

顧問なんだからたまには役に立つように！  
: 市来、高橋

# Epoch of Reionization

杉山直

名古屋大学理学&KMI/Kavli IPMU

On behalf of SKA-Japan Consortium

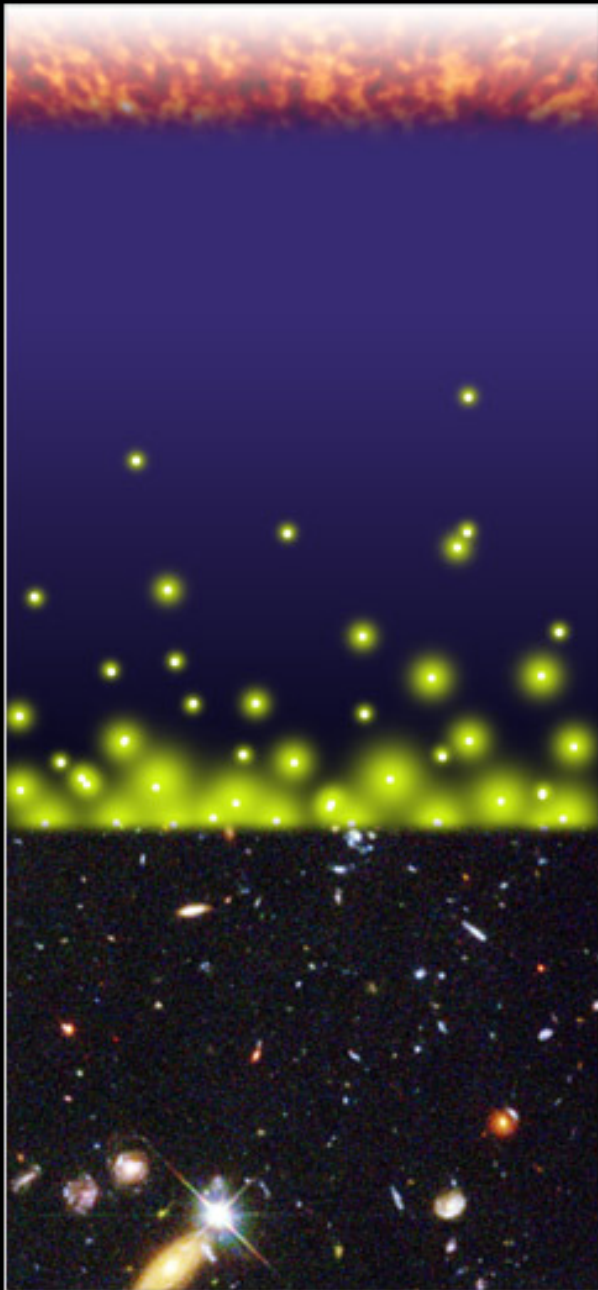
SKA-Japan顧問

# 目次

- 1、Introduction
- 2、再イオン化の物理
- 3、foregroundと観測可能性
- 4、SKA
- 5、まとめ



# 1、Introduction



ゆらぎの生成・線形成長  
 $z=1100$  中性化

暗黒時代

$z\sim 30$  初代天体形成

$z\sim 10$  再イオン化進行

$z\sim 6$  再イオン化完了

$z\sim 1$

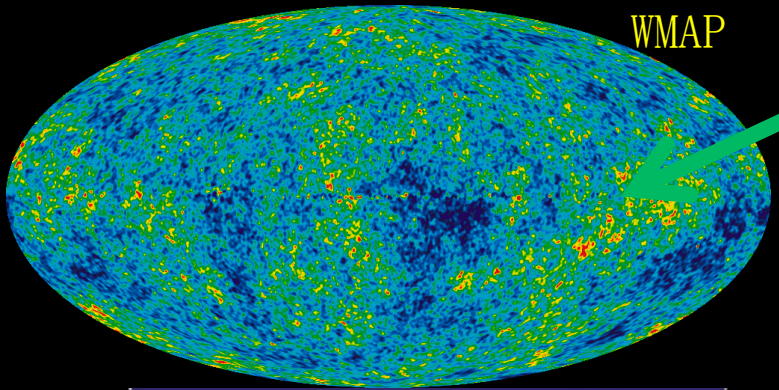
銀河進化

大規模構造形成

暗黒エネルギー

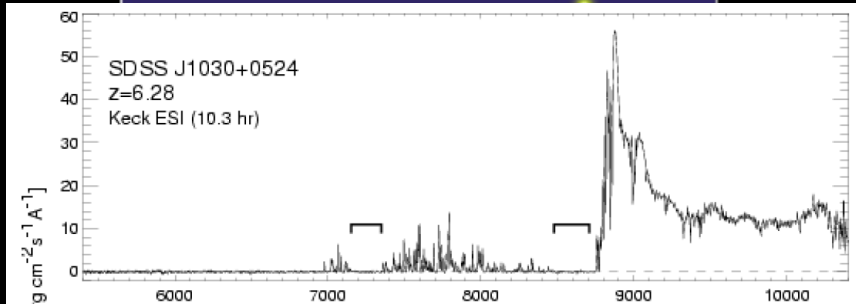
Epoch of Reionization & Dark Ages

宇宙論の構造形成に残された最後のフロンティア



ゆらぎの生成・線形成長  
 $z=1100$  中性化

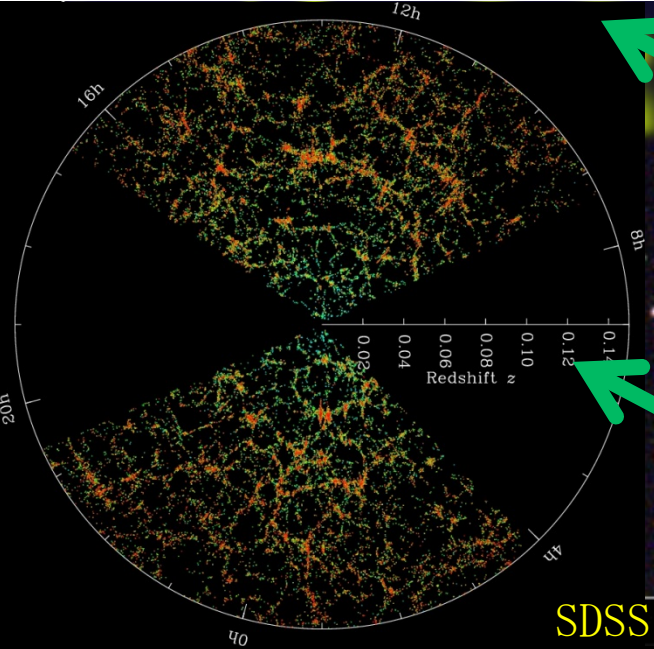
暗黒時代



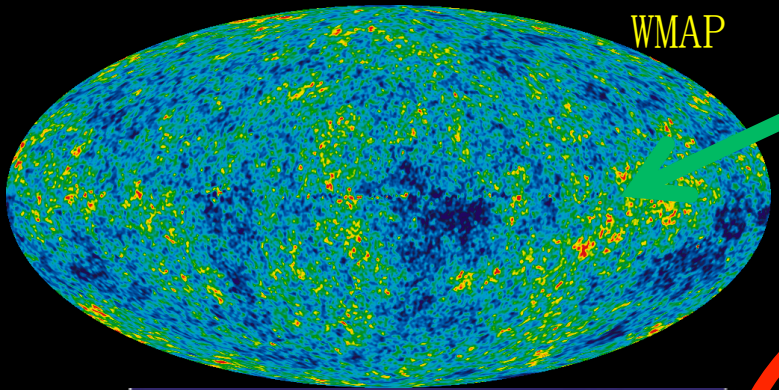
$z \sim 30$  初代天体形成

$z \sim 10$  再イオン化進行

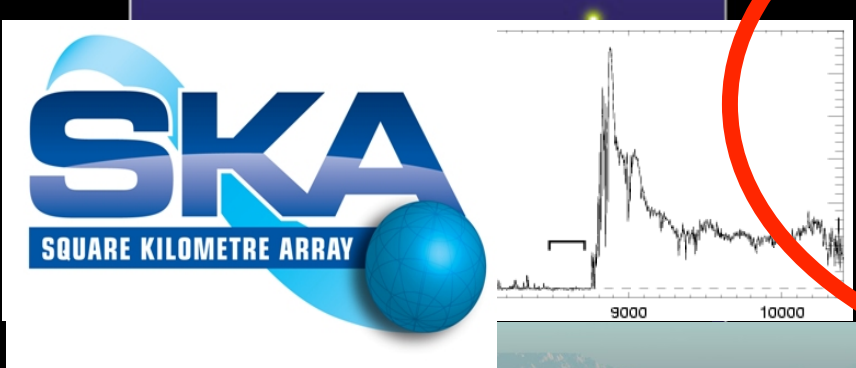
$z \sim 6$  再イオン化完了



$z \sim 1$   
 銀河進化  
 大規模構造形成  
 暗黒エネルギー



ゆらぎの生成・線形成長  
 $z=1100$  中性化



暗黒時代  
 $z \sim 30$  初代天体形成  
 $z \sim 10$  再イオン化進行

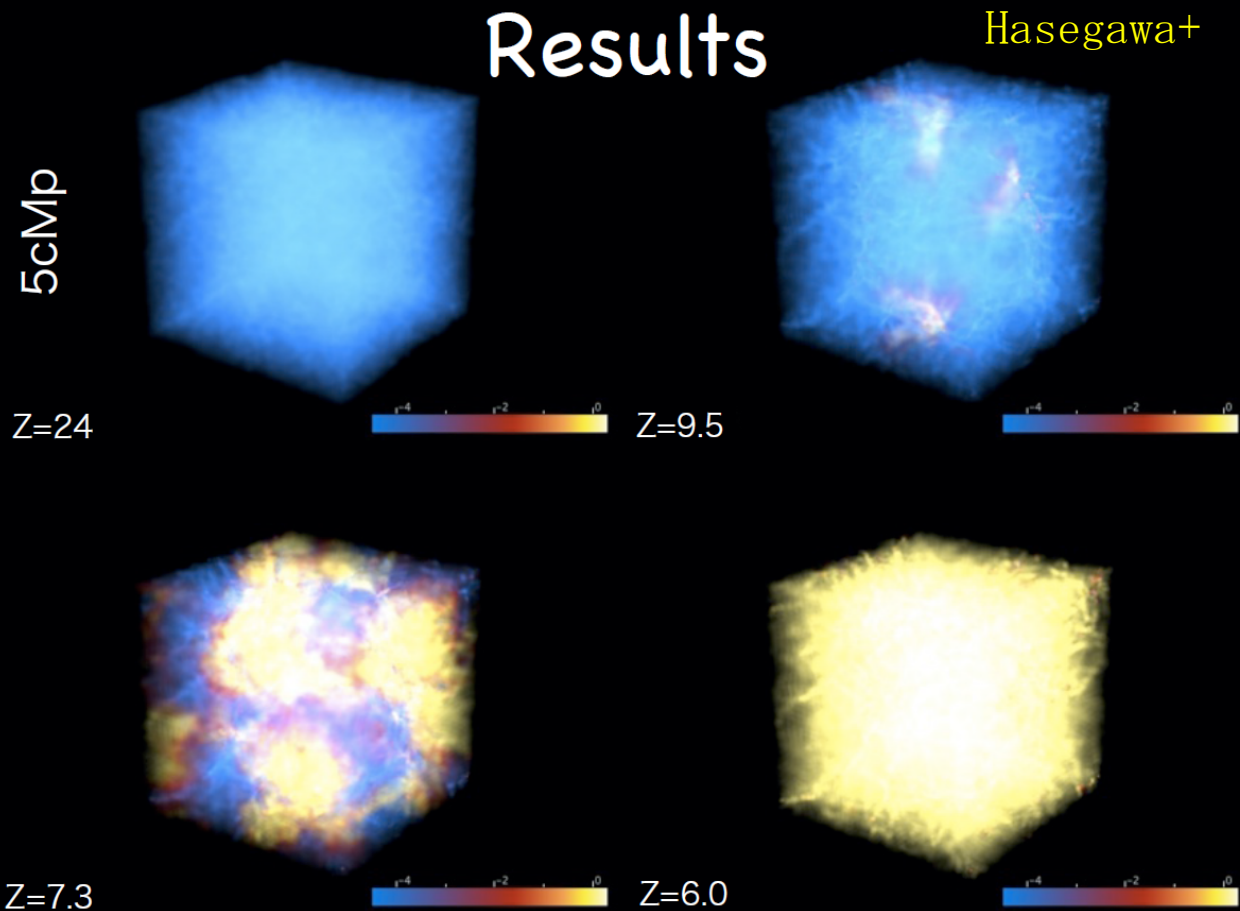




# 暗黒時代 - 初代天体形成 - 再イオン化

## Epoch of Reionization (EoR)

天体が形成されると紫外線やX線によってまわりをイオン化していく。

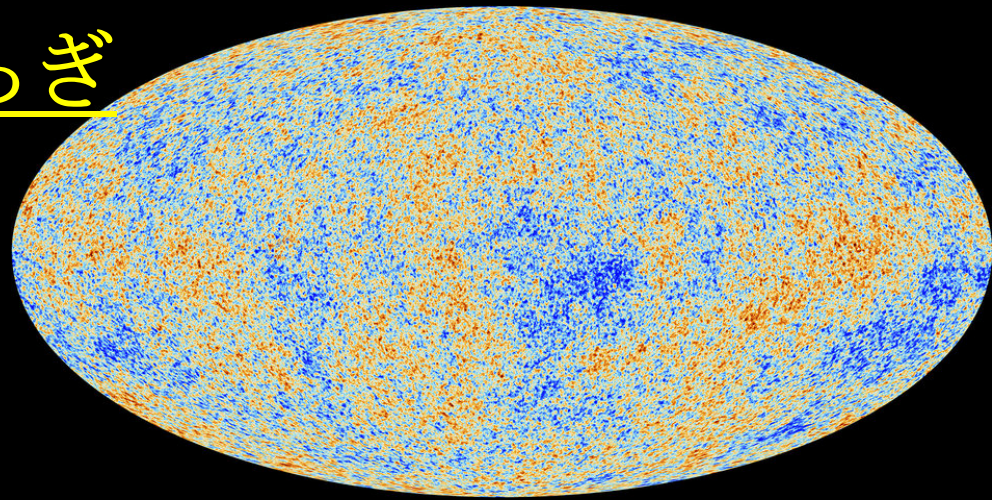


どう観測するか？

- ・ 宇宙背景放射
- ・ Ly  $\alpha$  forest
- ・ 21cm線

# 宇宙背景放射温度揺らぎ

晴れ上がり後、再イオン化  
光子が自由電子によって  
散乱され温度揺らぎ減少



温度揺らぎ現象の割合  
→ optical depth

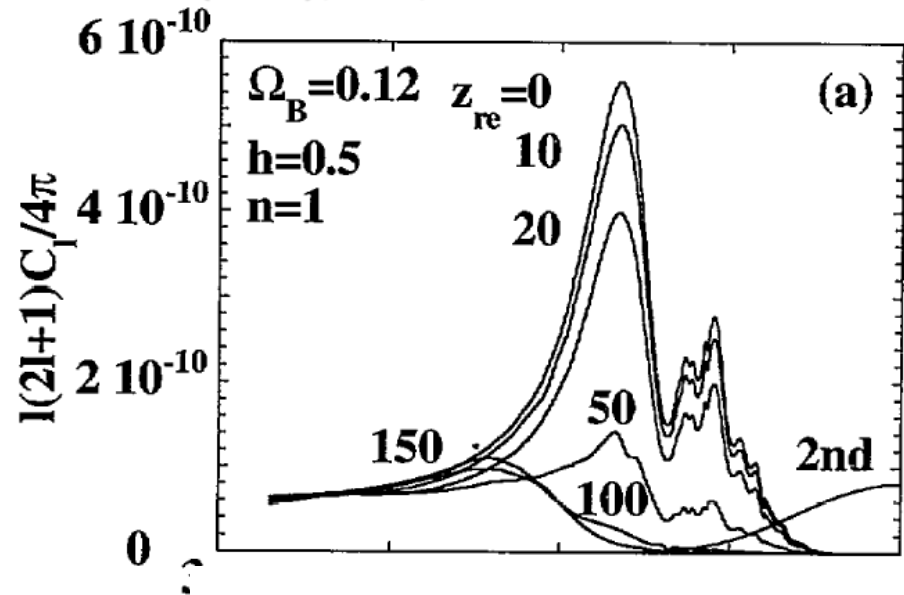
$$\tau = c\sigma_T \int_0^z n_e(z') \frac{dt}{dz'} dz'$$

Damping:  $\exp(-\tau)$   
 $\tau = 0.089 \pm 0.032$  (PLANCK)

積分量しかわからないので  
neの時間発展はわからない。  
瞬間的再イオン化を仮定  
→  $z \sim 10$

PLANCK

N.S., Silk, Vittorio, ApJL  
(1993), 419, L1



# 宇宙背景放射偏光

晴れ上がり後、再イオン化  
光子が自由電子によって  
散乱され偏光ゆらぎが生成

偏光ゆらぎの大きさ

→ optical depthと四重極子揺らぎ

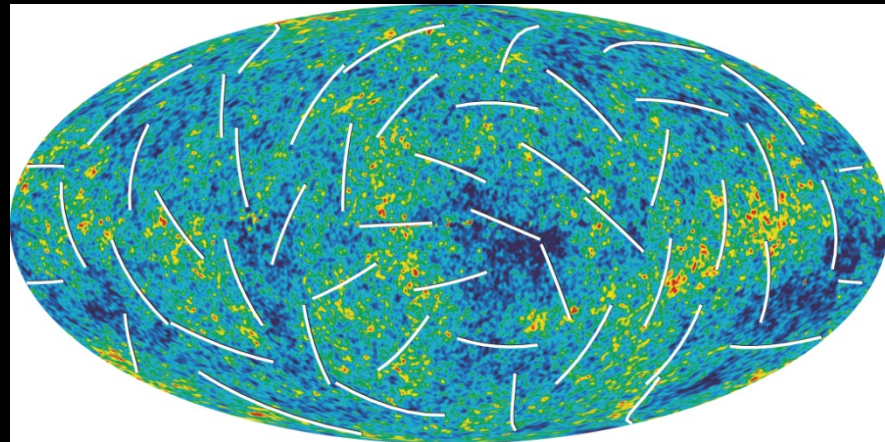
$$\tau = c\sigma_T \int_0^z n_e(z') \frac{dt}{dz'} dz'$$

$\tau = 0.089 \pm 0.014$  (WMAP)

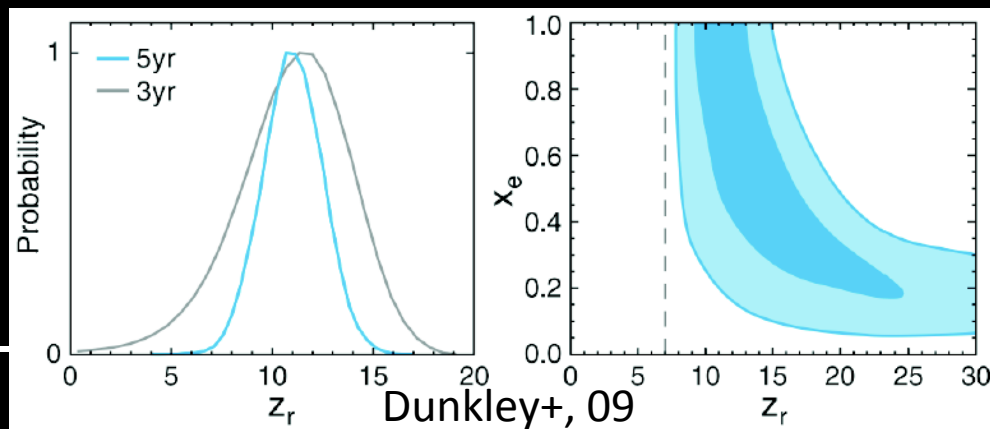
積分量しかわからないので  
 $n_e$ の時間発展はわからない。

瞬間的再イオン化を仮定

→  $z \sim 10$



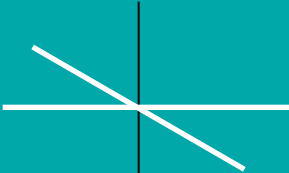
WMAP



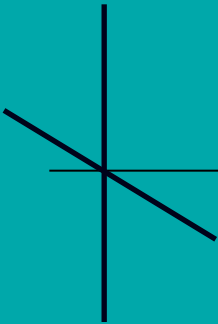


Incoming  
Electro-Magnetic  
Field

Same Flux



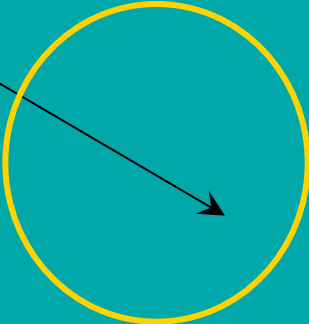
Same  
Flux



No-Preferred  
Direction  
**UnPolarized**



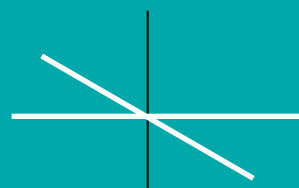
Electron  
scattering



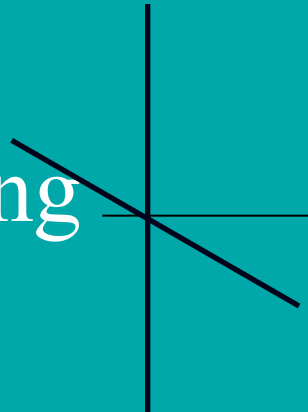
Homogeneously Distributed Photons

Incoming  
Electro-Magnetic  
Field

Weak Flux

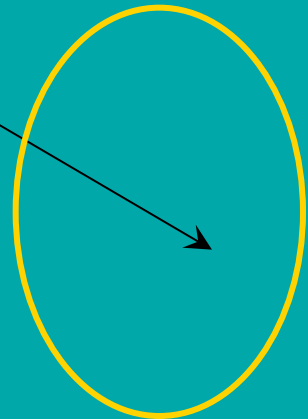


Strong  
Flux

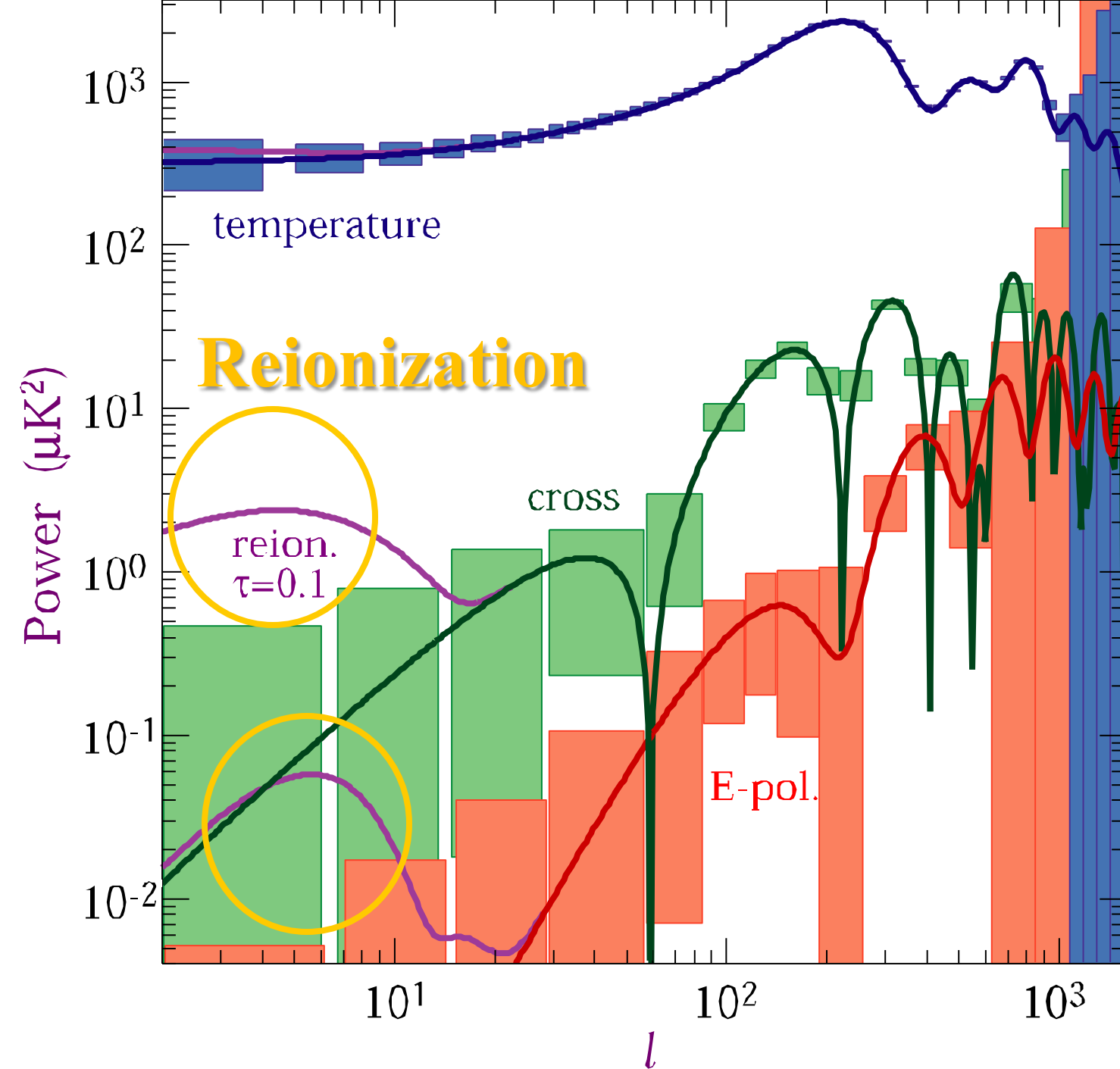


Preferred  
Direction  
**Polarized**

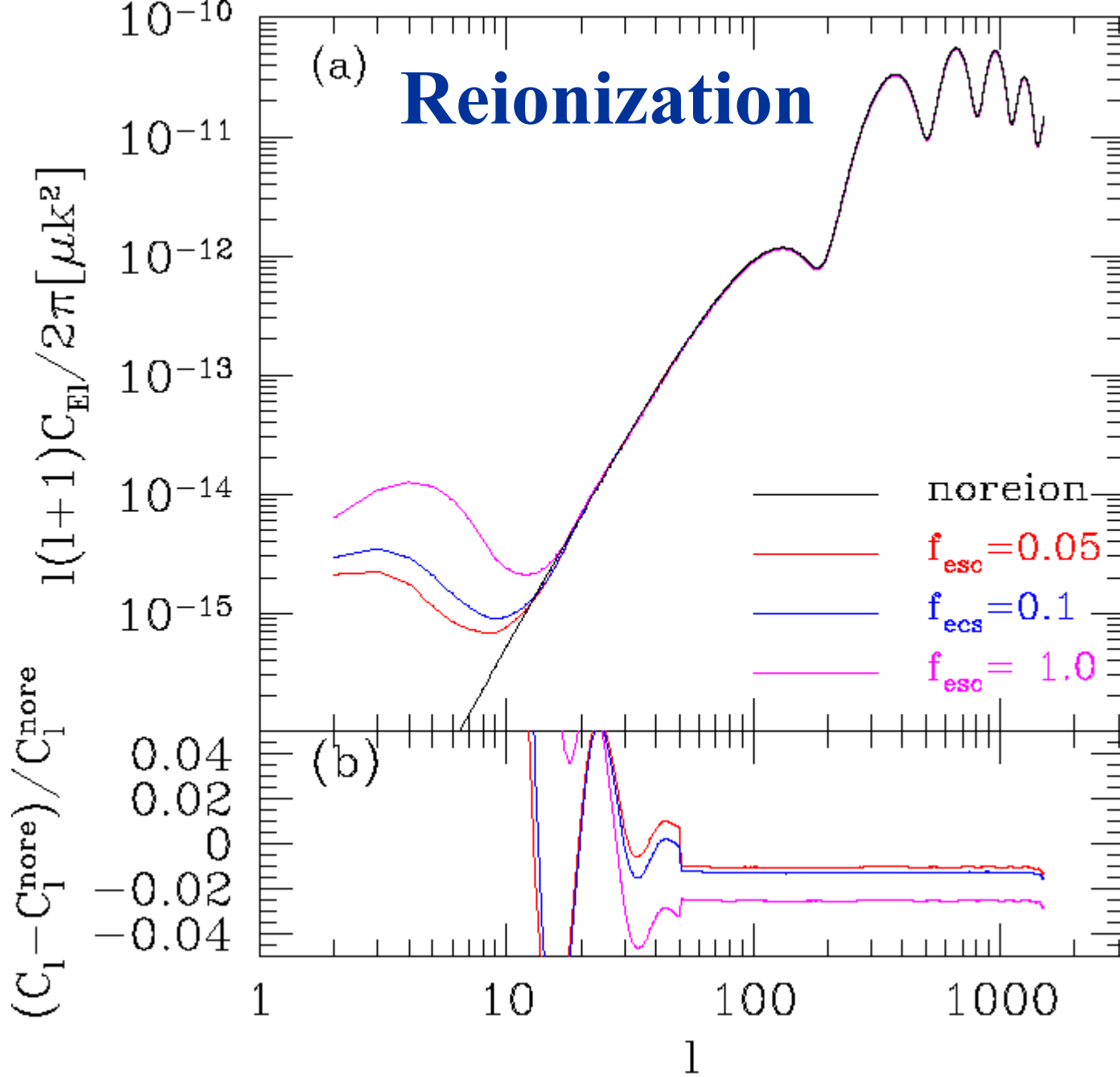
Electron  
scattering

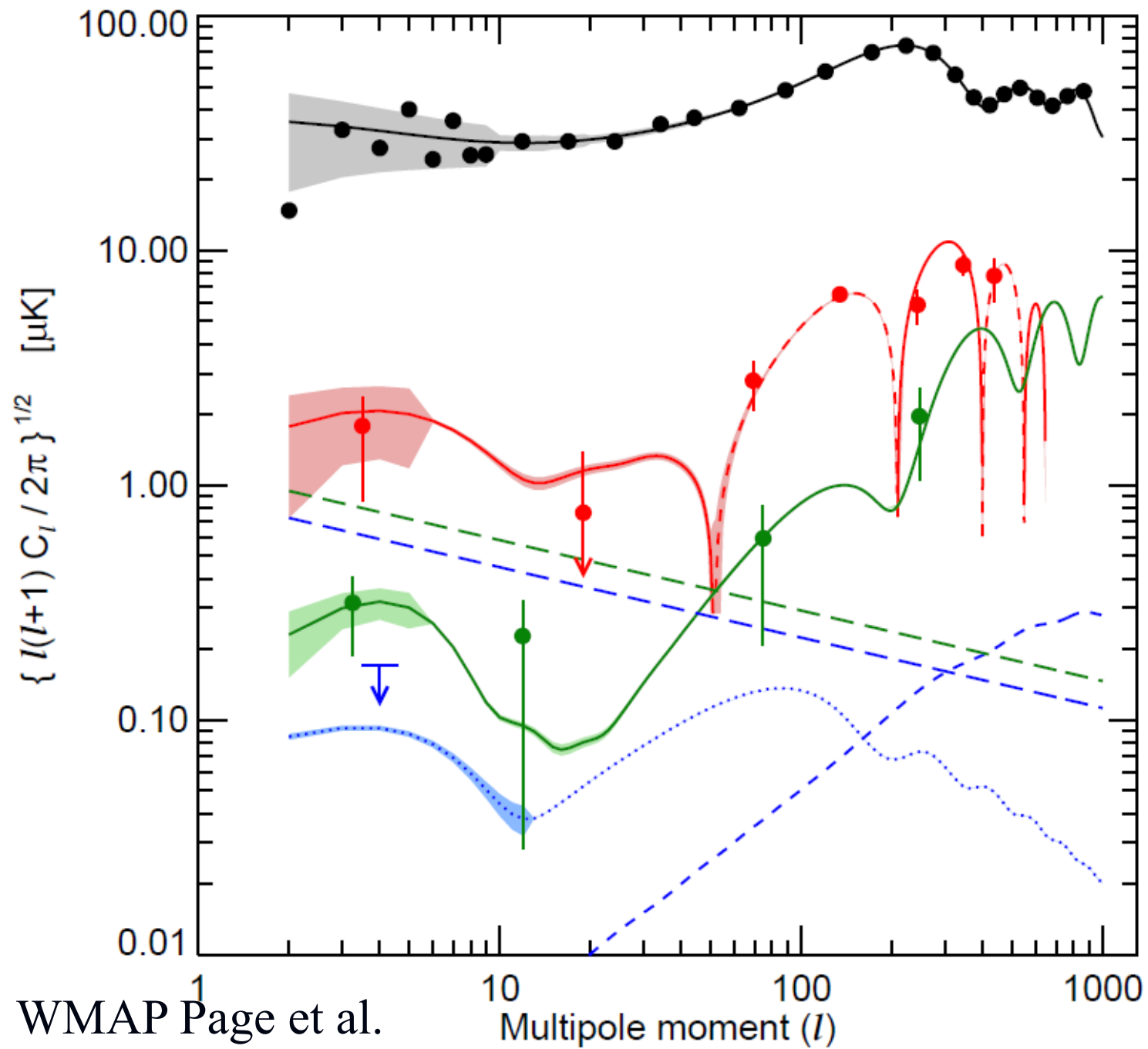


Photon Distributions with Quadrupole Pattern



Scalar  
Comp.





# 宇宙背景放射偏光

晴れ上がり後、再イオン化  
光子が自由電子によって  
散乱され偏光ゆらぎが生成

偏光ゆらぎの大きさ

→ optical depthと四重極子揺らぎ

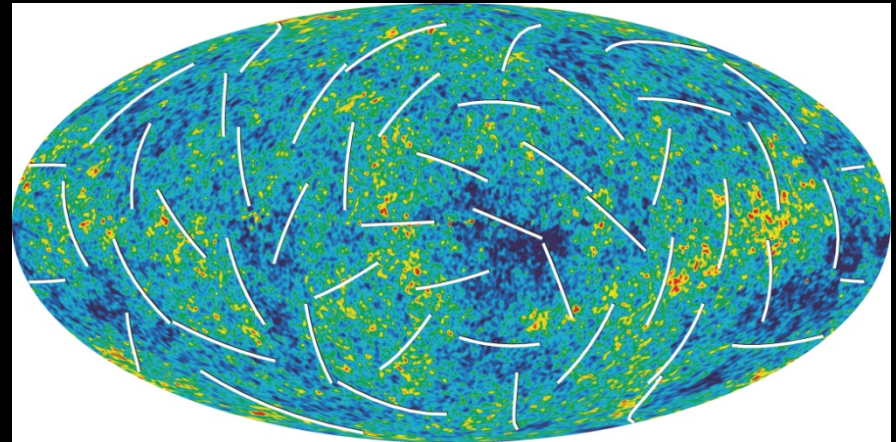
$$\tau = c\sigma_T \int_0^z n_e(z') \frac{dt}{dz'} dz'$$

$\tau = 0.089 \pm 0.014$  (WMAP)

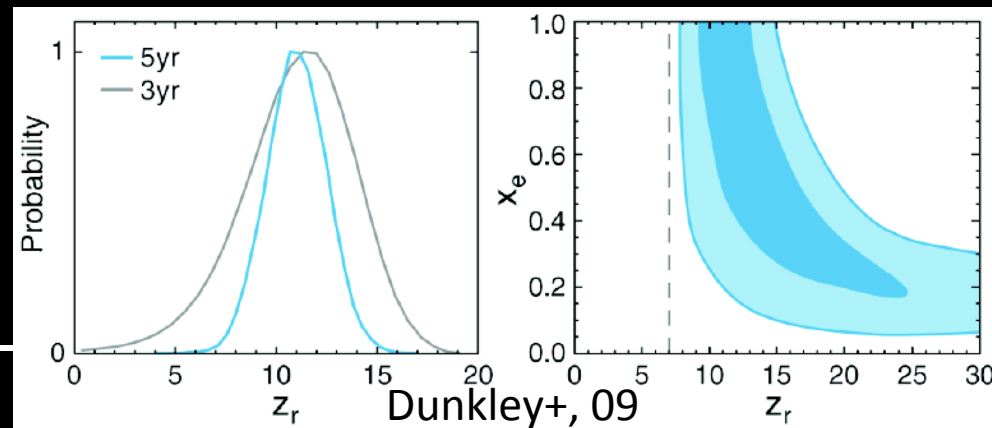
積分量しかわからないので  
 $n_e$ の時間発展はわからない。

瞬間的再イオン化を仮定

→  $z \sim 10$



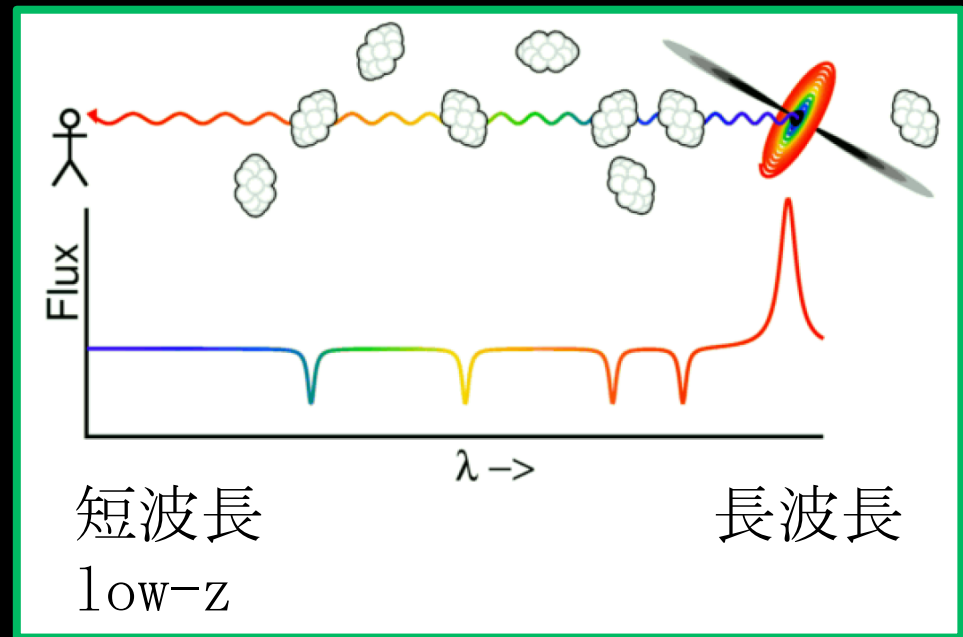
WMAP



# Ly $\alpha$ forest

## Ly $\alpha$ forest

- Ly $\alpha$ 線 (静止波長1216Å)
- 背景連続光 (QSOなど)
- 中性水素により吸収  
→ 赤方偏移
- 視線方向にたくさんの雲  
→ Ly $\alpha$  forest
- 中性水素分布の  
視線方向分布



# Ly $\alpha$ forest

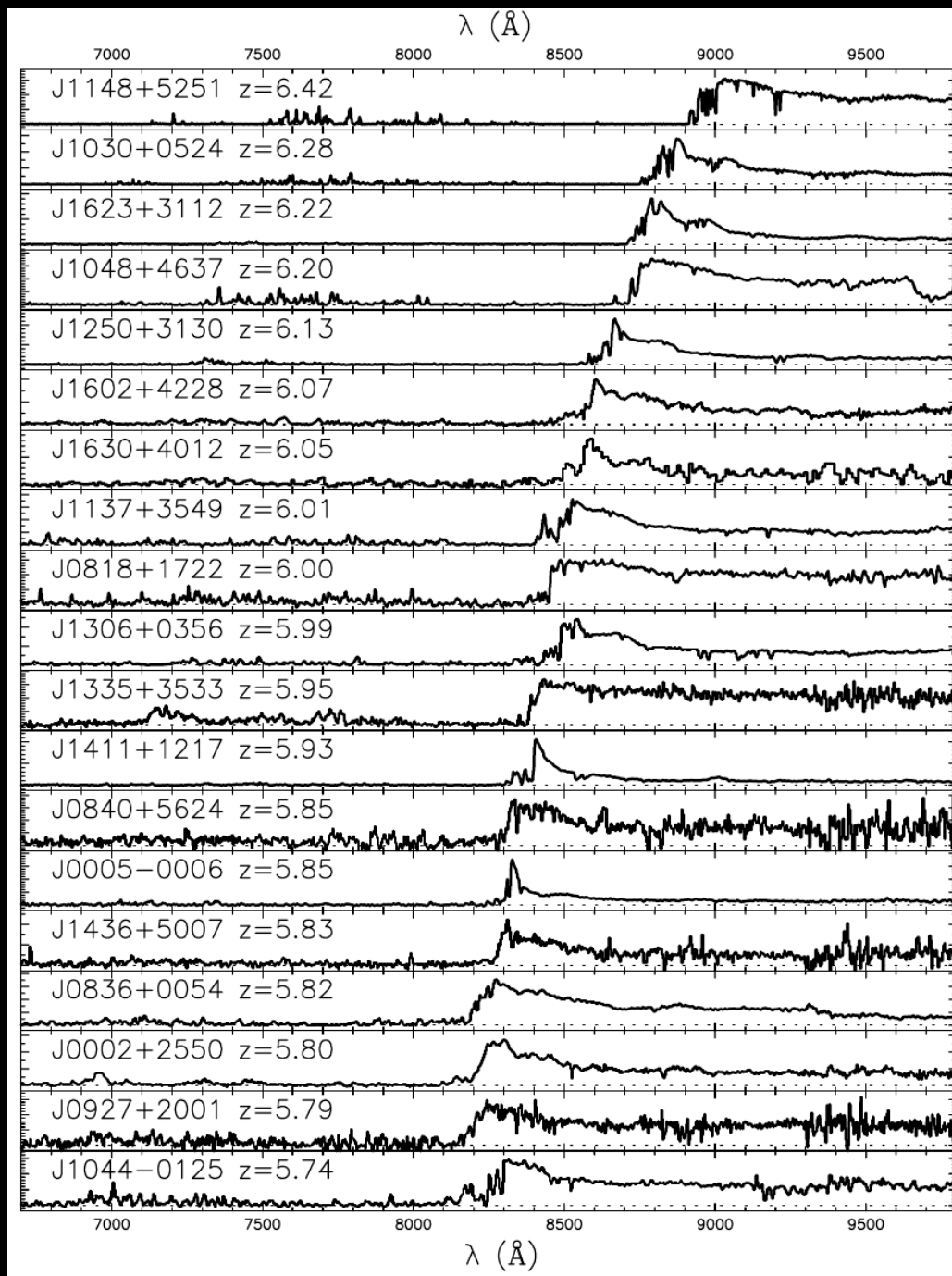
## Ly $\alpha$ forest

- Ly $\alpha$ 線 (静止波長1216Å)
- 背景連続光 (QSOなど)
- 中性水素により吸収  
→ 赤方偏移
- 視線方向にたくさんの雲  
→ Ly $\alpha$  forest
- 中性水素分布の  
視線方向分布

## Gunn-Peterson test

(Fan+ AJ, 2006)

- Ly $\alpha$  troughがあるか?
- $z \sim 6$ では既にほぼ電離
- $z > 6$ で中性水素割合増加



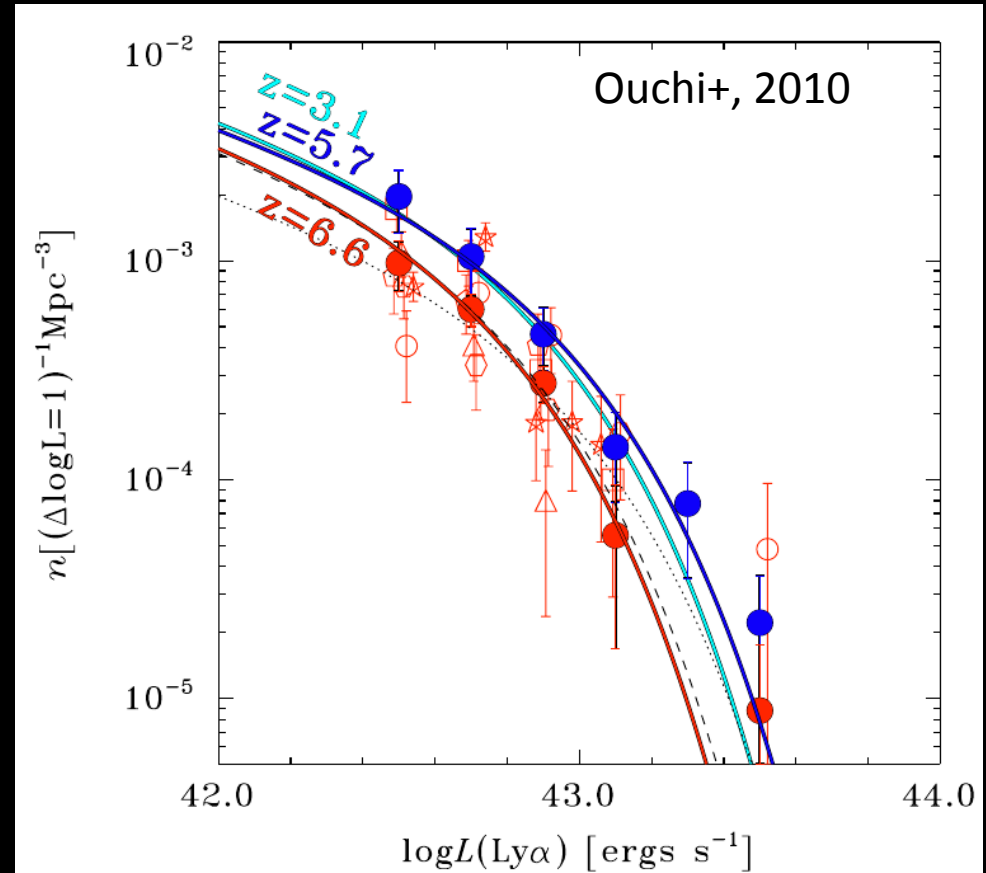


# 遠方銀河観測

## Ly $\alpha$ lines in galaxies

HIの割合が大きくなると観測数が減ることからHIを制限する望遠鏡の貢献

- $z=6.6$  (Ouchi+, 2010)
- $z=7.0$  (Ota+, 2008)
- $z=7.2$  (Ono+, 2012)



# 遠方銀河観測

## Ly $\alpha$ lines in galaxies

HIの割合が大きくなると観測数が減ることからHIを制限

すばる望遠鏡の貢献

- z=6.6 (Ouchi+, 2010)
- z=7.0 (Ota+, 2008)
- z=7.2 (Ono+, 2012)

## Ly $\alpha$ damping wing

damping wingでの吸収具合からHIの量を見積もる

- GRB (z=6.3; Totani+, 2006)
- QSO (z=6.4; Schroeder, 2012)



$$Q_{\text{HII}} \gtrsim 0.5$$

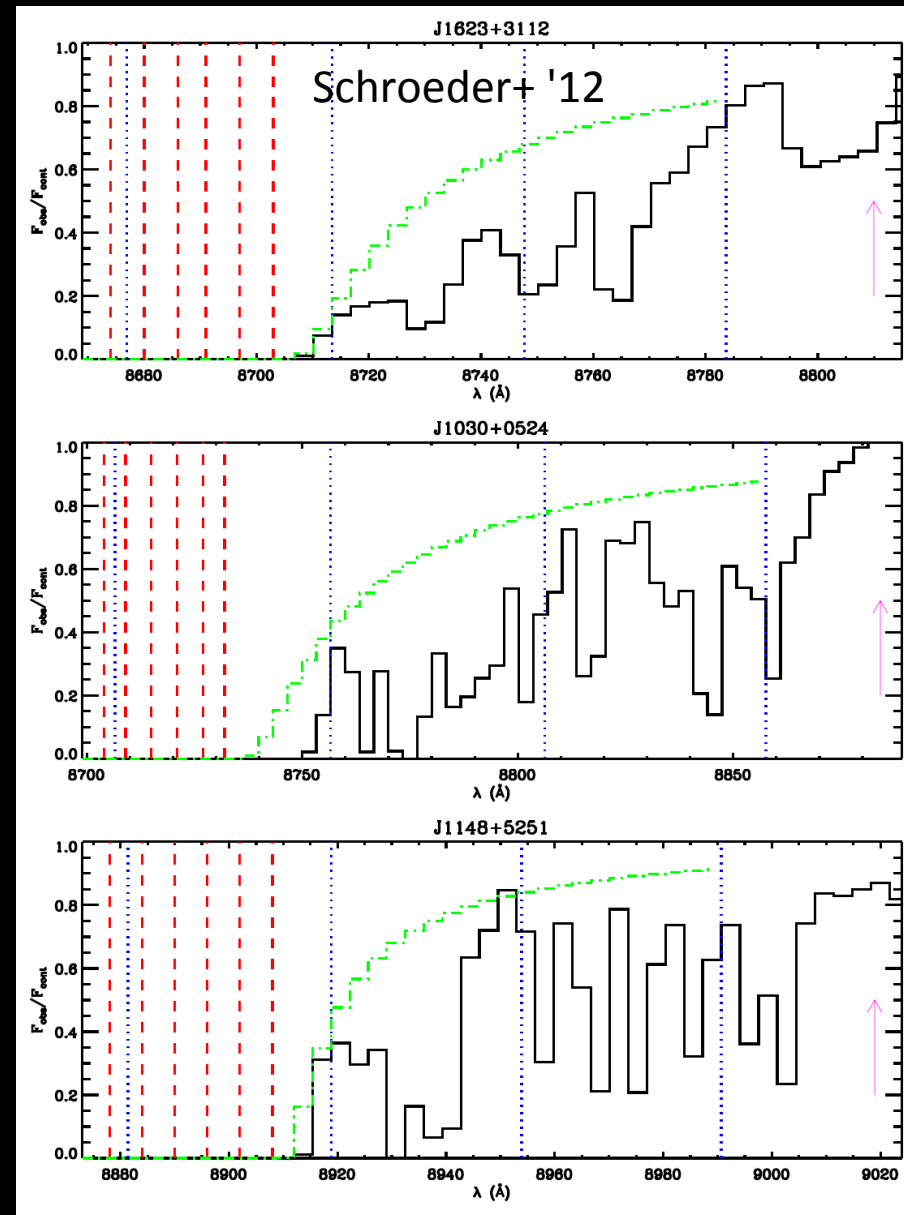


図: SDSS QSOの連続光規格化スペクトル。緑色Damping wingによる寄与(見積り)。赤い線は仮定したバブルのサイズ。

# 遠方銀河観測

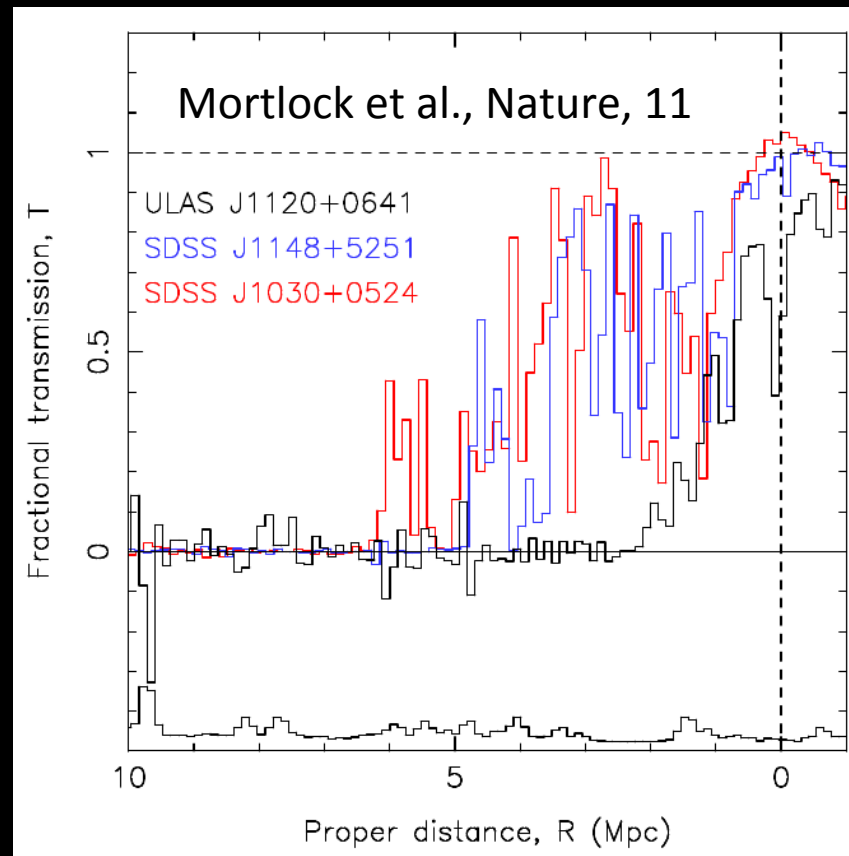
## QSO Near Zones ( $z=7.1$ )

誕生したQSOはバブルを作る  
バブルのサイズはHIの量に依存

$$V \propto (1 - Q_{\text{HII}})^{-1}$$



$$Q_{\text{HII}} \lesssim 0.1$$



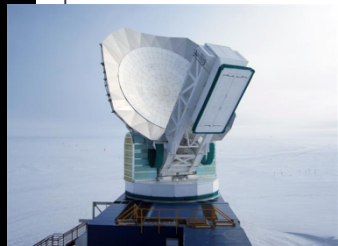
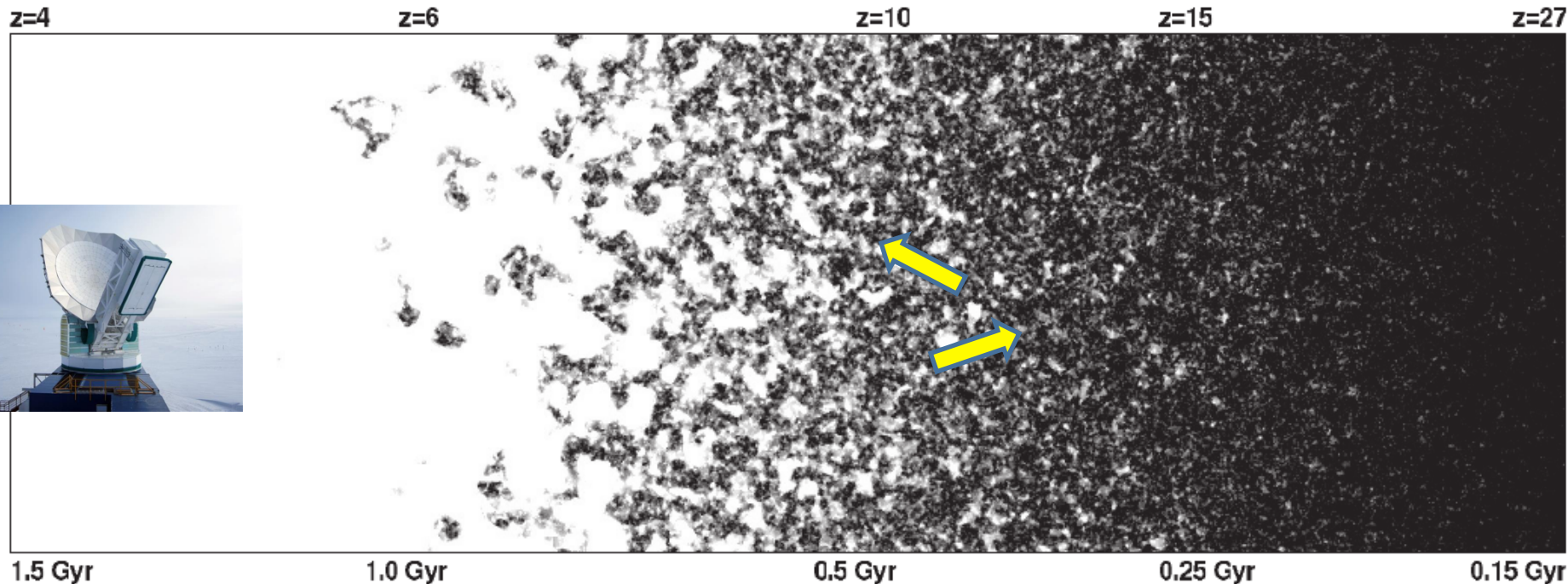
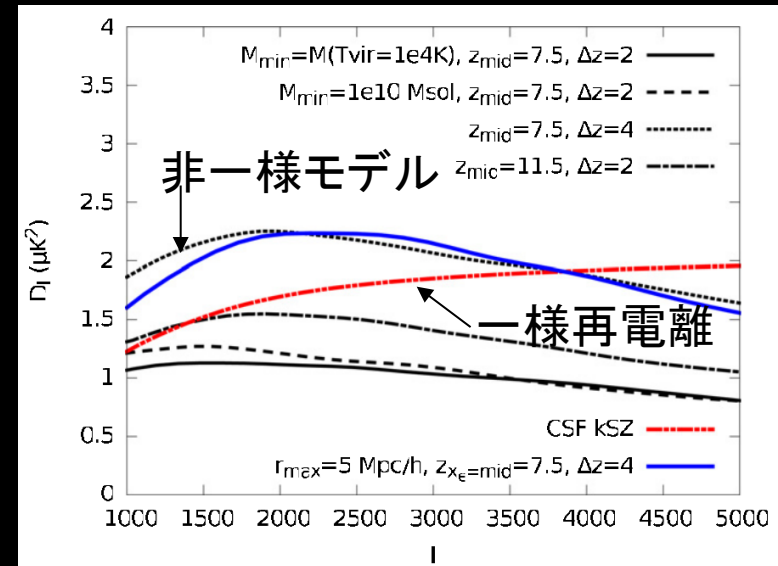
遠方のQSO ( $z=7.1$ ; ULAS) と近傍のQSO ( $z=6.42, 6.31$ ; SDSS) スペクトルの比較。

# CMB観測

(Zahn +, ApJ, 2012)

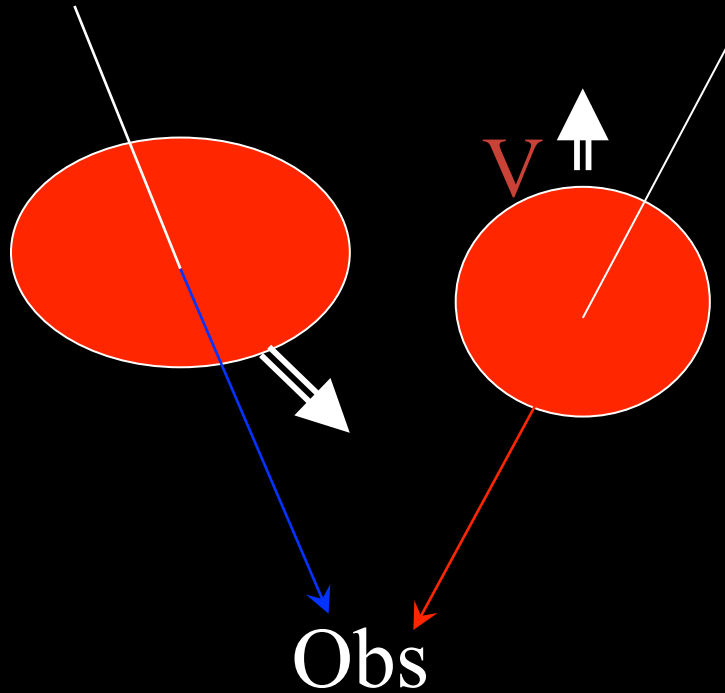
## kinematic SZ effect

- ・イオン化バブル中の電子による  
コンプトン散乱
- ・イオン化の揺らぎとバブルの  
運動に感度



# Kinetic Sunyaev-Zeldovich Effect

= Doppler Effect from Ionized Bubbles



$V \sim 100 \text{ km/s}$ : even if  $ln_e \sigma_T \sim 10^{-3}$

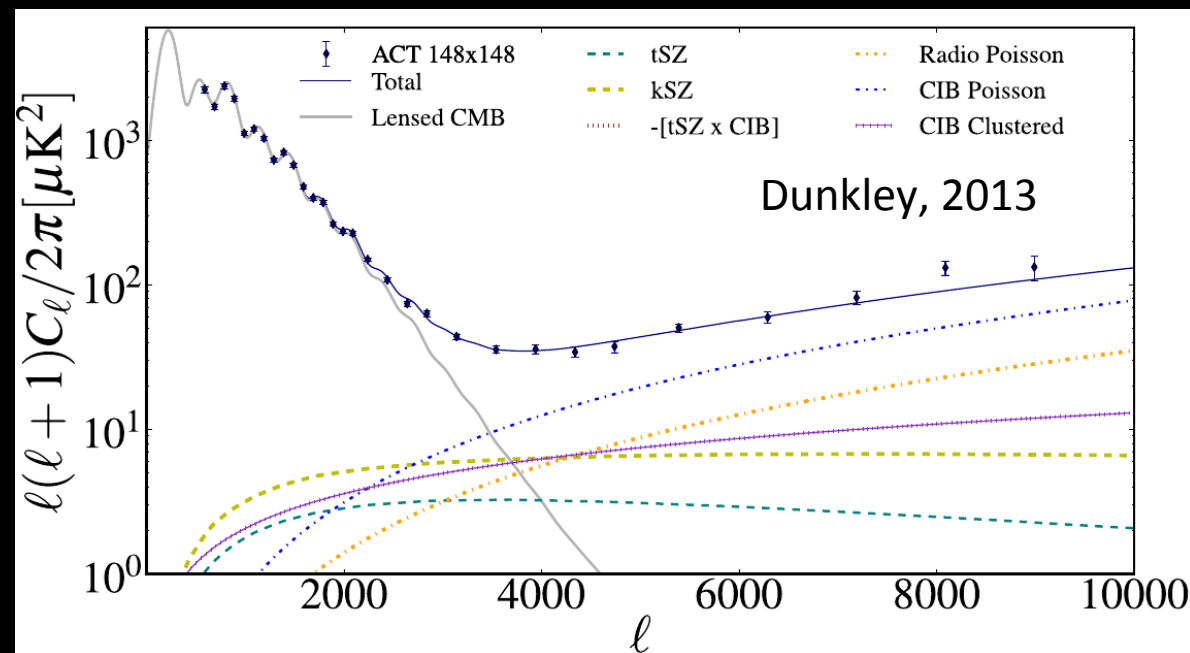
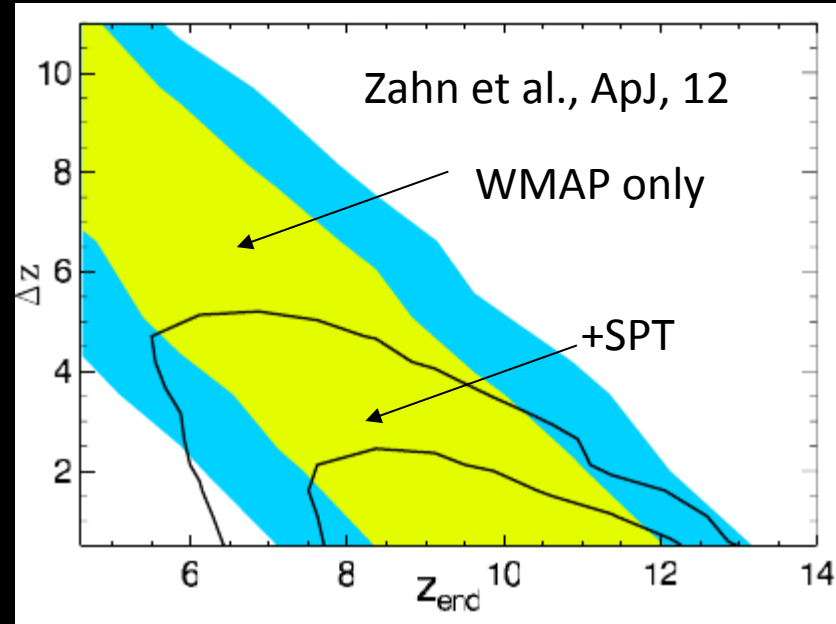
$\Rightarrow \Delta T/T \approx 10^{-5} - 10^{-6}$

**Observable!**

# CMB観測

## kinematic SZ effect

- ・イオン化バブル中の電子によるコンプトン散乱
- ・イオン化の揺らぎとバブルの運動に感度

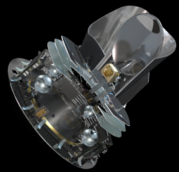
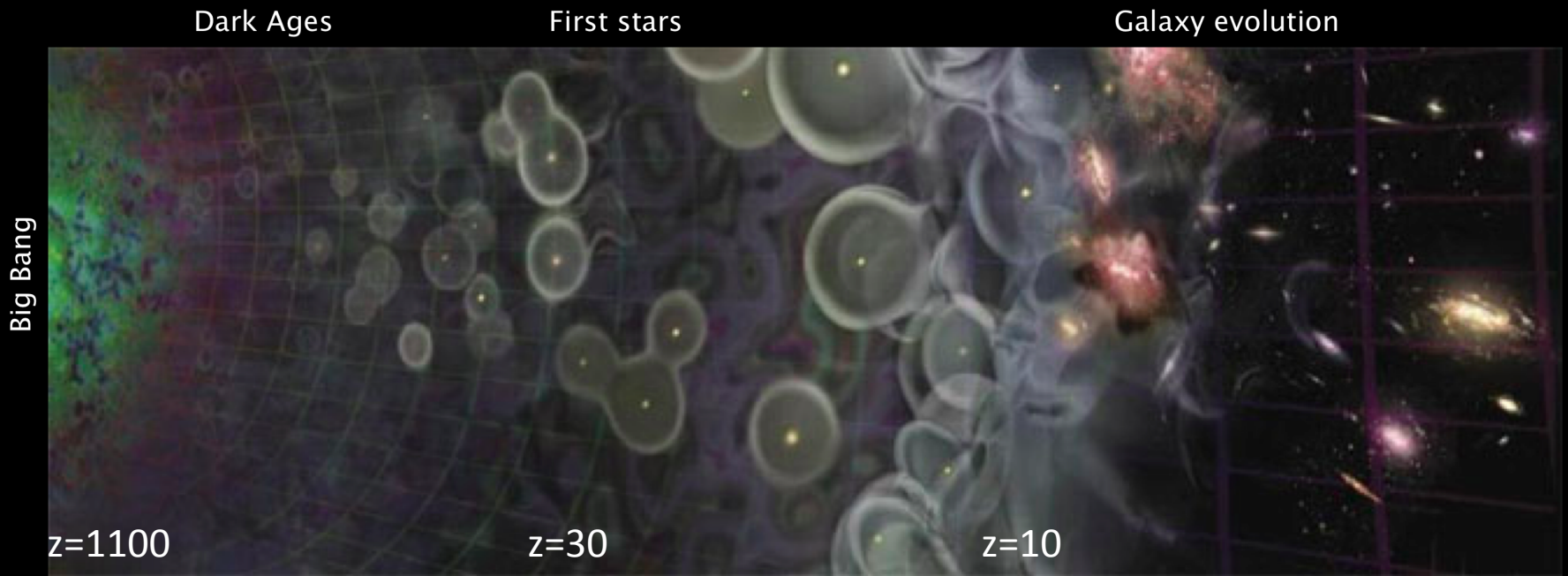


SPT, ACTなどから再イオン化にかかっている期間に制限

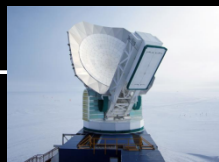
$$\Delta z \lesssim 7.9 (95\%)$$

不確定性: tSZ x CIB correlation

# 現状



Planck



ACT  
SPT



すばる



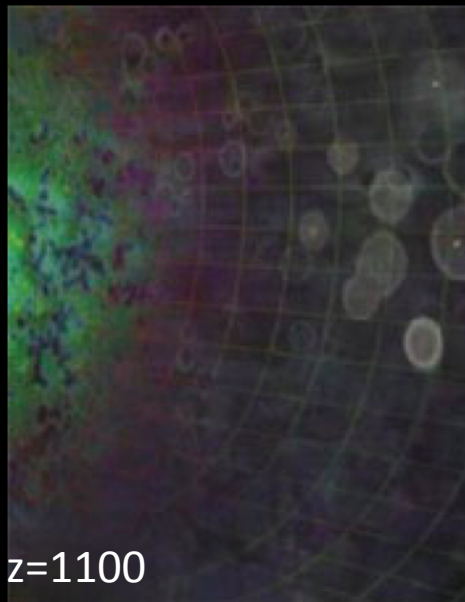
SDSS



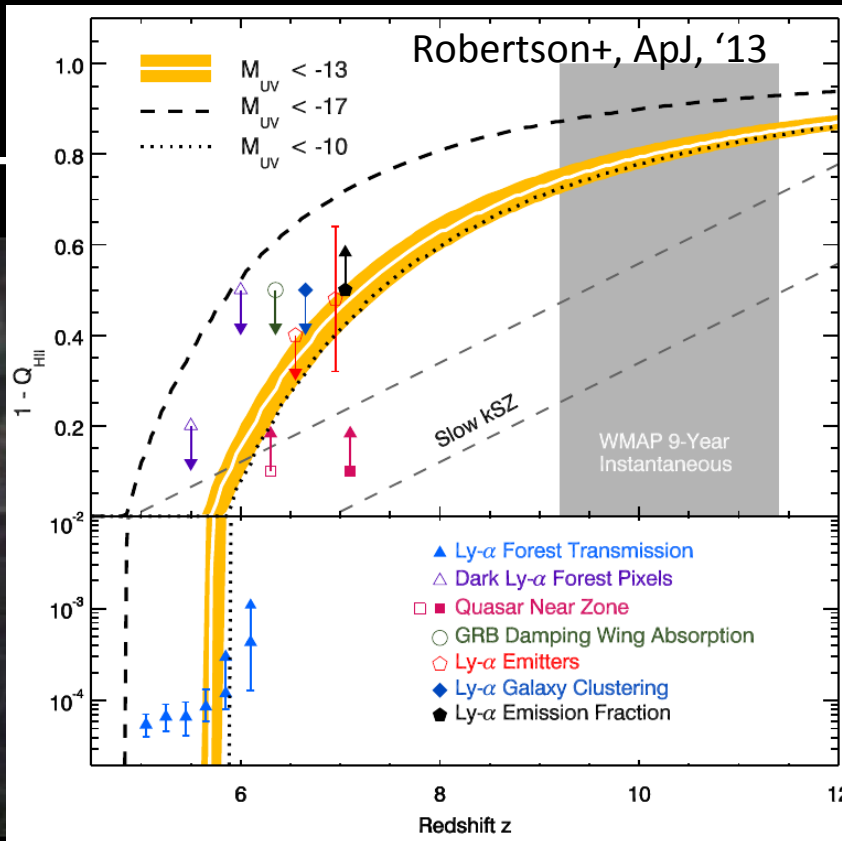
# 現状

Big Bang

Dark Ages



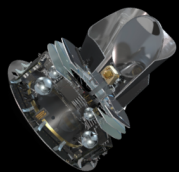
z=1100



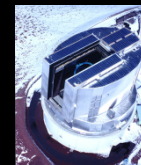
evolution



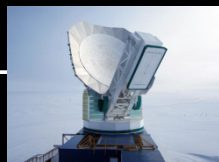
Galaxies (z < 7)



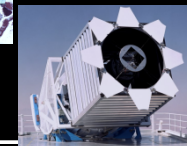
Planck



すばる



ACT  
SPT



SDSS



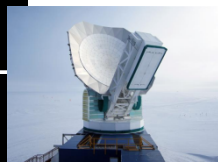
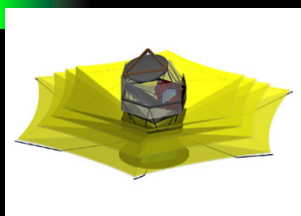
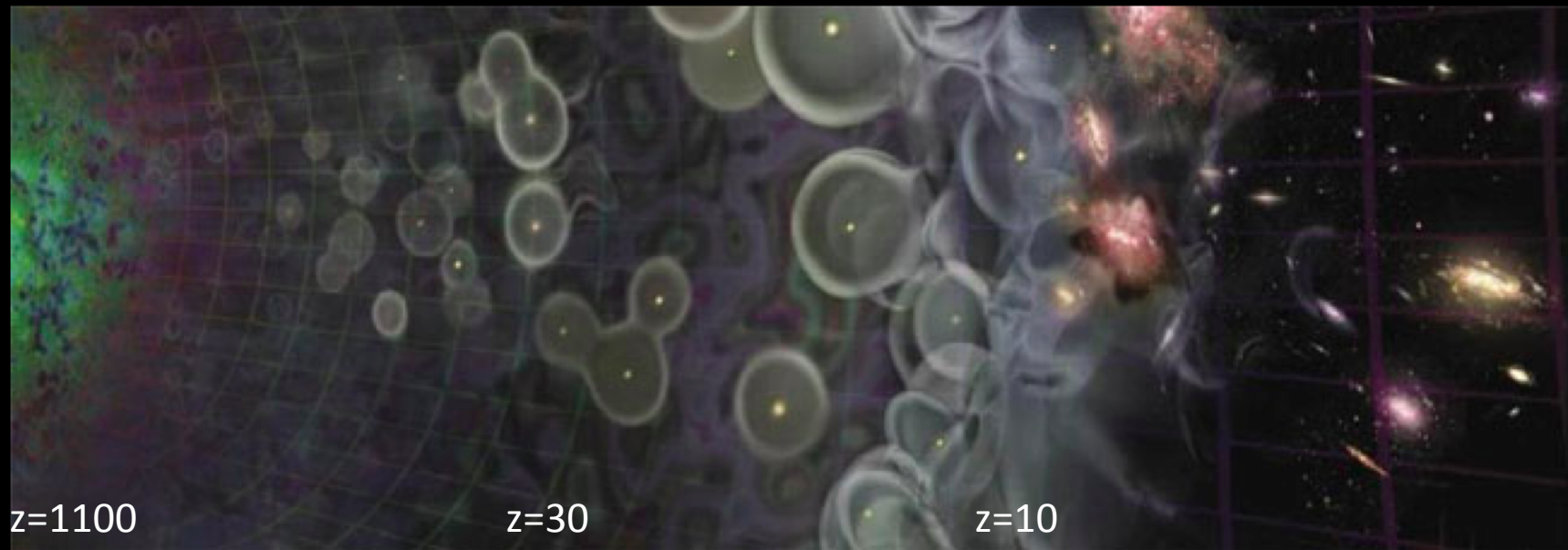
# 将来

Dark Ages

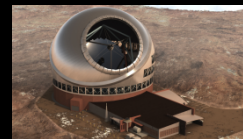
First stars

Galaxy evolution

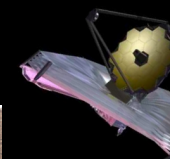
Big Bang



CMBpol  
ACTpol  
SPTpol



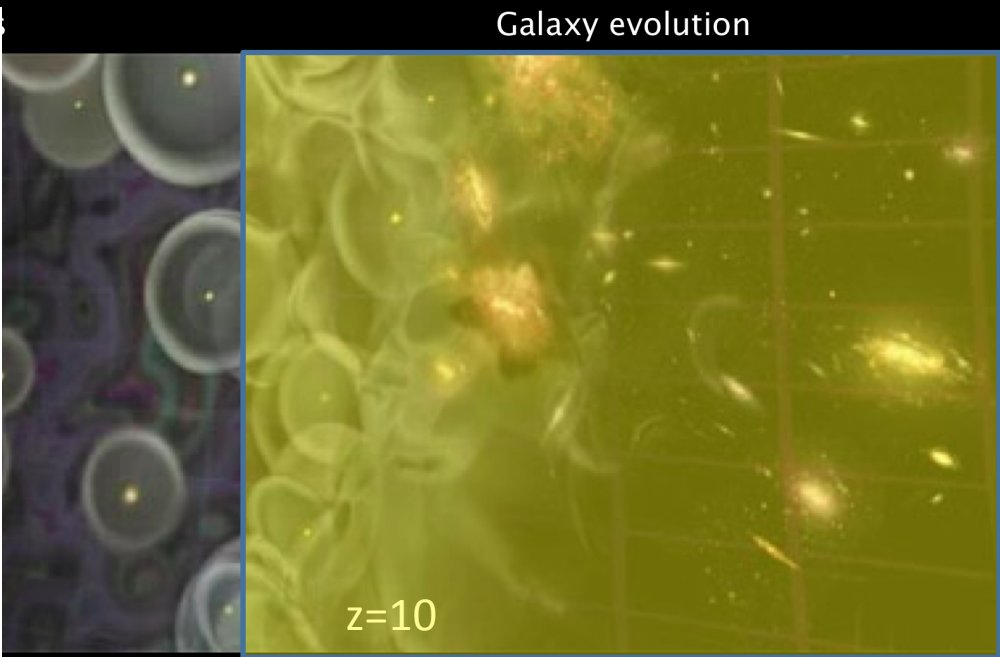
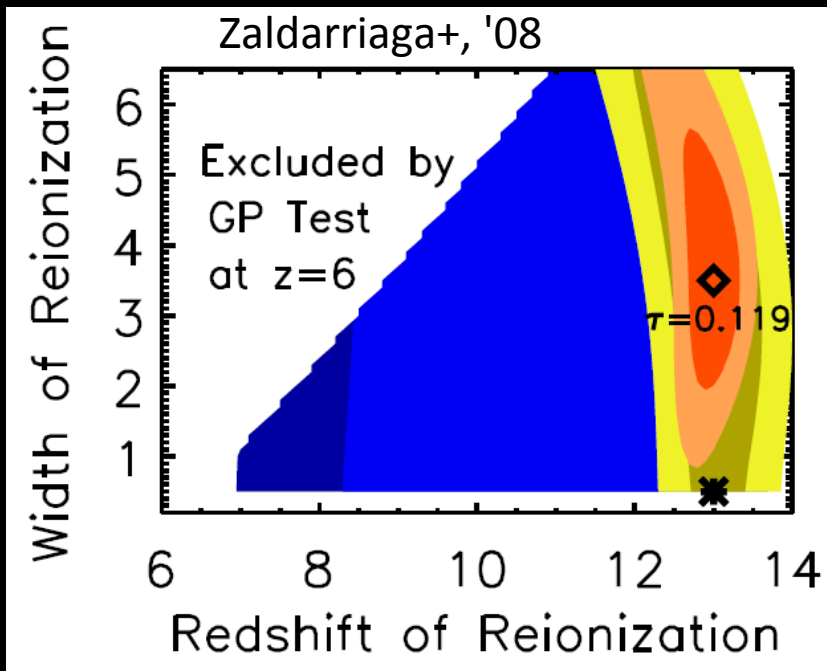
TMT



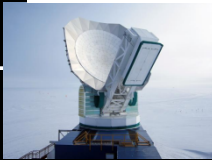
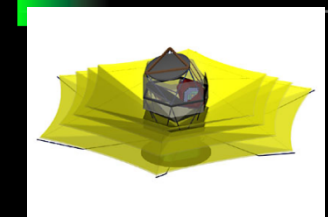
JWST

# 将来

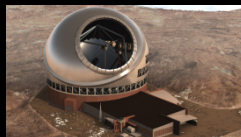
CMB偏光観測では将来的にも $\Delta z=0$ が  
ようやく排除できる程度



First starts ( $z < 20$ ; TMT & JWST)



CMBpol  
ACTpol  
SPTpol

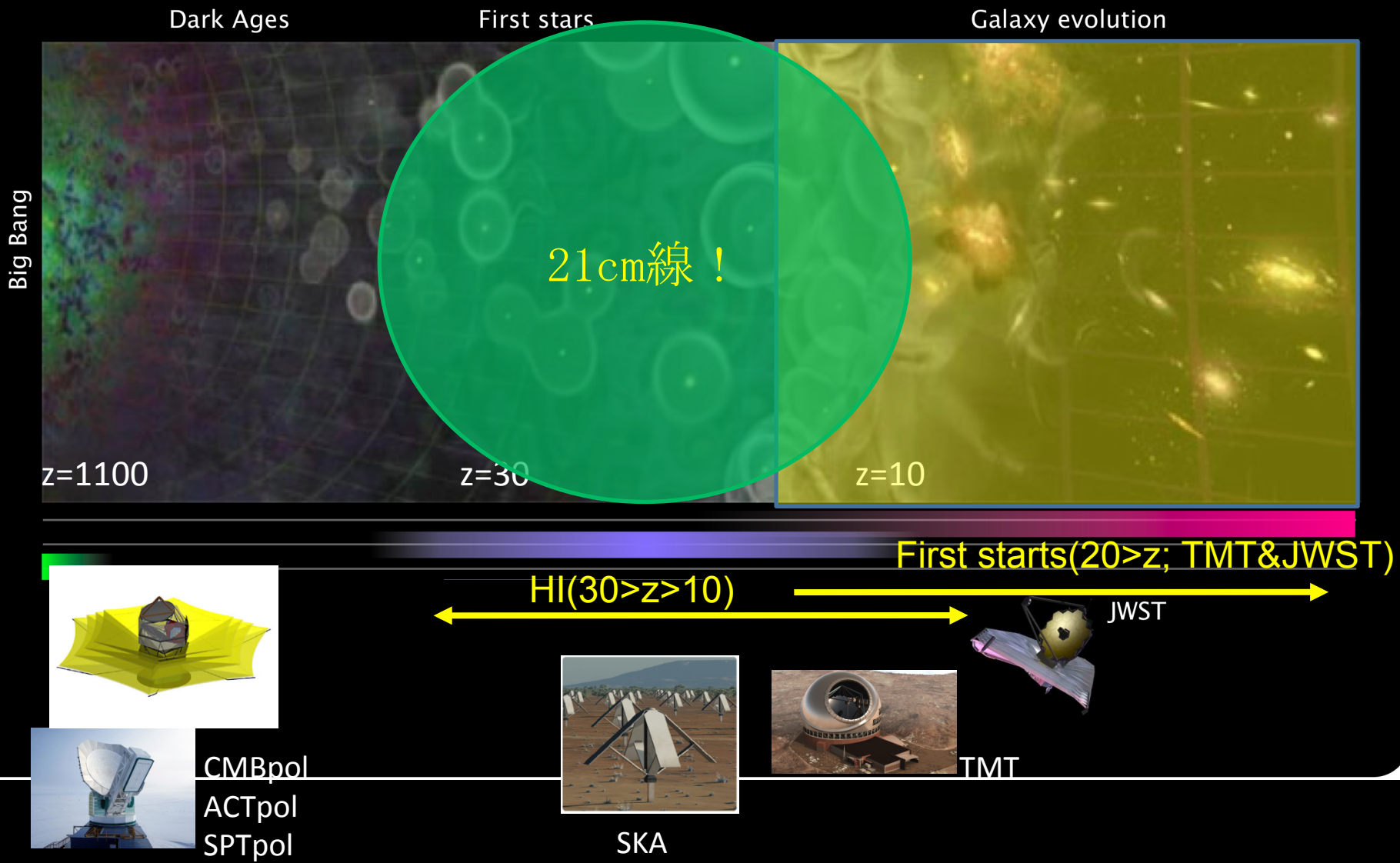


TMT



JWST

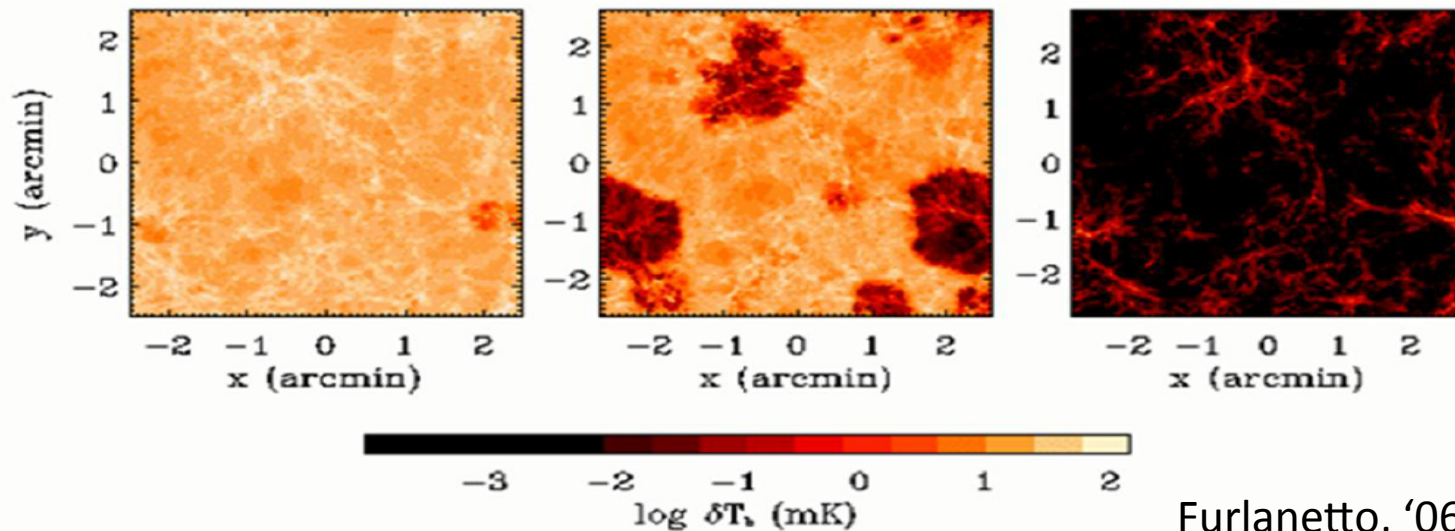
# 将来





# 将来

Big Bang



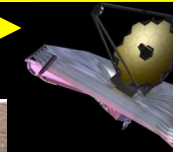
Furlanetto, '06

Figure 2-2. The brightness temperature of the (redshifted) 21 cm transition at several redshifts, as predicted by the “late reionization” simulation analyzed in Furlanetto et al. (2004). Each panel corresponds to the same slice of the simulation box (with width  $10h^{-1}$  comoving Mpc and depth  $\Delta\nu = 0.1$  MHz), at  $z = 12.1$ ,  $9.2$ , and  $7.6$ , from left to right. The three epochs shown correspond to the early, middle, and late stages of reionization in this simulation.

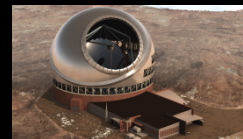
First starts ( $20 > z$ ; TMT & JWST)

HI ( $30 > z > 10$ )

JWST



TMT

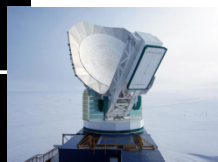


SKA

CMBpol

ACTpol

SPTpol



TMT → バブル中の天体をねらう  
SKA → バブル外のガスをねらう

# 再イオン化から何がわかるか？

天体物理

宇宙論

新しい物理

# 再イオン化から何がわかるか？

## 天体物理

- ・ 初代天体：星形成率、初期質量関数、Pop III
- ・ 初代ブラックホール：質量、降着率
- ・ ガス：分布、速度、温度、電離度

## 宇宙論

## 新しい物理

# 再イオン化から何がわかるか？

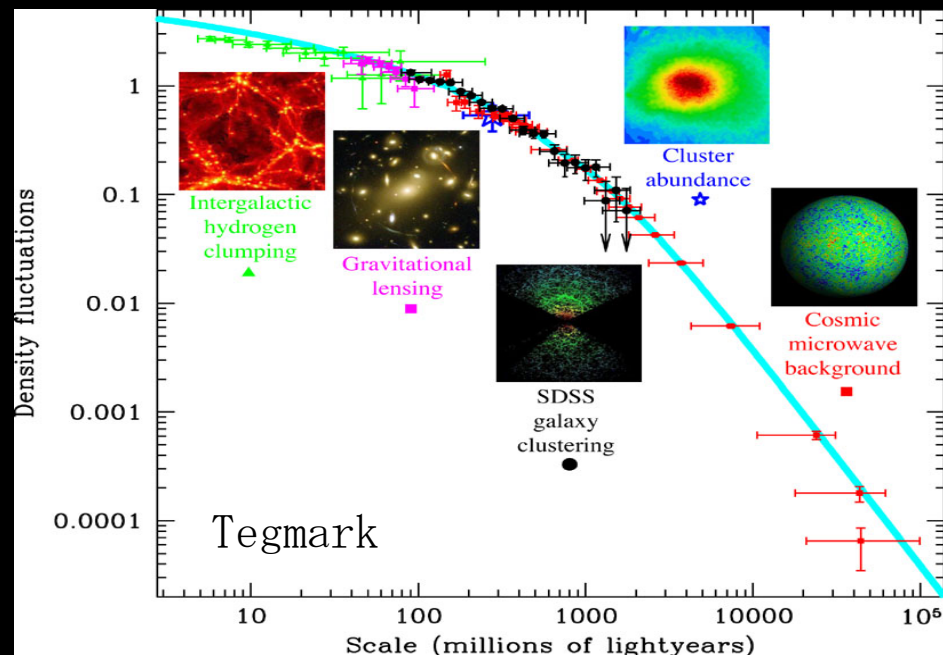
## 天体物理

- ・ 初代天体：星形成率、初期質量関数、Pop III
- ・ 初代ブラックホール：質量、降着率
- ・ ガス：分布、速度、温度、電離度

## 宇宙論

- ・ 小スケールゆらぎ、非ガウス性
- ・ 早期暗黒エネルギー
- ・ ニュートリノ質量
- ・ 原始磁場

## 新しい物理



# 再イオン化から何がわかるか？

## 天体物理

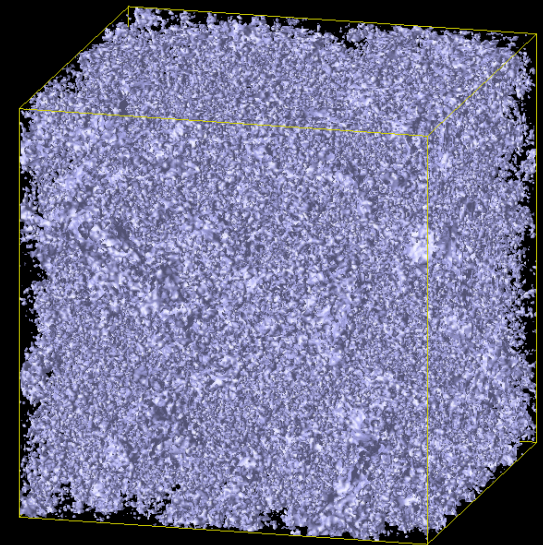
- ・ 初代天体：星形成率、初期質量関数、Pop III
- ・ 初代ブラックホール：質量、降着率
- ・ ガス：分布、速度、温度、電離度

## 宇宙論

- ・ 小スケールゆらぎ、非ガウス性
- ・ 早期暗黒エネルギー
- ・ ニュートリノ質量
- ・ 原始磁場

## 新しい物理

- ・ 暗黒物質の崩壊
- ・ 原始ブラックホールの蒸発
- ・ 宇宙ひも
- ・ 物理定数の時間変化

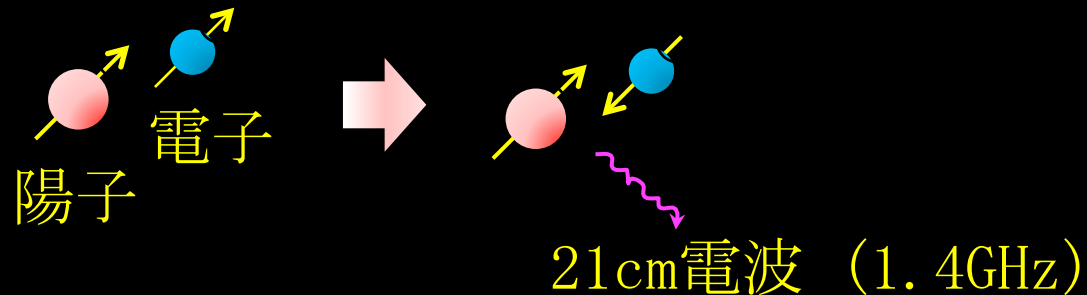




## 2、再イオン化の物理

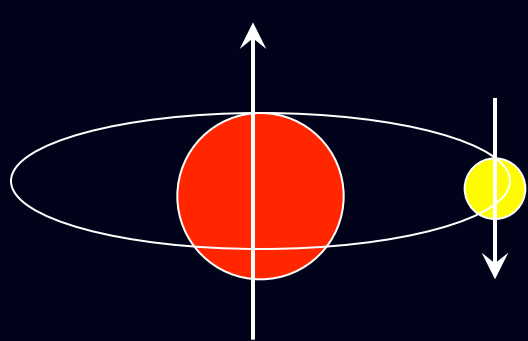
# 21cm線

水素原子の超微細構造



重要な周波数

|                  |          |                     |
|------------------|----------|---------------------|
| 70MHz (SKA)      | $z = 19$ | $t = 200\text{Myr}$ |
| 50MHz (SKA goal) | $z = 27$ | $t = 120\text{Myr}$ |
| 30MHz (LOFAR)    | $z = 45$ | $t = 56\text{Myr}$  |

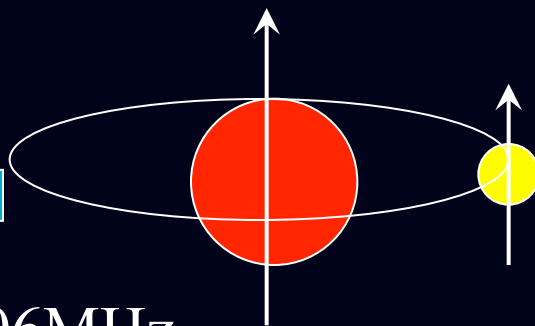


$n=1$ , singlet

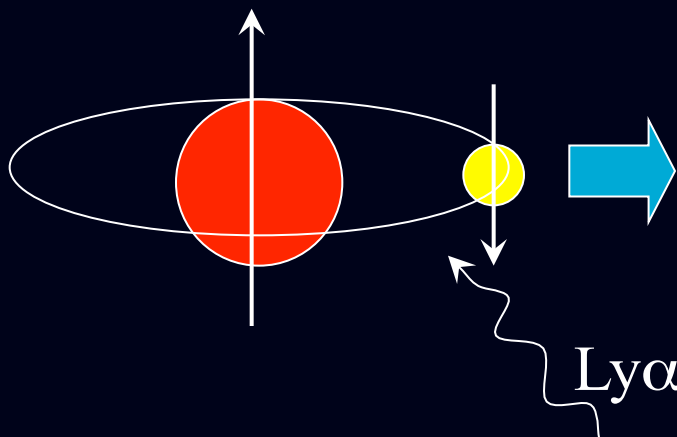


1,420.406MHz

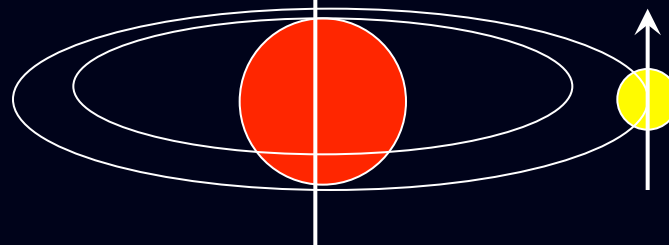
21.11cm



$n=1$ , triplet



$n=1$ , singlet

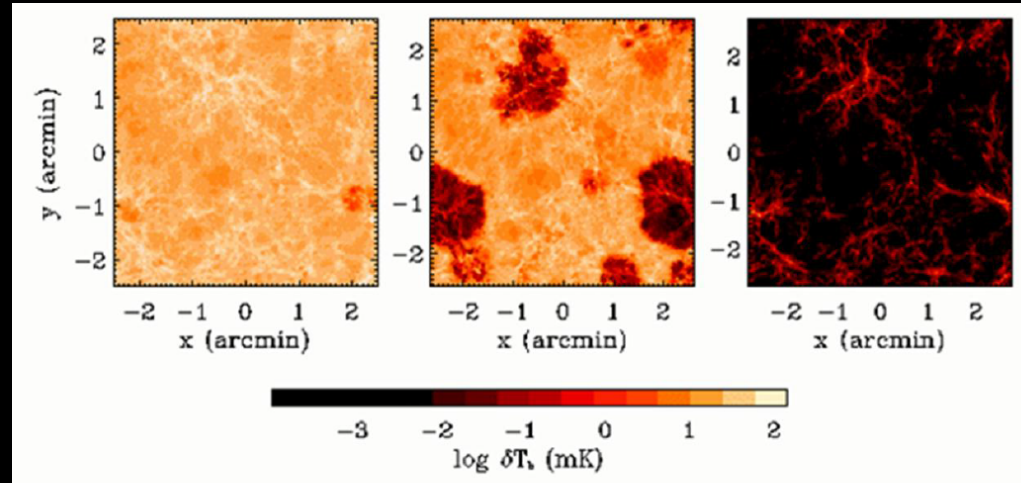


$n=2$ , triplet

# 21cm線の観測

## スピン温度

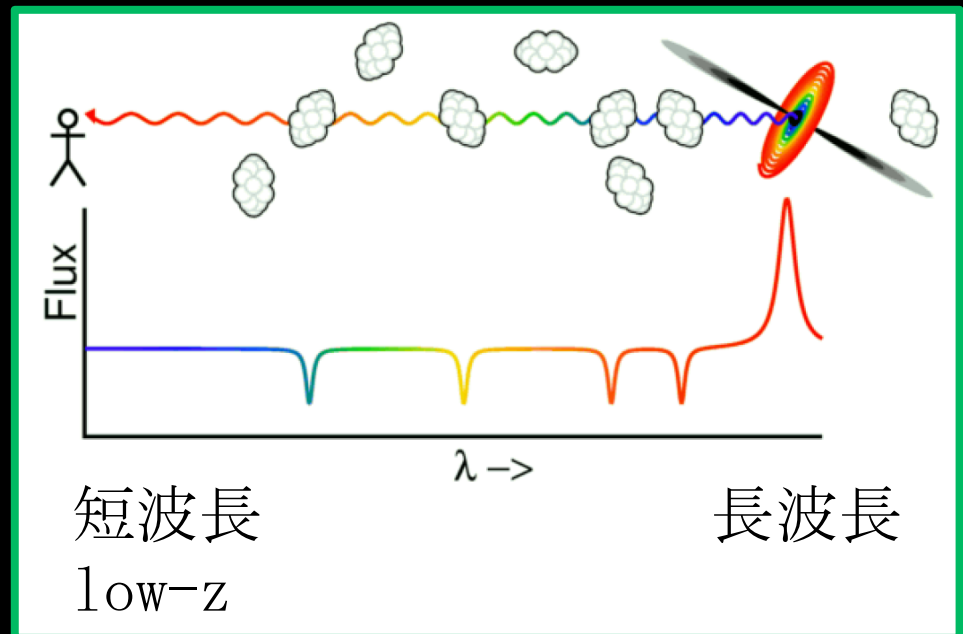
$$\frac{n_{\uparrow\uparrow}}{n_{\uparrow\downarrow}} = 3 \exp \left[ - \frac{h\nu_{21\text{cm}}}{kT_{\text{spin}}} \right]$$



## 観測方法

- CMBに対する放射吸収  
( $T_{\text{spin}}$ ,  $T_{\gamma}$ の大小による)
- 背景光源に対する吸収線

$$\tau_{21\text{cm}} \approx 0.01 x_{\text{HI}} \left( \frac{1+z}{10} \right)^{1/2} \frac{T_{\gamma}}{T_S}$$



# スピン温度

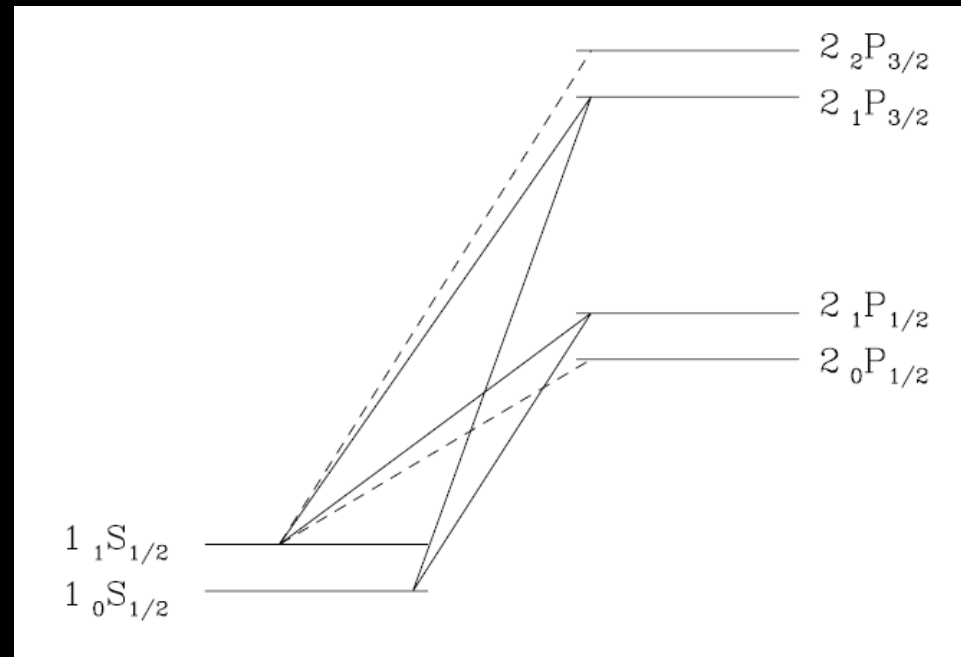
スピン温度の決まり方

- CMBとの相互作用 ( $T_\gamma$ )
- 原子の衝突 ( $T_K, x_c$ )
- Ly  $\alpha$  との相互作用 ( $T_c \sim T_K, x_\alpha$ )

$$T_S^{-1} = \frac{T_\gamma^{-1} + x_c T_K^{-1} + x_\alpha T_c^{-1}}{1 + x_c + x_\alpha}$$

Wouthuysen-Field effect

- Ly  $\alpha$  で励起された後  
スピン励起状態に落ちる
- Ly  $\alpha$  の量 ( $T_c$ ) で効率が  
決まる



# スピン温度の進化

初期宇宙：熱平衡

$z \sim 150$

CMBとバリオンが脱結合  
原子衝突が頻繁

$z \sim 70$

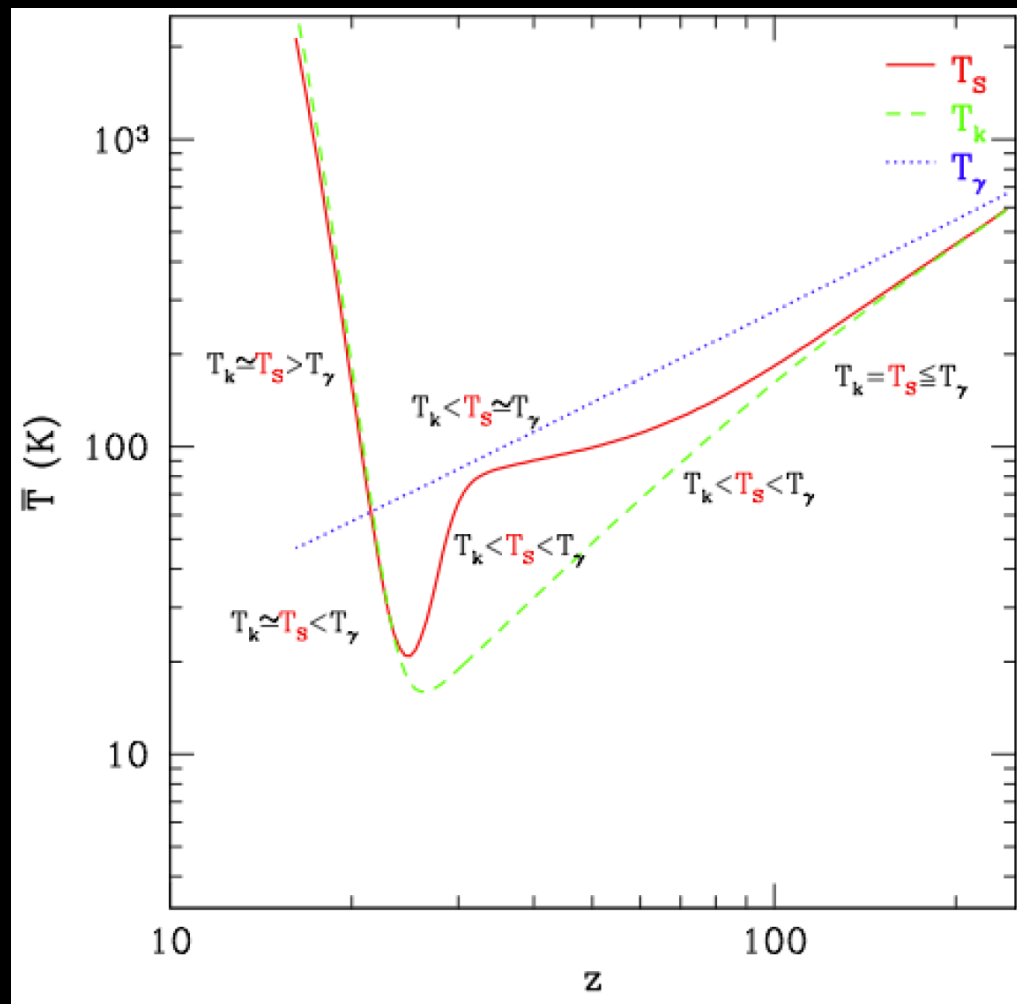
ガス密度が小さく  
原子衝突が非効率

$z \sim 20$

天体からのLy  $\alpha$  により  
W-F効果が効く

$z \sim 15$

ガスが暖められCMB温度  
を超える





# スピン温度の進化

初期宇宙：熱平衡

$z \sim 150$

CMBとバリオンが脱結合  
原子衝突が頻繁

$z \sim 70$

ガス密度が小さく  
原始衝突が非効率

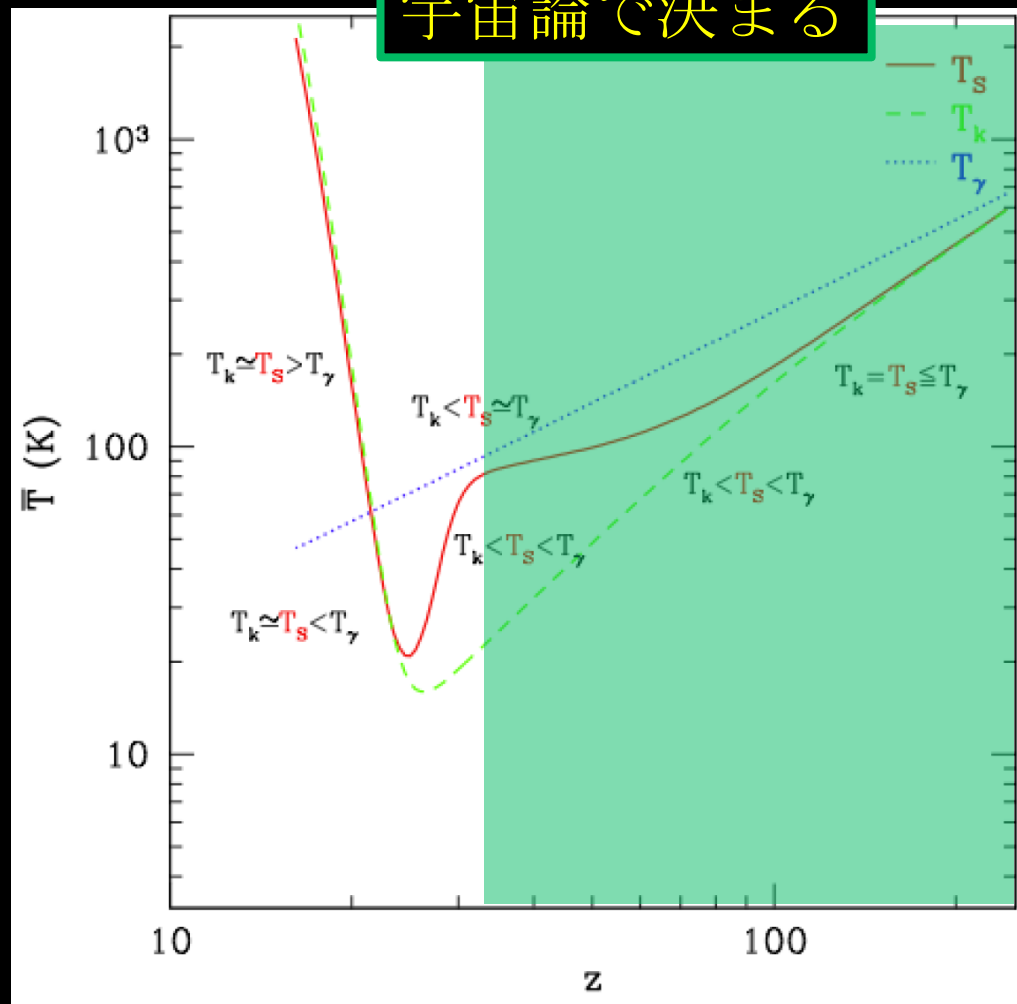
$z \sim 20$

天体からのLy  $\alpha$  により  
W-F効果が効く

$z \sim 15$

ガスが暖められCMB温度  
を超える

宇宙論で決まる



# スピン温度の進化

初期宇宙：熱平衡

$z \sim 150$

CMBとバリオンが脱結合

原子衝突が頻繁

$z \sim 70$

ガス密度が小さく

原始衝突が非効率

$z \sim 20$

天体からのLy  $\alpha$  により

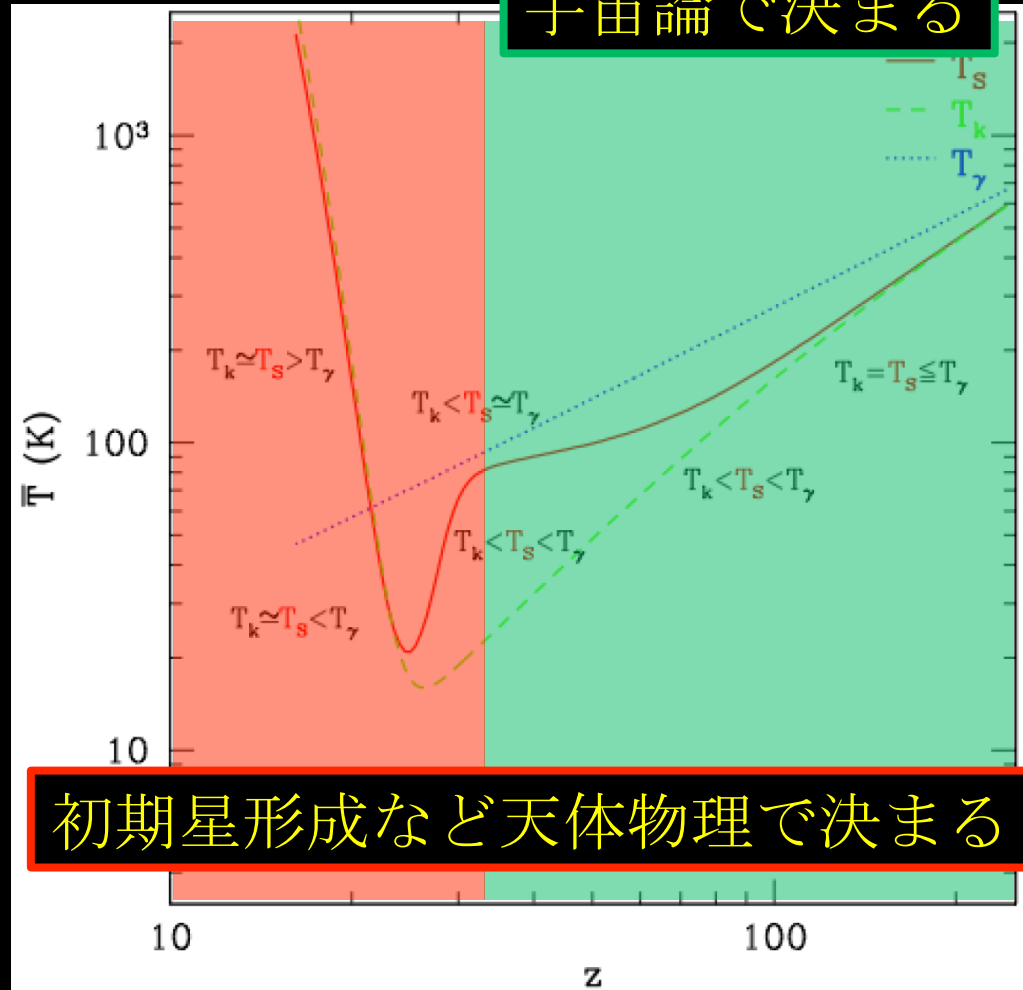
W-F効果が効く

$z \sim 15$

ガスが暖められCMB温度

を超える

宇宙論で決まる



# スピン温度の進化

初期宇宙：熱平衡

$z \sim 150$

CMBとバリオンが脱結合

原子衝突が頻繁

$z \sim 70$

ガス密度

原始衝突

$z \sim 20$

天体からのLy  $\alpha$  により

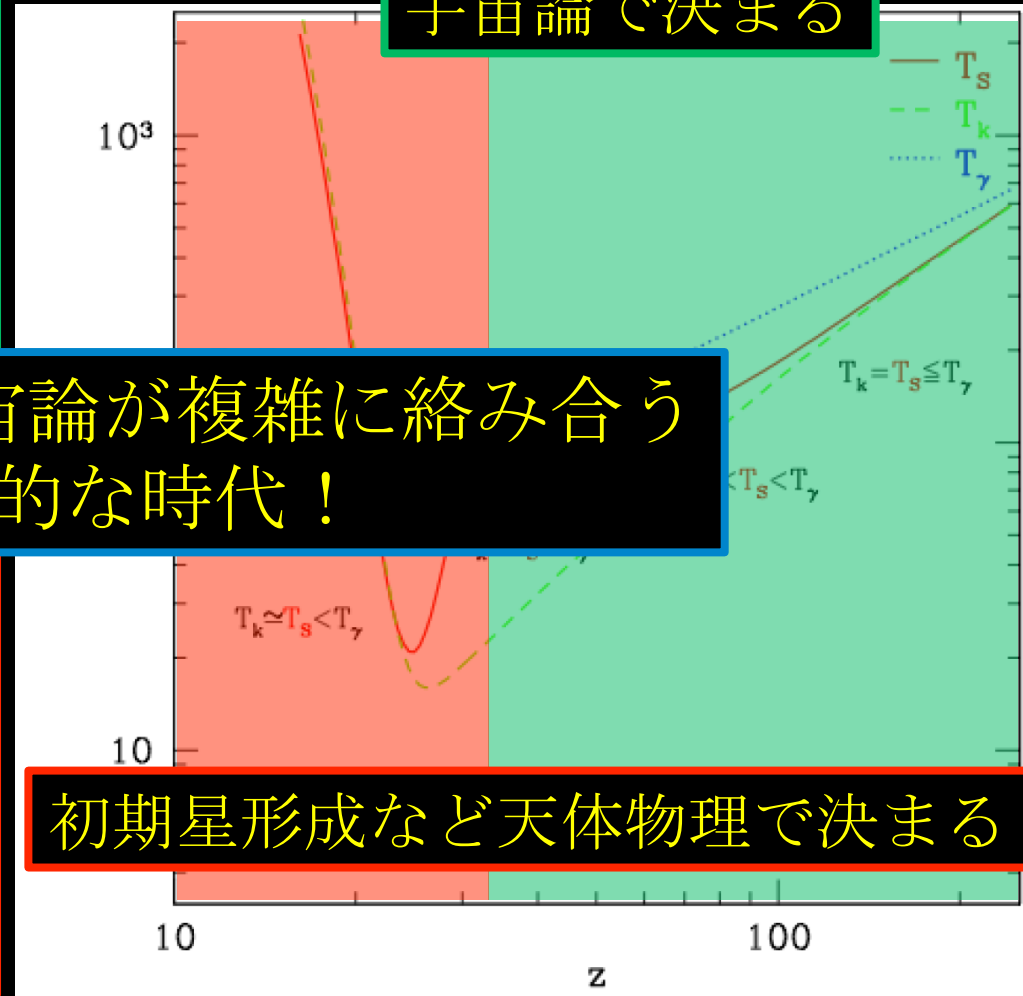
W-F効果が効く

$z \sim 15$

ガスが暖められCMB温度

を超える

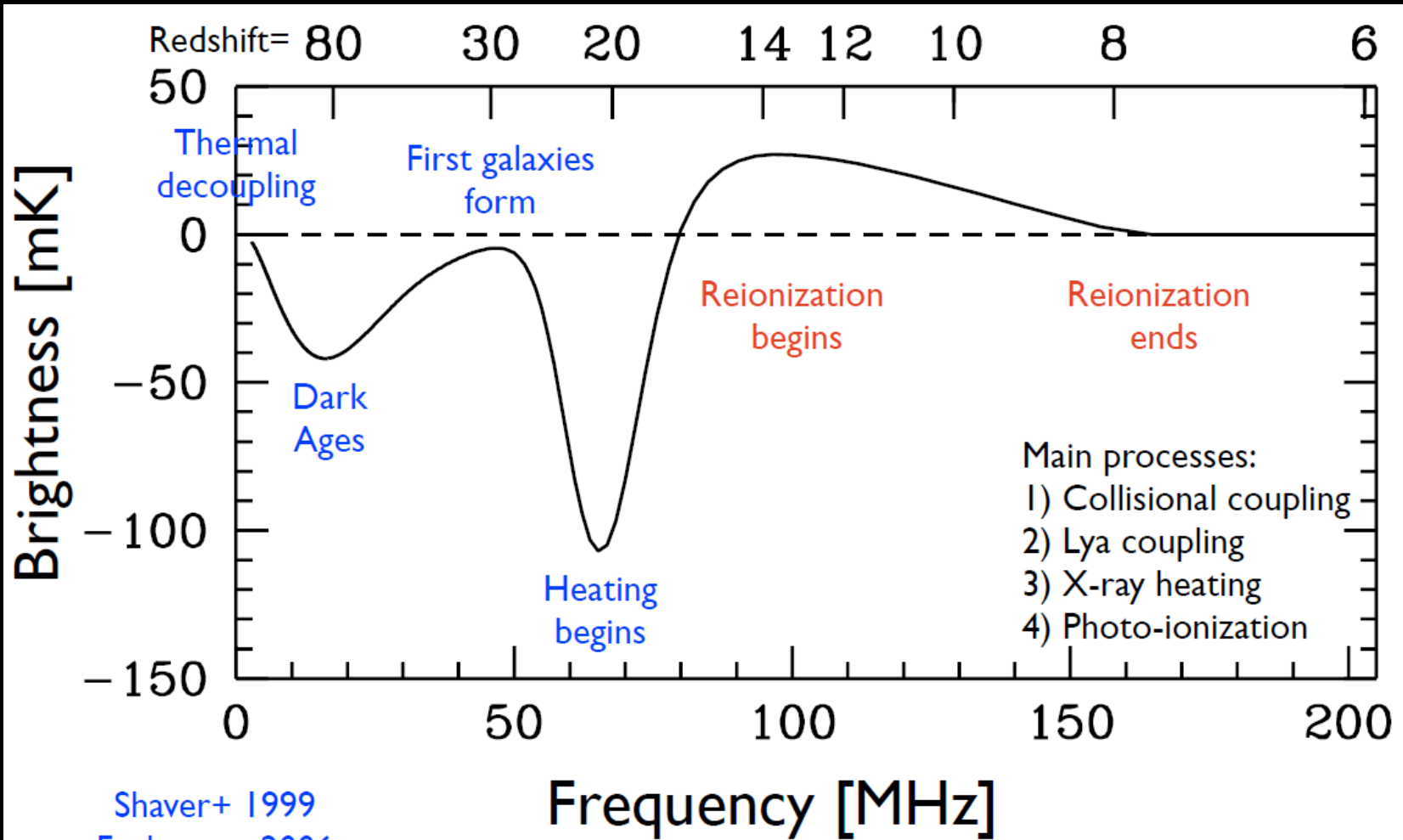
宇宙論で決まる



天体物理と宇宙論が複雑に絡み合う  
魅力的な時代！

# 輝度温度

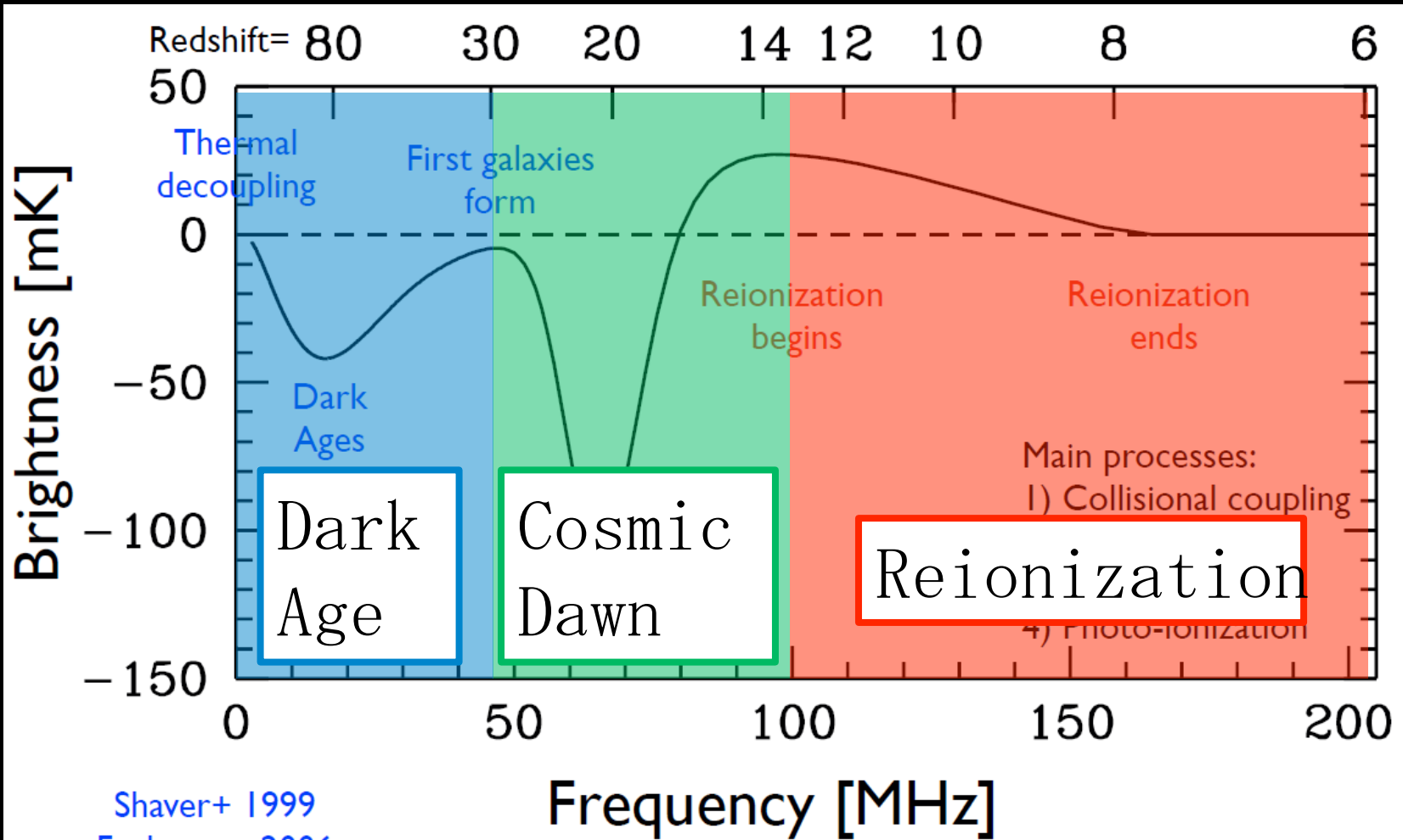
グローバルシグナル（ゆらぎなしの平均値）。  
CMBとの温度差。正なら放射、負なら吸収。



Shaver+ 1999  
Furlanetto 2006  
Pritchard & Loeb 2010

# 輝度温度

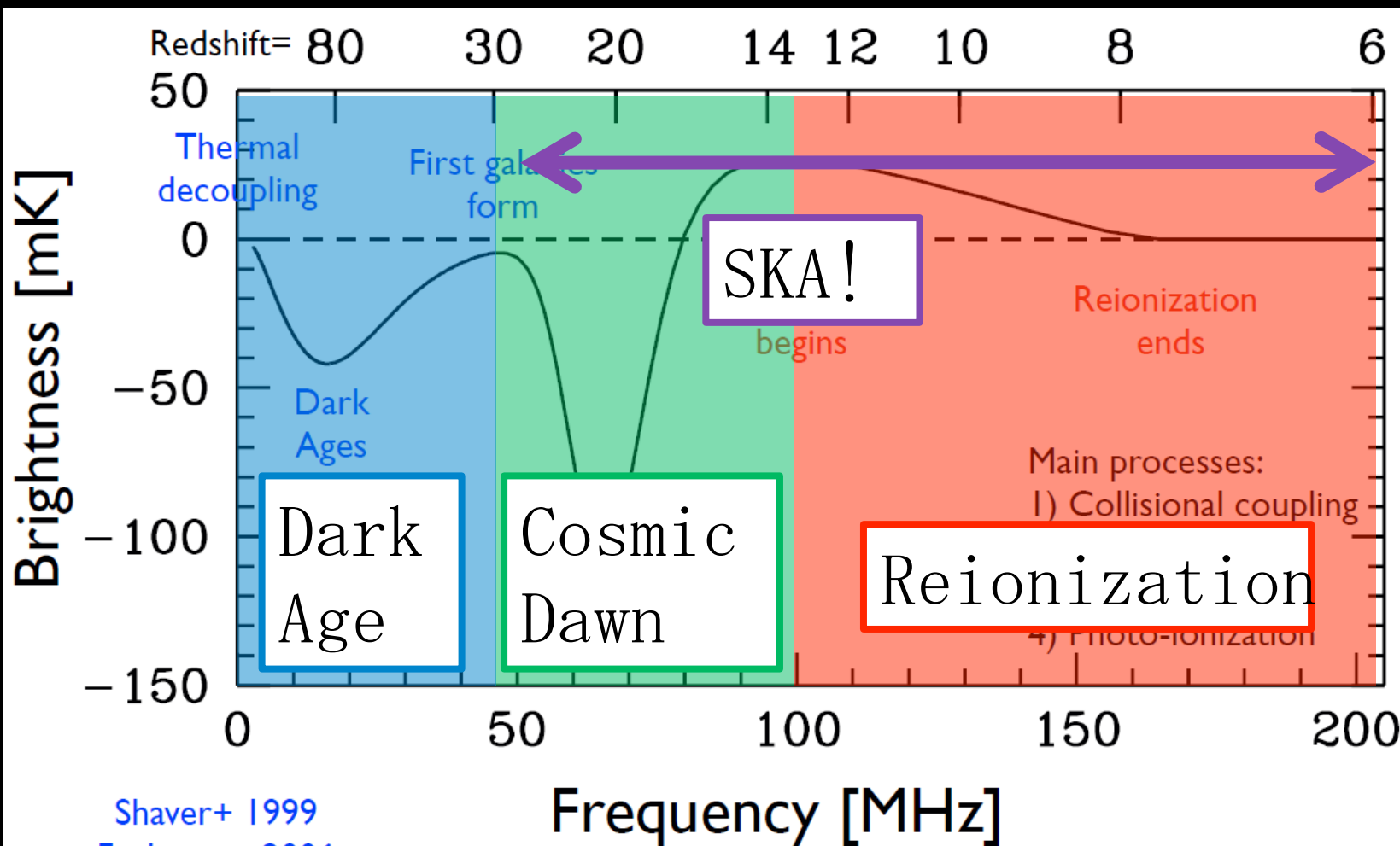
グローバルシグナル（ゆらぎなしの平均値）。  
CMBとの温度差。正なら放射、負なら吸収。



Shaver+ 1999  
Furlanetto 2006  
Pritchard & Loeb 2010

# 輝度温度

グローバルシグナル（ゆらぎなしの平均値）。  
CMBとの温度差。正なら放射、負なら吸収。

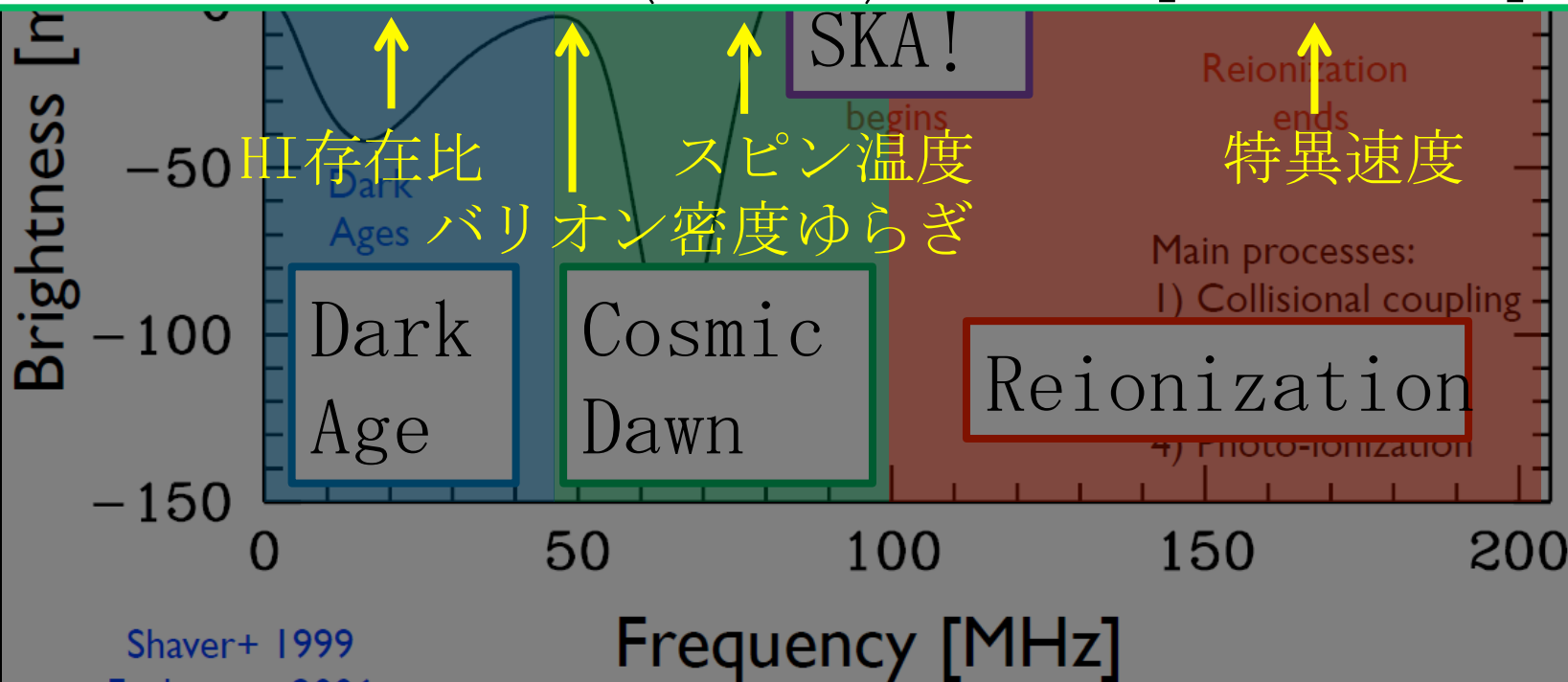


Shaver+ 1999  
Furlanetto 2006  
Pritchard & Loeb 2010

# 輝度温度

グローバルシグナル（ゆらぎなしの平均値）。  
CMBとの温度差。正なら放射、負なら吸収。

$$\delta T_b = 27 [\text{mK}] x_{\text{HI}} (1 + \delta_b) \left( \frac{T_S - T_\gamma}{T_S} \right) \left( \frac{1+z}{10} \right)^{1/2} \left[ \frac{\partial_r v_r}{(1+z)H(z)} \right]^{-1}$$



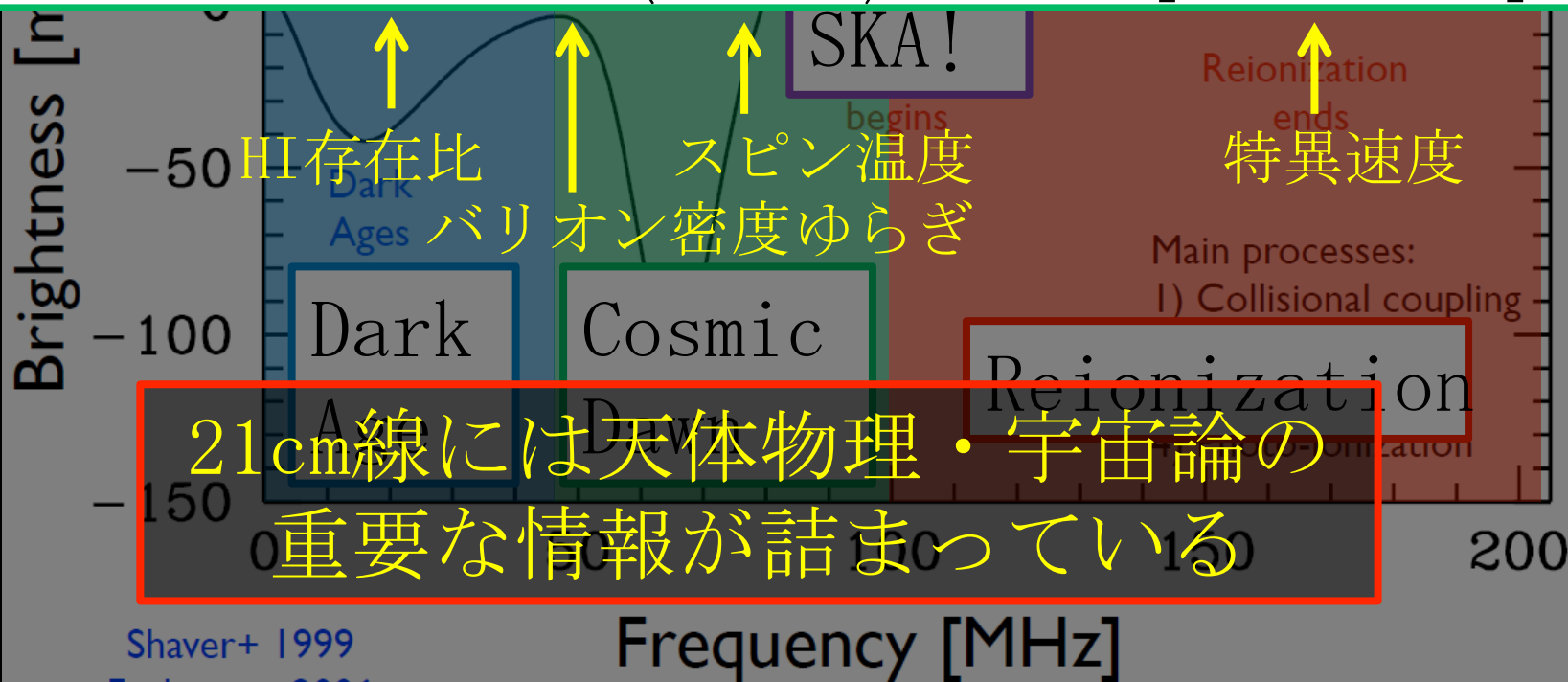
Shaver+ 1999  
Furlanetto 2006  
Pritchard & Loeb 2010



# 輝度温度

グローバルシグナル（ゆらぎなしの平均値）。  
CMBとの温度差。正なら放射、負なら吸収。

$$\delta T_b = 27 [\text{mK}] x_{\text{HI}} (1 + \delta_b) \left( \frac{T_S - T_\gamma}{T_S} \right) \left( \frac{1+z}{10} \right)^{1/2} \left[ \frac{\partial_r v_r}{(1+z)H(z)} \right]^{-1}$$

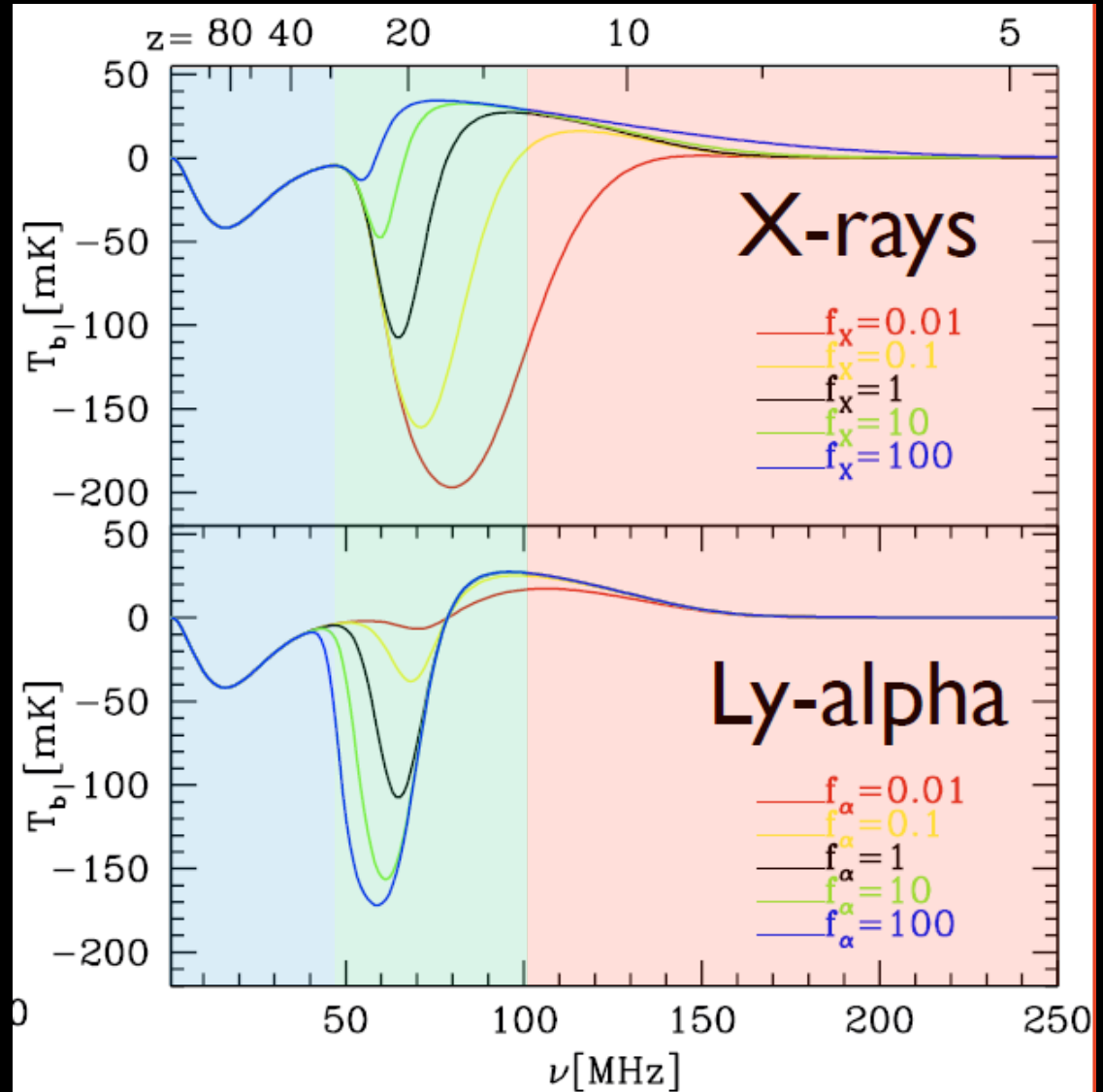


Shaver+ 1999  
Furlanetto 2006  
Pritchard & Loeb 2010

# 例

影響する要因

- X線強度
- 紫外線強度
- 脱出確率
- 星形成史
- 初期質量関数
- ガス分布



# 再イオン化研究の現状

これまでの観測・理論研究からわかってきたこと

- ・ 銀河間物質の非一様性 (clumping factor)  
シミュレーション・観測・理論で $C \sim 3-4$ に収束
- ・ 明るい銀河の星形成史  
UV光度関数 ( $z = 6-10$ ) が観測されている

## 現在の論点

- ・ 電離光子脱出確率
  - 電離光子脱出確率の銀河質量依存性が、どの質量の銀河が再イオン化に寄与するかを決める重要な量
  - 直接観測は不可能
  - 理論研究でも収束していない
- ・ 暗い銀河の星形成史
  - 現在は観測的制限無し → 今後の観測に期待
  - 理論研究でも収束していない

# 再イオン化シミュレーション

再イオン化数値シミュレーションのポイント

- ・ 小スケールから大スケールまで
  - $M < 10^8 M_{\text{sun}}$  のmini haloを分解
  - 21cm線の統計的議論 (power spectrumなど) のための大領域計算
- ・ 複雑な放射輸送
  - 再イオン化光子：脱出確率の銀河質量依存性がどの質量の銀河が再イオン化に寄与するか決める
  - X線：銀河間ガスを加熱
  - Ly  $\alpha$ ：スピン温度とガス温度を結合

かつては簡略化されて取り扱っていた

例えば… (Benson et al. 2001):

銀河の周りに光子を仮定に基づいて分布させた

(A) Growing sphere model

scale the Strömgren sphere of each halos

(B) High density model

ionize from high density region

(C) Low density model

ionize from low density region

(D) Random cells model

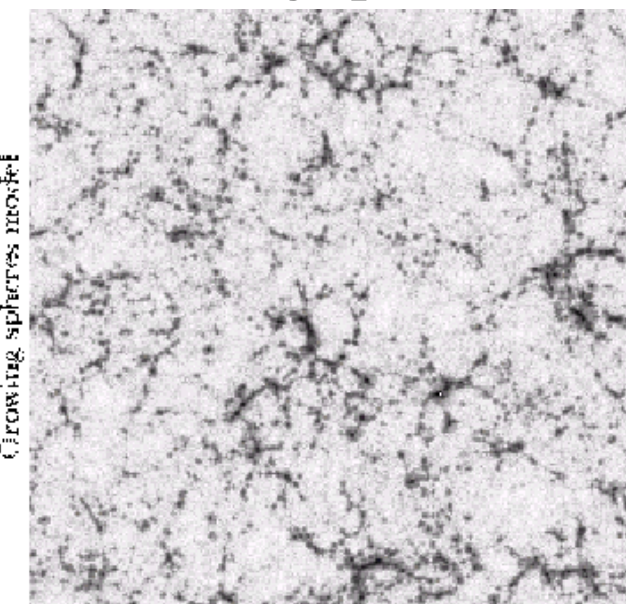
Strömgren sphere at random cells

(E) Boundary model

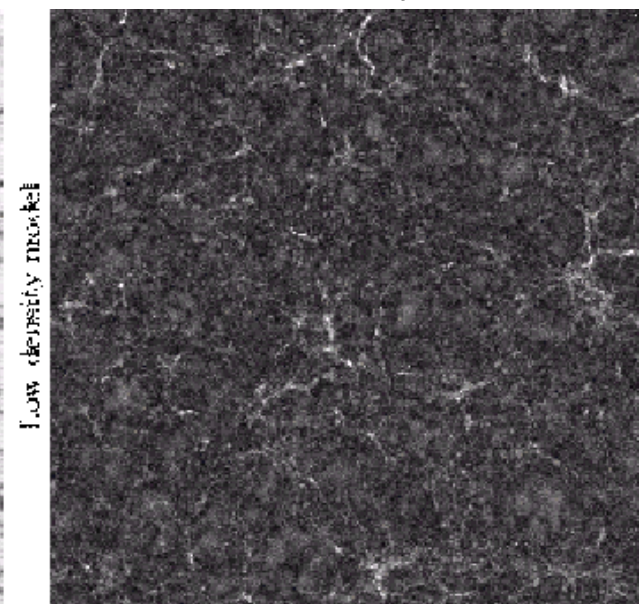
Strömgren sphere  $\pm$  random cells at boundaries of  
ionized region



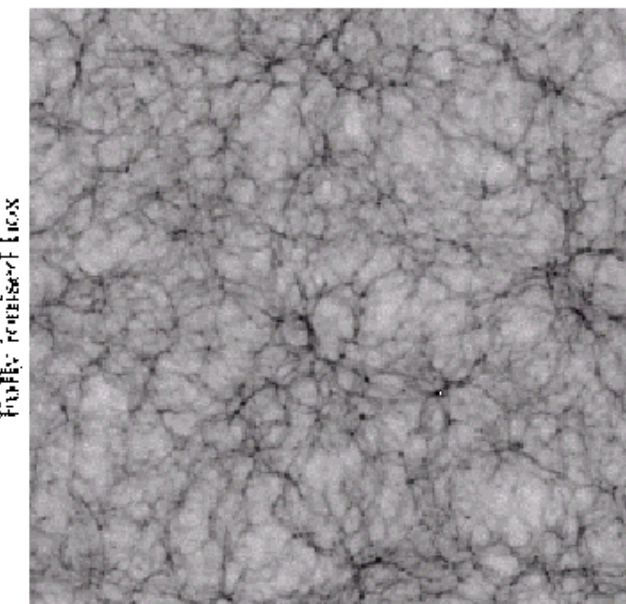
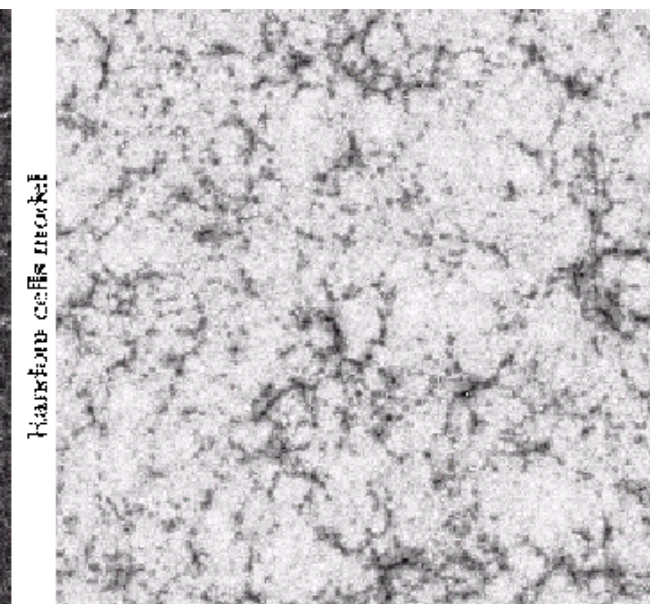
A: Growing sphere



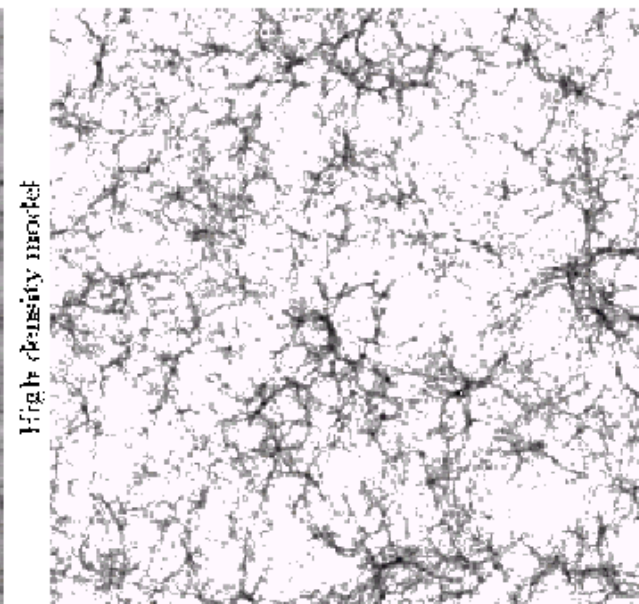
C: Low density



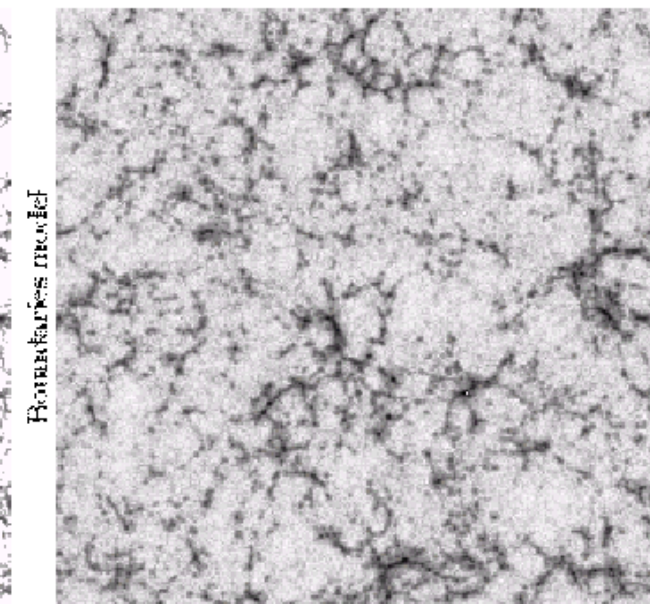
D: Random cells



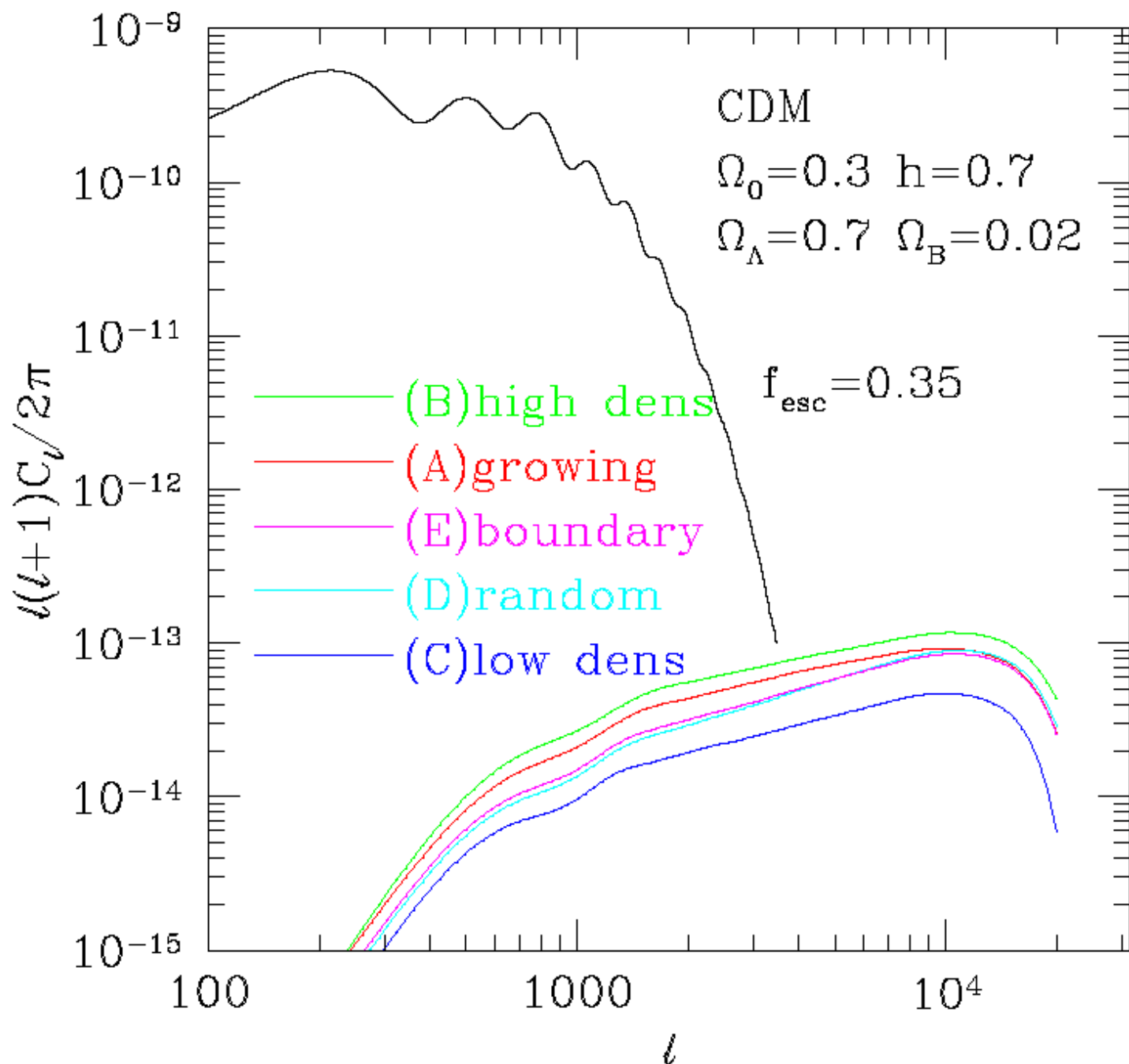
Density Field



B: High density



E: Boundary



Dependence on distribution of ionized region



# 再イオン化シミュレーション

再イオン化数値シミュレーションのポイント

- 小スケールから大スケールまで
  - $M < 10^8 M_{\text{sun}}$  のmini haloを分解
  - 21cm線の統計的議論 (power spectrumなど) のための大領域計算
- 複雑な放射輸送
  - 再イオン化光子：脱出確率の銀河質量依存性がどの質量の銀河が再イオン化に寄与するか決める
  - X線：銀河間ガスを加熱
  - Ly  $\alpha$ ：スピン温度とガス温度を結合

# 再イオン化シミュレーション

## 従来のシミュレーション

- ・ 宇宙論的流体 (N体) 計算
  - ・ 空間分解能の粗い post-processing 輻射輸送
  - ・ 単純化した sub-grid 銀河モデル  
(星形成率 & 電離光子脱出確率)
- 計算が軽く、100Mpc以上の領域を計算  
→ 統計的議論が可能
- × 結果は採用したモデルに強く依存

# 再イオン化シミュレーション

## 従来のシミュレーション

- ・宇宙論的流体 (N体) 計算
- ・空間分解能の粗いpost-processing輻射輸送
- ・単純化したsub-grid銀河モデル  
(星形成率 & 電離光子脱出確率)

○計算が軽く、100Mpc以上の領域を計算  
→ 統計的議論が可能

×結果は採用したモデルに強く依存

## 近年の傾向

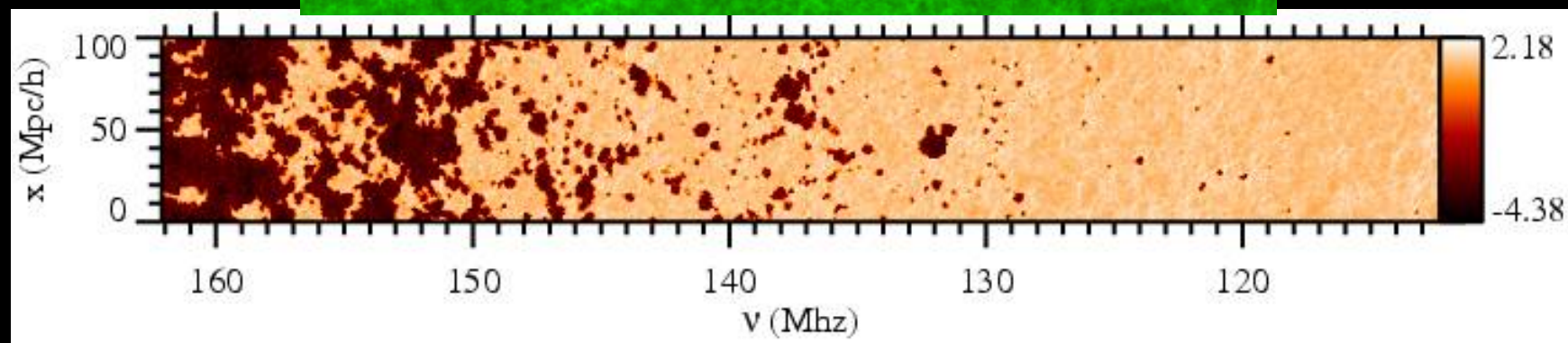
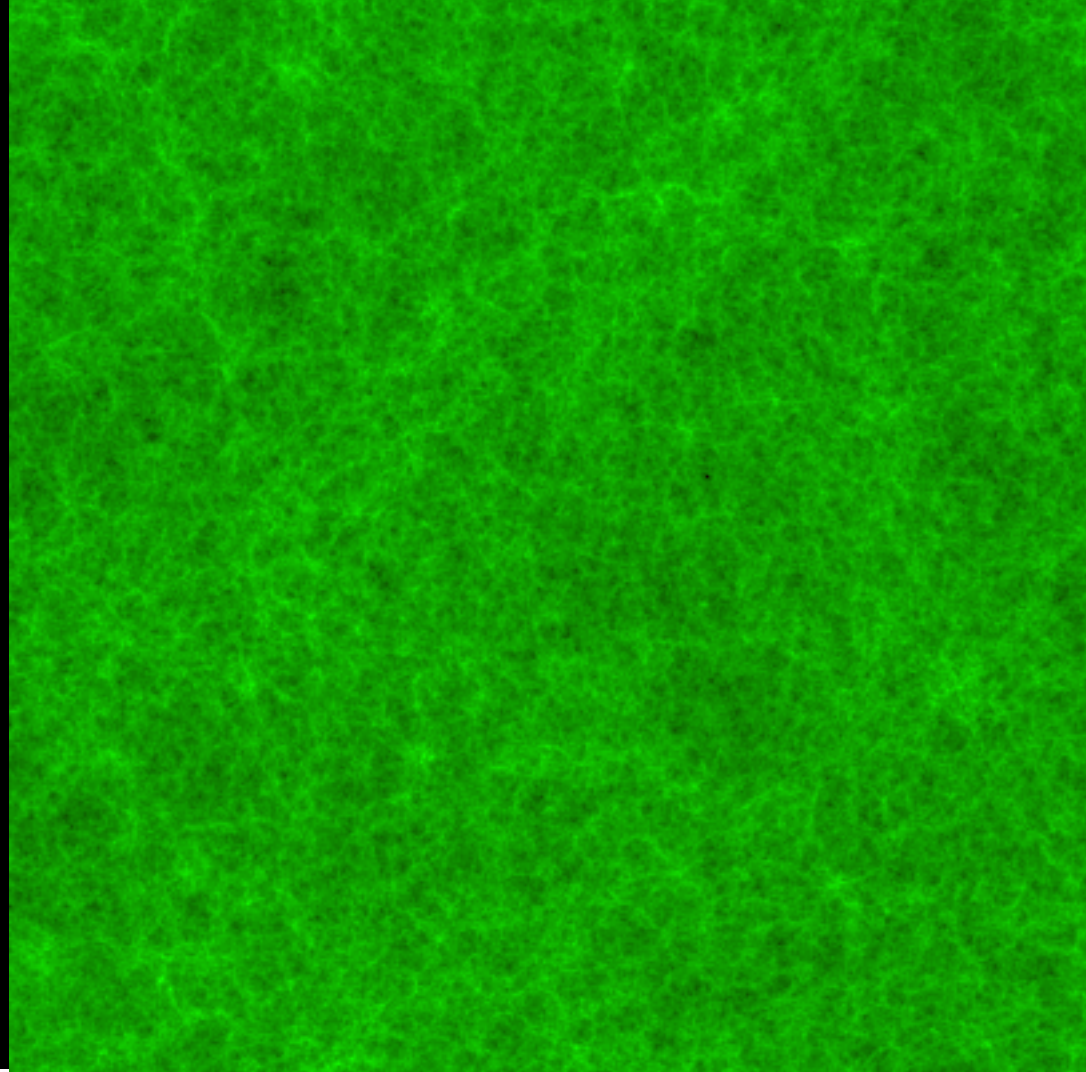
- ・輻射流体計算を実装  
(筑波グループ、Norman、Finlator)

○銀河モデルを仮定する必要がない

○UVBの星形成、IGMへの影響は自然に入る

×計算コストが非常に高く、大領域の計算が難しい  
(現在、最大で20Mpc)

Ilian Iliev



# フィードバック

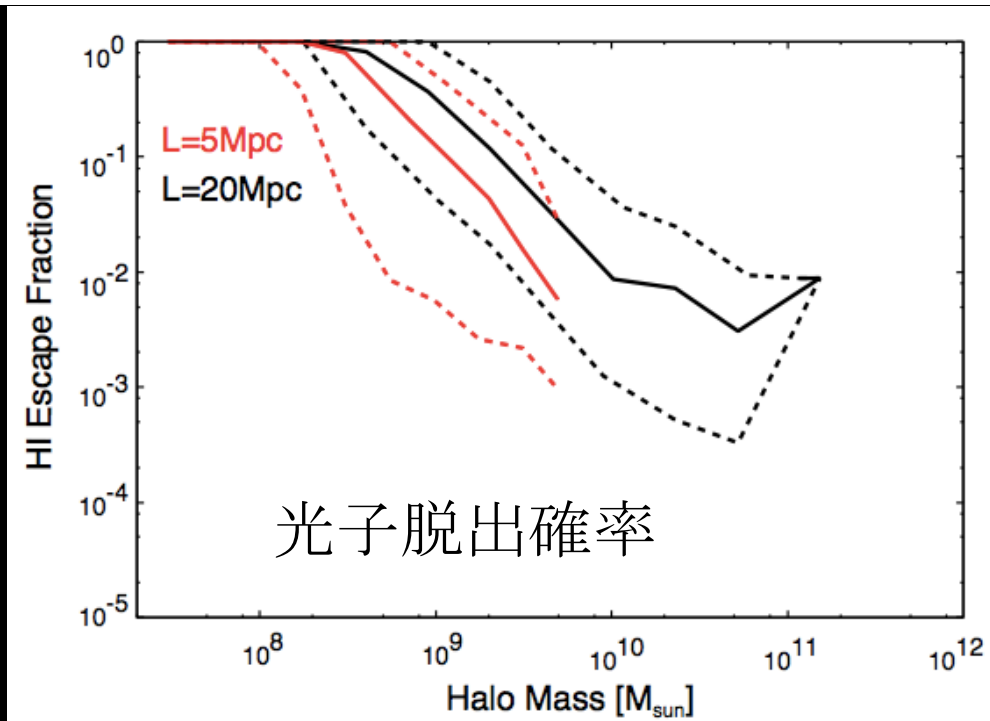
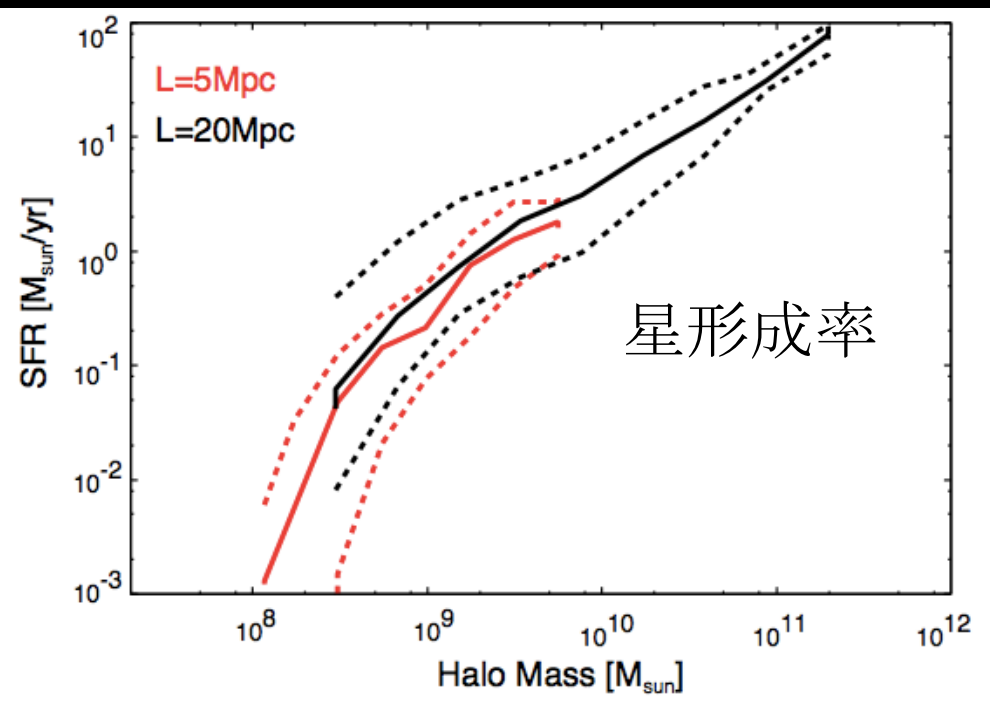
## 主なフィードバック

- 星形成率：  
低質量銀河で内部の星自身による星形成阻害
- 光子脱出確率  
低質量銀河でガス流出により高い値となる。  
質量依存性も強い。

## 今後の方向性

- 大スケールと小スケールの相補性
- よりよいフィードバックモデルの構築

Hasegawa in prep

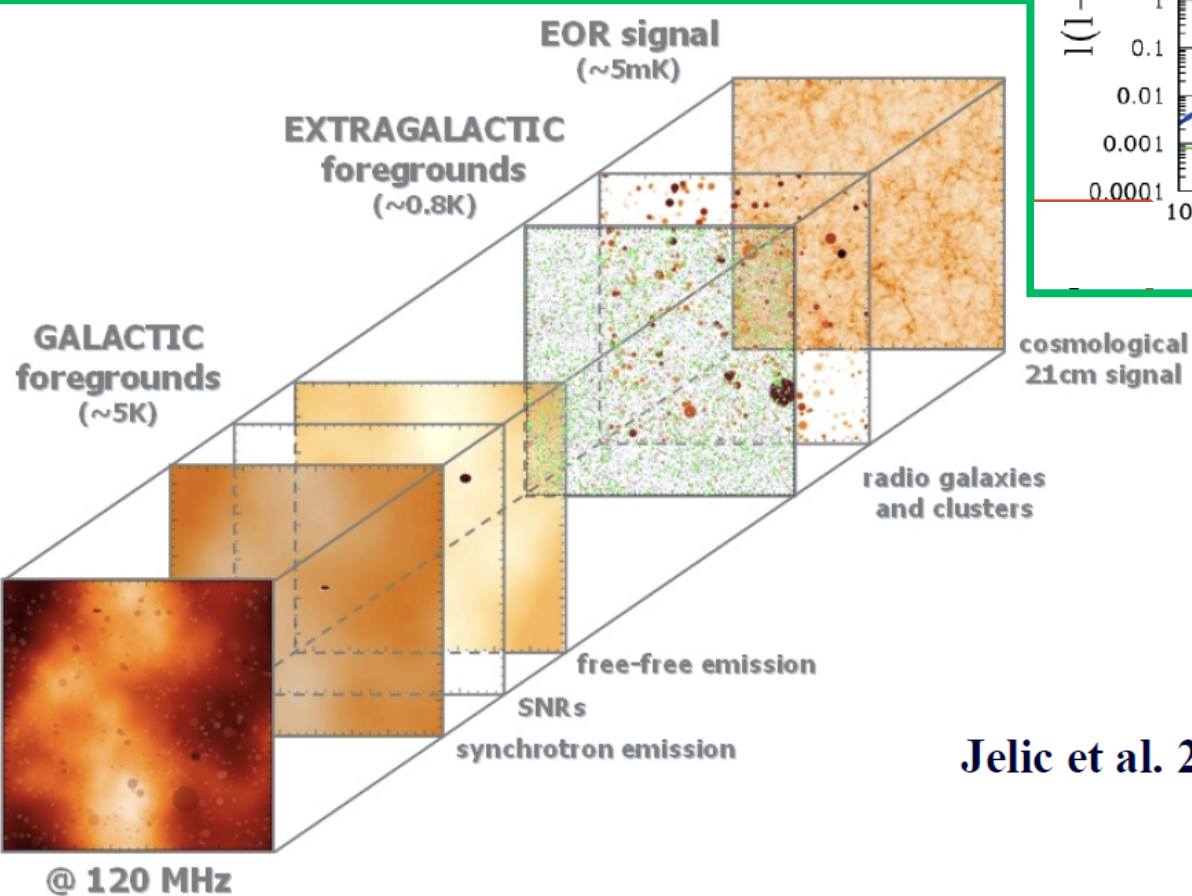
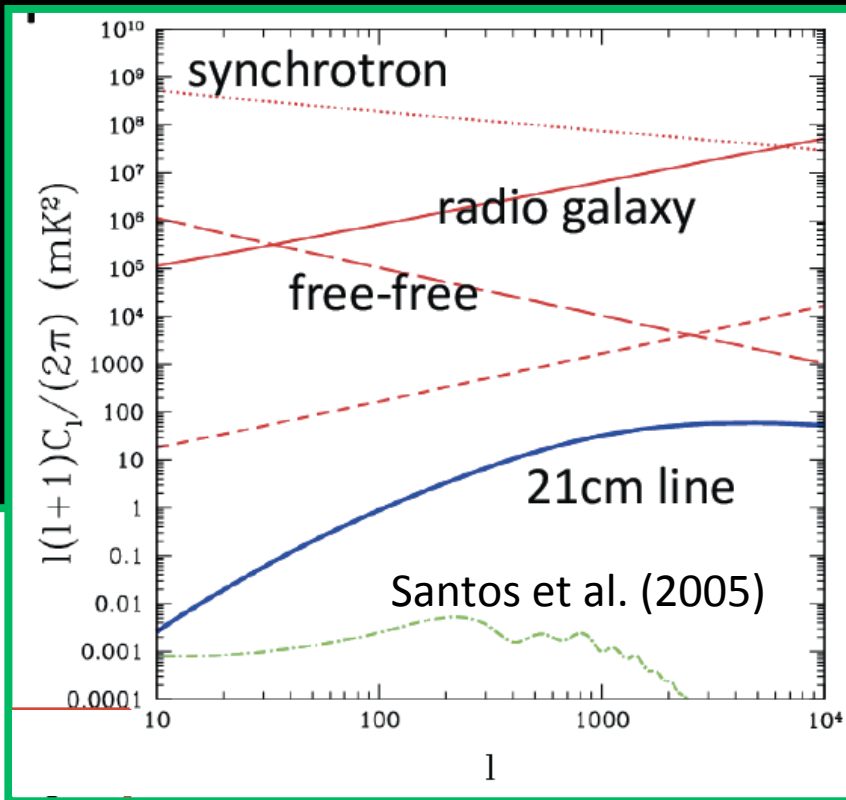


### 3、foregroundと観測可能性

# 本当に観測できるか？

強烈なforeground

- 銀河系
- 銀河系外電波天体
- 地球大気



Jelic et al. 2008

power spectrumで  
foregroundは  
signalの6桁上！

どう差し引いて  
signalを得るか？

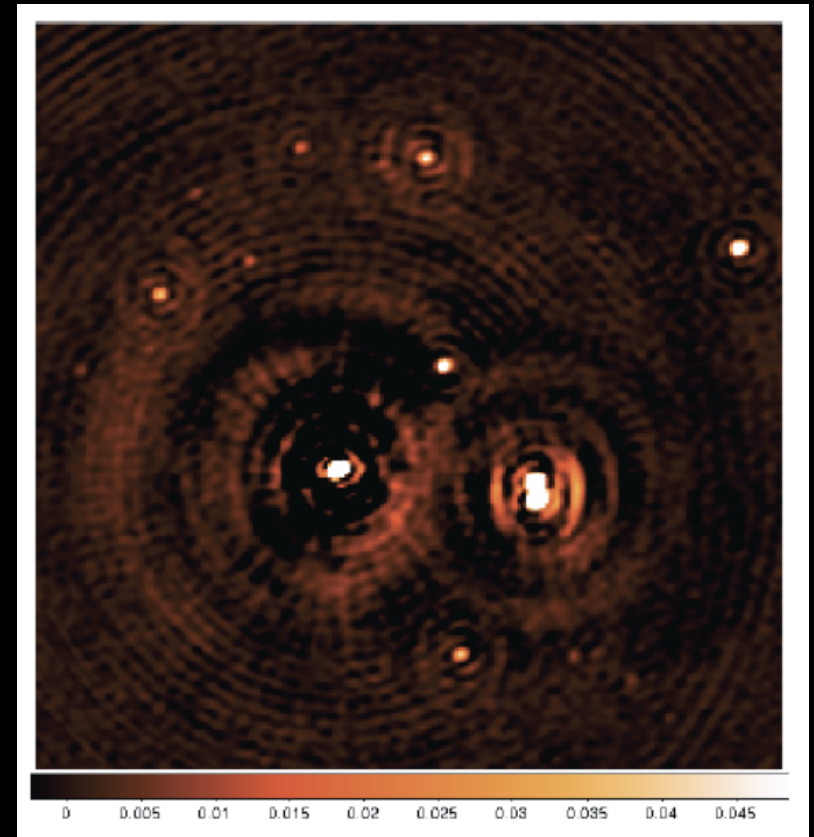


# 銀河系外電波天体

点源の漏れだし

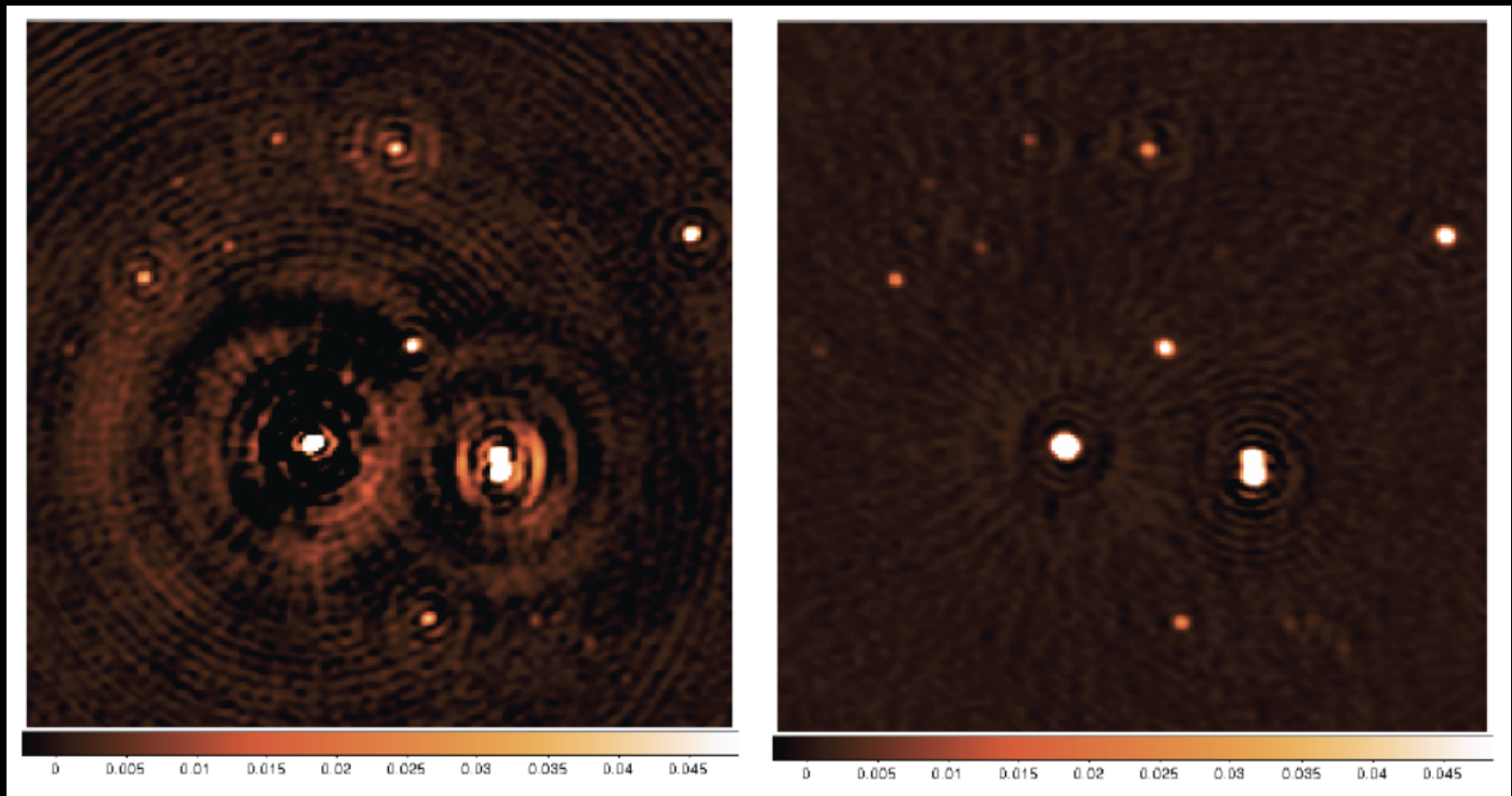
- ionosphere, troposphere, atmosphere
  - 見る方向によって異なる
  - 時々刻々と変化
- beam shape, receiver gain, frequency sensitivity
  - 望遠鏡の性質
  - 視野外からも寄与

→ sky modelを用いて  
漏れ出しを推定・差し引く



# calibration

## SAGE calibration (LOFAR)



# calibration

LOFAR EoR team

熊崎 (名大院生)



シミュレーションやっています (PI)。  
その結果によって次のLOFARの  
観測領域が決まります！

0 0.005

0.04 0.045

# calibrationの必要精度

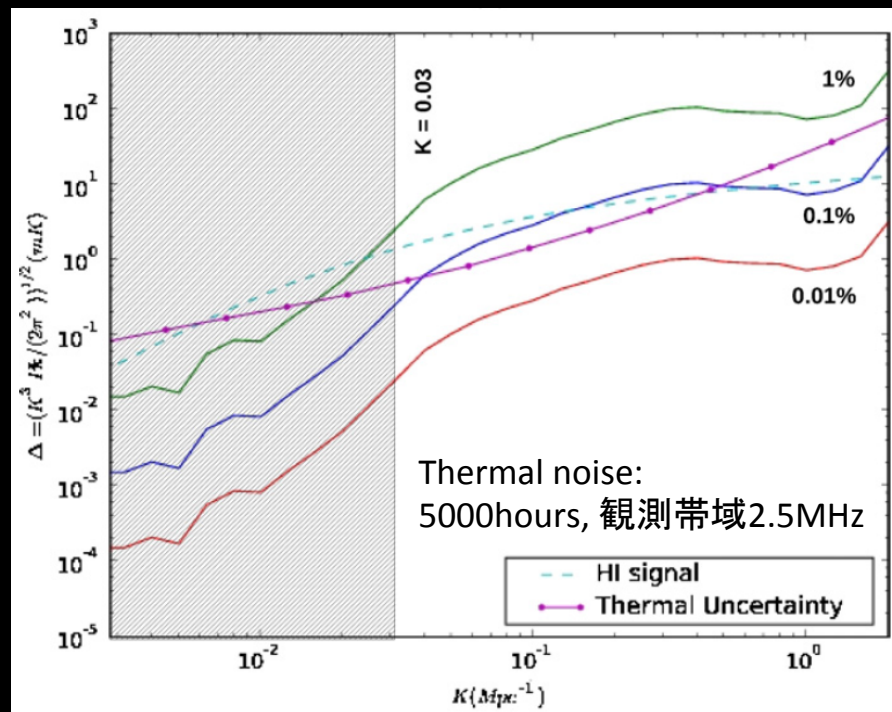
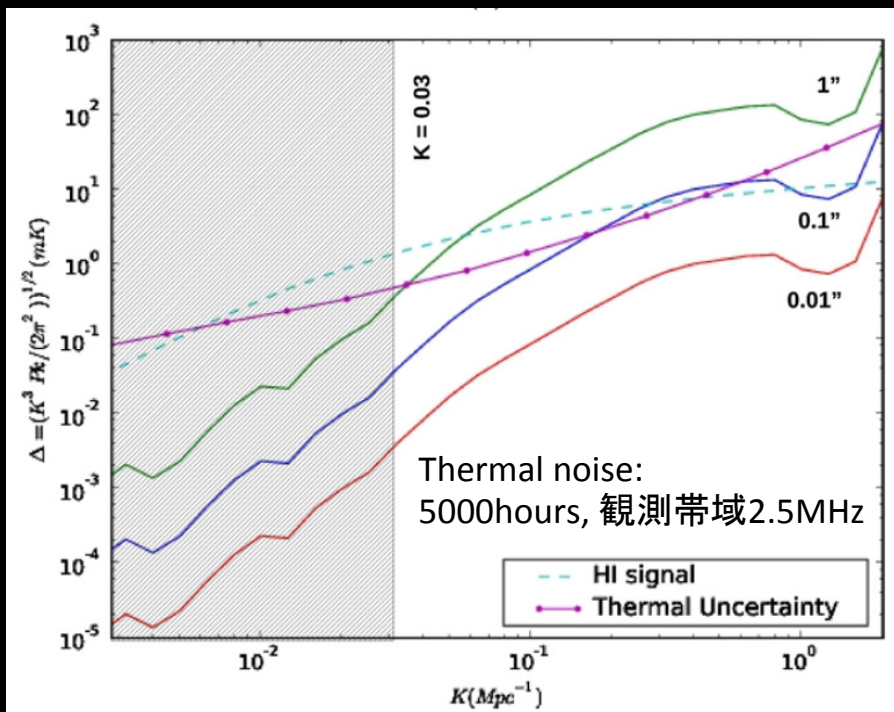
Datta et al. 2010

MWAの観測シミュレーション

21cm線のpower spectrumを観測するために・・・

点源の位置決定精度  
< 0.1" が必要

点源の明るさ決定精度  
< 0.05%が必要





# calibrationの必要精度

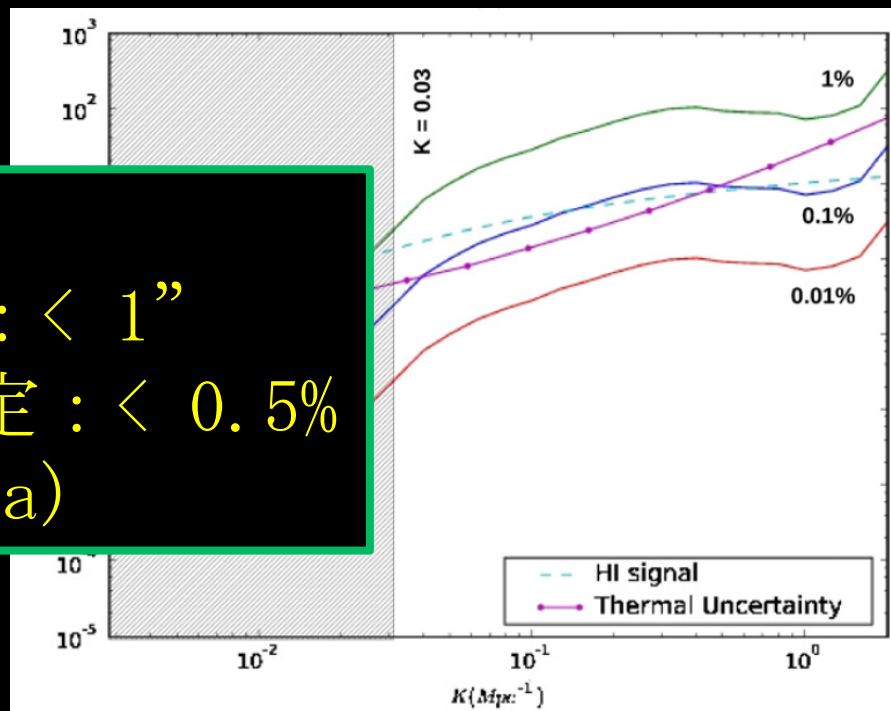
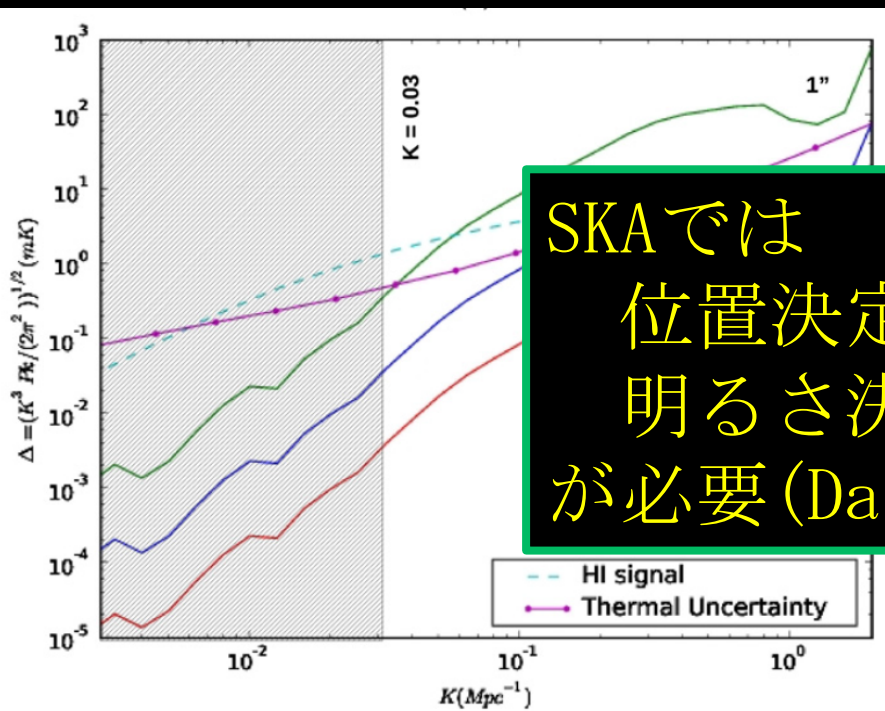
Datta et al. 2010

MWAの観測シミュレーション

21cm線のpower spectrumを観測するために・・・

点源の位置決定精度  
< 0.1" が必要

点源の明るさ決定精度  
< 0.05%が必要



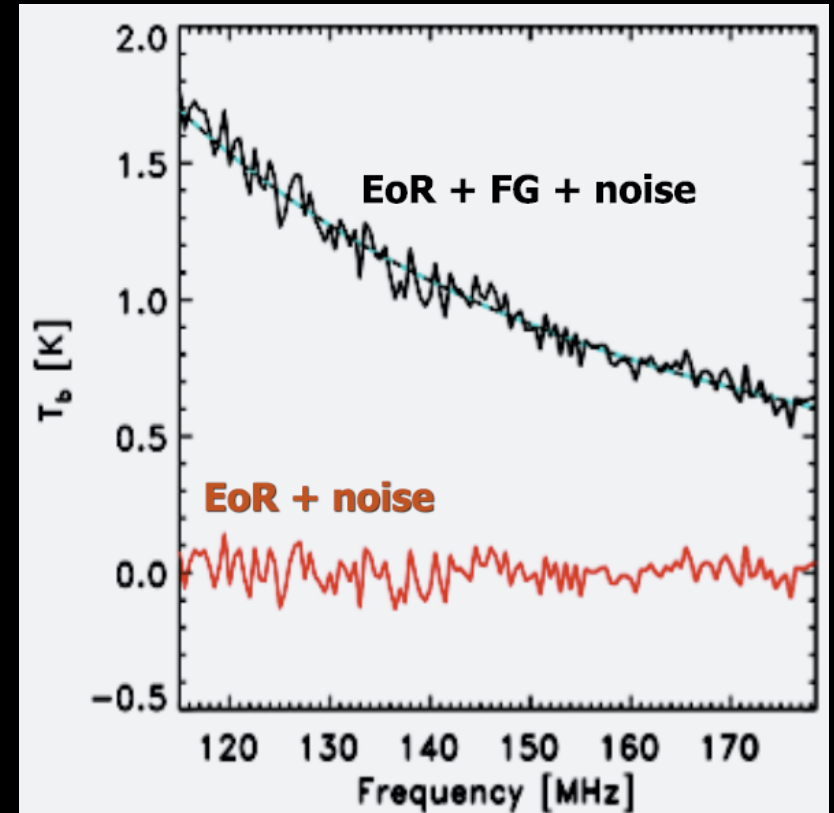
# 銀河系

## 銀河系電波放射

- 様々なソース
  - シンクロトロン
  - free-free
  - 超新星残骸
- pixelごとに強さ、スペクトルが異なる
- 銀河系放射は滑らか  
EoR signalはギザギザ

## pixelごとにsignalを引き出す

- 滑らかな成分を差し引く
  - 多項式近似
  - high-pass filter
- ノイズスペクトルを差し引く

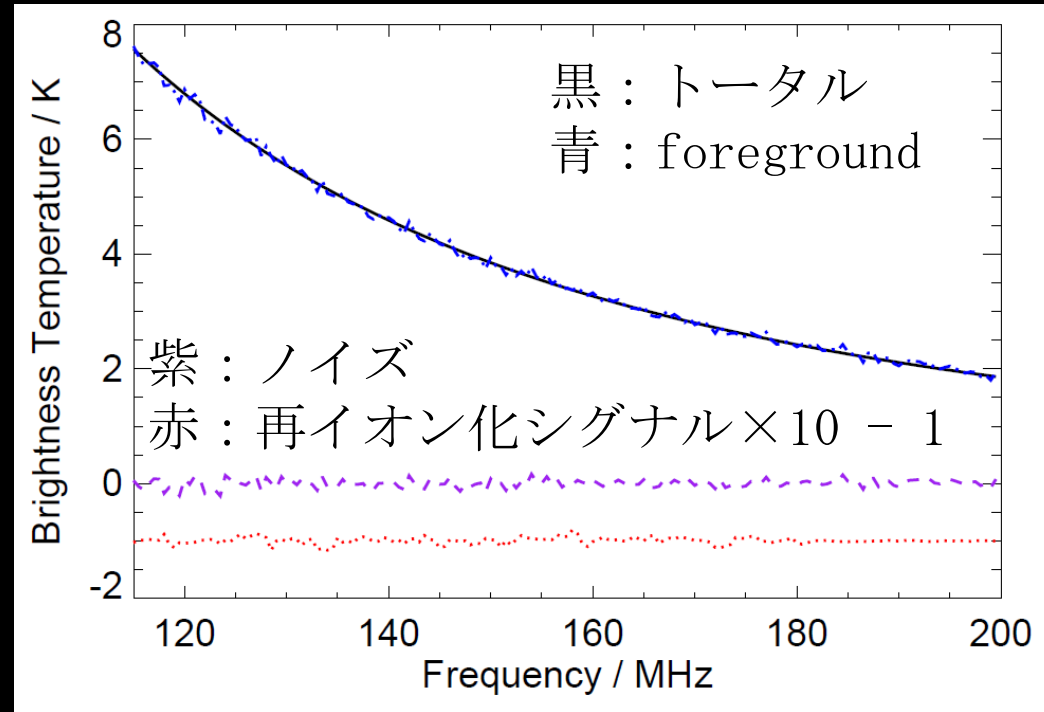


Jelic 2008

# LOFAR simulation

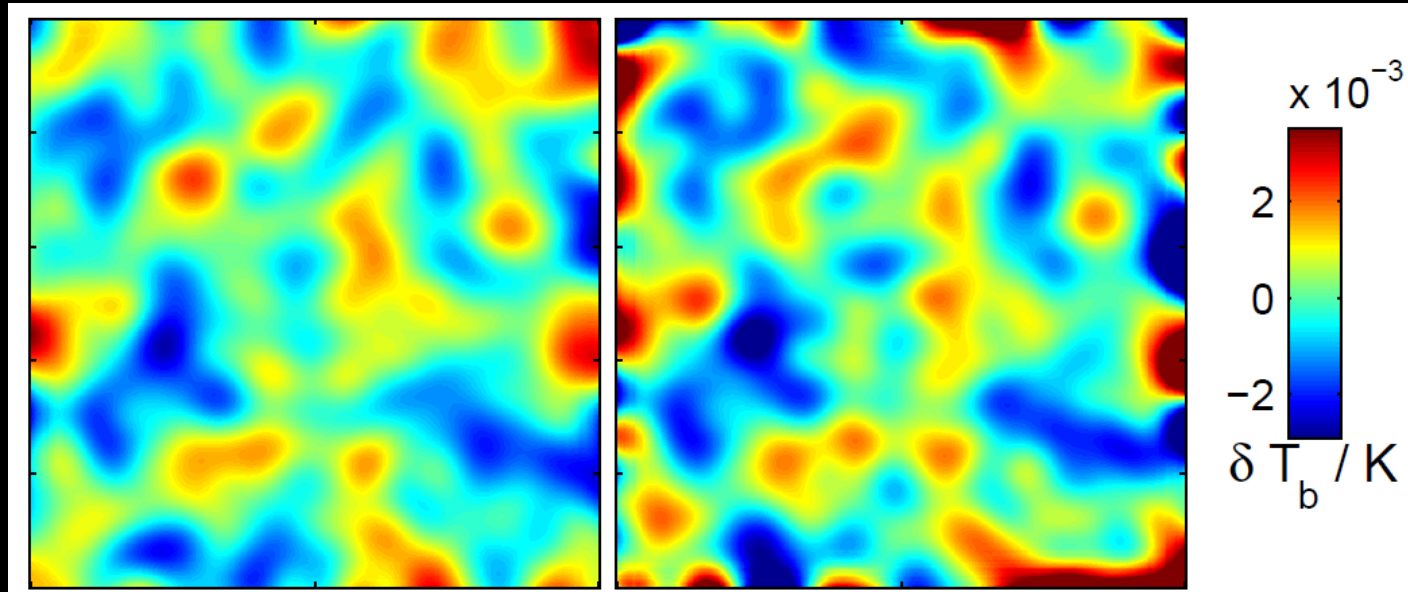
Chapman+ 2013

- 600時間の観測を想定
- pixelごとにwavelet変換で滑らかな成分を引く
- さらにノイズを引く



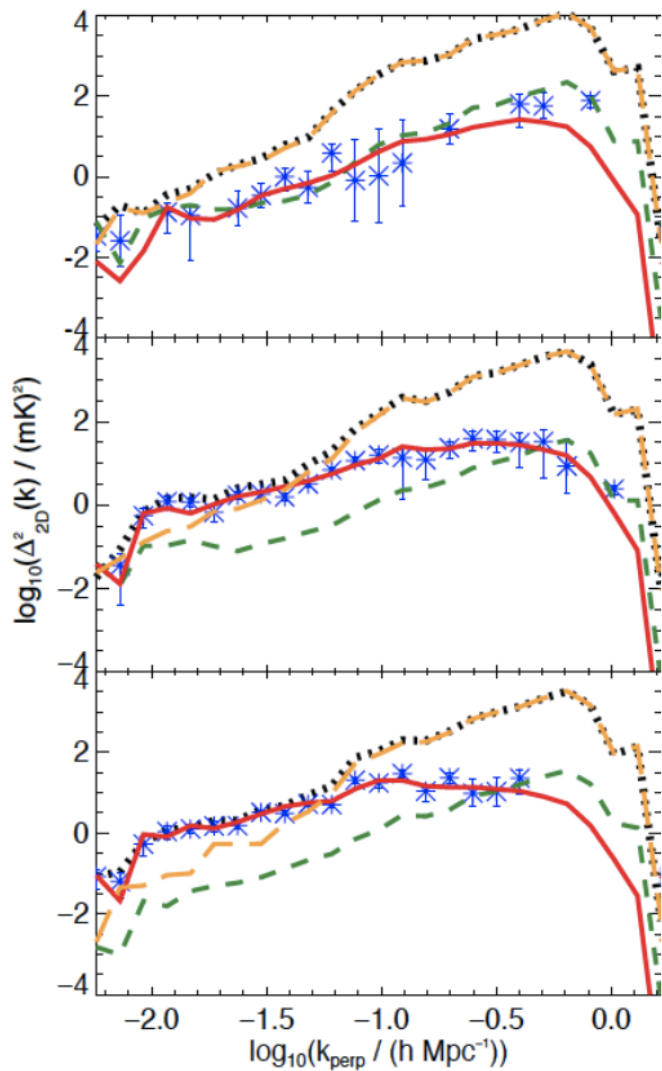
左 : input  
右 : output  
@165MHz  
 $10^\circ \times 10^\circ$

相関係数  
= 0.689





# LOFAR simulation



130MHz  
z=9.92

150MHz  
z=8.47

170MHz  
z=7.35

21cm線power spectrum  
の再構成

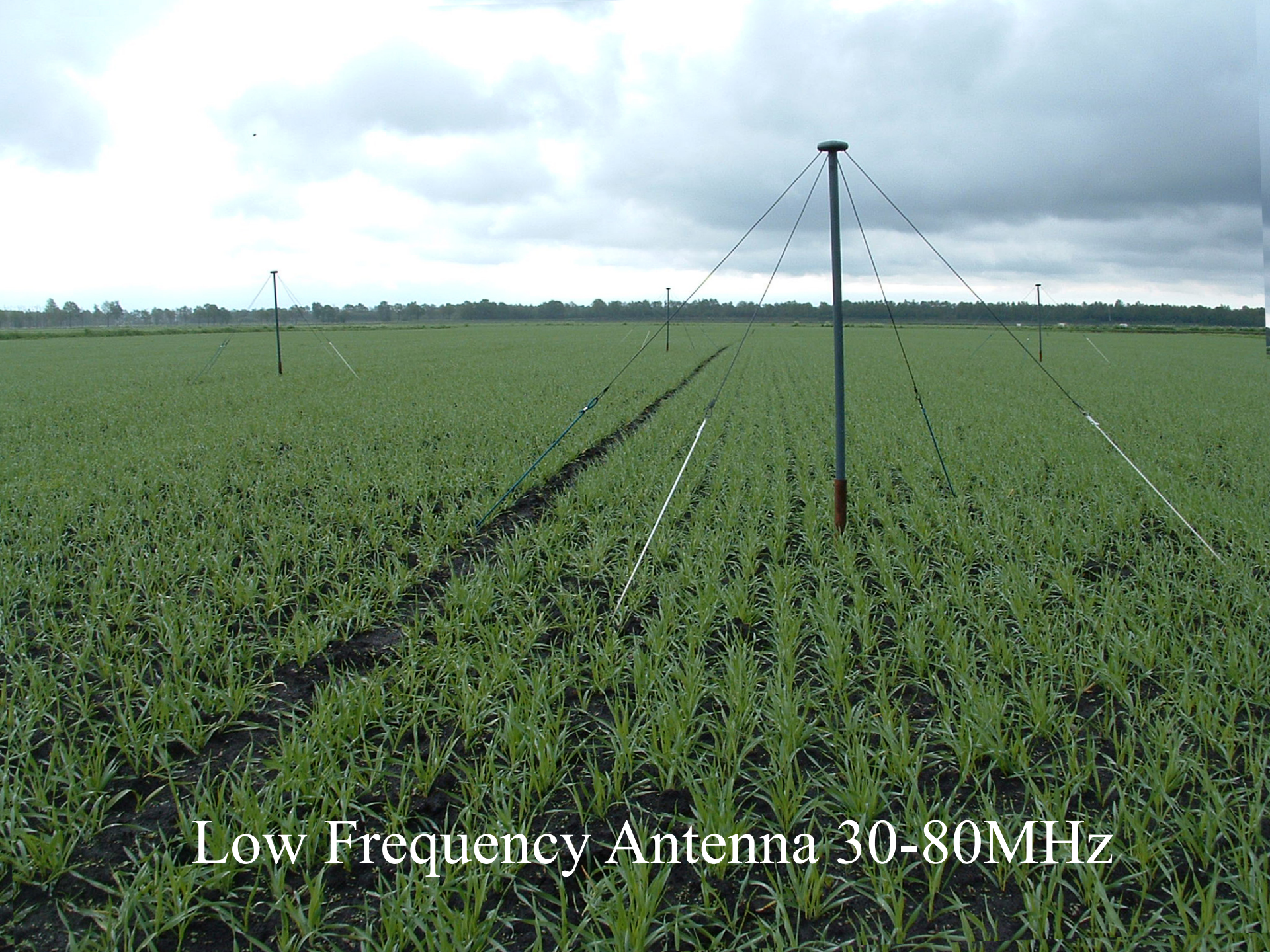
黒：銀河系差し引き残差  
橙：ノイズ  
赤：input signal  
青点：再構成結果  
緑：leakage



**LOFAR**

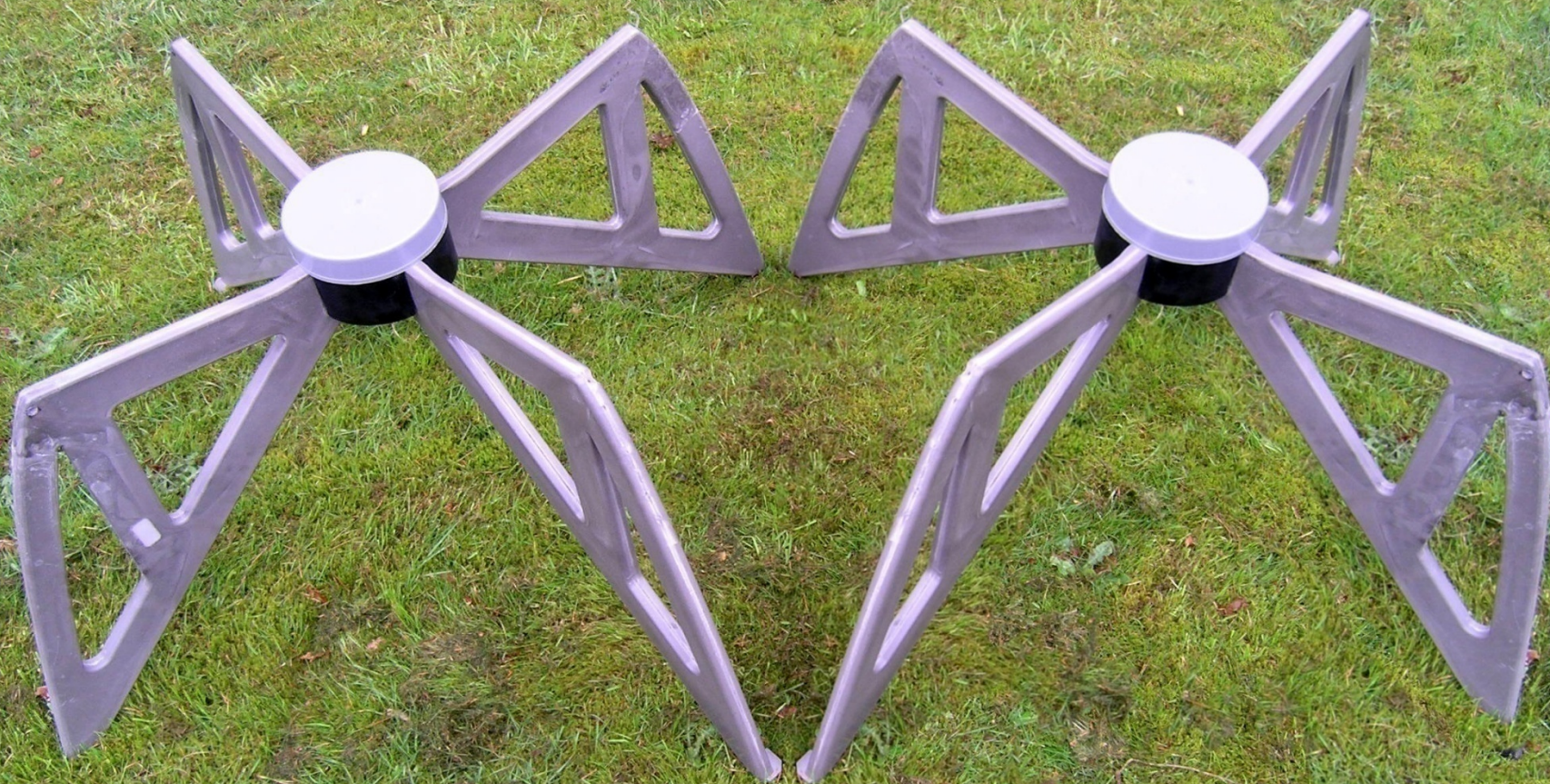






Low Frequency Antenna 30-80MHz





High Frequency Antenna 120-240MHz



# PAPER 南アフリカ

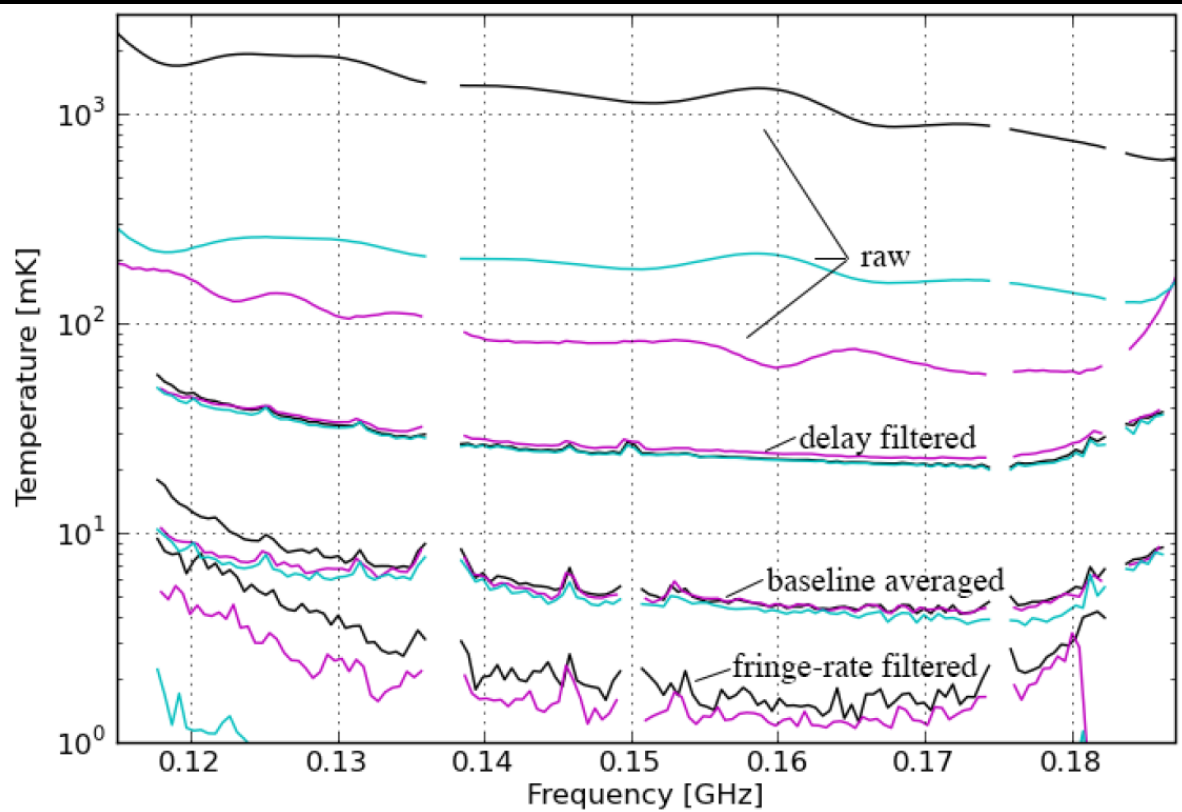




# PAPER観測データ

Parsons+ 2013

55日×5時間のデータ



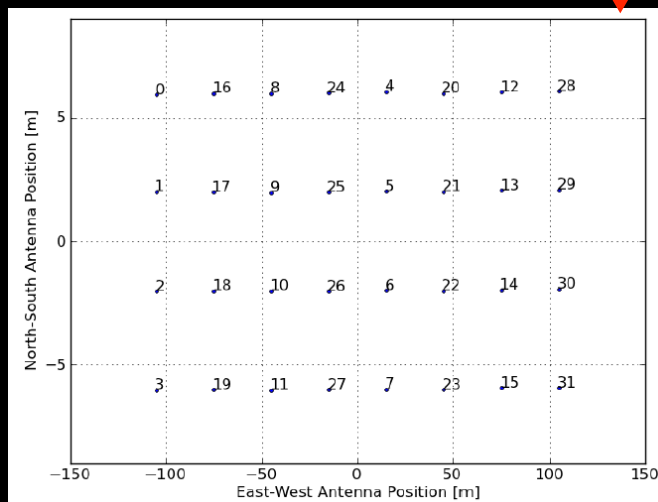
delay-spectrum  
analysis

(周波数に関する  
フーリエ変換)

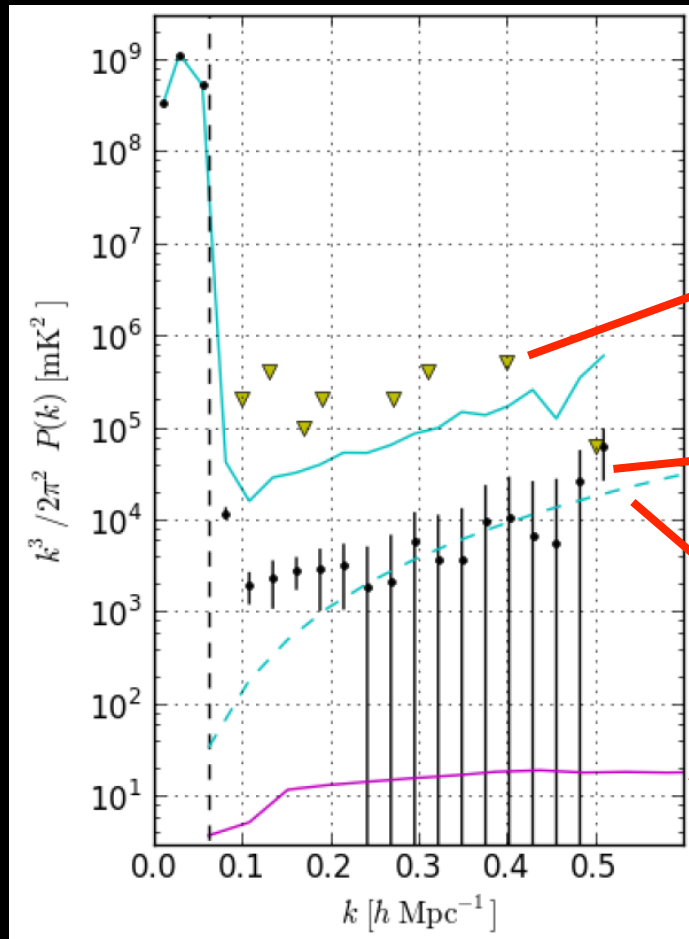
各baselineの平均

fringe-rate filter

maximum redundancy configuration  
(特定の波数の観測に特化)



# PAPER観測データ



GMRTによる上限 ( $z = 8.6$ )

PAPERによる制限 ( $z = 7.7$ )  
→  $\langle T_b \rangle < 400\text{mK}$

noise spectrum ( $T_{\text{sys}} = 560\text{K}$ )

Lidz et al. 2008による予言値  
( $x_{\text{HI}} = 0.5$ )

あと2ケタ！（温度にして1ケタ）

宇宙がずっと断熱的に進化してきたとすると  $\langle T_b \rangle \sim 400\text{mK}$   
→ global heatingがあったという初めての証拠

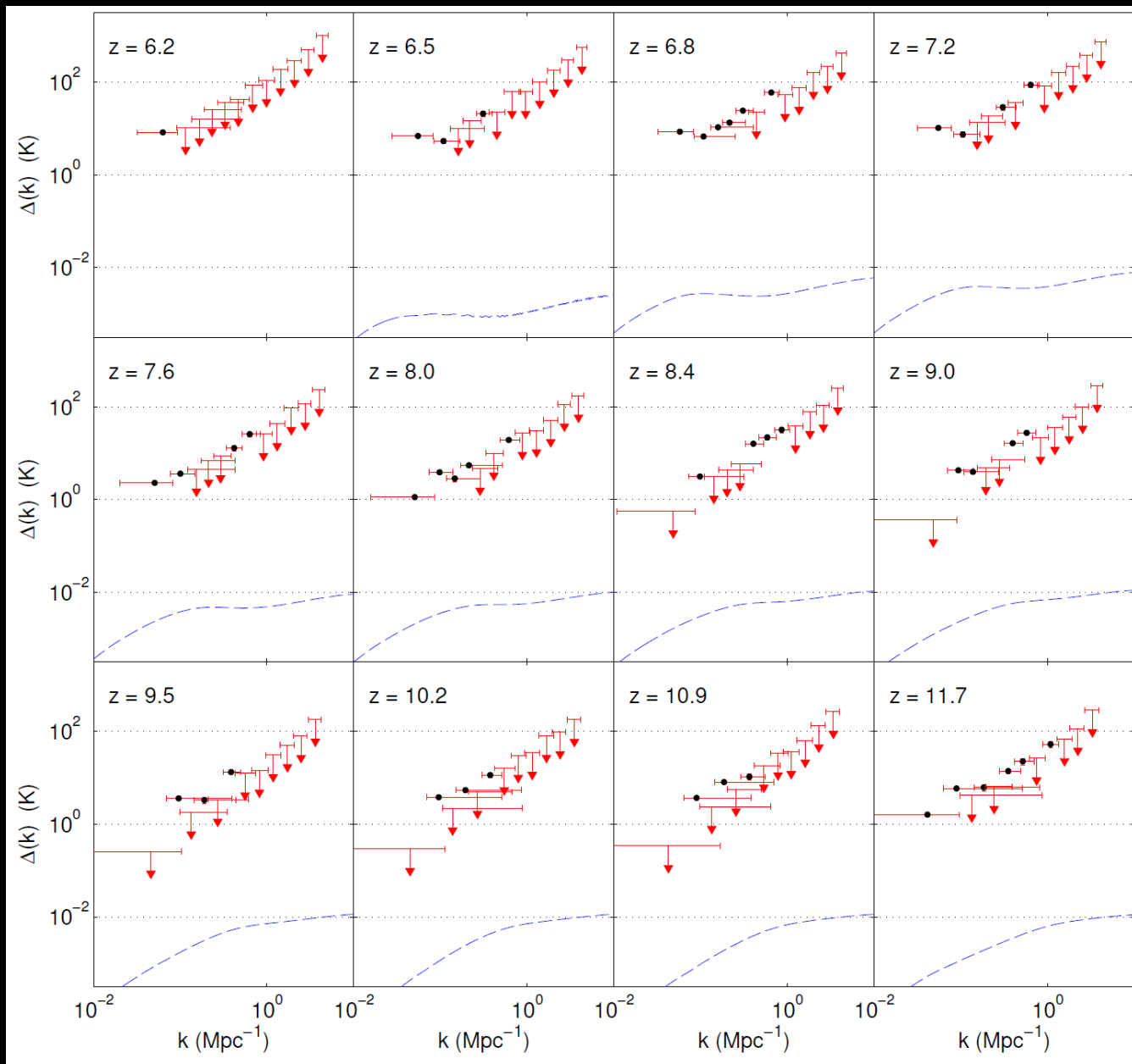




Mileura Widefield Array (MWA)

# MWA観測データ

Dillon+ 2013



4、SKA

# シグナルの大きさ

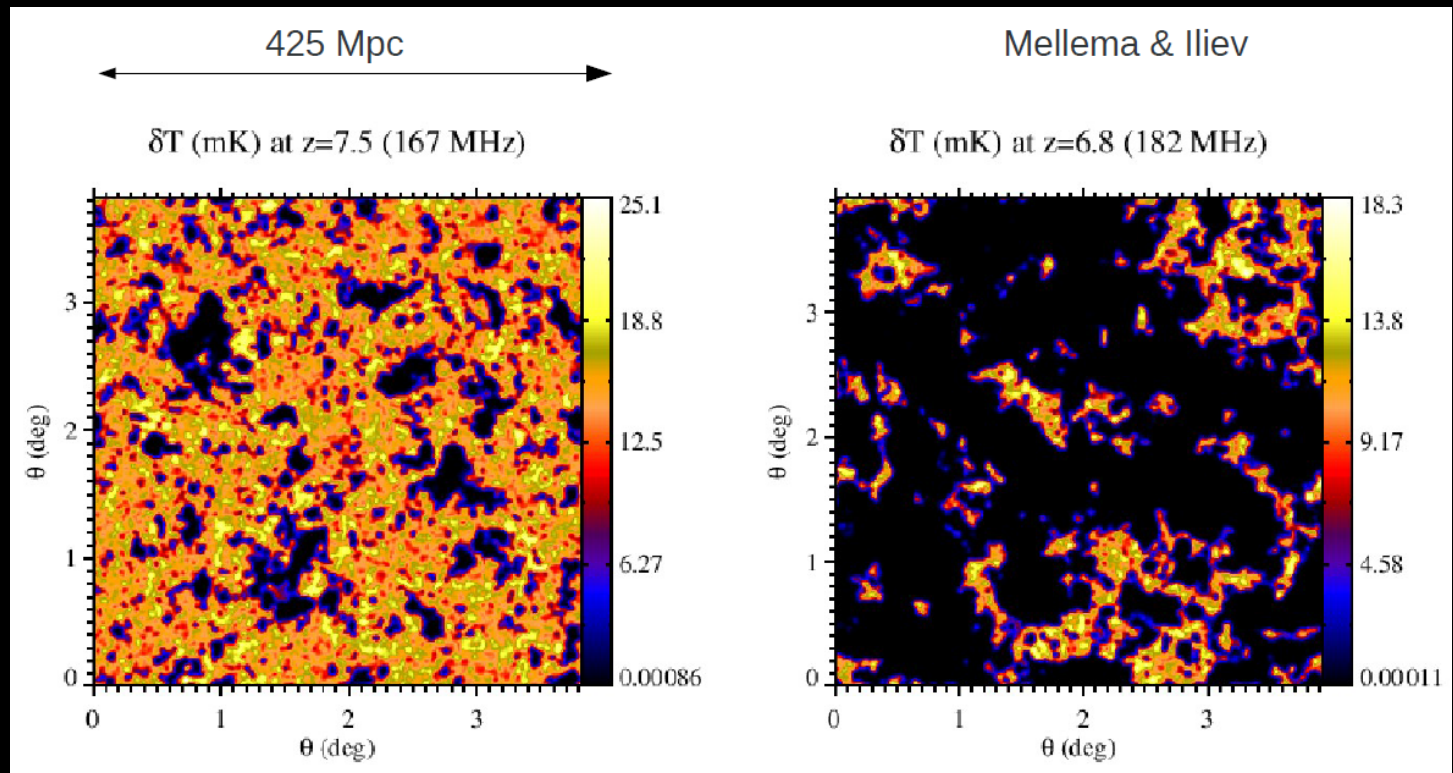
21cmシグナル：分解能 $\downarrow \Rightarrow$ ピーク温度 $\downarrow$

シミュレーション：

1'  $\rightarrow$  ピーク $\sim 10$ mK

5'  $\rightarrow$  ピーク $\sim 3$ mK

バブルの大きさ  $\sim 10'$





# シグナルの大きさ

21cmシグナル：分解能 $\downarrow \Rightarrow$ ピーク温度 $\downarrow$

シミュレーション：

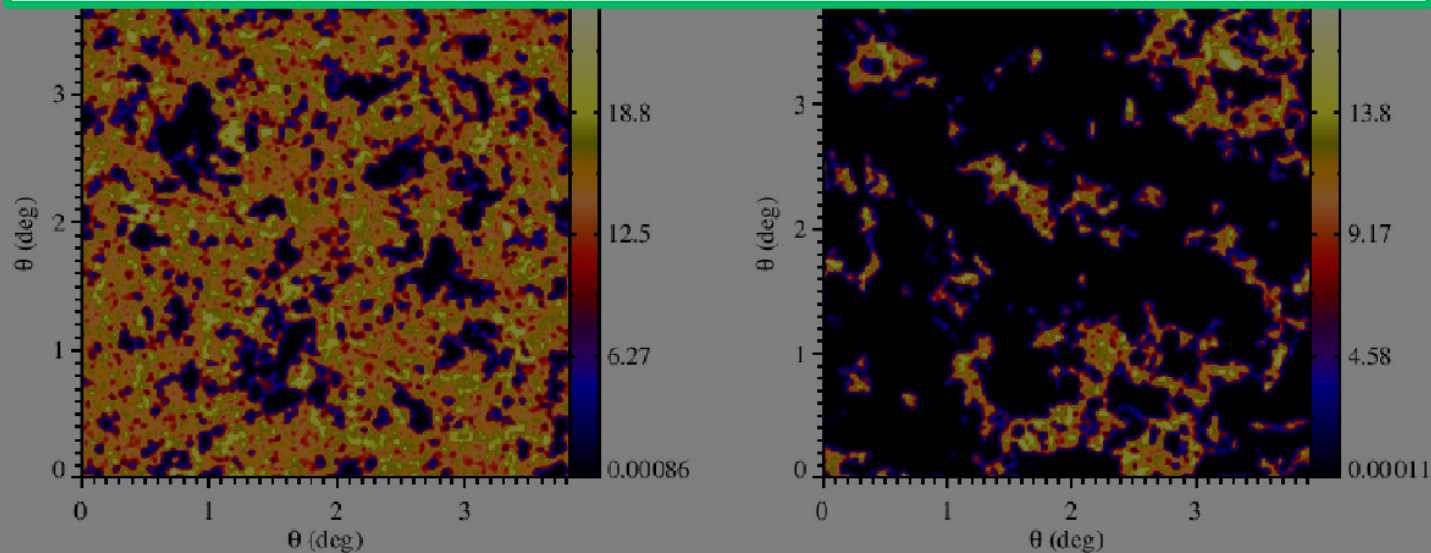
1'  $\rightarrow$  ピーク $\sim 10\text{mK}$

5'  $\rightarrow$  ピーク $\sim 3\text{mK}$

バブルの大きさ  $\sim 10'$

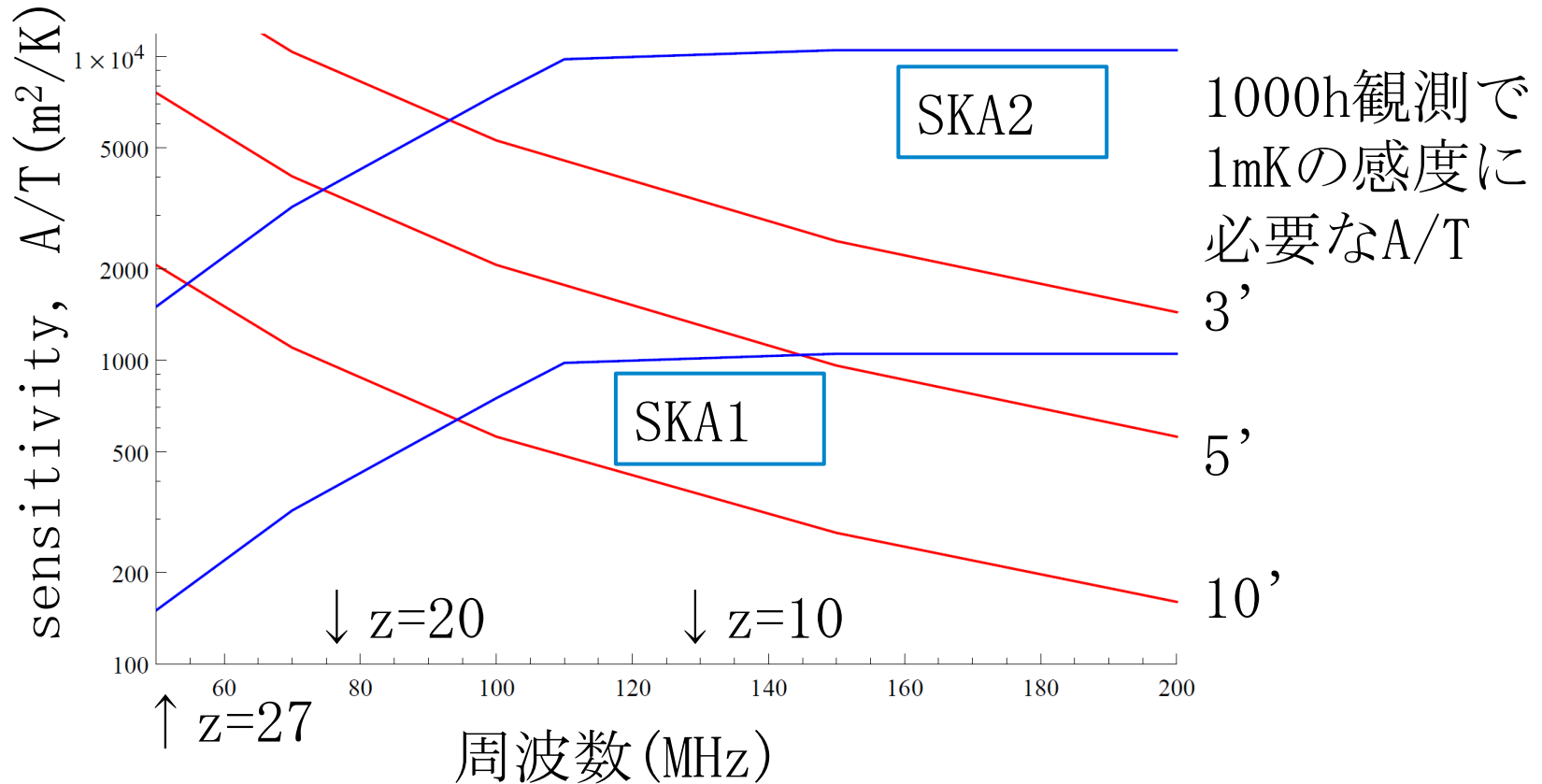
SKAへの要望

「分解能数分角で1mKの感度」



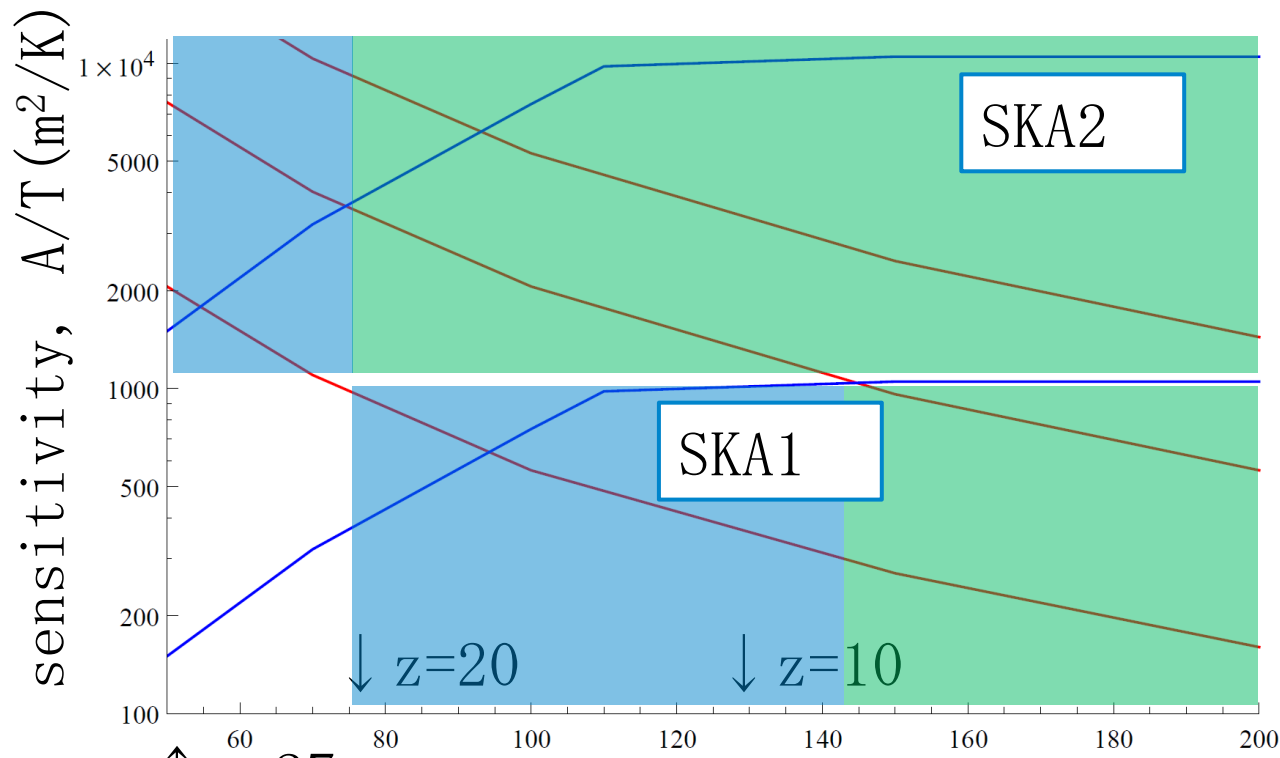
# SKAの感度

A: 実効的な開口面積  
T: システム雑音



分解能の要求は厳しくないため、コア (~5km) に  
たくさんアンテナを配置するのがよい。

# SKAの感度



1000h観測で  
1mKの感度に  
必要なA/T

3'

5'

10'

tomography

power spectrum

SKA1 :  $z < 9$

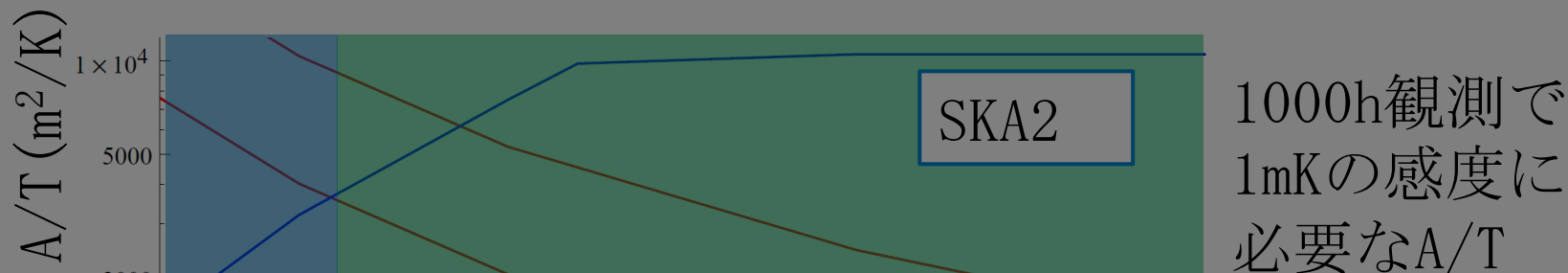
$z < 20$

SKA2 :  $z < 20$

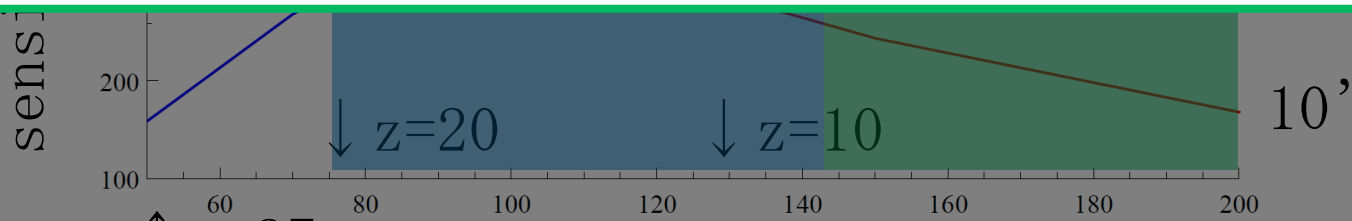
$z < 27$



# SKAの感度

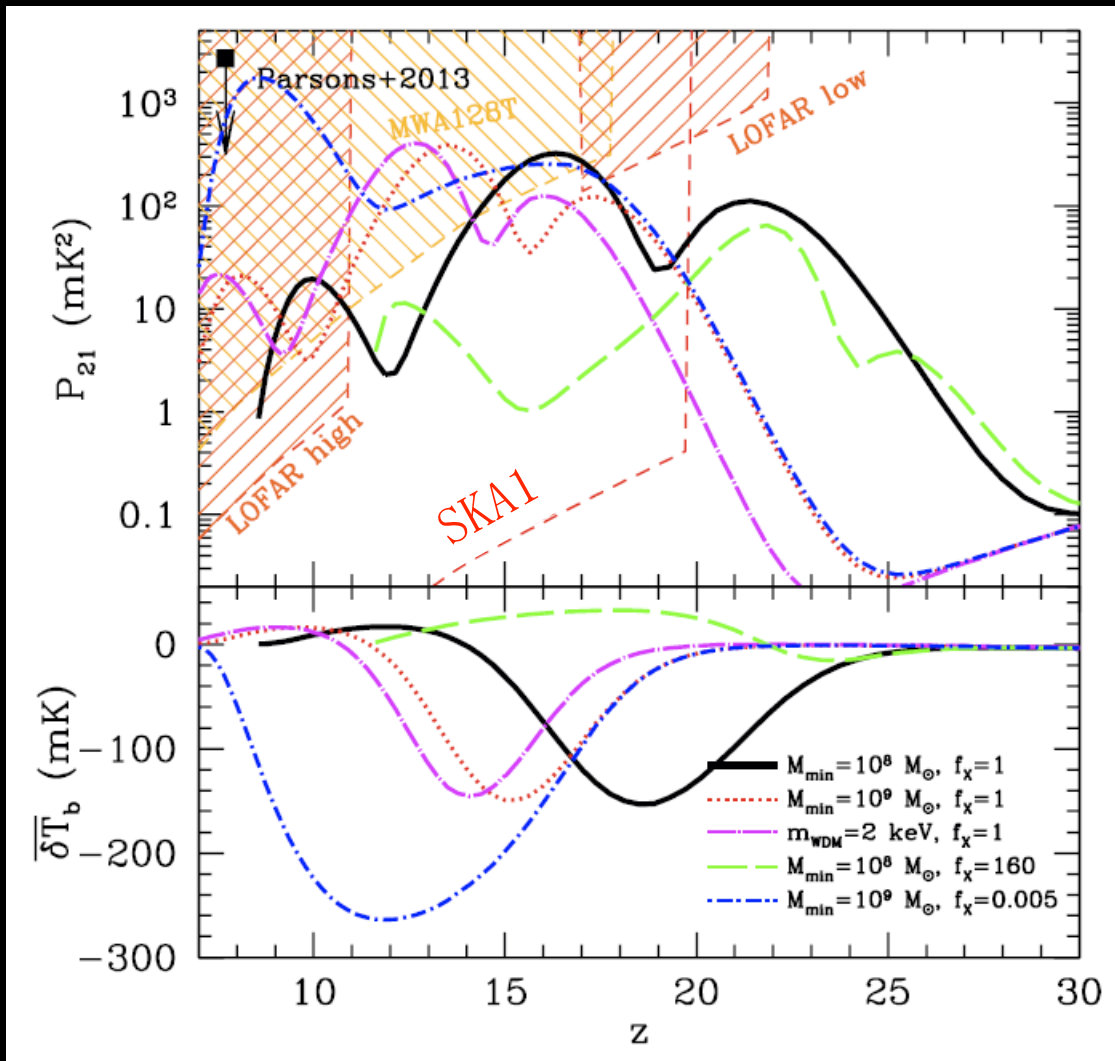


SKA1 : 再イオン化過程をしっかりと見る  
 SKA2 : 初代天体形成からをしっかりと見る



|        | tomography | power spectrum |
|--------|------------|----------------|
| SKA1 : | $z < 9$    | $z < 20$       |
| SKA2 : | $z < 20$   | $z < 27$       |

# 21cm power spectrum



21cm power spectrum  
 の観測可能性  
 (Mesinger+ 2013)  
 $k=0.1/\text{Mpc}$ ,  $2000h$

LOFAR:

$z < 11$  だいたいモデル

MWA:

$z < 15$  一部のモデルなら

SKA1:

$z < 20$  どんなモデルでも

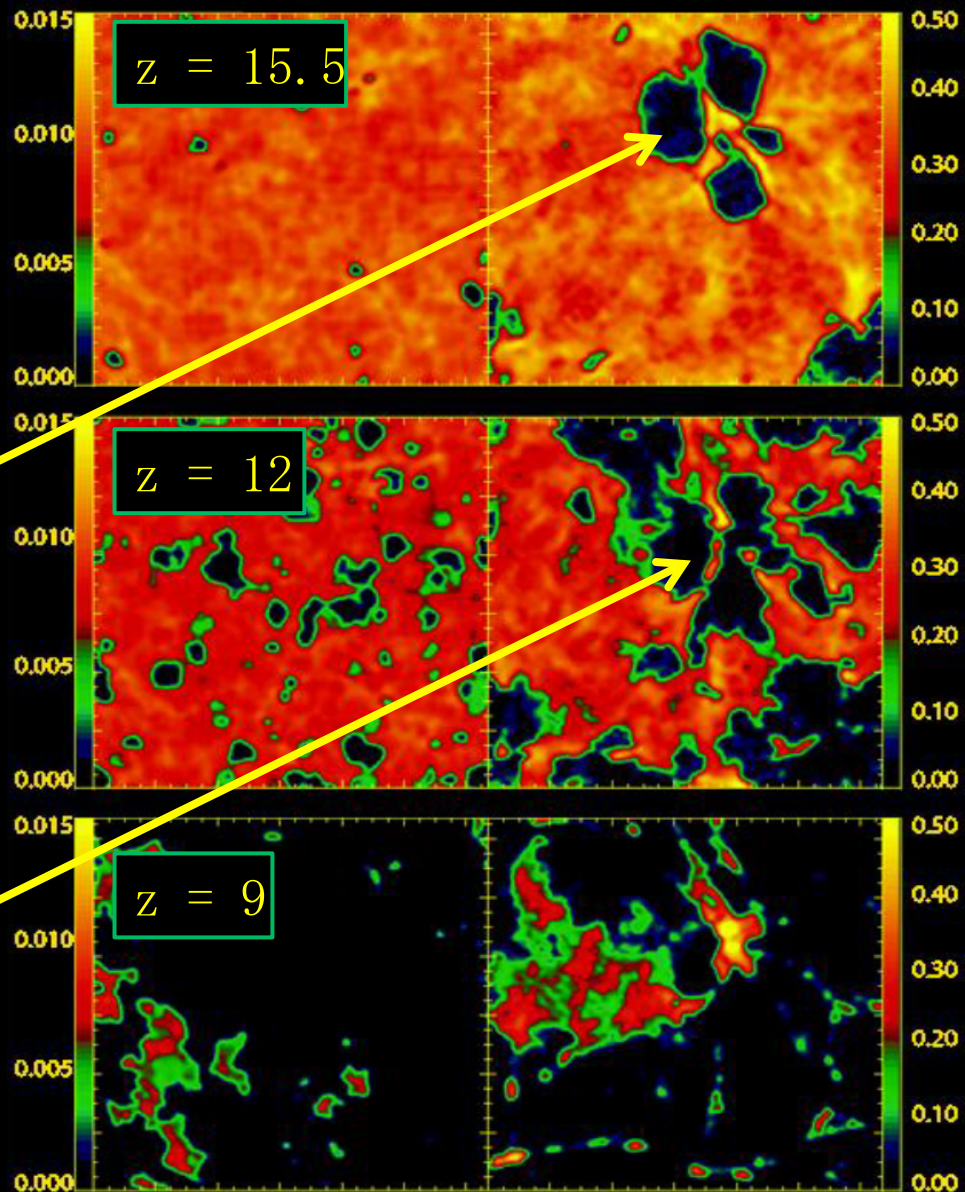
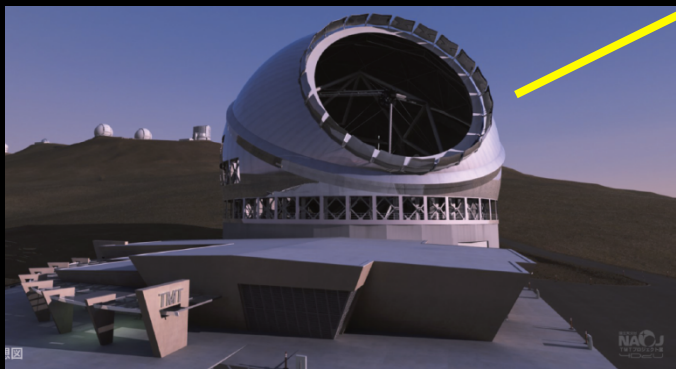
SKA2:

$z < 27$  どんなモデルでも

# 21cm tomography

トモグラフィ

- 天体がどこにあるか、  
どのように分布しているか
- どのように再イオン化が  
進んでいくか、時間発展が  
わかる



# 21cm tomography

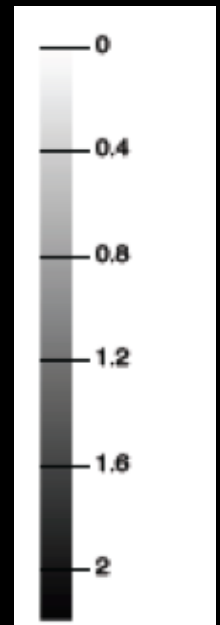
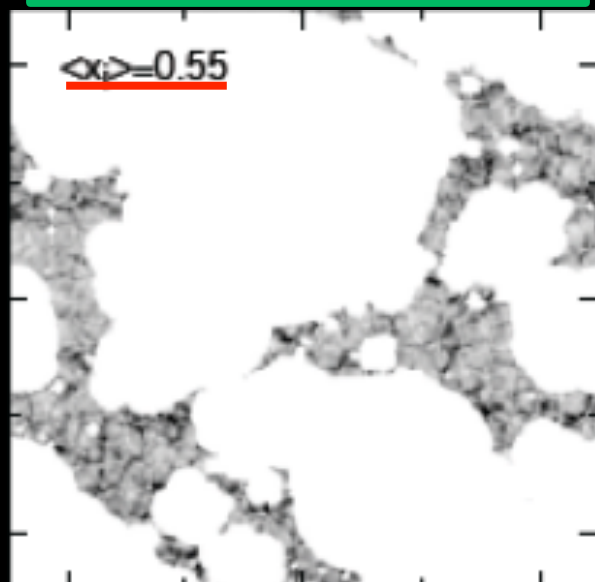
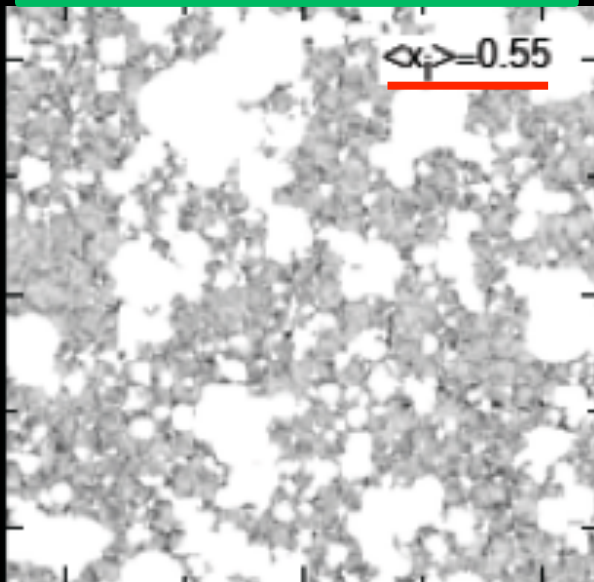
パワースペクトルでは得られない情報

- ・バブルの形状
  - どの質量の銀河が再イオン化に寄与しているか
- ・バブルのまわりは放射？吸収？
  - ブラックホールからのX線の寄与

小質量銀河が支配

大質量銀河が支配

100/hMpc



# 5、まとめ

# まとめ：SKAが挑む宇宙の再イオン化

- これまで未開拓の「宇宙の幼年期」
  - 暗黒時代
  - 初代天体形成期
  - 再イオン化期
- 中性水素21cm線による探索
  - CMBに対する放射、吸収
  - 背景光源による21cm forest
- SKA, pathfinderによる観測
  - pathfinder：再イオン化期を部分的に
  - SKA1：再イオン化期をがっちり
  - SKA2：初代天体形成～再イオン化期をがっちり

# まとめ：SKAが挑む宇宙の再イオン化

多くの分野にわたる興味

- 天体物理

「最初の星ってどういう星なの？」

「最初のブラックホールは？」

「何が再イオン化を起こしたの？」

- 宇宙論

「ゆらぎを3次元的にいっぱい見たい！」

→ 高橋さんのトーク

- 基本物理

「何か変なこと起こってない？」



# SKA-JPメンバーの研究

## 2013年業績

Oyama+ 2013

21cm輝線観測によるニュートリノ質量への制限の予測

Shimabukuro+ 2013

21cm forestによるニュートリノ質量への制限予測

Shiraishi+ 2013

21cm輝線観測による原始磁場への制限の予測

Sekiguchi+ 2013

21cm輝線観測による宇宙ひもへの制限

Ichiki+ 2013

原始磁場が21cm輝線に与える影響

Kohri+ 2013

21cm輝線観測による小スケールゆらぎの測定

Sekiguchi+ 2013

21cm輝線観測による等曲率ゆらぎへの制限

Takeuchi+ 2013

21cm輝線観測による等曲率ゆらぎへの制限

Shimabukuro+ in progress

21cm forestによる再イオン化モデルへの制限の予測

Hasegawa, in progress

輻射流体計算による再イオン化のシミュレーション

Kumazaki+, in progress

LOFARにおける系外点源除去のシミュレーション

