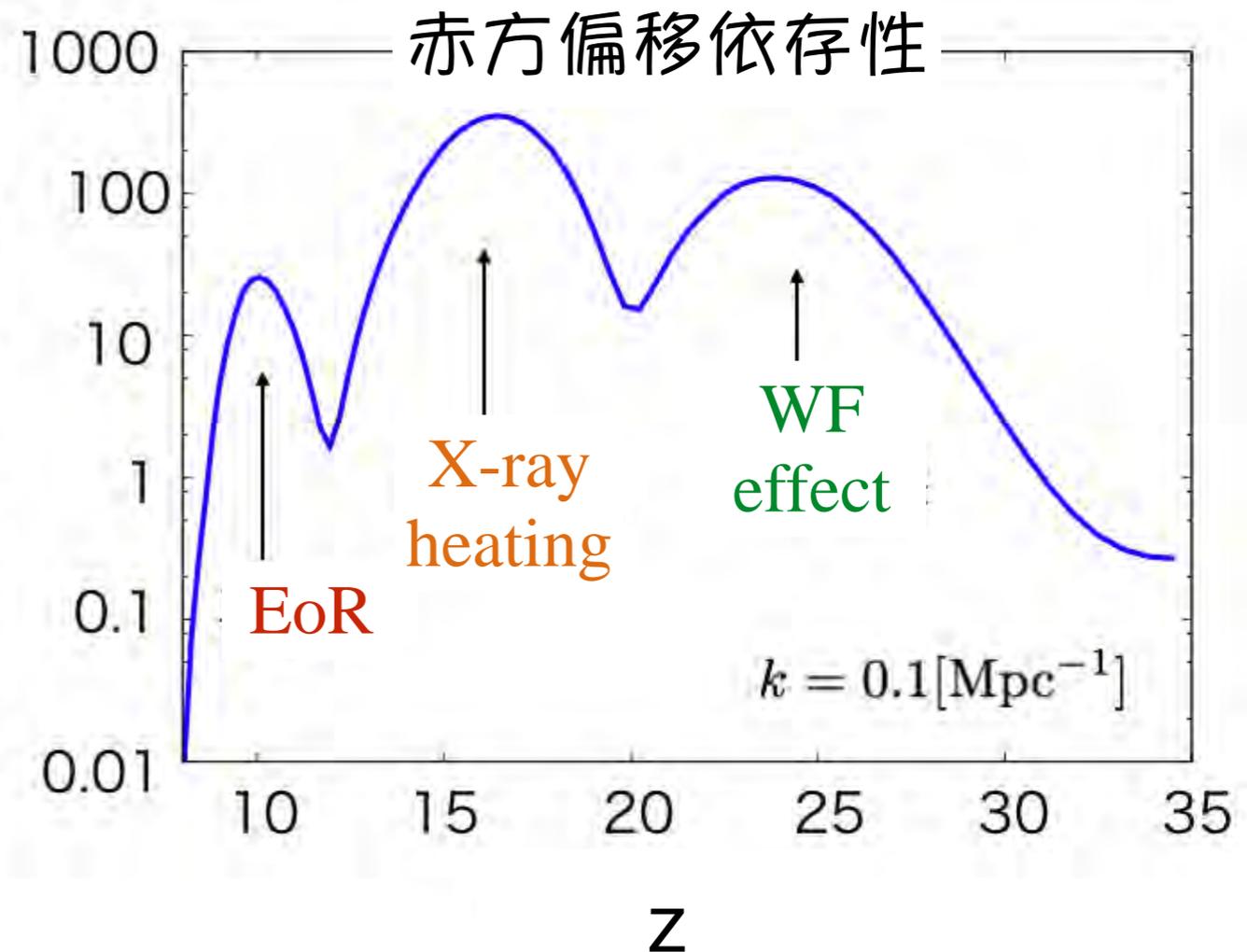
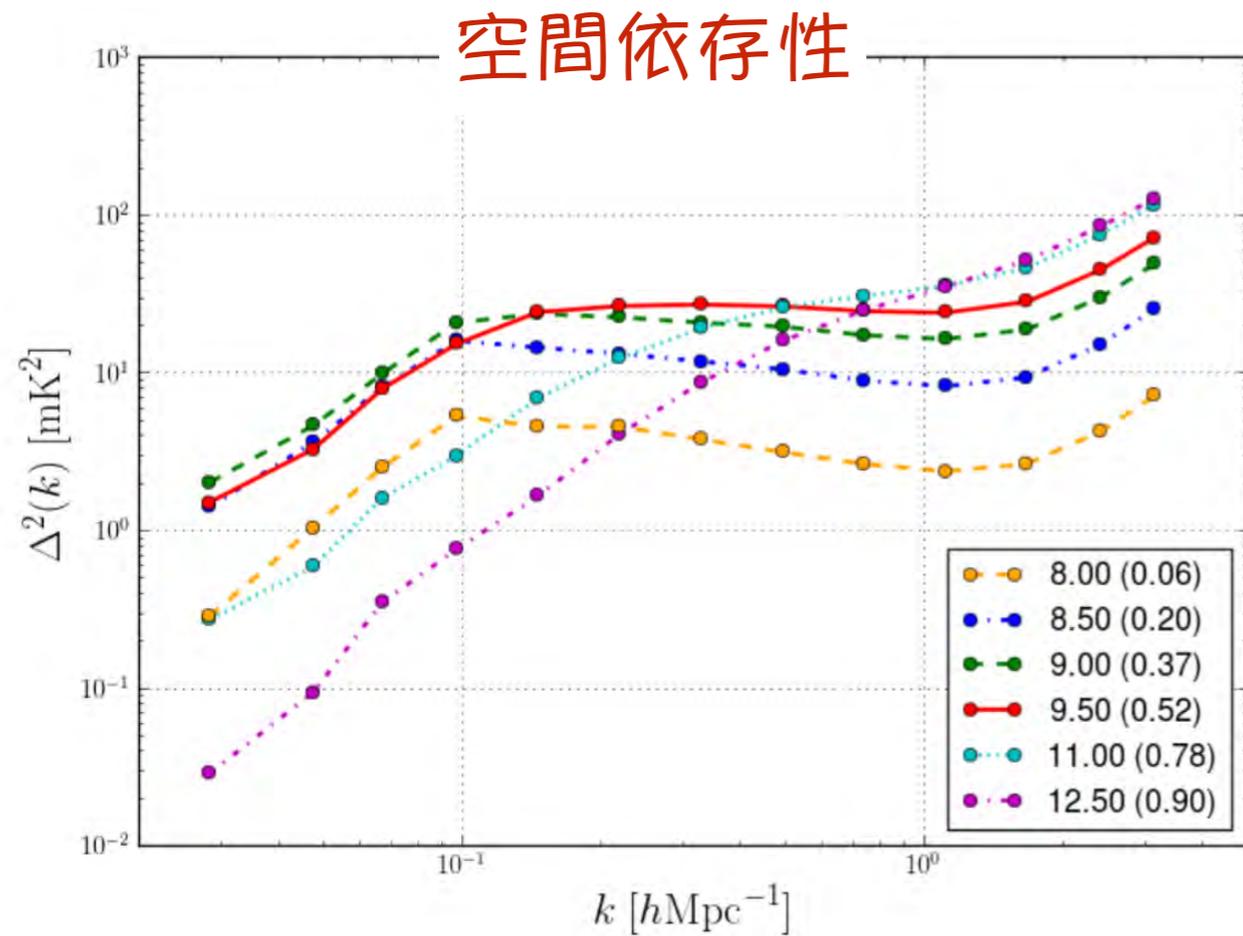


- **PAPER** (South Africa, USA) > HERA
- $z=7-12$
- 角度分解能 :  $\sim$ 数十分角
- 集光面積 :  $1100 \text{ m}^2$

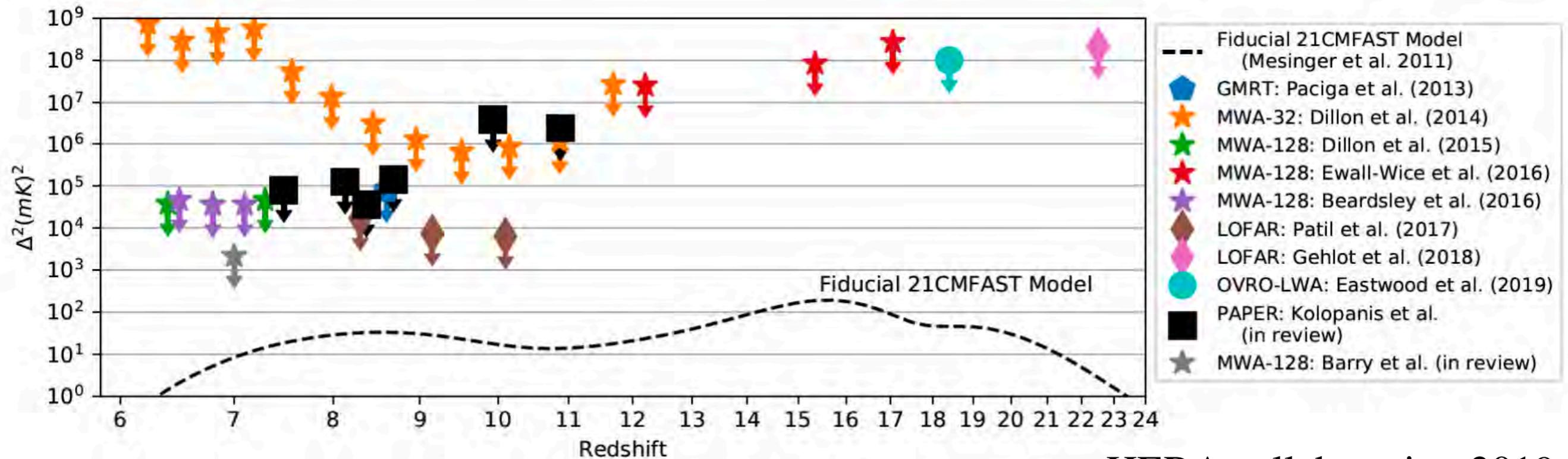
# 21cm power spectrum

MWAやLOFARなどの先行機はまずは21cm線シグナルの統計的検出を目指す。

21cm power spectrum (PS):  $\langle \delta T_b(\mathbf{k}) \delta T_b(\mathbf{k}') \rangle = (2\pi)^3 \delta(\mathbf{k} + \mathbf{k}') P_{21}$



# 現在の21cmPSへの制限

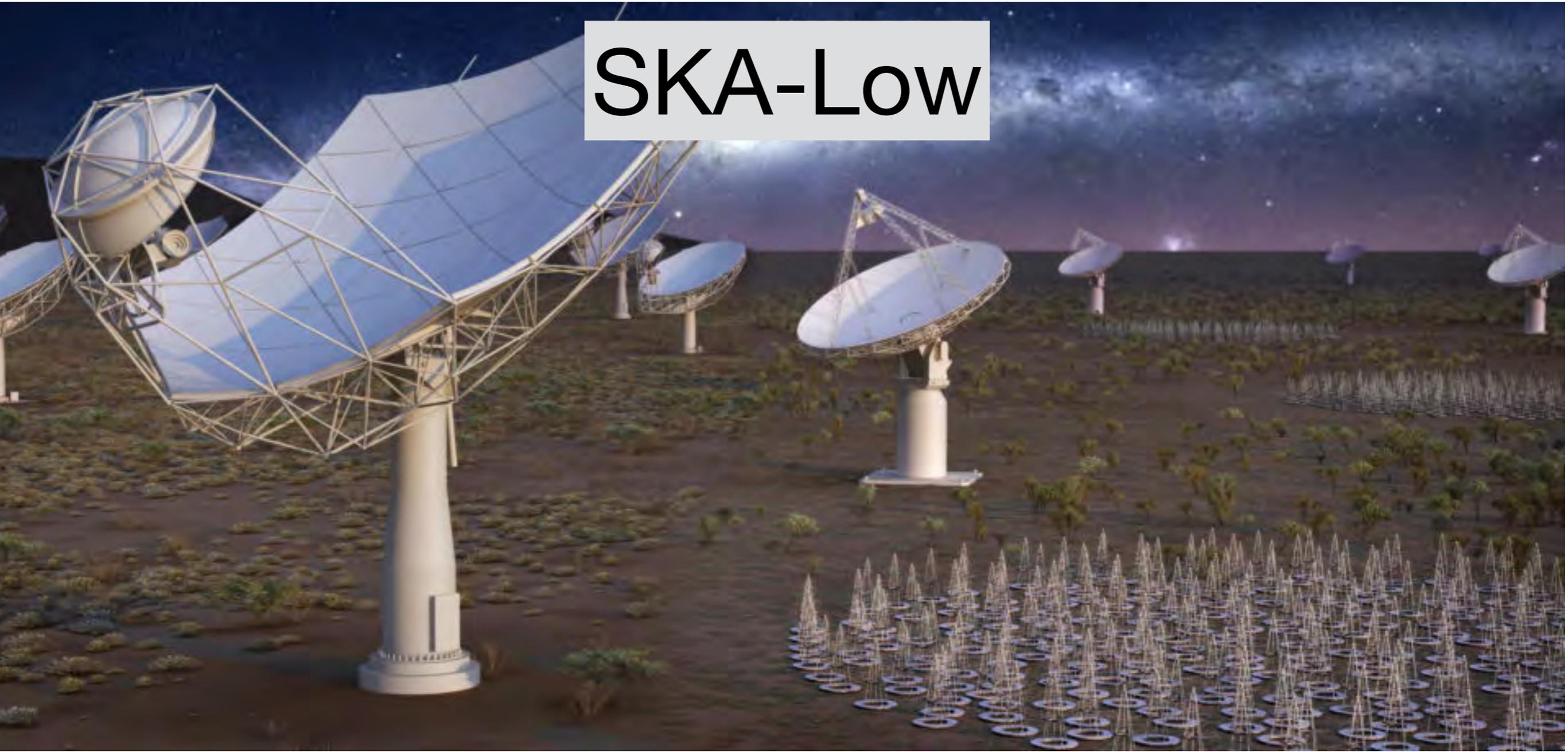


HERA collaboration 2019

予想される21cm線パワースペクトルの2,3桁大きいところに上限値を与えている。もう一息。

(2020年現在、もう少し制限は良くなっている)

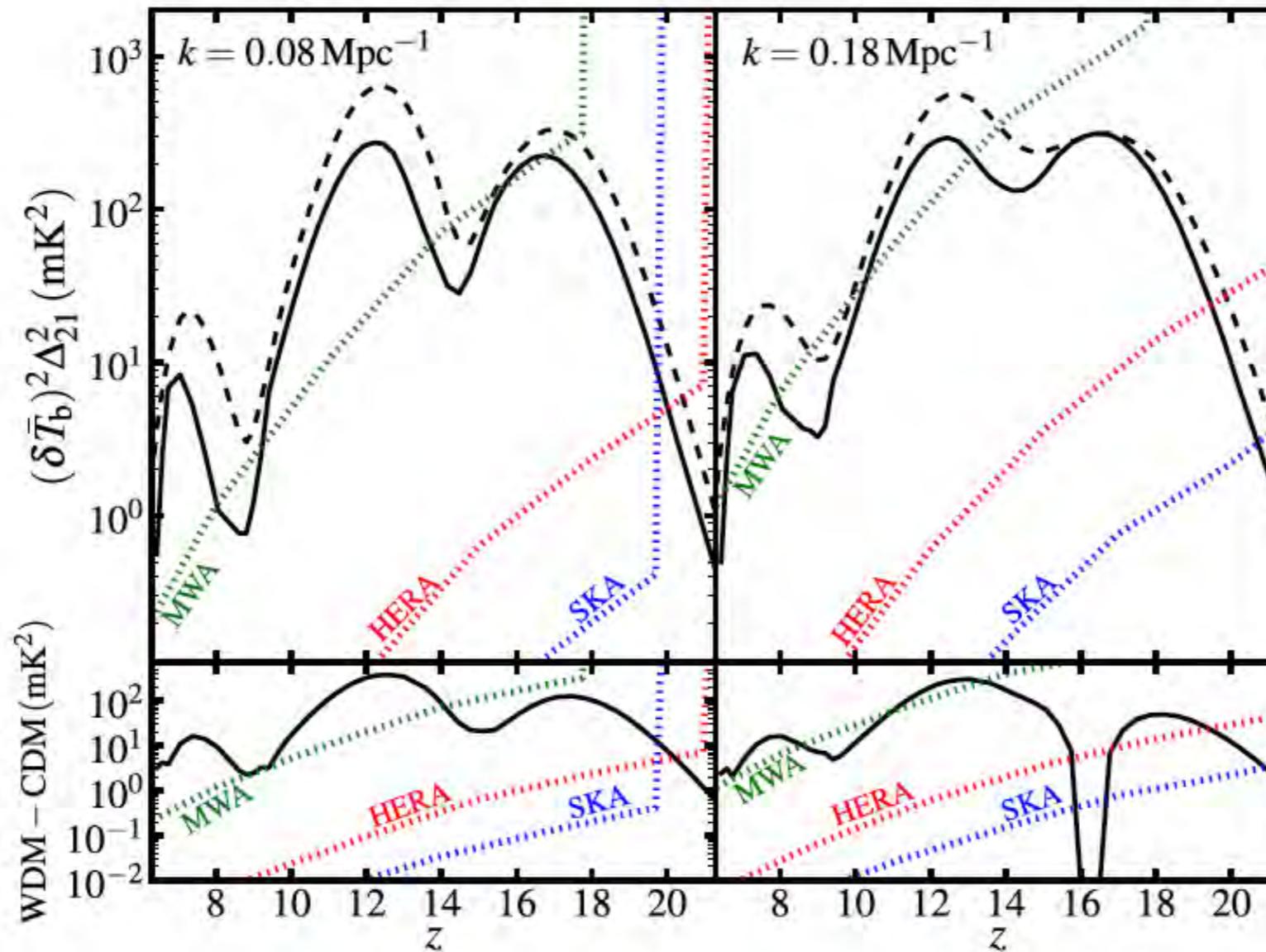
# SKA-Low



# 21cm PS with SKA

## 赤方偏移依存性

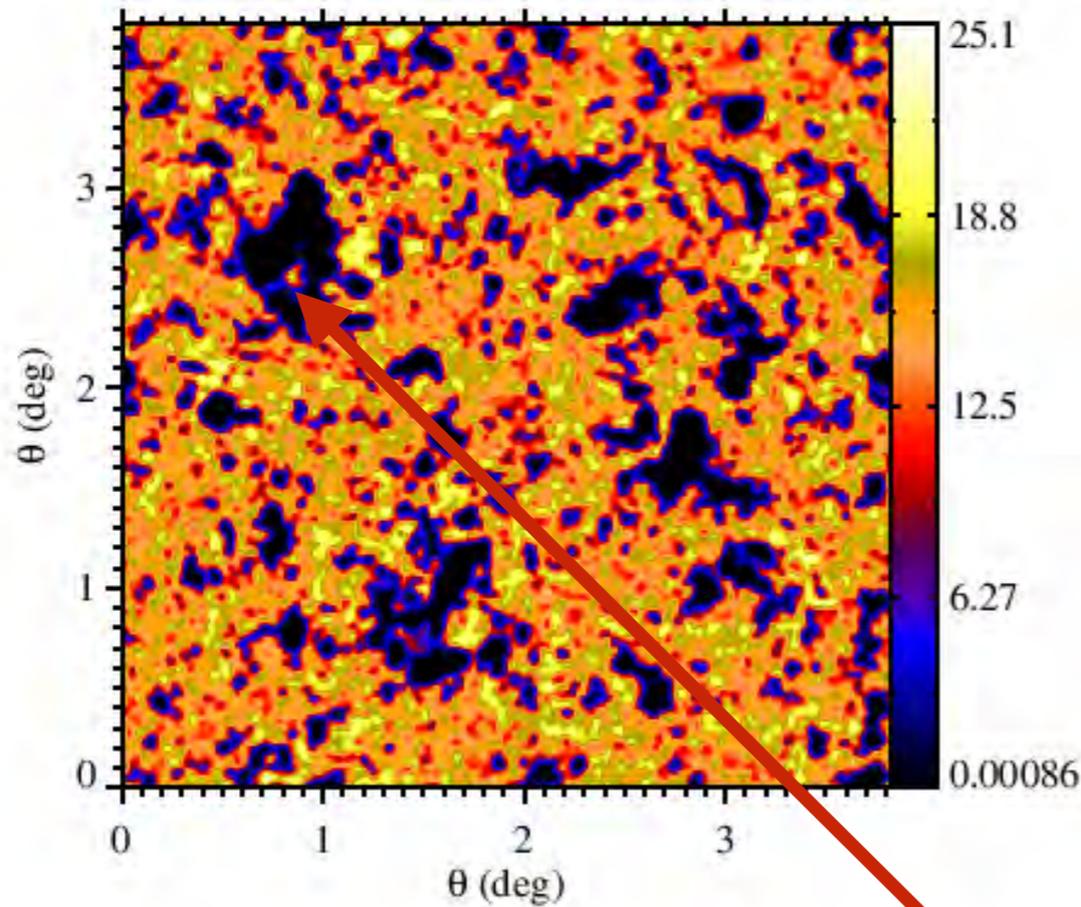
Pritchard et al. (2014)



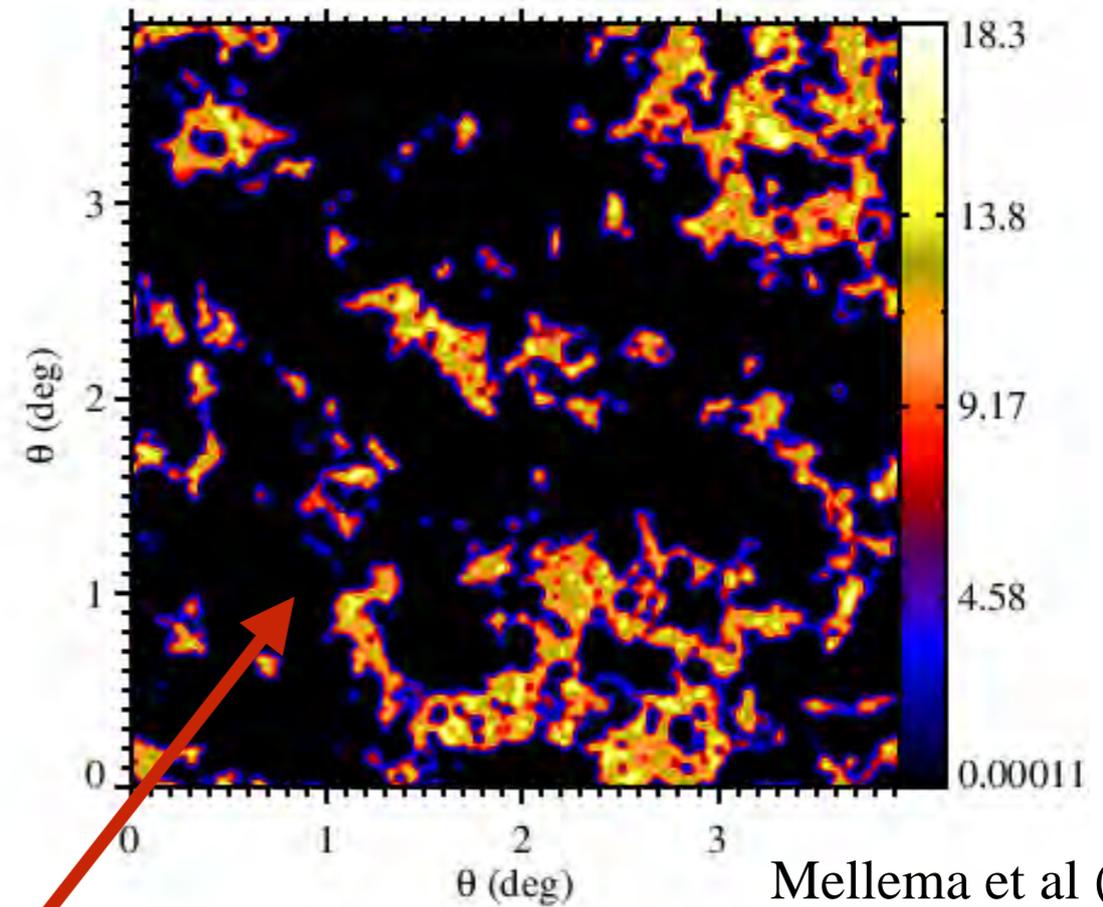
SKAは暗黒時代から再電離期までの21cmPSの検出が可能

# 21cm線で見た再電離期

$x_i = 0.5$



$x_i = 0.8$



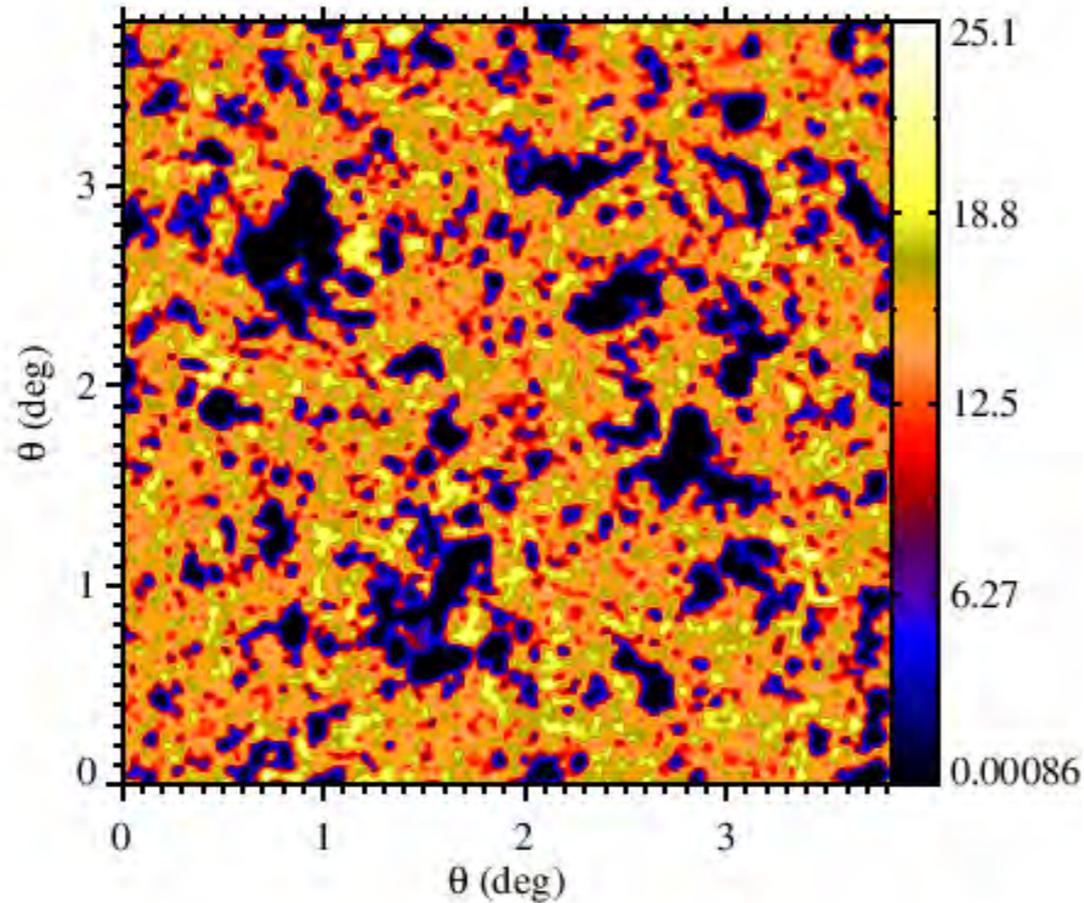
Mellema et al (2013)

イオン化領域

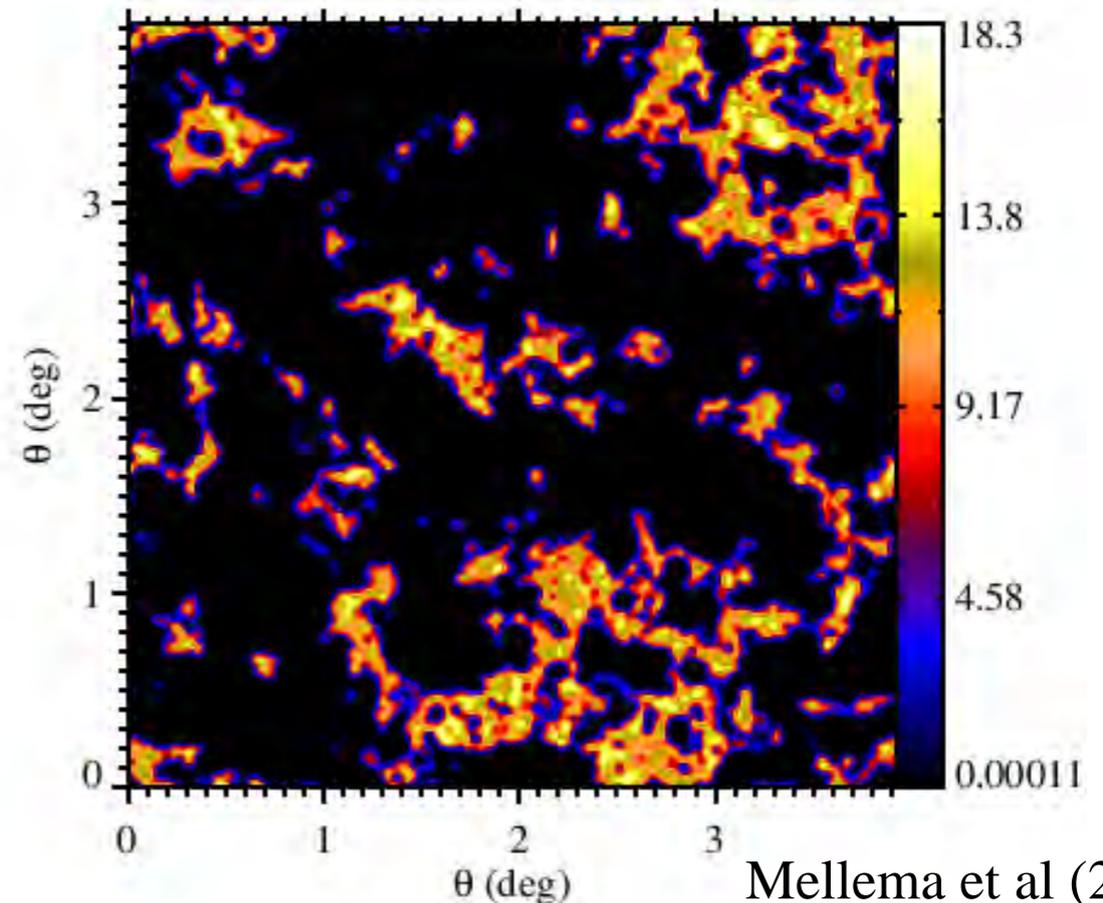
21cm線を使うとイオン化領域を3次元的に観測できる

# 21cm線で見えた再電離期

$$x_i = 0.5$$



$$x_i = 0.8$$



Mellema et al (2013)

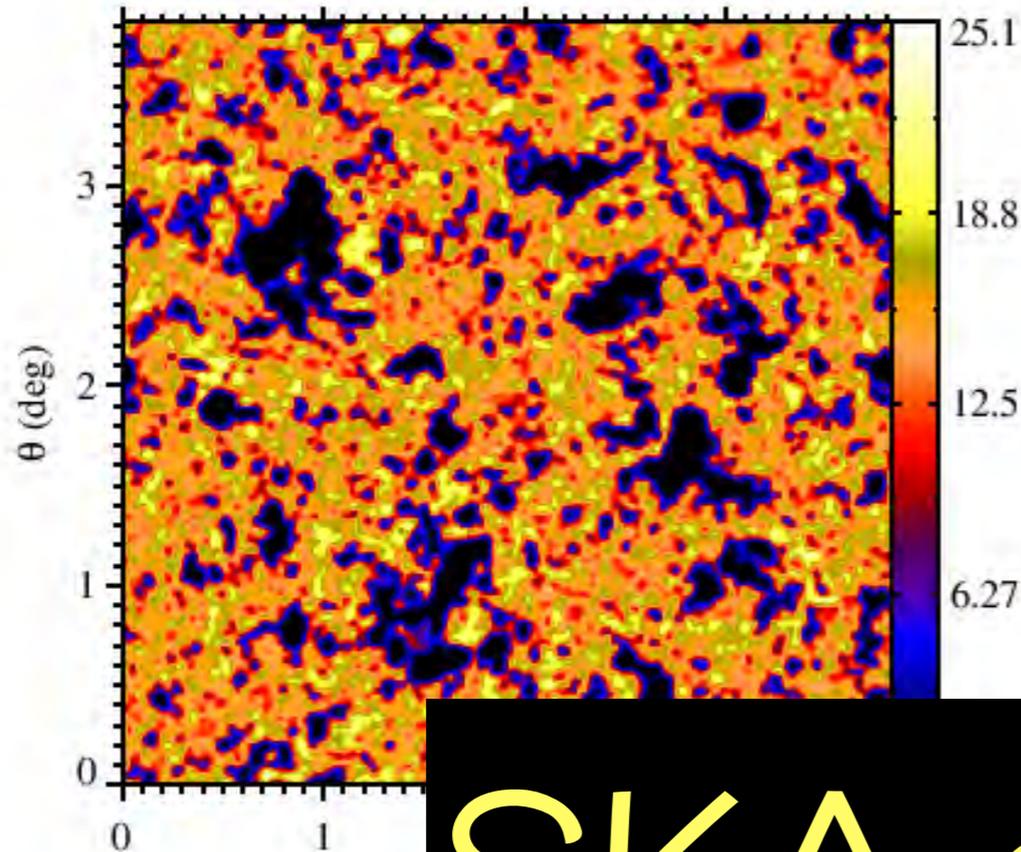
イメージングのために必要な最低限の観測スペック

○数分角の角度分解能

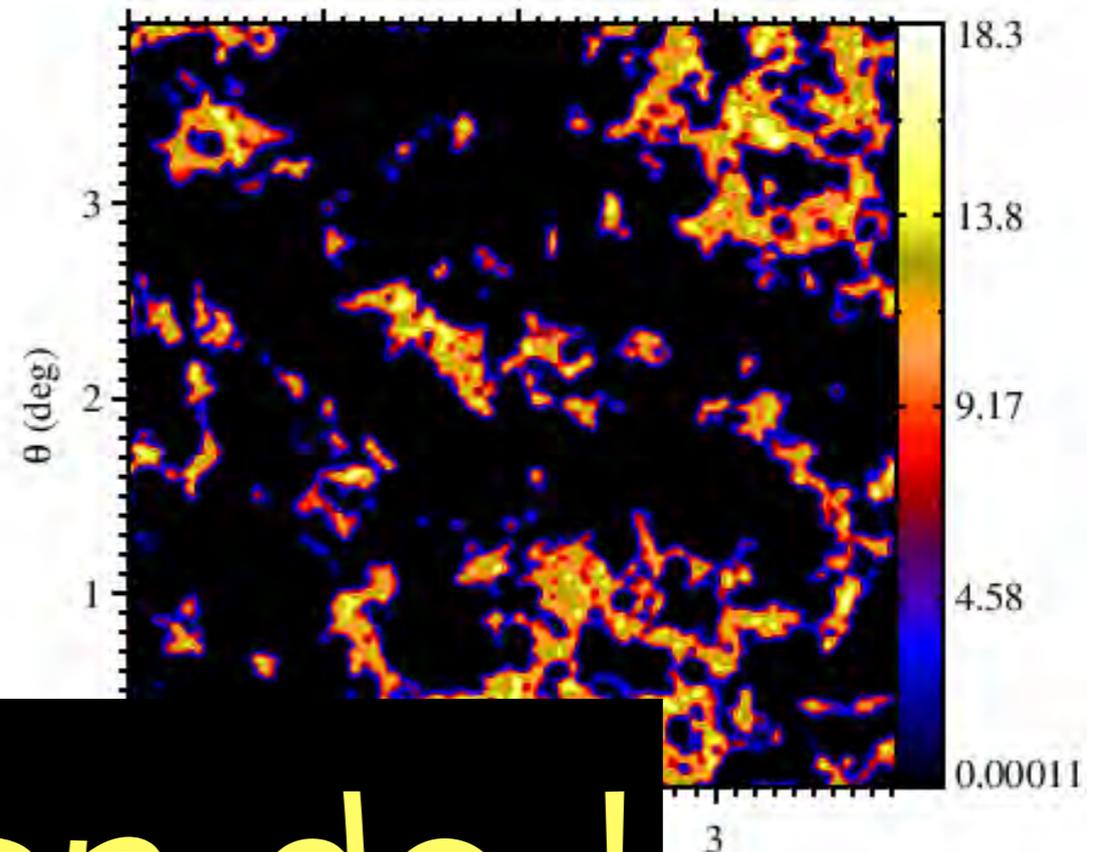
○数度程度の視野

# 21cm線で見えた再電離期

$x_i = 0.5$



$x_i = 0.8$



SKA can do!

Mellema et al (2013)

イメージングのために必要な最低限の観測スペック

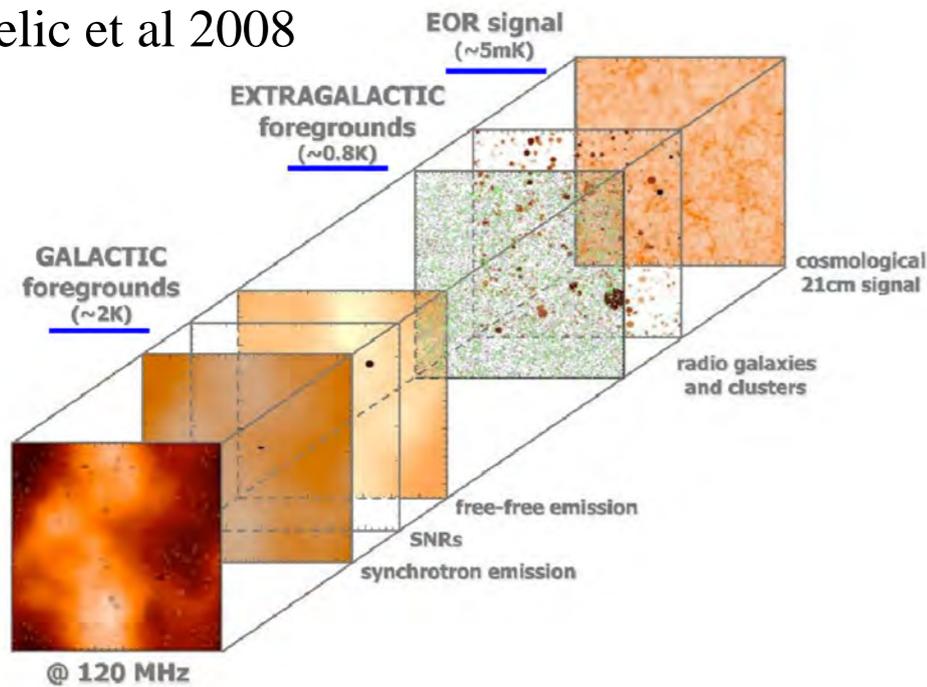
○数分角の角度分解能

○数度程度の視野

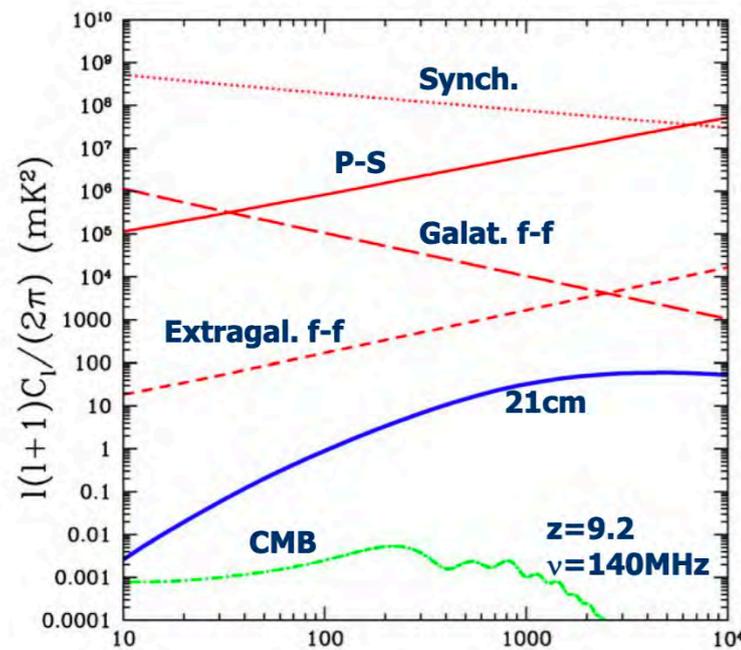
# 21cm線観測への課題

21cm線は強烈な前景放射に埋もれている

Jelic et al 2008



Santos 2005



~8 order

前景放射除去?

or

前景放射を避ける?

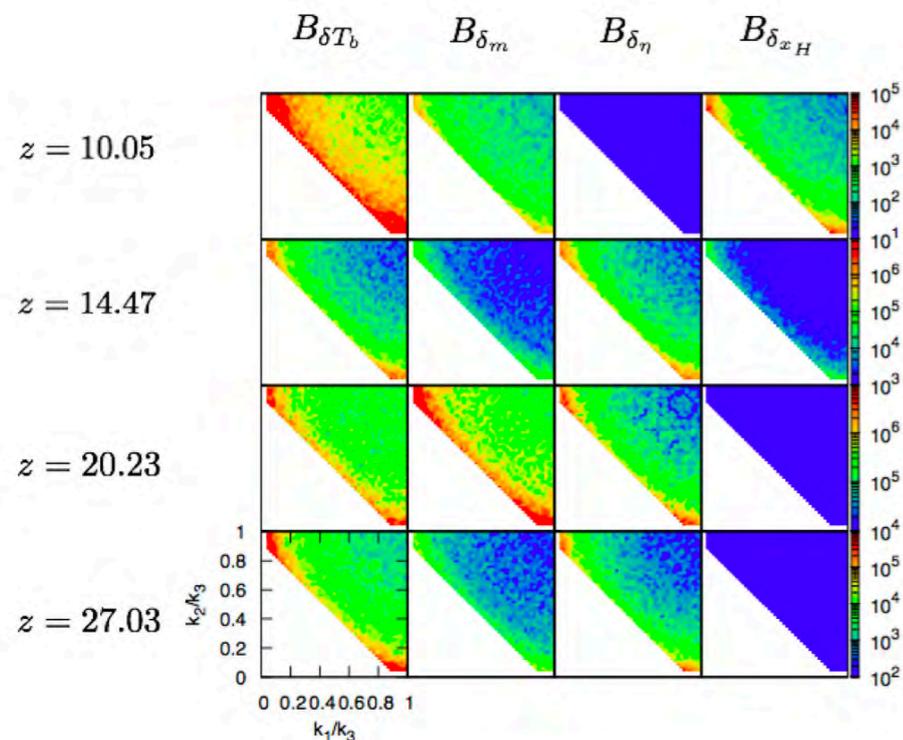
SKA日本再電離グループでは  
21cm線と他波長の相互相関関数  
で前景放射を軽減する方法を提案

Yoshiura et al (2018)

# SKA日本再電離チーム活動内容①

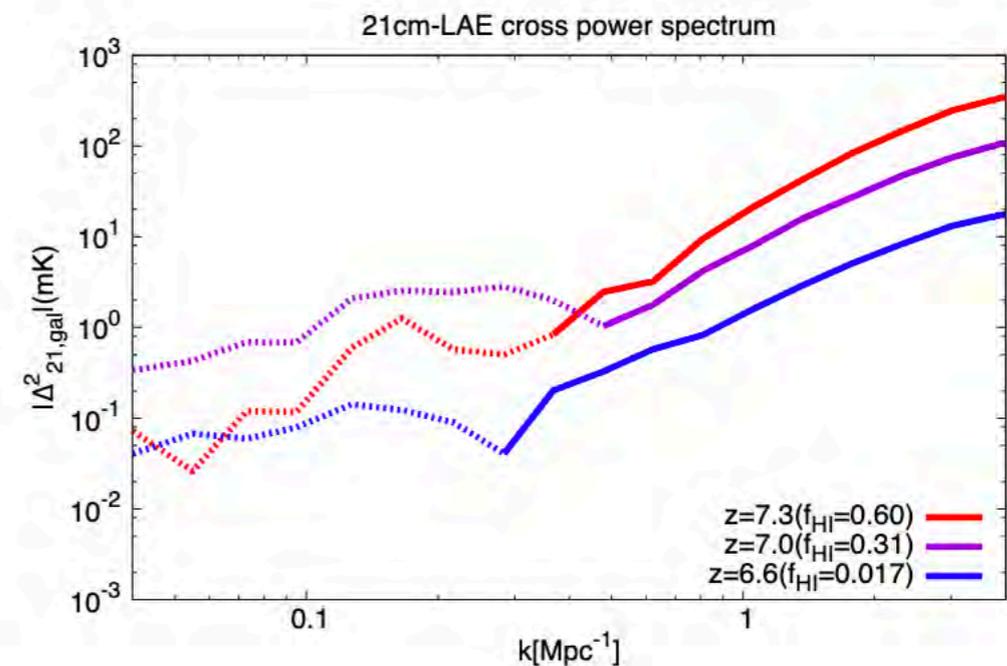
- 21cm線シグナル高次統計量 (bispectrum, skewness)
- 21cm線とLAEの相互相関関数

Shimabukuro et al 2016



21 cm bispectrum

Kubota et al 2018

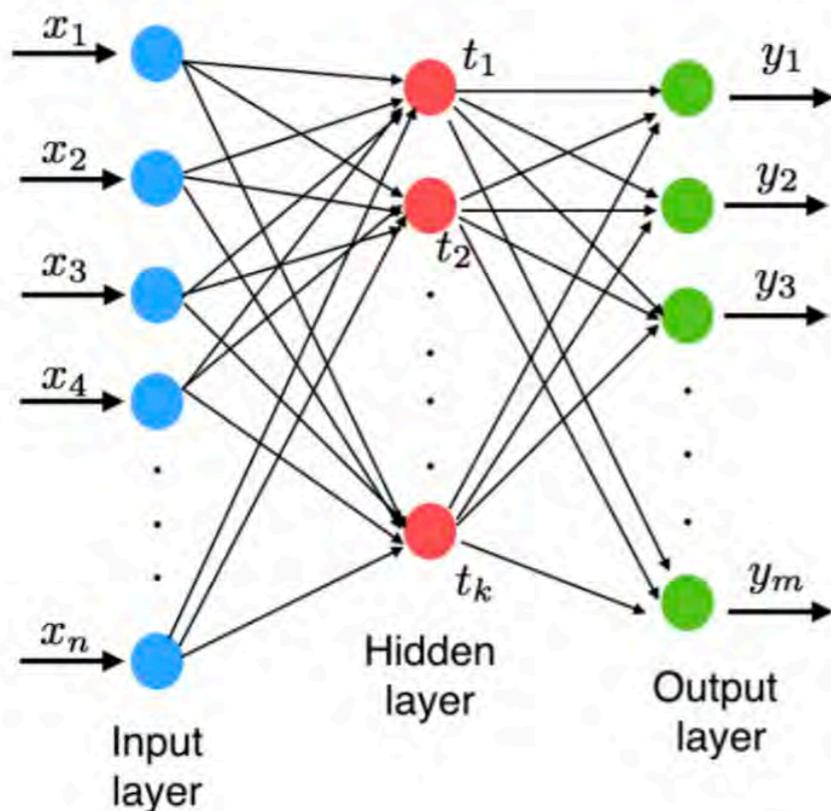


21 cm - LAE cross correlation

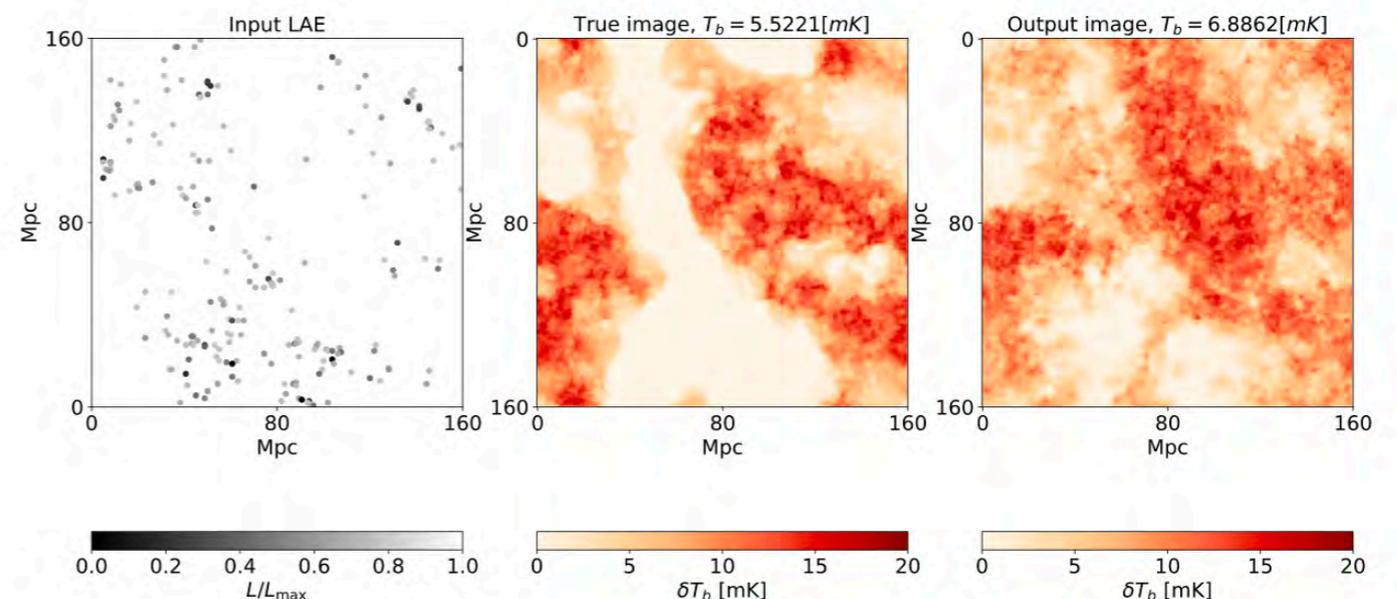
# SKA日本再電離チーム活動内容②

- 機械学習を用いた21cm線シグナル解析

Shimabukuro & Semelin (2017)



Yoshiura et al (2020)



Artificial neural network

# SKA日本再電離チーム活動内容③

他にも . . .

- 21 cm forestを用いた小スケール物理の探査（島袋、市來）
- ミンコフスキー汎関数を用いた再電離期のトポロジー解析（吉浦、島袋、高橋）
- 初代星周りの21 cm線シグナル（田中、長谷川）
- MWAデータ解析（吉浦）

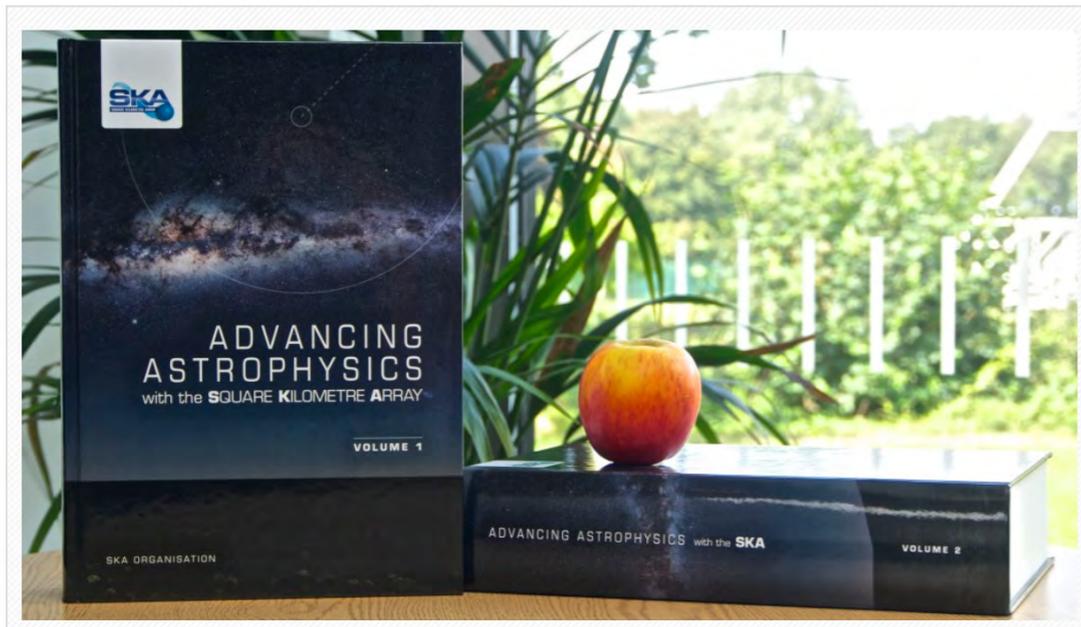
(See [https://ui.adsabs.harvard.edu/user/libraries/G2YRTSm8RkeVLBND\\_JfhUg](https://ui.adsabs.harvard.edu/user/libraries/G2YRTSm8RkeVLBND_JfhUg))

ALMA、TMTやngVLAとのシナジー？

興味のある人のご参加お待ちしております。

# 参考文献

- 国際SKAサイエンスブック (<https://www.skatelescope.org/books/>)
- SKA日本サイエンスブック (<http://ska-jp.org/science.html>)
- Japanese Cosmic Dawn/Epoch of Reionization Science with the Square Kilometre Array (arxiv:1603.01961)



日本版  
Square Kilometre Array  
サイエンスブック



日本SKAコンソーシアム  
科学検討班

2015

# メッセージ

- 暗黒時代から再電離期に渡る宇宙の歴史はフロンティア
- 21cm線はこれらの時期を探る強力なツール
- SKAは暗黒時代から再電離の情報をもたらしてくれると期待されている
- しかし、21cm線観測には前景放射や装置の系統誤差など解決すべき問題が存在するのでやることは多い。是非、興味のある人はご連絡ください。