

SKAで探る 宇宙の夜明けと再電離

市來淨與(名大KMI) &
SKA-JP EoR team

overview

- 再電離班と国際サイエンスブック紹介
- イントロダクション
- 国際サイエンスブックより
 - 再電離はいつ起こったのか？
 - 初代星の性質は？
 - いつ初代銀河は現れた？
 - いつEoR銀河は現れた？
- 再電離班の目指すサイエンス
- まとめ



井上進

再電離班 (16人)

吉川耕司

百瀬莉恵子 大内正己

横山修一郎

河野孝太郎
細川隆史

高橋慶太郎
島袋隼士
吉浦伸太郎

矢島秀伸

長谷川賢二 小林将人
竹内努 田代寛之
市來淨與 ('15班長)

MWA
派遣

(1501.04459) The physics of Reionization: processes relevant for SKA observations

B. Semelin & I. Iliev

(1501.04291) Cosmology from the EoR/Cosmic Dawn with the SKA

J. Pritchard, 市來, A. Mesinger et al.

(1501.04203) HI tomographic imaging of the Cosmic Dawn and EoR with SKA

G. Mellema, L. Koopmans, H. Shukla et al.

(1501.04213) EoR modelling and simulations for SKA

I. Iliev, M.G. Santos, A. Mesinger et al.

国際サイエンスブック (1)

(1501.04247) SKA-EoR correlations and cross correlations:kSZ, radio galaxies, and NIR background

V. Jelic, B. Ciardi, 田代 et al.

(1501.04246) Imaging HII Regions from Galaxies and Quasars during Reionisation with SKA

J. S. B. Wyithe, P. M. Geil, & H. Kim

(1501.04141) Probing First Galaxies and Their Impact on the IGM through the 21-cm Observation of the Cosmic Dawn with the SKA

K. Ahn, A. Mesinger, M. A. Alvarez et al.

(1501.04425) 21cm Forest with the SKA

B. Ciardi, 井上(進), K. J. Mack et al.

国際サイエンスブック (2)

(1501.04340) All-sky signals from recombination to reionization with the SKA observations

R. Subrahmanyan, N. U. Shankar, J. Pritchard et al.

(1501.04104) Bulk Flows and End of the Dark Ages with the SKA

U. Maio, B. Ciardi, & L. Koopmans

(1501.04106) Constraining the Astrophysics of the Cosmic Dawn and the EoR with the SKA

A. Mesinger, A. Ferrara, B. Greig et al.

(1501.04429) Cosmic Dawn and Epoch of Reionization Foreground Removal with the SKA

E. Chapman, A. Bonaldi, G. Harker et al.

A background image featuring a bright, glowing lightning bolt striking down from the top right corner, with a jagged, crackling path extending across the frame. The overall color palette is light blue and white, giving it a clean, high-tech appearance.

イントロダクション

インフレーション ... 宇宙の構造の種と背景重力波の誕生

再加熱 ... 火の玉宇宙の誕生, QCD相転移 ... ハドロン生成

元素合成(~3分) ... ヘリウム原子核生成

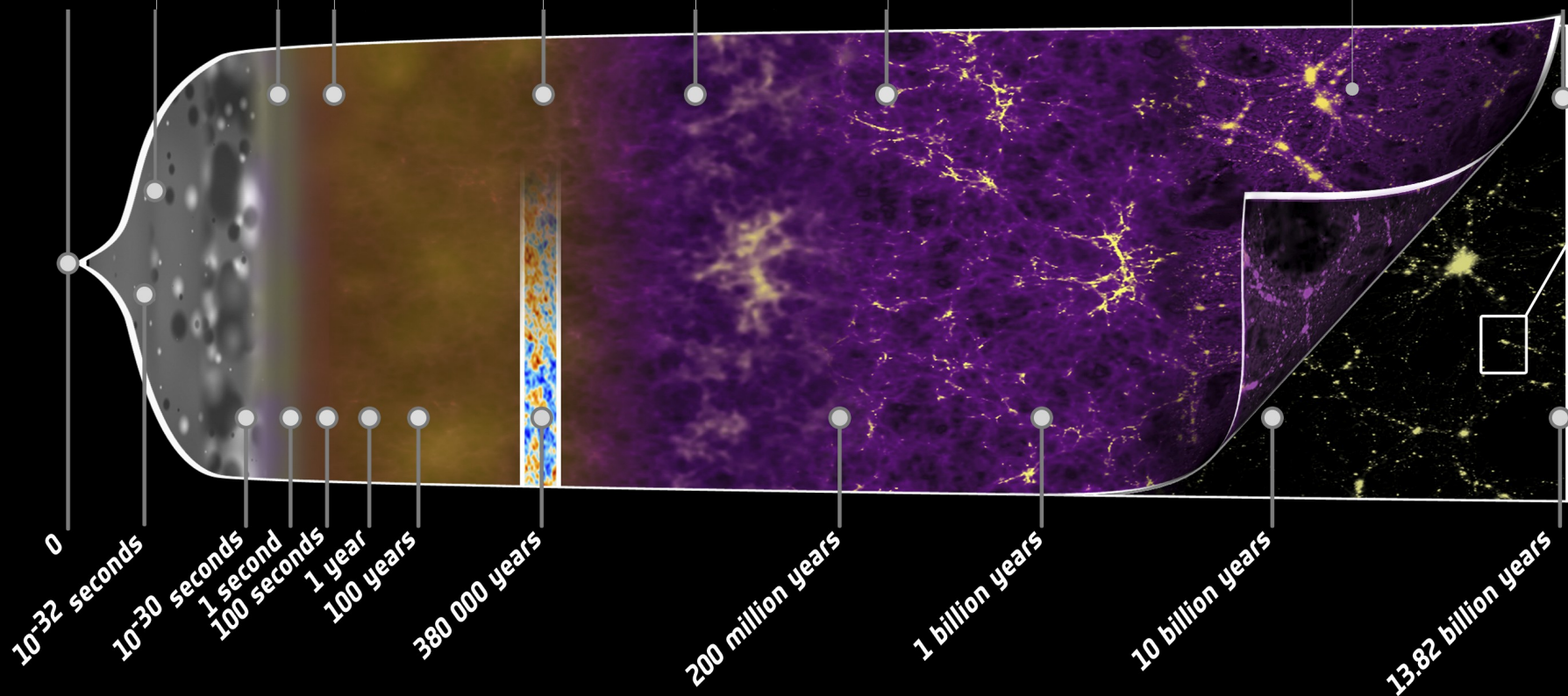
晴れ上がり(38万年) ... 宇宙背景輻射

暗黒時代(<1億年くらい) ... 輝く天体がない時代

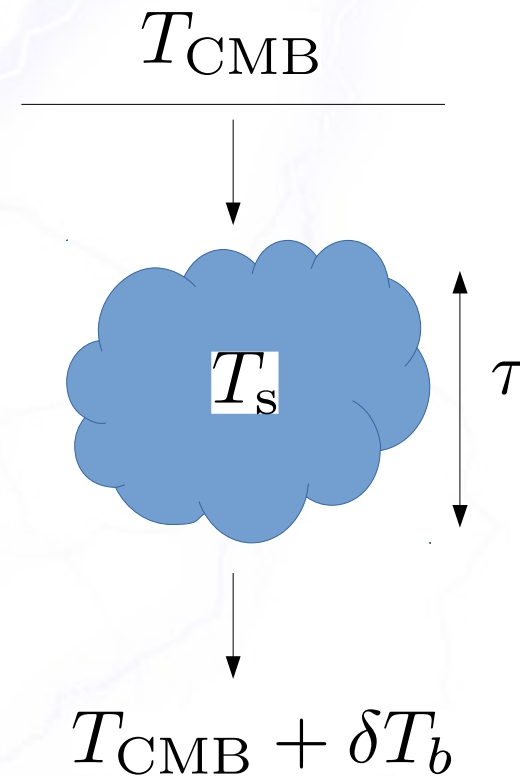
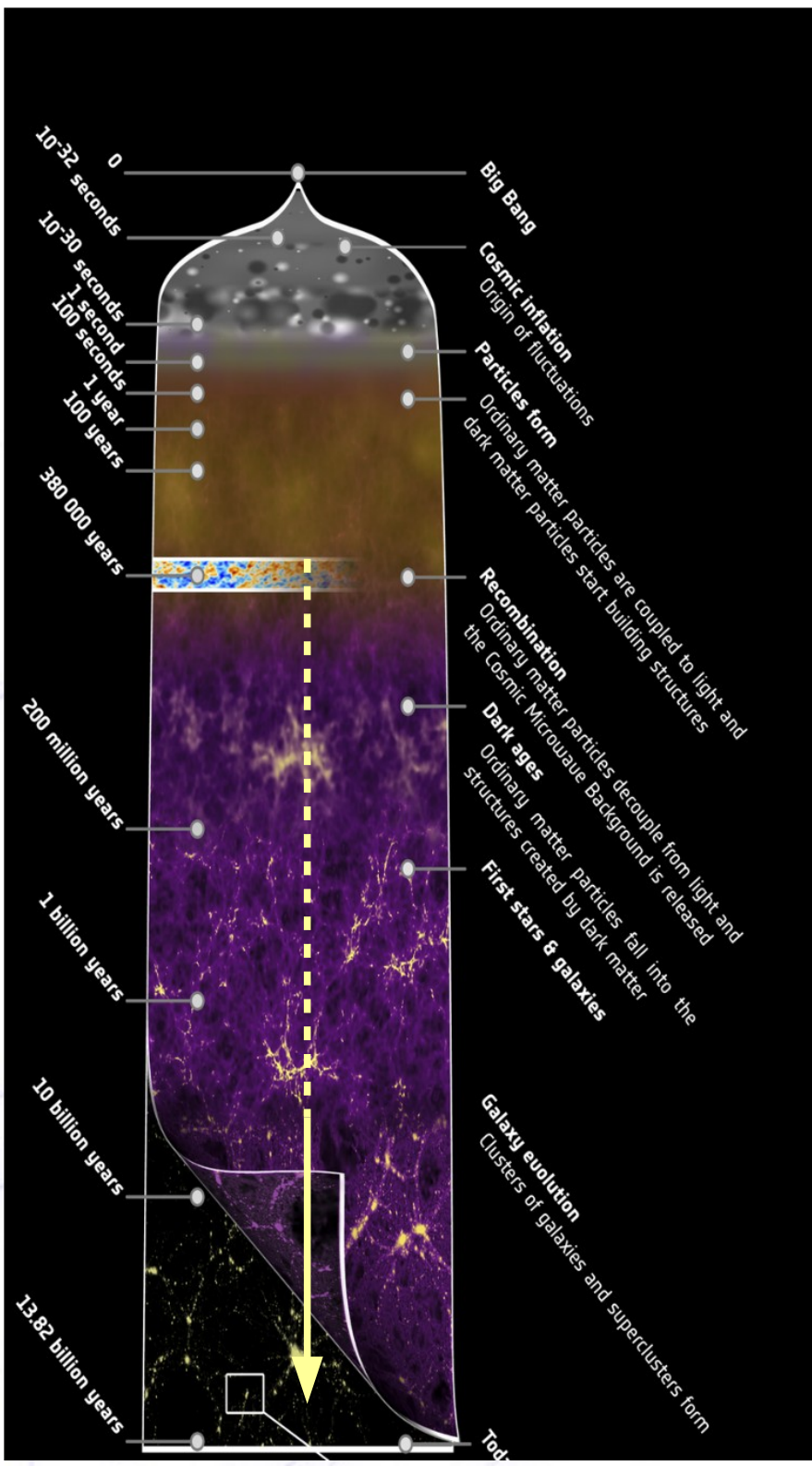
初代天体形成と再電離(1~10億年)

第二インフレーション(~70億年)

宇宙の誕生



HIの放射吸収 背景光はCMB (T_{CMB})



$$\delta T_b = \frac{(T_s - T_{\text{CMB}})}{(1 + z)} (1 - e^{-\tau})$$

宇宙論

$$\delta T_b = \frac{(T_s - T_{\text{CMB}})}{(1+z)} (1 - e^{-\tau})$$

$$\approx 27[\text{mK}] x_{\text{HI}} \frac{(T_s - T_{\text{CMB}})}{T_s} \times (1 + \delta) \left(\frac{H}{\frac{dv_{\parallel}}{dr_{\parallel}}} \right)$$

宇宙物理

中性率 x_{HI}

スピン温度 T_s

↳ ガスの状態
周囲の輻射場が重要
(長谷川さん、矢島さん、島袋さんトーク)

密度揺らぎ δ

速度勾配 $dv_{\parallel}/dr_{\parallel}$

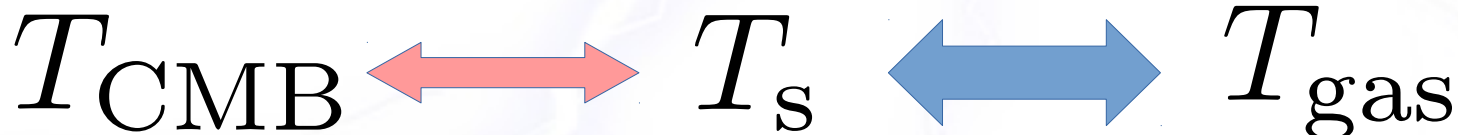
↳ 非等方 $P(k) \wedge$
(山内さんトーク)

スピン温度の時間変化

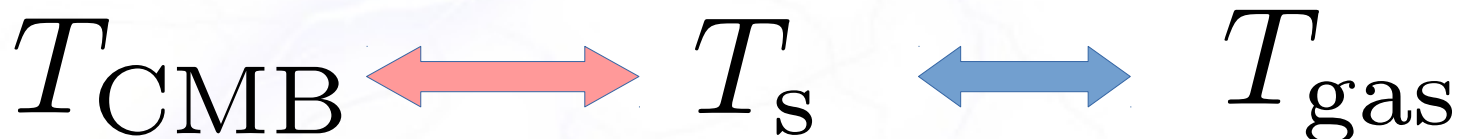
放射結合

衝突結合

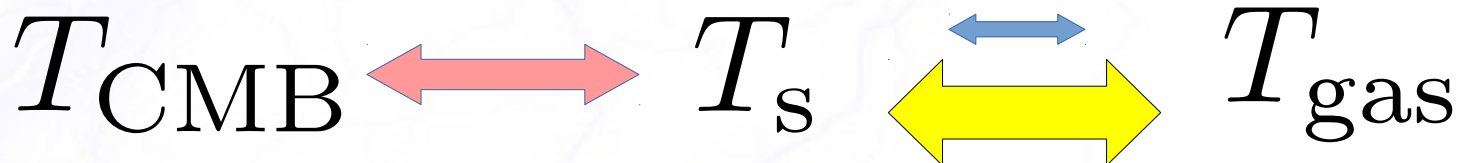
$z \gtrsim 300$



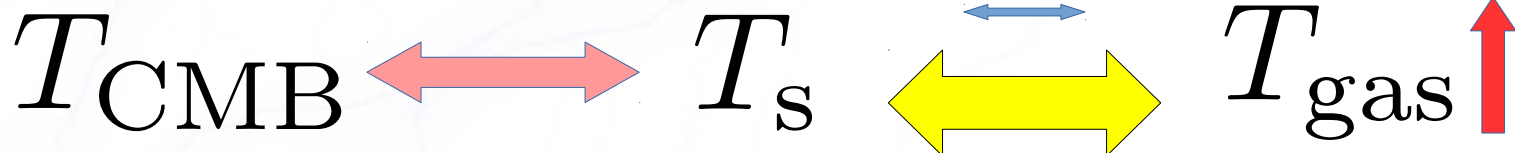
$300 \gtrsim z \gtrsim 25$



$25 \gtrsim z$



$17 \gtrsim z$



L α 結合

21cm

イオン化率

スピン温度

密度揺らぎ

clumpiness 紫外線 $L\alpha$ 線 X線

・脱出確率

・feedback

・LW radiation

星形成史

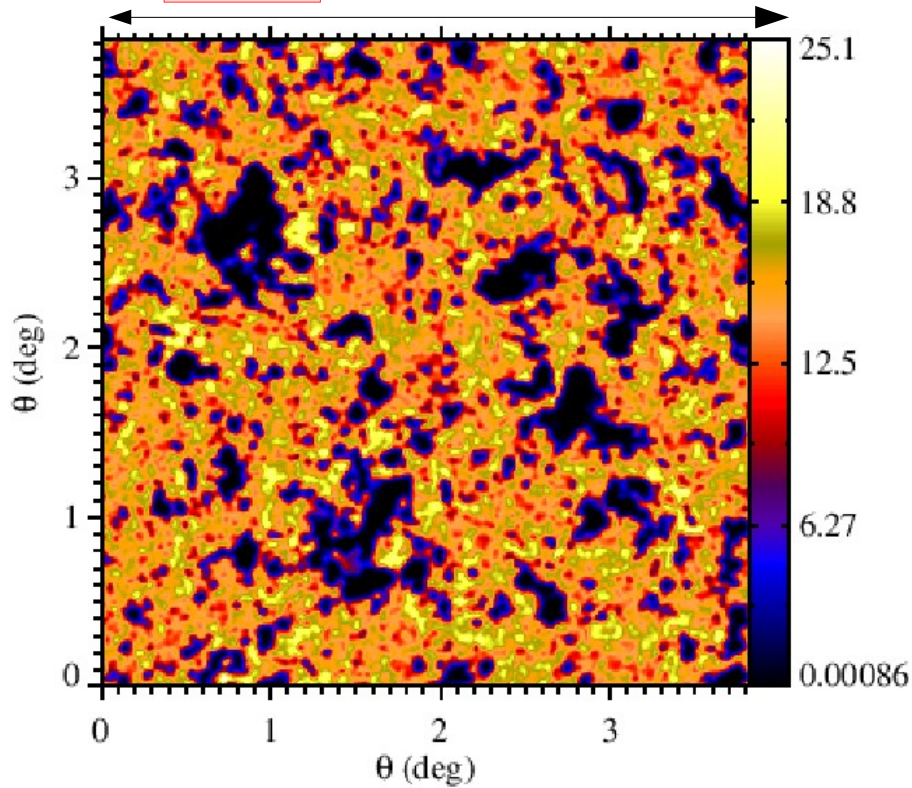
初期質量関数, 最小ハロ一質量

宇宙論

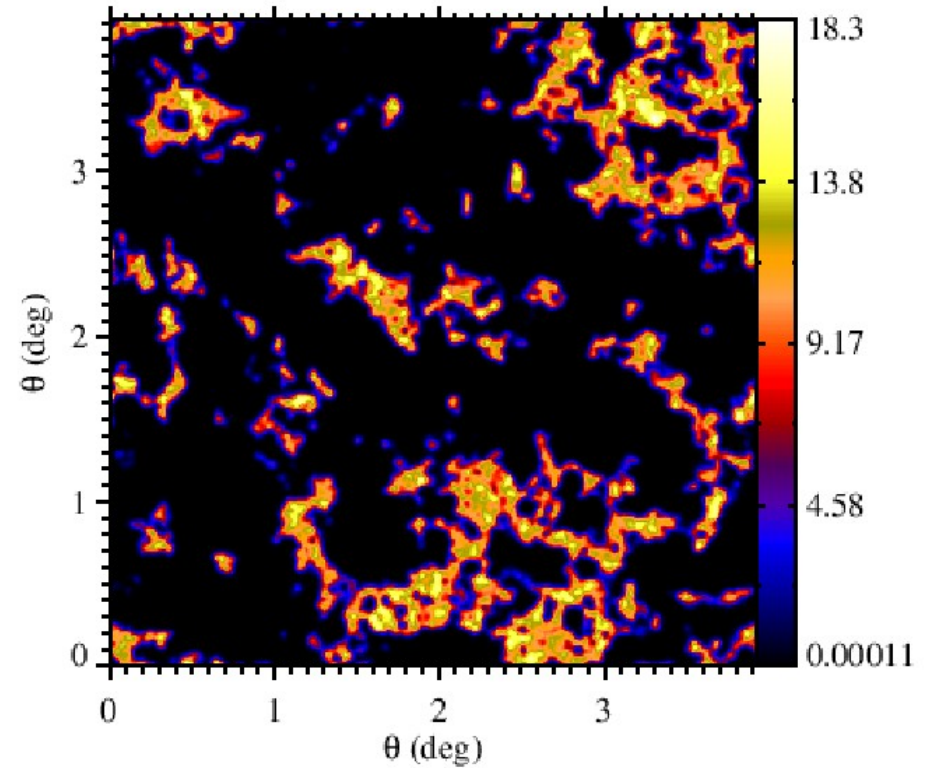
予想マップ

Mellema & Iliev

425 Mpc δT (mK) at $z=7.5$ (167 MHz)



δT (mK) at $z=6.8$ (182 MHz)



- 密度揺らぎは1度
- イオン化 bubbleは10分
- 広い視野(QSO探査)
- mKの温度揺らぎ



5x5平方度の視野
数分の分解能
mKの感度

SKA-Lowへの要求

$$C_{\ell}^{\text{noise}} \approx \left(\frac{T_{\text{sys}}}{\sqrt{Bt_{\text{int}}}} \right)^2 f_{\text{cover}}^{-2} \ell_{\text{max}}^{-2}$$

熱雑音

$$f_{\text{cover}} \equiv A_{\text{eff}} N_{\text{dish}} / A_{\text{core}}$$
$$\ell_{\text{max}} \simeq D_{\text{core}} / \lambda$$

1. A_{core} は小さい方がよい \rightarrow $A_{\text{core}} = (2\text{km})^2$
2. 角度分解能: 3分スケール \rightarrow $D_{\text{core}} \gtrsim 2\text{km}$
3. FoV: 5x5平方度@100MHz \rightarrow $A_{\text{eff}} = (35\text{m})^2$
4. mK感度: $t_{\text{int}} = 1000\text{h}$ (秋の夜のみ--> 数年間)

SKA-Lowへの要求

$$C_{\ell}^{\text{noise}} \approx \left(\frac{T_{\text{sys}}}{\sqrt{Bt_{\text{int}}}} \right)^2 f_{\text{cover}}^{-2} \ell_{\text{max}}^{-2}$$

熱雑音

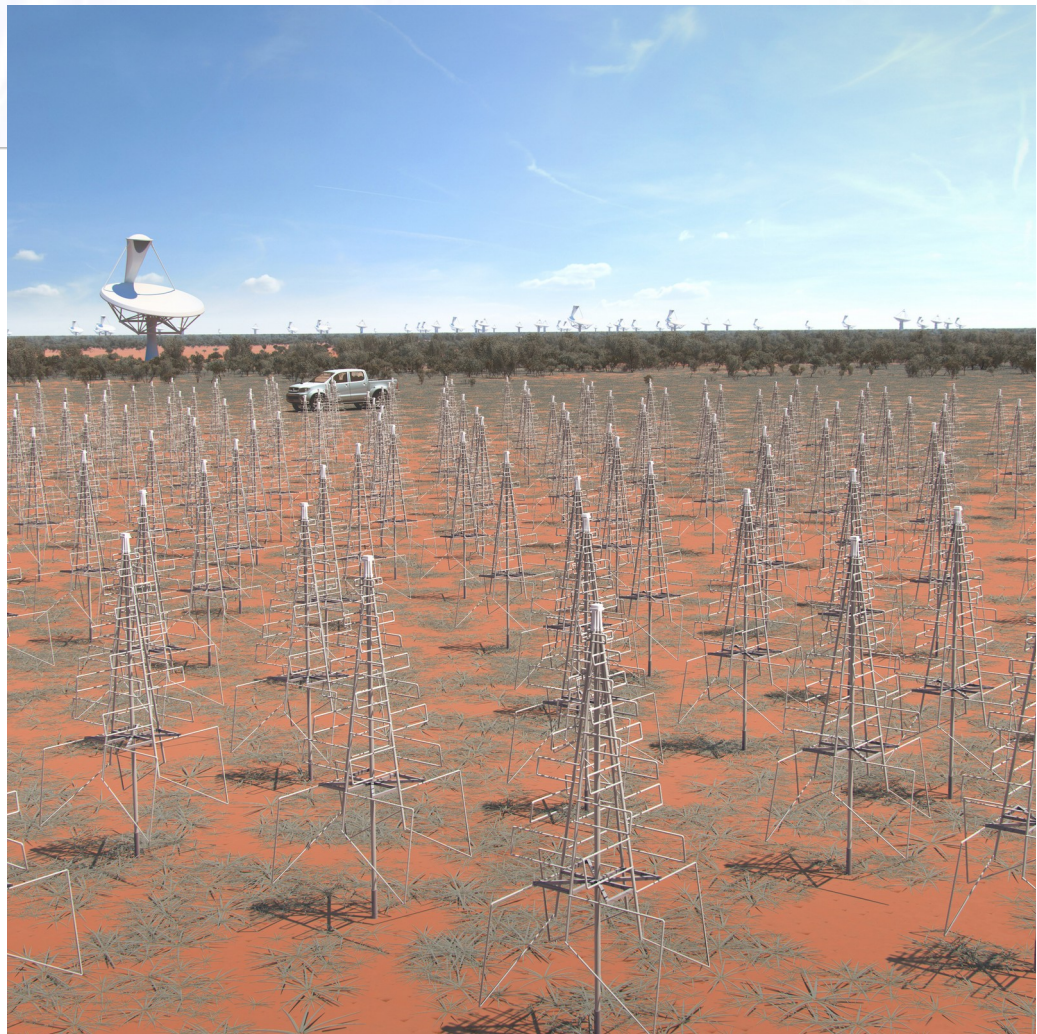
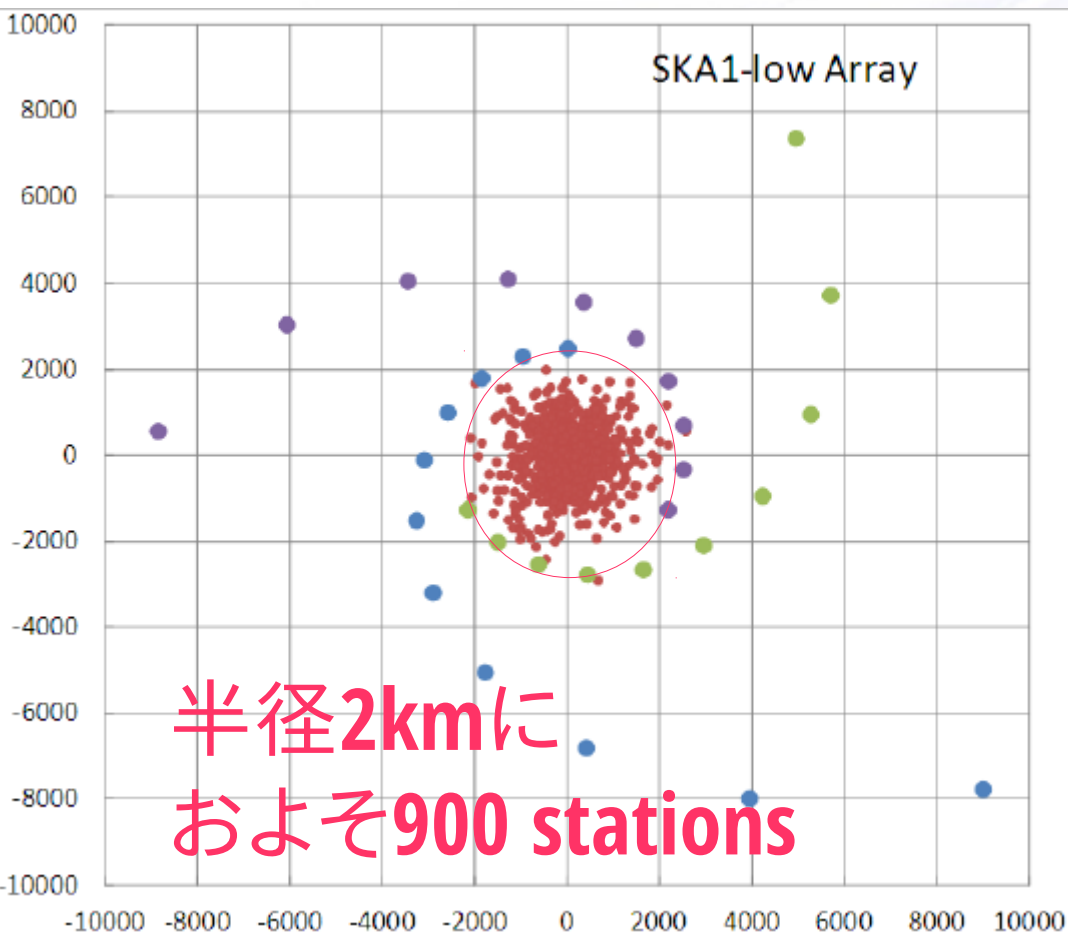
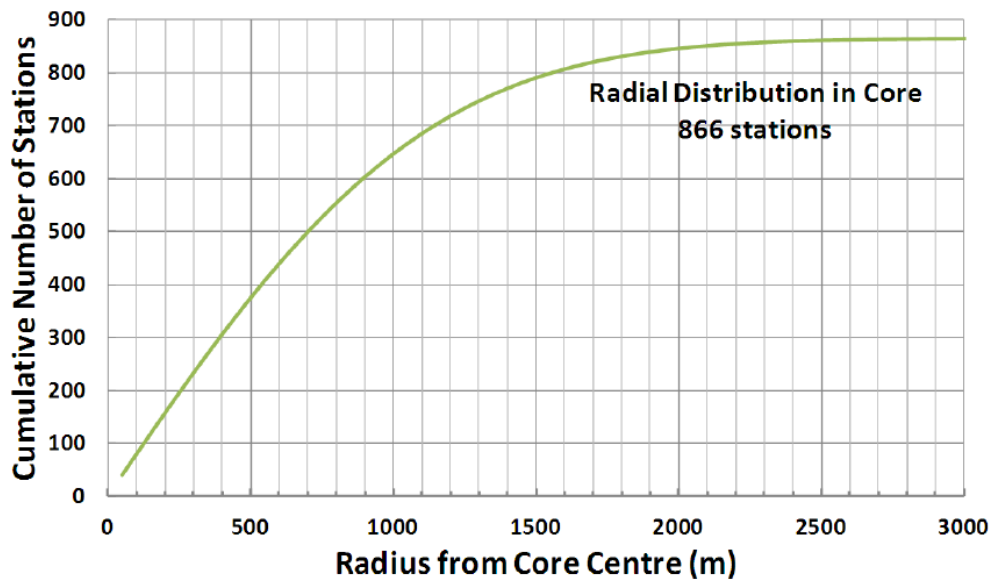
$$f_{\text{cover}} \equiv A_{\text{coll}}/A_{\text{core}}$$
$$\ell_{\text{max}} \simeq D_{\text{core}}/\lambda$$

5. 周波数: $z=27-3 \rightarrow f=50-350\text{MHz}$
6. バンド幅: light-cone効果を抑えつつ $\rightarrow 10\text{MHz}$
7. 周波数分解能: 角度分解能と同じ程度 $\rightarrow 0.5\text{MHz}$

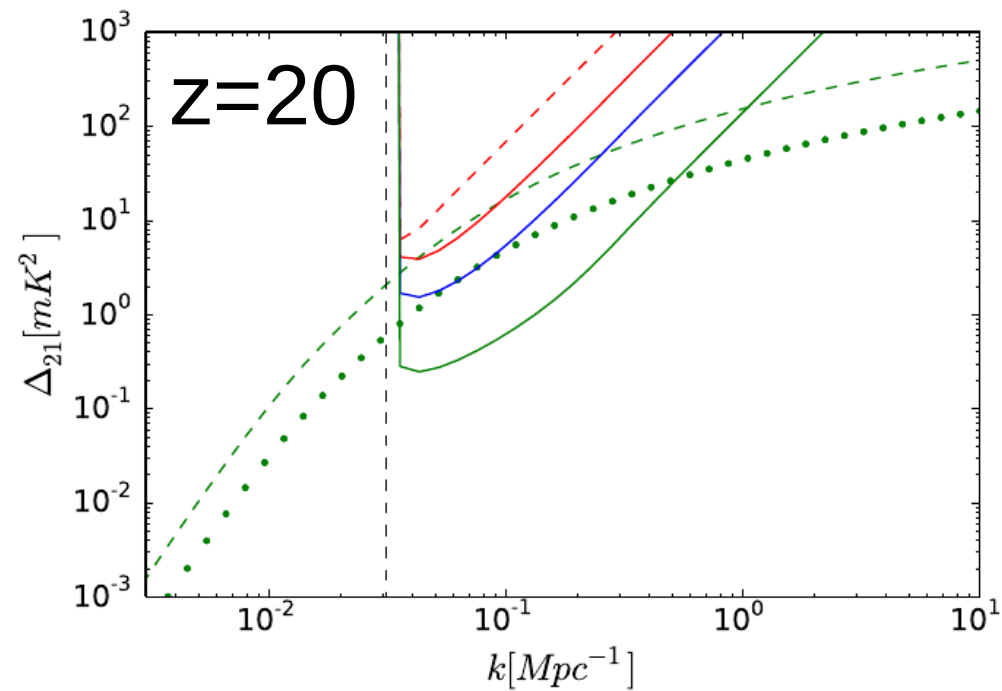
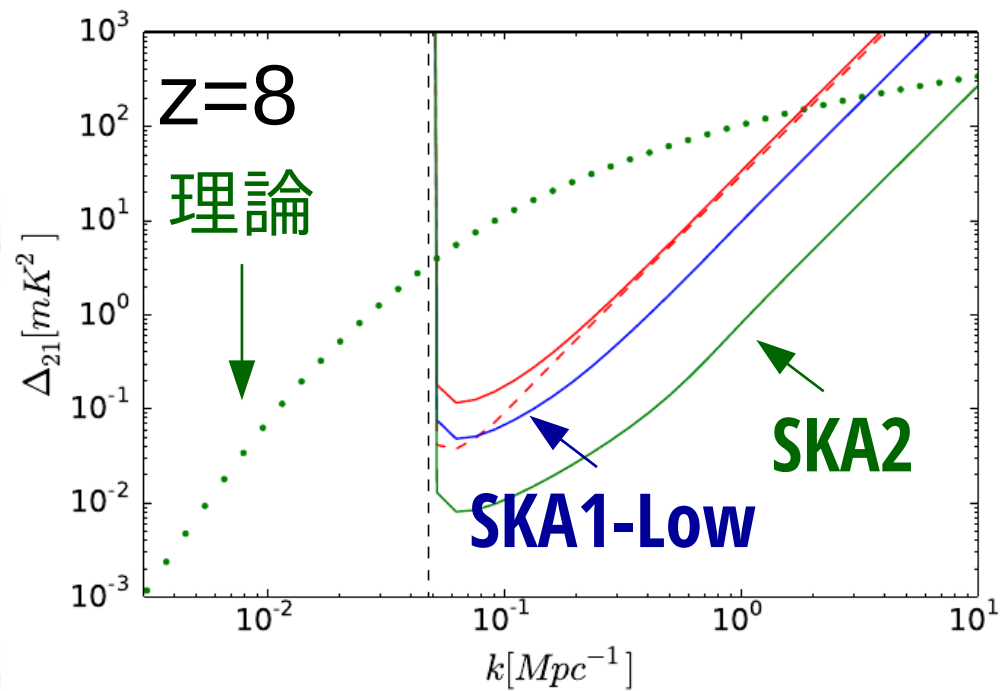
要求まとめ

- 周波数: 50 – 300 MHz
- 分解能: 1kHz (可能な限り), 1sec
- 角度分解: 数分 (1kHz for 21cm forest studies and RFI flagging)
- 観測時間: 1000h
- 偏光漏込: $< 10^{-4}$
- 視野: 5 x 5 平方度 (2km core)
- ターゲット: South Galactic Pole
(MWA, PAPERの結果次第)

SKA1-Low

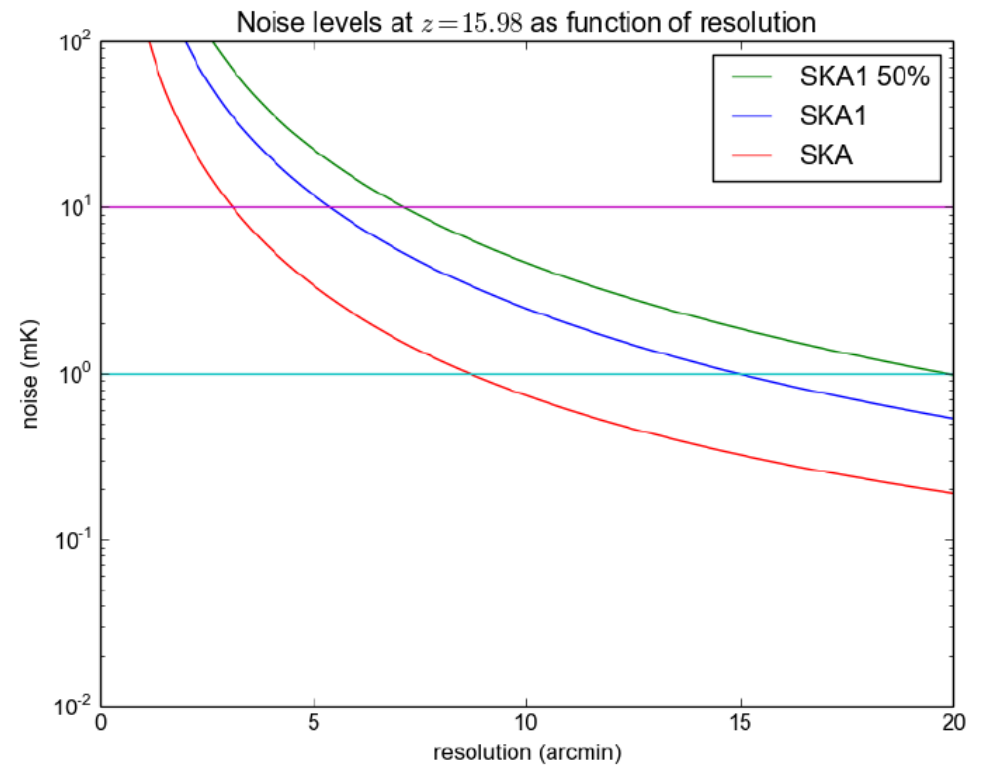
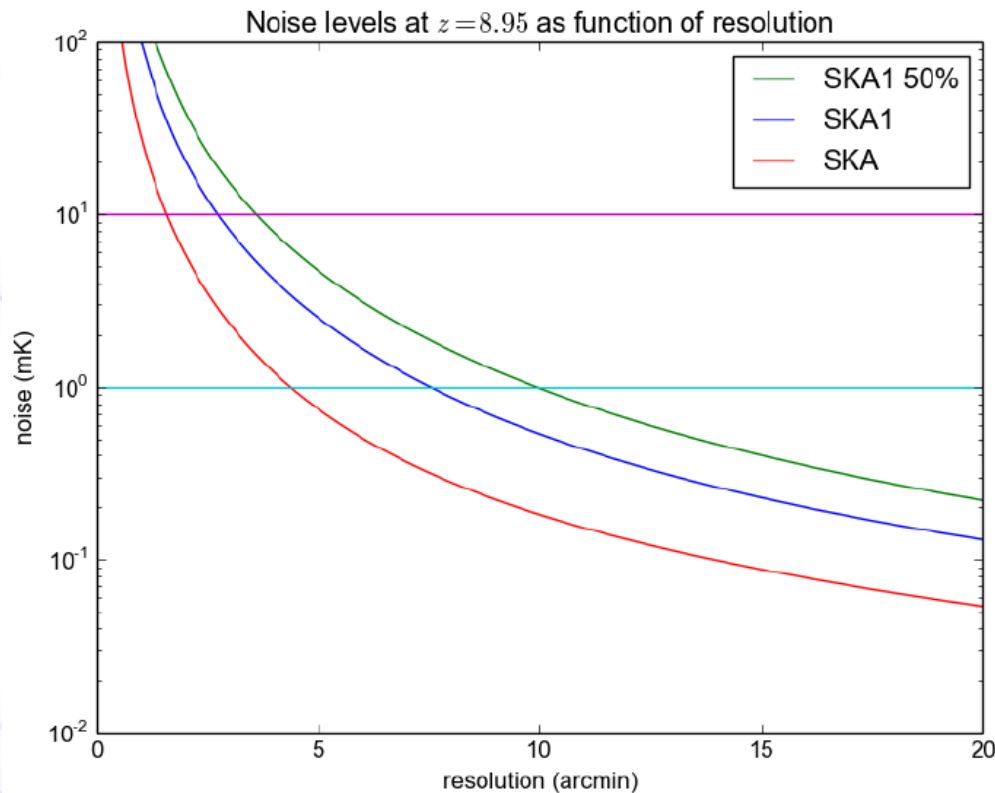


SKAの性能:P(k)



Low- z はSKA1, High- z はSKA2で

SKAの性能:imaging

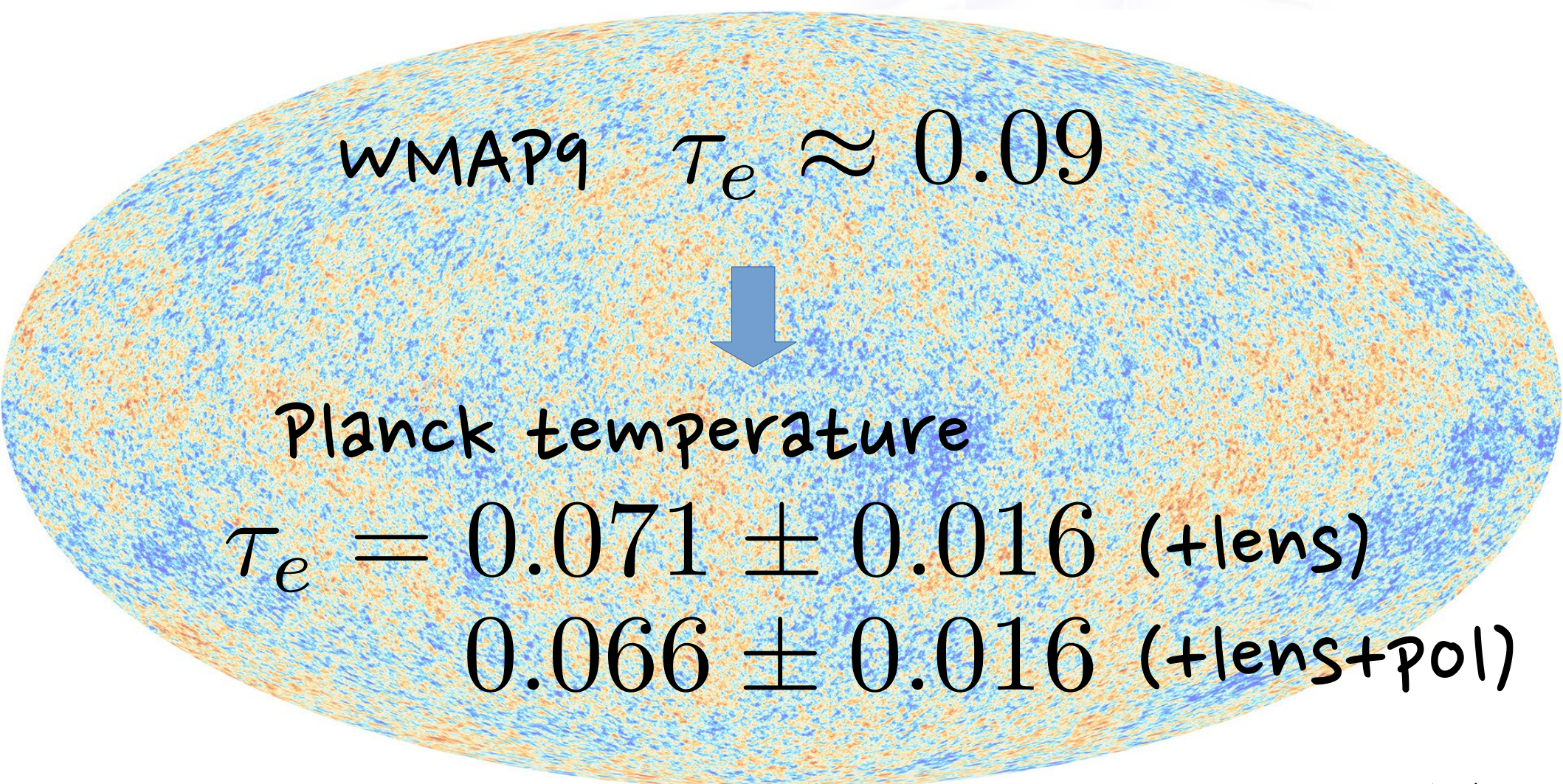


$$\delta\theta \sim 5' \quad \delta T \lesssim 3\text{mK} \quad @z=9$$

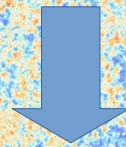
A background image featuring a bright, jagged lightning bolt striking down from the top right corner, with a soft, glowing aura around it. The rest of the background is a light, textured blue-grey color.

再電離はいつおこったのか？

good news from Planck



WMAP9 $\tau_e \approx 0.09$



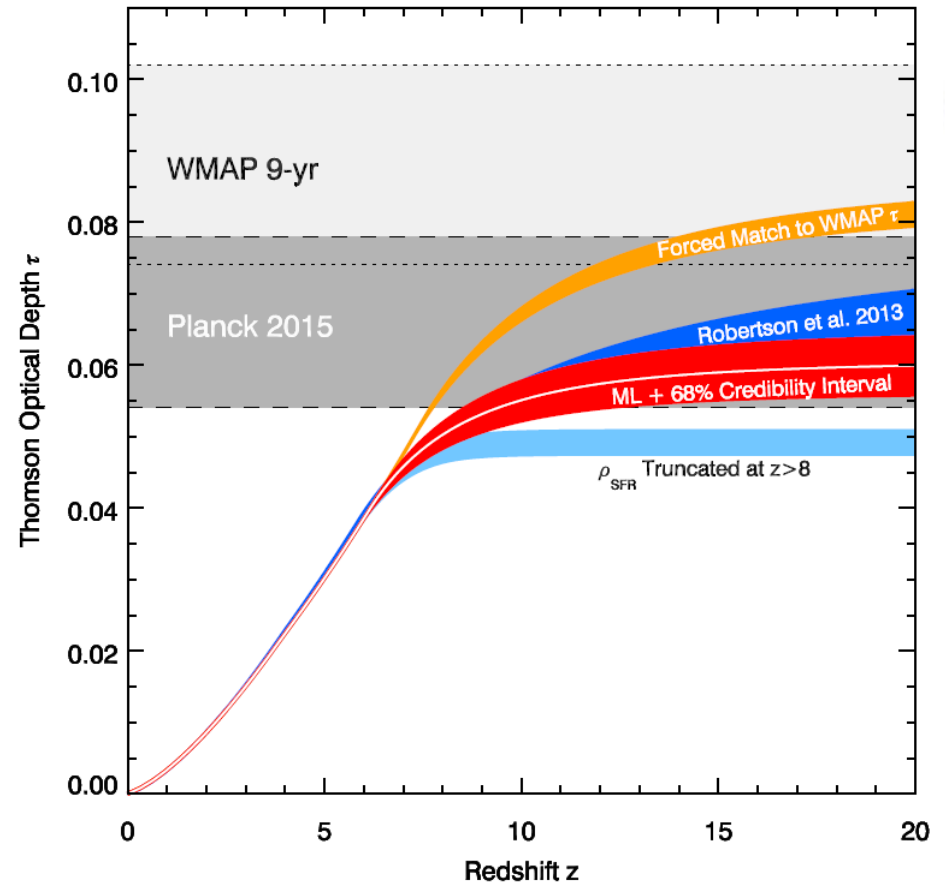
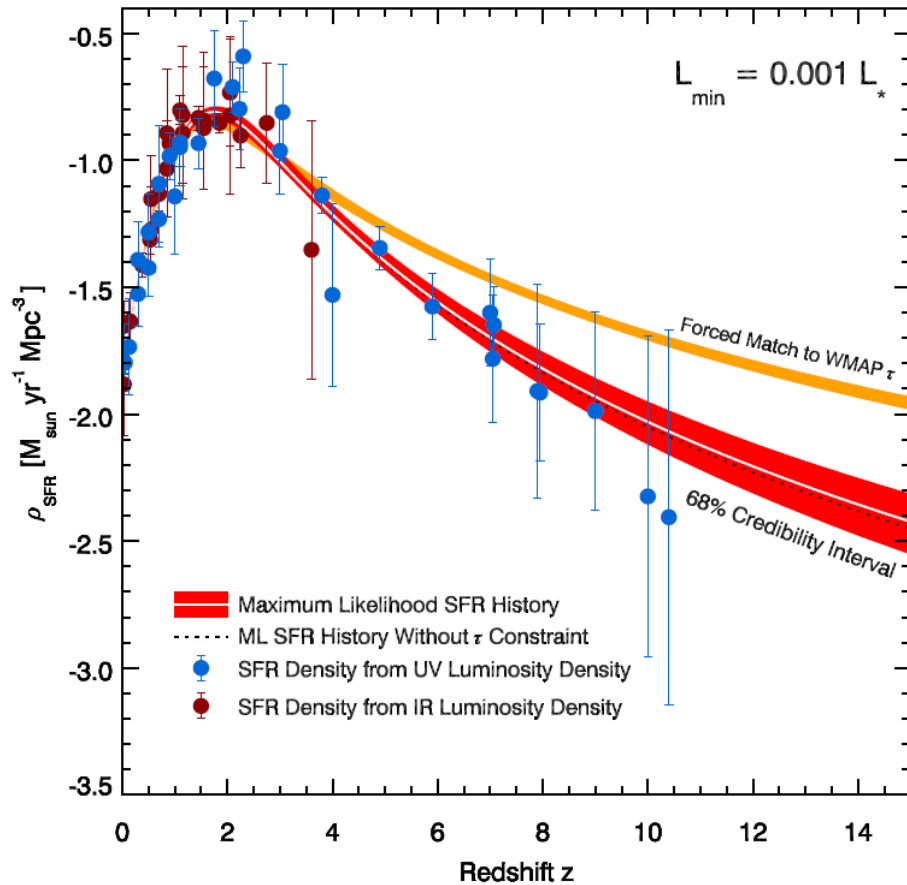
Planck temperature

$$\tau_e = 0.071 \pm 0.016 \text{ (+lens)}$$

$$0.066 \pm 0.016 \text{ (+lens+pol)}$$

瞬間的再電離モデル $\rightarrow z_{\text{re}} = 8.8^{+1.7}_{-1.4}$

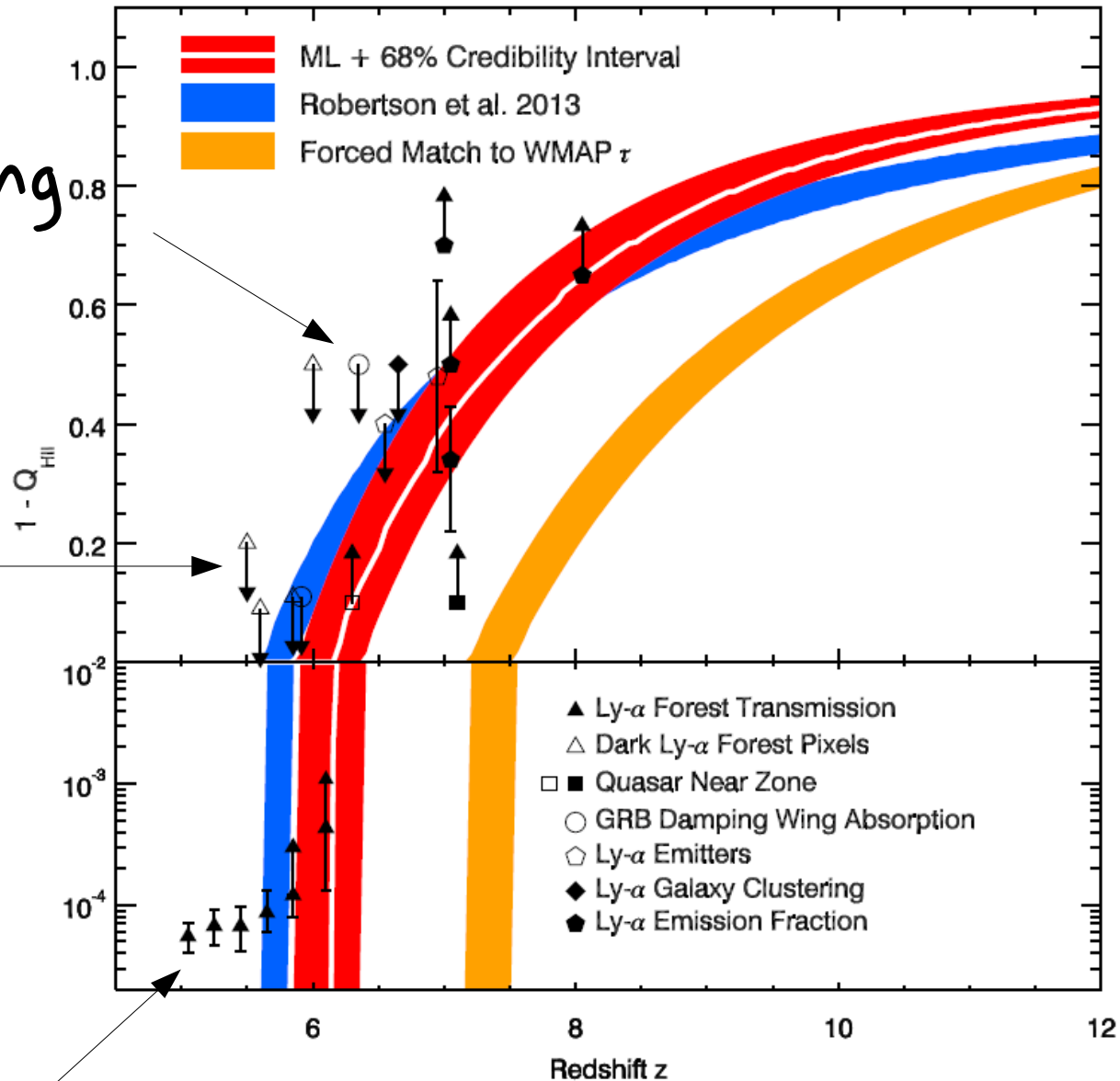
good news from Planck



good news from Planck

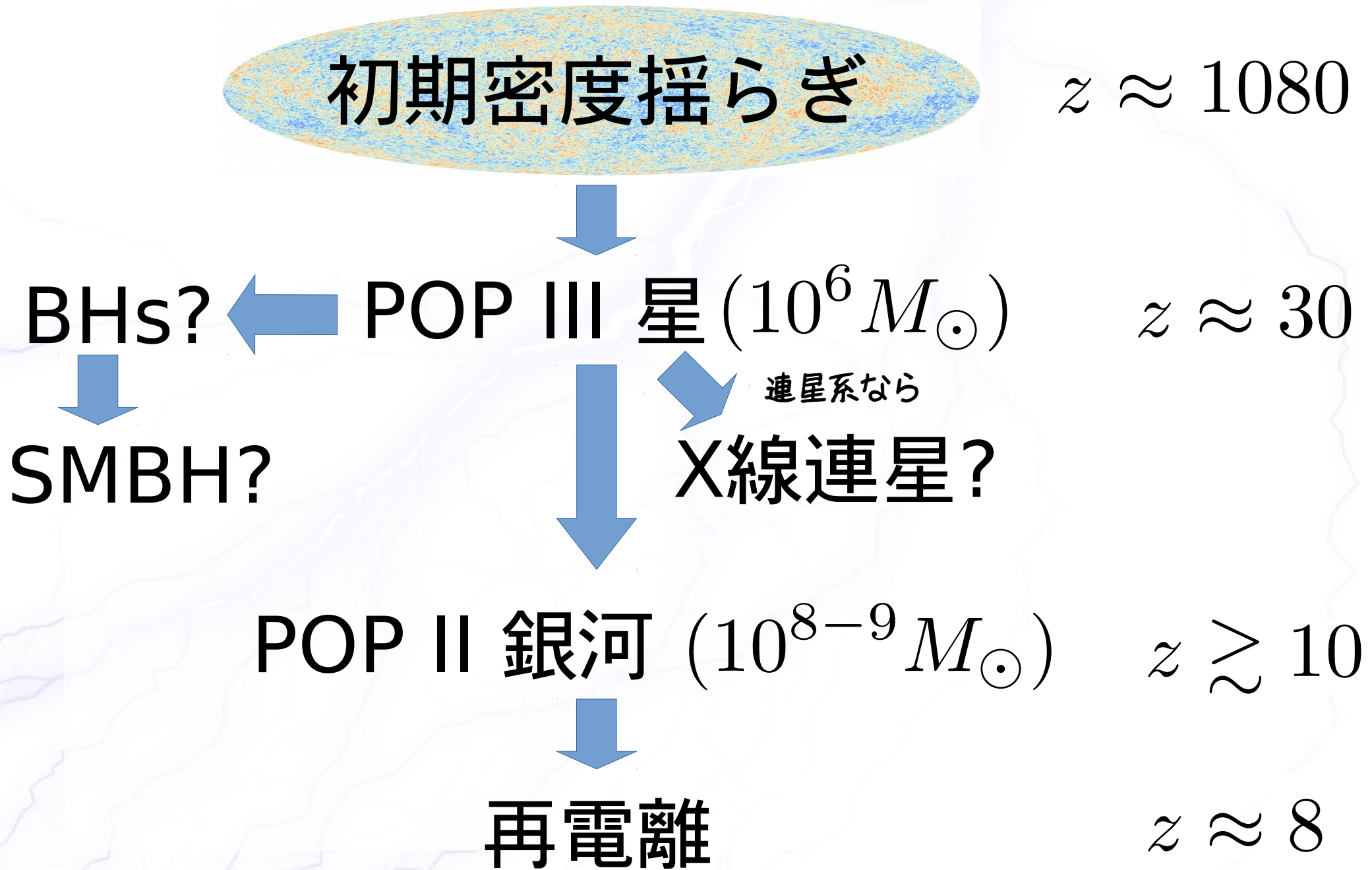
GRB damping wing

Dark Ly- α pixels



Ly- α forest

標準シナリオ



再イオン化

Ly α 結合

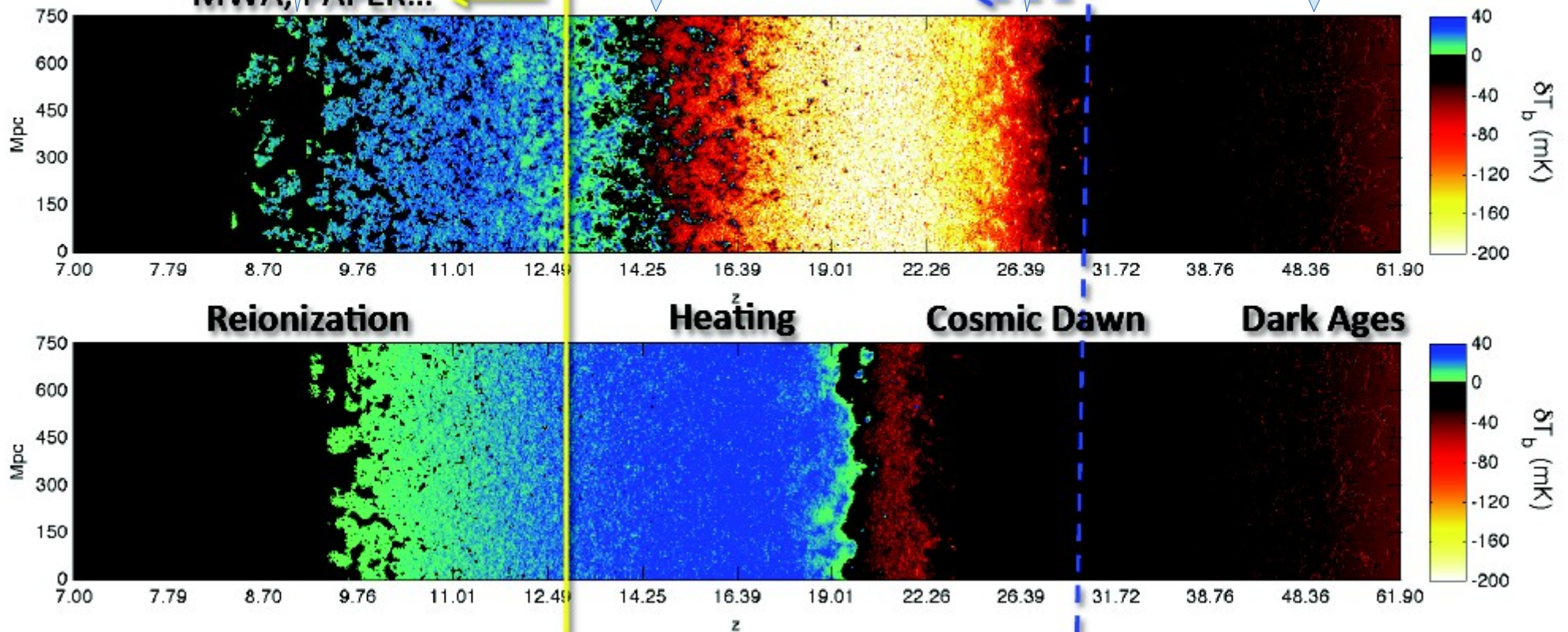
$$T_{\text{gas}} \approx T_{\text{spin}}$$

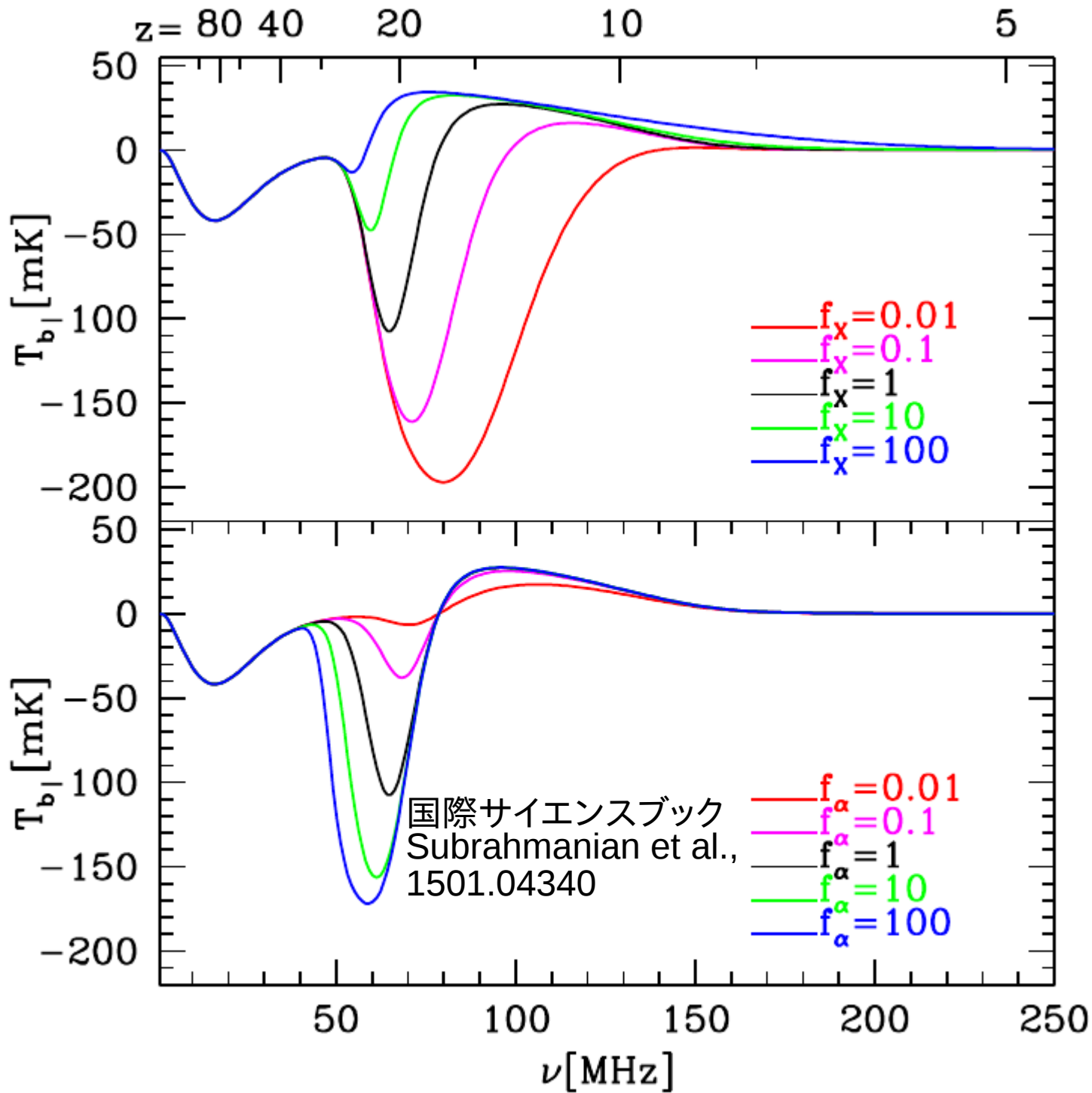
IGM加熱

脱結合

1st gen LOFAR,
MWA, PAPER...

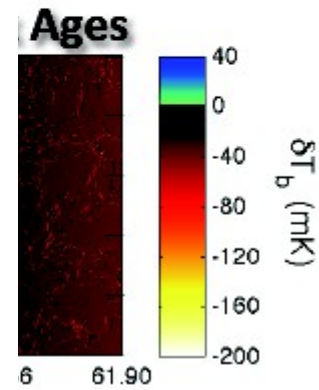
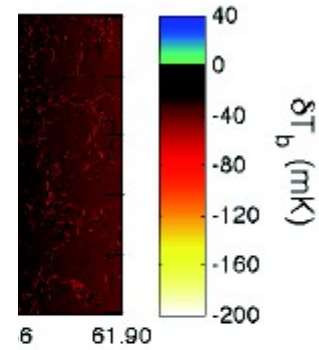
SKA





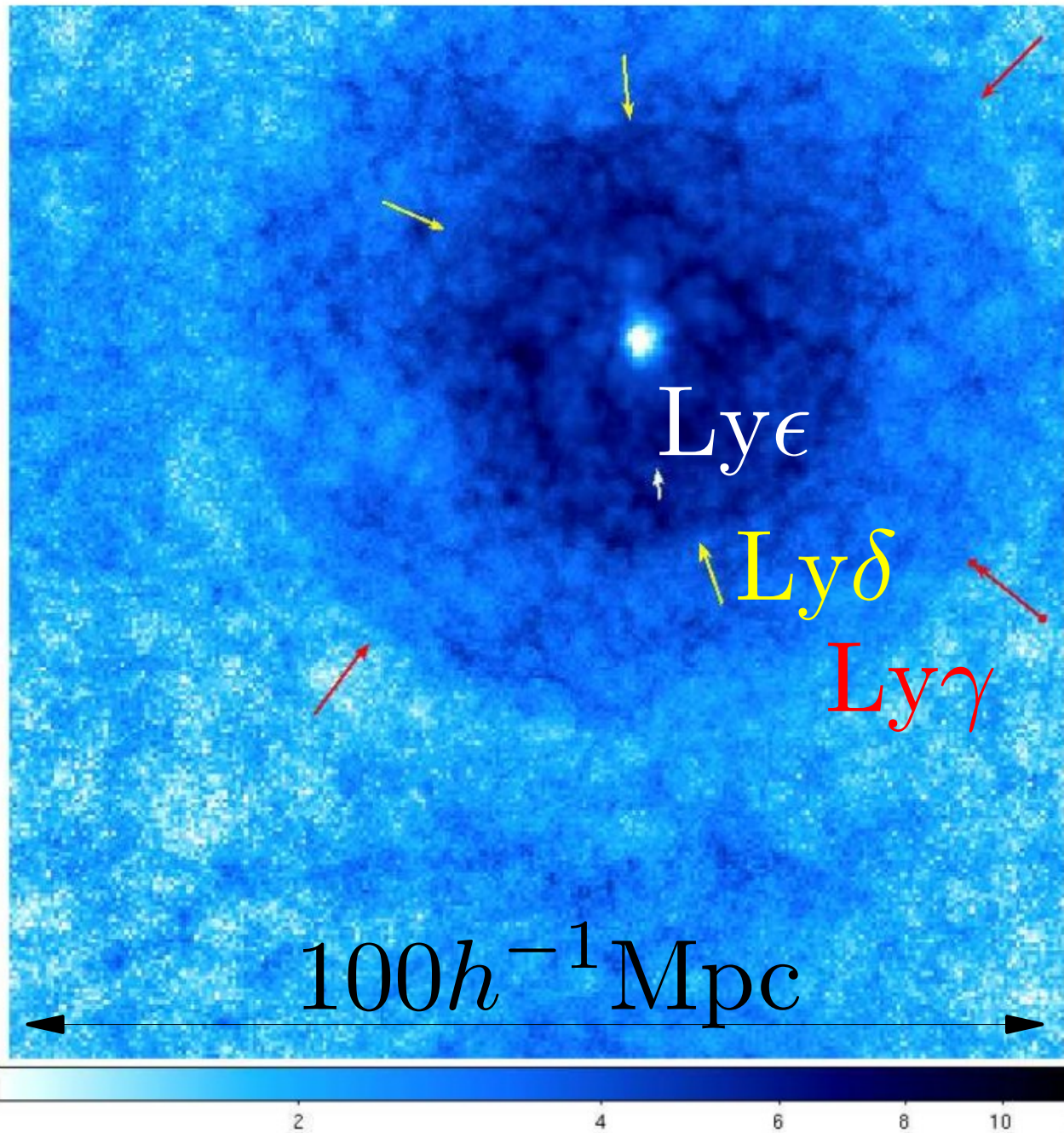
国際サイエンスブック
 Subrahmanian et al.,
 1501.04340

説結合

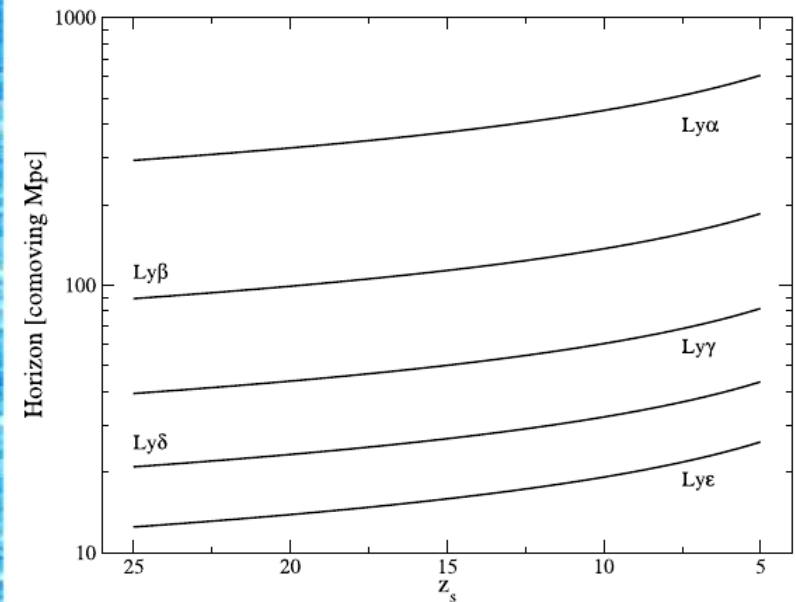


いつ初代銀河が現れた？
初代星は連星系か？
そこからのUV, Xの性質は？

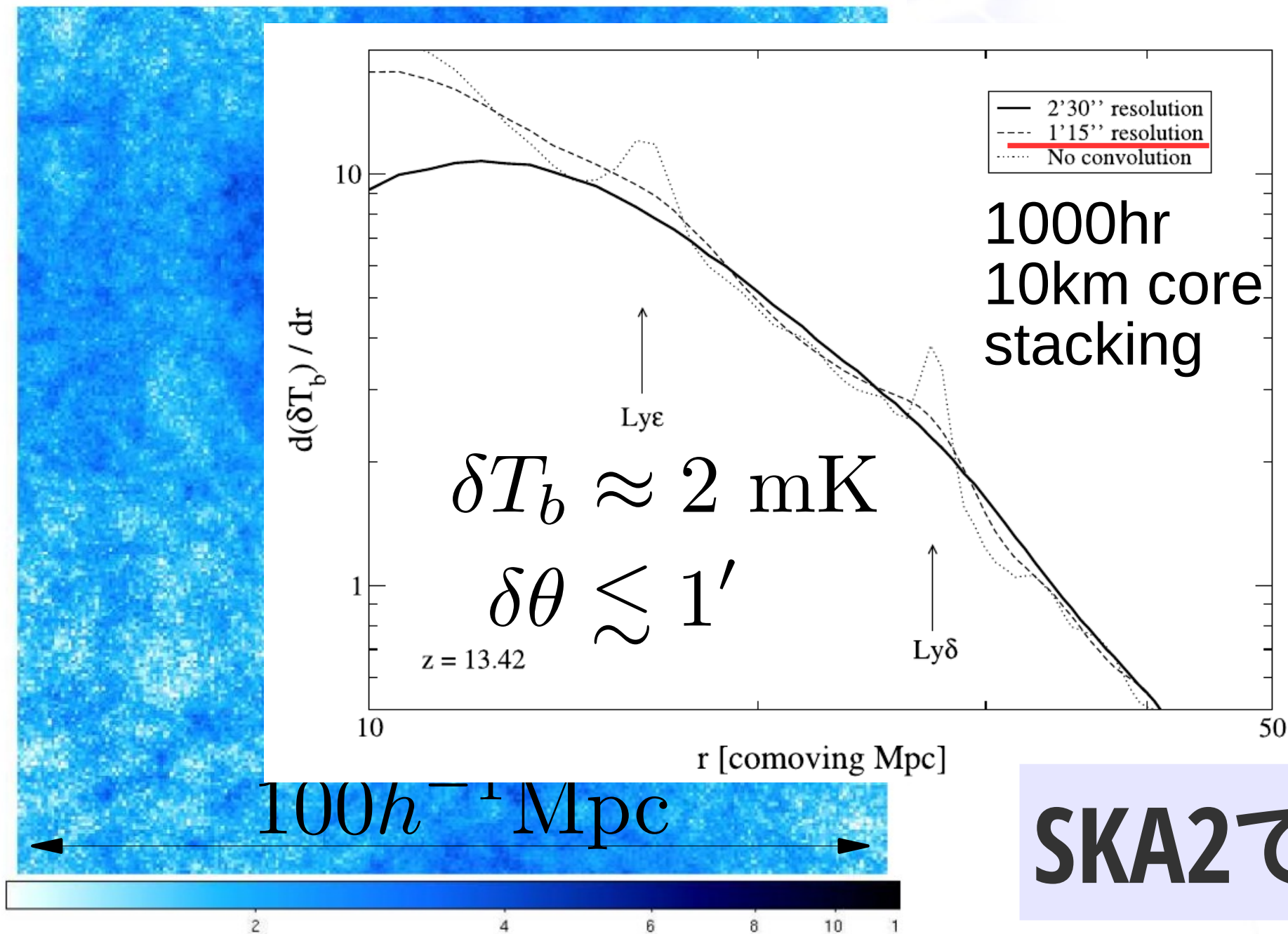
Ly horizons (Vonlanthen +, A&A 2011)



初代天体周りはどう見えるか？



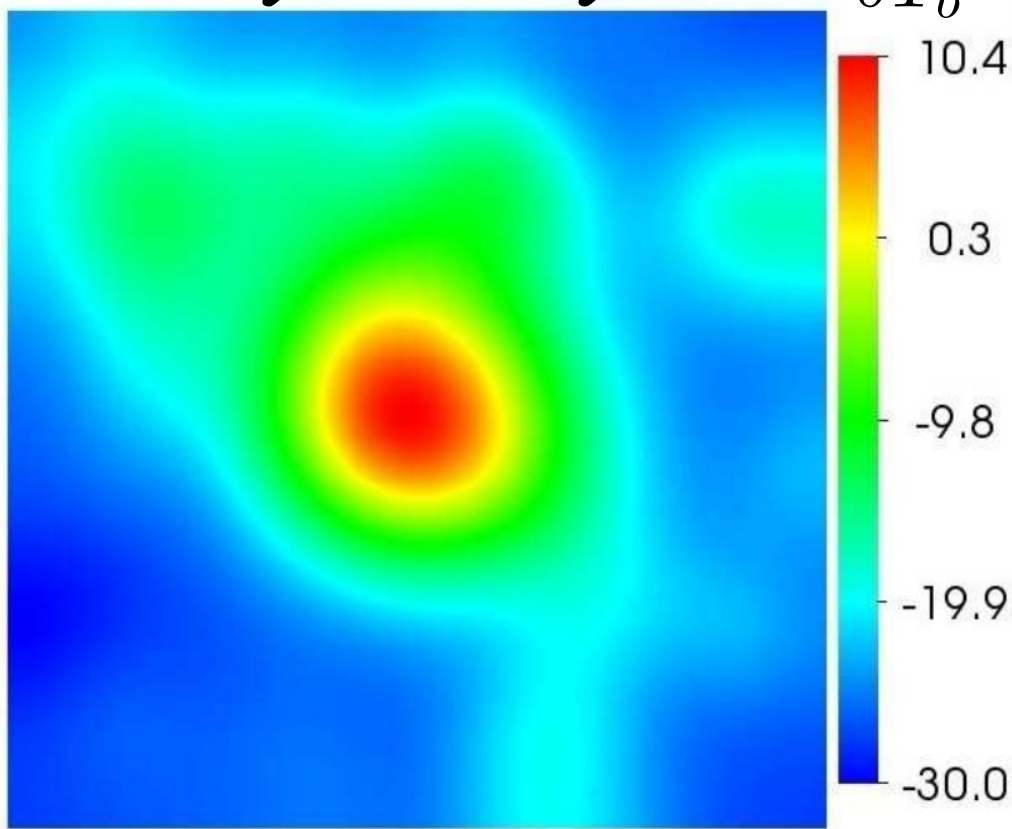
Ly horizons (Vonlanthen +, A&A 2011)



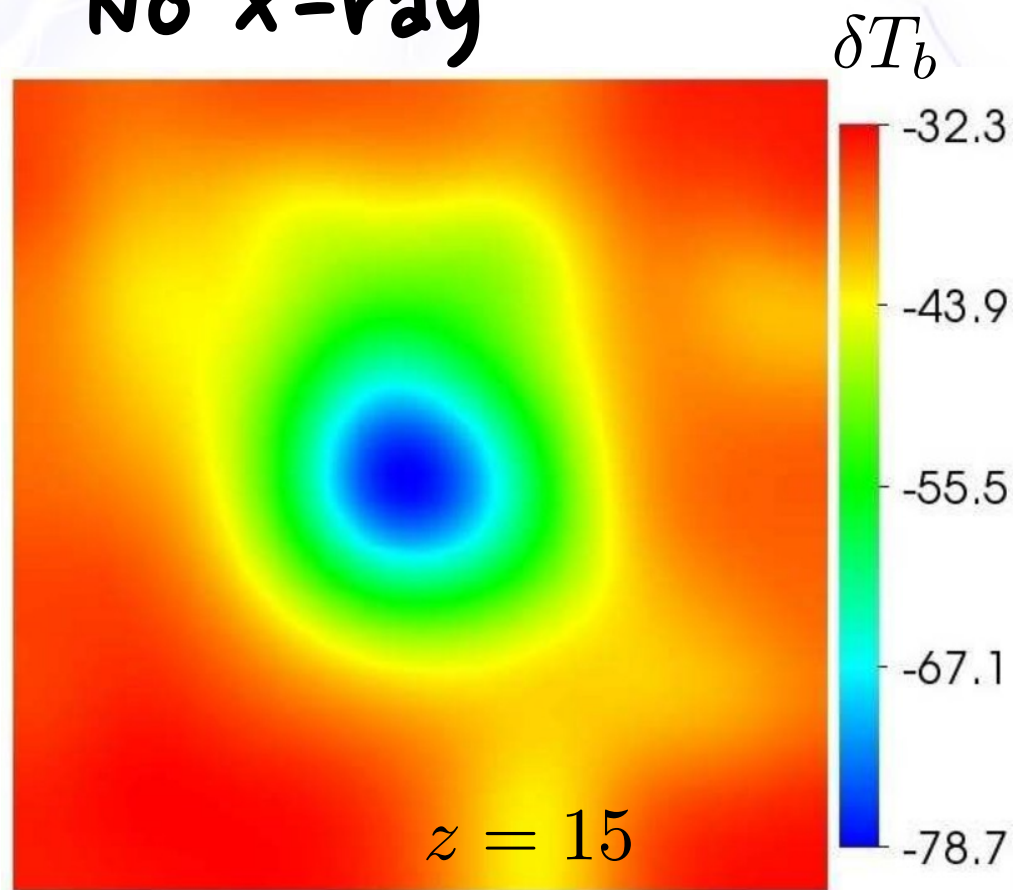
SKA2で

First objects (Ahn+, A&A 2011)

POP II & III +
X-ray binary



POP II & III only
NO X-ray



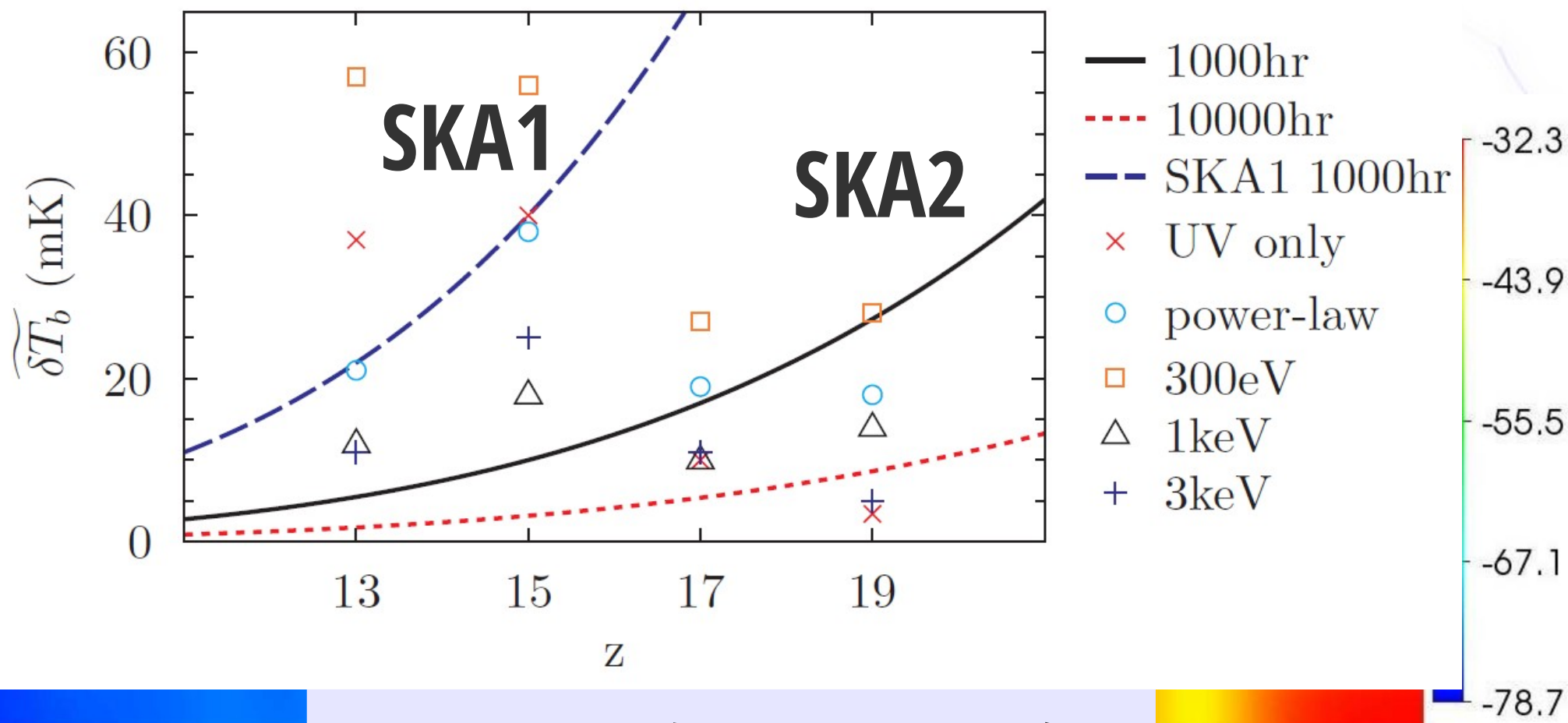
13' ~ 40 [cMpc]

$z = 15$

(PopIII, 銀河, QSOの比較... 矢島さんトーク)

First objects (Ahn+, A&A 2011)

2km-core SKA ($\Theta = 2'$, $\Delta\nu = 1\text{MHz}$)



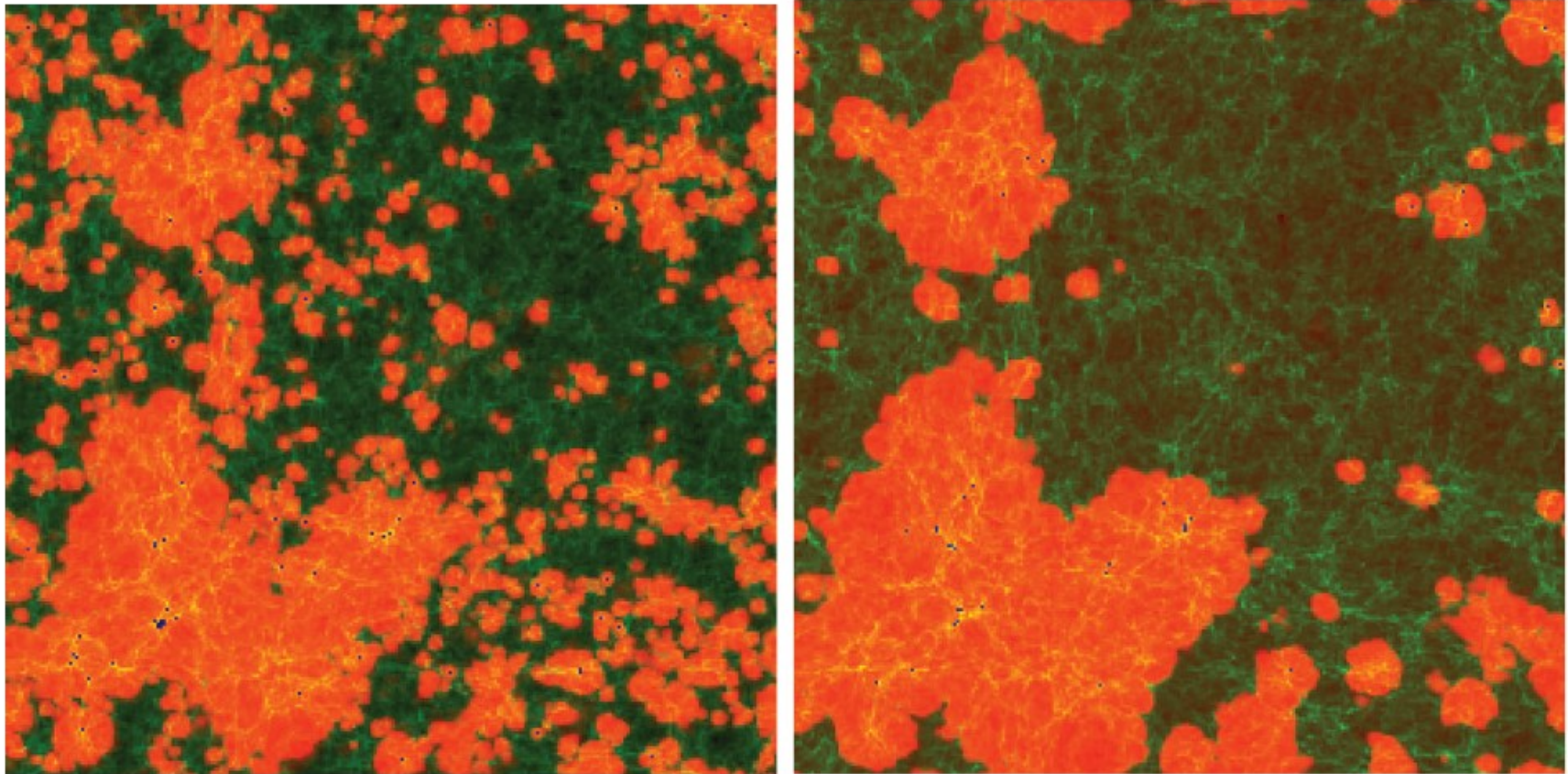
SKA2で観測可能

いつEoR銀河が現れた？ IGMの構造は？

いつEoR銀河が現れた？

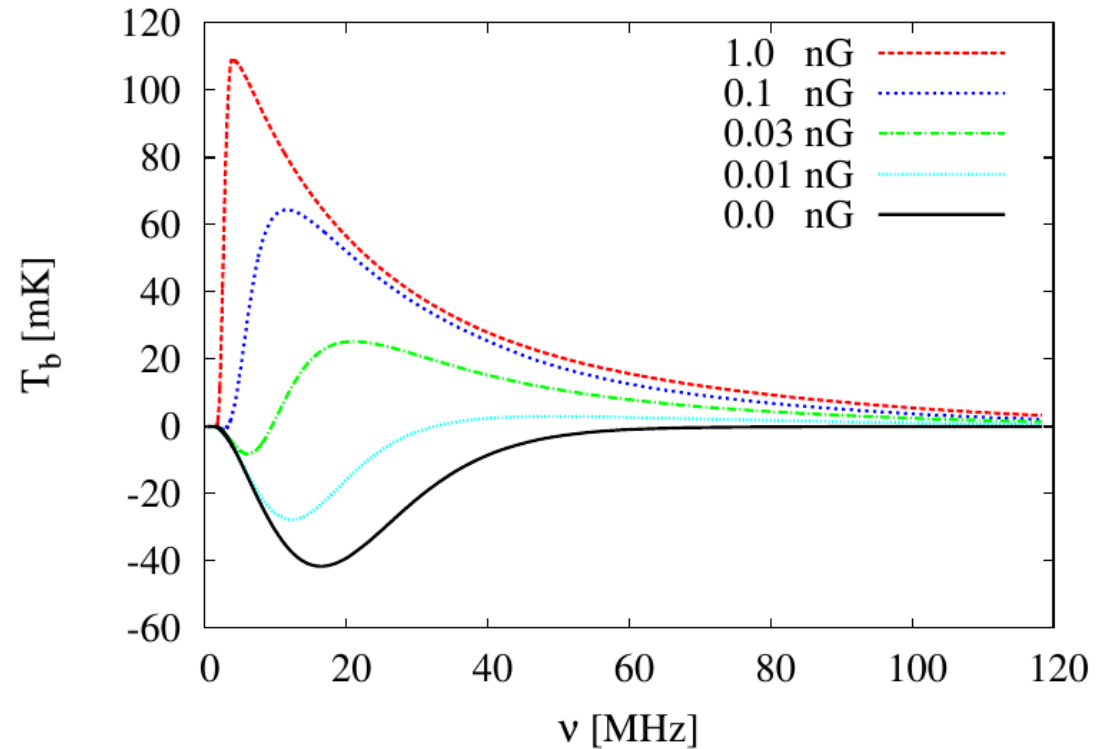
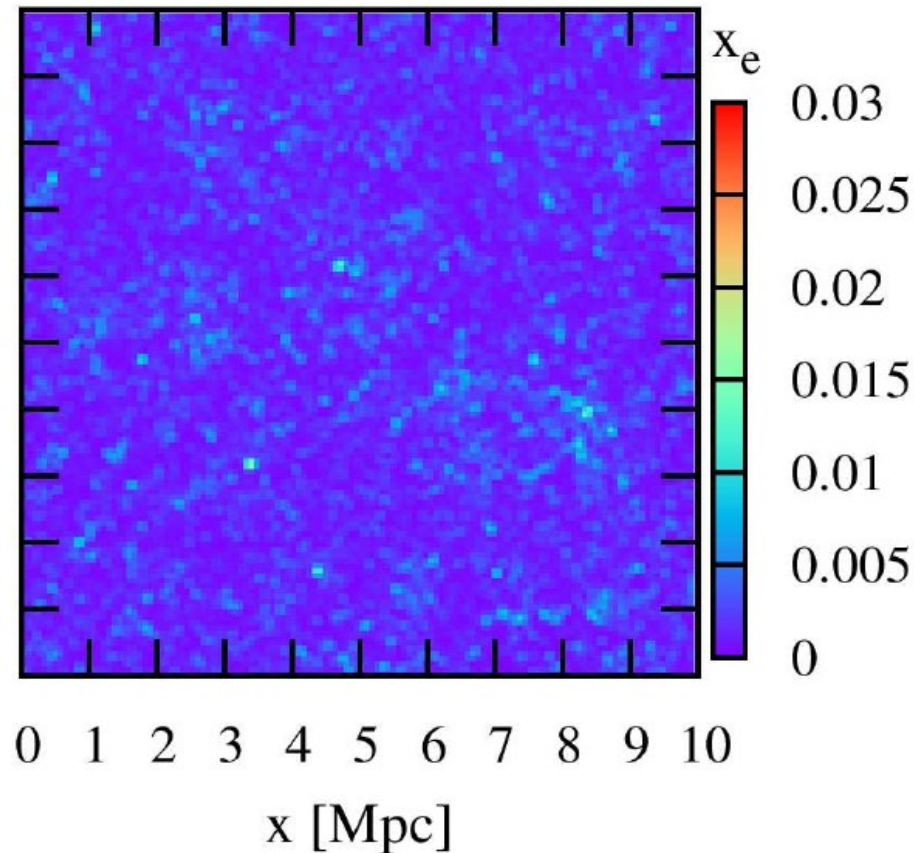
Star forming galaxies (竹内さんトーク)

$$M \sim 10^8 M_{\odot} \text{ or } 10^9 M_{\odot} ?$$



exotic EoR

国際サイエンスブック J. Pritchard et al., ArXiv:1501.04291



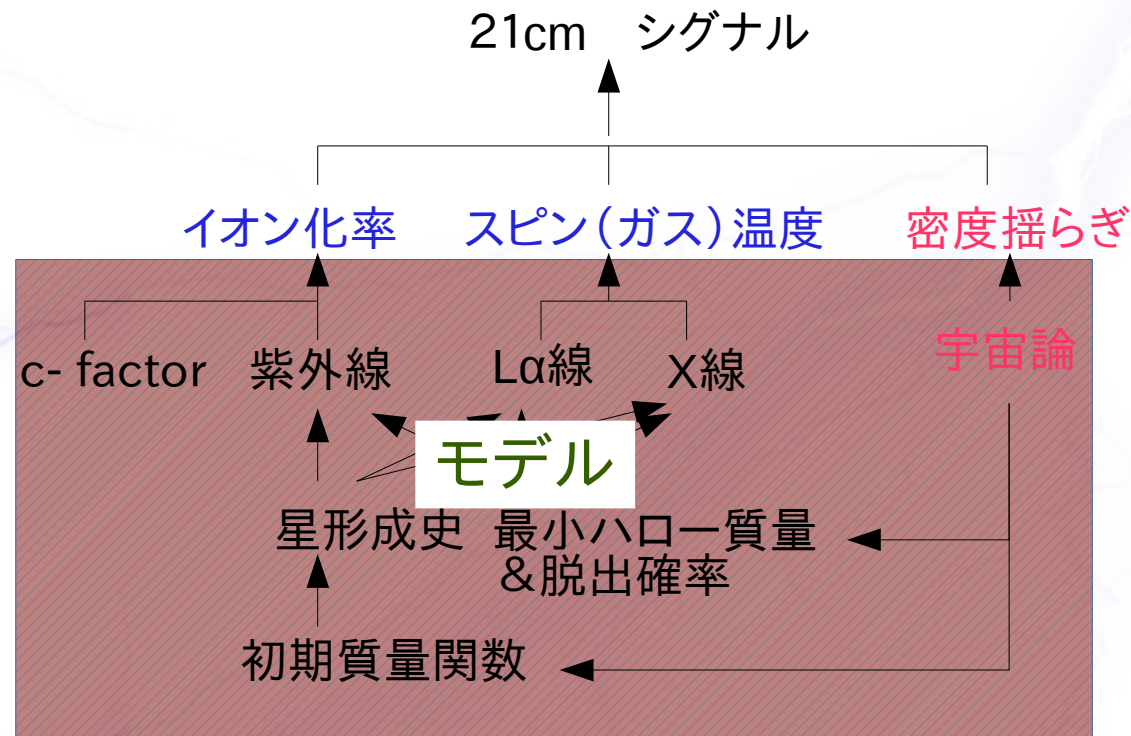
初期磁場の散逸
による加熱電離

グローバルシグナル
(揺らぎは観測不可)



日本のサイエンス

宇宙再電離モデルの構築



現在の主流モデル

- 宇宙論 (ゼルドビッチ近似)
- (粗い) ポストプロセス 輻射輸送
 - フィードバック効果が無視される
- サブグリッド銀河モデル
 - 星形成率, 脱出確率, IMF

利点: 計算が軽い, 100Mpc box
→ 統計的な議論

欠点: 結果がモデル依存

モデルの部分を数値シミュレーションの結果に置き換える

宇宙再電離モデルの構築

- 精密化とは別の目的...スピード
- データと理論モデルの比較
 - CMB study ... 数秒
 - 現存の21cmコード ... 数時間

早く・安く・うまく

計算を

計算コストを

物理を正しく

SKAJPの戦略

① 初代質量関数のモデル作成

- 電離光子と解離光子の数の正確な見積り

② 輻射流体計算結果のサブグリッドモデル作成

- 紫外線脱出割合の環境・時刻依存性のテーブル作成
- 銀河間電離ガスのクランピングへの光加熱の影響

③ 重力場の精密化

- 大規模なN体計算 … 小さなハローまで
- 高次摂動論を用いる … 高次相関まで

④ 超音速流のモデル化

- 2流体計算とし、初期条件を正しく設定
- 球対称崩壊モデルを応用してモデル化

SKAJPの戦略

① 初代質量関数のモデル作成

- 電離光子と解離光子の数の正確な見積り

(Abel+, '02, Yoshida+ '06, Turk+, '09, Susa '13, Hirano+ '14)

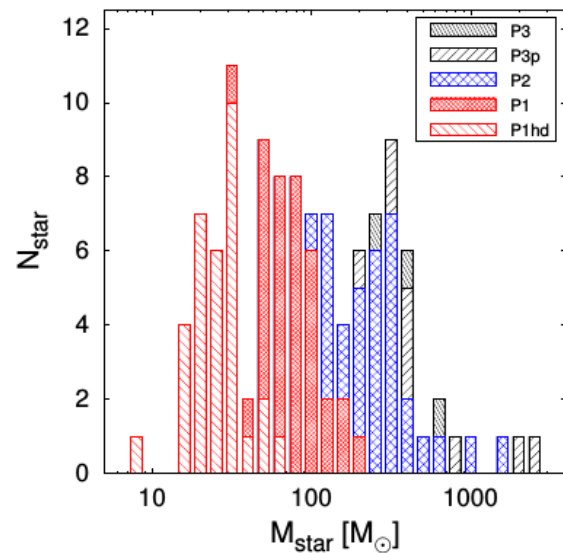
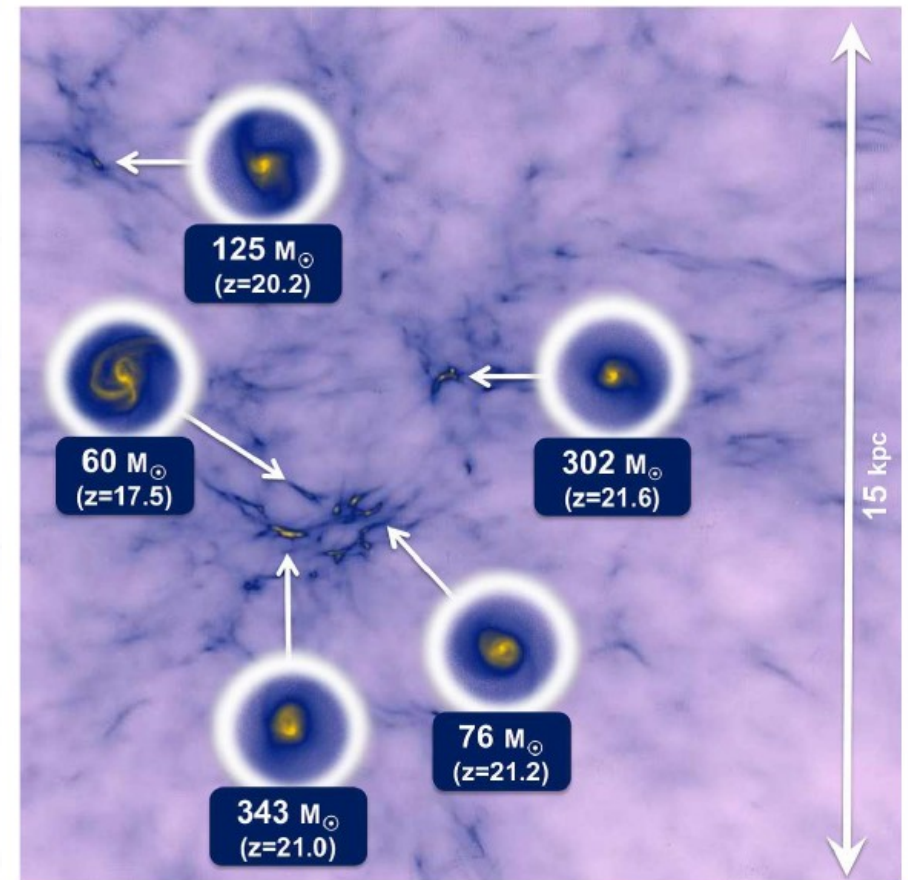


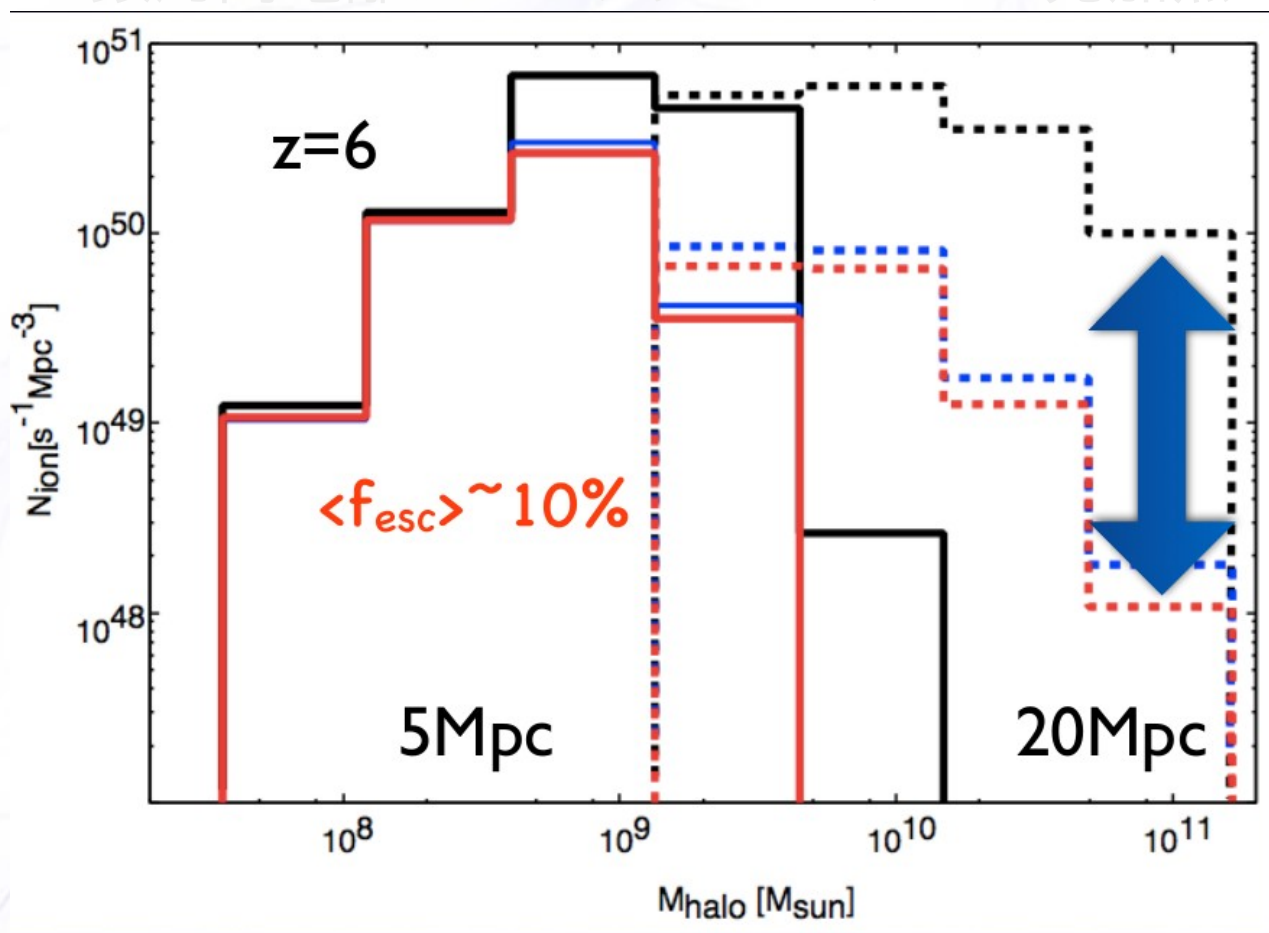
FIG. 5.— The final distribution of the calculated stellar masses for our 110 first stars. The red, blue, and black histograms represent the different paths of protostellar evolution; P1: KH contracting protostar (red), P2: oscillating protostar (blue), and P3: super-giant protostar (black). See text in Sec. 2.2.1 for details. P1hd refers to the cases in which the gas clouds are formed by HD cooling and evolve on low-temperature tracks. P3p (predicted) indicates the same cases as P3, except that the final masses are calculated from a correlation between the properties of the cloud and the resulting stellar mass (Eq. 13 see Appendix B).



SKAJPの戦略

① 輻射流体計算結果のサブグリッドモデル作成

- 紫外線脱出割合の環境・時刻依存性のテーブル作成
- 銀河間電離ガスのクランピングへの光加熱の影響



SKAJPの戦略

① 輻射流体計算結果のサブグリッドモデル作成

- 紫外線脱出割合の環境・時刻依存性のテーブル作成
- 銀河間電離ガスのクランピングへの光加熱の影響

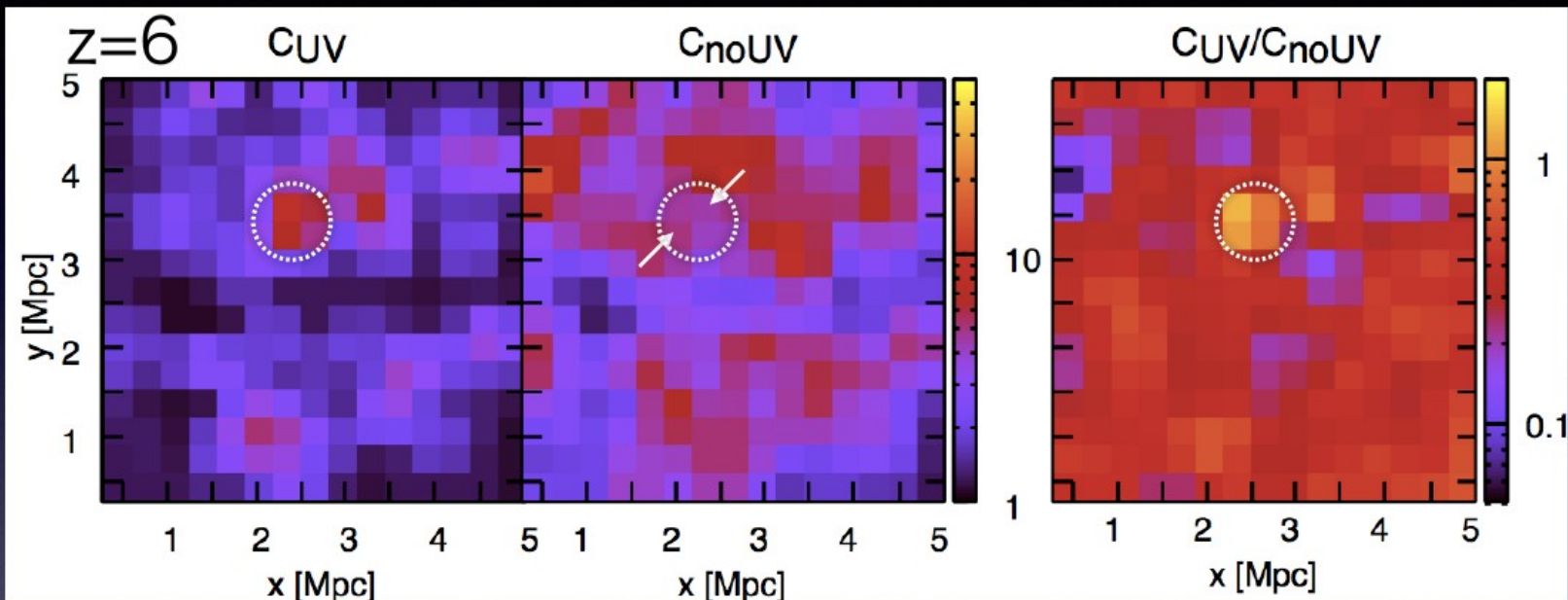
Clumping factorの空間分布

$\Delta x = 0.3 \text{ Mpc}$

feedback有り

feedback無し

それらの比

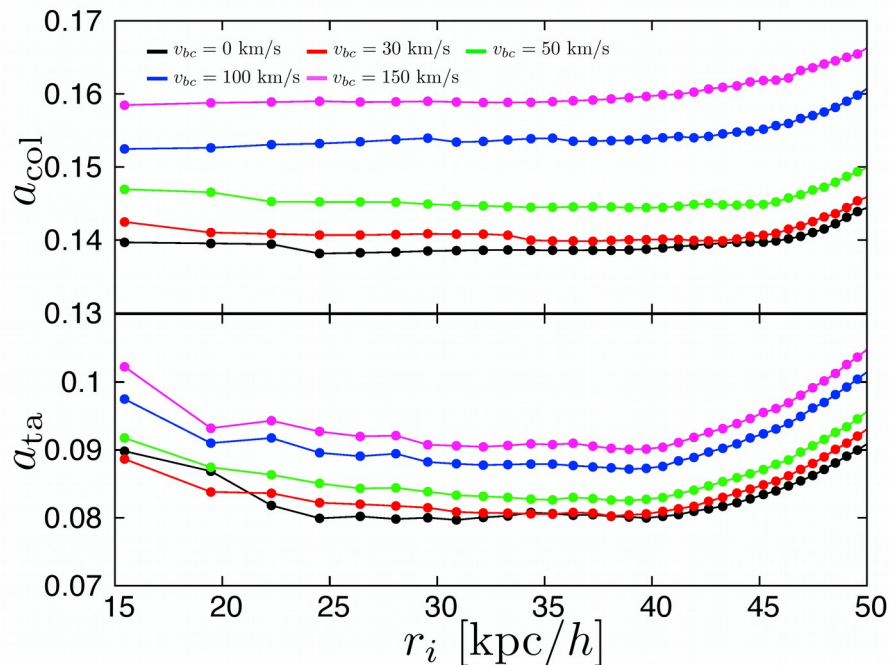


SKAJPの戦略

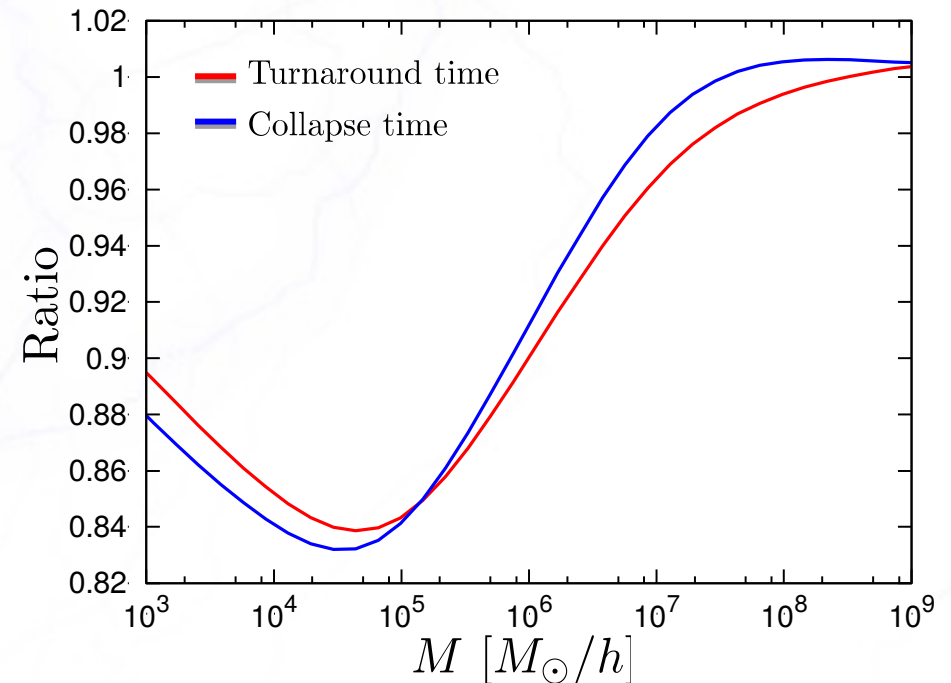
① 超音速流のモデル化

- 2流体計算とし、初期条件を正しく設定
- 球対称崩壊モデルを応用してモデル化

崩壊時刻の遅れ

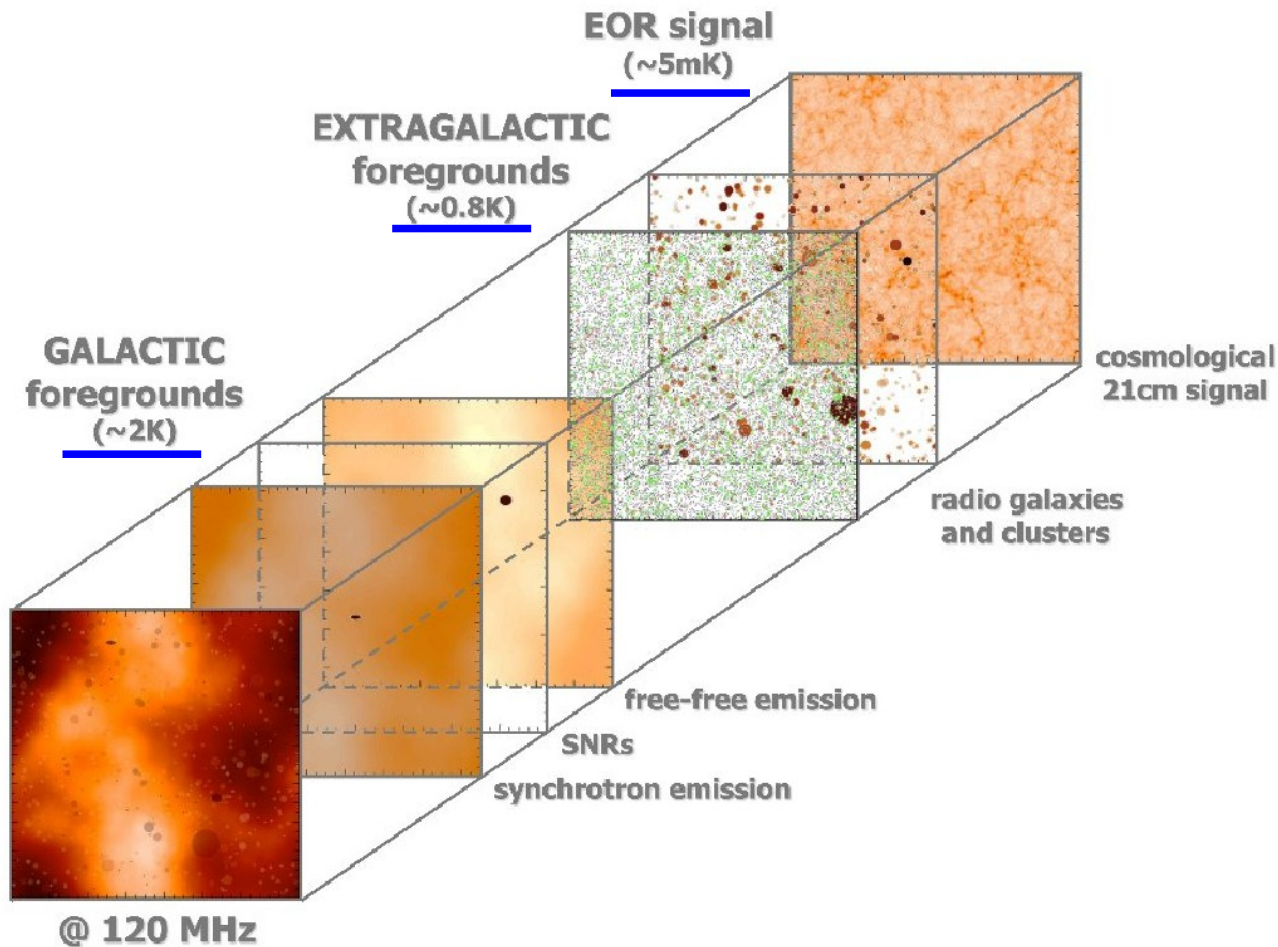


Mass function (z=10)



see, 浅羽さんポスター

前景放射問題



強烈な前景放射

- 銀河系シンクロトロン
- 銀河系外電波天体
- 地球電離圏
- ...

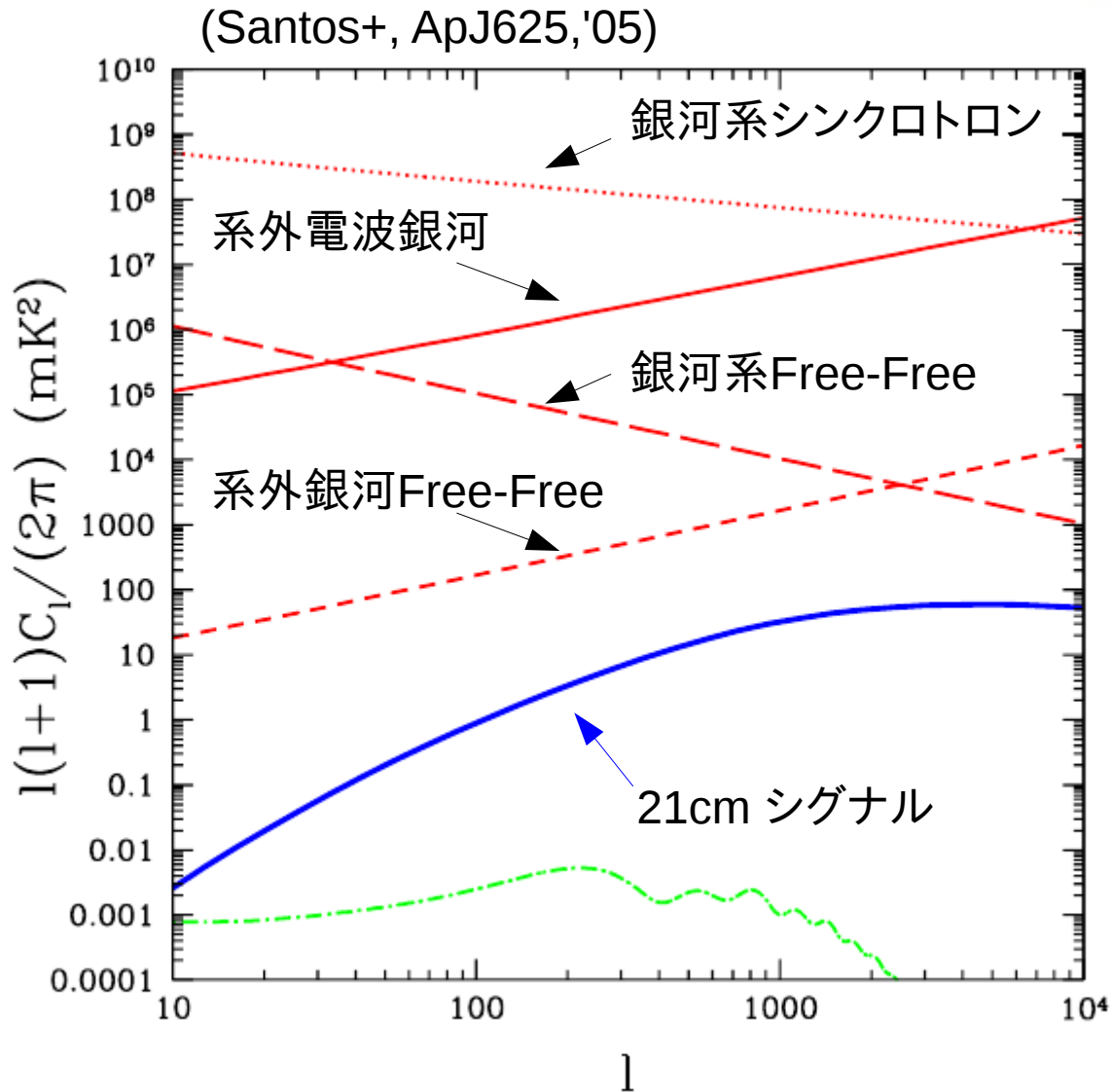
再電離期のシグナル
~ 25 mK²



5桁の隔たり

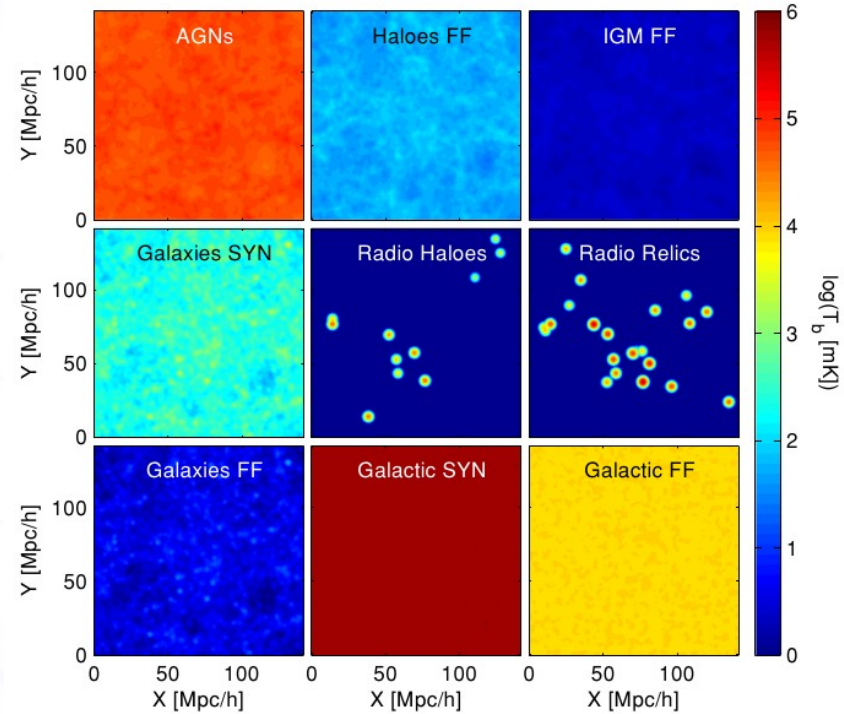
前景放射のシグナル
~ 4 × 10⁶ mK

10桁!



$z = 9$ ($\nu = 140$ MHz) での角度パワースペクトル

Gleser+, MNRAS 391, '08



Position accuracy 0.5%
Antenna gain calibration 0.05%

Datta et al., ApJ, 2010

type

名前

手法

parametric

Polynomial fitting

(Wang+,2006)

$$\log T_{fg} = a_0 + \sum_{i=1}^n a^i (\log \nu)^i$$

CCA

(Ricciardi+,2010)

$$\vec{x} = \mathbf{A}(\vec{p})\vec{s} + \vec{n}$$

(dataとモデルのcov-matrixの差を最小化)

Wp smoothing

(Harker+,2009)

$$\min \left[\chi^2 + \lambda \int (\text{curvature})^2 d\nu \right]$$

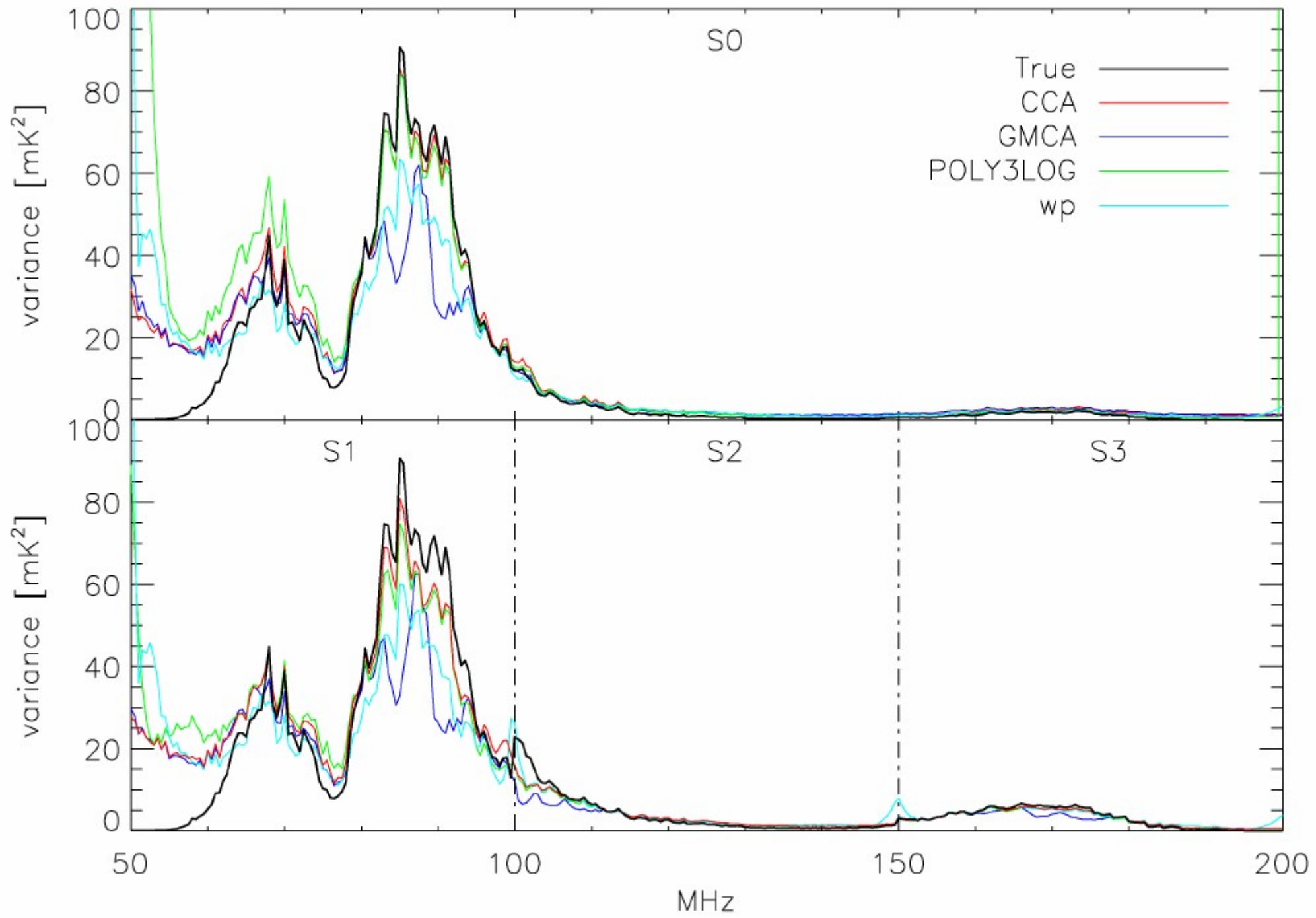
Non-parametric

GMCA

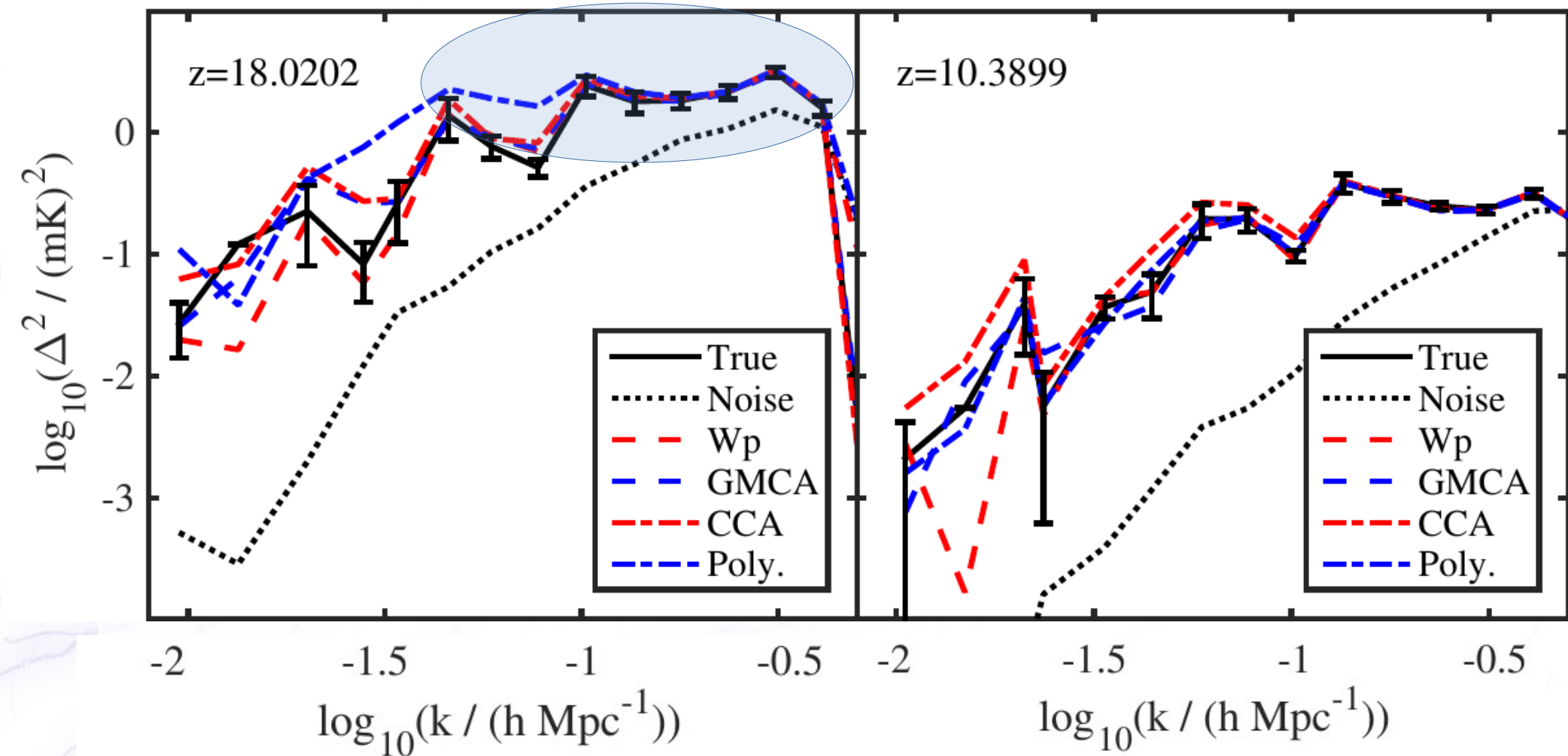
(Bobin+,2014)

$$\vec{x} = \mathbf{A}\vec{s} + \vec{n}$$

(estimate A based on sparcity)

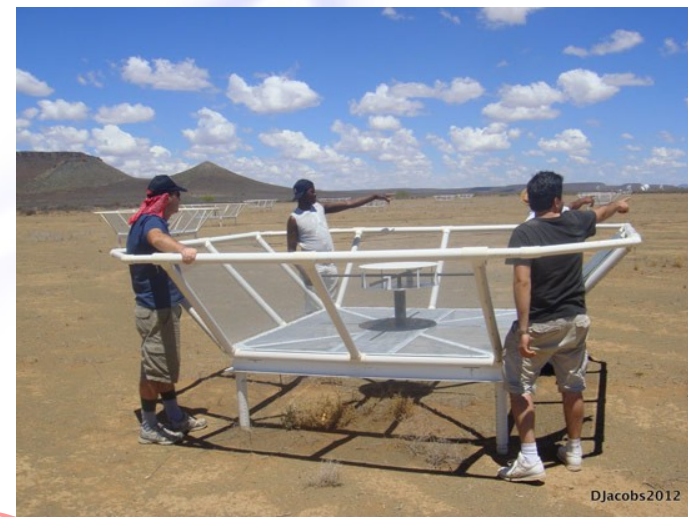


小スケールはうまくいく

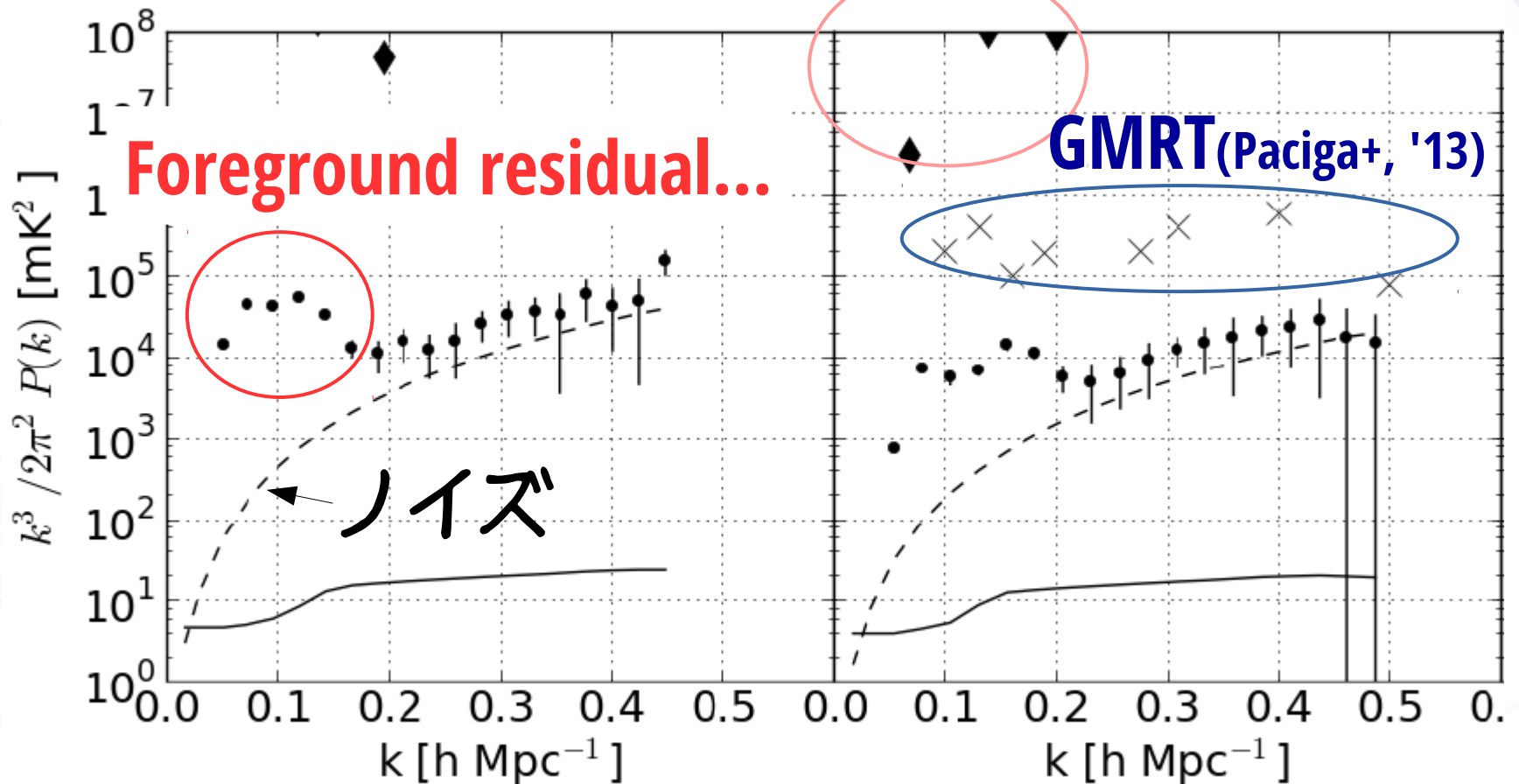


CCA が成績優秀

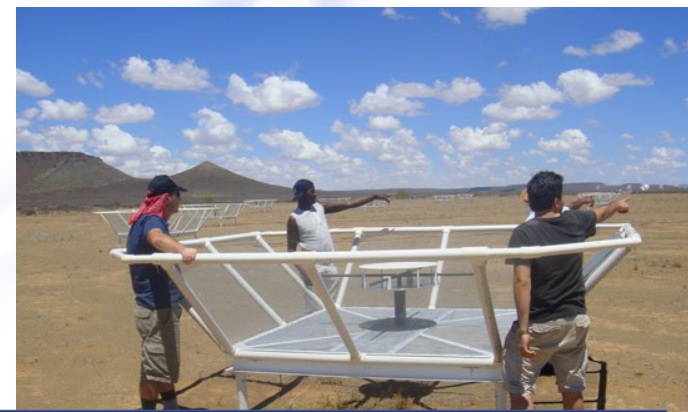
観測例 (PAPER)



MWA (Dillon+, '14)



観測例 (PAPER)



Data量 ... 10Tera bytes for 32 antennas

計算機 ... a 35 core cluster

↓ SKAに $\propto N^2$ でスケール

~10,000Tera bytes

& a 35,000 core cluster

0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6
k [h Mpc⁻¹]

帯域幅250MHz ... 1GHz (4倍サンプル)
チャンネル数 ... $(250\text{M}) / (1.2\text{k}) \sim 208333$
自己相関演算 ... $208333^2 / 2 * 2 = 4.34\text{e}10$
干渉演算 ... $866^2 / 2 \sim 374978$

データ量 ... 216 [Gbyte/s]
観測時間合計 ... 216G x 3,600,000

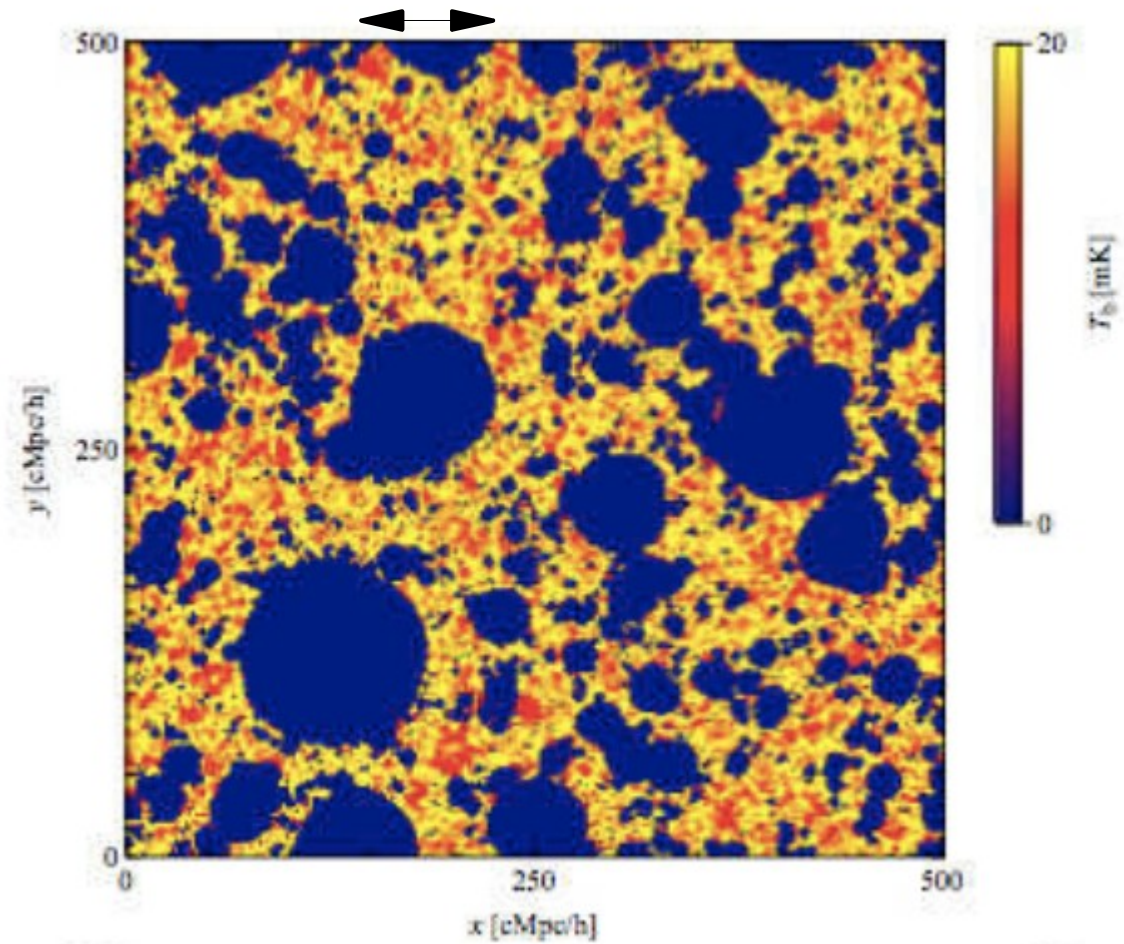
まとめ

- 宇宙の熱史における最後のイベント：
再電離
- CMBと銀河カウントは無矛盾に
- 中性水素21cmによる直接観測
 - SKA1で再電離の様子が統計的によくわかる
 - 初代天体まわりはSKA2が必要

まとめ

- EoRの統計的研究からの要求
 - 周波数... 50-300MHz, 視野... 5x5 [deg²], 角分解能... 数分, 周波数分解能... 0.1MHz
- 天体周辺の様子
 - 角分解能...分以下 (Ly-horizons)
- 電離層まで含めた現実的な前景放射モデルの構築と研究は必須
- SKA-JP再電離班では、日本版再電離モデル構築を目指して活動中

分解能 $1' \sim 0.5[\text{Mpc}]$



視野 $3^\circ \sim 10^\circ$

メモ集

10.2 eV

- Ly α pumping becomes strong

$$N_{\alpha} \gtrsim N_{\alpha,th} = 10^{-10} (20/(1+z)) [1/\text{s}/\text{cm}^2/\text{sr}/\text{Hz}]$$

SKA-Lowへの要求

$$\Delta_{\text{noise}}^2 \approx \sqrt{\text{独立なkモードの数}} k^{\frac{3}{2}} [D_c^2 \Delta D_c \Omega_{\text{FoV}}]^{\frac{1}{2}} \left(\frac{T_{\text{sys}}}{\sqrt{B t_{\text{int}}}} \right)^2 \left(\frac{A_{\text{eff}}}{A_{\text{coll}}} \right)^2 \left(\frac{A_{\text{core}}}{A_{\text{eff}}} \right)$$

熱雑音 1/(visibilityの数) redundancy

1. A_{core} は小さい方がよい $\rightarrow A_{\text{core}}=(2000\text{m})^2$
2. FoV: 5x5平方度@100MHz $\rightarrow A_{\text{eff}} = 35^2 [\text{m}]$
3. 角度分解能: 3分スケール $\rightarrow D_{\text{core}} > 2000[\text{m}]$
4. mK感度: $t_{\text{int}}=1000\text{h}$ (秋の夜のみ \rightarrow 数年間)