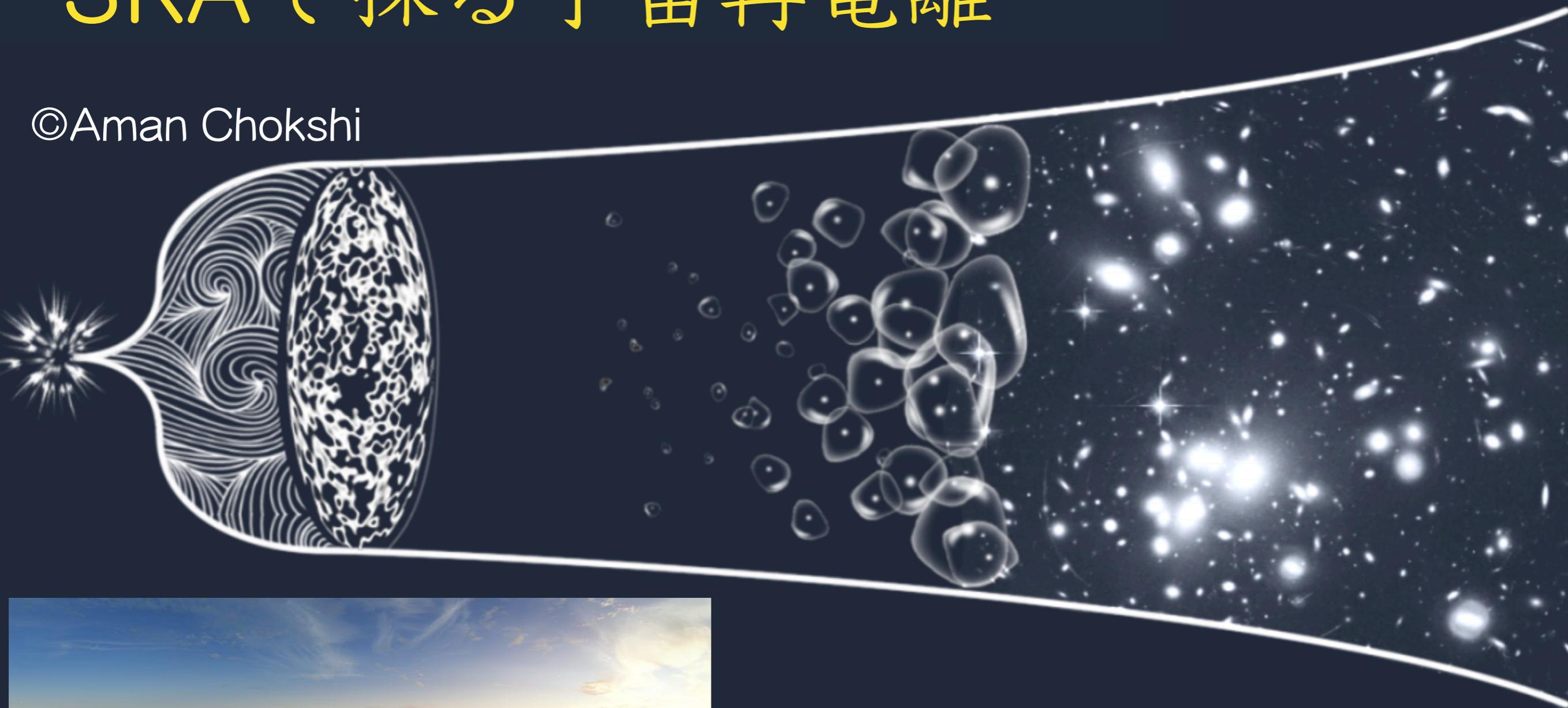




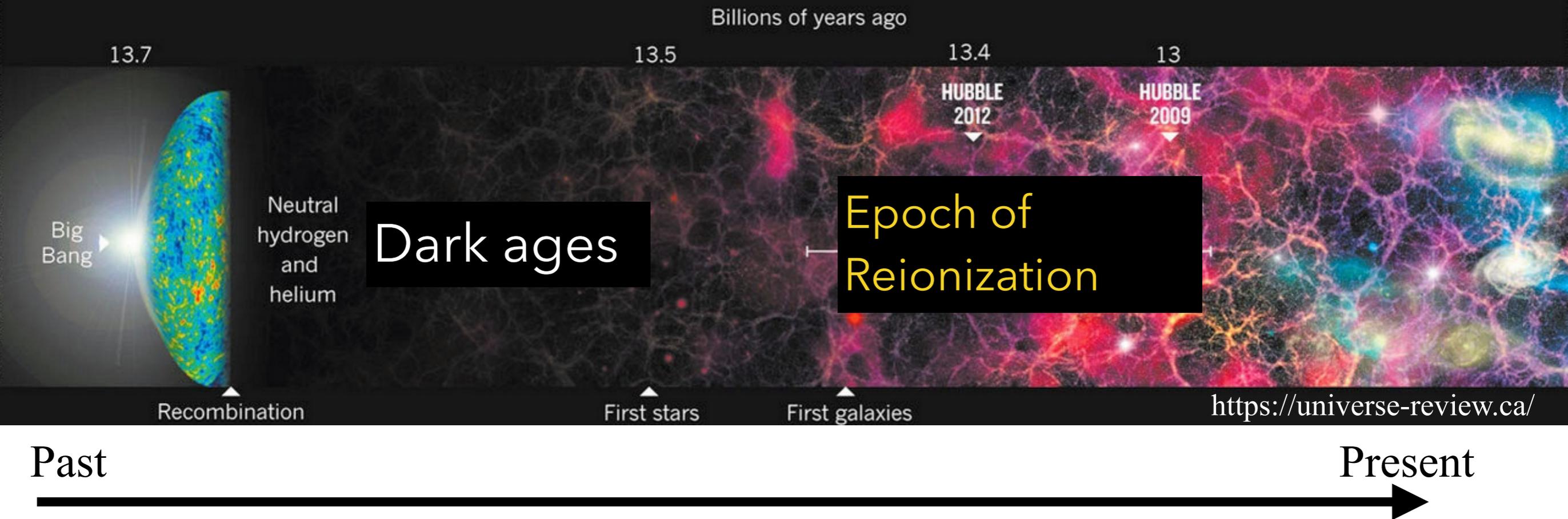
# SKAで探る宇宙再電離

©Aman Chokshi



島袋隼士 (云南大学・SWIFAR)  
on behalf of SKA日本再電離グループ

# 宇宙の歴史

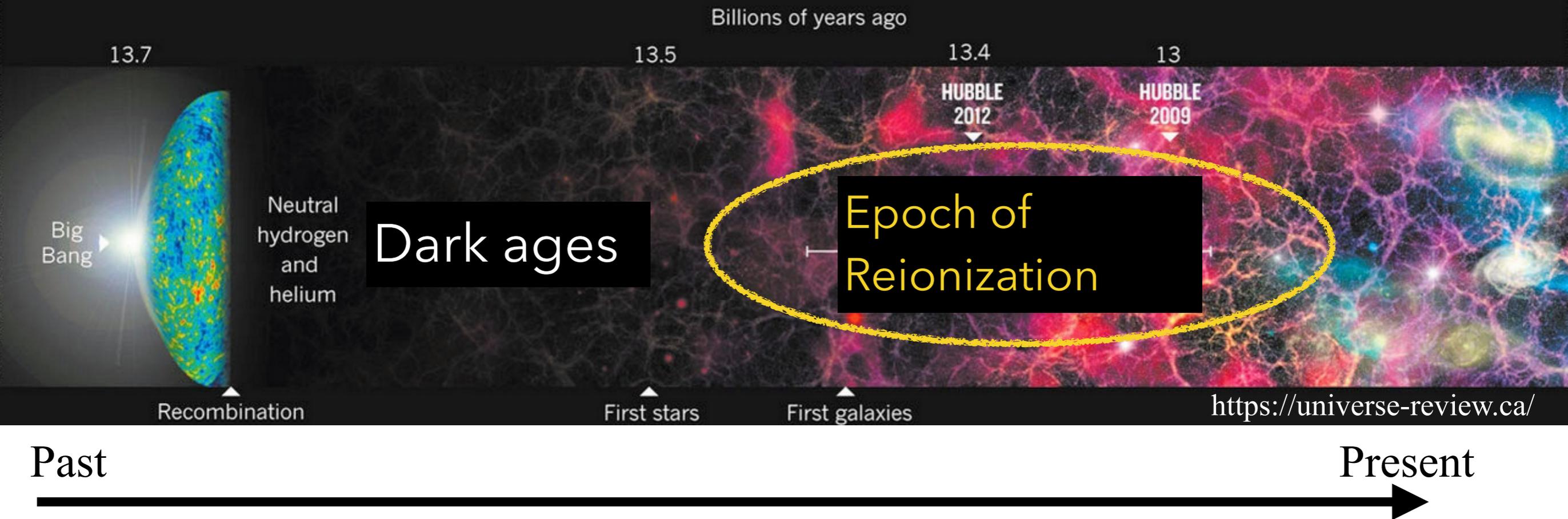


宇宙暗黒時代 (Dark Ages) . . . 星や銀河の存在しない真っ暗な時代

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



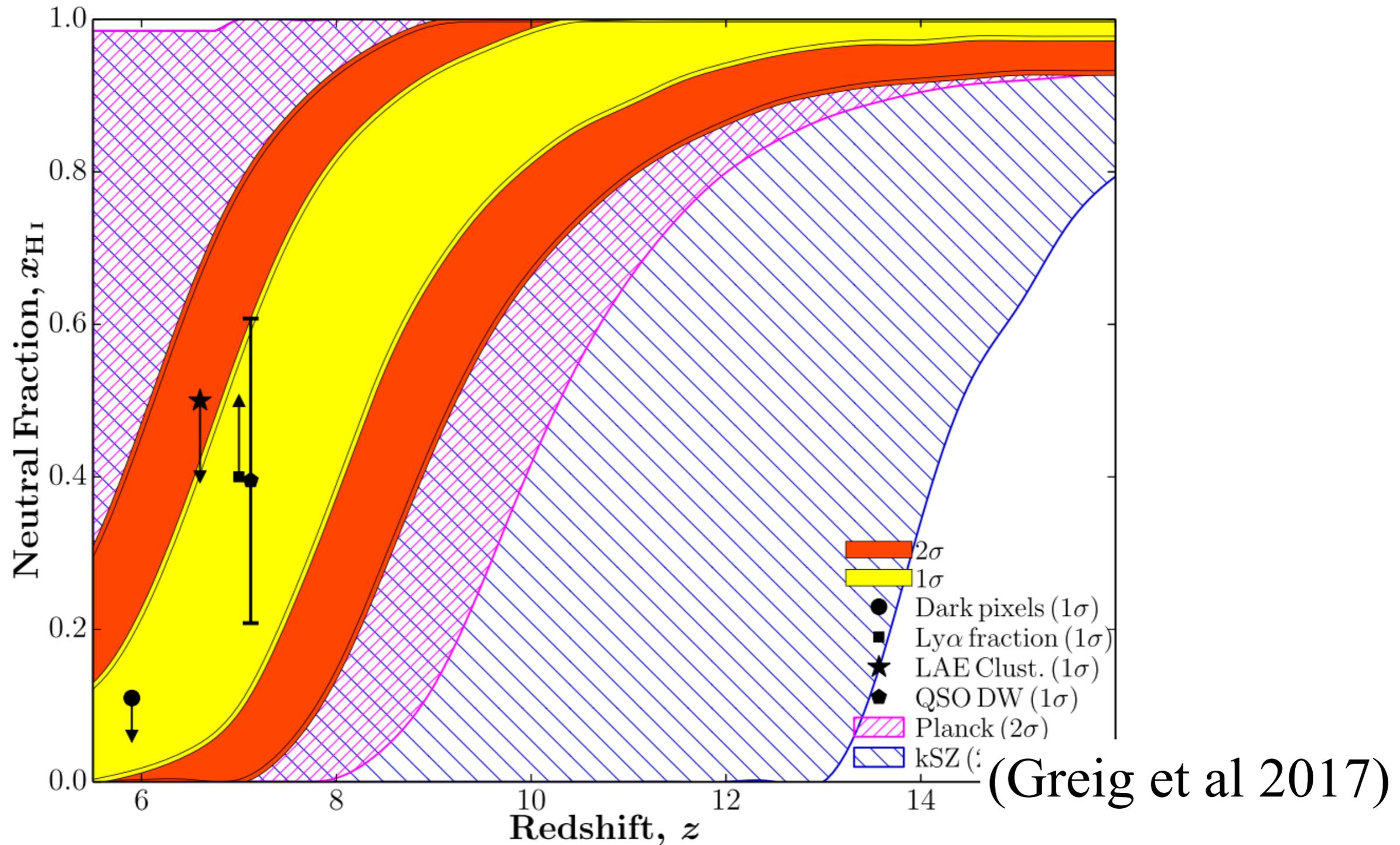
宇宙暗黒時代 (Dark Ages) . . . 星や銀河の存在しない真っ暗な時代

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 ( $z \sim 6-15$ ).

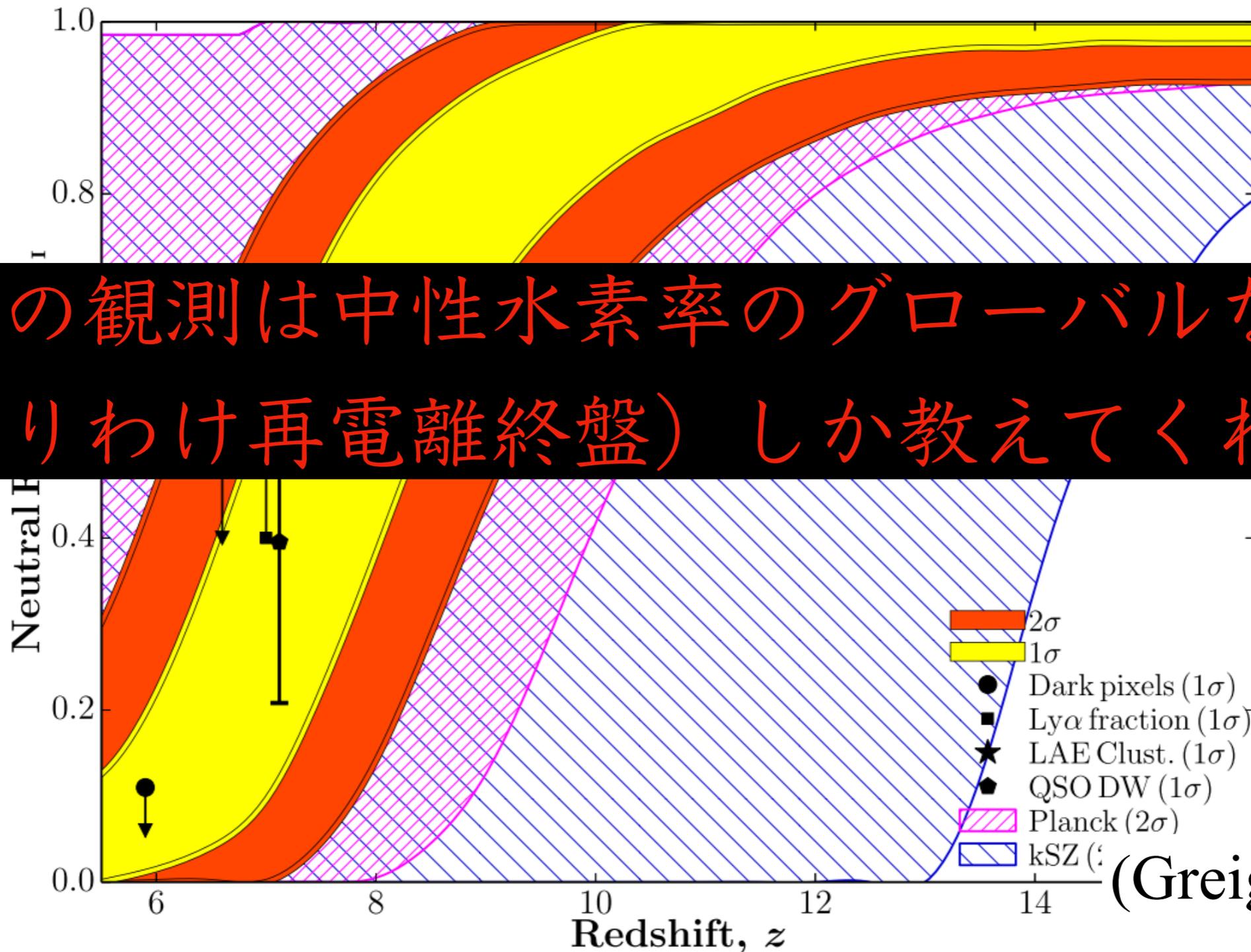
# 現在の再電離の観測的制限

平均的な中性水素率の時間進化 (グローバルヒストリー)



# 現在の再電離の観測的制限

平均的な中性水素率の時間進化（グローバルヒストリー）



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)

# 再電離期の性質についてより詳しく知りたい。

(例)

- ・再電離モデルへの制限
- ・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

# 再電離期の性質についてより詳しく知りたい。

(例)

- ・再電離モデルへの制限
- ・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

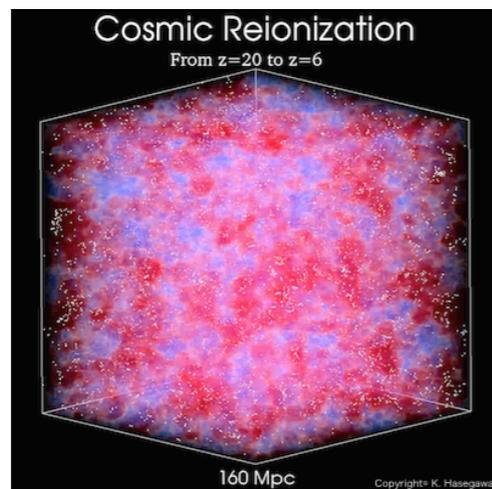
➡ そのためには、再電離期の銀河間物質を直接観測するのが良い。

# 再電離期の性質についてより詳しく知りたい。

(例)

- ・再電離モデルへの制限
- ・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

➡ そのためには、再電離期の銀河間物質を直接観測するのが良い。



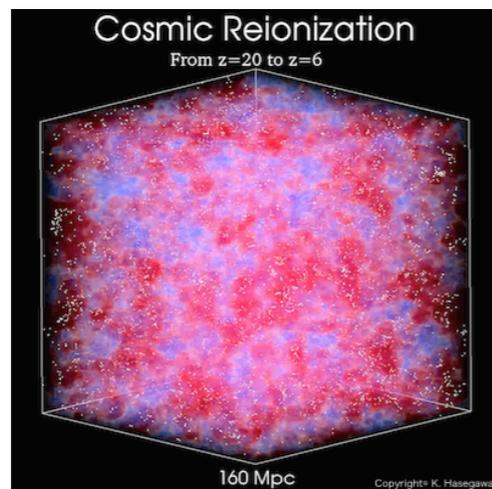
# 再電離期の性質についてより詳しく知りたい。

(例)

- ・再電離モデルへの制限
- ・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

➡ そのためには、再電離期の銀河間物質を直接観測するのが良い。

➡ ALMAやJWST、すばる望遠鏡による銀河観測とも相補的！



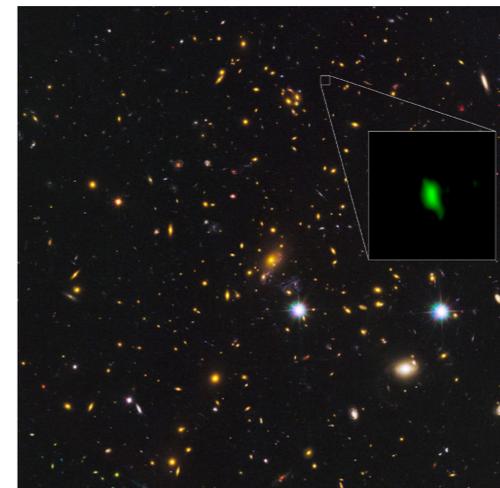
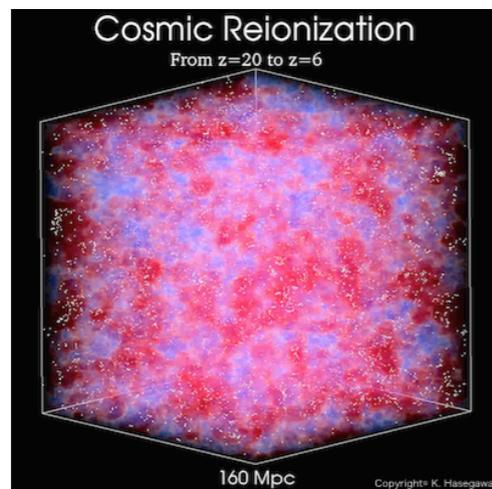
# 再電離期の性質についてより詳しく知りたい。

(例)

- ・再電離モデルへの制限
- ・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

➡ そのためには、再電離期の銀河間物質を直接観測するのが良い。

➡ ALMAやJWST、すばる望遠鏡による銀河観測とも相補的！



# 再電離期の性質についてより詳しく知りたい。

(例)

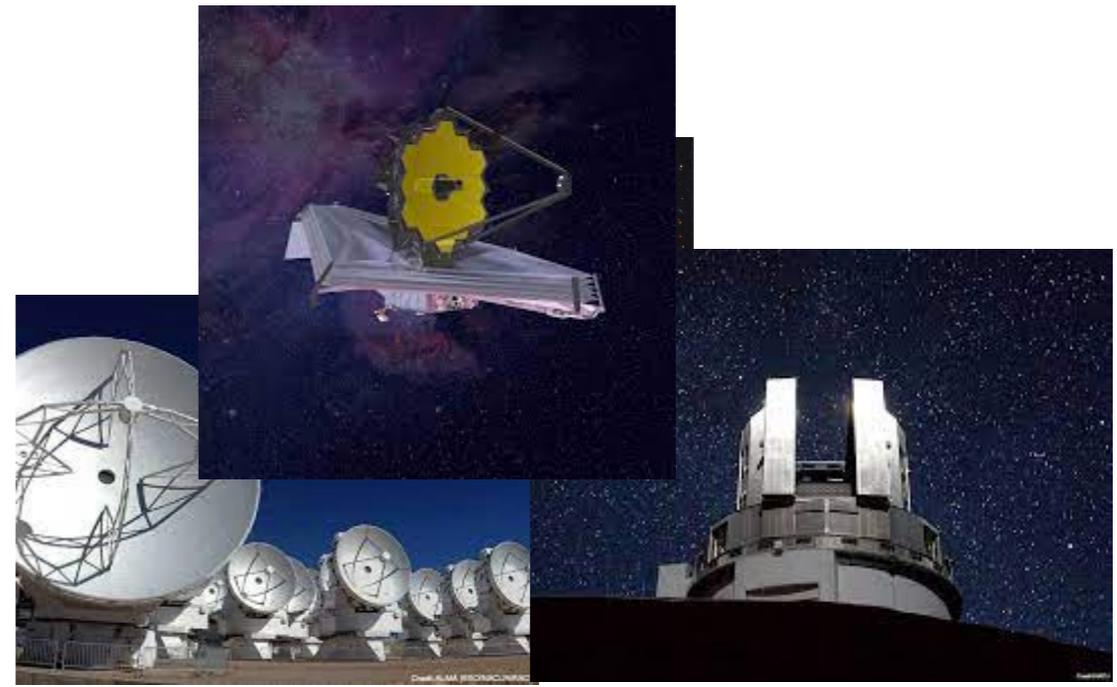
- ・再電離モデルへの制限
- ・イオン化バブルの空間的性質（トポロジー等）や時間進化
- ・再電離源は何？
- ・銀河形成や進化と再電離の関係

➡ そのためには、再電離期の銀河間物質を直接観測するのが良い。

➡ ALMAやJWST、すばる望遠鏡による銀河観測とも相補的！

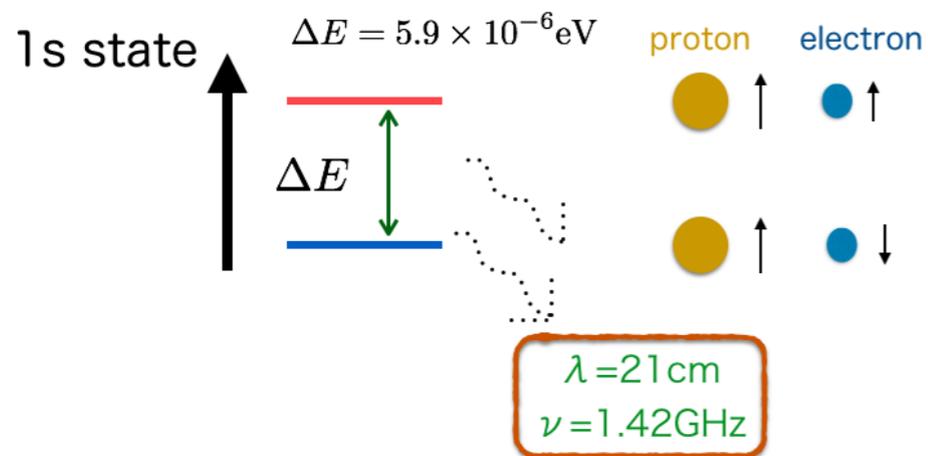


×



# 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 (21 cm signal)

赤 : 宇宙論      青 : 天体物理

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

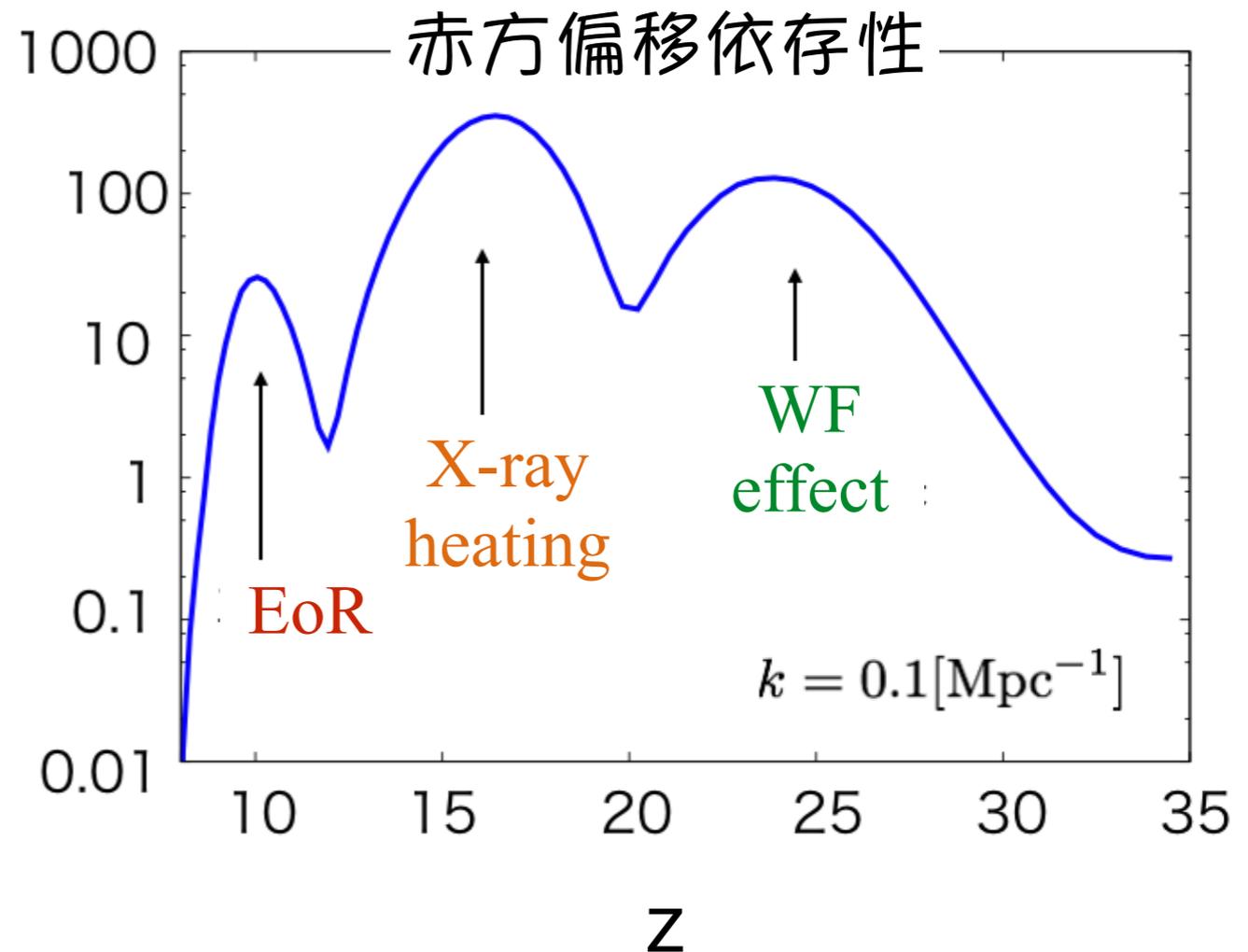
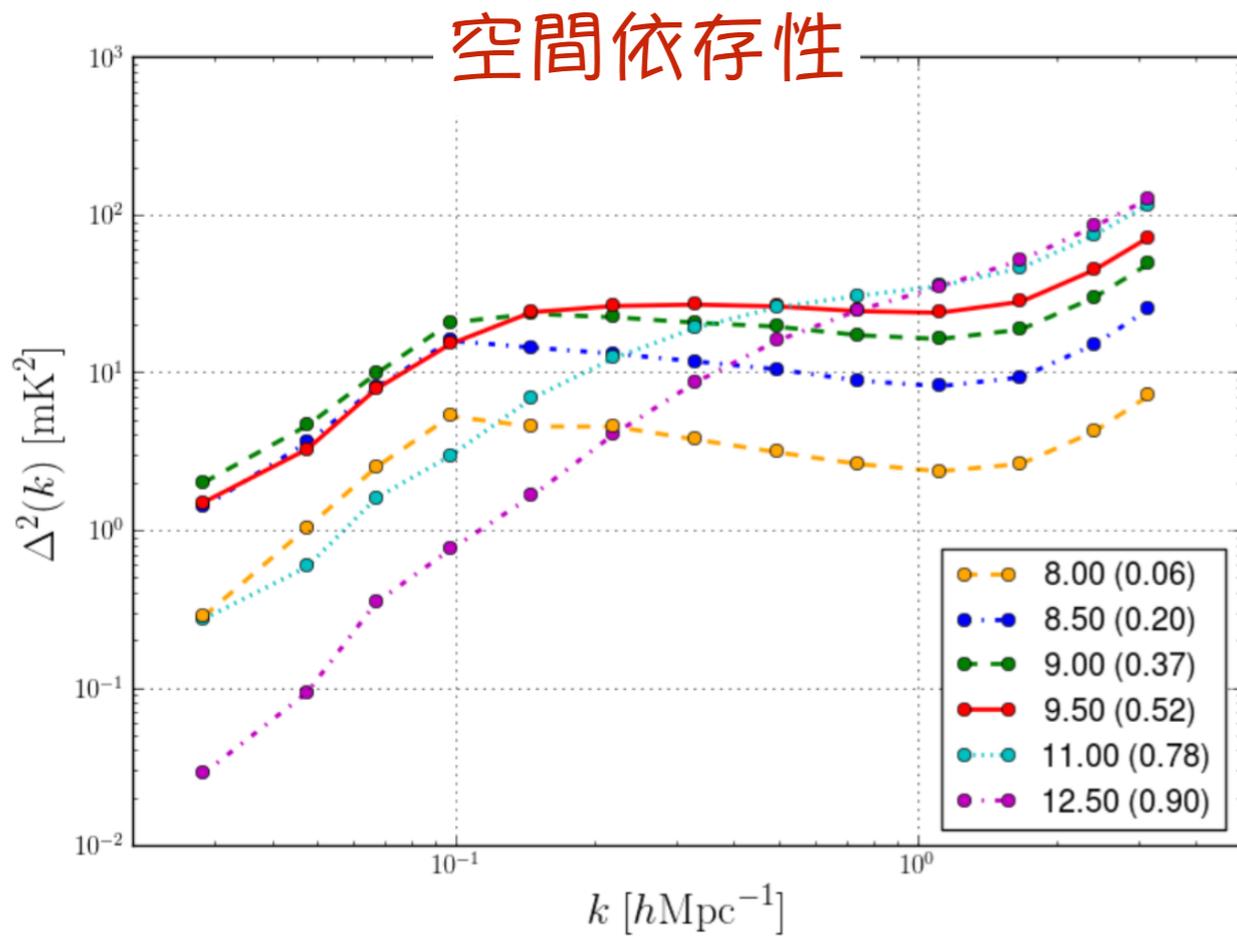
$$\sim 27 x_H (1 + \delta_m) \left( \frac{H}{dv_r/dr + H} \right) \left( 1 - \frac{T_\gamma}{T_S} \right) \left( \frac{1 + z}{10} \frac{0.15}{\Omega_m h^2} \right)^{1/2} \left( \frac{\Omega_b h^2}{0.023} \right) [\text{mK}]$$

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

# 21cm線パワースペクトル

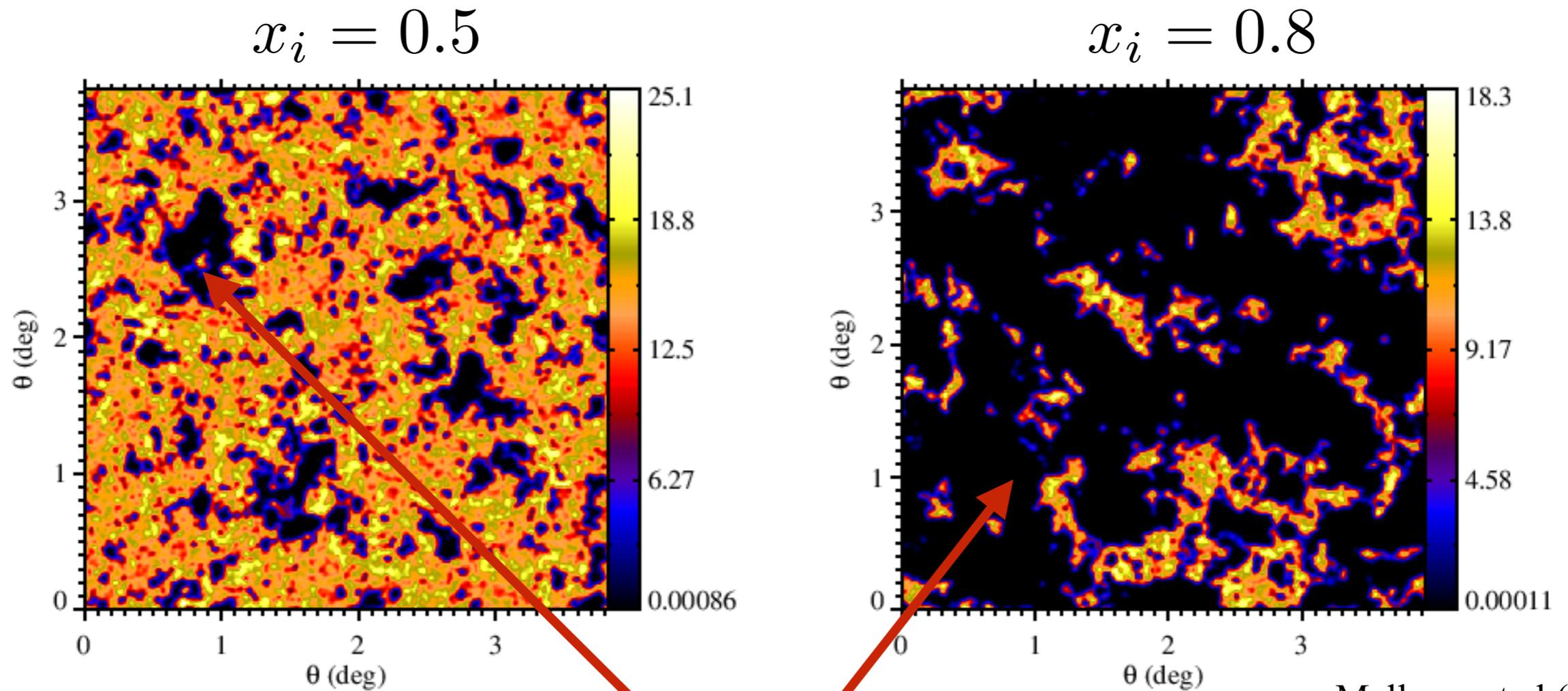
MWAやLOFARなどの先行機はまずは21cm線シグナルの統計的検出を目指す。

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



Pober et al (2014)

# 21cm線イメージングで見た再電離期



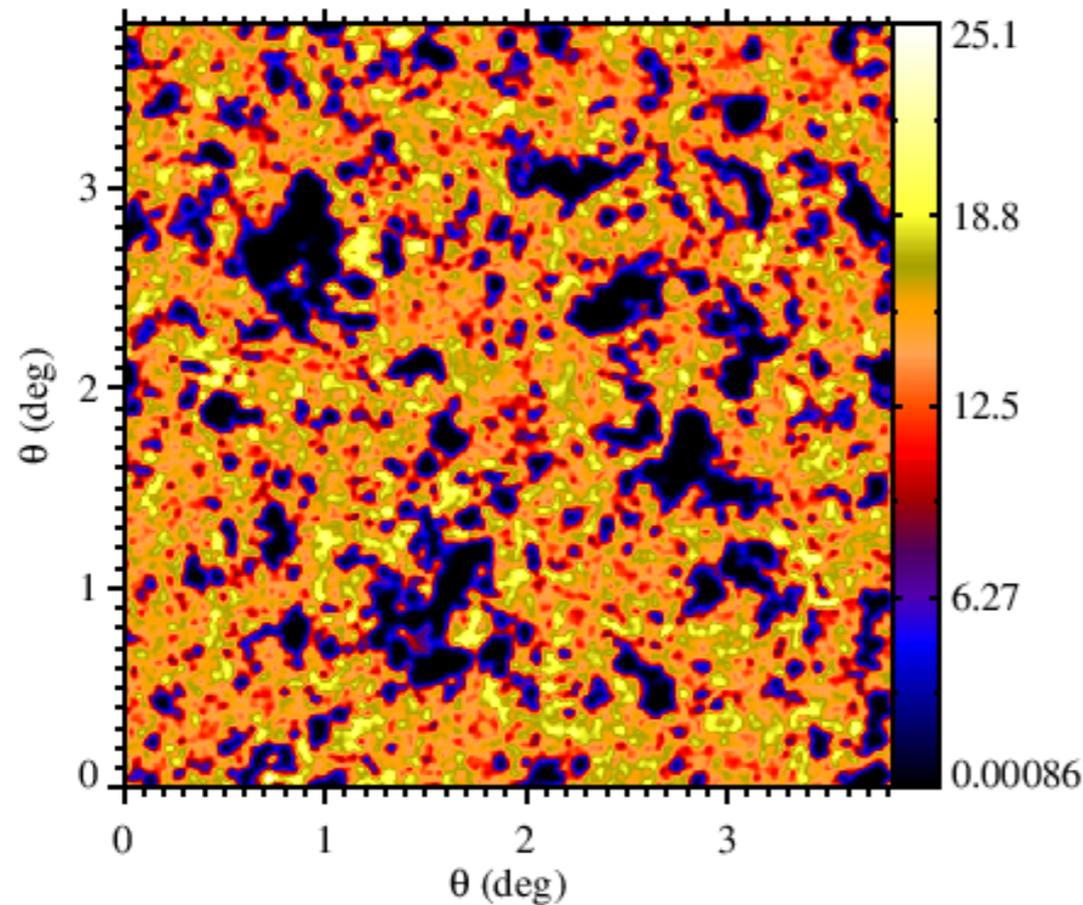
Mellema et al (2013)

イオン化領域

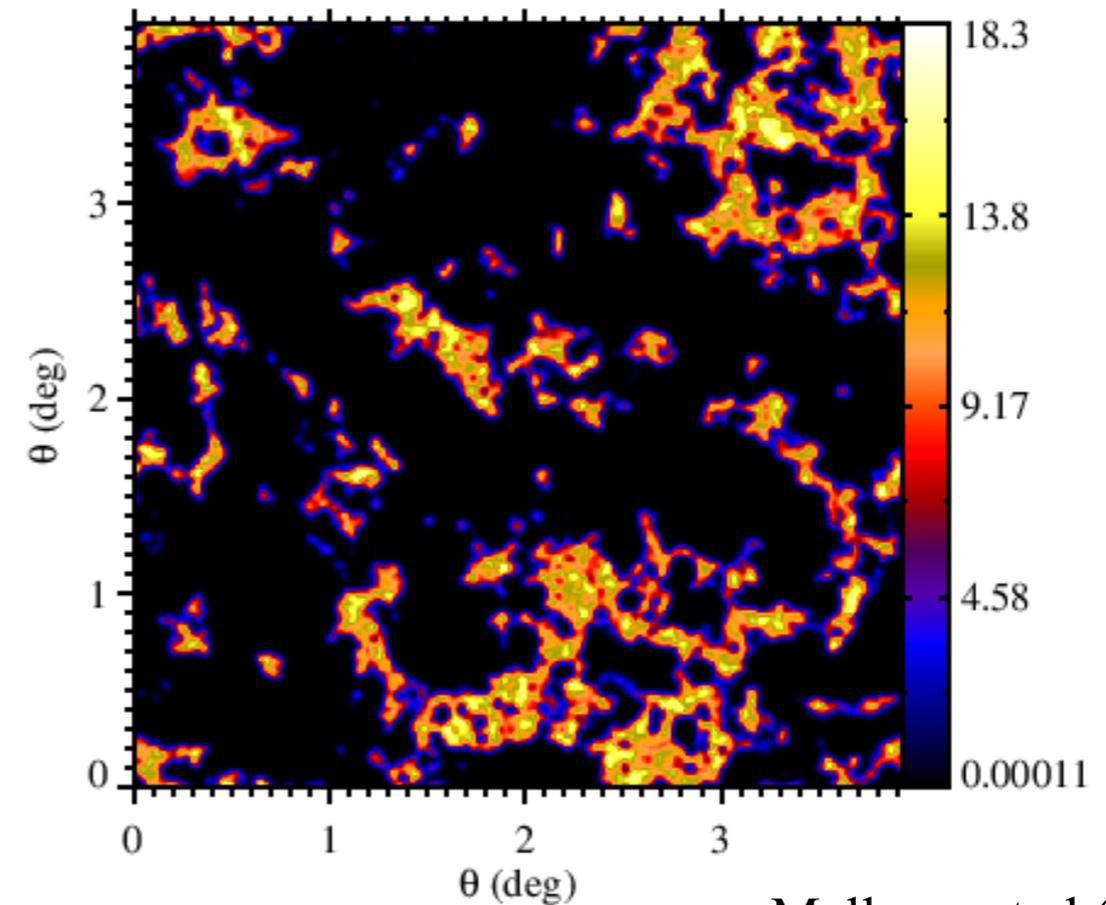
21cm線を使うとイオン化領域を3次元的に観測できる

# 21cm線イメージングで見た再電離期

$$x_i = 0.5$$



$$x_i = 0.8$$



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

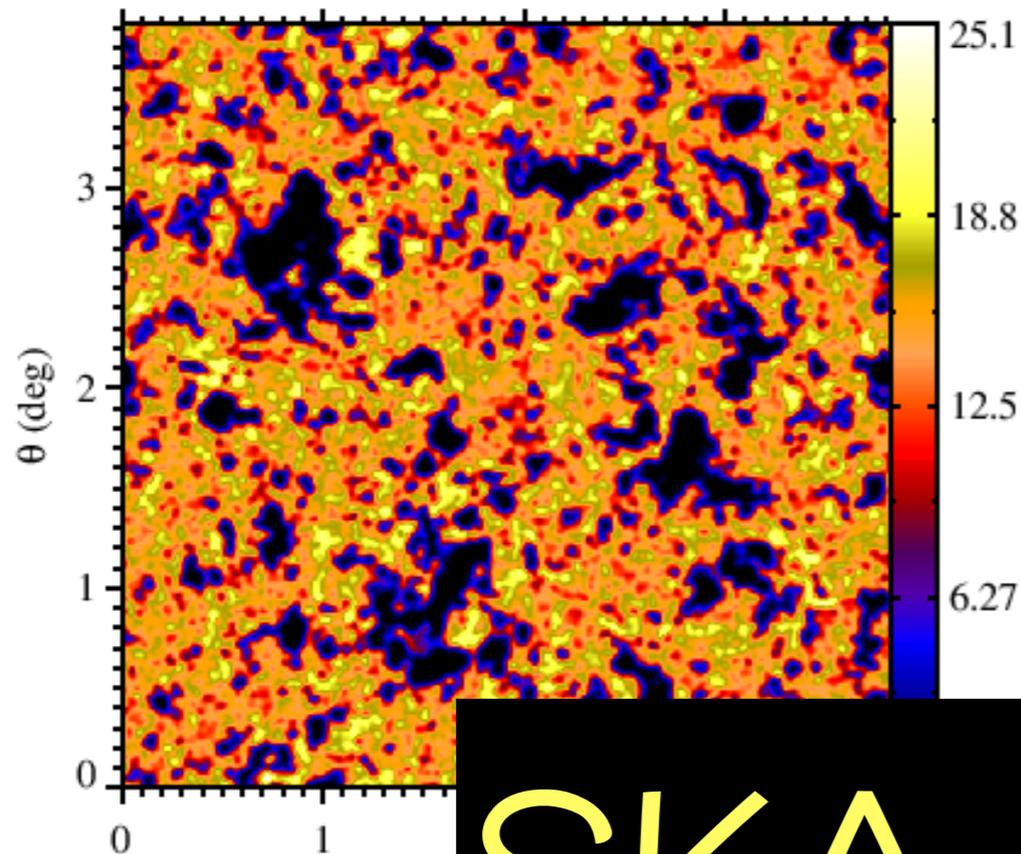
○数分角の角度分解能

○数度程度の視野

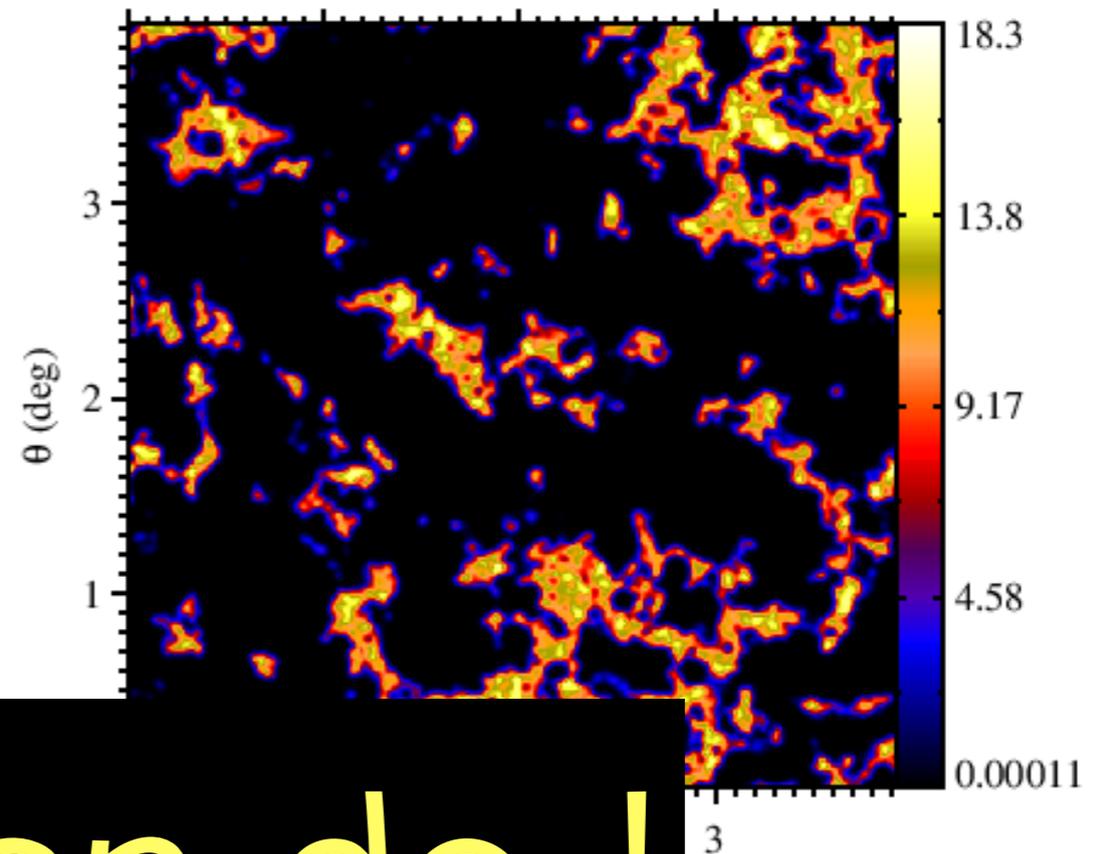
○21cm線シグナルに対して十分に低い熱雑音

# 21cm線イメージングで見た再電離期

$x_i = 0.5$



$x_i = 0.8$



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

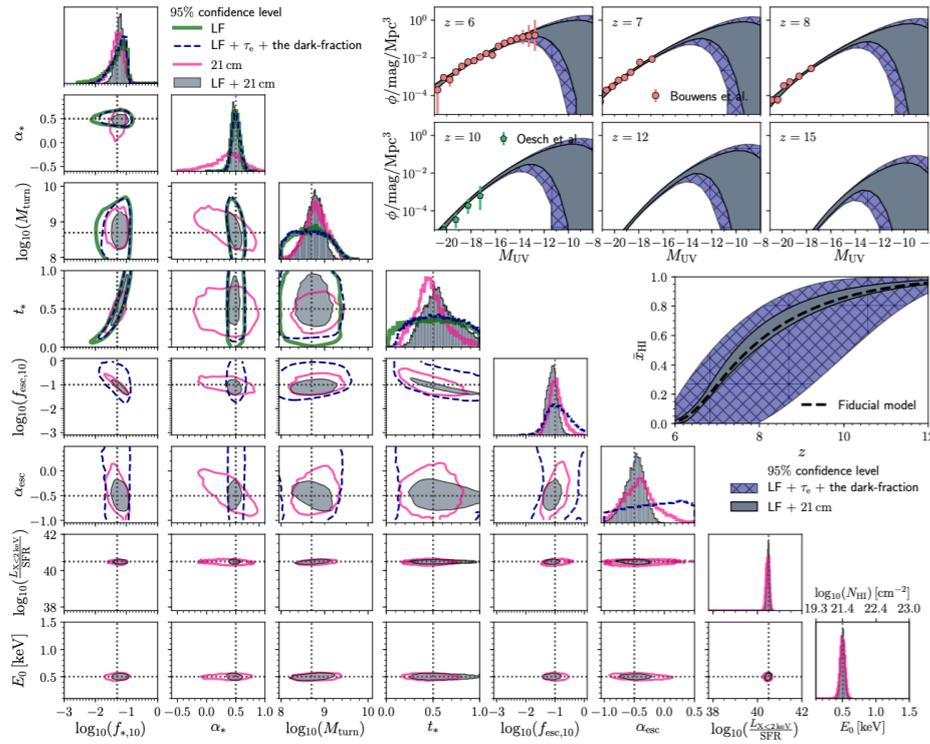
○数分角の角度分解能

○数度程度の視野

○21cm線シグナルに対して十分に低い熱雑音

# 21cm線統計的アプローチ

Park et al 2018



・ベイズ統計学を用いて21cm線パワースペクトルから再電離パラメータ推定

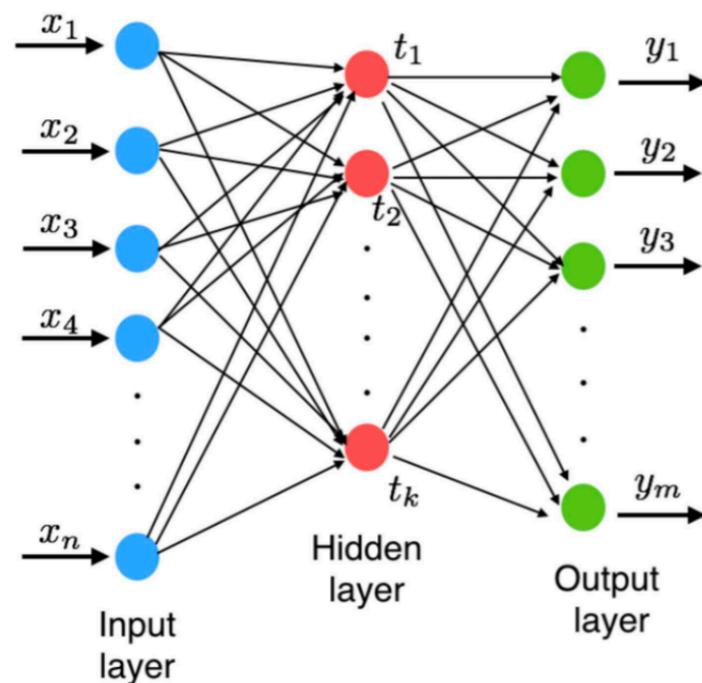
Greig & Mesinger (2016), Park et al (2018)

・21cm線高次統計量

Shimabukuro et al (2015,2016,2017), Yoshiura et al (2015)

Watkinson et al (2017), Majumadar et al (2018)

Shimabukuro & Semelin (2017)



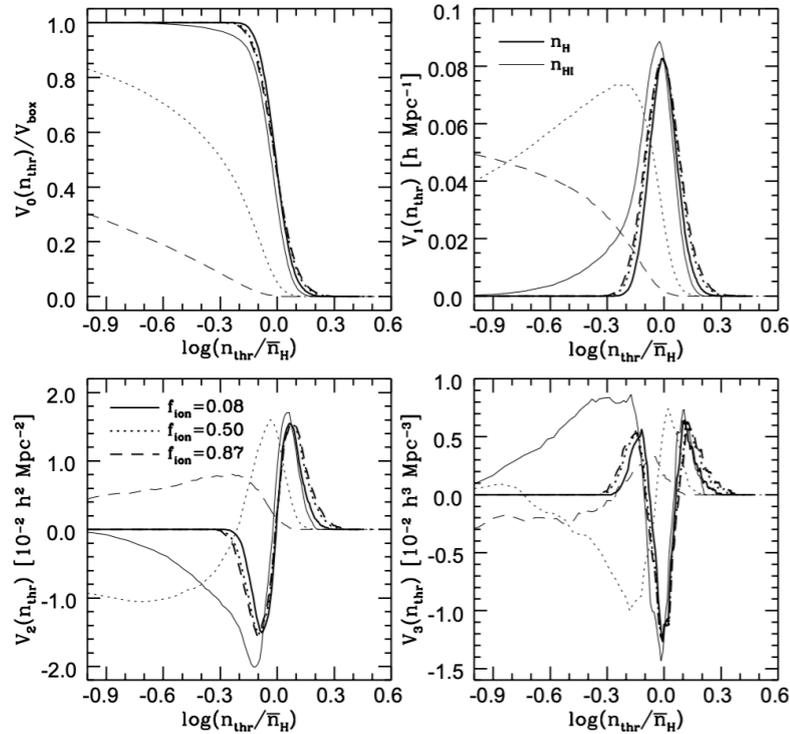
・機械学習を用いた21cm線パワースペクトルからのパラメータ推定

Shimabukuro & Semelin (2017), Schmit et al (2018)

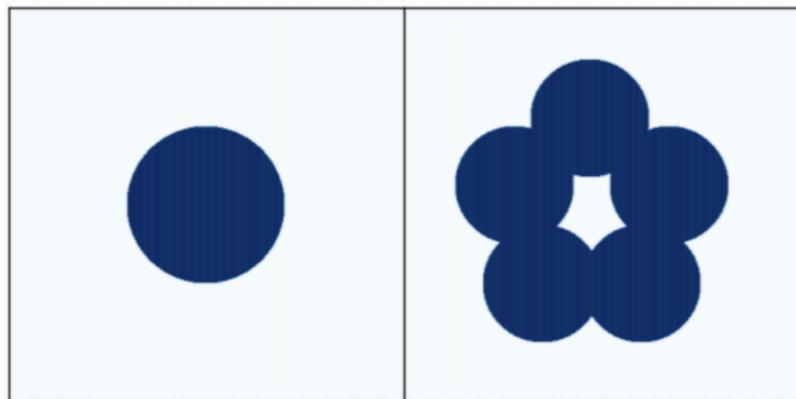
統計的アプローチで再電離モデルへの制限

# 電離バブルの幾何学

Gleser et al (2006)



Giri et al (2021)



・ミンコフスキー汎関数

Gleser et al (2006), Lee et al (2008), Friedrich et al (2011), Hong et al (2014), Yoshiura et al (2017)

・ベッチ数

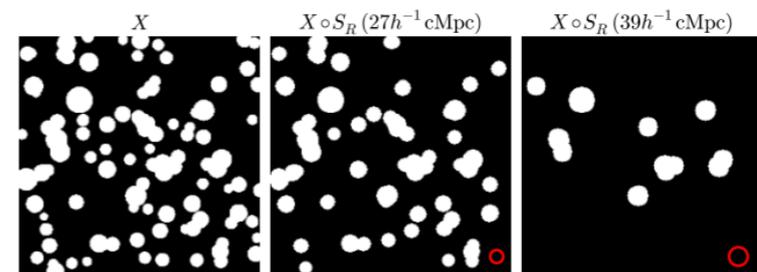
Giri et al (2021), Kapahtia et al (2021)

・ニューラルネットワーク

Shimabukuro & et al (2020), Yoshiura et al (2021)

・グラニューロメトリー法

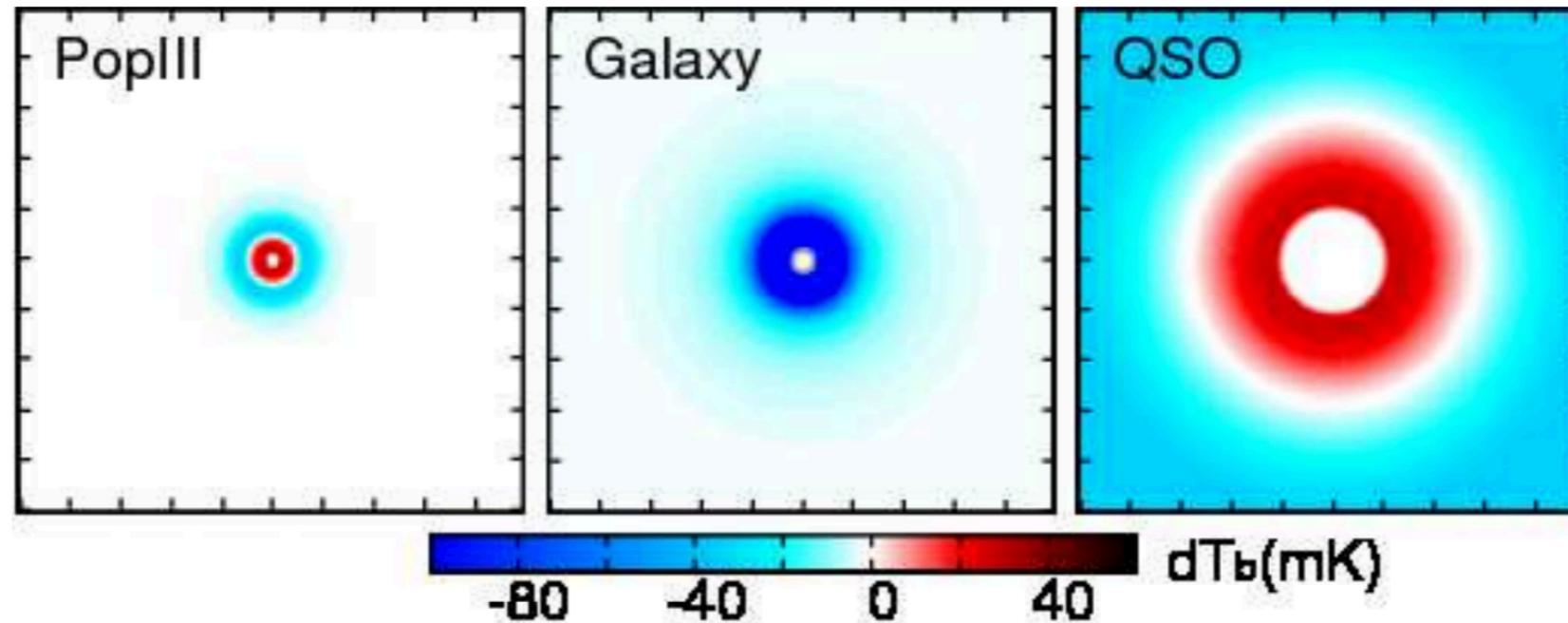
Kakiichi et al (2017)



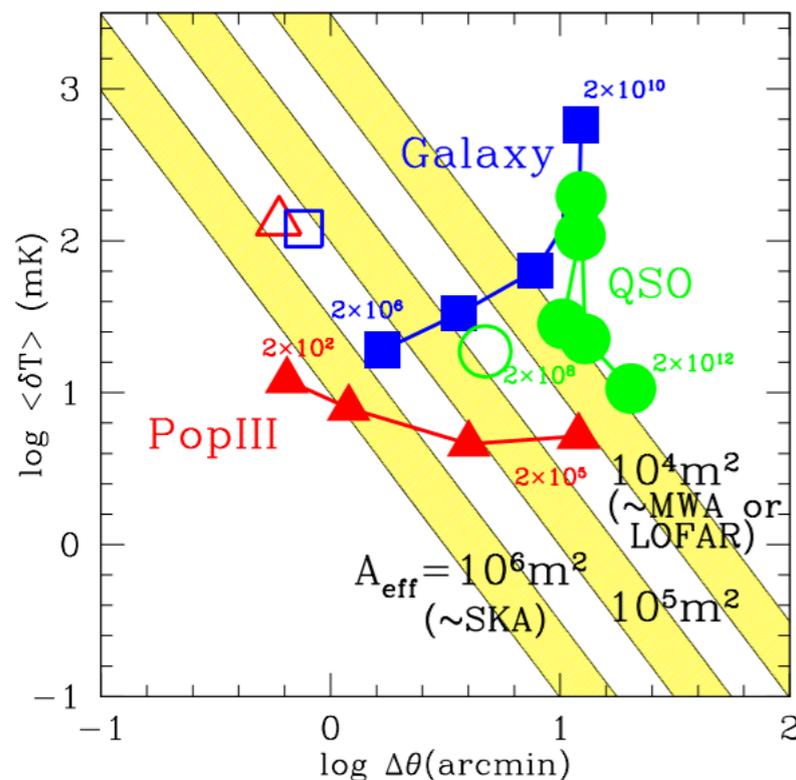
再電離の空間的（幾何学的）特徴を定量的に評価

# 初期天体と再電離

Yajima & Li (2013)



Yajima & Li (2013)



・初期天体と21cm線シグナル

Yajima & Li (2013), Tanaka et al (2018)

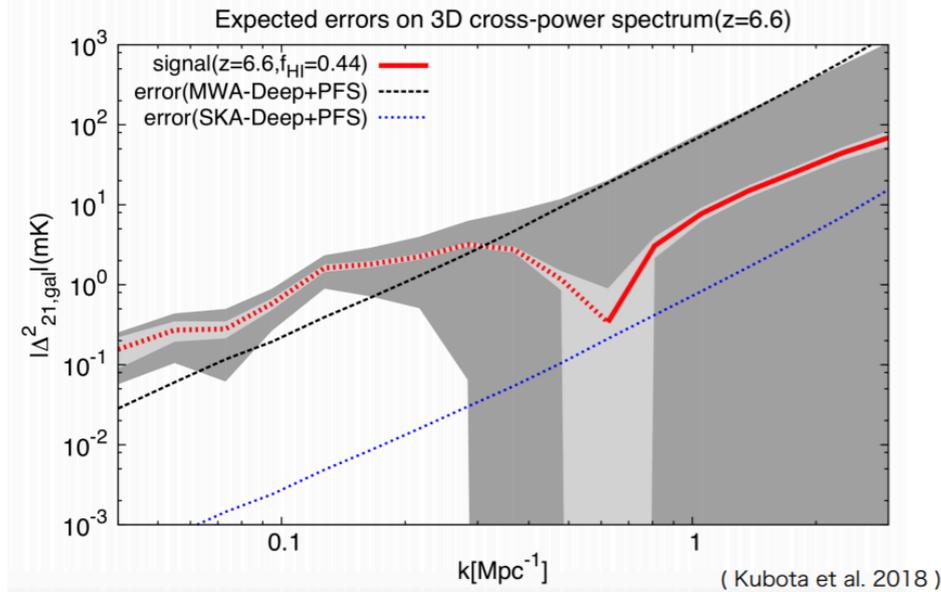
・銀河形成と再電離

Hasegawa & Semelin (2013), Hutter et al (2020)

銀河形成・進化が再電離に与える影響を評価

# 21cm線と他波長観測

Kubota et al (2018)



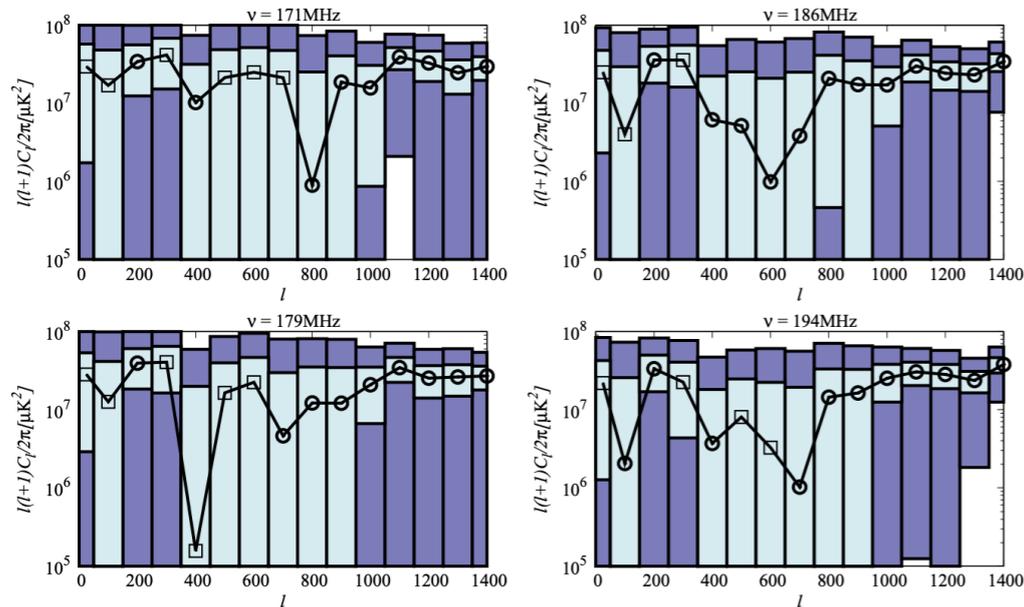
・21cm線とライマン $\alpha$ 輝線銀河の相互相関

Yoshiura et al (2018), Kubota et al (2018)

・21cm線と酸素[OIII]輝線銀河の相互相関

Moriwaki et al (2019)

Yoshiura et al (2019)



・21cm線とCMBの相互相関

Yoshiura et al (2019)

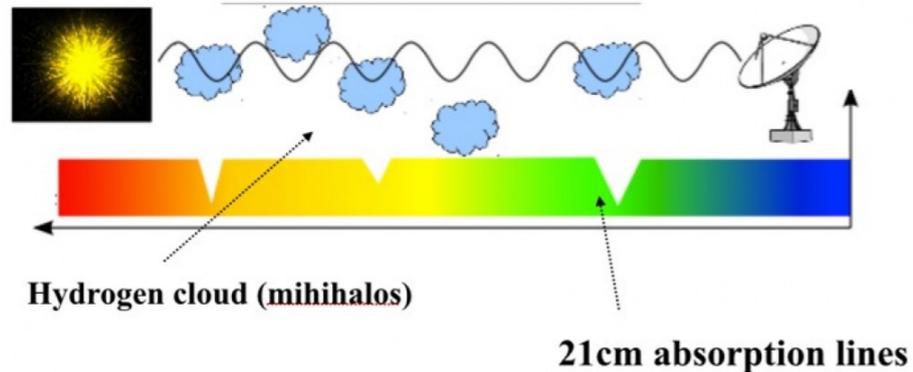
・21cm線と背景X線の相互相関

Ma et al (2018)

21cm線と他波長観測は異なる系統誤差のため、21cm線シグナル検出に有効

# 21cm線吸収線系

bright radio source (ex. GRB, QSO, etc)



・21cm吸収線系で探る宇宙の加熱や銀河間物質の温度状態

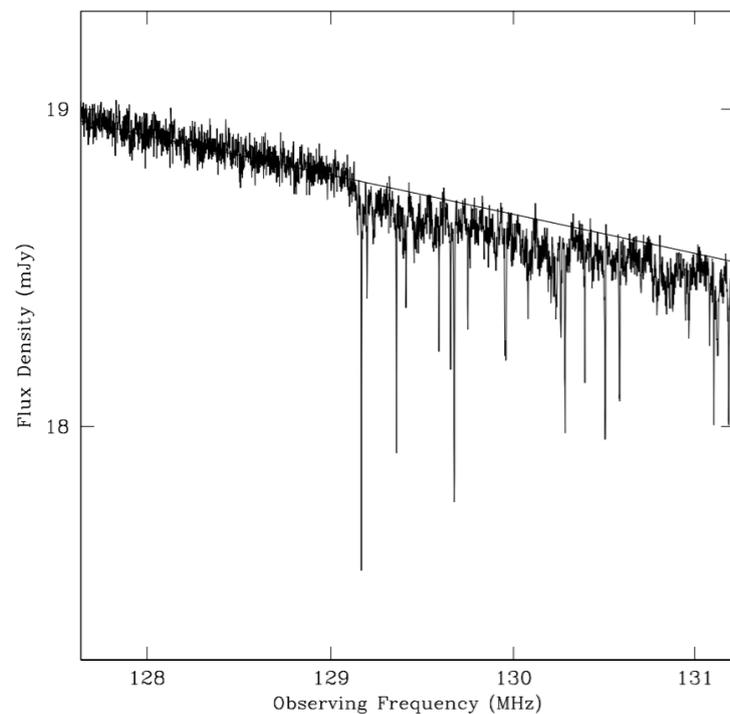
Furlanetto & Loeb (2002), Ciardi et al (2015), Semelin (2015)

・21cm吸収線系で探る暗黒物質やインフレーション

[Shimabukuro](#) et al (2014,2019,2020a), Villanueva & [Ichiki](#) (2021), Kawasaki et al (2020)

・21cm吸収線観測による銀河形成の検証

Xu et al (2011), Aditya et al (2021)



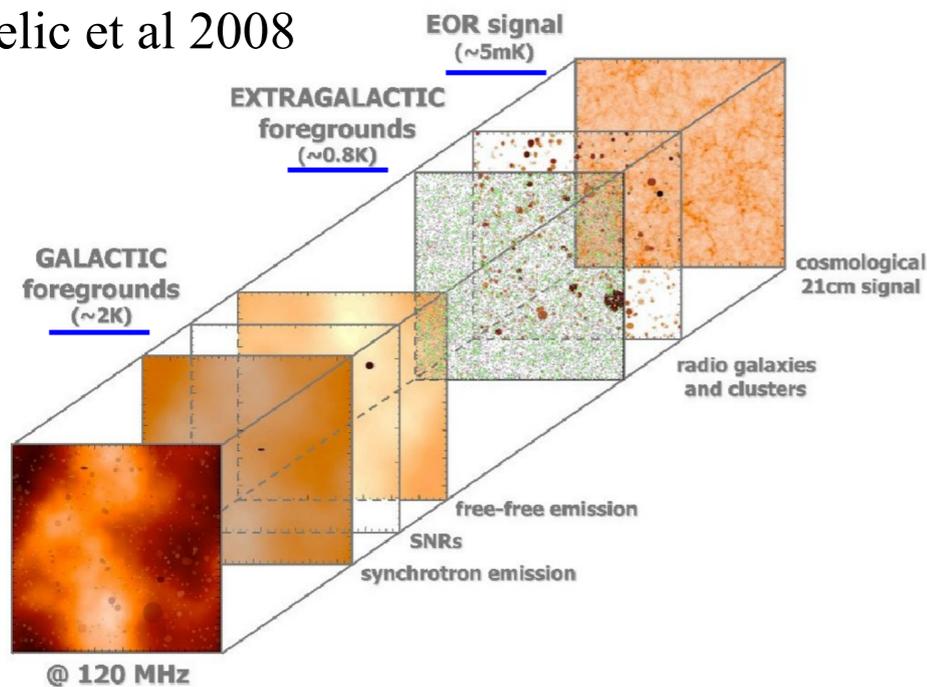
Carilli+ 2002

宇宙再電離のみならず、宇宙論、銀河進化研究とも関係

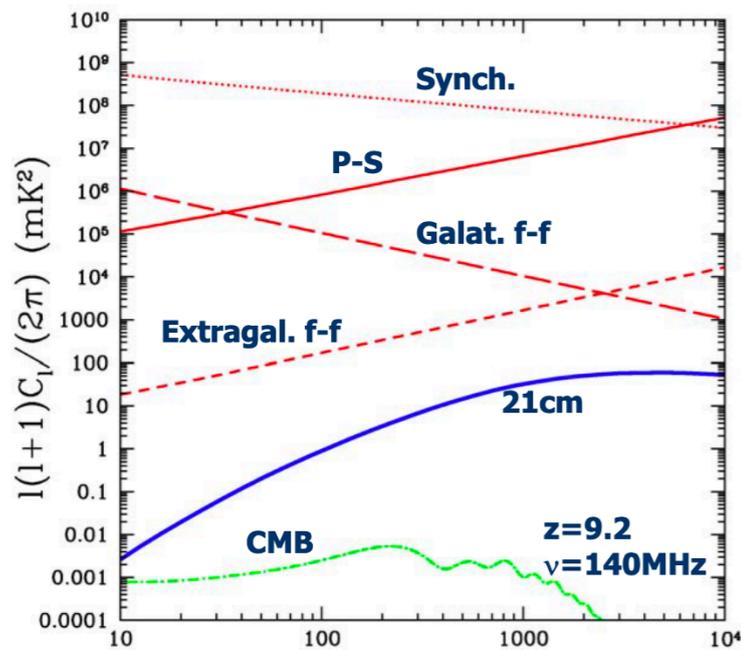
# 21cm線観測への課題

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(and)

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

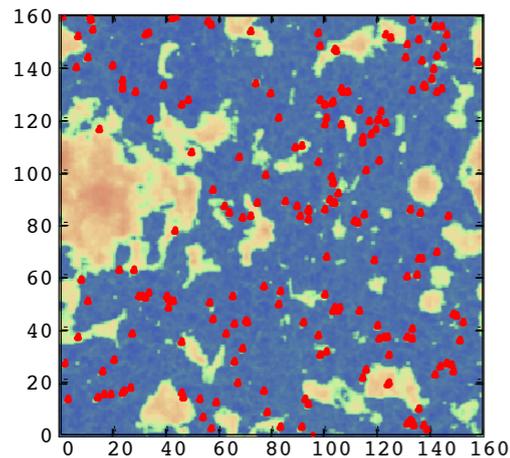
Yoshiura et al (2018)

Kubota et al (2018)

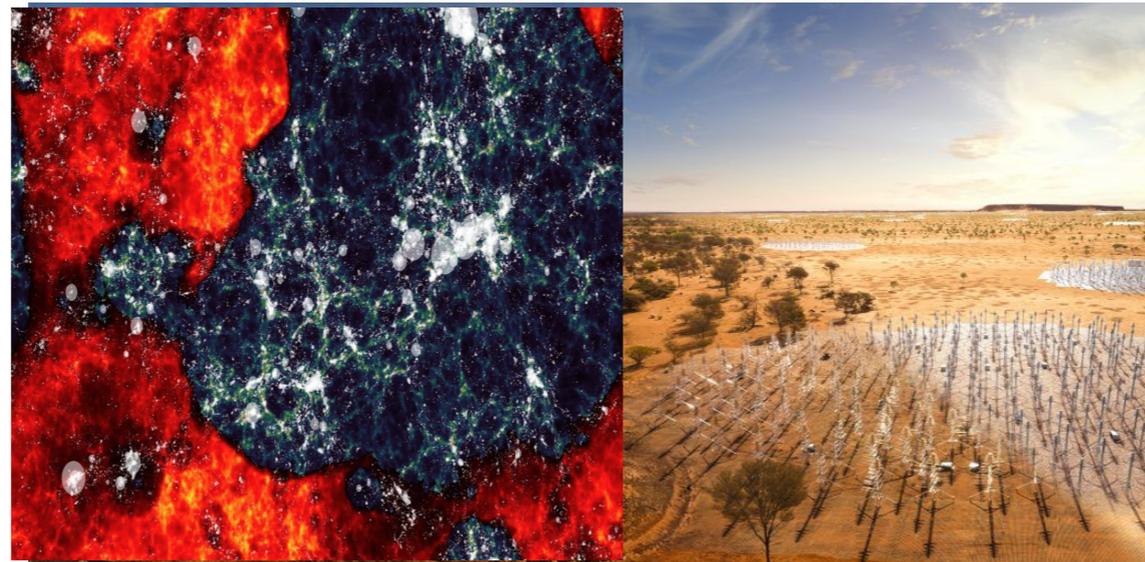
# 21cm線と他波長のシナジーによる 宇宙再電離の包括的説明

## 他波長観測

(e.g. 銀河)

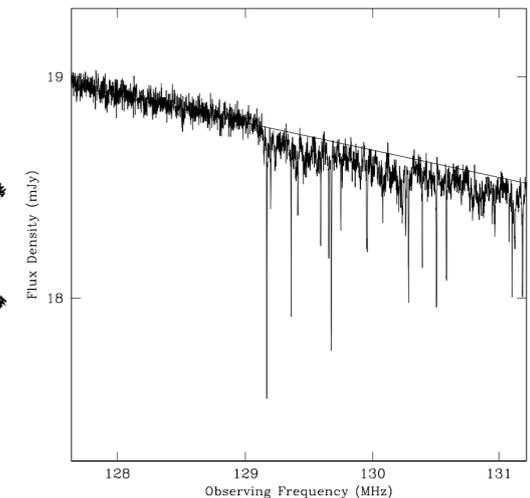


## 21cm線観測 SKA Low



## 他波長観測

(e.g. クエーサー)



## 相互相関

宇宙再電離を探る手法として中性水素の21cm輝線が有力である。他波長との**相互相関**を取ることで微弱な21cm線を検出でき、さらに電離光源の正体に迫ることもできる。

## 21cm吸収線

一方、**21cm吸収線**によりこれまでの観測では届かない低質量天体が検出可能になり、宇宙再電離期の銀河形成、初期宇宙や暗黒物質などの未知の物理の理解が飛躍的に高まる。

# SKAに向けた日本グループの取組み

- ・国際SKA再電離サイエンスグループへの参加（市來、井上、島袋、高橋、竹内、橋本、長谷川、吉浦）
- ・先日のEast Asia SKA workshopのブレイクアウトセッション内の議論（Ahn、Parkinson、島袋、吉浦）で再電離&宇宙論の東アジアワークショップ&サマースクール案を企画（2022年）。
- ・島袋はSKA中国再電離グループコアメンバーのため、中国との橋渡しも。
- ・日本グループはこれまでは理論研究が多かったが、SKA先行機（MWA）のデータを使った研究も開始。（Yoshiura et al 2019、2021）
- ・21cm線観測には避けて通れない電離層、RFI、前景放射について、若手有志による勉強&研究も開始（吉浦、伊東、宮元、島袋、赤堀、高橋）