

# 中性水素21cm線で探る 宇宙再電離史

田代 寛之

(名古屋大学)

## Outline

- Introduction: 再イオン化期
- 中性水素21cm線とは
- 再イオン化期からの中性水素21cm線シグナル

Global signal

Power spectrum

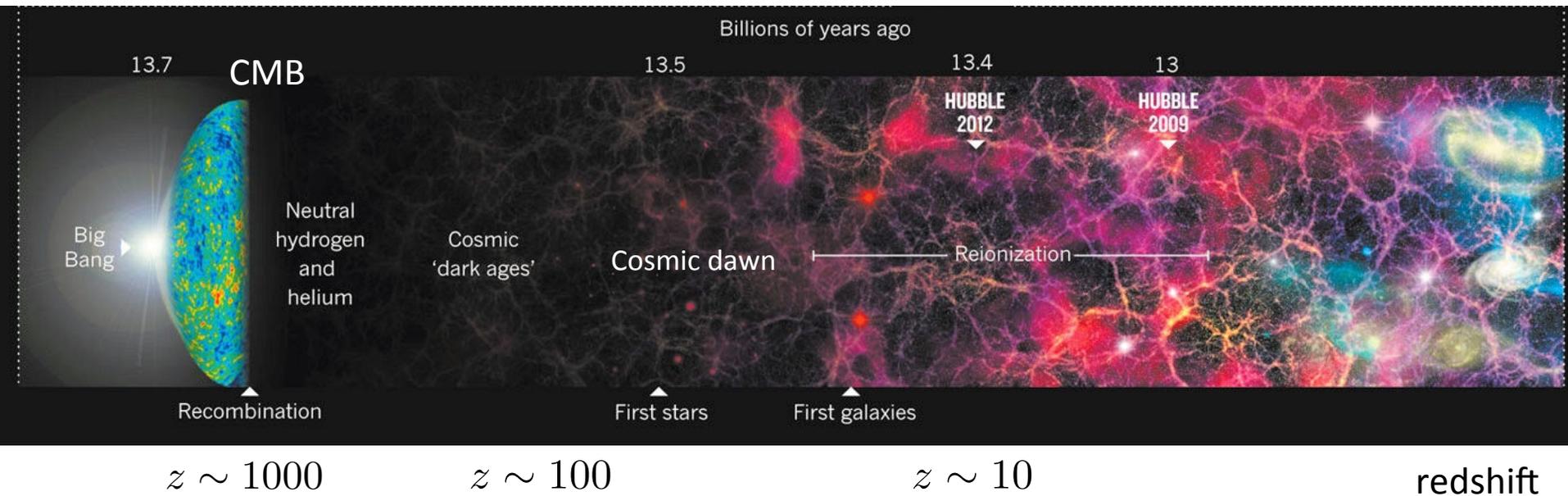
Imaging

- Square Kilometer Array

SKA-JP

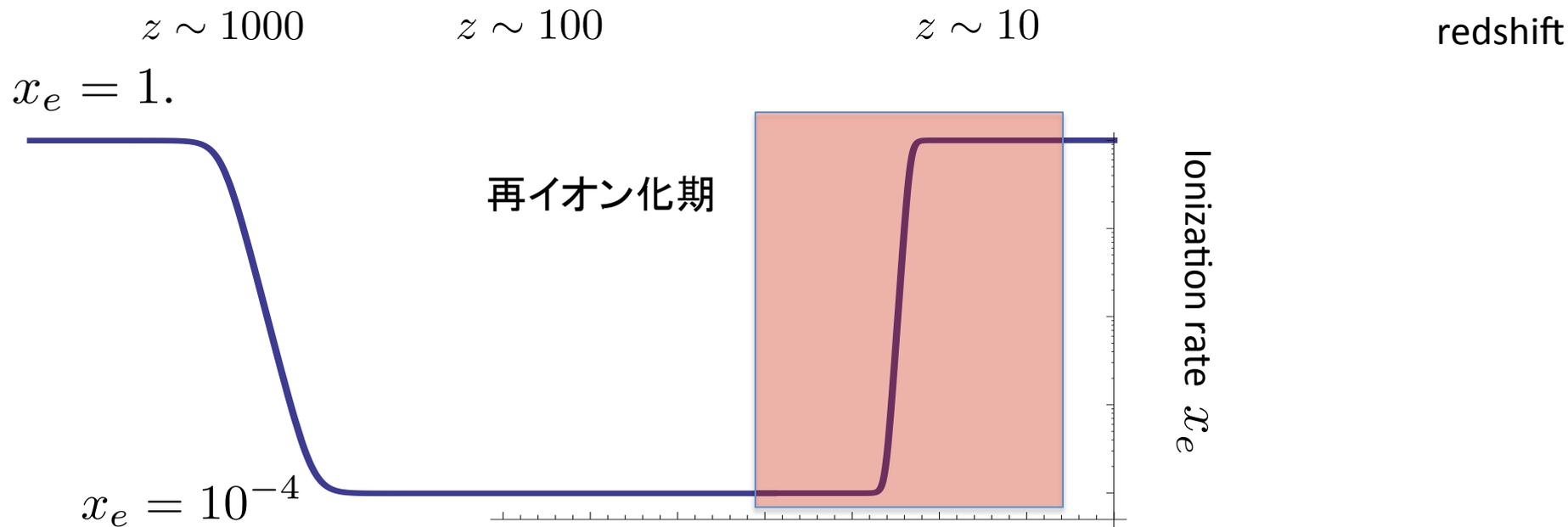
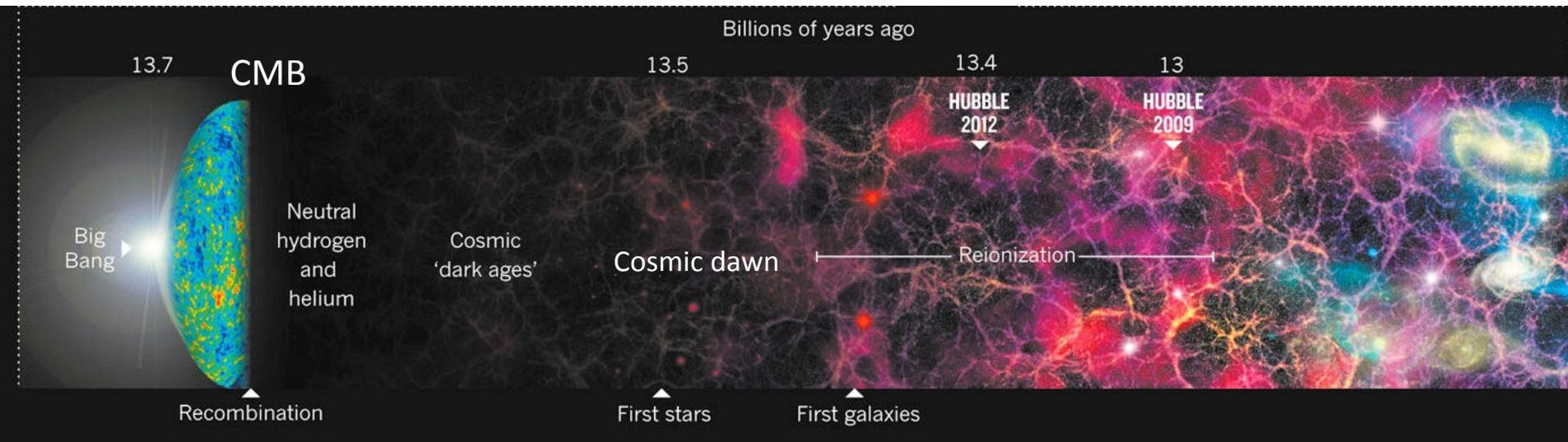
# 再イオン化 (Epoch of Reionization)

From Nature (Ncik Spenser)



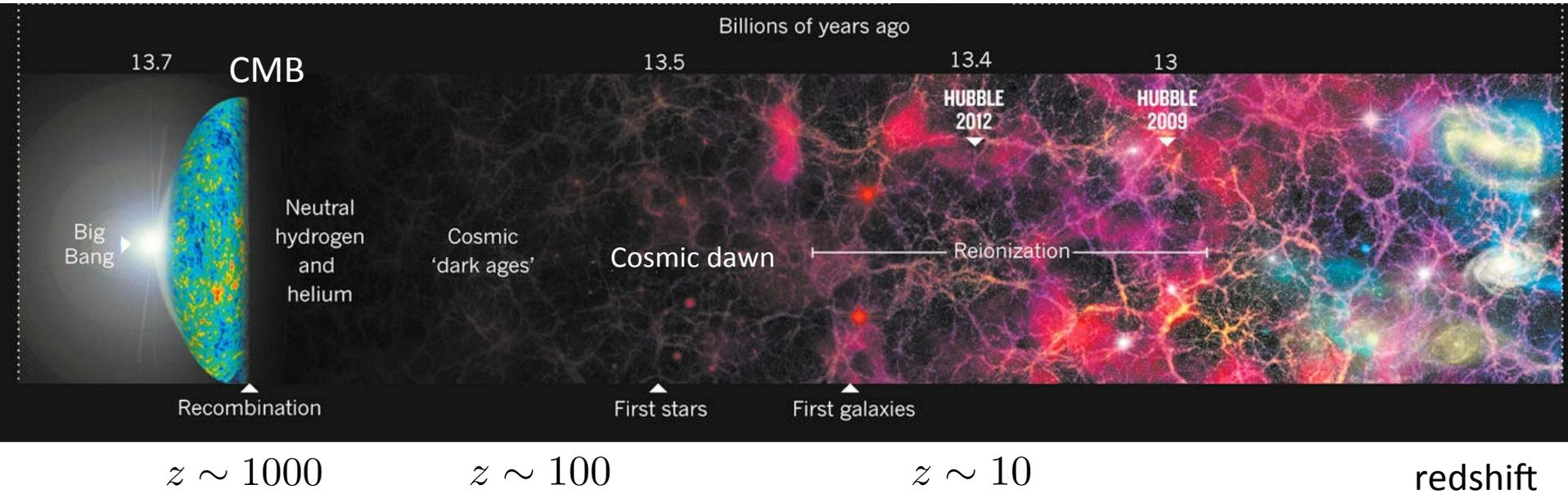
# 再イオン化 (Epoch of Reionization)

From Nature (Ncik Spenser)



# 再イオン化 (Epoch of Reionization)

From Nature (Ncik Spenser)

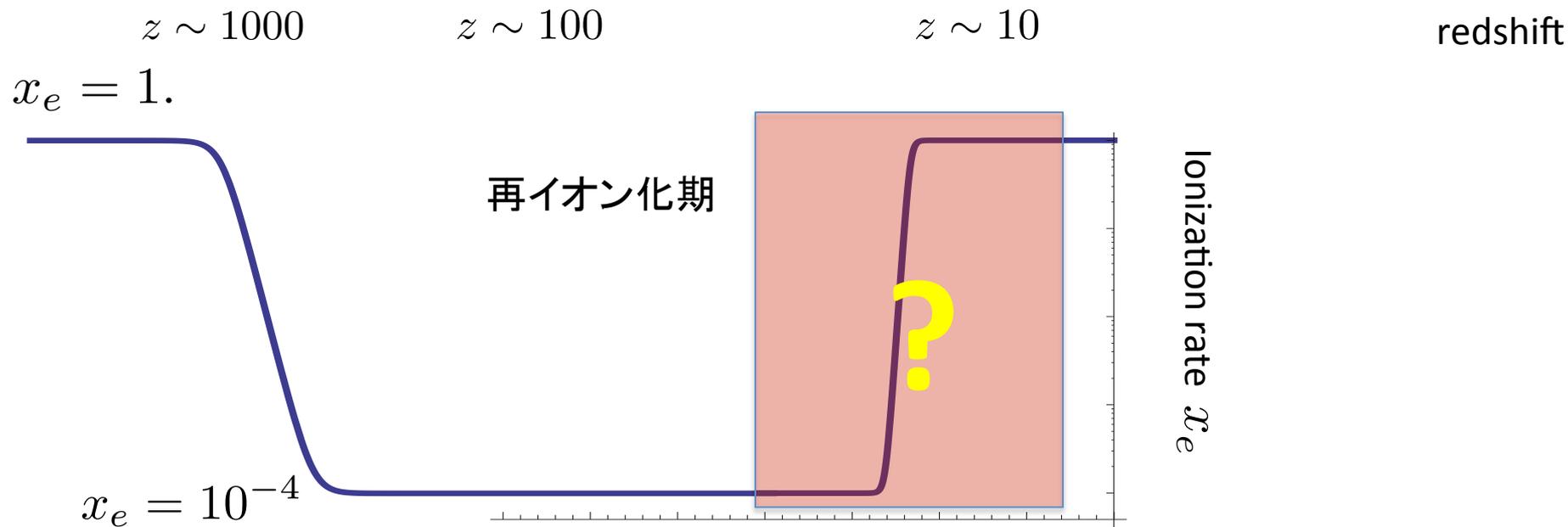
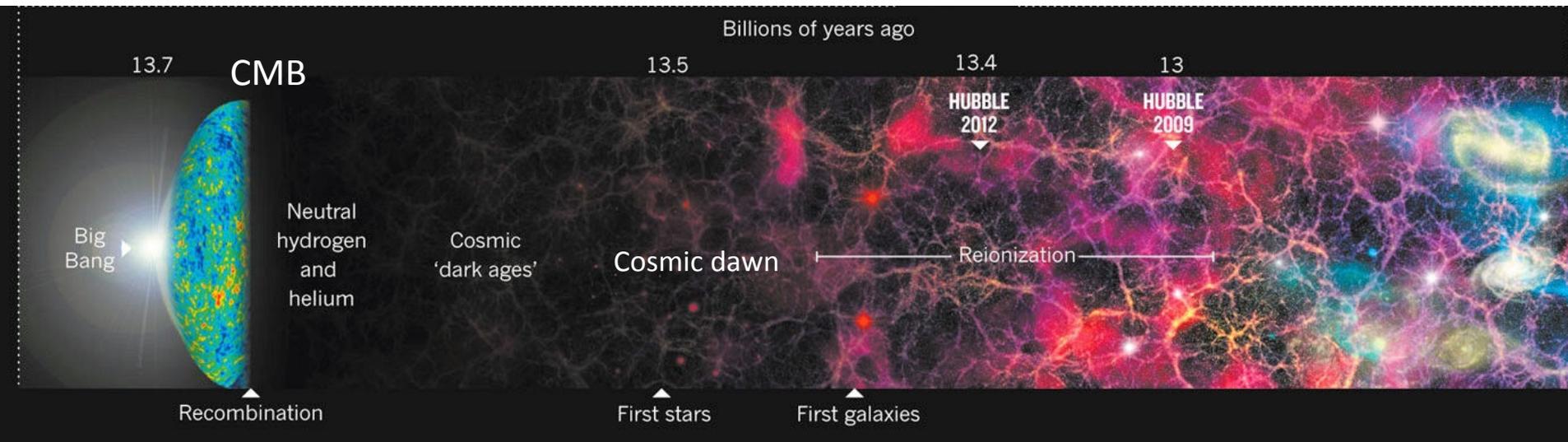


## 再イオン化期: 宇宙初期の構造形成と密接に関わる必要な時期

- 宇宙最初の星
- 宇宙最初のブラックホール(QSO)
- 宇宙最初の銀河とそれに続く銀河の進化 などなど

# 再イオン化 (Epoch of Reionization)

From Nature (Ncik Spenser)



# 再イオン化に関する観測的制限

---

我々の知っている再イオン化に関しての幾つかのこと

- Gunn-Peterson Troughs (high- $z$  QSOs)
  - CMB anisotropy
  - GRB (Totani et al. 2006)
  - Soft X-ray background (McQuinn 2012)
  - 高赤方偏移銀河 (Ouchi et al. 2010, Oesch et al. 2013)
- etc.

# Gunn-Peterson Troughs (high-z QSOs)

クエーサースペクトルに現れる  
中性水素によるLy-alpha 吸収

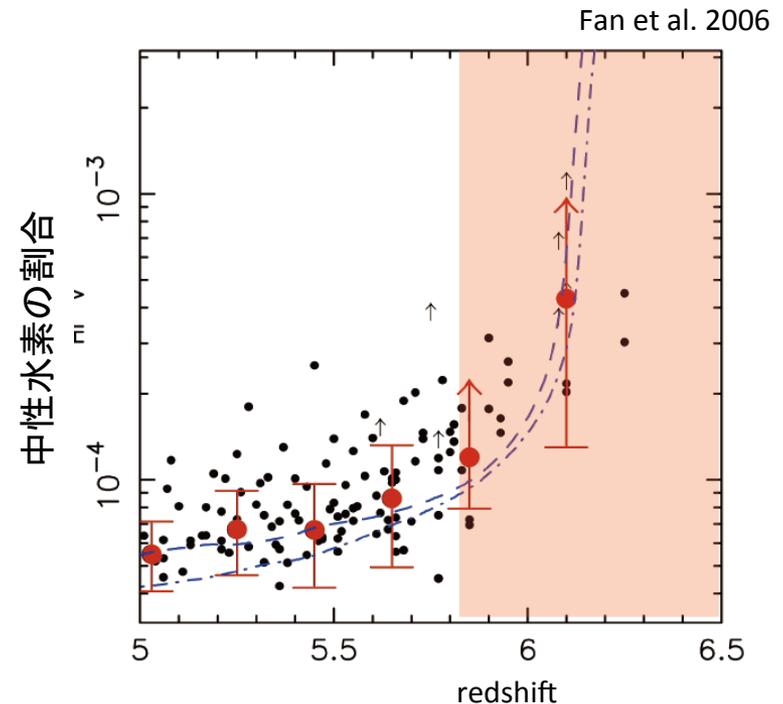
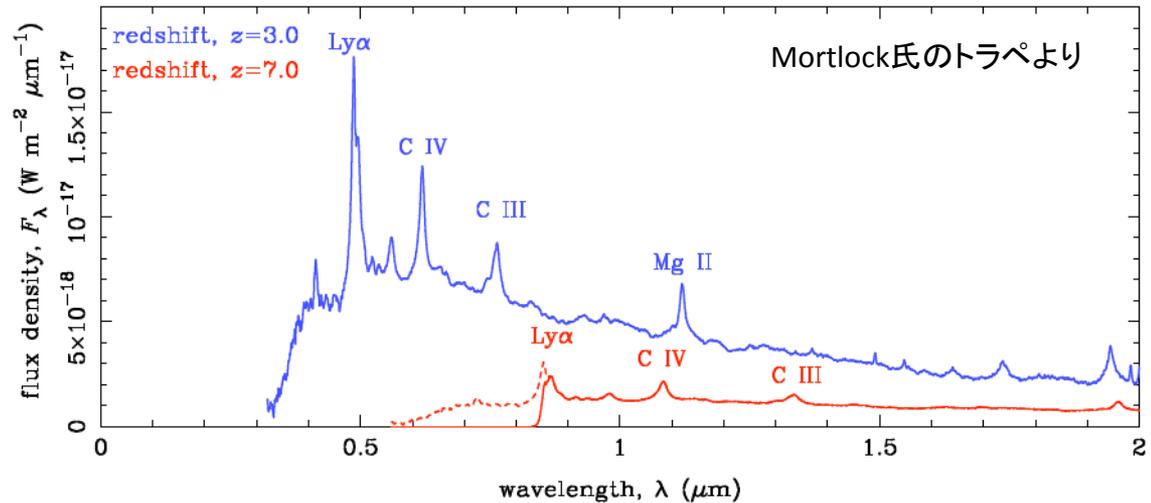
(Redshift効果により  
短い波長側で吸収)

$$\tau_{GP} \approx 4.3 \times 10^5 \left( \frac{n_{HI}}{n_H} \right)$$

非常に強い吸収

中性水素の割合  $1 - 4\%$  at  $z = 6$   
(Fan et al, 2006)

Reionization completed  
by  $z \sim 6$



# 再イオン化に関する観測的制限

---

- Gunn-Peterson Troughs (high- $z$  QSOs)  
Reionization completed by  $z \sim 6$
  - CMB anisotropy
  - GRB (Totani et al. 2006)
  - Soft X-ray background (McQuinn 2012)
  - 高赤方偏移銀河 (Ouchi et al. 2010, Oesch et al. 2013)
- etc.

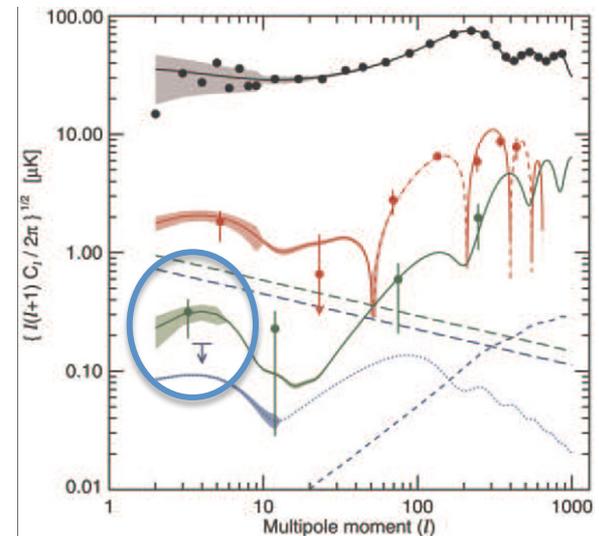
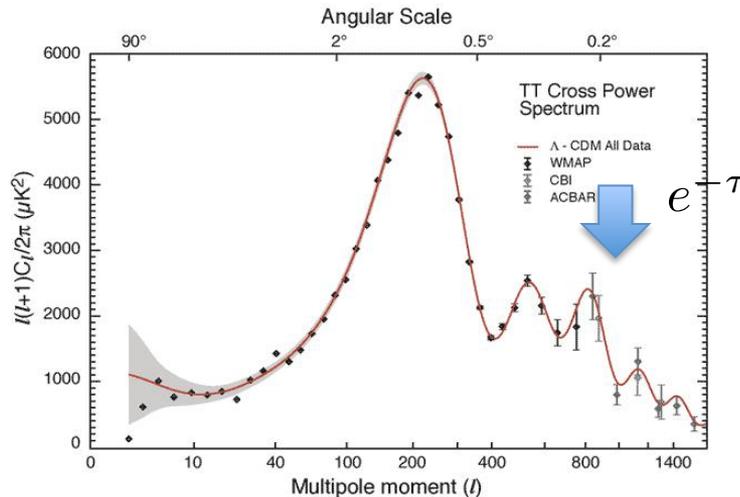
# CMBと再イオン化

再イオン化により自由電子数の増加  $\longrightarrow$  CMBとThomson散乱

パラメータ:  $\tau$  最終散乱面から我々までのThomson散乱のoptical depth

## CMB anisotropy への影響

- 散乱により、散乱前の情報を失う (Primordial anisotropy がdamp)
- 散乱により、新たな情報を得る (e.g. large scaleでの偏光bump)



# CMBと再イオン化

再イオン化により自由電子数の増加  $\longrightarrow$  CMBとThomson散乱

パラメータ:  $\tau$  最終散乱面から我々のところまでのThomson散乱のoptical depth

## CMB anisotropy への影響

- 散乱により持っていた情報を失う (Primordial anisotropy がdamp)
- 散乱により新たな情報を得る (e.g. large scaleでの偏光bump)

WMAP 9 yr (2012):  $\tau = 0.089 \pm 0.014$

Planck 2013 (only TT):  $\tau = 0.089 \pm 0.0031$

$z \sim 10$  あたりで再イオン化

(ただし、瞬間的な再イオン化シナリオ)

# 再イオン化に関する観測的制限

---

- Gunn-Peterson Troughs (high- $z$  QSOs)

Reionization completed by  $z \sim 6$

- CMB anisotropy

Reionization took place at  $z \sim 10$

- GRB (Totani et al. 2006)
- Soft X-ray background (McQuinn 2012)
- 高赤方偏移銀河 (Ouchi et al. 2010, Oesch et al. 2013)

etc.

# 再イオン化に関する観測的制限

---

- Gunn-Peterson Troughs (high- $z$  QSOs)

Reionization completed by  $z \sim 6$

- CMB anisotropy

Reionization took place at  $z \sim 10$

- GRB (Totani et al. 2006)
- Soft X-ray background (McQuinn 2012)
- 高赤方偏移銀河 (Ouchi et al. 2010, Oesch et al. 2013)

etc.

再イオン化は $z \sim 10$ あたりには始まってて、  
 $z \sim 6$ までにはおわってるっぽい

# 再イオン化に関する観測的制限

---

- Gunn-Peterson Troughs (high- $z$  QSOs)

Reionization completed by  $z \sim 6$

- CMB anisotropy

Reionization took place at  $z \sim 10$

- GRB (Totani et al. 2006)
- Soft X-ray background (McQuinn 2012)
- 高赤方偏移銀河 (Ouchi et al. 2010, Oesch et al. 2013)

etc.

再イオン化は $z \sim 10$ あたりには始まってて、  
 $z \sim 6$ までにはおわってるっぽい

非常に不満足

We don't know

- How it occurs
- How long it takes
- How the ionized region evolves

To obtain new constraints

**Redshifted 21 cm line signals**

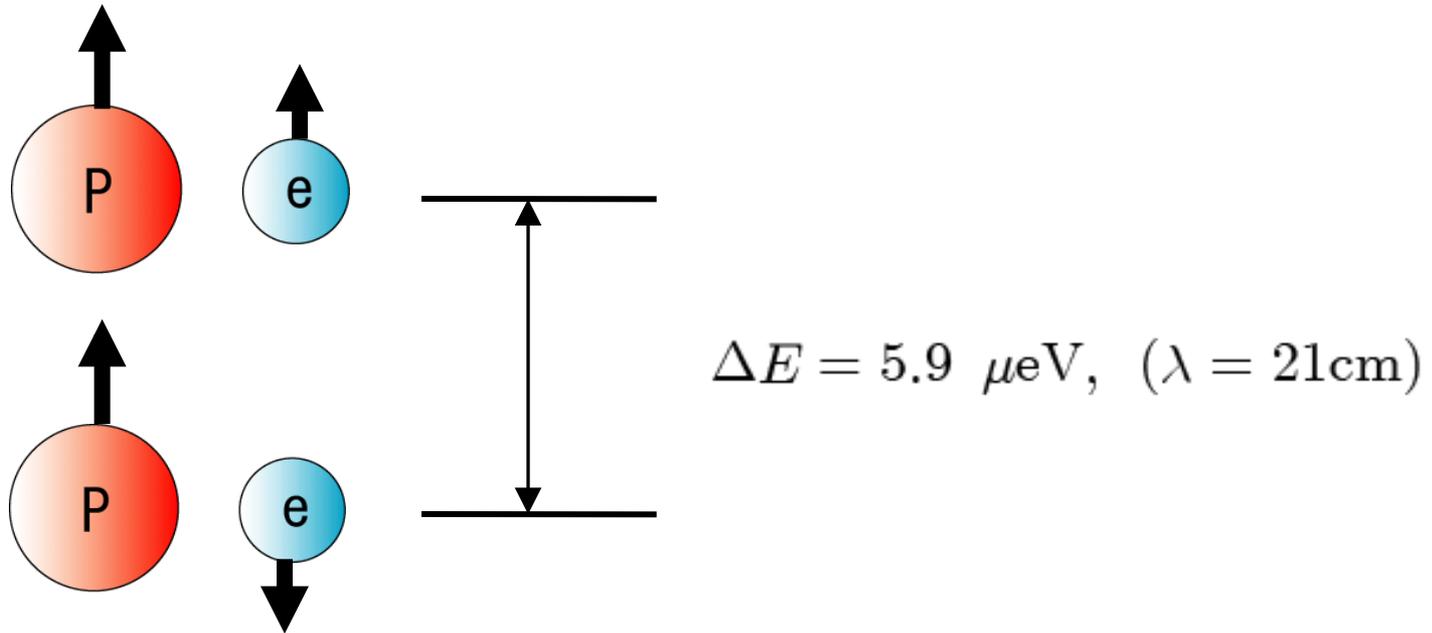
one of promising probing methods

for Epoch of Reionisation

# Redshifted 21cm線の基本

# HI 21 cm Line

**21cm transition** : hyper fine structure of neutral hydrogen



Line absorption or emission : Neutral hydrogen at  $z$

  $21 \times (1 + z) \text{ cm}$

# Redshifted 21 cm signal

宇宙論的な枠組み： CMBの存在

21 cm線の放出

- 自然放射
- CMBによる誘導放射

21 cm線の吸収

- CMB光子による励起

CMBに対するabsorptionやemissionがシグナル

# Redshifted 21 cm signal

CMB温度からの差: differential Brightness temperature

$$\delta T_b(\nu) = \frac{T_S - T_{\text{CMB}}}{1+z} (1 - e^{-\tau_{\nu 0}})$$
$$\sim 27 x_{\text{HI}} (1 + \delta_i) \left(1 - \frac{T_\gamma}{T_s}\right) \left(\frac{H}{dv_r/dr + H}\right) \left(\frac{1+z}{10}\right)^{1/2} \left(\frac{0.15}{\Omega_m h^2}\right)^{1/2} \left(\frac{\Omega_b h^2}{0.023}\right) [\text{mK}]$$

## 中性水素のSpin temperature

21cm 遷移の励起状態と基底状態の個数密度の比を表す

$$\frac{n_1}{n_0} = 3 \exp\left(-\frac{T_\star}{T_s}\right)$$

$n_0$  : 基底状態の個数密度  
 $n_1$  : 励起状態の個数密度  
 $T_\star = 0.068 \text{ K}$  ( $\lambda = 21 \text{ cm}$ )

# 21 cm 遷移 (spin 温度) の物理

- 自然放射

- CMBによる遷移

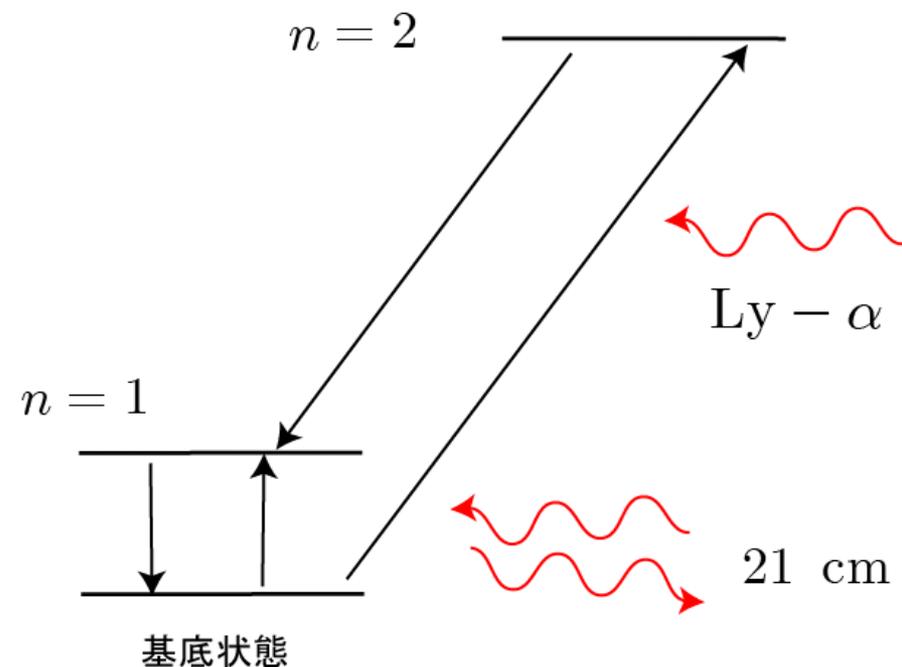
CMB光子による励起や誘導放射

- 衝突による遷移

水素-水素、水素-電子など

- Wouthousian-Field 効果

Ly シリーズを介した遷移



# 21 cm 遷移 (spin 温度) の物理

---

$$T_S^{-1} = \frac{T_{\text{CMB}}^{-1} + x_\alpha T_\alpha^{-1} + x_K T_K^{-1}}{1 + x_\alpha + x_K} \quad (\text{Field 1975})$$

ガスの運動学的温度  $T_K$    ライマン  $\alpha$  色温度  $T_\alpha$     $x_K, x_\alpha$    それぞれの結合定数

Spin 温度はガスとCMBの温度とのバランスで決まる

ガスの温度や天体からの影響が小さい:  $x_K, x_\alpha$  が小さい

$$T_s \sim T_{\text{CMB}}$$

ガスの温度や天体からの影響が大きい:  $x_K, x_\alpha$  が大きい

$$T_s \sim T_K \quad (T_\alpha)$$

# Redshifted 21 cm signal

CMB温度からの差: differential Brightness temperature

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

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

ガスの温度が低い  $T_{\text{CMB}} > T_s > T_K$

$\delta T_b < 0$  : CMBに対して吸収シグナル

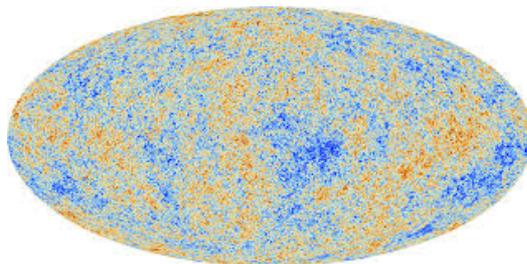
ガスの温度が高い  $T_K > T_s > T_{\text{CMB}}$

$\delta T_b > 0$  : CMBに対して放射シグナル

# Redshifted 21 cm signalの利点

- Line absorption (emission)

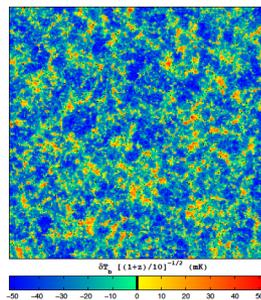
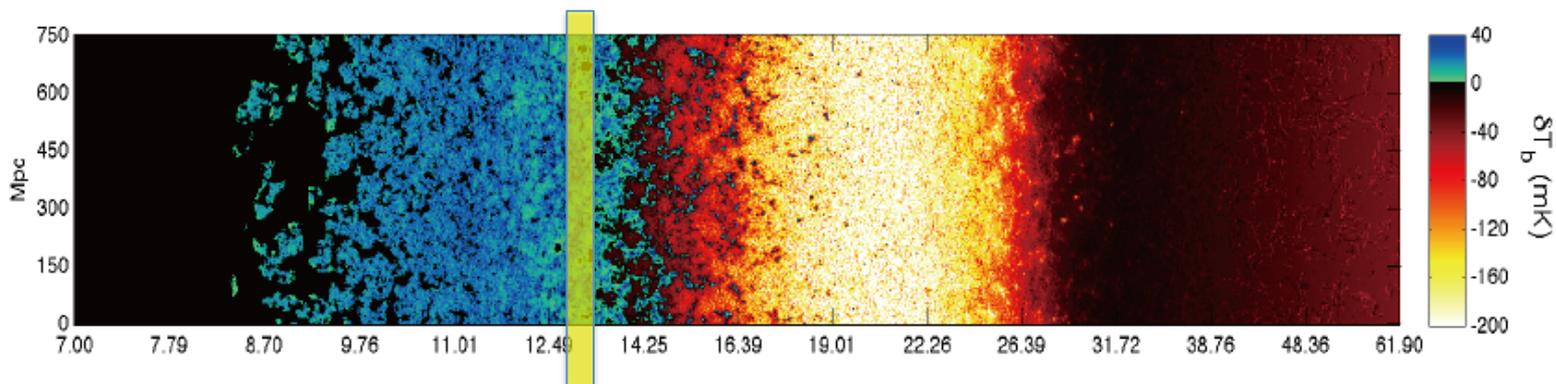
CMB



one map

最終散乱面 +  $\alpha$

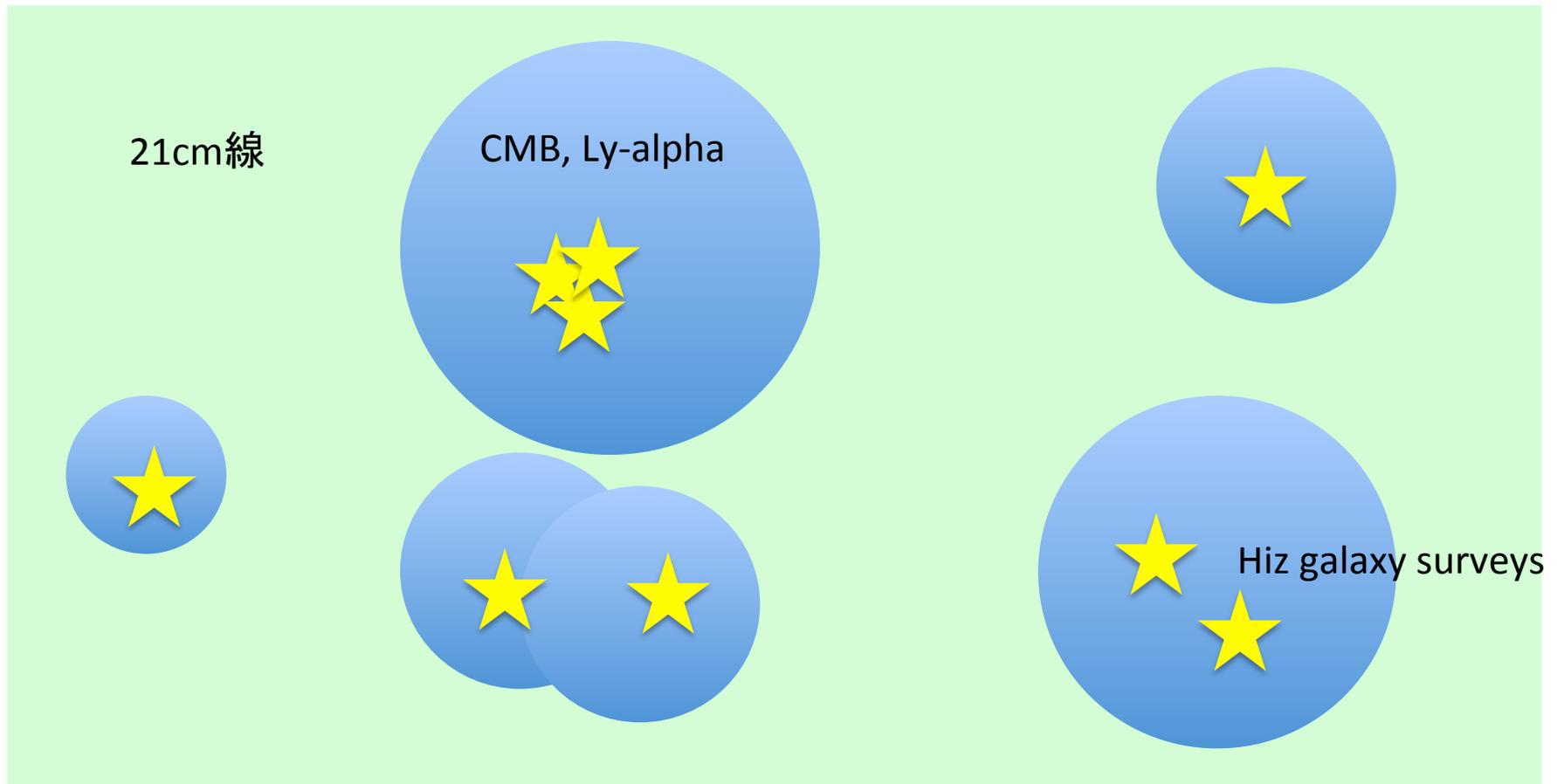
21 cm線



観測周波数をえらぶことで  
Redshift毎の階層的なmaps  
(tomography)

# Redshifted 21 cm signalの利点

- 他の観測と相補的



# Redshifted 21 cm signal

CMB温度からの差: differential Brightness temperature

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

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

ガスの温度が低い  $T_{\text{CMB}} > T_s > T_K$

$\delta T_b < 0$  : CMBに対して吸収シグナル

ガスの温度が高い  $T_K > T_s > T_{\text{CMB}}$

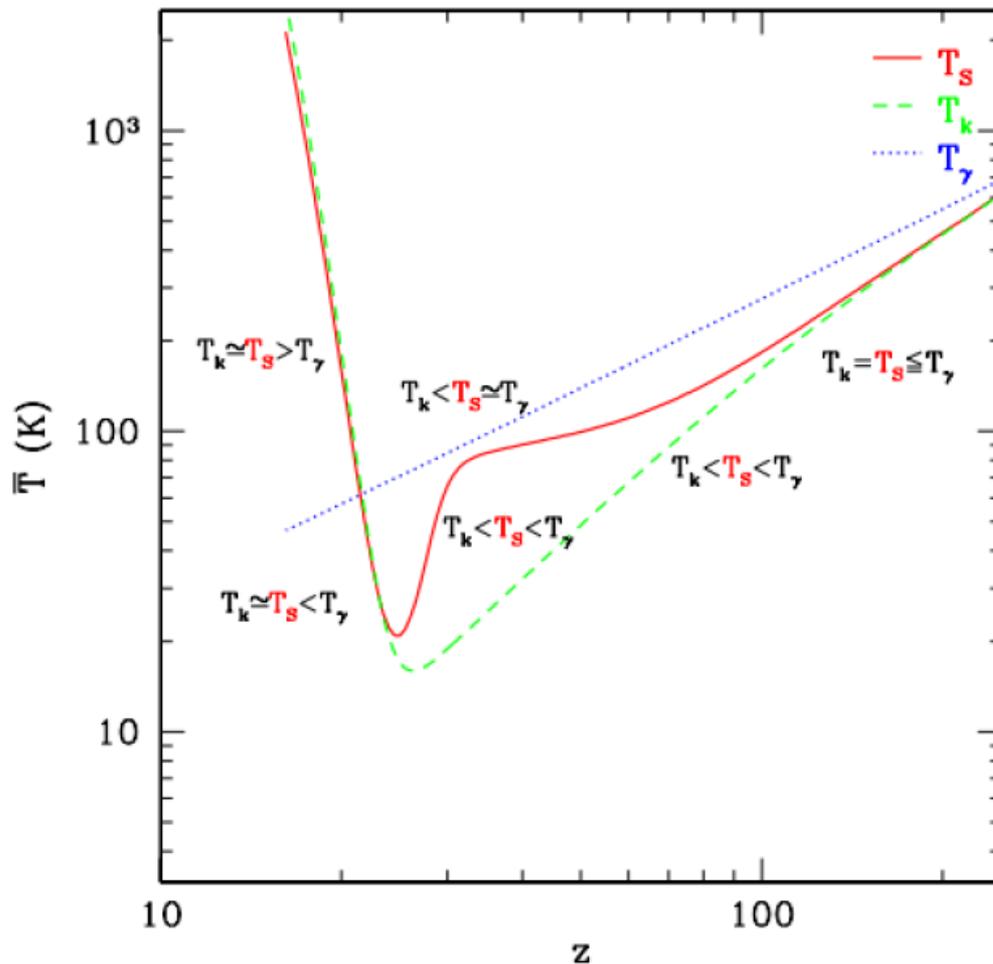
$\delta T_b > 0$  : CMBに対して放射シグナル

再イオン化期中性水素シグナル

# Global redshifted 21 cm signal

21cm線シグナルはHIガスの物理に非常にsensitive

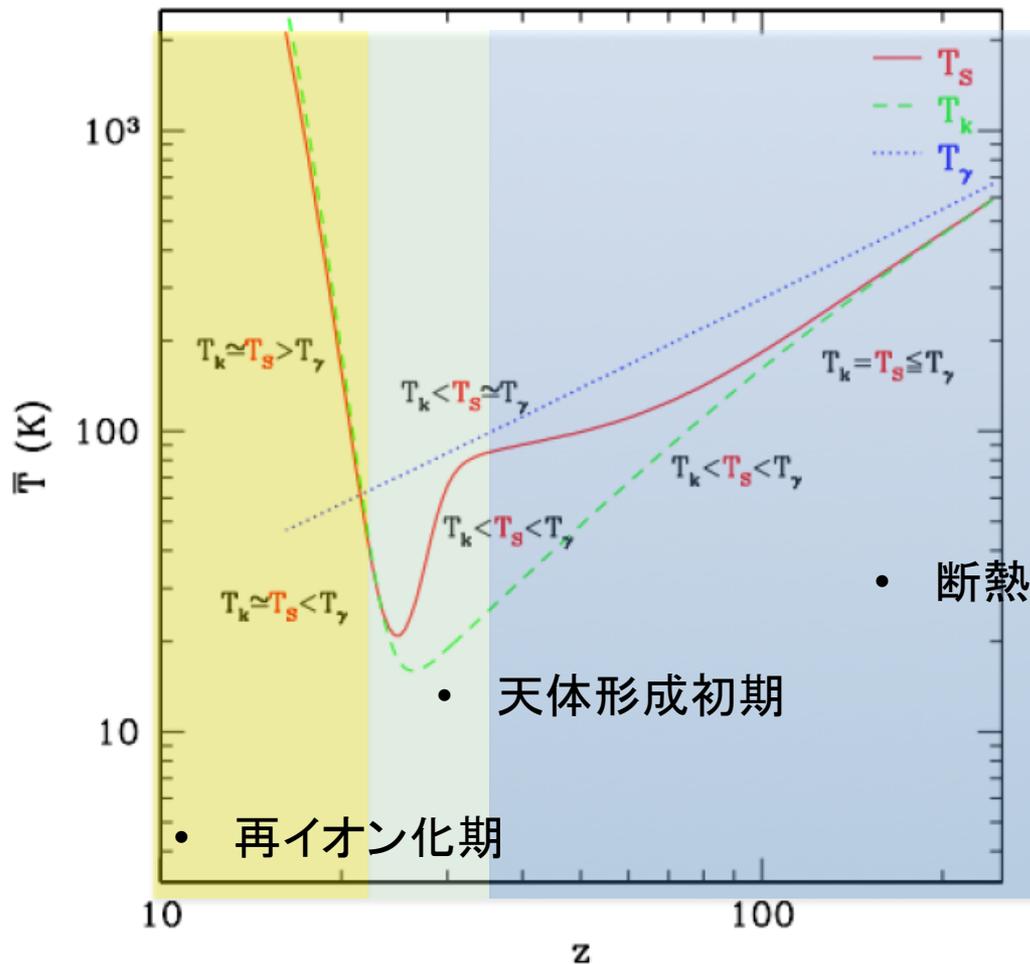
$$\delta T_b(\nu) \sim 27 x_{\text{HI}} (1 + \delta_i) \left(1 - \frac{T_\gamma}{T_s}\right) \left(\frac{H}{dv_r/dr + H}\right) \left(\frac{1+z}{10}\right)^{1/2} \left(\frac{0.15}{\Omega_m h^2}\right)^{1/2} \left(\frac{\Omega_b h^2}{0.023}\right) [\text{mK}]$$



# Redshifted 21 cm signal

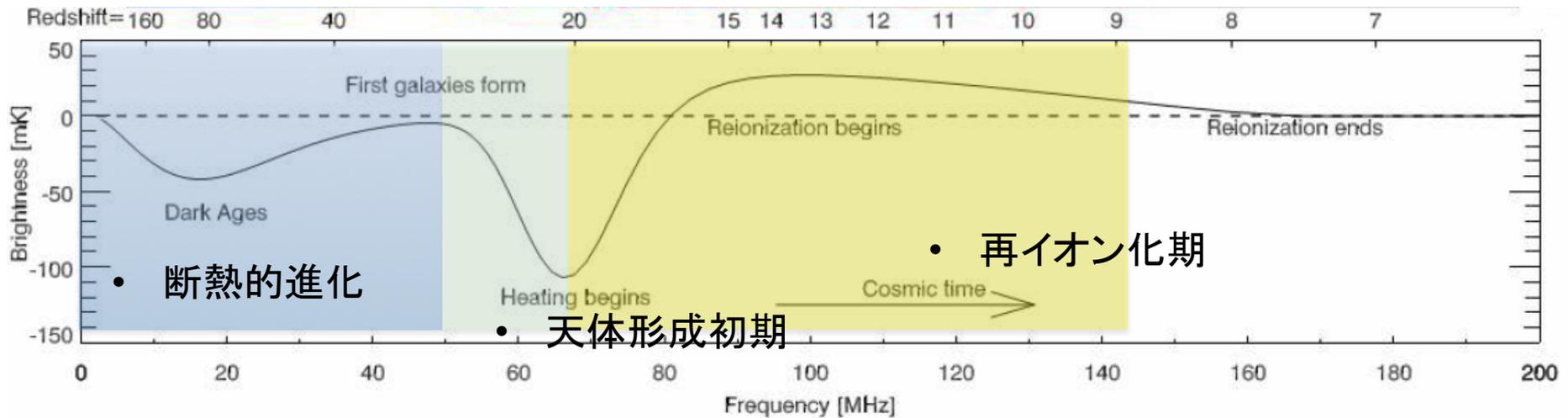
21cm線シグナルはHIガスの物理に非常にsensitive

$$\delta T_b(\nu) \sim 27 x_{\text{HI}} (1 + \delta_i) \left(1 - \frac{T_\gamma}{T_s}\right) \left(\frac{H}{dv_r/dr + H}\right) \left(\frac{1+z}{10}\right)^{1/2} \left(\frac{0.15}{\Omega_m h^2}\right)^{1/2} \left(\frac{\Omega_b h^2}{0.023}\right) [\text{mK}]$$



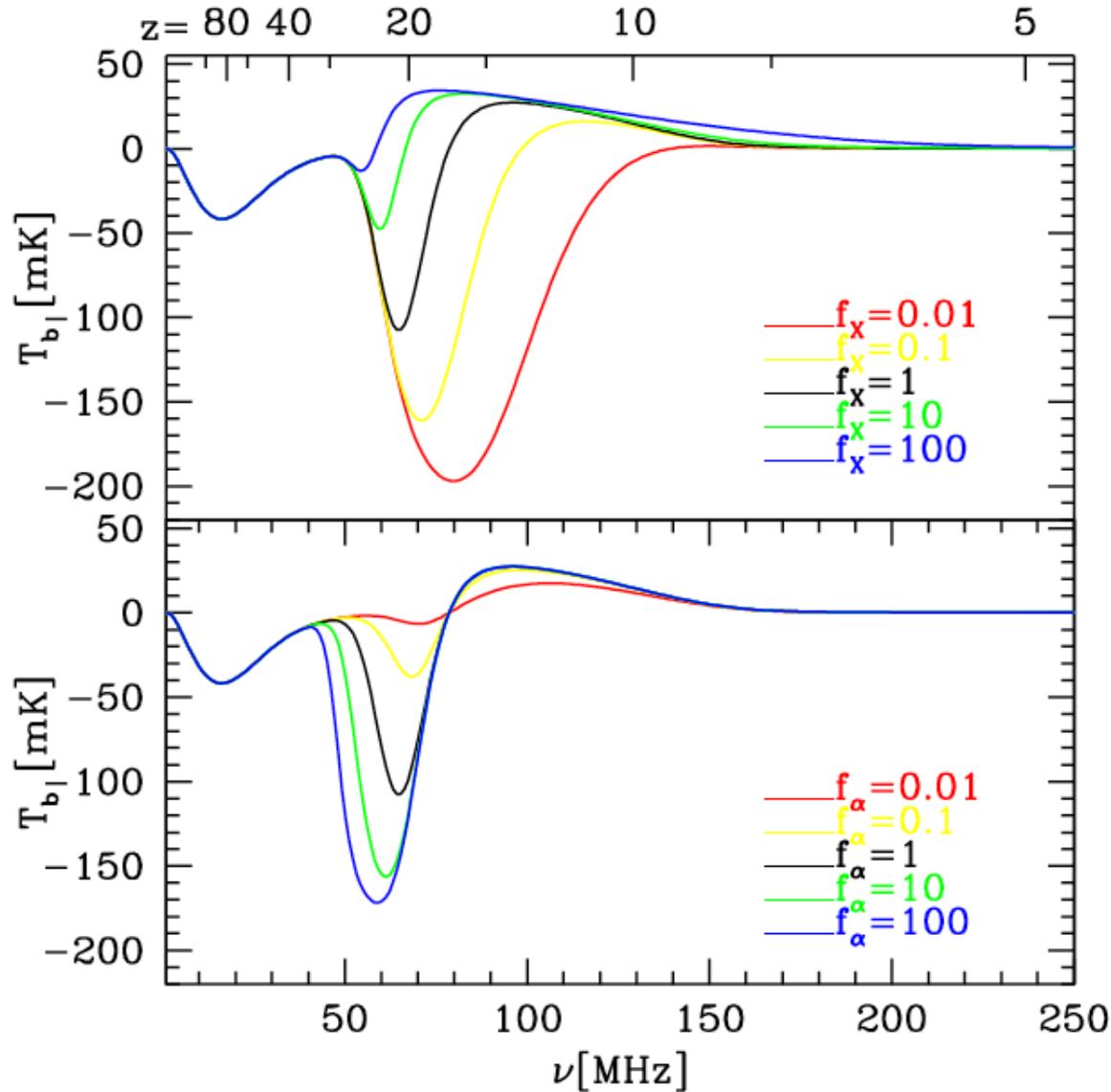
# Redshifted 21 cm signal

吸収、放射シグナルを探ることだけでも  
宇宙初期の構造形成史にせまることができる



Pritchard & Loeb 2012

# Redshifted 21 cm signal

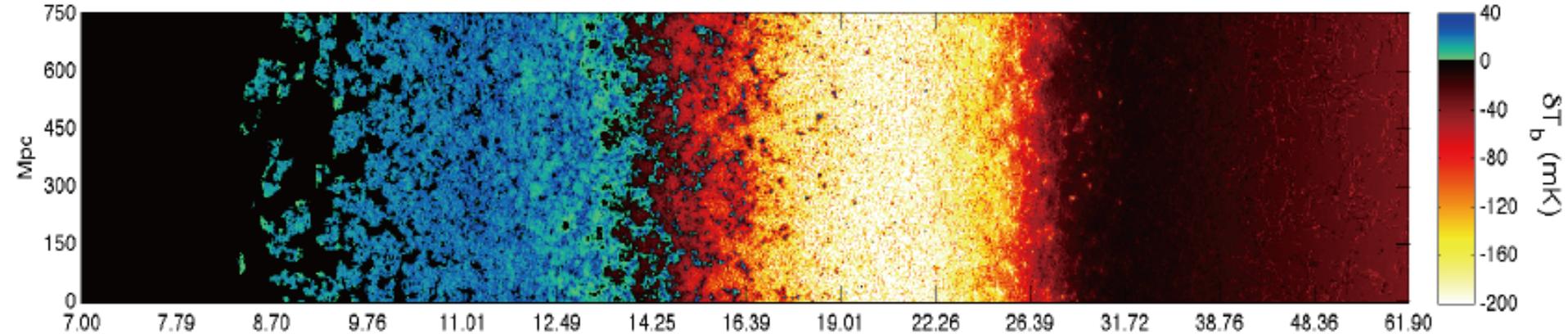


X線によるheating

Ly-alphaによるgasとの  
カップリング

# 21 cm signalのゆらぎ

Mesinger et al. 2013



非常に複雑なゆらぎ → さまざまな再イオン化物理の情報

$$\delta T_b(\nu) \sim 27 x_{\text{HI}} (1 + \delta_i) \left(1 - \frac{T_\gamma}{T_s}\right) \left(\frac{H}{dv_r/dr + H}\right) \left(\frac{1+z}{10}\right)^{1/2} \left(\frac{0.15}{\Omega_m h^2}\right)^{1/2} \left(\frac{\Omega_b h^2}{0.023}\right) [\text{mK}]$$

宇宙論 (初期宇宙起源)

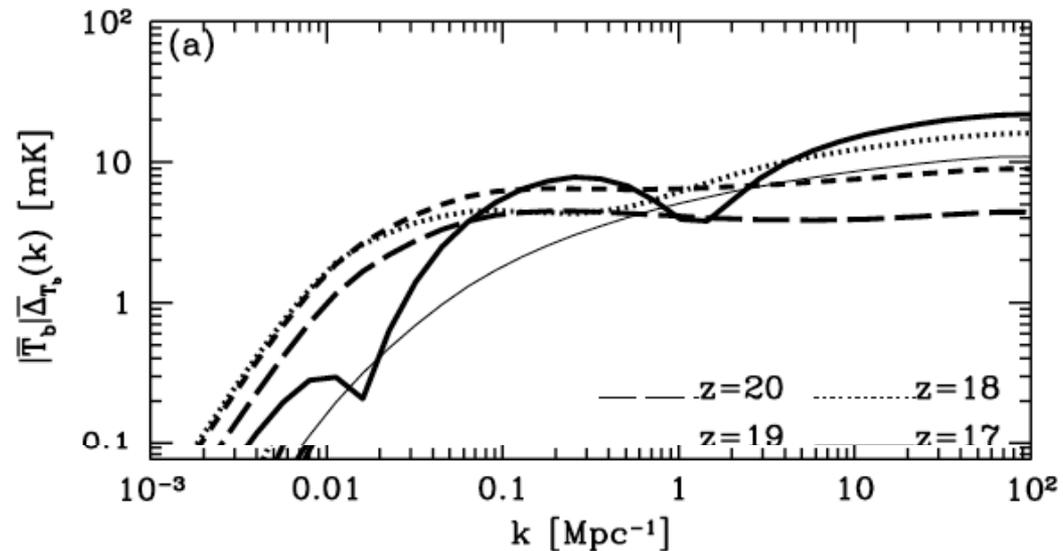
Astrophysics (天体形成起源) UV, X線の影響

# Power spectrum

## 各赤方偏移の各スケールごとのゆらぎの情報

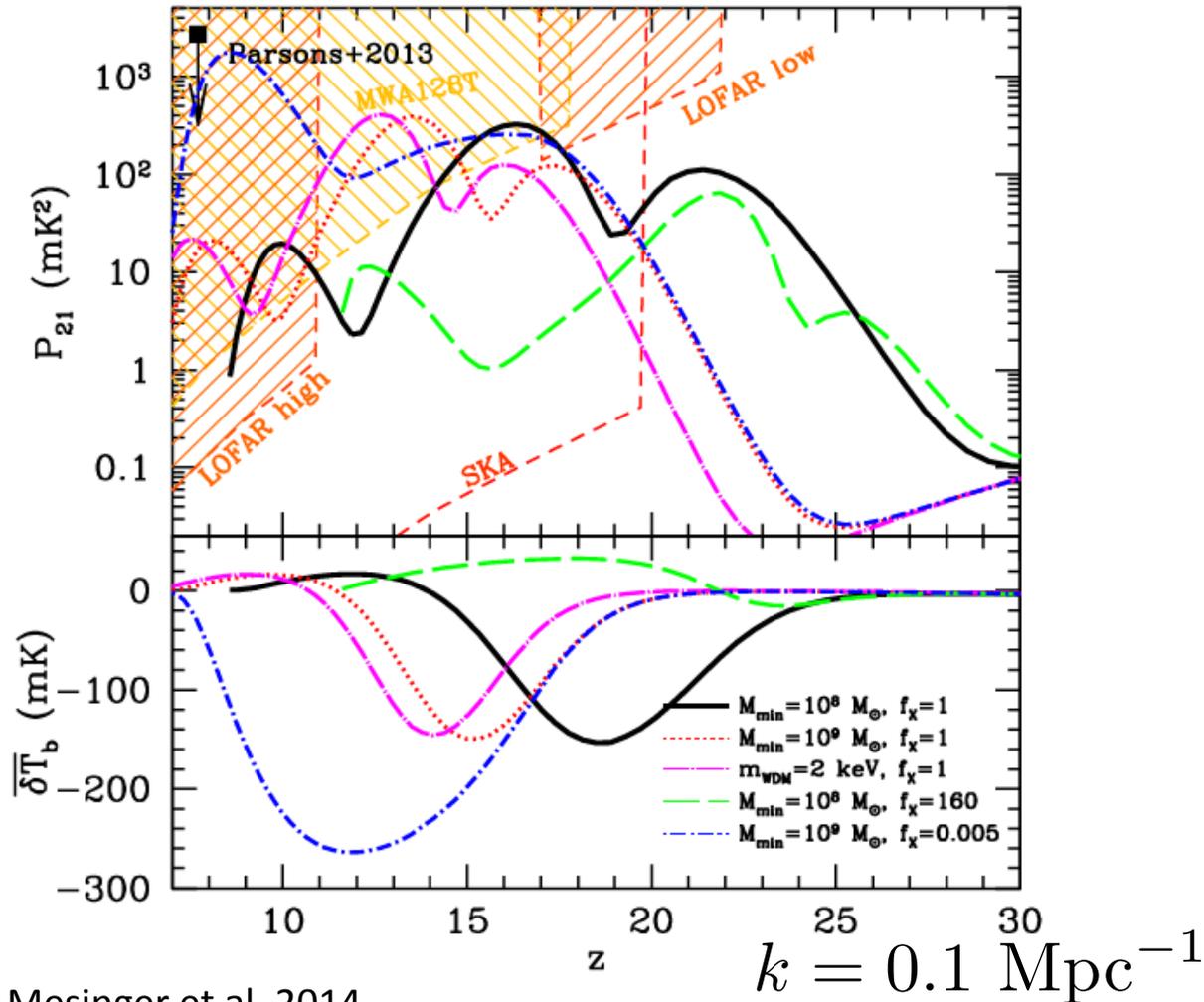
- 密度ゆらぎ
- イオン化度のゆらぎ
- Ly-alpha のゆらぎ
- ガス温度のゆらぎ (X線によるheating)
- 速度勾配のゆらぎ

Pritchard & Furlanetto 2007



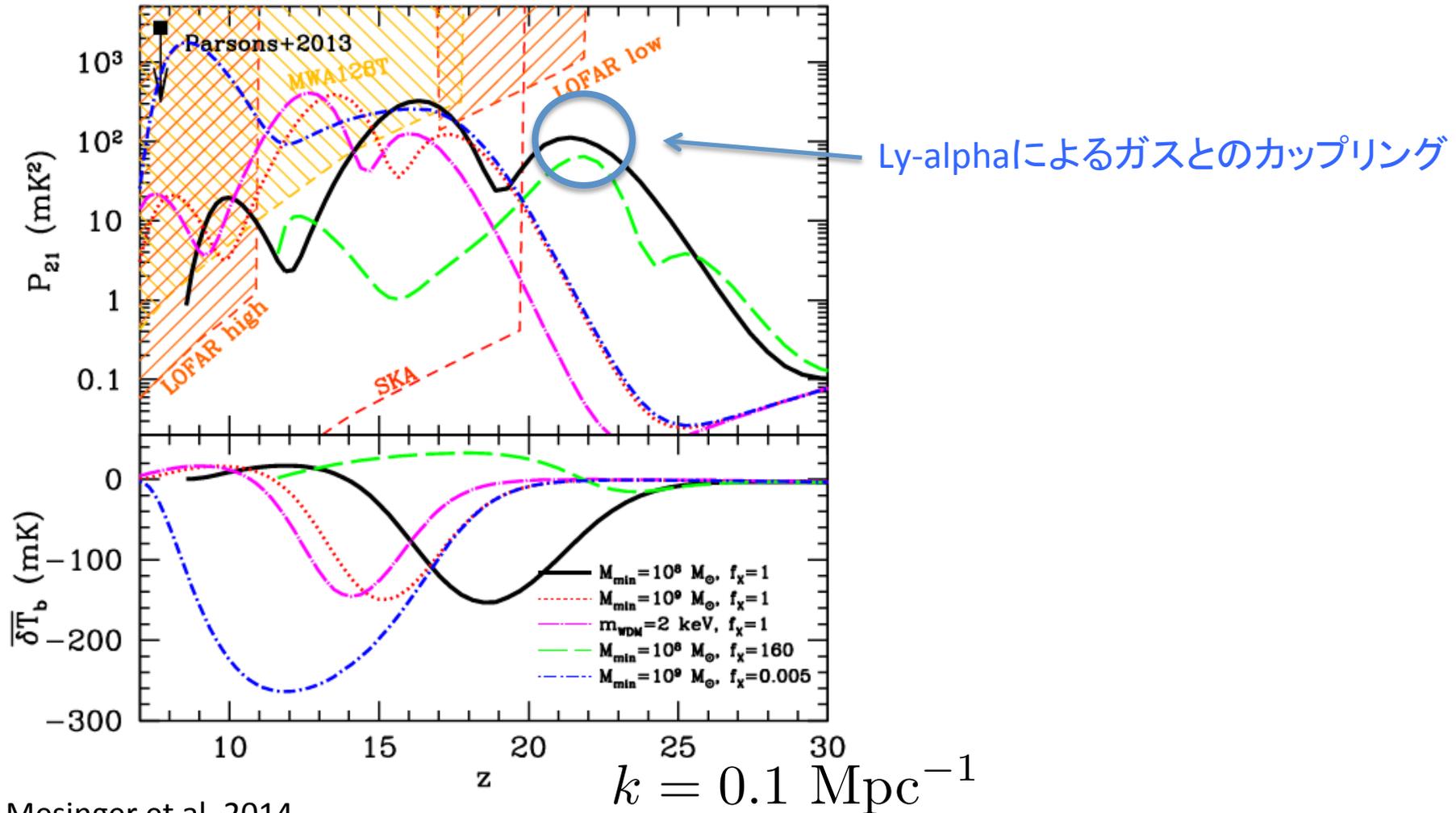
# Power spectrum

Scale毎のamplitudeのredshift evolution: 3つのピーク



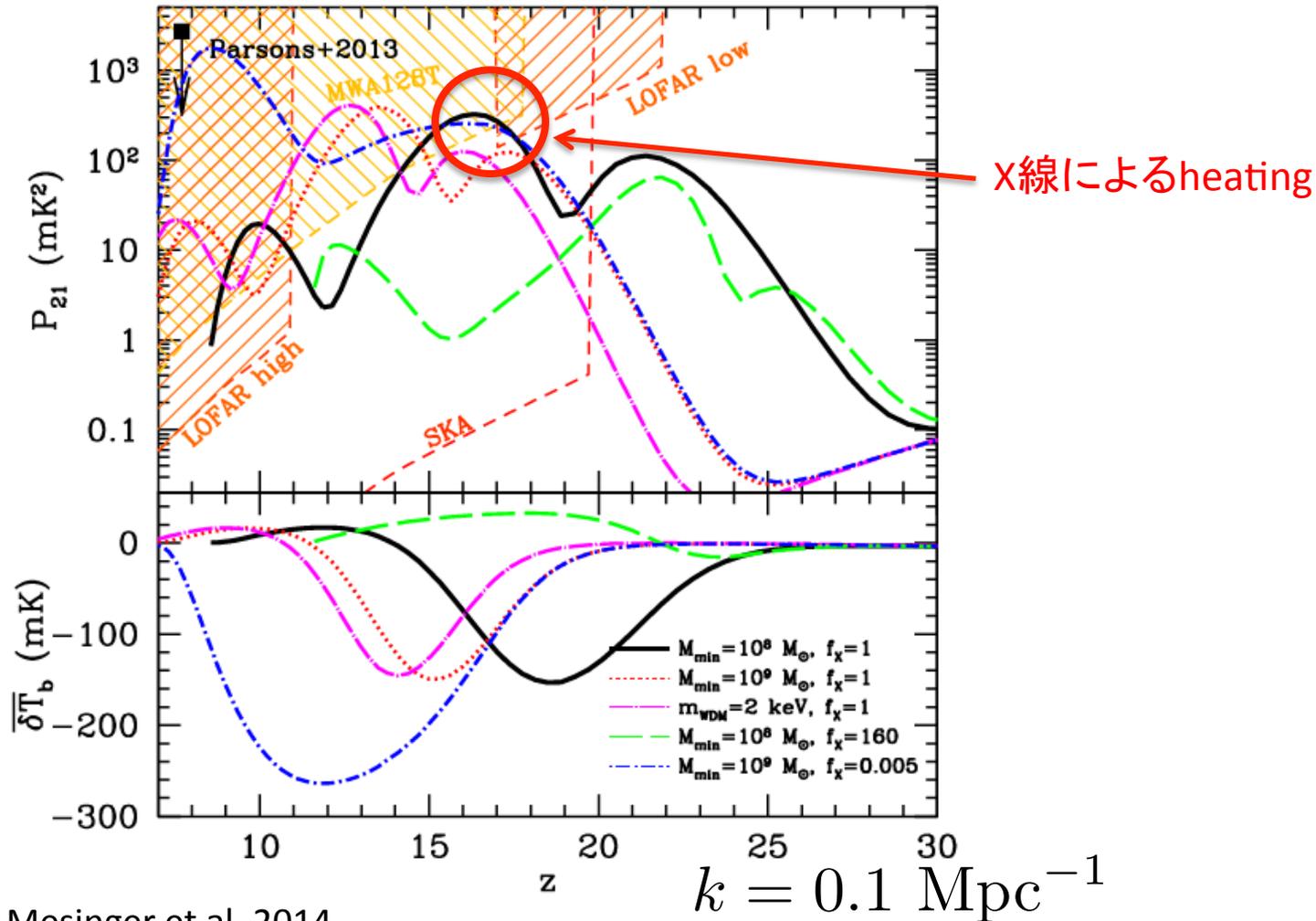
# Power spectrum

Scale毎のamplitudeのredshift evolution: 3つのピーク



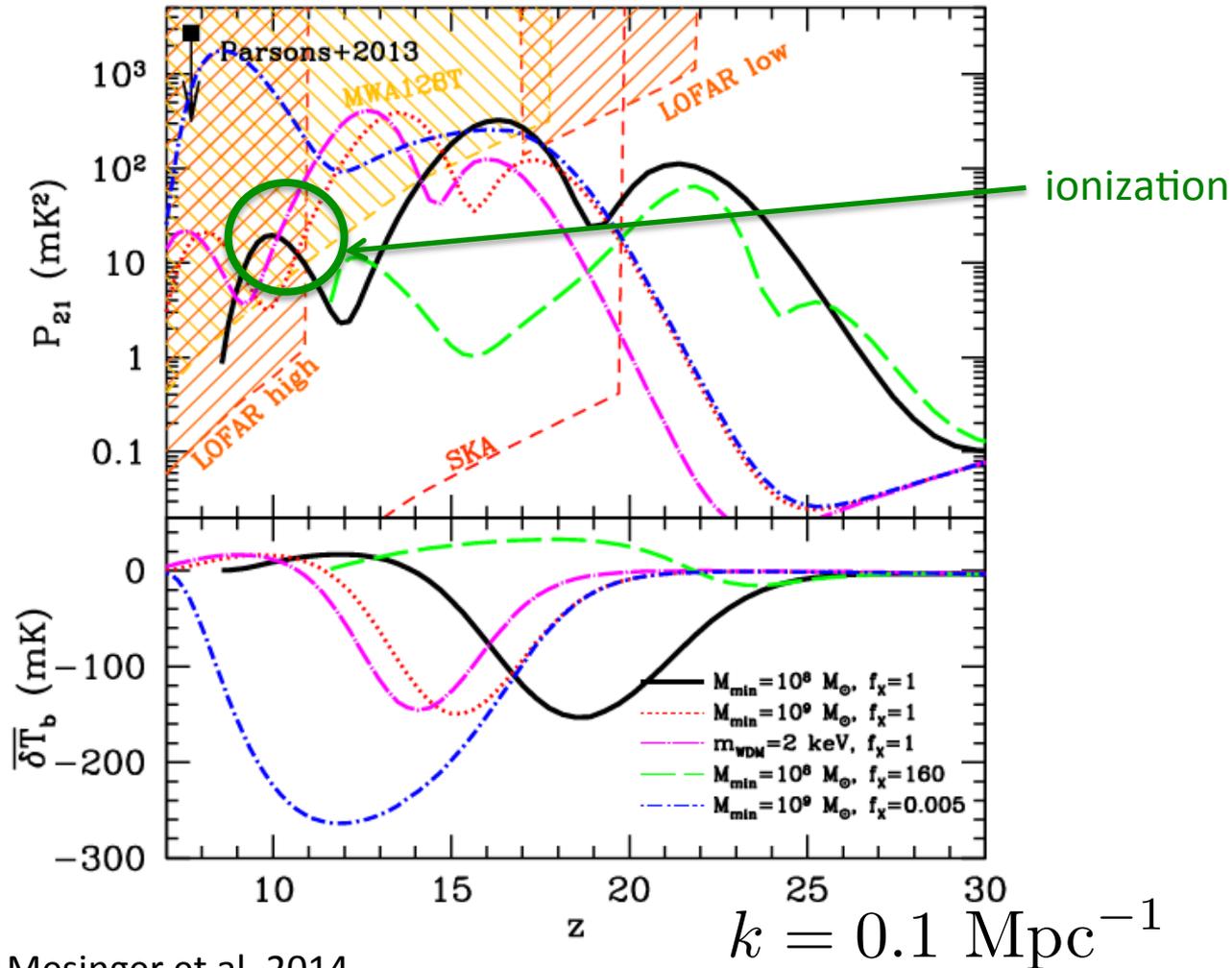
# Power spectrum

Scale毎のamplitudeのredshift evolution: 3つのピーク



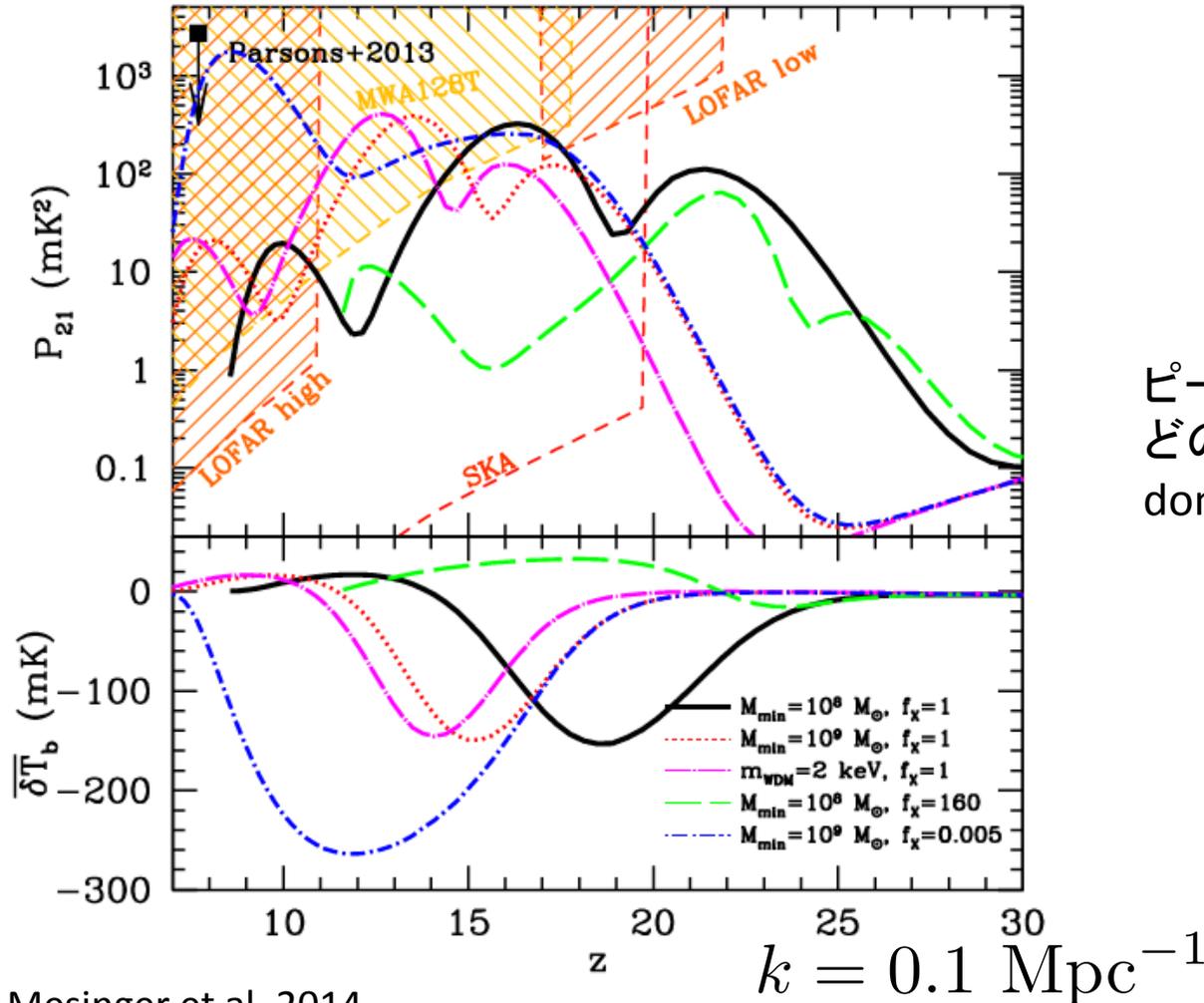
# Power spectrum

Scale毎のamplitudeのredshift evolution: 3つのピーク



# Power spectrum

Scale毎のamplitudeのredshift evolution: 3つのピーク



- Ly-alpha
- X線
- ionization

ピークのredshiftの位置で  
どのような天体形成が  
dominantかわかる

# 他の宇宙論的観測との相互相関

---

21 cm線観測は他の観測と相補的な関係

- 宇宙背景放射(CMB) : 自由電子
  - 高赤方偏移銀河 : イオン化光子源
  - 近赤外背景放射 : イオン化光子源
- 
- 相互相関をとることに新たな情報
  - 各観測特有のシステムティックなノイズをうちけせる

# CMBとの相互相関

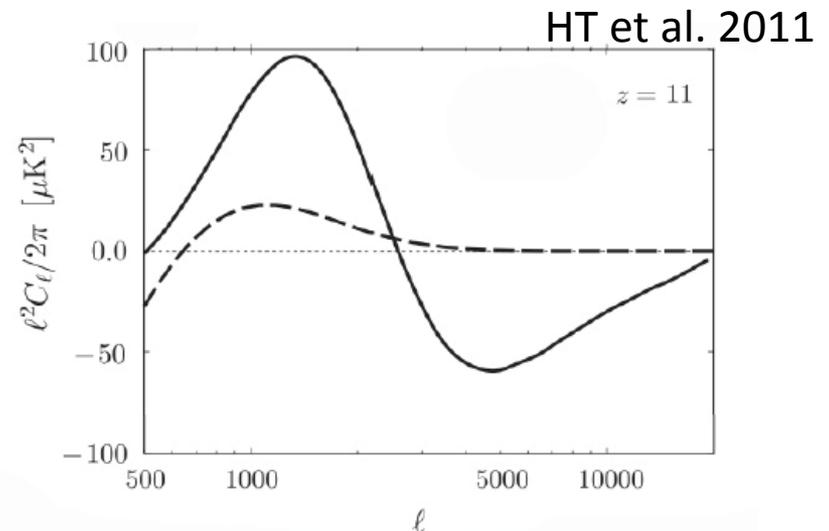
21cm line signals

$$\delta T_b(\nu) \sim 27 x_{\text{HI}} (1 + \delta_i) \left(1 - \frac{T_\gamma}{T_s}\right) \left(\frac{H}{dv_r/dr + H}\right) \left(\frac{1+z}{10}\right)^{1/2} \left(\frac{0.15}{\Omega_m h^2}\right)^{1/2} \left(\frac{\Omega_b h^2}{0.023}\right) [\text{mK}]$$

CMB

$$\left(\frac{\delta T}{T}\right)_{\text{kSZ}} = -\sigma_T \bar{n}_n(0) \int_{z_r}^{z_0} \frac{(1+z)^2}{H} e^{-\tau} \bar{x}_e (1 + \delta + \delta_{x_e} + \delta\delta_{x_e}) v_r dz$$

バブルの大きさにsensitive!



# Imaging

21 cm線のゆらぎ : 天体起源 (UV, X線)



極めてnon-Gaussianなゆらぎ

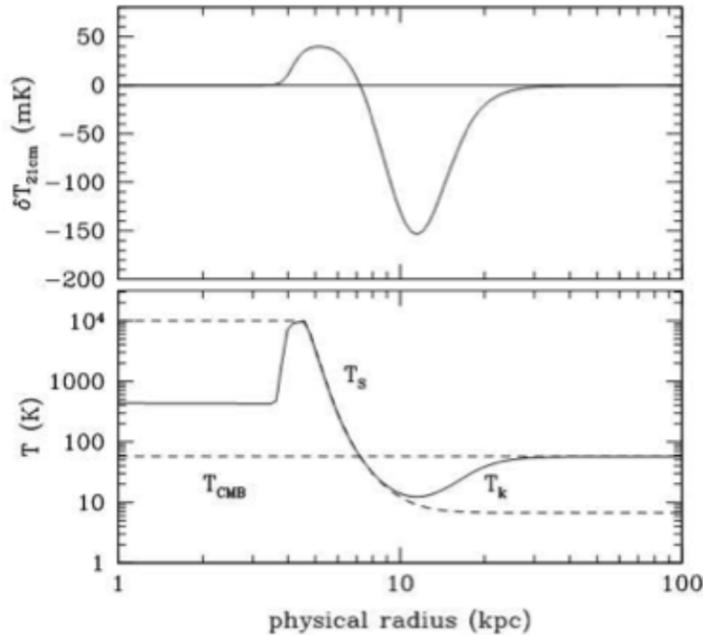
統計的な手法では限界があるかもしれない。。

21 cm signal から像を合成し、  
再電離期の様子を直接みる

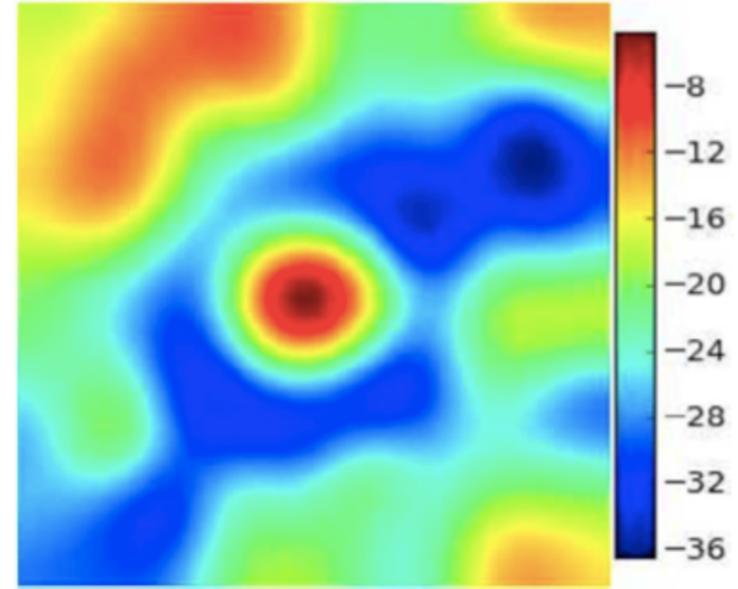
- Global signal
- Study of special areas
- Bubble sizes
- Density field

# Imaging

## Pop III star まわりの21 cm線シグナル



Cen et al. 2008



Ahn et al. 2014

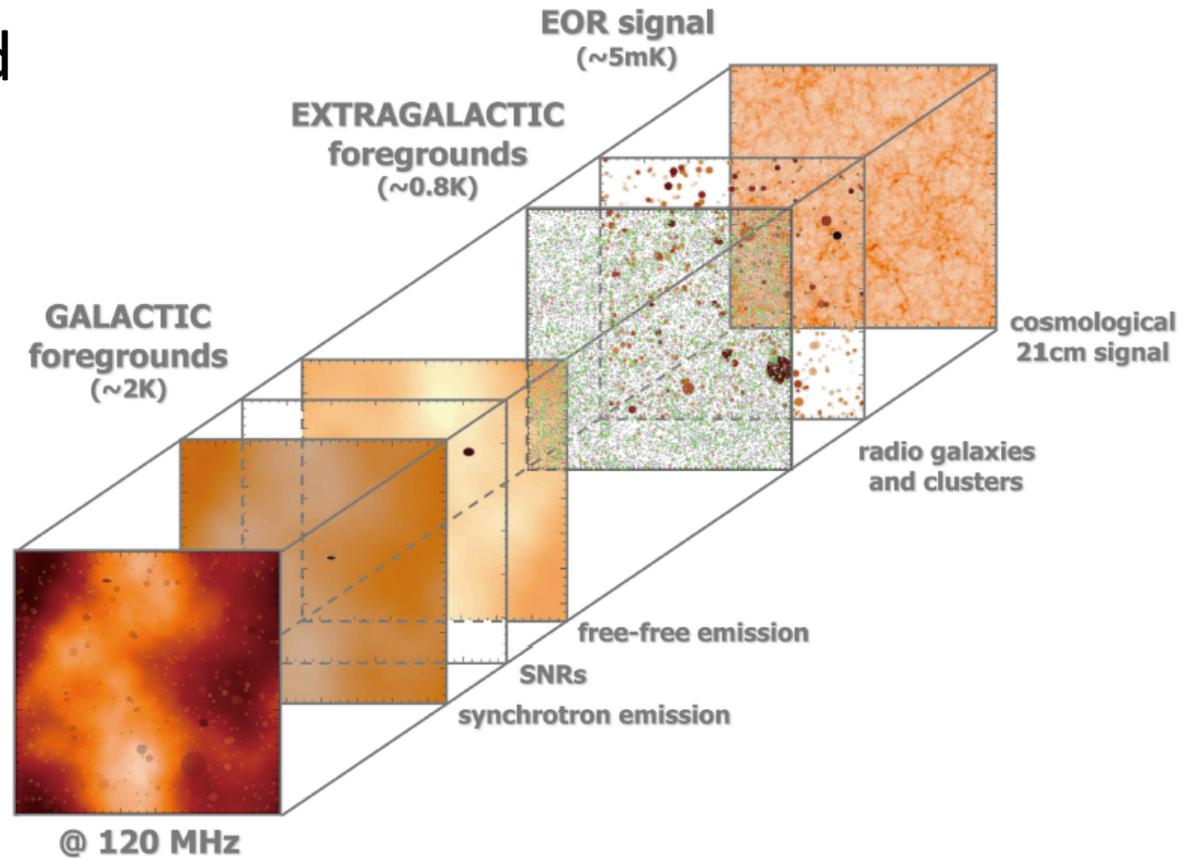
一辺 40 comoving Mpc で、ビーム幅  $\theta = 2'$  相当の平滑化

- QSO(Massive BH) (Zaroubi et al. 2007, HT & Sugiyama 2013, Yajima & Li 2014)
- PopIII SN (HT in preparation)

イオン光子源やheating源に直接迫れる可能性

# Difficulties

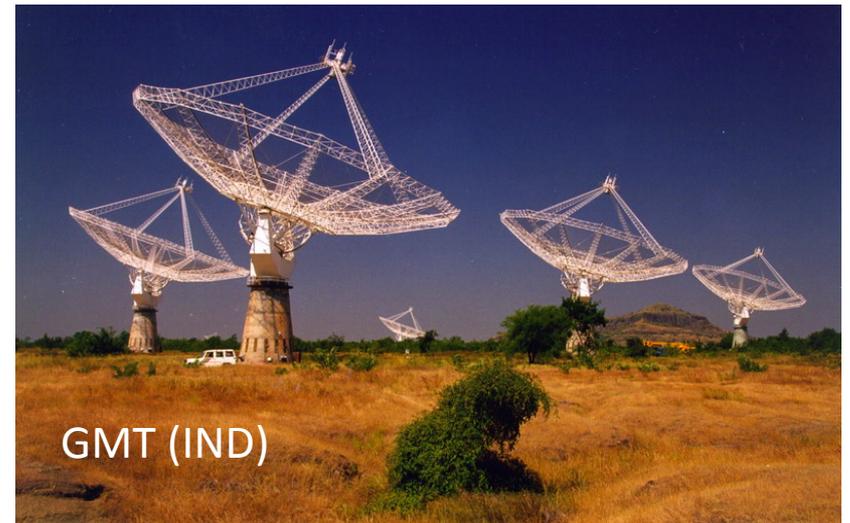
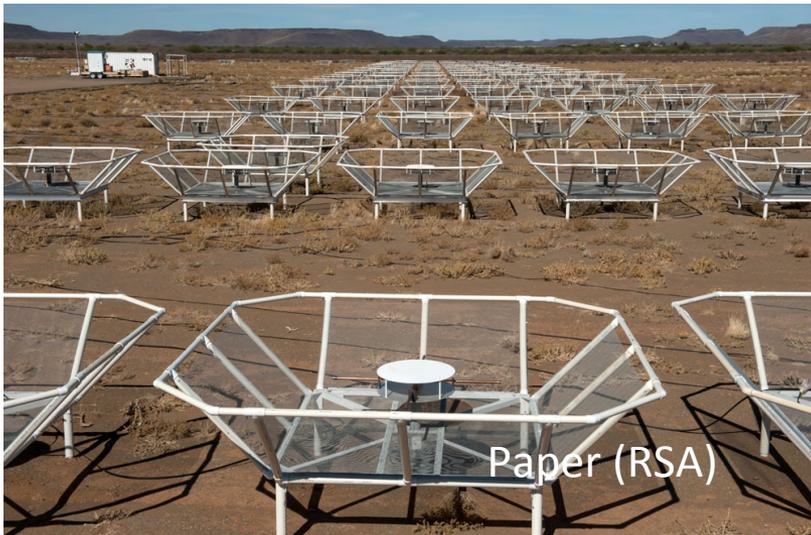
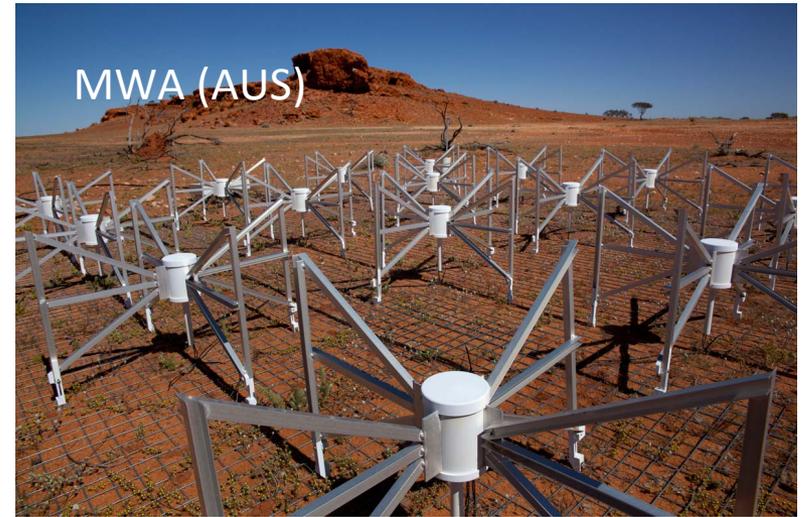
弱いシグナル  
強いforeground



“a needle in a haystack”

# Projects

---



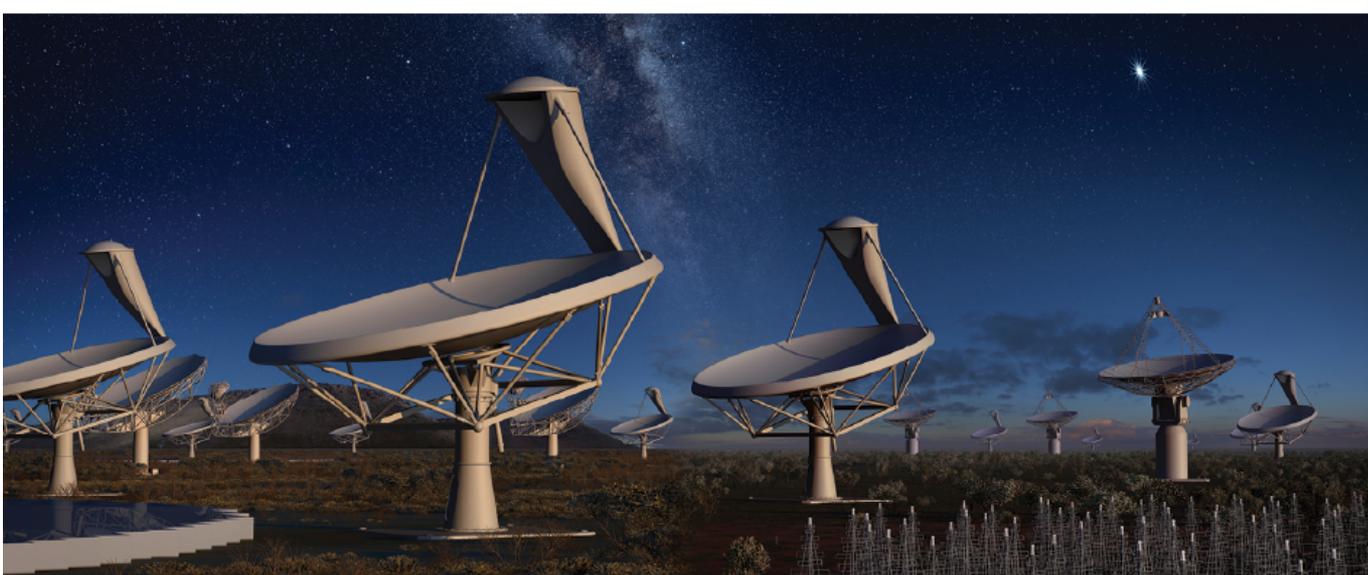
# SKA (Square Kilometer Array)

---

大型電波望遠鏡 (広帯域 : 60 MHz – 10 GHz)

- 高感度
- 高分解能
- 広視野

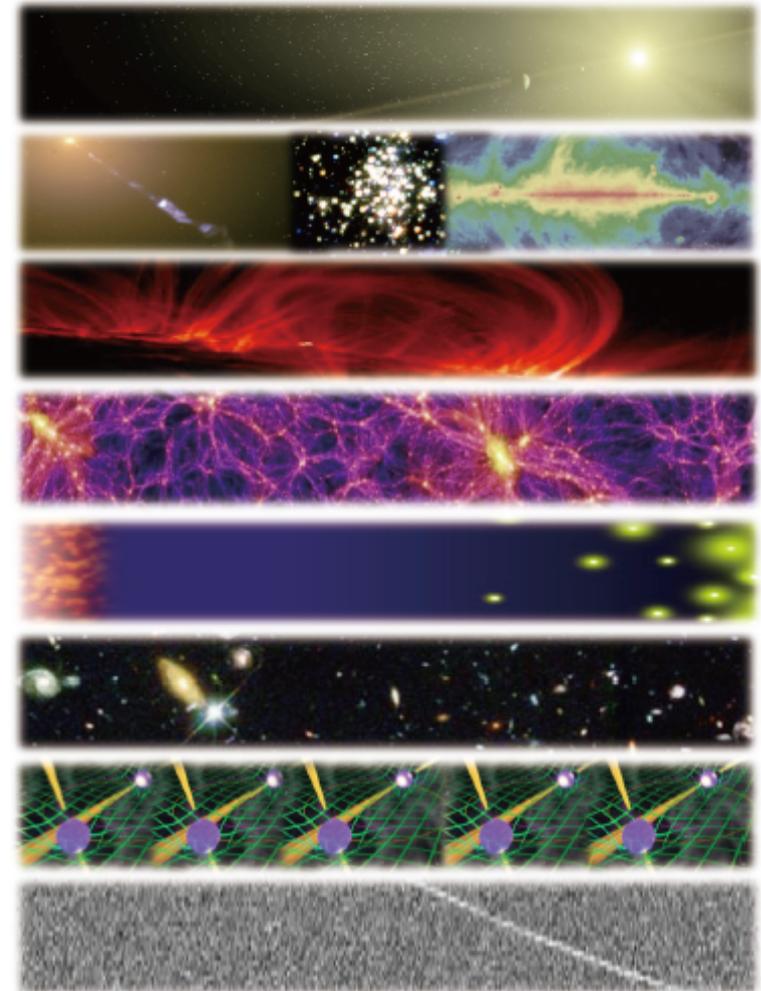
運用 : Phase I 2020 - Phase II 2024 -



# SKAでのサイエンス

Robert Braun氏のスライドより

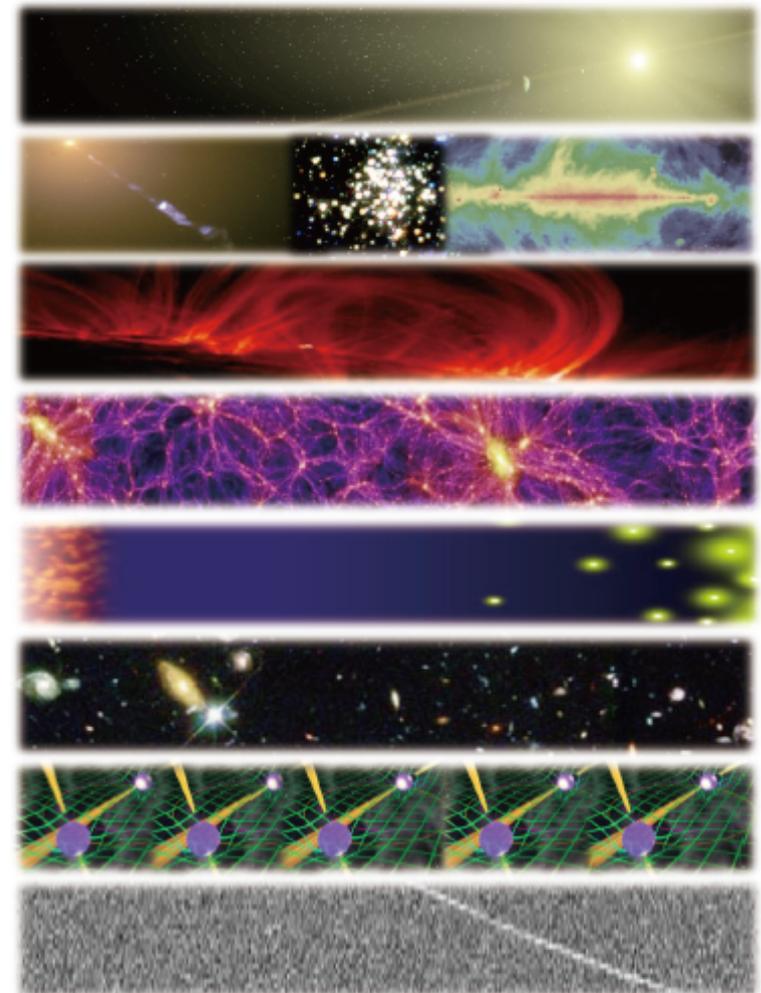
- **Astrobiology (“The Cradle of Life”)**
  - *Project Scientist:* Tyler Bourke
  - *Working Group Chair:* Melvin Hoare
- **Galaxy Evolution – Continuum**
  - *Project Scientist:* Jeff Wagg
  - *Working Group Chairs:* Nick Seymour & Isabella Prandoni
- **Cosmic Magnetism**
  - *Project Scientist:* Jimi Green
  - *Working Group Chairs:* Melanie Johnston-Hollitt & Federica Govoni
- **Cosmology**
  - *Project Scientist:* Jeff Wagg
  - *Working Group Chair:* Roy Maartens
- **Epoch of Reionisation & the Cosmic Dawn**
  - *Project Scientist:* Jeff Wagg
  - *Working Group Chair:* Leon Koopmans
- **Galaxy Evolution – HI**
  - *Project Scientist:* Jimi Green
  - *Working Group Chairs:* Lister Staveley-Smith & Tom Osterloo
- **Pulsars (“Strong field tests of gravity”)**
  - *Project Scientist:* Jimi Green
  - *Working Group Chairs:* Ben Stappers & Michael Kramer
- **Transients**
  - *Project Scientist:* Tyler Bourke
  - *Working Group Chairs:* Rob Fender & J.-P. MacQuart



# SKAでのサイエンス

Robert Braun氏のスライドより

- **Astrobiology (“The Cradle of Life”)**
  - *Project Scientist:* Tyler Bourke
  - *Working Group Chair:* Melvin Hoare
- **Galaxy Evolution – Continuum**
  - *Project Scientist:* Jeff Wagg
  - *Working Group Chairs:* Nick Seymour & Isabella Prandoni
- **Cosmic Magnetism**
  - *Project Scientist:* Jimi Green
  - *Working Group Chairs:* Melanie Johnston-Hollitt & Federica Govoni
- **Cosmology**
  - *Project Scientist:* Jeff Wagg
  - *Working Group Chair:* Roy Maartens
- **Epoch of Reionisation & the Cosmic Dawn**
  - *Project Scientist:* Jeff Wagg
  - *Working Group Chair:* Leon Koopmans
- **Galaxy Evolution – HI**
  - *Project Scientist:* Jimi Green
  - *Working Group Chairs:* Lister Staveley-Smith & Tom Osterloo
- **Pulsars (“Strong field tests of gravity”)**
  - *Project Scientist:* Jimi Green
  - *Working Group Chairs:* Ben Stappers & Michael Kramer
- **Transients**
  - *Project Scientist:* Tyler Bourke
  - *Working Group Chairs:* Rob Fender & J.-P. MacQuart



- **Astrobiology (“The Cradle of Life”)**

## サイエンスブック

「Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array」  
としてまとめられている

- *Project Scientist:* Jimi Green
- *Working Group Chairs:* Melanie Johnston-Hollitt & Federica Govoni

- **Cosmology**

- *Project Scientist:* Jeff Wagg
- *Working Group Chair:* Roy Maartens

- **Epoch of Reionisation & the Cosmic Dawn**

- *Project Scientist:* Jeff Wagg
- *Working Group Chair:* Leon Koopmans

- **Galaxy Evolution – HI**

- *Project Scientist:* Jimi Green
- *Working Group Chairs:* Lister Staveley-Smith & Tom Osterloo

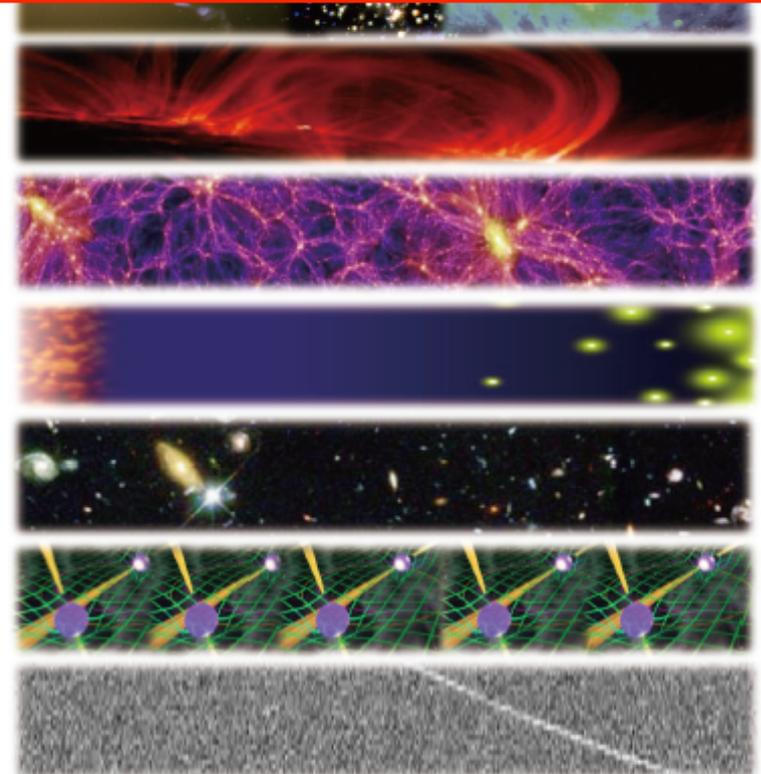
- **Pulsars (“Strong field tests of gravity”)**

- *Project Scientist:* Jimi Green
- *Working Group Chairs:* Ben Stappers & Michael Kramer

- **Transients**

- *Project Scientist:* Tyler Bourke
- *Working Group Chairs:* Rob Fender & J.-P. MacQuart

Exploring the Universe with the world's largest radio telescope



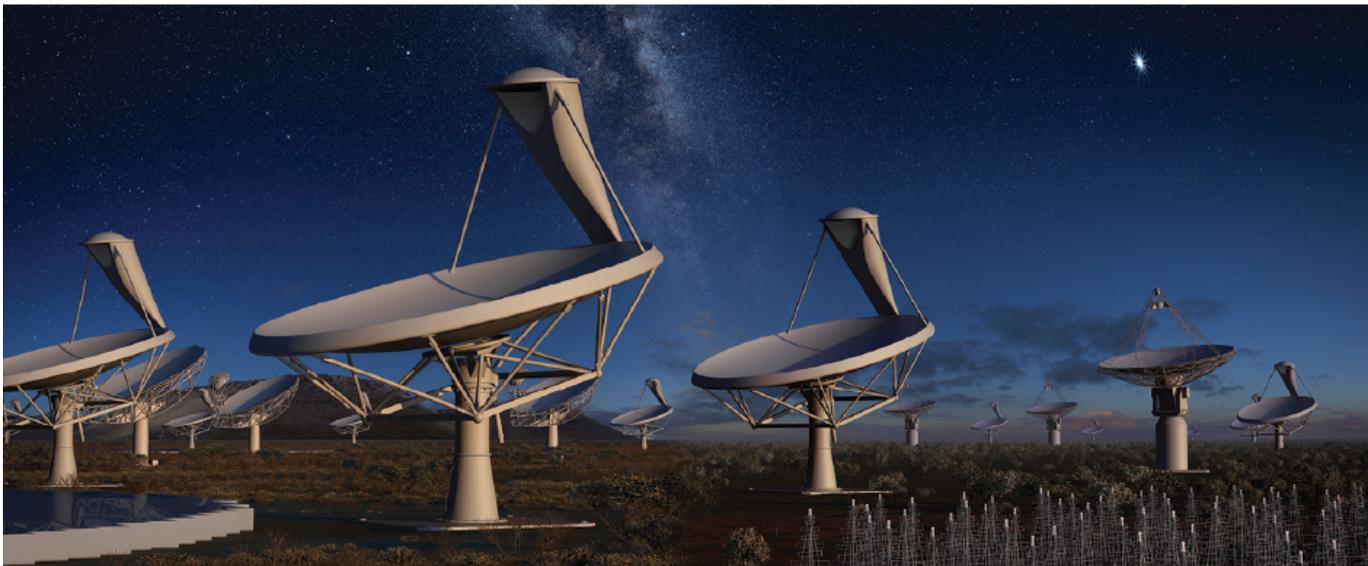
# SKA (Square Kilometer Array)

---

大型電波望遠鏡 (広帯域 : 60 MHz – 10 GHz)

- 高感度
- 高分解能
- 広視野

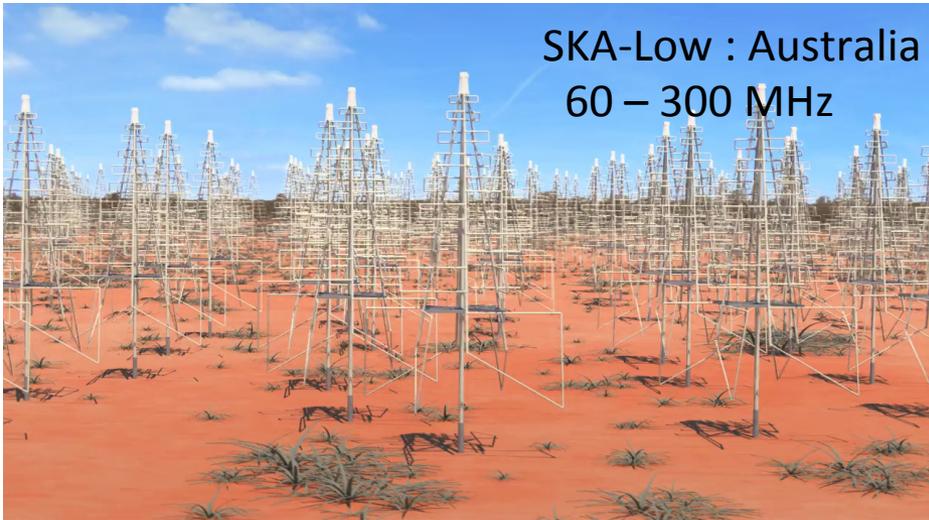
運用 : Phase I 2020 - Phase II 2024 -



# SKA (Phase I : 2020-)

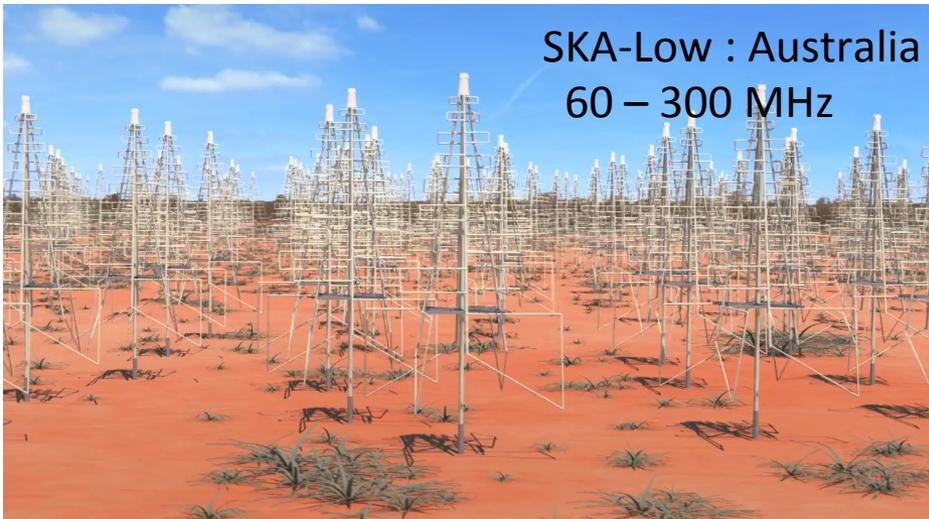
---

## AustraliaとSouth Africaに3つのtelescope群



# SKA (Phase I : 2020-)

AustraliaとSouth Africaに3つのtelescope群



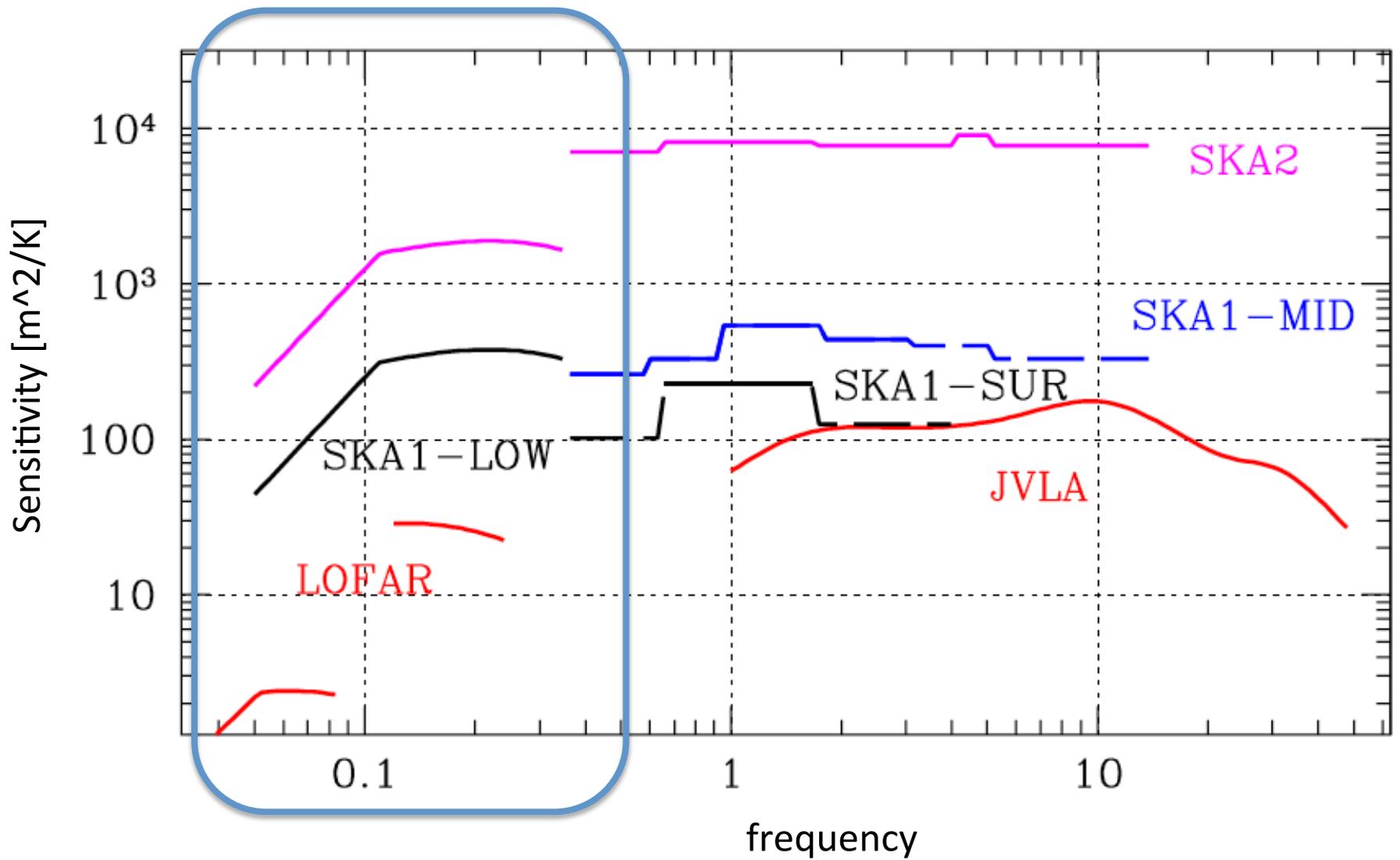
Dark age, 再イオン化期を狙う

$z \sim 5 - 20$

(21 cm線換算)

Beam size > 5 deg





既存の観測の約10倍!

# SKA (Phase I) で狙う再電離のサイエンス

---

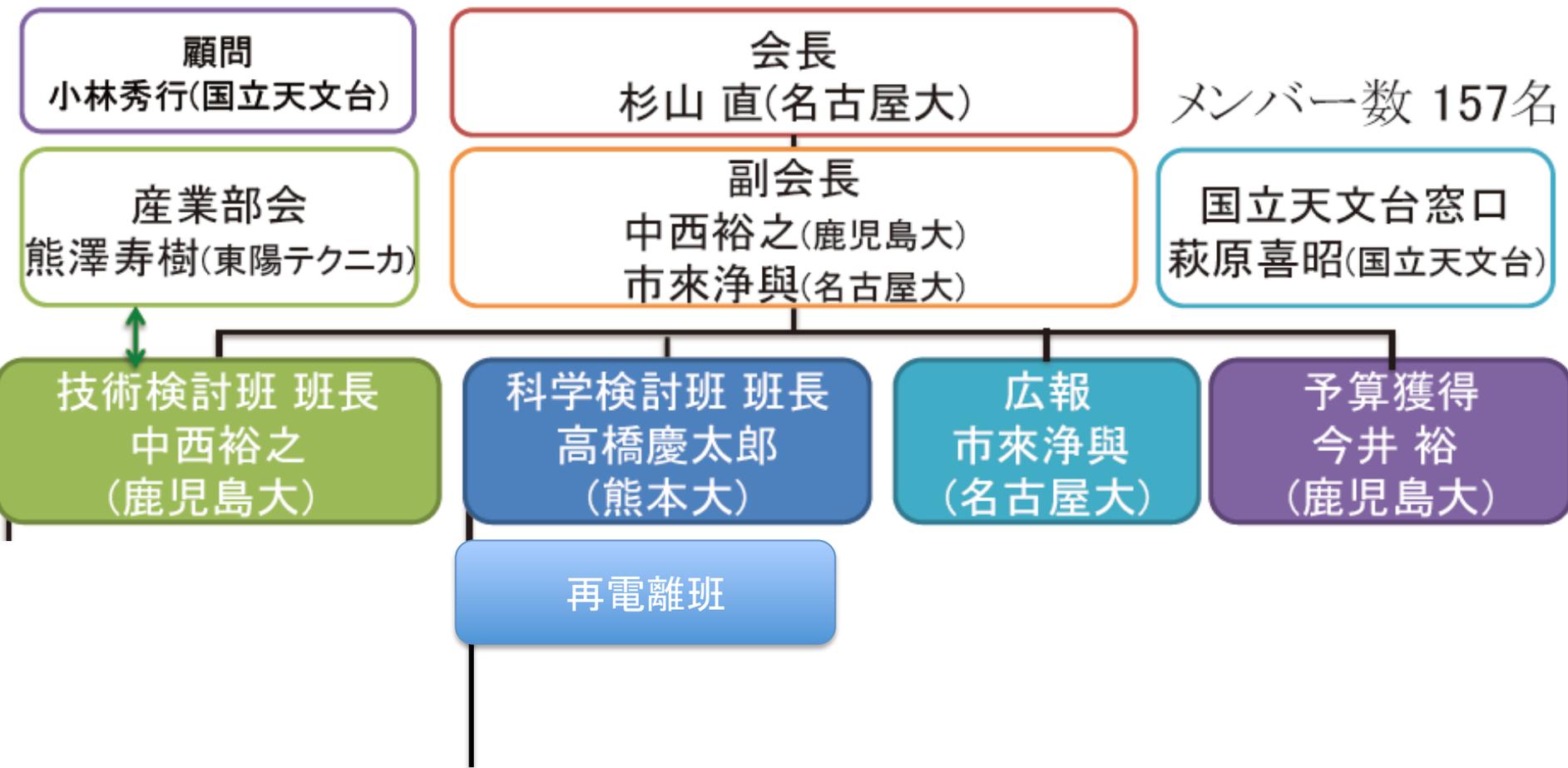
- HI 21cm線のグローバルなシグナル ( $z \sim 20$ )
- 21cm線ゆらぎのpower spectrum および高次相関  
( $z \sim 20, k \sim 1\text{Mpc}^{-1}$ )
- HI 21cm線によるHI領域のイメージング  
(1 mK noise for 5' at  $z \sim 10$ , 10 mK noise for 10' at  $z \sim 20$ )
- 高赤方偏移電波源に対する21cm吸収

再イオン化期中性水素をprobeすることで  
再イオン化プロセスや再イオン化源に迫る



初代星や初代銀河の進化の理解

## 課題： SKAでどう存在感を出していくか



# 再電離班 15名

竹内努

島袋隼士

井上進

小林将人

河野孝太郎

大内正己

横山修一郎

吉浦伸太郎

高橋慶太郎

細川隆史

市來淨與

百瀬莉恵子

吉川耕司

田代寛之

長谷川賢二

まだまだメンバー募集中

# 日本版サイエンスブック 3月に出版

- 国際サイエンスブックの要約
- SKAJPのこれからの戦略

# 再電離班 15名

竹内努

島袋隼士

井上進

小林将人

河野孝太郎

大内正己

横山修一郎

吉浦伸太郎

高橋慶太郎

細川隆史

市來淨與

百瀬莉恵子

吉川耕司

田代寛之

長谷川賢二

まだまだメンバー募集中