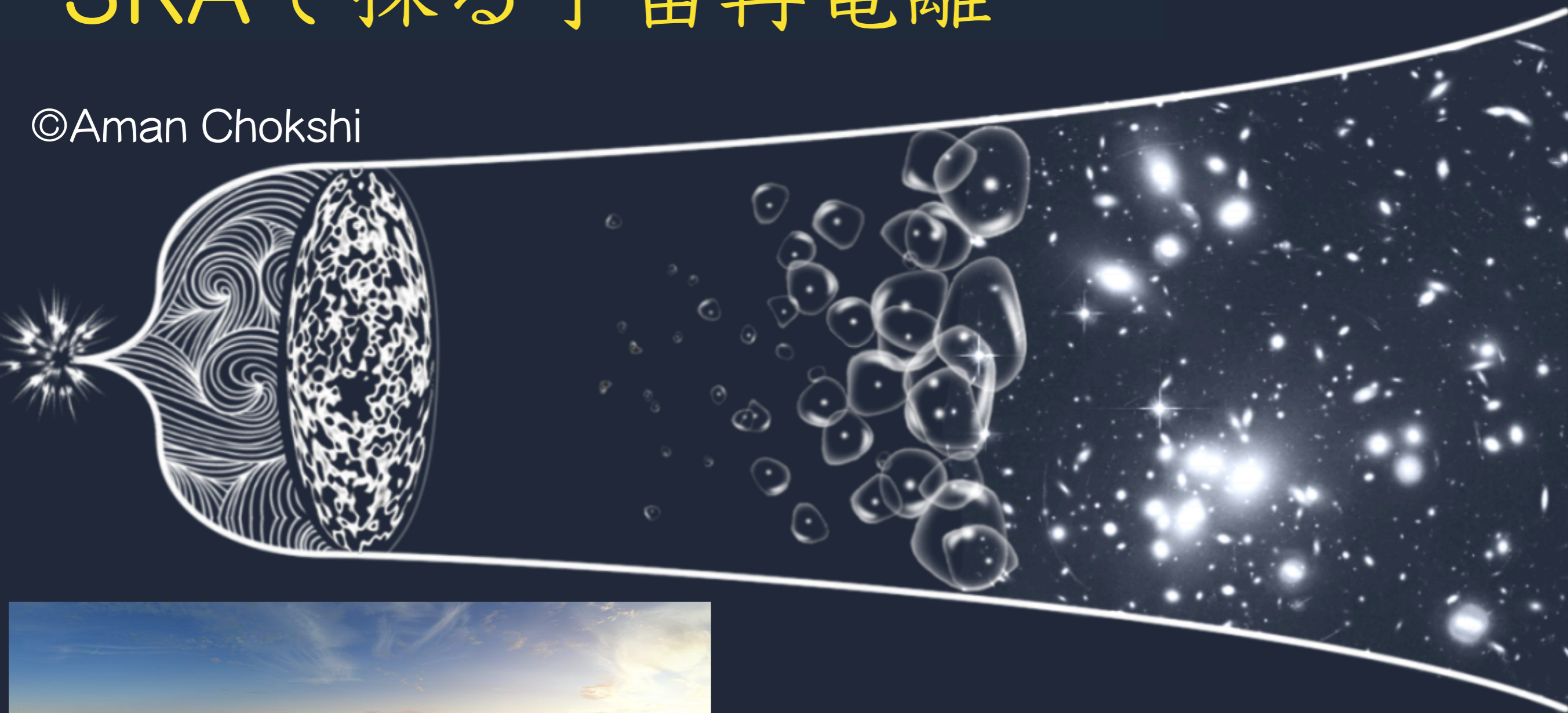




# SKAで探る宇宙再電離

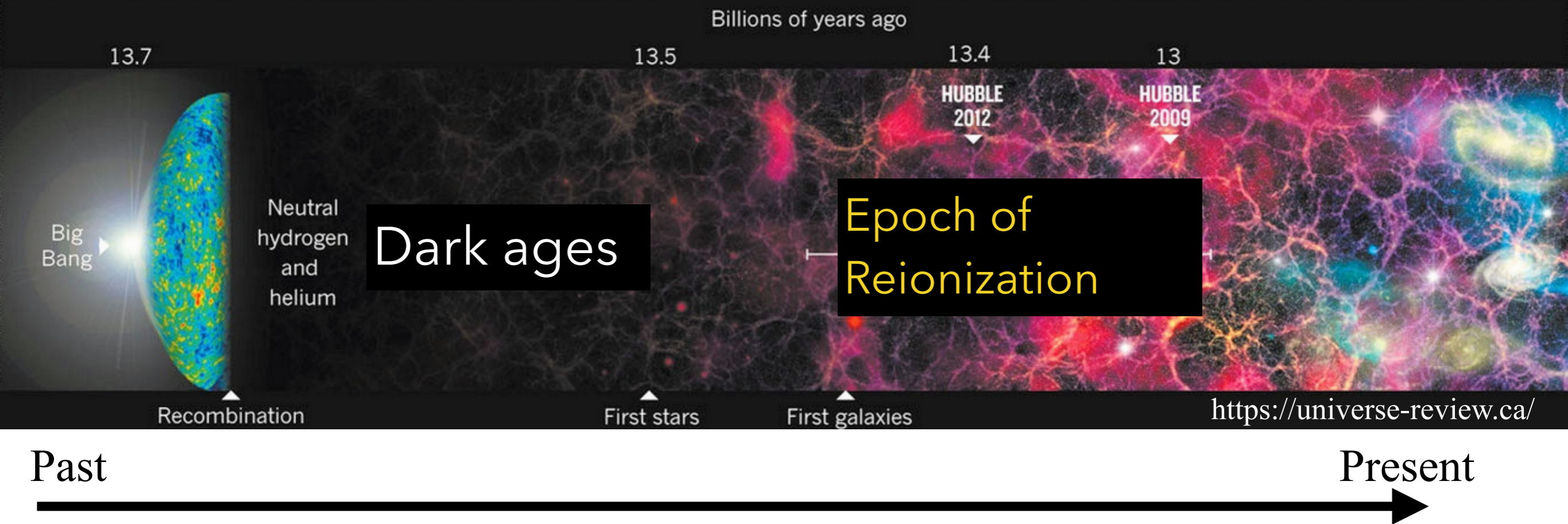
©Aman Chokshi



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

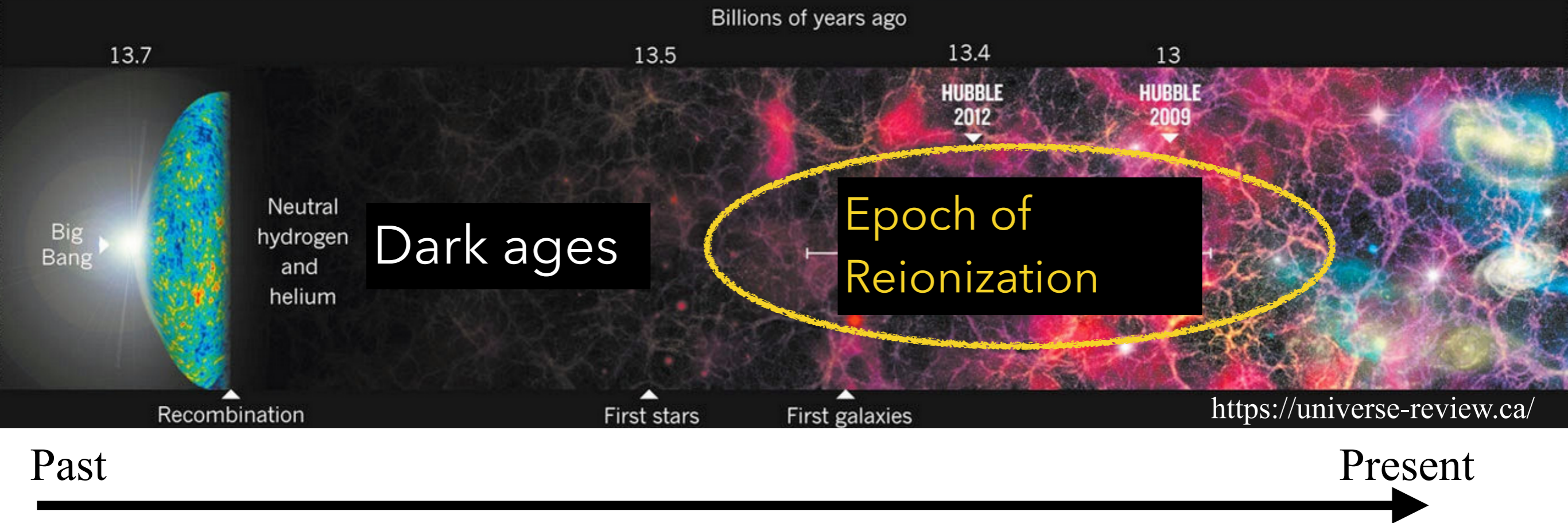


宇宙暗黒時代 (Dark Ages) . . . 星や銀河の存在しない真っ暗な時代

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

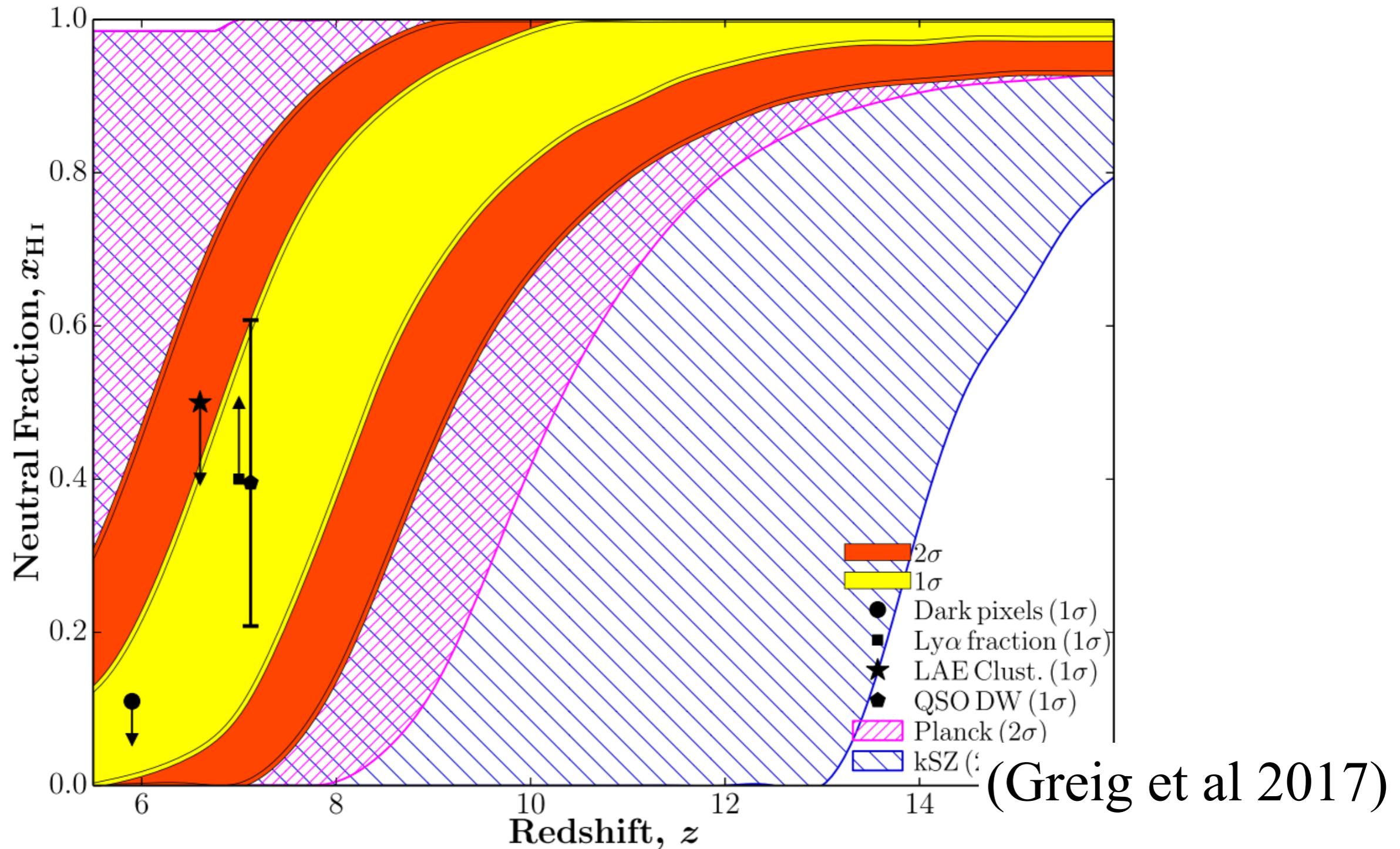
宇宙の夜明け (Cosmic Dawn) . . . 宇宙最初の星や銀河が作られる ( $z \sim 20-30$ ).

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

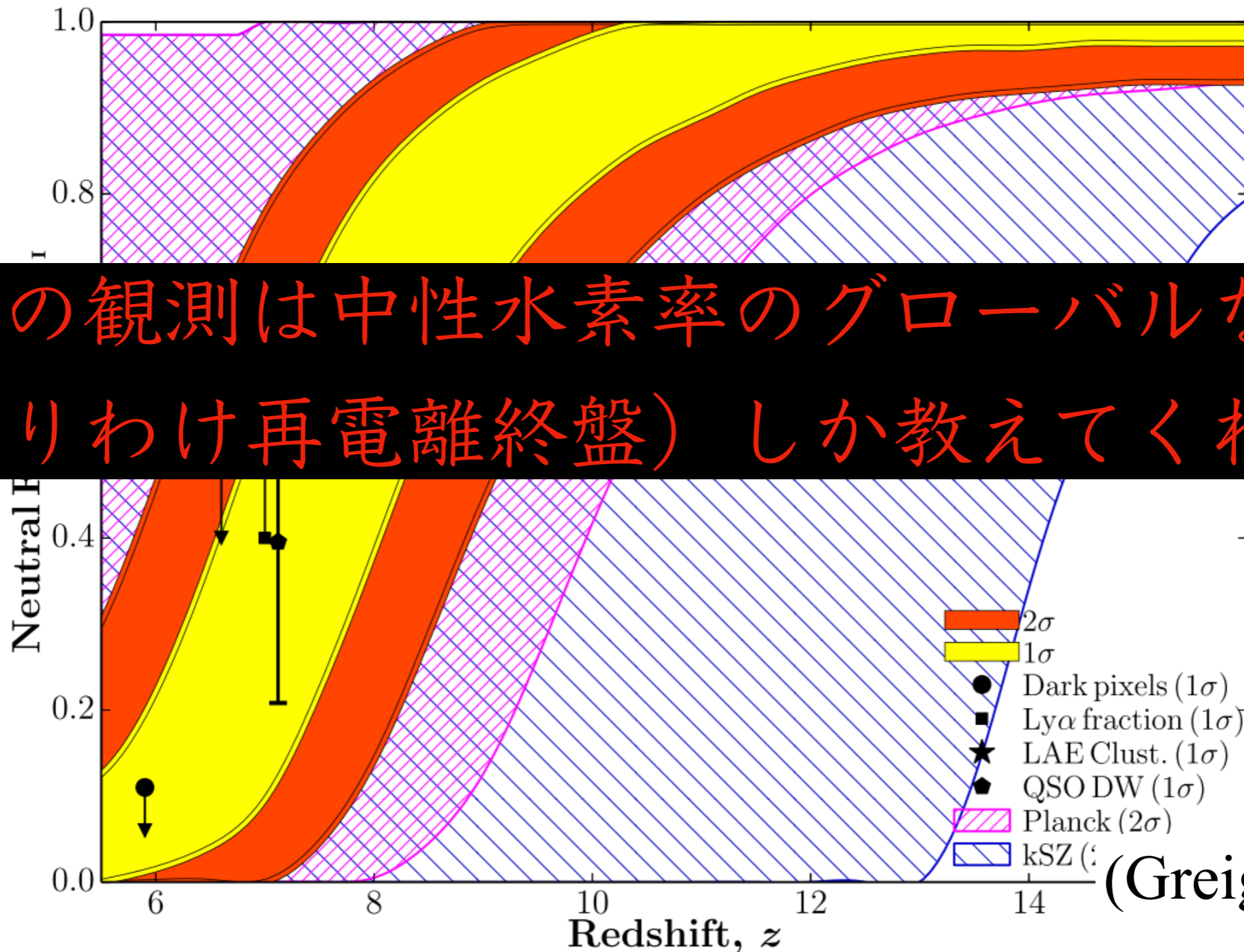
平均的な中性水素率の時間進化 (グローバルヒストリー)





# 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。

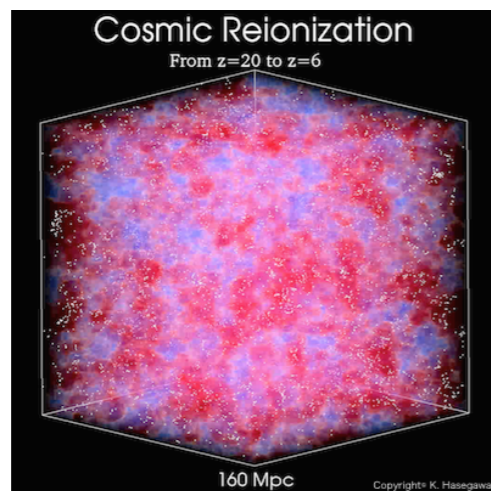


# 再電離期の性質についてより詳しく知りたい。

(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。



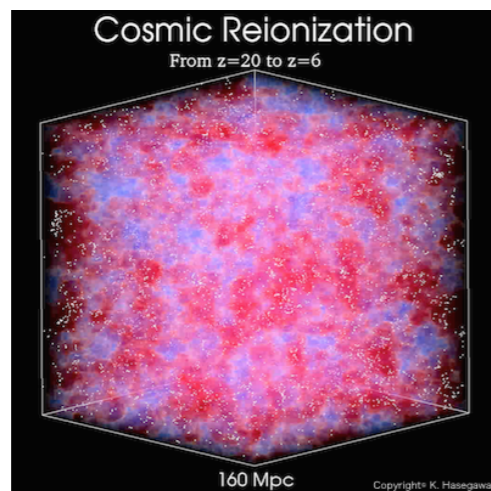
# 再電離期の性質についてより詳しく知りたい。

(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！





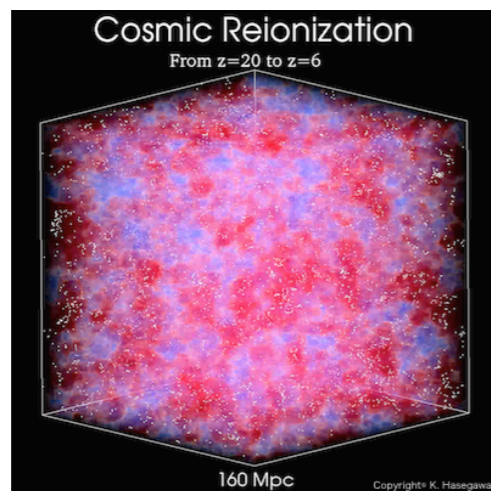
# 再電離期の性質についてより詳しく知りたい。

(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)

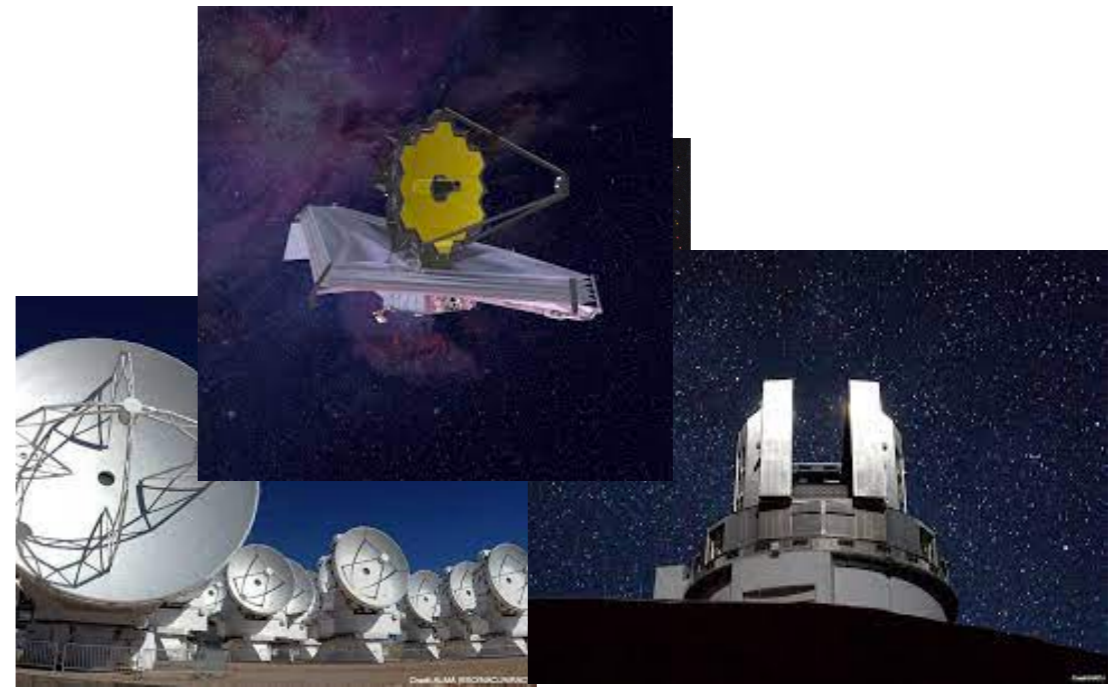
- ・再電離モデルへの制限
- ・イオン化バブルの空間的性質（トポロジー等）や時間進化
- ・再電離源は何？
- ・銀河形成や進化と再電離の関係

➡ 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！



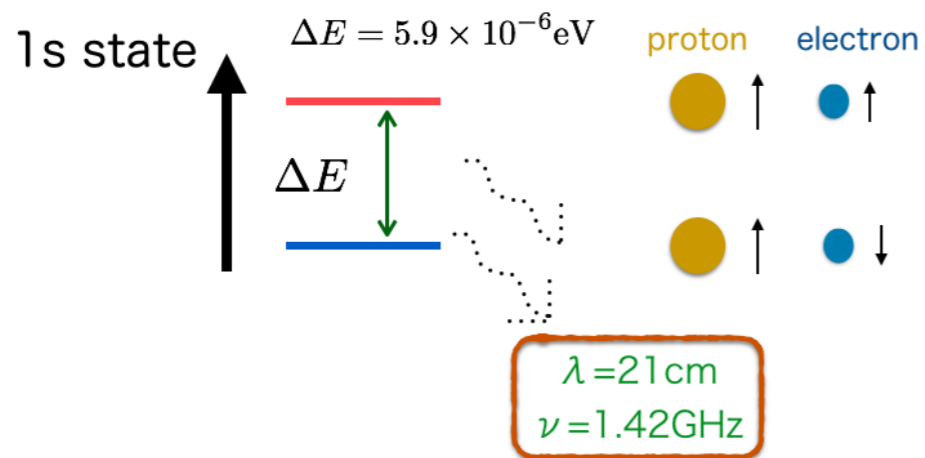
×





# 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

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

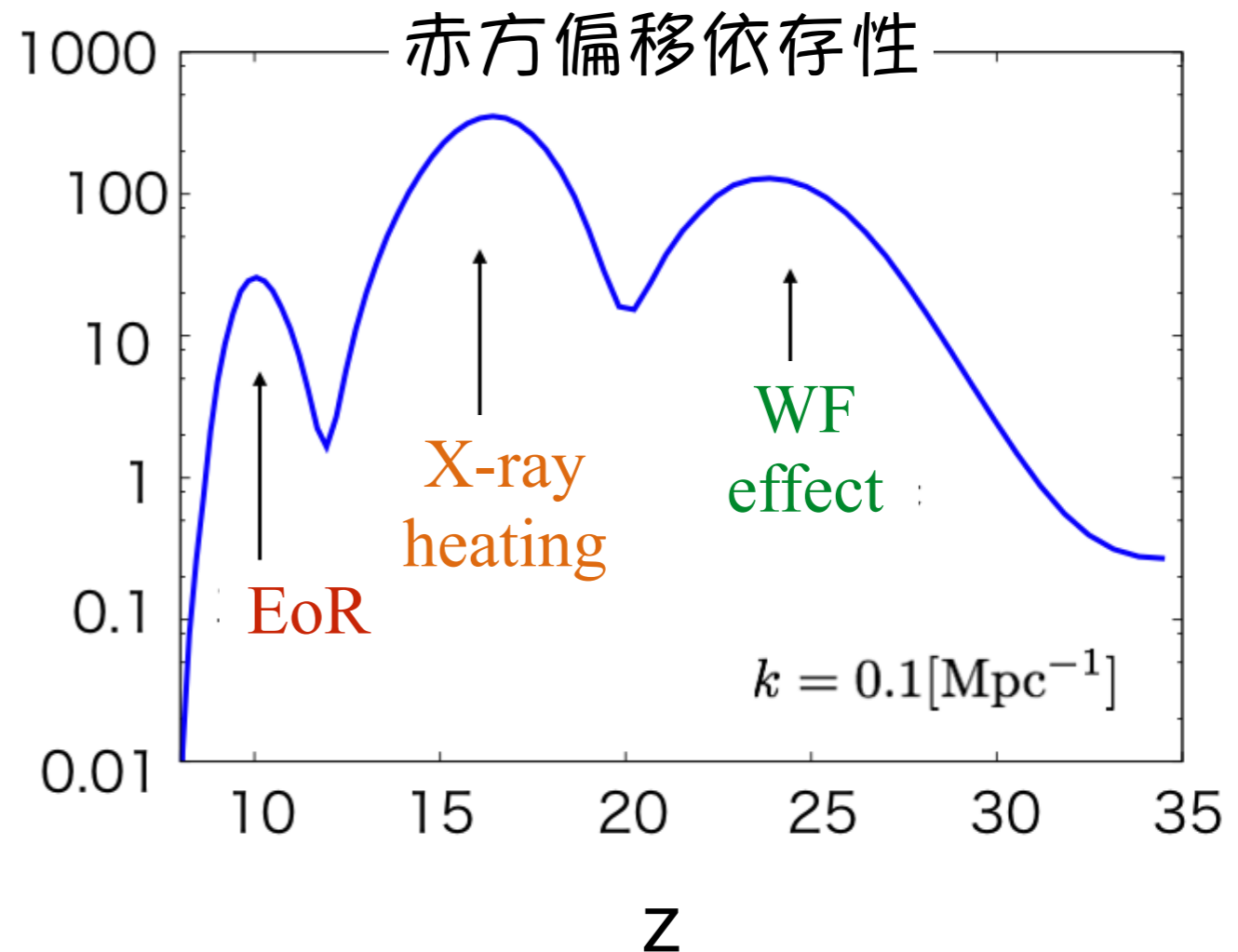
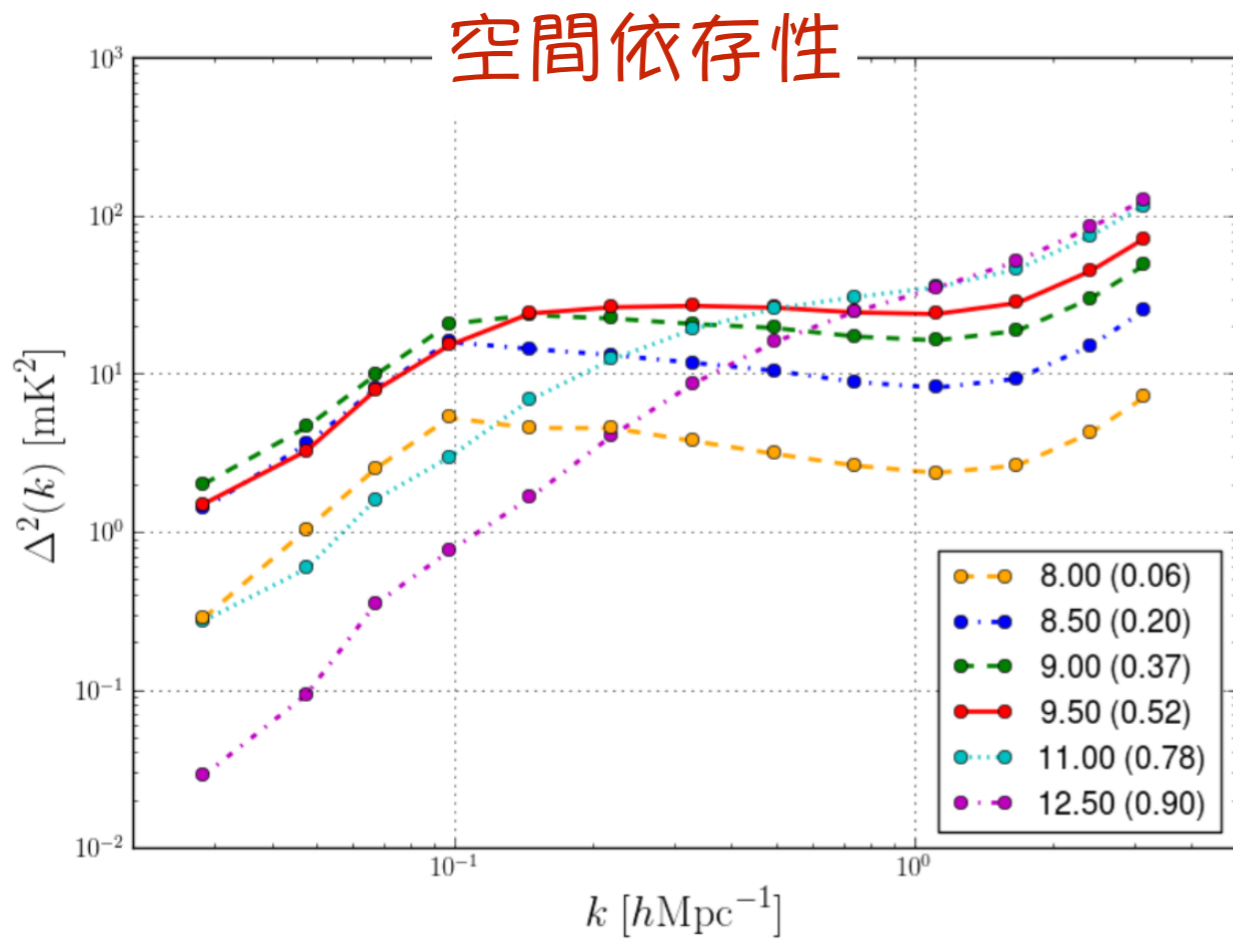
$$\sim 27 x_H (1 + \delta_m) \left( \frac{H}{dv_r/dr + H} \right) \left( 1 - \frac{T_\gamma}{T_S} \right) \left( \frac{1 + z}{10} \frac{0.15}{\Omega_m h^2} \right)^{1/2} \left( \frac{\Omega_b h^2}{0.023} \right) [\text{mK}]$$

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。

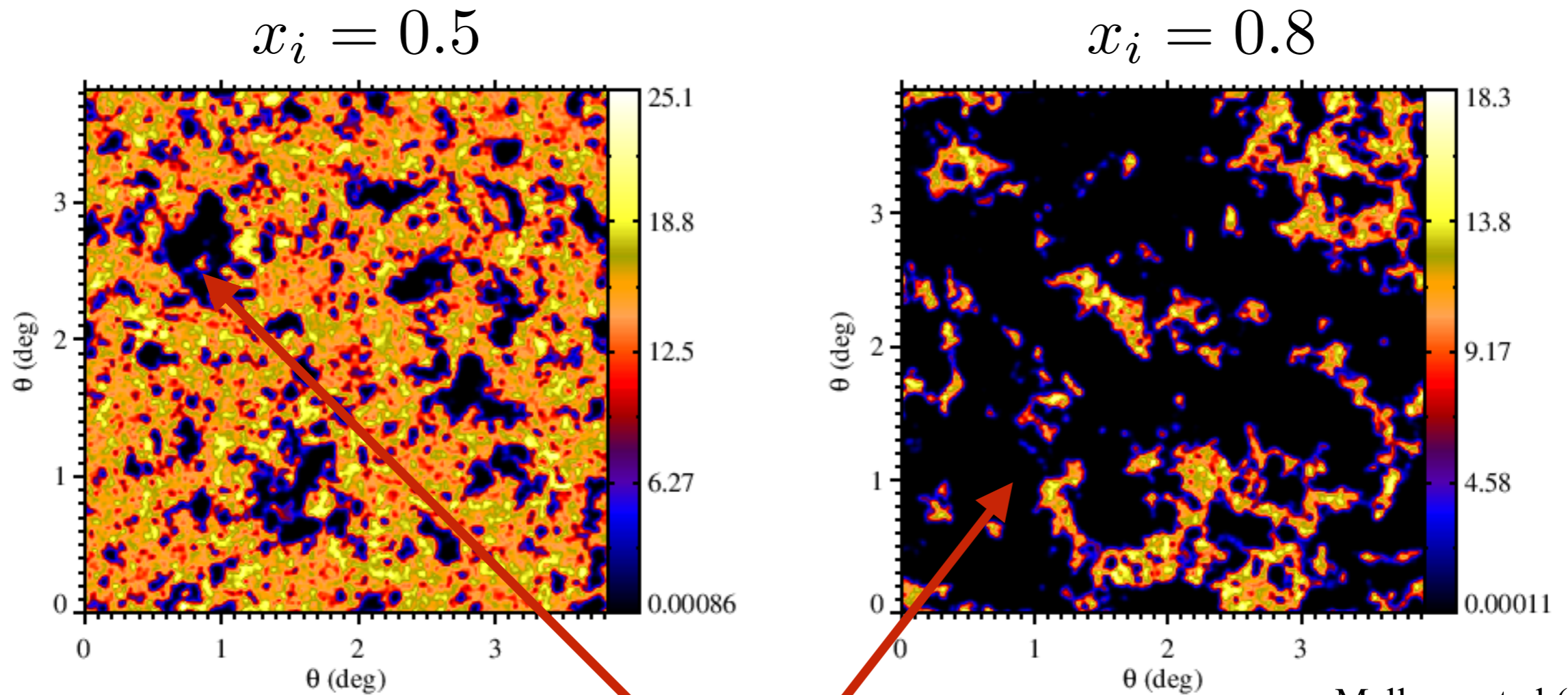
21cm power spectrum (PS) :  $\langle \delta T_b(\mathbf{k}) \delta T_b(\mathbf{k}') \rangle = (2\pi)^3 \delta(\mathbf{k} + \mathbf{k}') P_{21}$



Pober et al (2014)



# 21cm線イメージングで見た再電離期



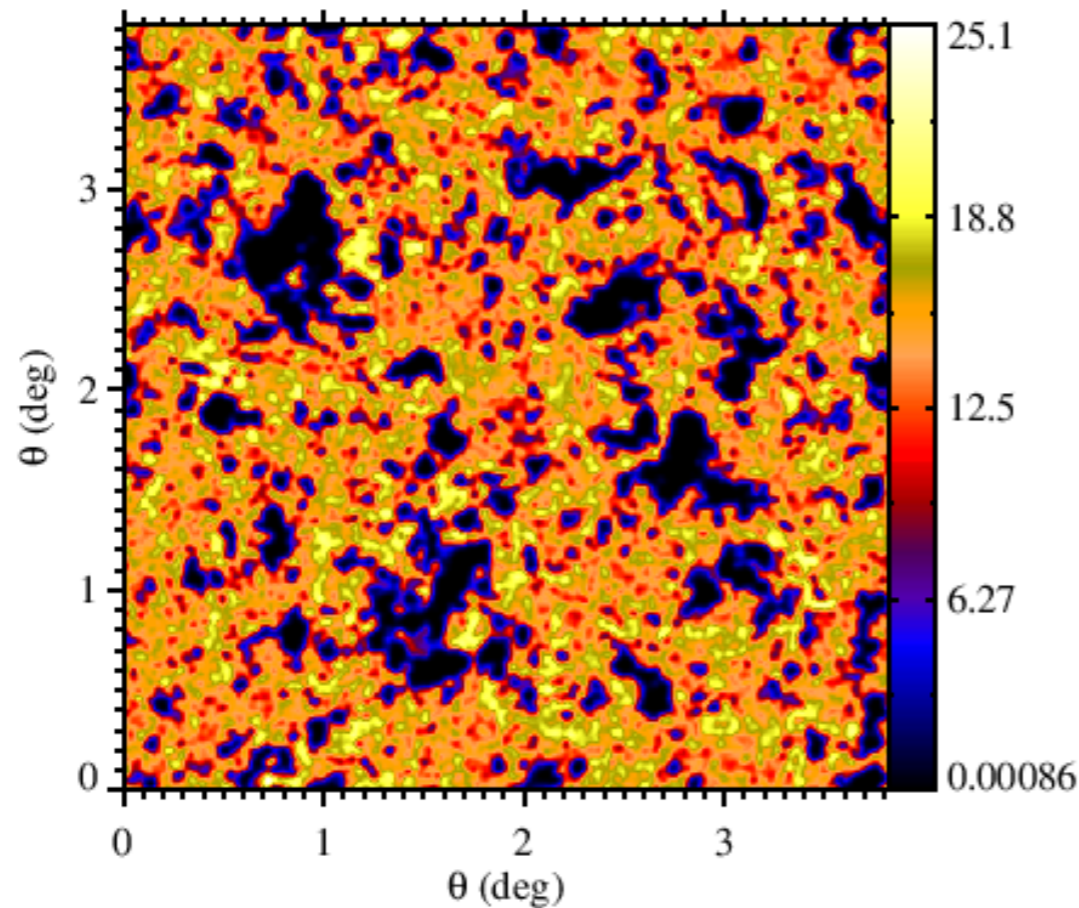
Mellema et al (2013)

イオン化領域

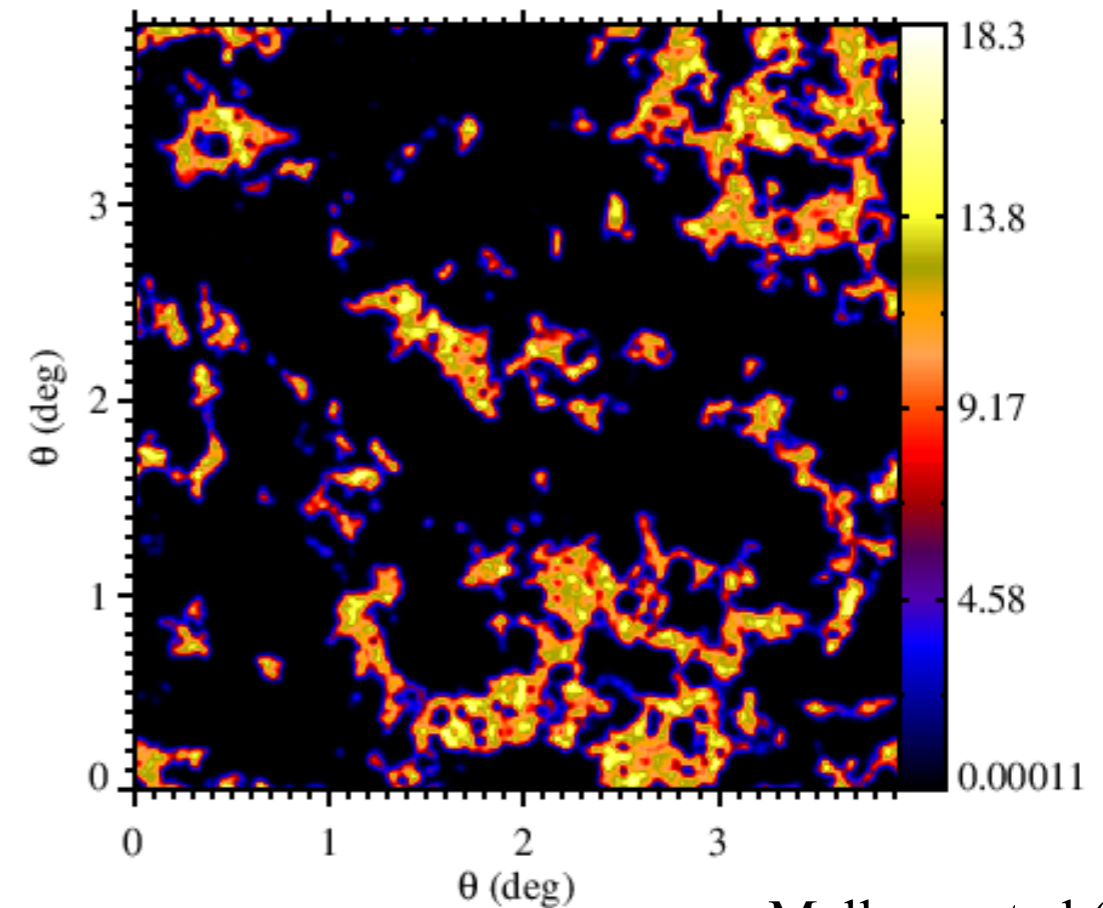
21cm線を使うとイオン化領域を3次元的に観測できる

# 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

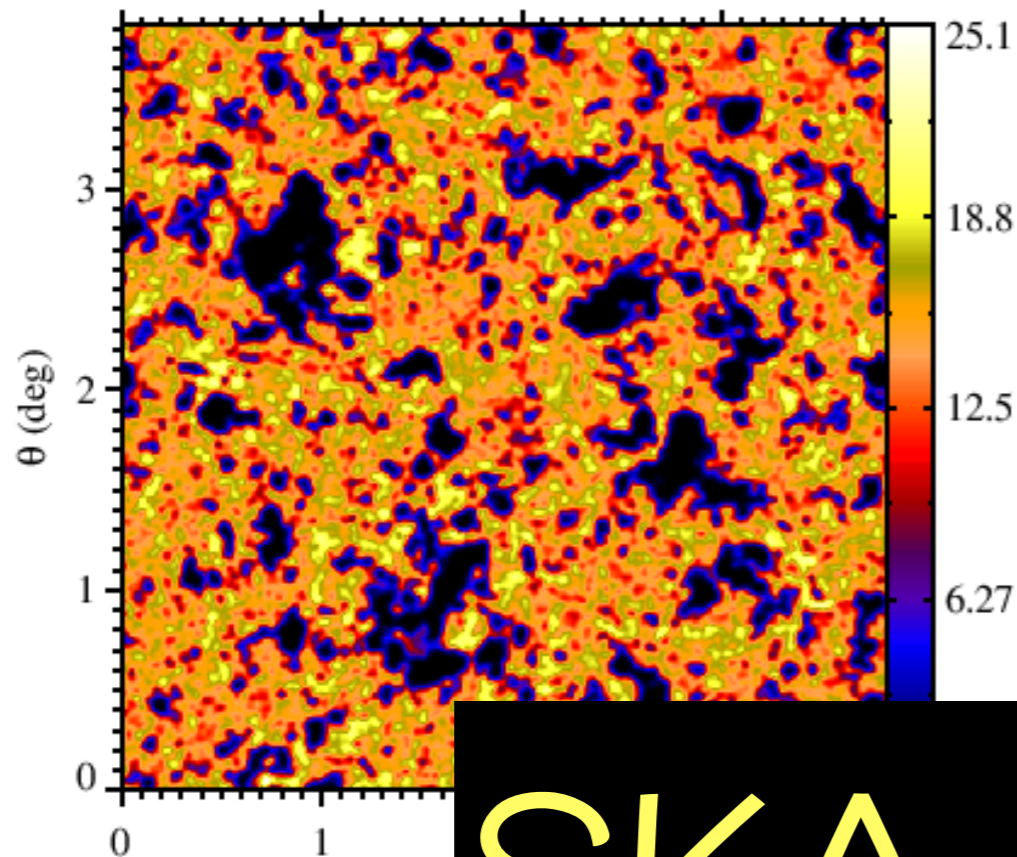
○数度程度の視野

○21cm線シグナルに対して十分に低い熱雑音

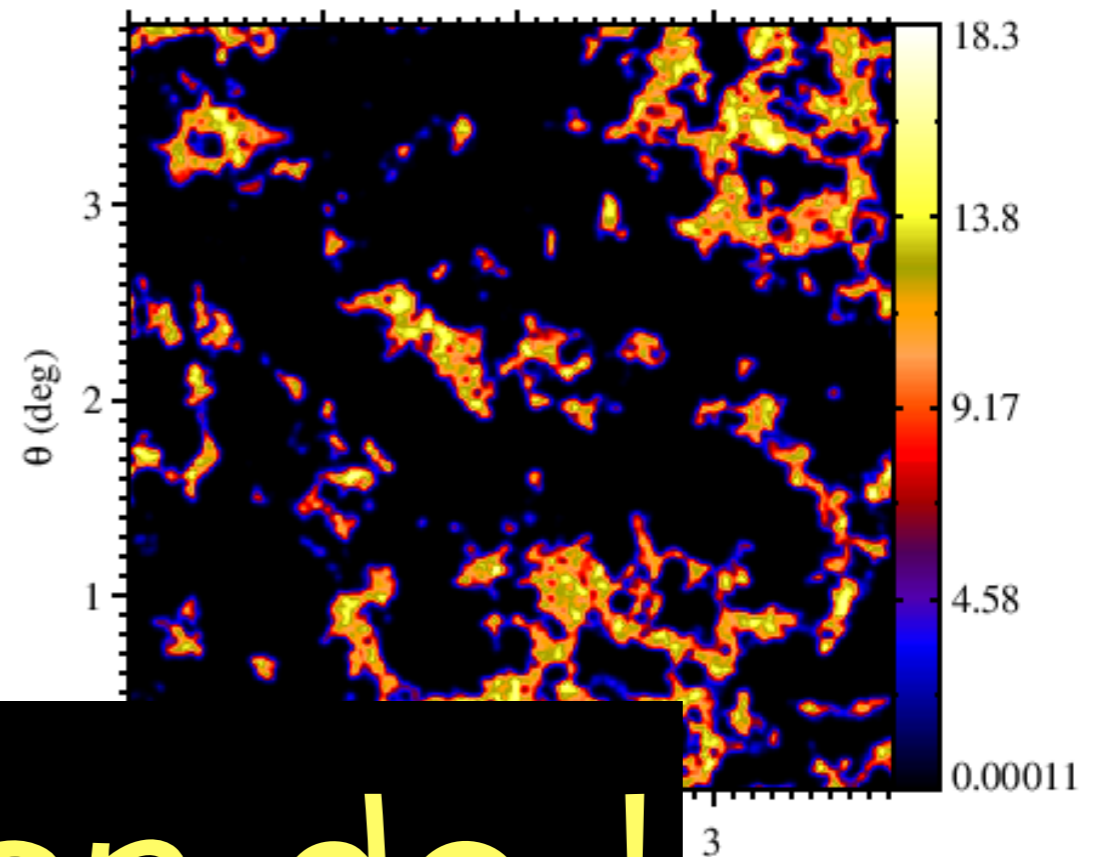


# 21cm線イメージングで見た再電離期

$x_i = 0.5$



$x_i = 0.8$



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

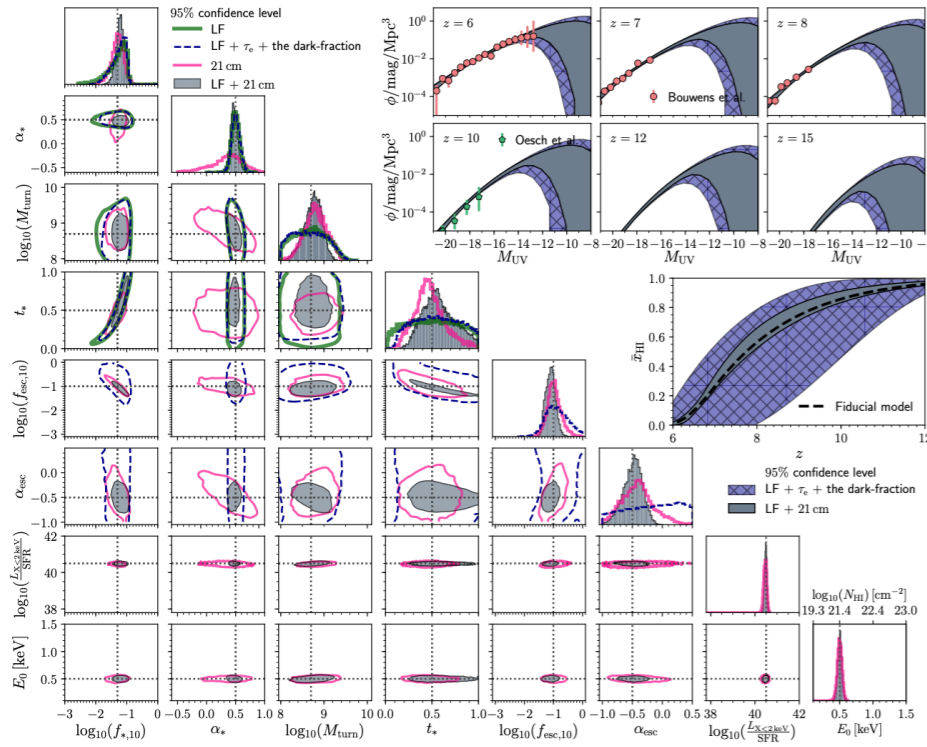
○数度程度の視野

○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

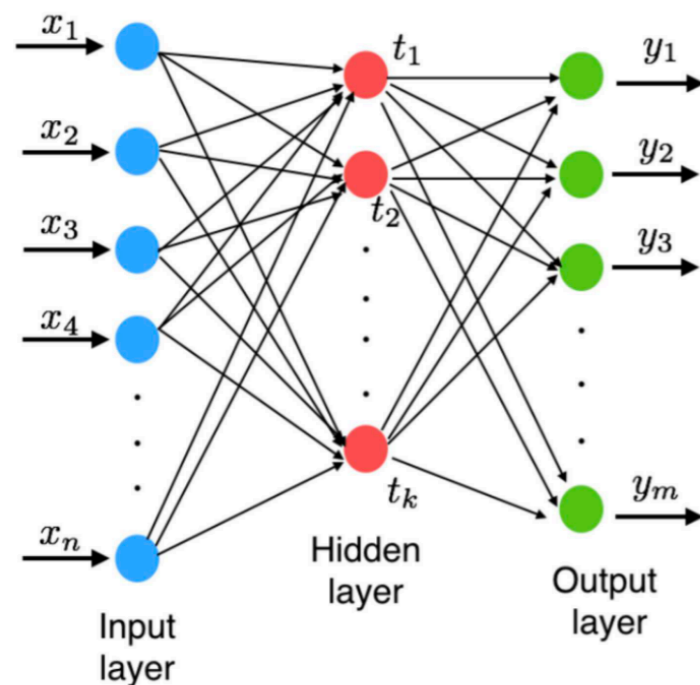
Greig & Mesinger (2016), Park et al (2018)

・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)



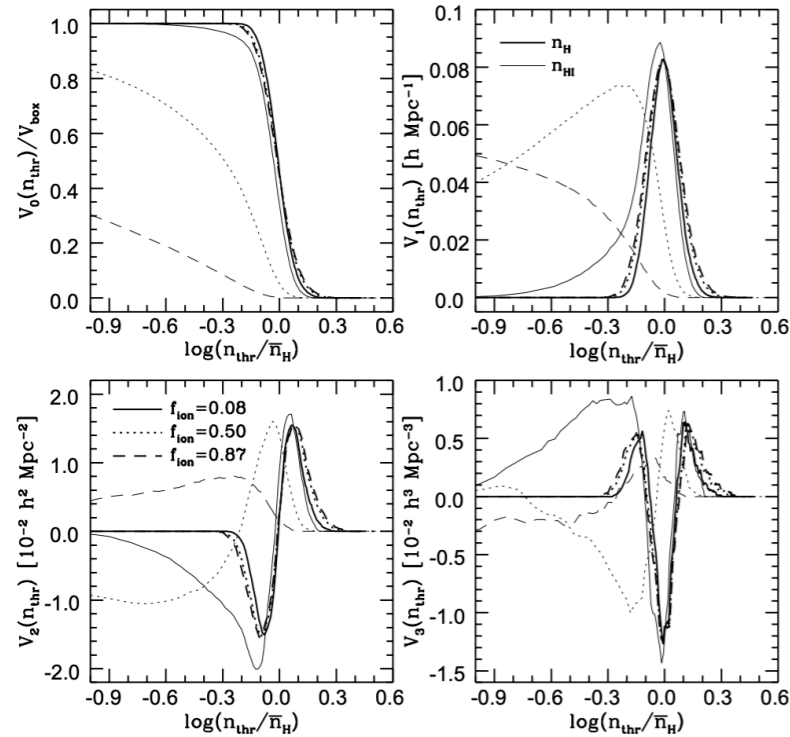
・機械学習を用いた21cm線パワースペクトルからのパラメータ推定

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

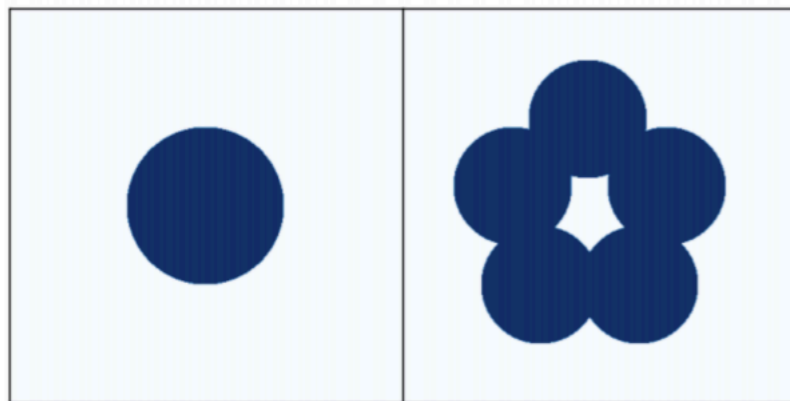
統計的アプローチで再電離モデルへの制限

# 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

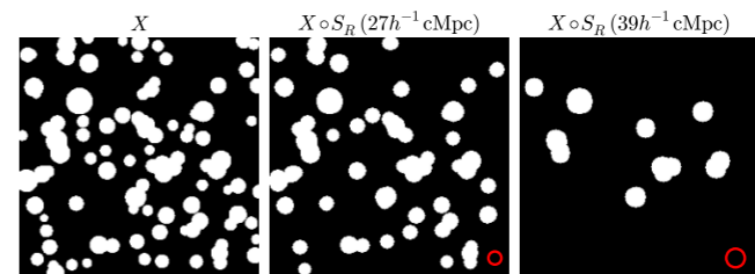
Giri et al (2021), Kapahtia et al (2021)

## ・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

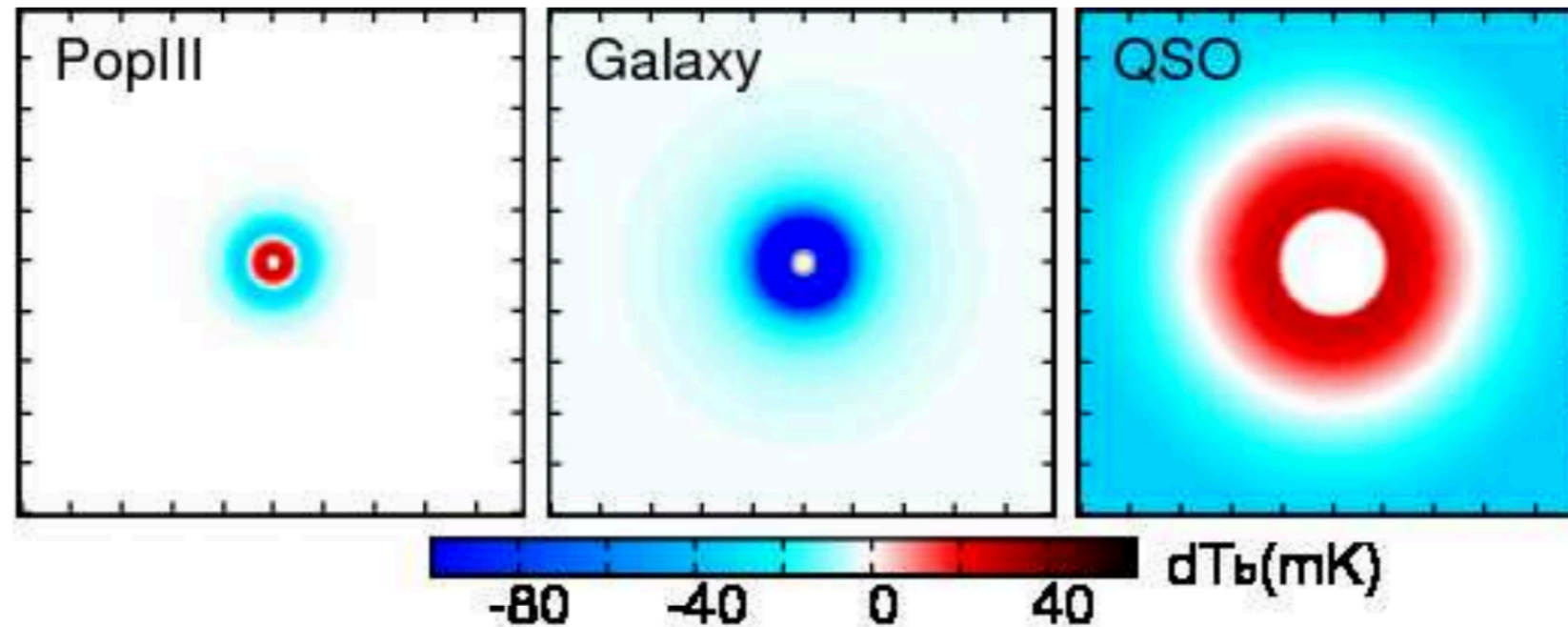
Kakiichi et al (2017)



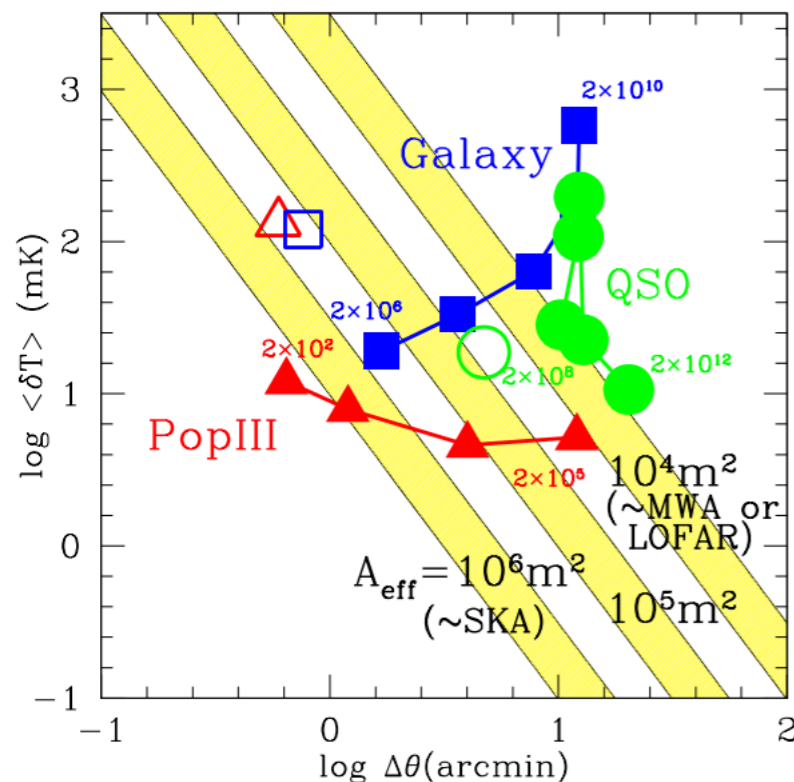
再電離の空間的（幾何学的）特徴を定量的に評価

# 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

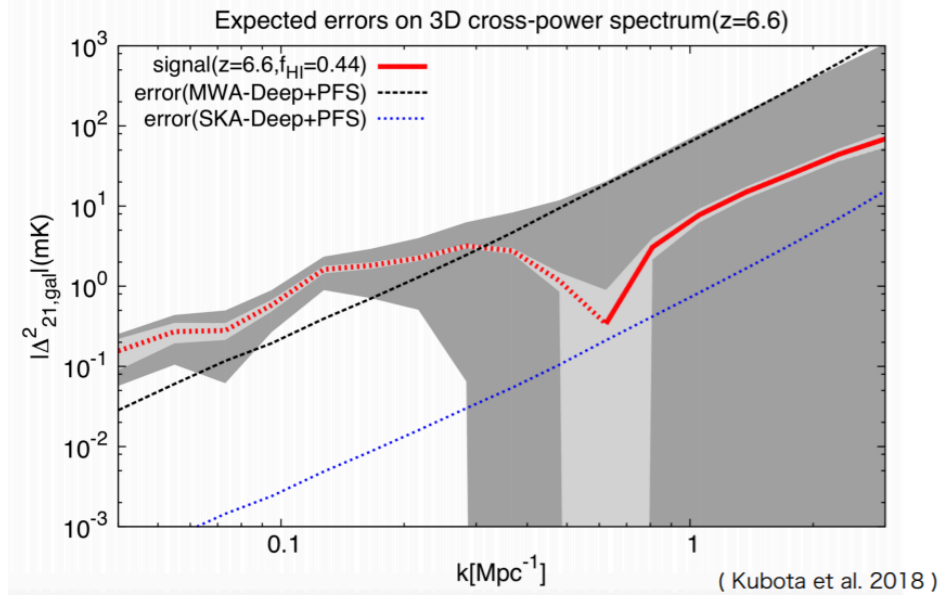
Hasegawa & Semelin (2013), Hutter et al (2020)

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)



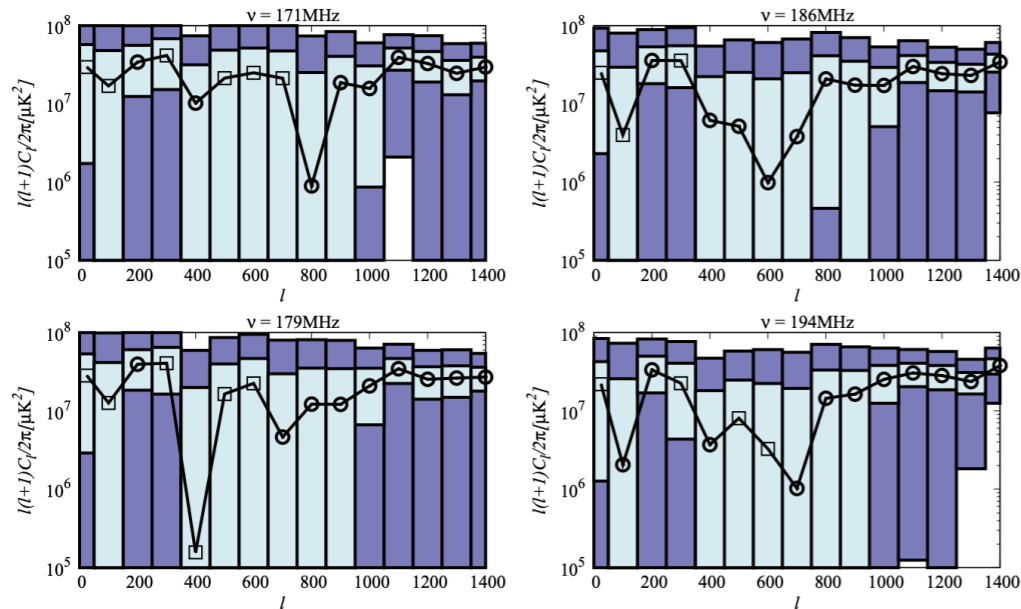
・21cm線とライマン $\alpha$ 輝線銀河の相互相関

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)

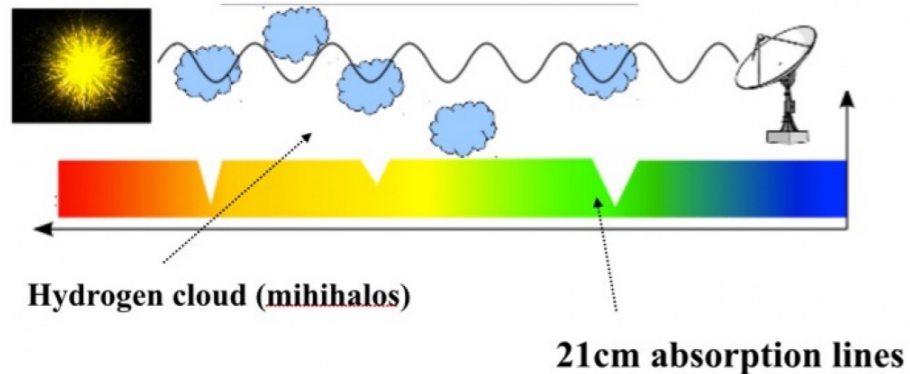
・21cm線と背景X線の相互相関

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

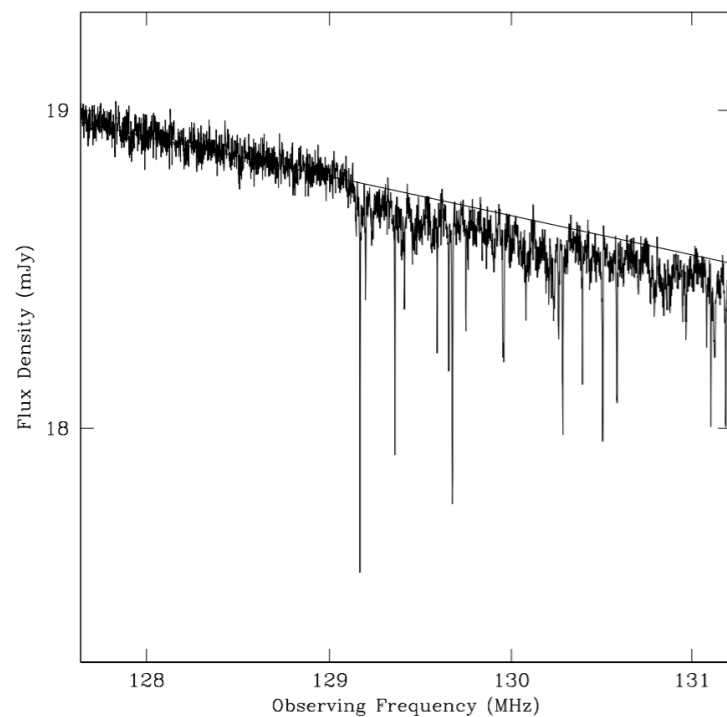
Furlanetto & Loeb (2002), Ciardi et al (2015), Semelin (2015)

・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)



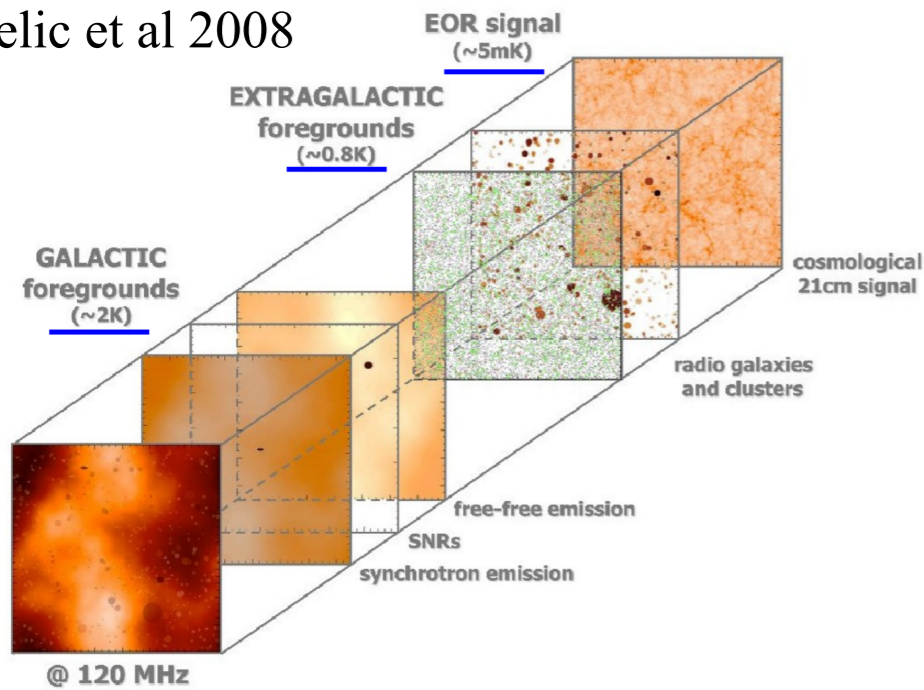
Carilli+ 2002

宇宙再電離のみならず、宇宙論、銀河進化研究とも関係

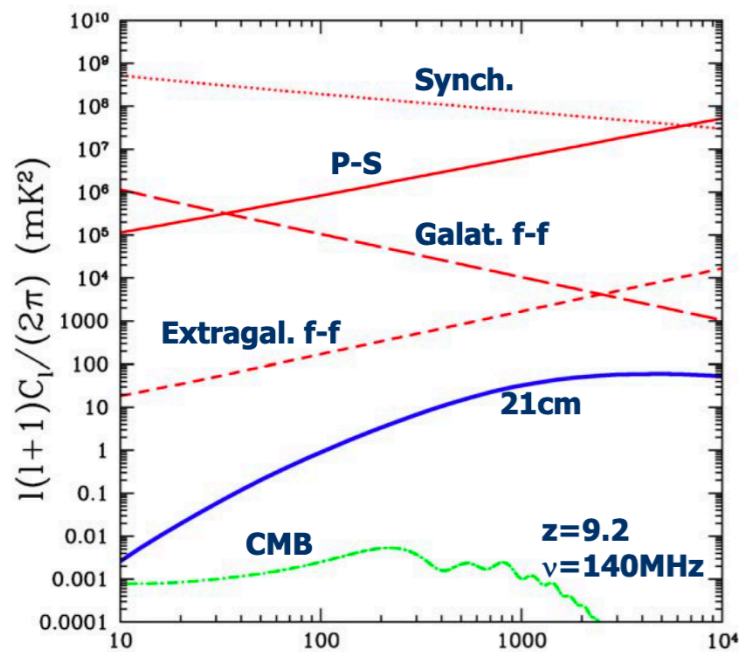
# 21cm線観測への課題

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)

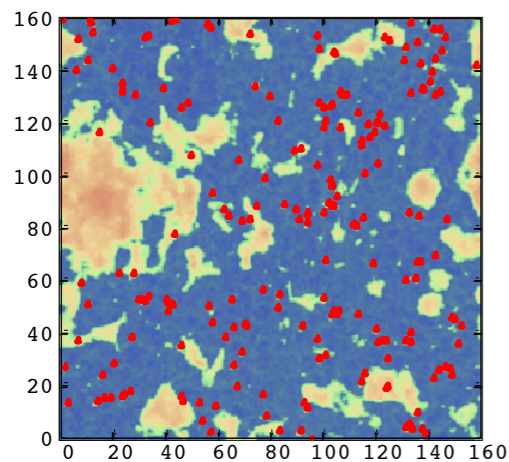
Kubota et al (2018)



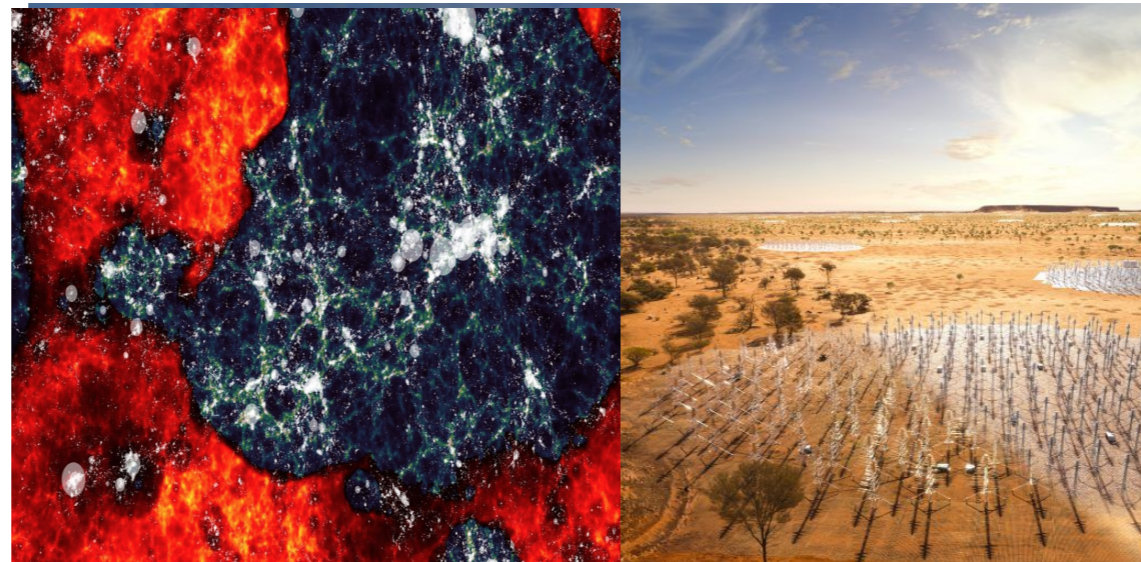
# 21cm線と他波長のシナジーによる 宇宙再電離の包括的解明

## 他波長観測

(e.g. 銀河)

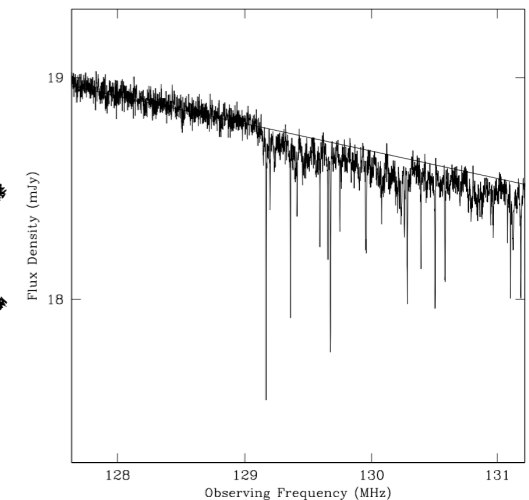


## 21cm線観測 SKA Low



## 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）