

中性水素21cm線で探る 初代天体と宇宙再電離

高橋慶太郎
熊本大学

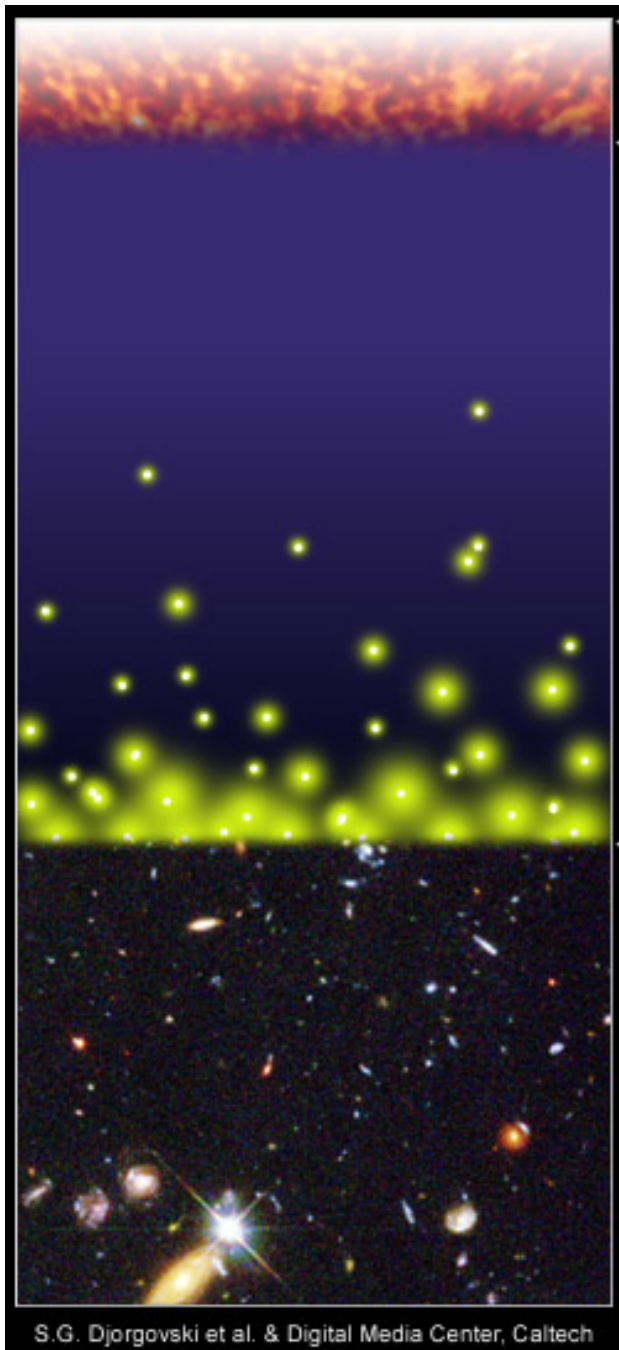


2017/09/14@物理学会シンポジウム

目次

- 1、暗黒時代から再電離へ
- 2、中性水素21cm線で探る
- 3、再電離21cm線観測の幕開け
- 4、まとめ

1、暗黒時代から再電離へ



ゆらぎの生成・線形成長
 $z=1000$ 中性化

暗黒時代

$z \sim 30$ 初代天体形成

$z \sim 10$ 再電離開始

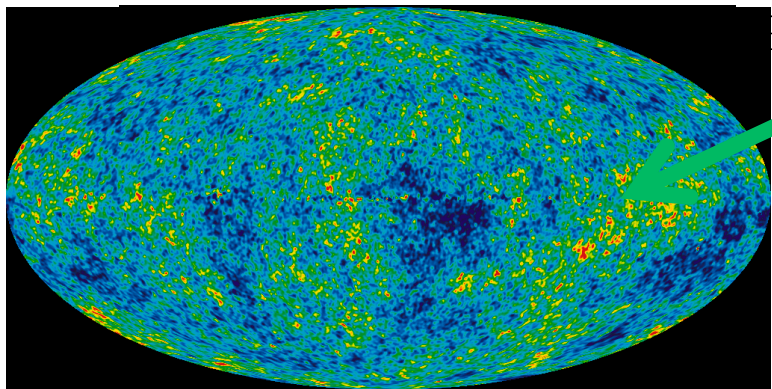
$z \sim 6$ 再電離完了

$z \sim 1$

銀河進化

大規模構造形成

暗黒エネルギー



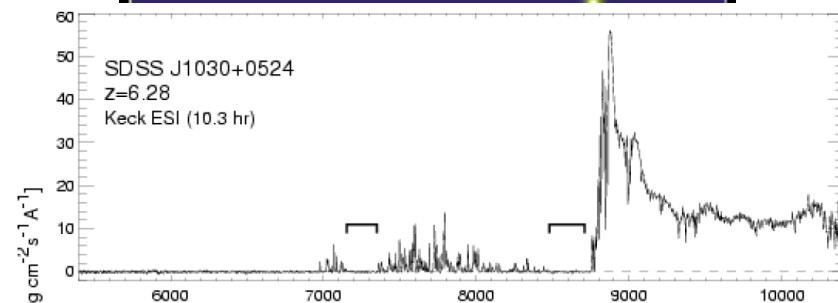
ゆらぎの生成・線形成長
 $z=1000$ 中性化

暗黒時代

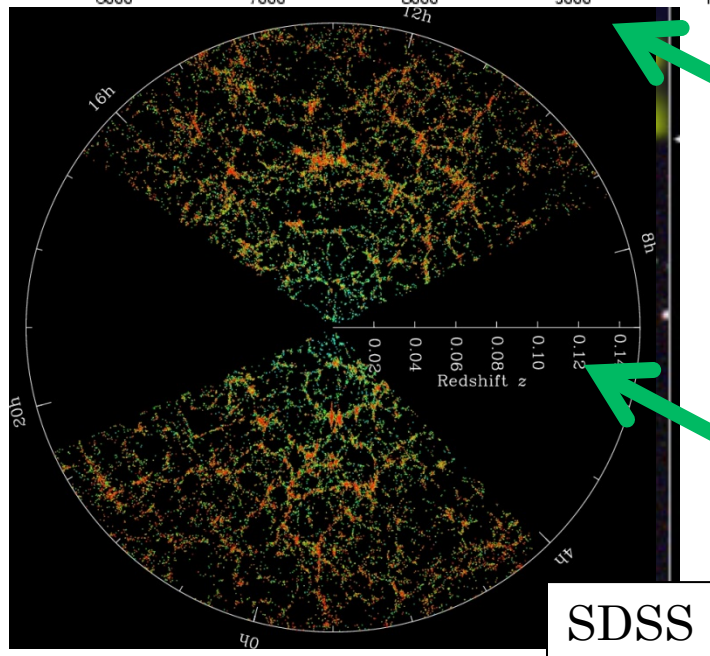
$z \sim 30$ 初代天体形成

$z \sim 10$ 再電離開始

$z \sim 6$ 再電離完了



$z \sim 1$
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
 $z=1000$ 中性化

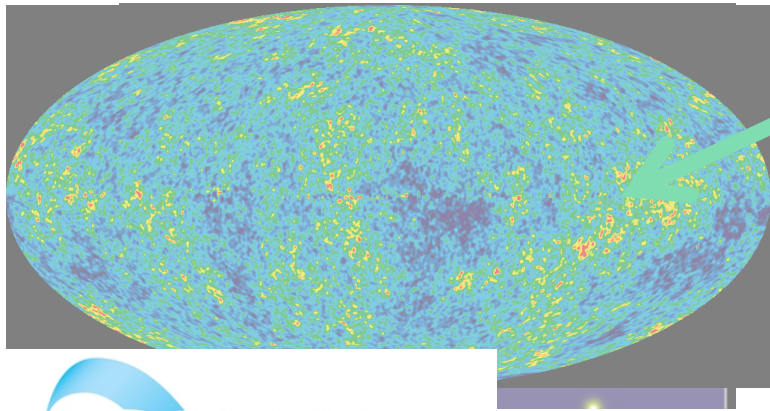
暗黒時代

$z \sim 30$ 初代天体形成

$z \sim 10$ 再電離開始

$z \sim 6$ 再電離完了

$z \sim 1$
銀河進化
大規模構造形成
暗黒エネルギー

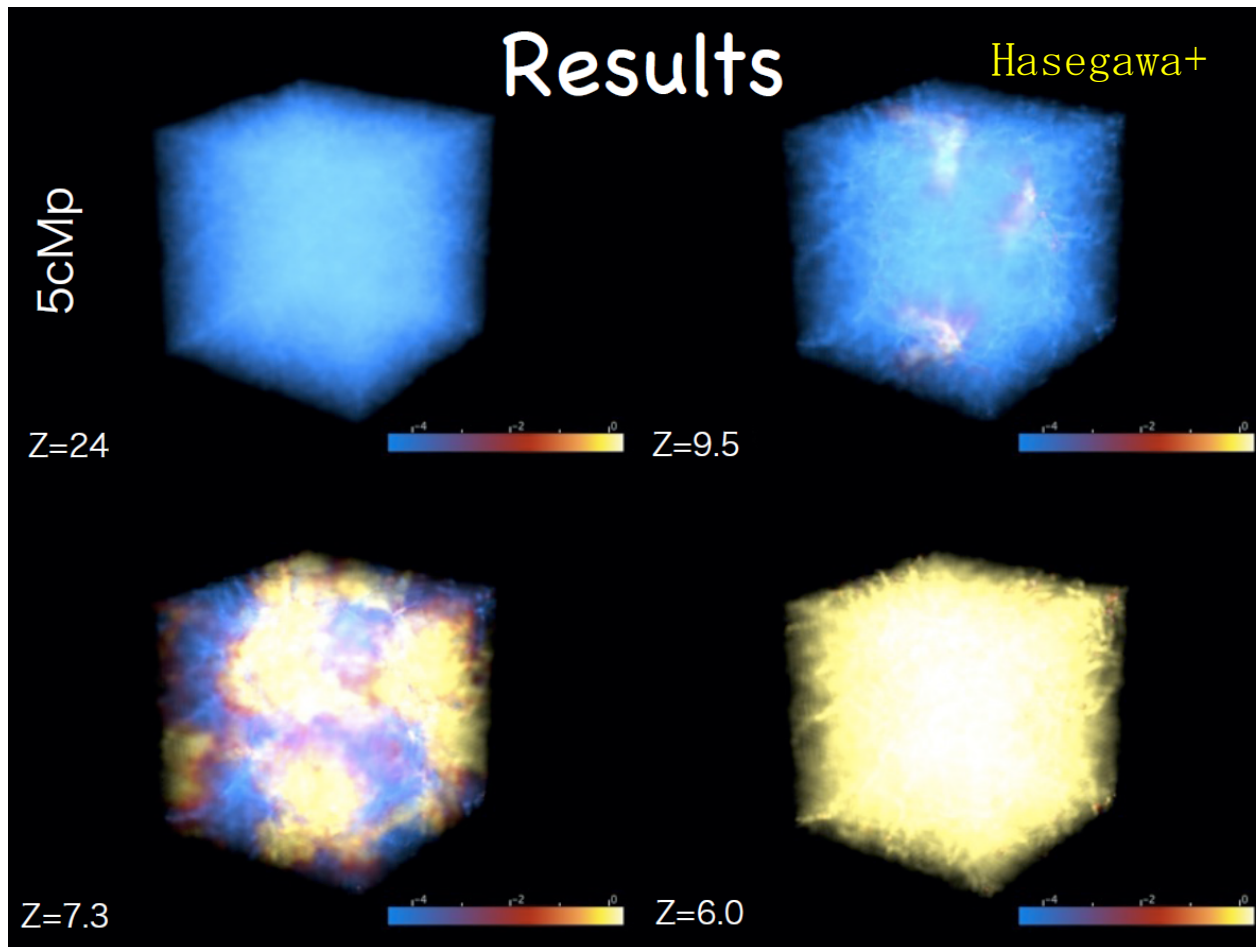


SDSS

暗黒時代 - 初代天体形成 - 再電離

天体が形成されると紫外線やX線によって周り電離する。
現在の宇宙はほぼ電離した状態にある。

このような「相転移」はどのようにして起こったのか？



宇宙論的密度ゆらぎ

宇宙論的密度ゆらぎ



線形成長
非線形成長

ハロー
(暗黒物質・バリオン)

宇宙論的密度ゆらぎ



線形成長
非線形成長

ハロー
(暗黒物質・バリオン)



冷却

初代星
(PopIII)

宇宙論的密度ゆらぎ



線形成長
非線形成長

ハロー
(暗黒物質・バリオン)

冷却



初代星
(PopIII)

冷却

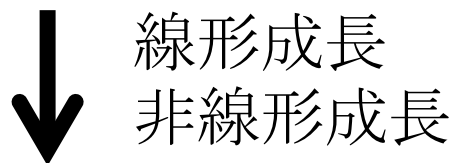
PopII

UV
metal



初代ブラック
ホール

宇宙論的密度ゆらぎ



ハロー
(暗黒物質・バリオン)

冷却

冷却

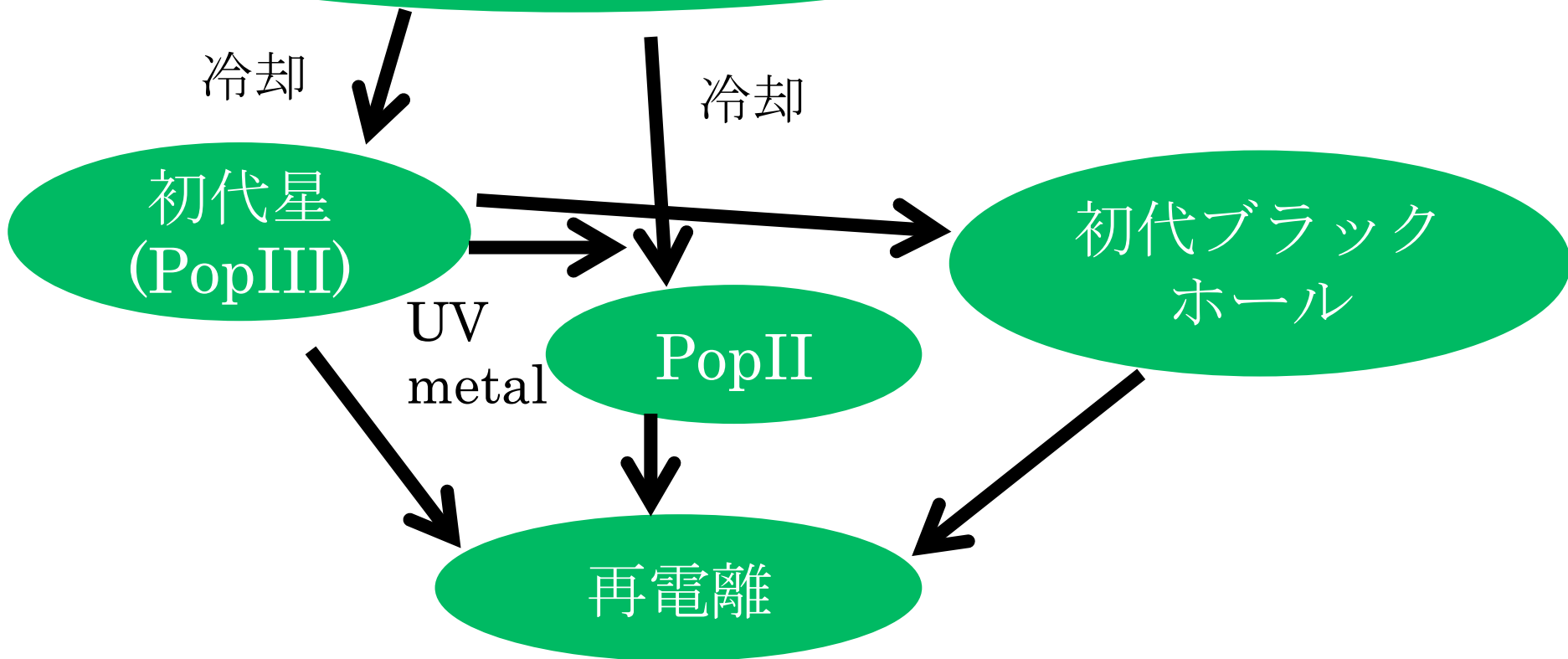
初代星
(PopIII)

初代ブラック
ホール

UV
metal

PopII

再電離



宇宙論的密度ゆらぎ



線形成長
非線形成長

ハロー
(暗黒物質・バリオン)

21cm線

冷却

冷却

初代
(PopIII)

光赤外・ライ
マン α 銀河探査

QSO探査

初代ブラック
ホール

UV
metal

PopII

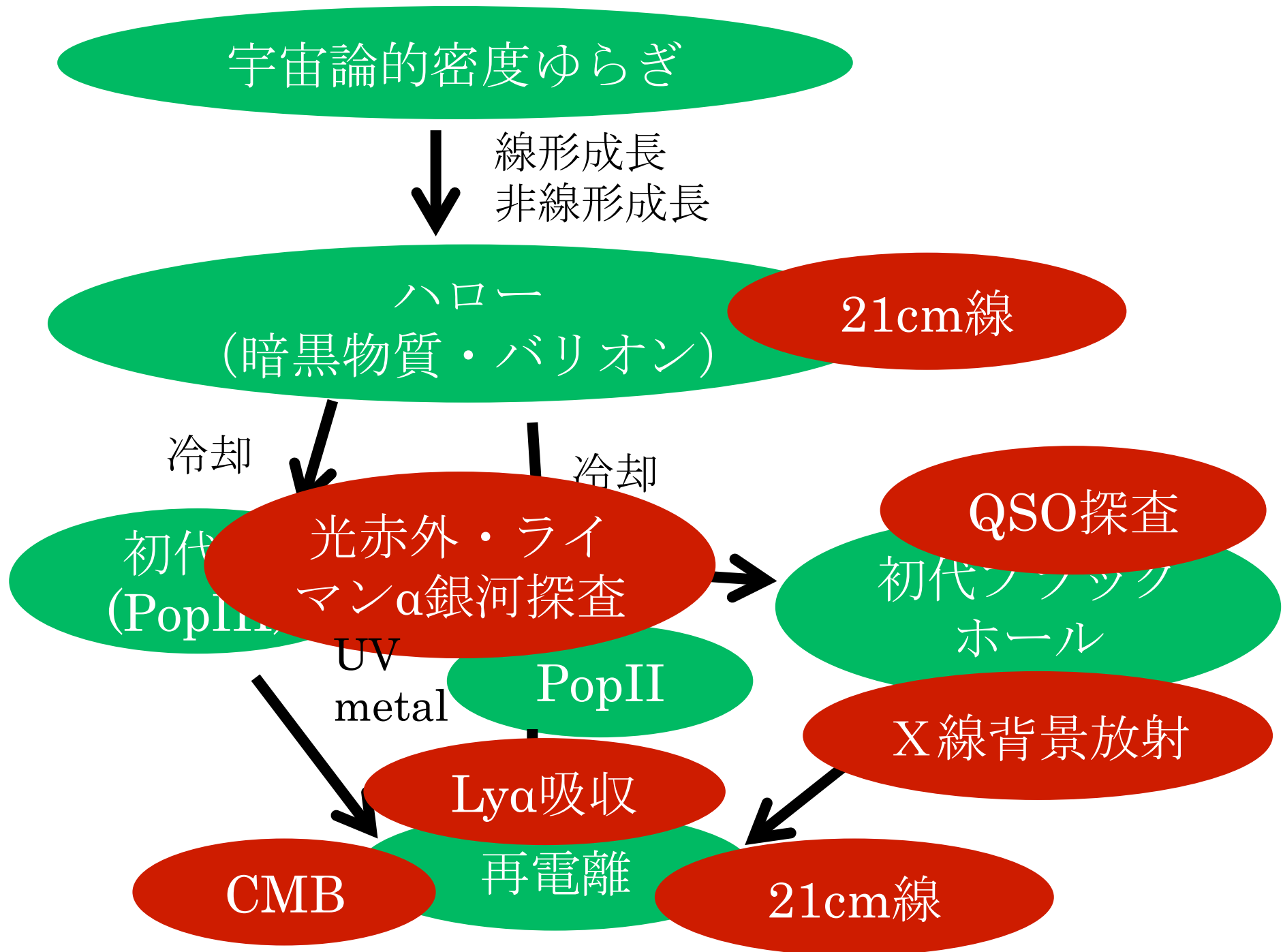
X線背景放射

$\text{Ly}\alpha$ 吸収

CMB

再電離

21cm線



マイクロ波背景放射

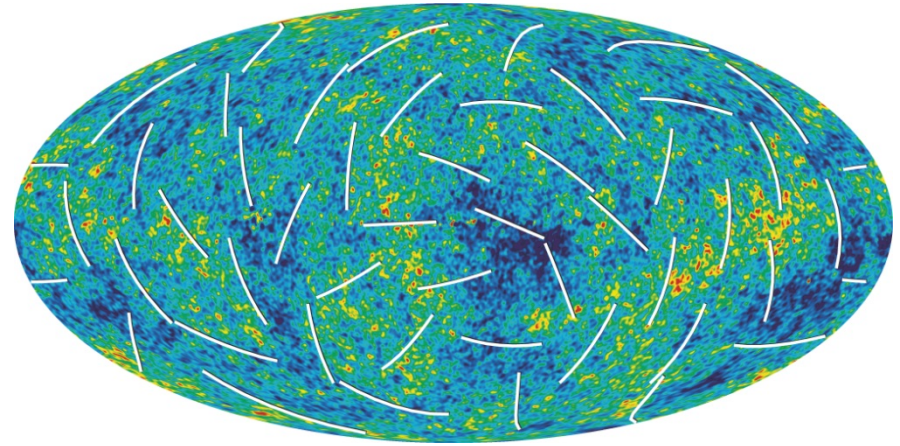
晴れ上がり後、再電離
→ 光子が自由電子によって
散乱され偏光ゆらぎが生成

偏光ゆらぎの大きさ
→ optical depth

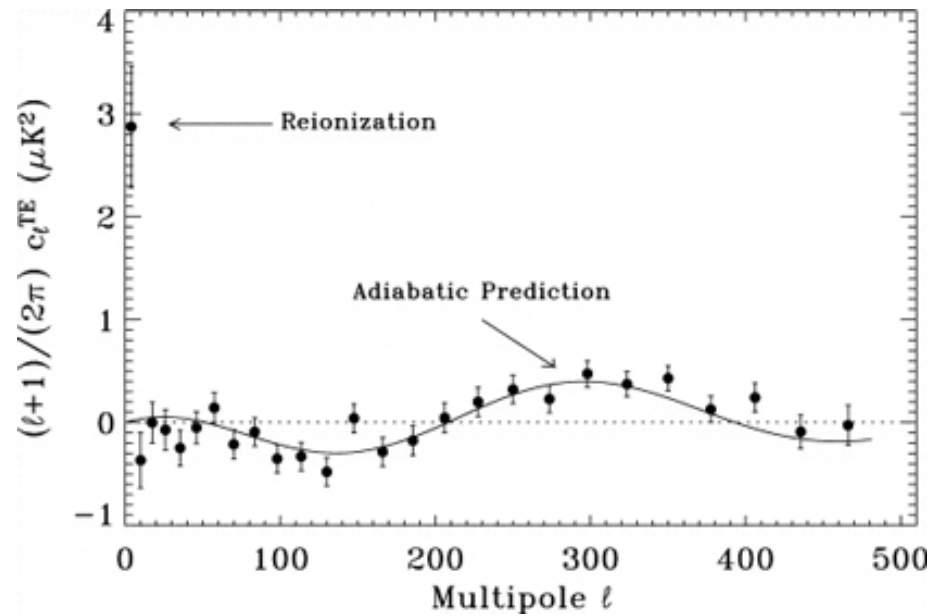
$$\tau = c \sigma_T \int n_e(t) dt$$

$\tau \sim 0.1$ (WMAP, Planck)

- ・ 積分量しかわからない
- ・ n_e の時間発展はわからない
- ・ 瞬間的再電離を仮定
→ $z \sim 10$



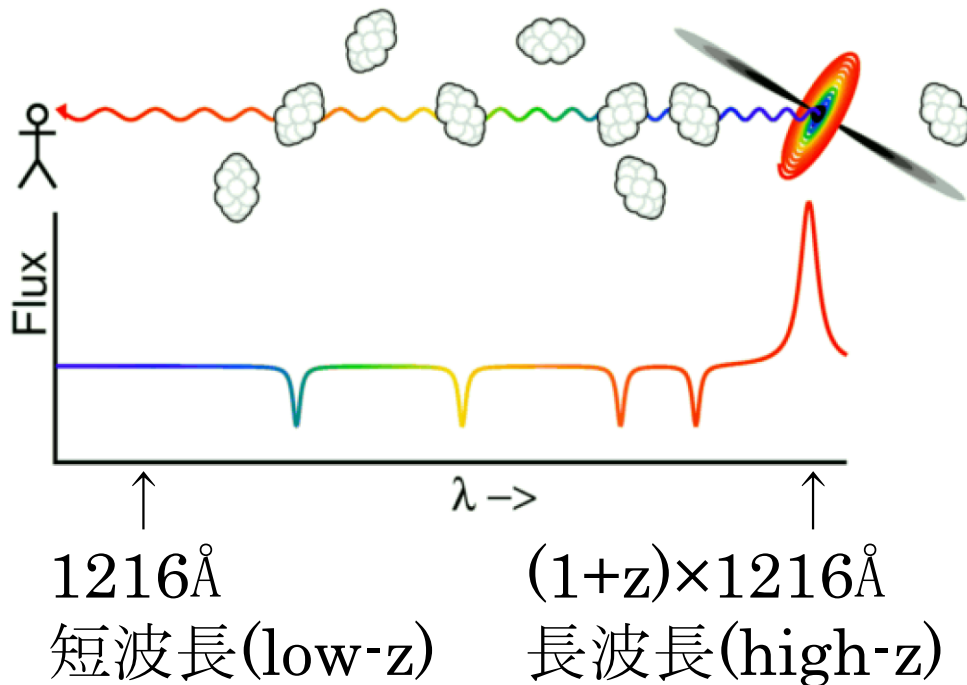
WMAP



Ly α forest

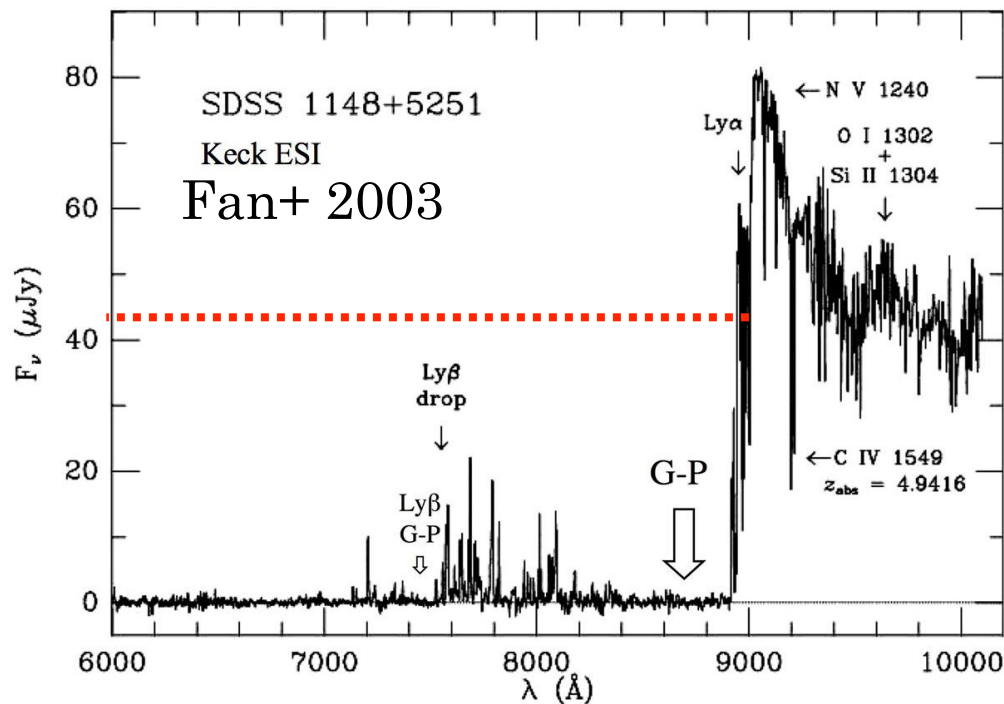
Ly α forest

- Ly α 線 (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 α forest



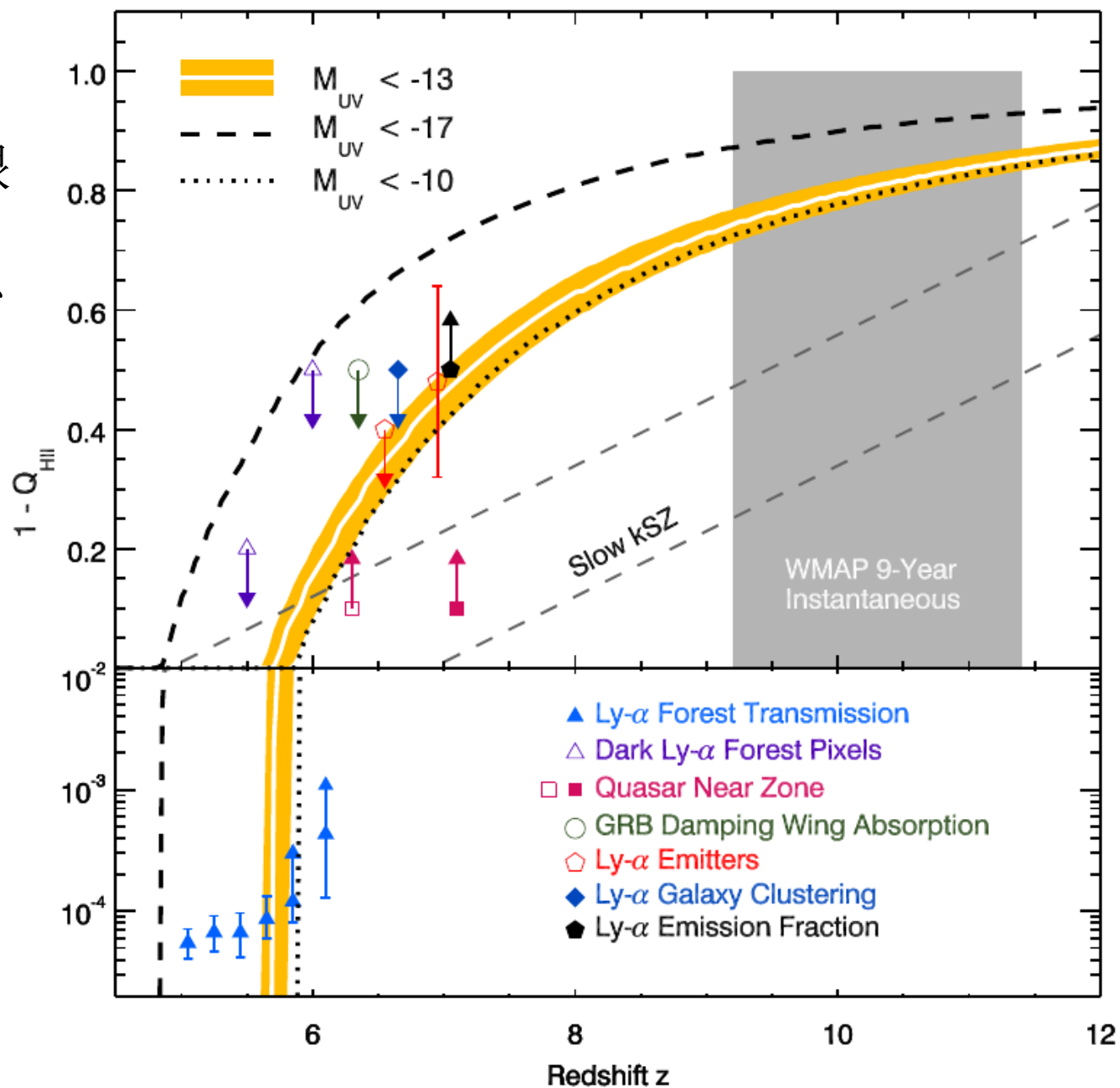
Gunn-Peterson test

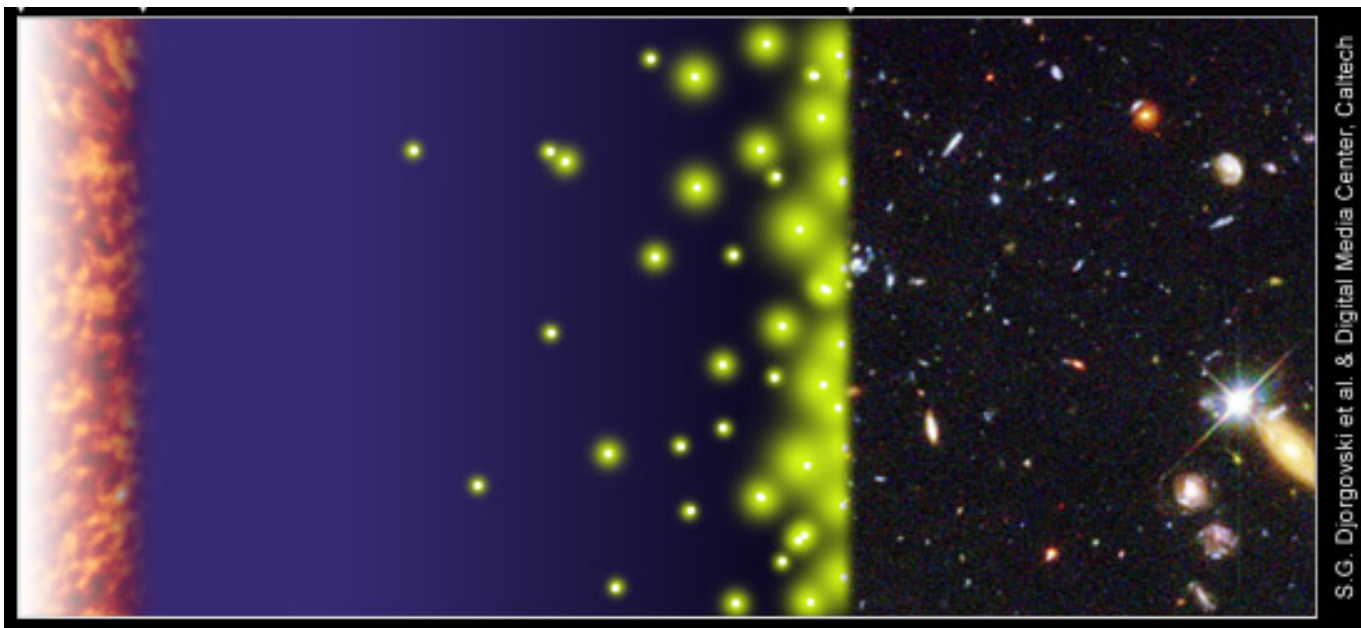
- optical depth大
- $$\tau_{Ly\alpha} \approx 5 \times 10^5 x_{HI} \left(\frac{1+z}{10} \right)^{3/2}$$
- $z \sim 6$ では既にほぼ電離
 - $z > 6$ で中性水素割合増加



平均中性率の
時間進化への制限

$z \sim 10$ 再電離開始
 $z \sim 6$ 再電離完了



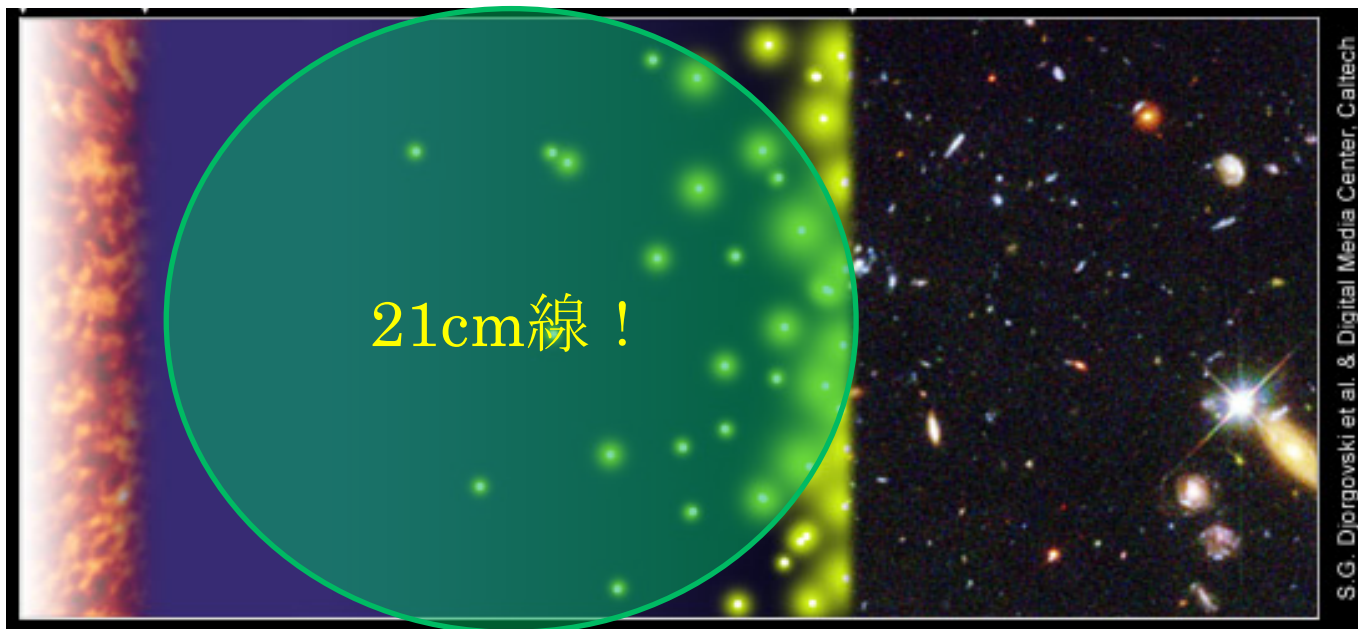


QSO ($z < 7 \rightarrow 10$)



銀河 ($z < 10 \rightarrow 20$)





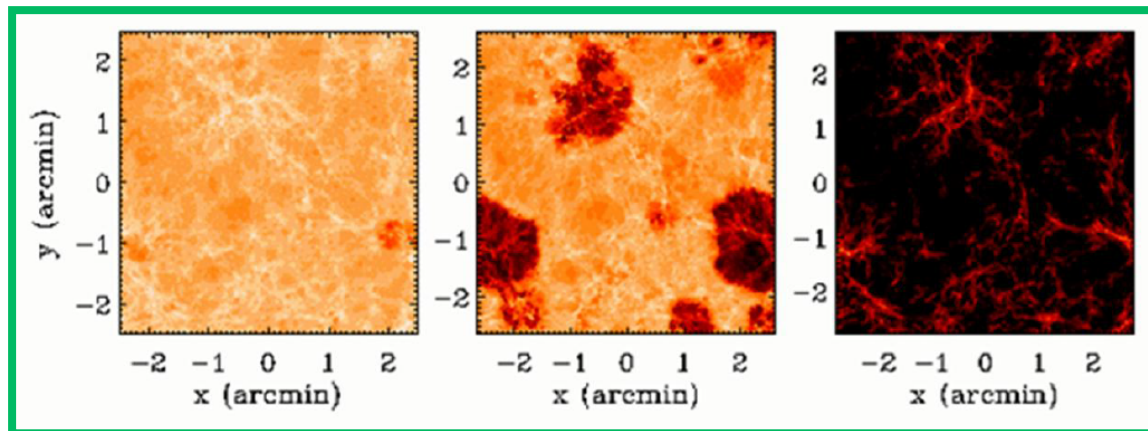
QSO ($z < 7 \rightarrow 10$)



銀河 ($z < 10 \rightarrow 20$)



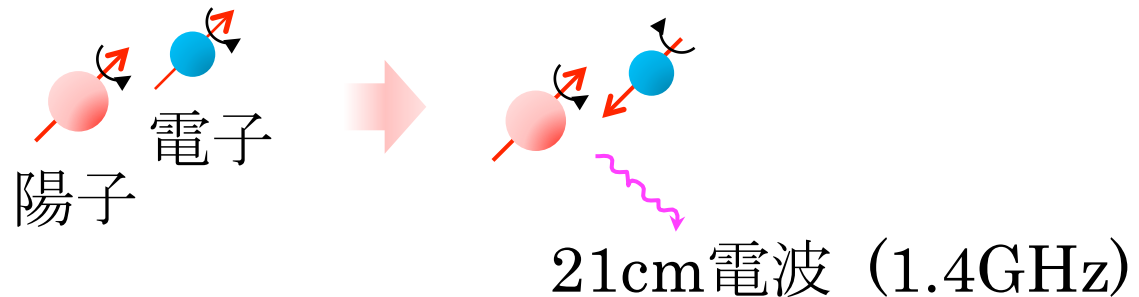
21cm線 ($z < 30$)



2、中性水素21cm線で探る

21cm線

水素原子の超微細構造



赤方偏移した21cm線を観測する

$z = 6 \rightarrow 200\text{MHz}$

$z = 20 \rightarrow 70\text{MHz}$

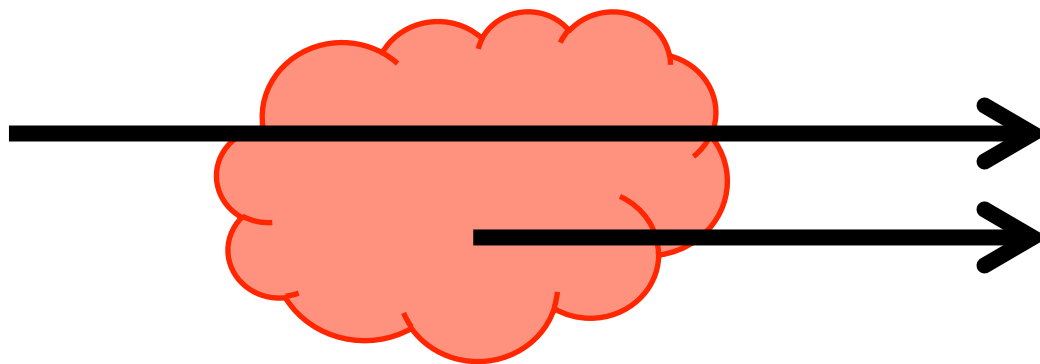
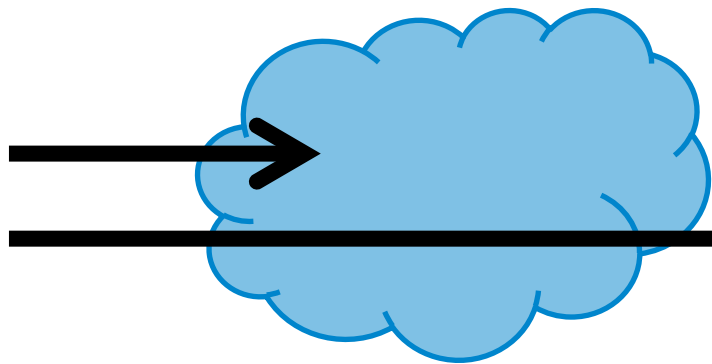
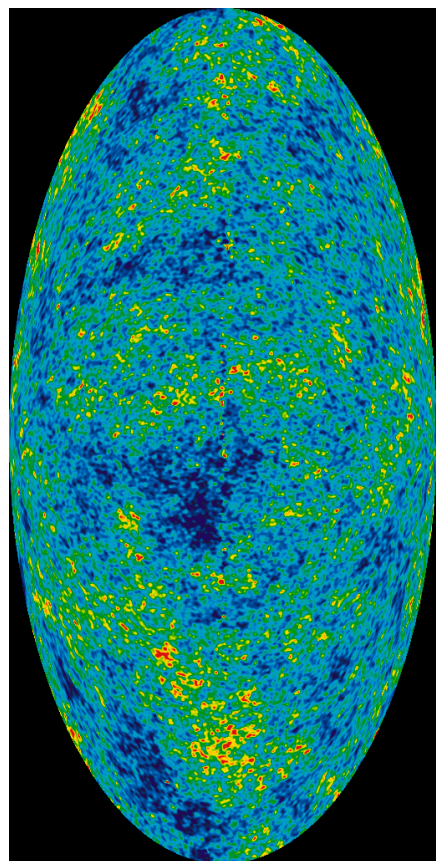
100MHz帯の電波によって初代天体形成～再電離の
中性水素分布を **3次元的に**観測できる

スピン温度

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

中性水素雲

スピン温度低



スピン温度高

スピン温度

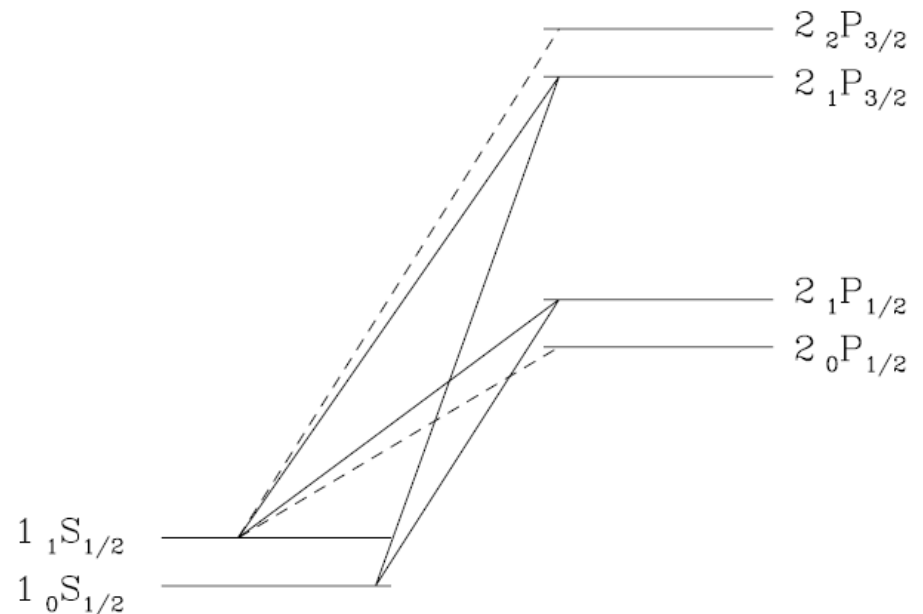
スピン温度の決まり方

- CMBとの相互作用 (T_Y)
- 原子の衝突 (T_K, x_C)
- Ly α 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 α で励起された後
スピン励起状態に落ちる
- Ly α 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

$z \sim 70$

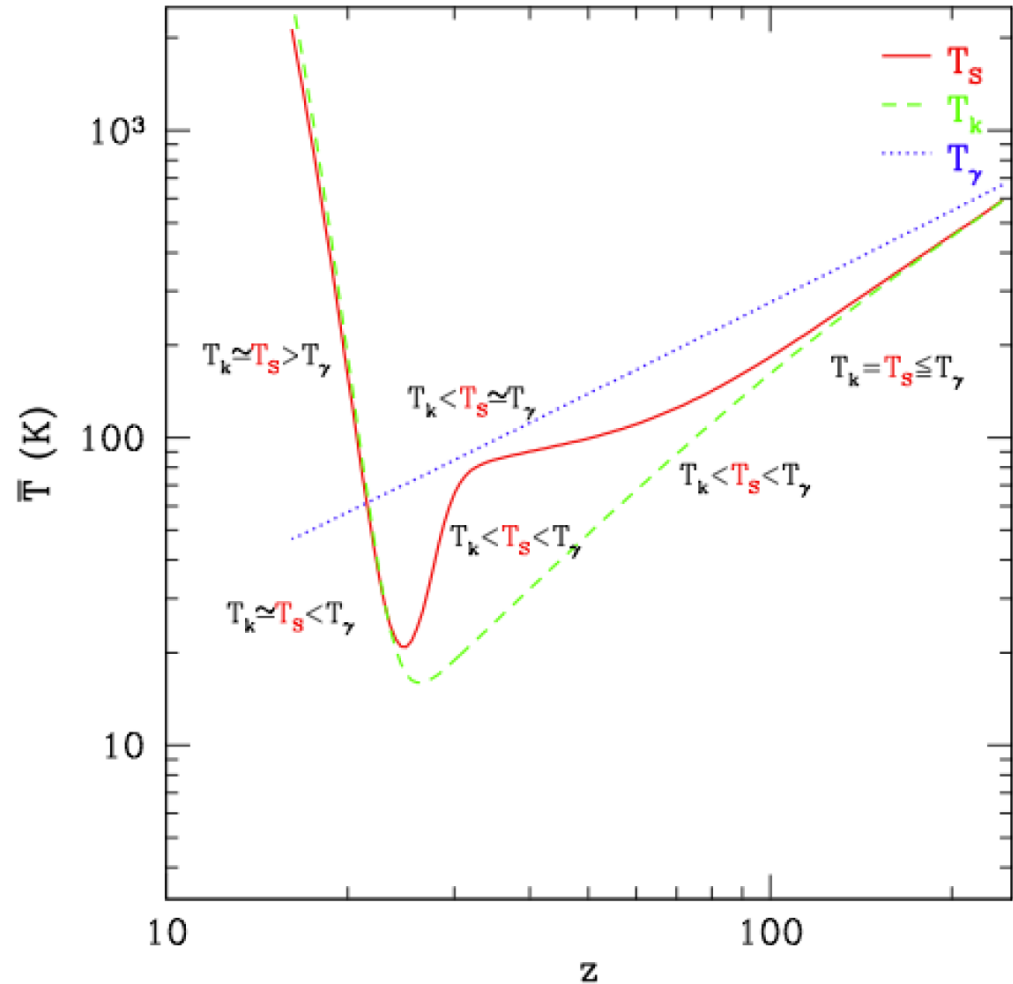
ガス密度が小さく
原子衝突が非効率

$z \sim 20$

天体からのLy α 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

$z \sim 70$

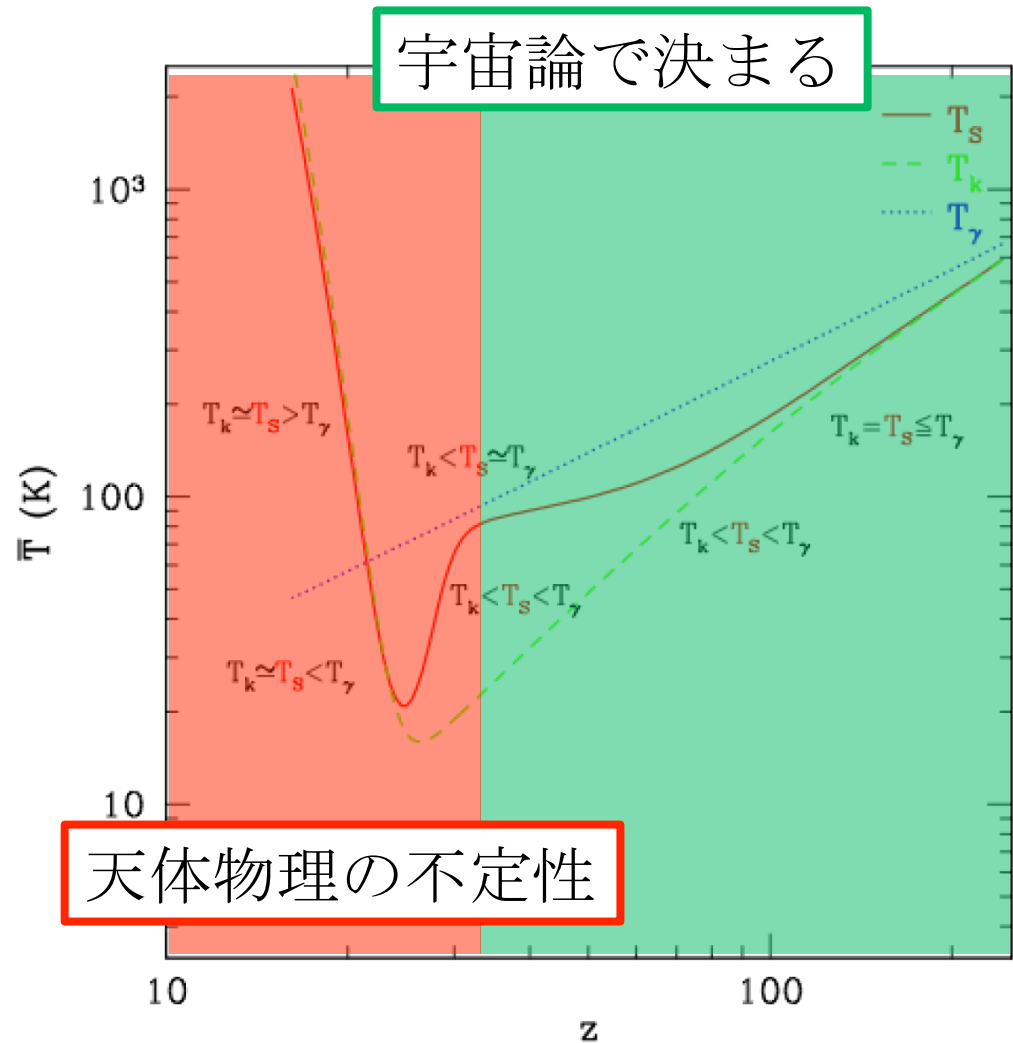
ガス密度が小さく
原子衝突が非効率

$z \sim 20$

天体からのLy α 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

$z \sim$
ガ
原

宇宙論と天体物理が入り混じる

- ので難しい

$z \sim$
天

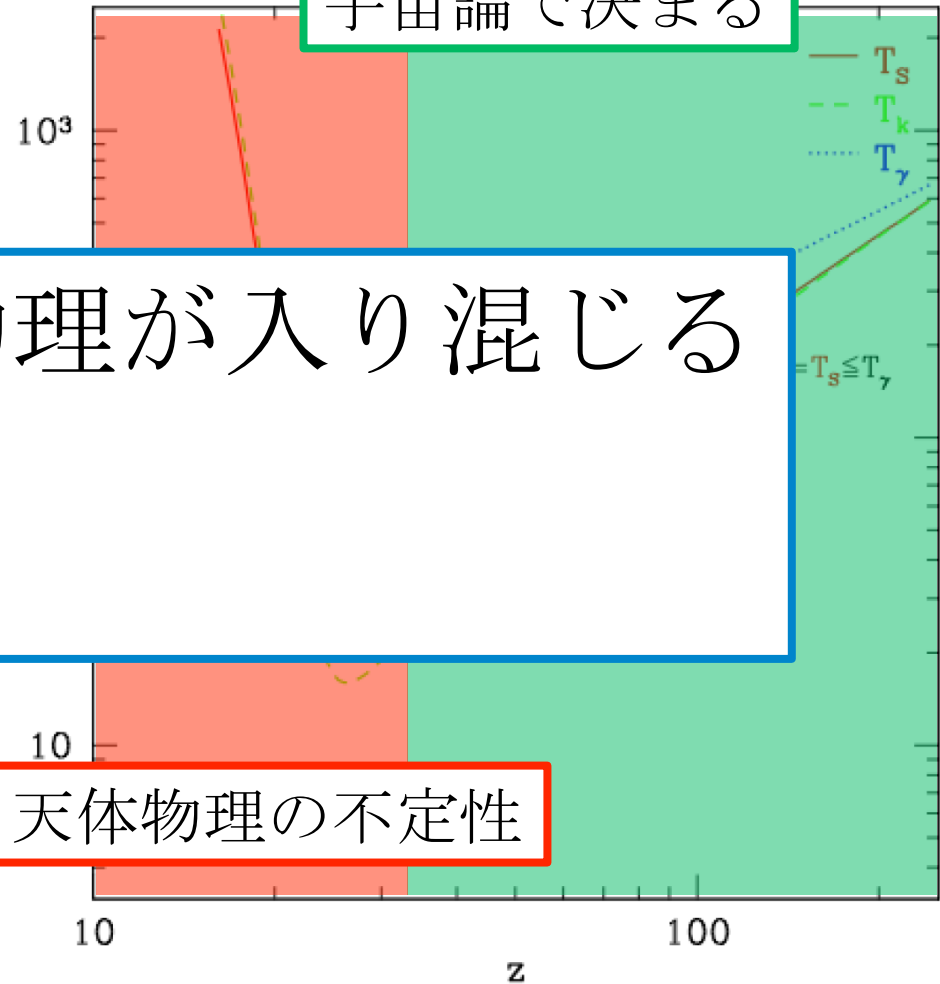
- ので楽しい

W-F効果が効く

$z \sim 15$

ガスが暖められCMB温度
を超える

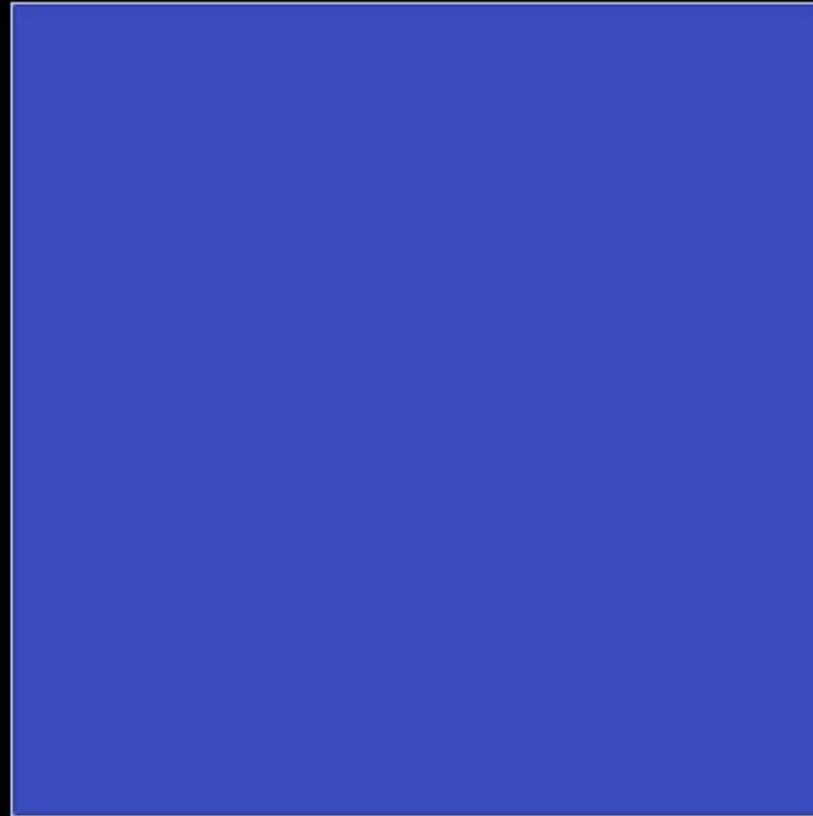
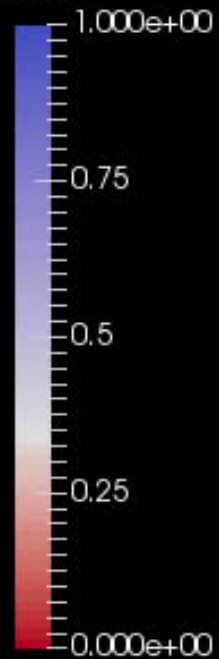
宇宙論で決まる



macroscopic simulation (160Mpc)³

Neutral Hydrogen Fraction

scalars

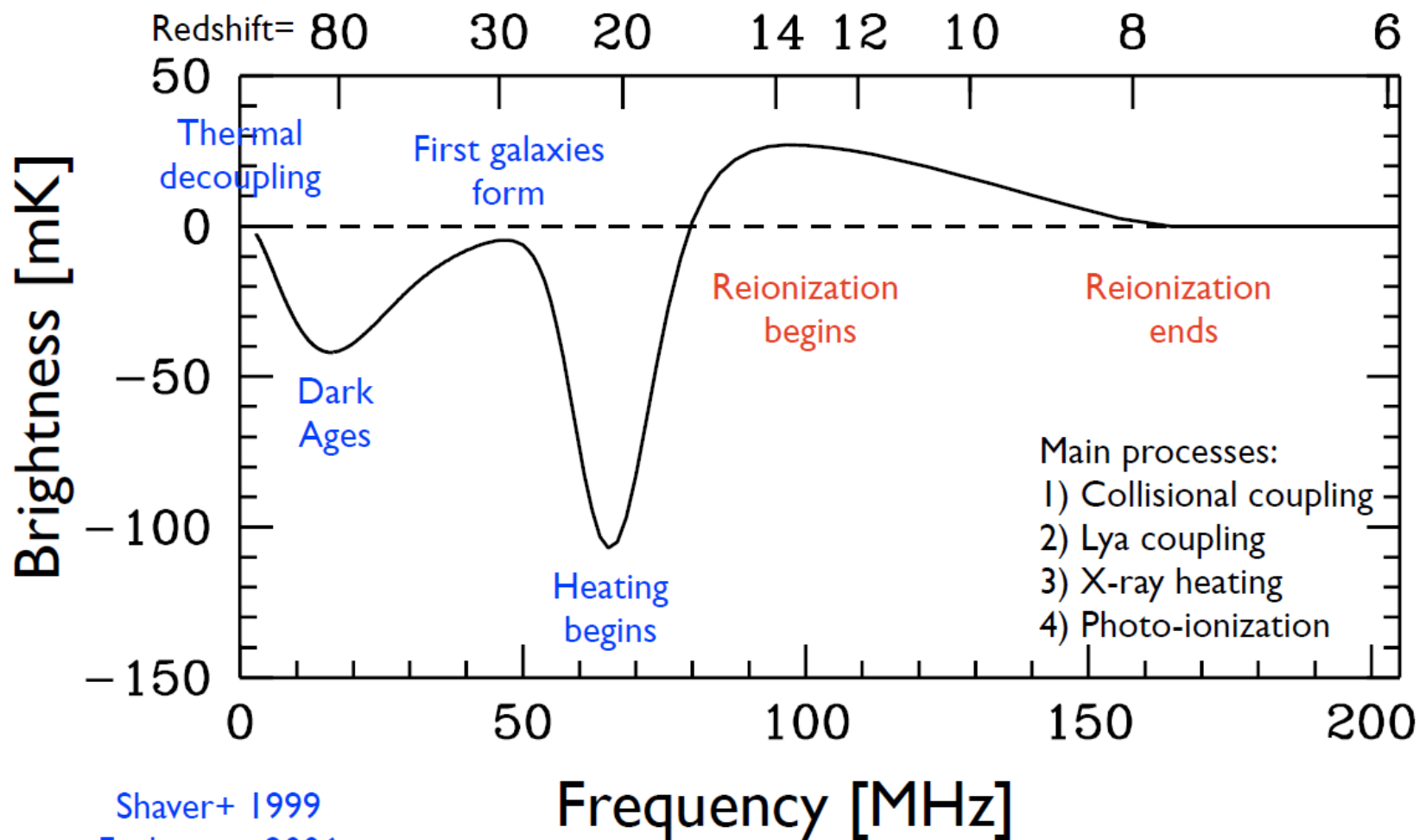


160 Mpc

長谷川 (名古屋)

輝度温度

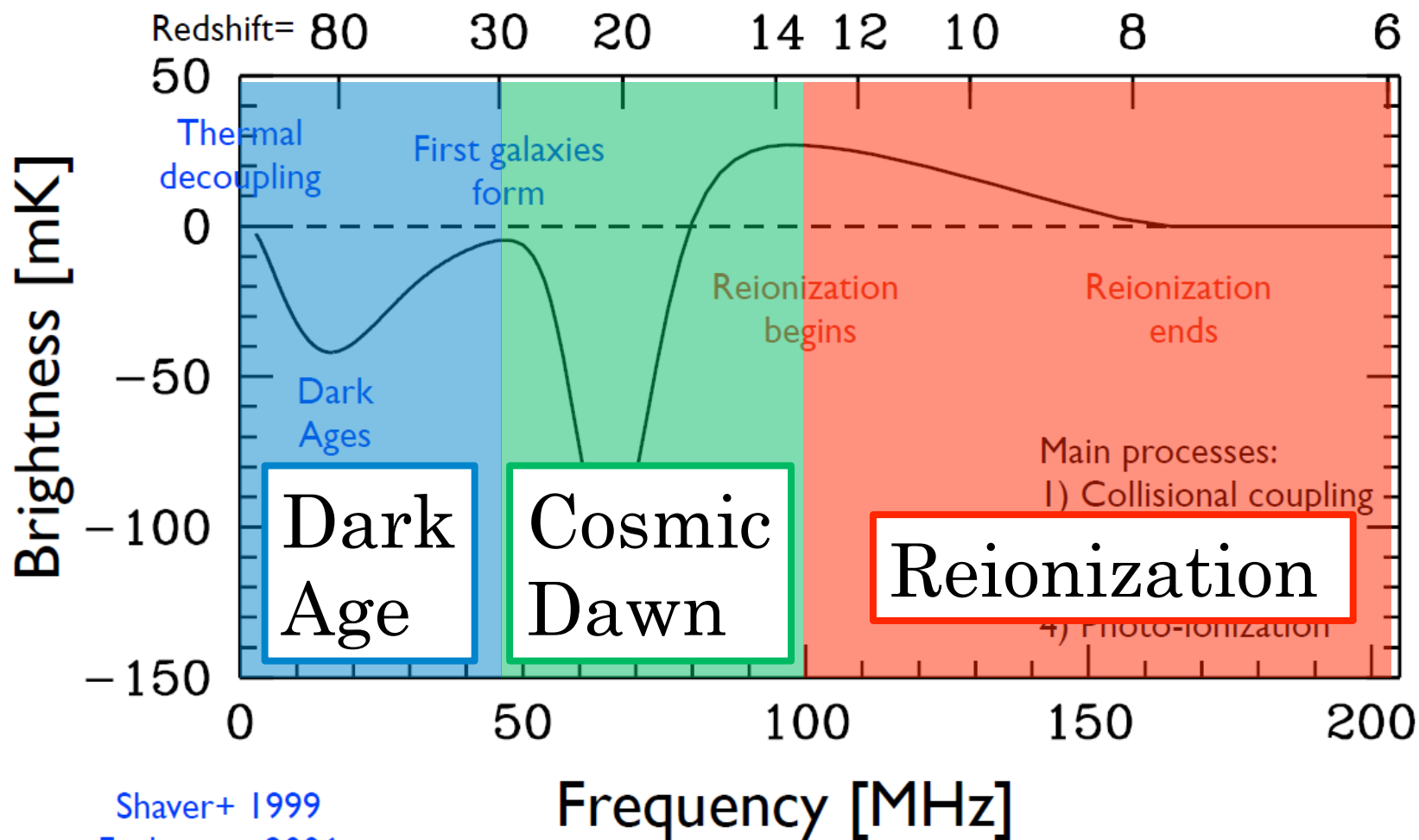
CMBとの温度差。正なら放射、負なら吸収。



Shaver+ 1999
Furlanetto 2006
Pritchard & Loeb 2010

輝度温度

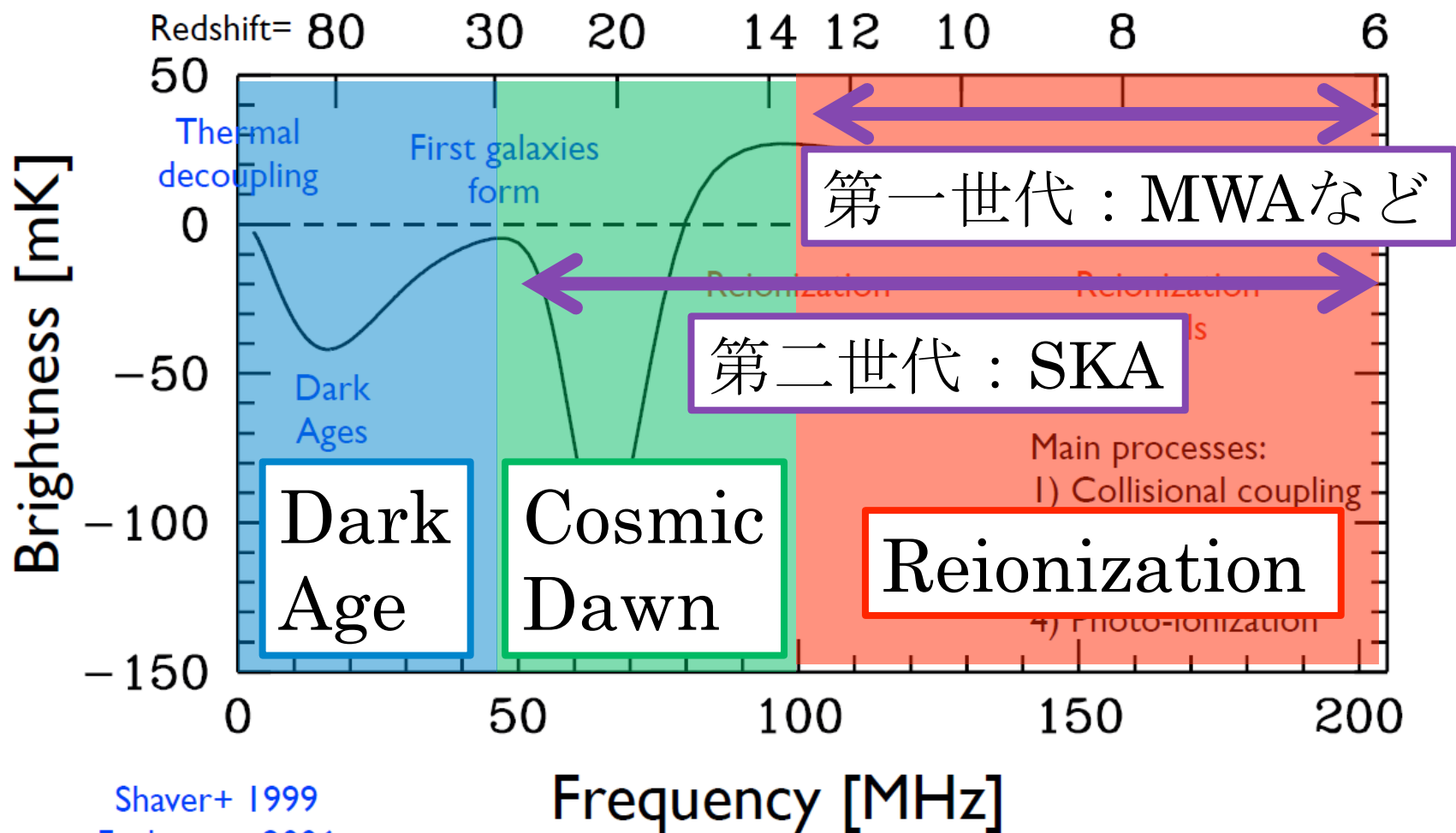
CMBとの温度差。正なら放射、負なら吸収。



Shaver+ 1999
Furlanetto 2006
Pritchard & Loeb 2010

輝度温度

CMBとの温度差。正なら放射、負なら吸収。



Shaver+ 1999
Furlanetto 2006
Pritchard & Loeb 2010

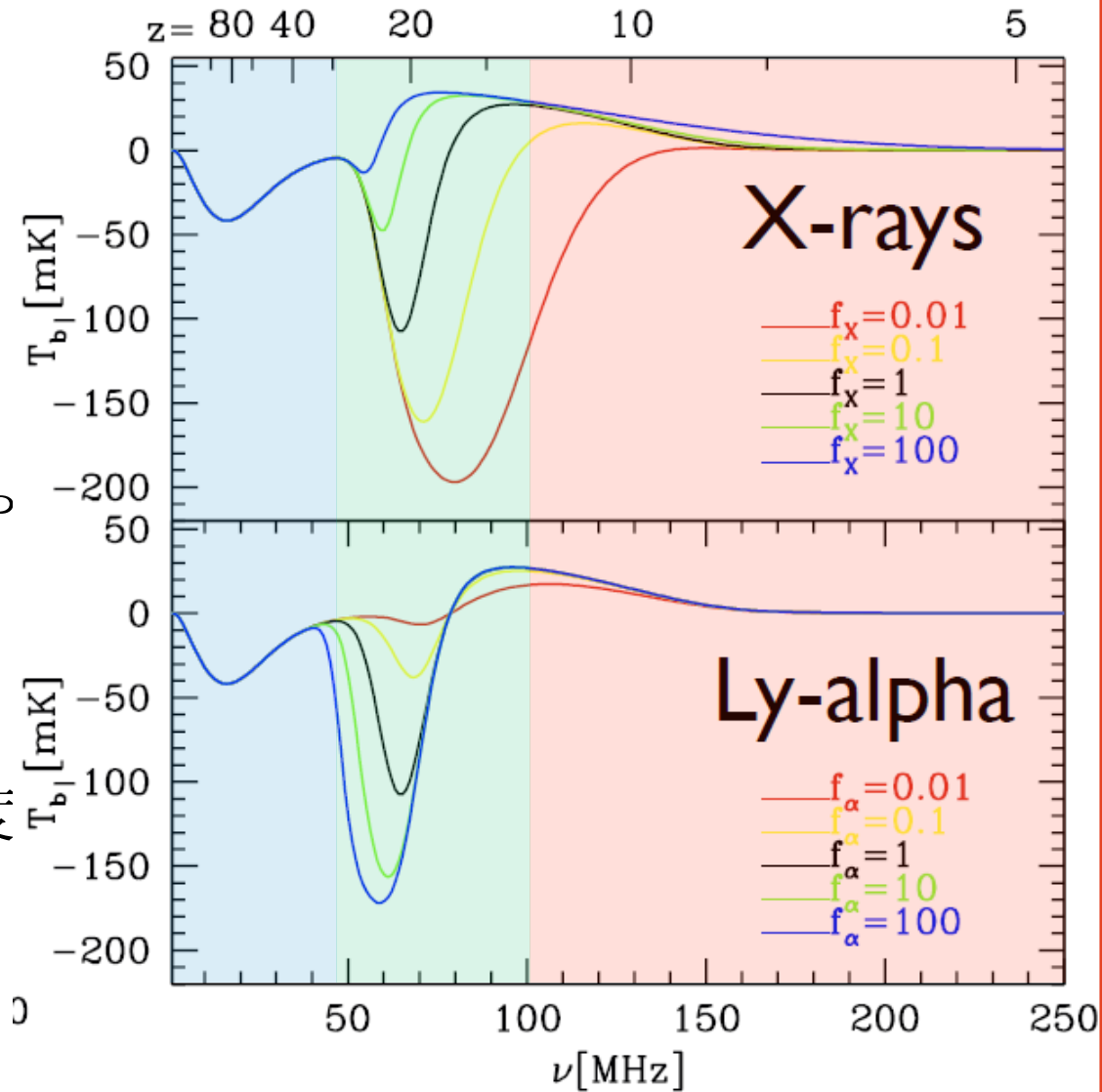
例

X線強度

- 銀河間ガスを加熱
- 放射源
 - QSO
 - X-ray binary
 - 超新星爆発
- PopIII初期質量関数やbinaryの割合に依存

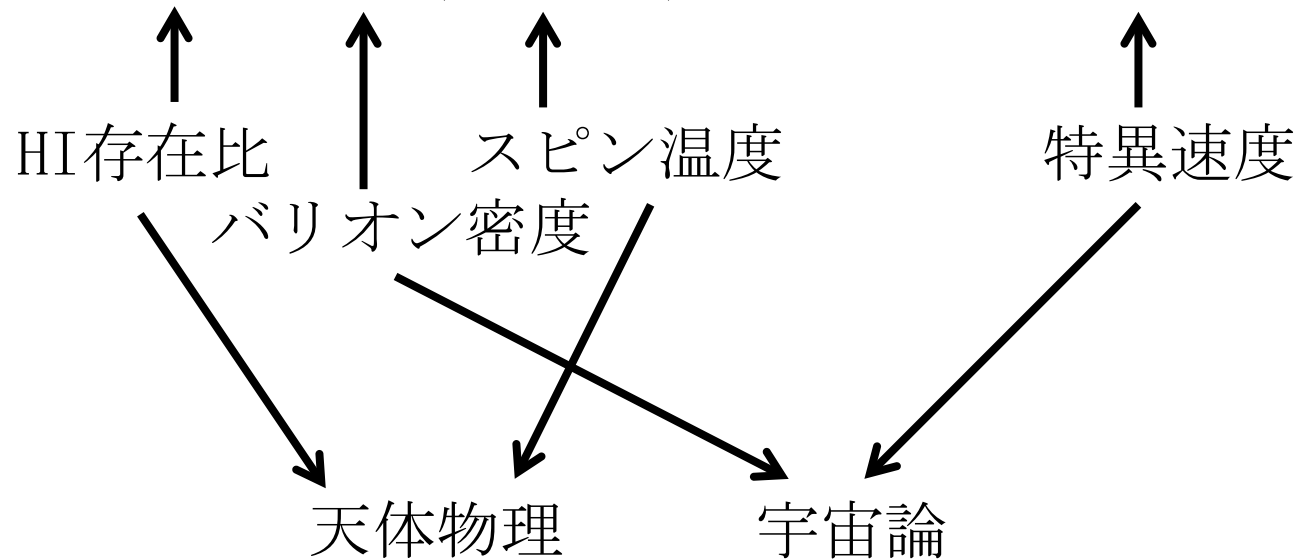
Ly α

- ガス温度とスピン温度の結合
- 主に星から
- 初期質量関数や星形成史に依存



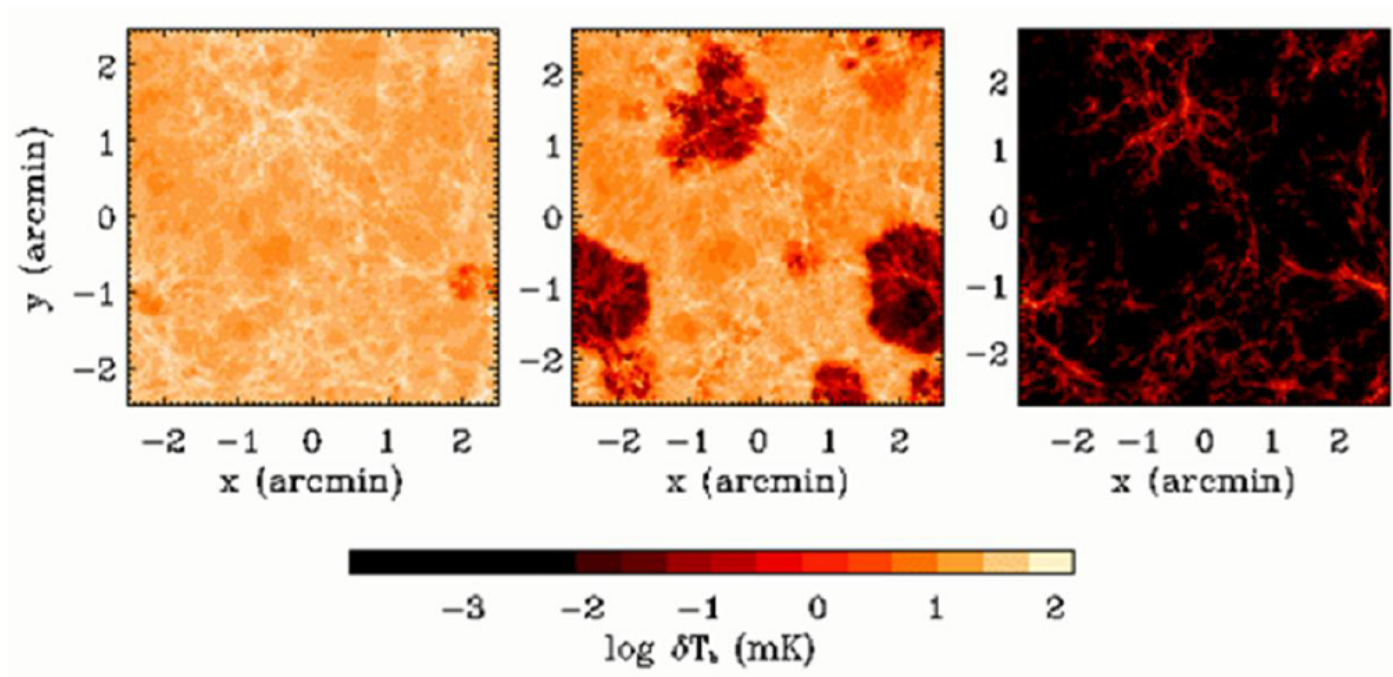
21cm線ゆらぎ

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



21cm線イメージング

輝度温度マップ



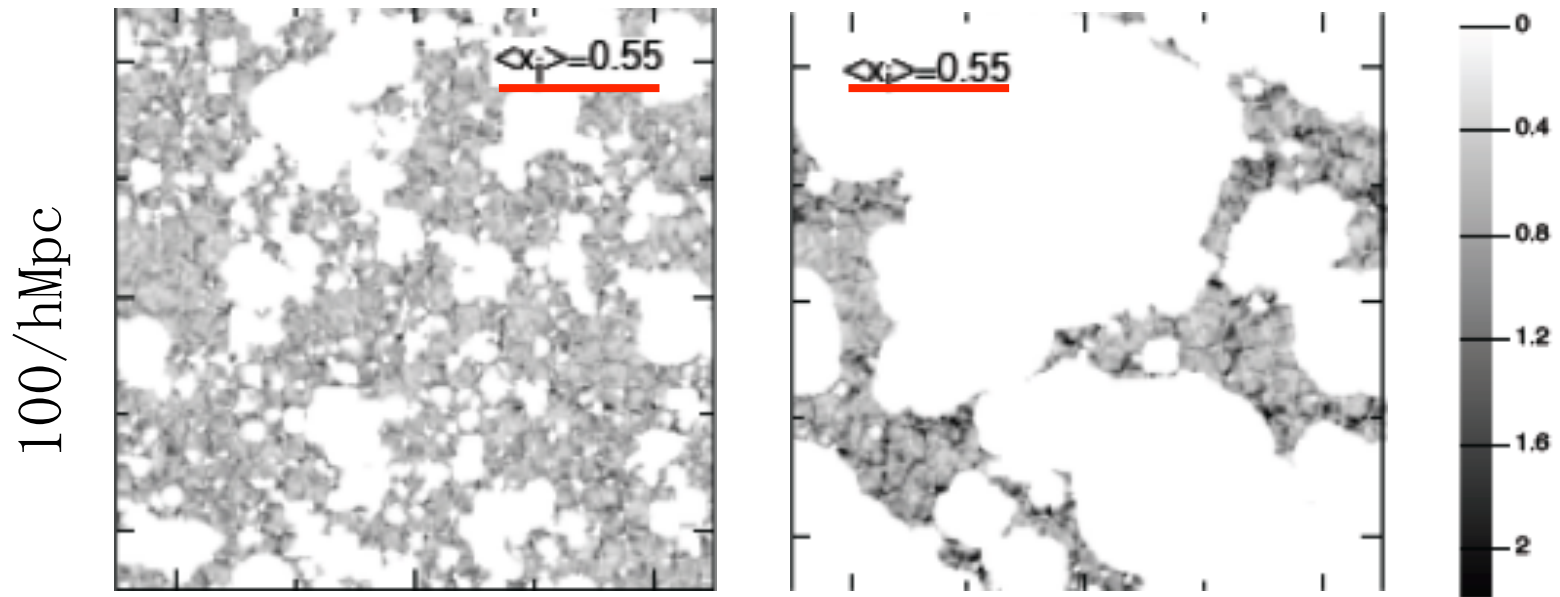
再電離の様子が時系列で見える！

イオン化バブルの真ん中を光赤外で見る
→ ALMA, TMT

21cm線イメージング

Kim et al. 2013

輝度温度マップ：同じ平均中性率でも・・・



小質量銀河が支配

大質量銀河が支配

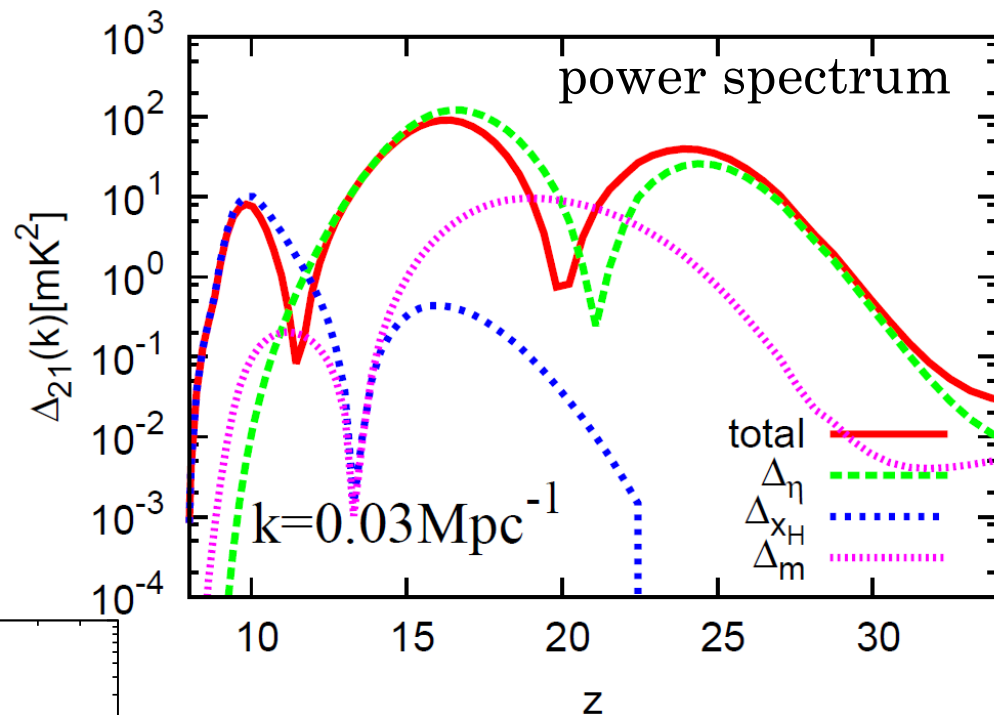
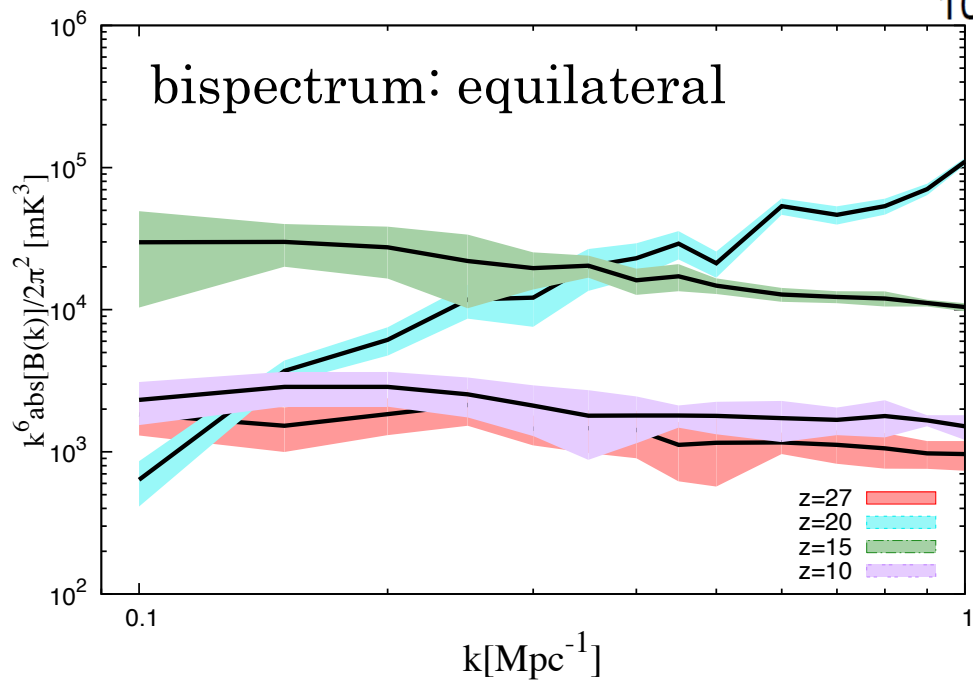
再電離に寄与したのはたくさんの小さな銀河か
少数の大きな銀河か

21cm線統計

Shimabukuro, Yoshiura, KT+, 15, 16, 17

第一世代望遠鏡では
イメージングは難しい。
統計的にゆらぎの情報を
引き出す。

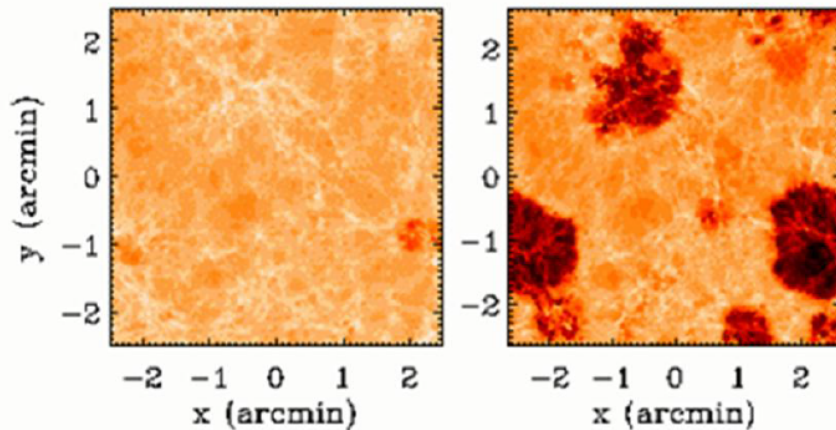
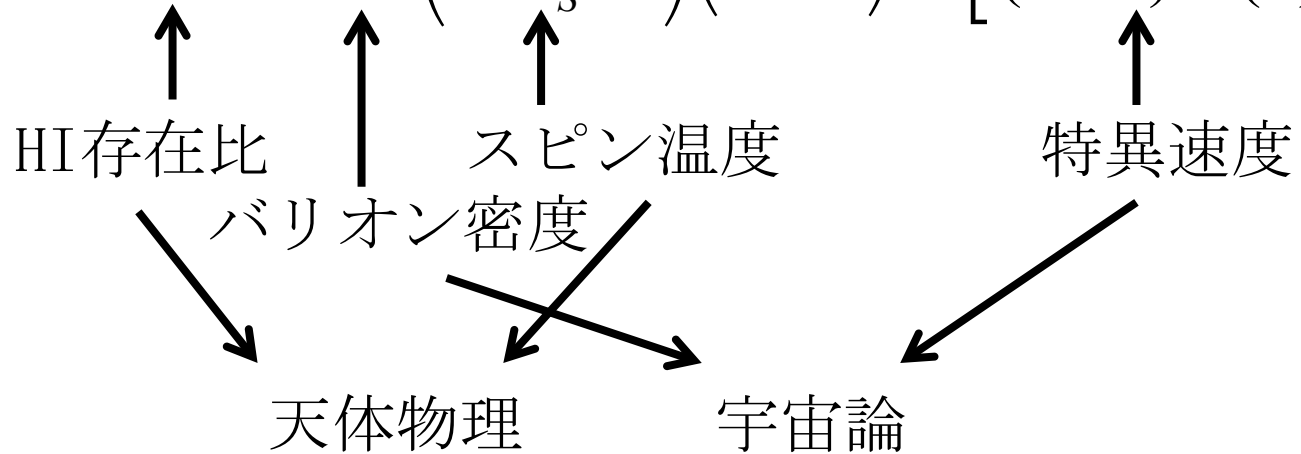
→ パワースペクトル
バイスペクトル



統計的情報から
どのようにして
(天体) 物理的情報を
引き出すかが今後の課題

21cm線宇宙論

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



- 再電離以前を狙う
- スケール：1Mpc - 100Mpc
- 莫大な情報 (2D → 3D)
- 小スケールゆらぎ、原始磁場
非ガウス性、原始重力波
ニュートリノ質量、宇宙ひも
原始ブラックホール

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、SMBH
- ・ ガス：分布、速度、温度、電離度

宇宙論

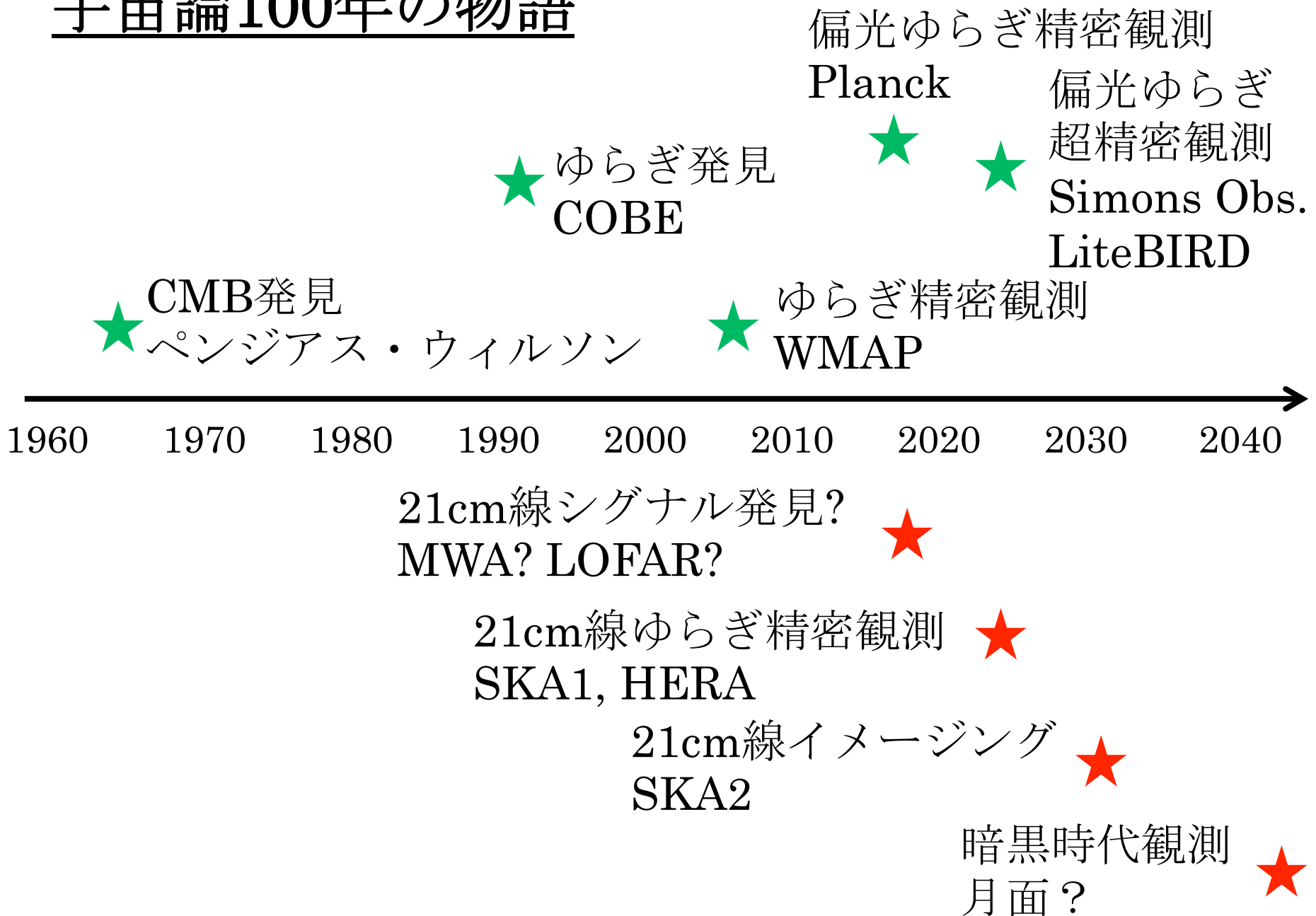
- ・ 小スケールゆらぎ、非ガウス性
- ・ 早期暗黒エネルギー
- ・ ニュートリノ質量
- ・ 原始磁場

新しい物理

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

広範なサイエンス！
多分野協力が必須！

宇宙論100年の物語



3、再電離21cm線観測の幕開け

観測開始

MWA (2010~)

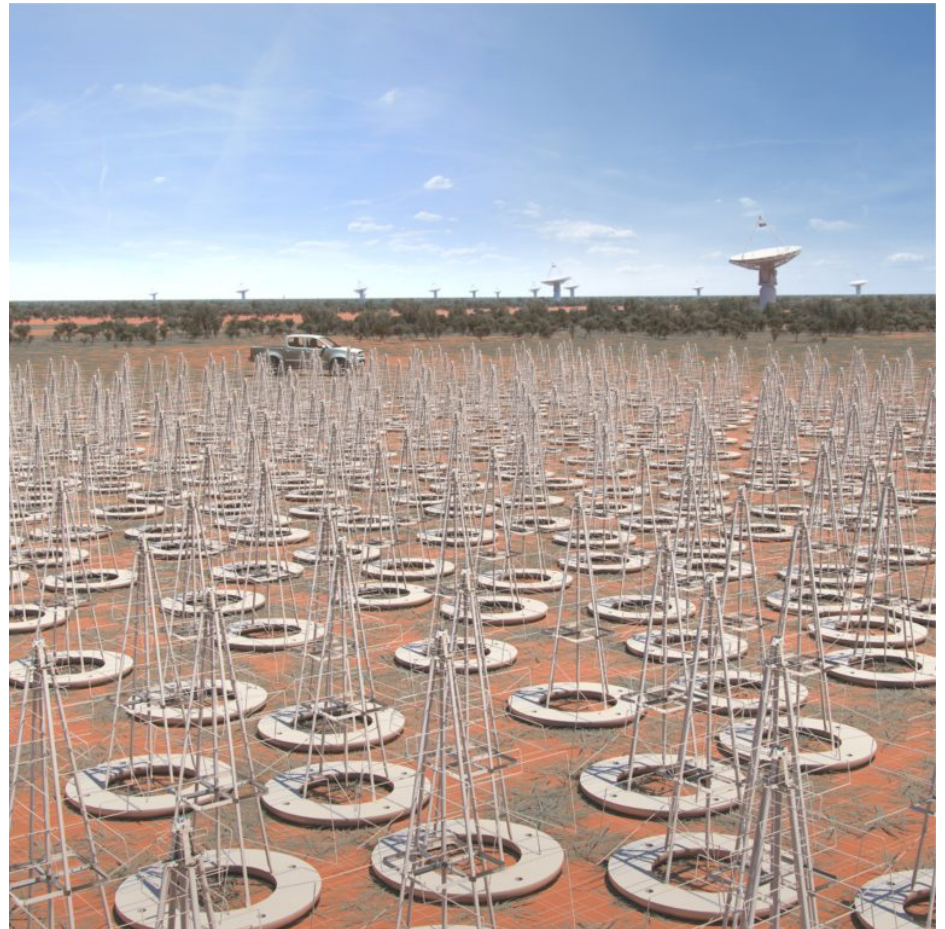
LOFAR (2012~)

PAPER (2010~)

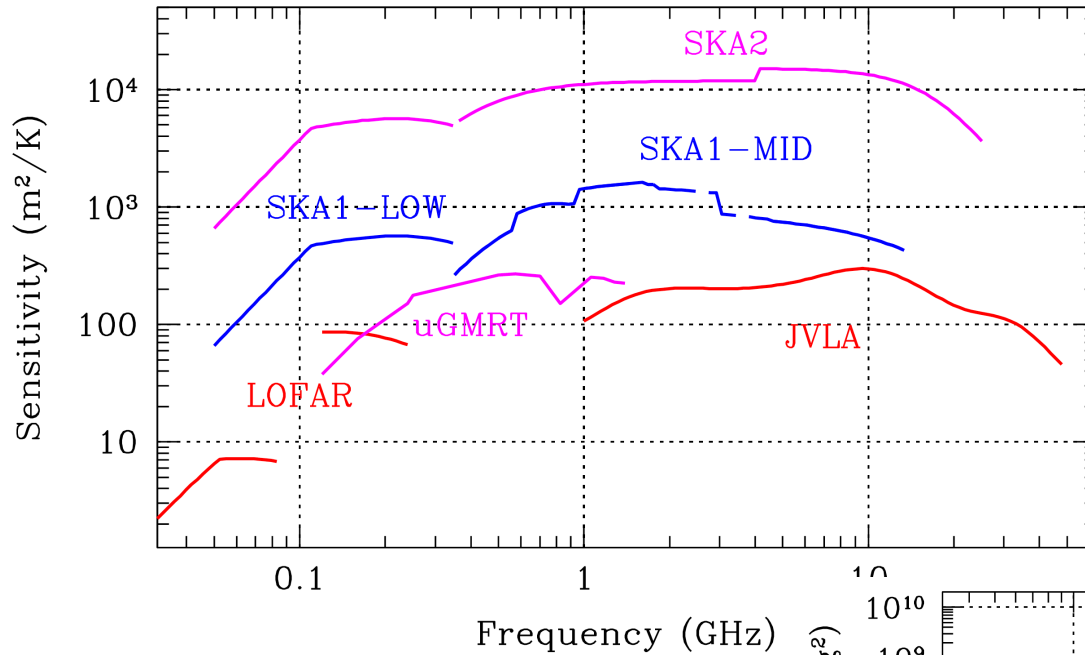


SKA-Low

- オーストラリア
- 50 - 350MHz, log-periodic antenna
- SKA1: 2020-
- SKA2: 2025?-
- EoR 21cm線、パルサー

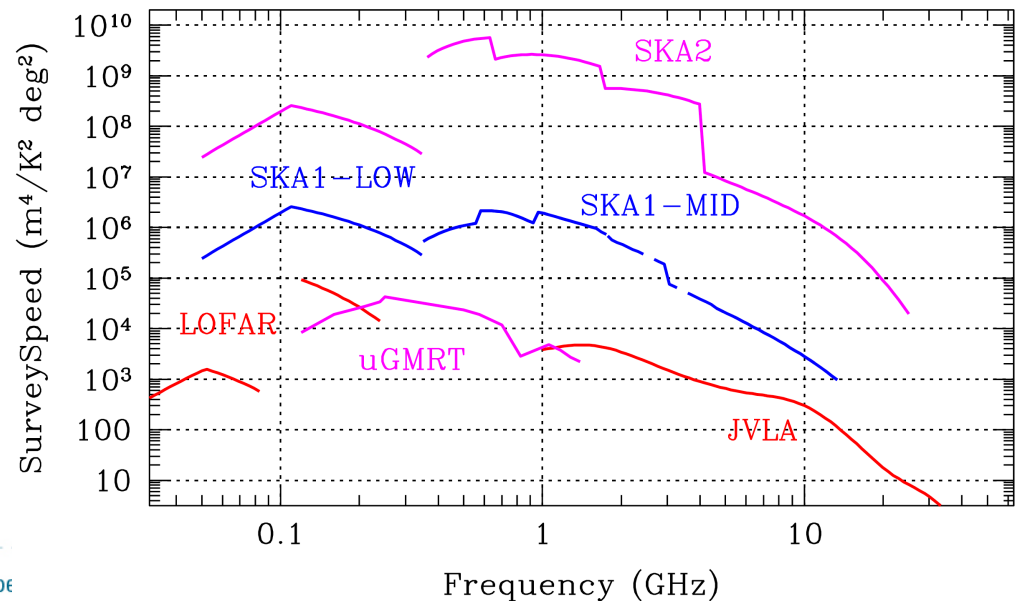


性能比較



Point-source sensitivity:
~ 4 – 20 times state-of-the-art

Survey speed:
~ 10 - 100 times state-of-the-art



MWA: SKA precursor

日本、オーストラリア、アメリカ、インド、中国、カナダ

MWA-Japan

熊本大学、名古屋大学、鹿児島大学

東京大学、東北大学、国立天文台



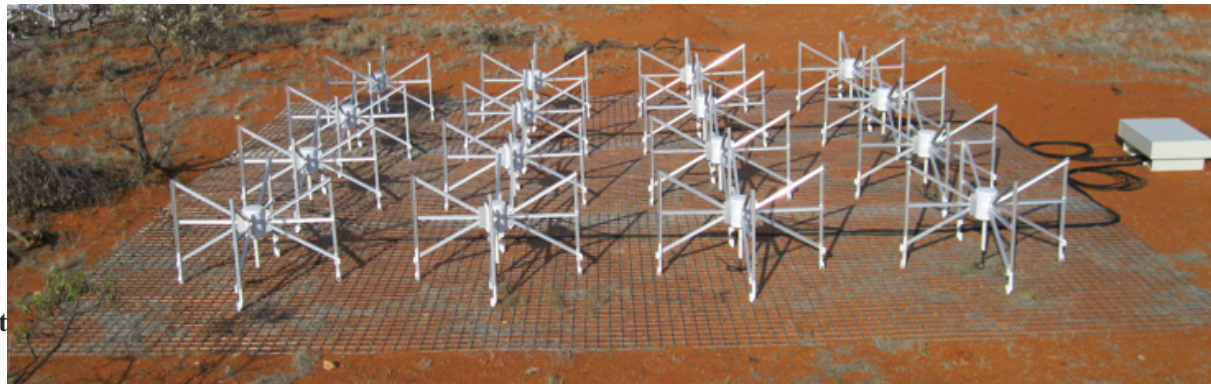
Murchison Widefield Array



GOVERNMENT OF
WESTERN AUSTRALIA



Australian Government



Randall Wayth
Director, MWA

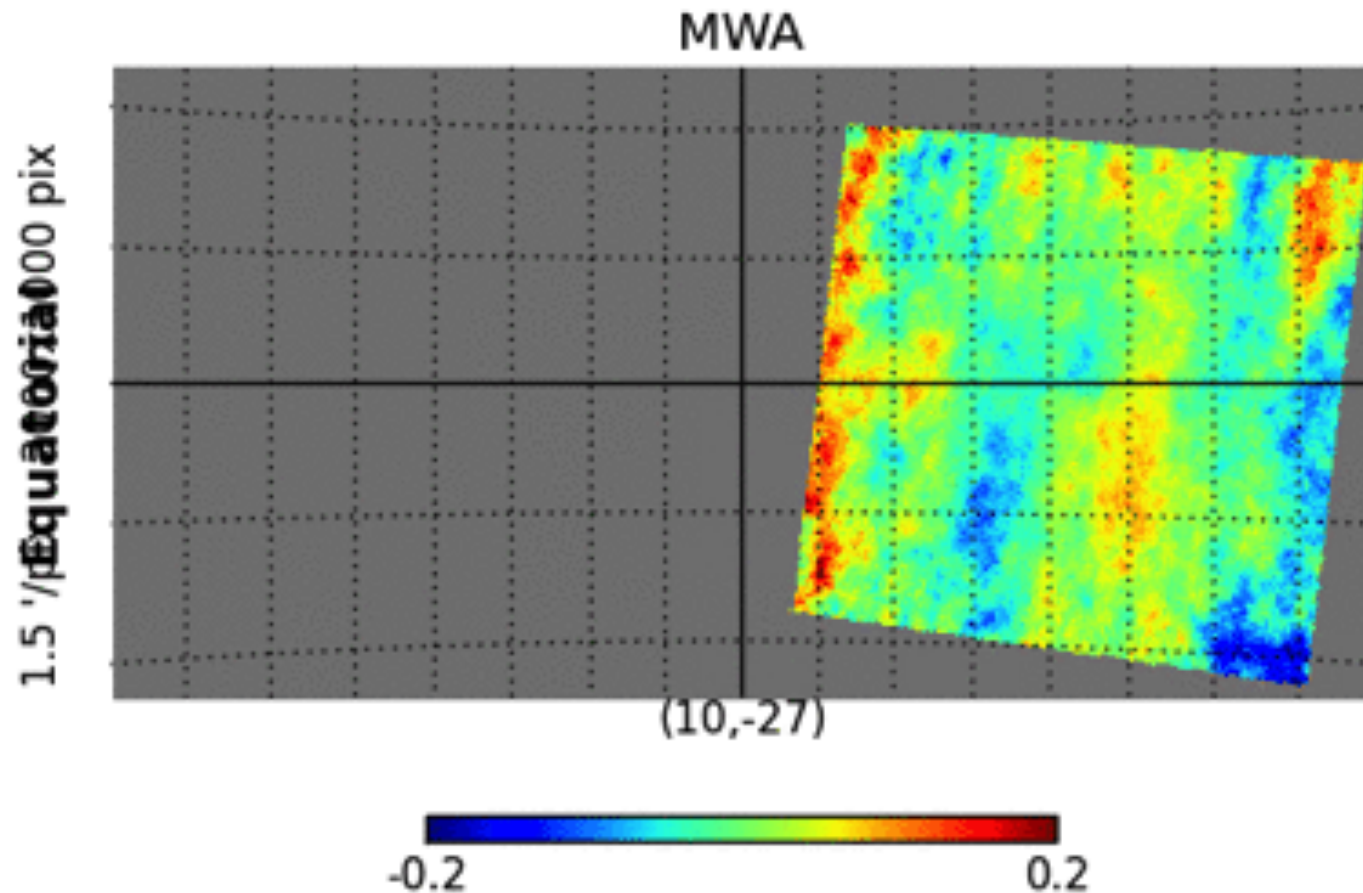


THE UNIVERSITY OF
SYDNEY



データ解析

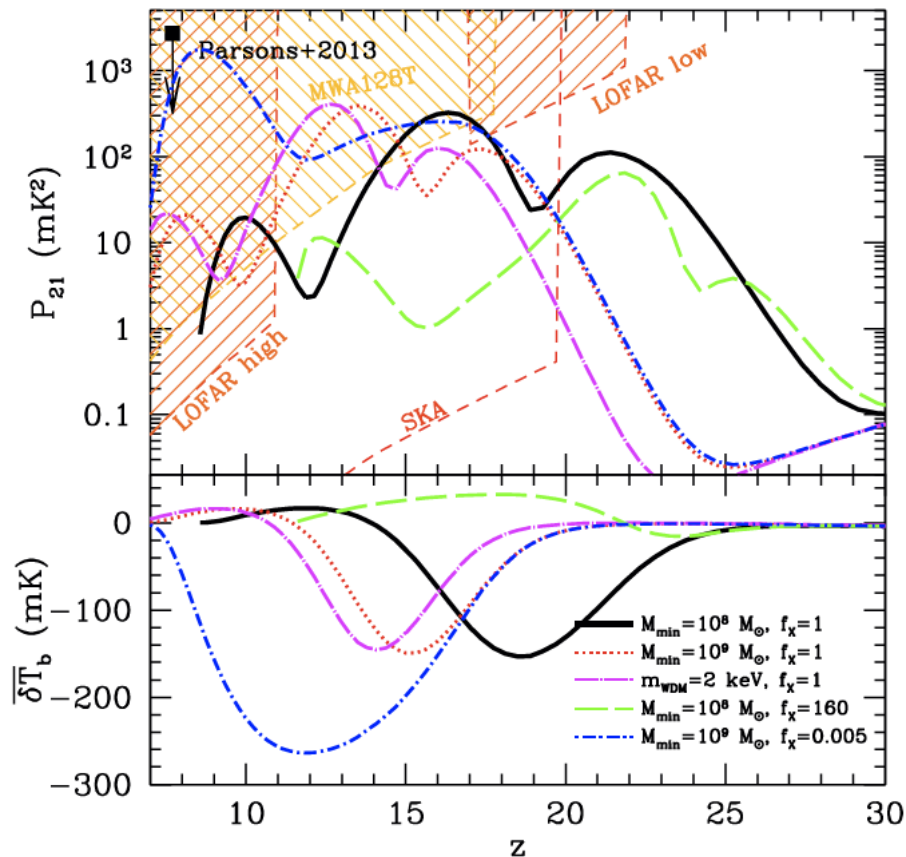
drift scan : 吉浦 (熊本大学)



予想感度

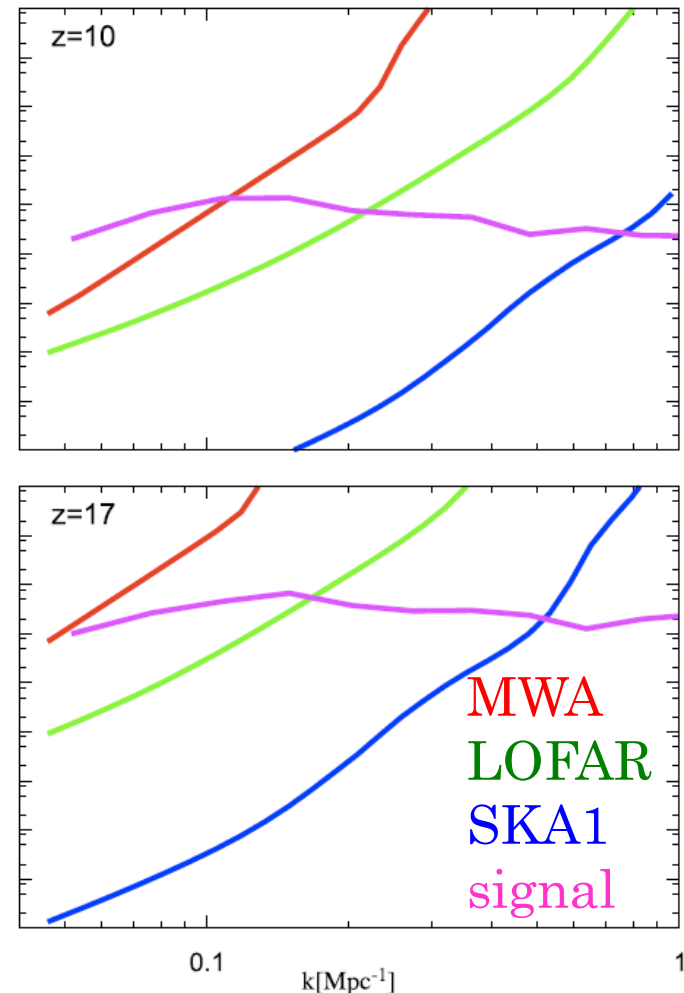
power spectrum

- Mesinger et al. 2014
- 2000時間の観測



bispectrum

- Yoshiura, KT+ 2015
- 1000時間の観測

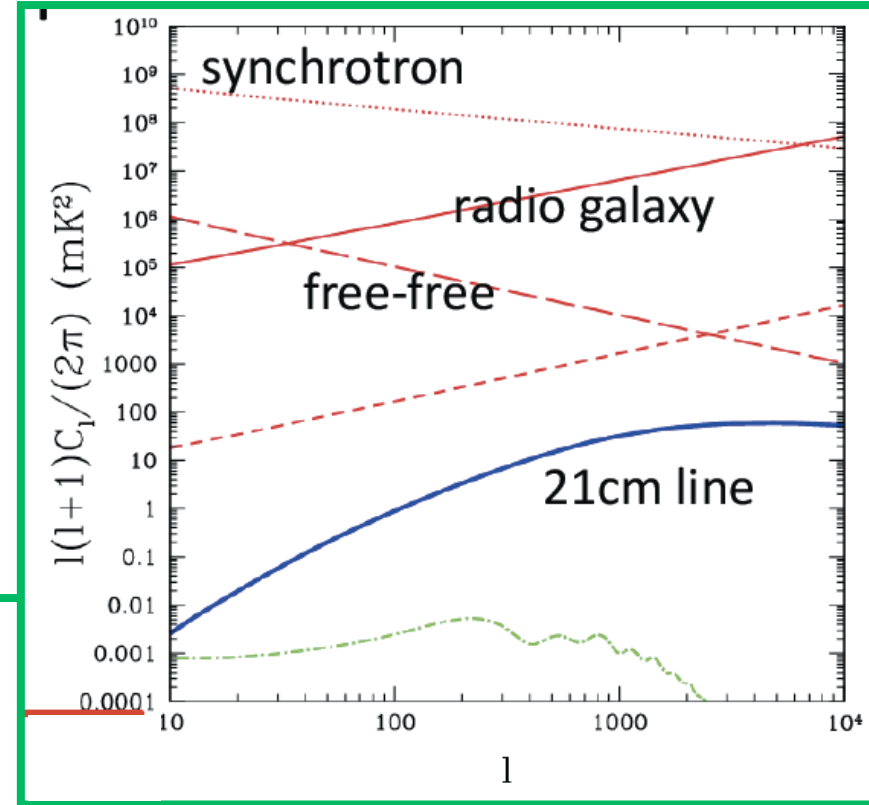
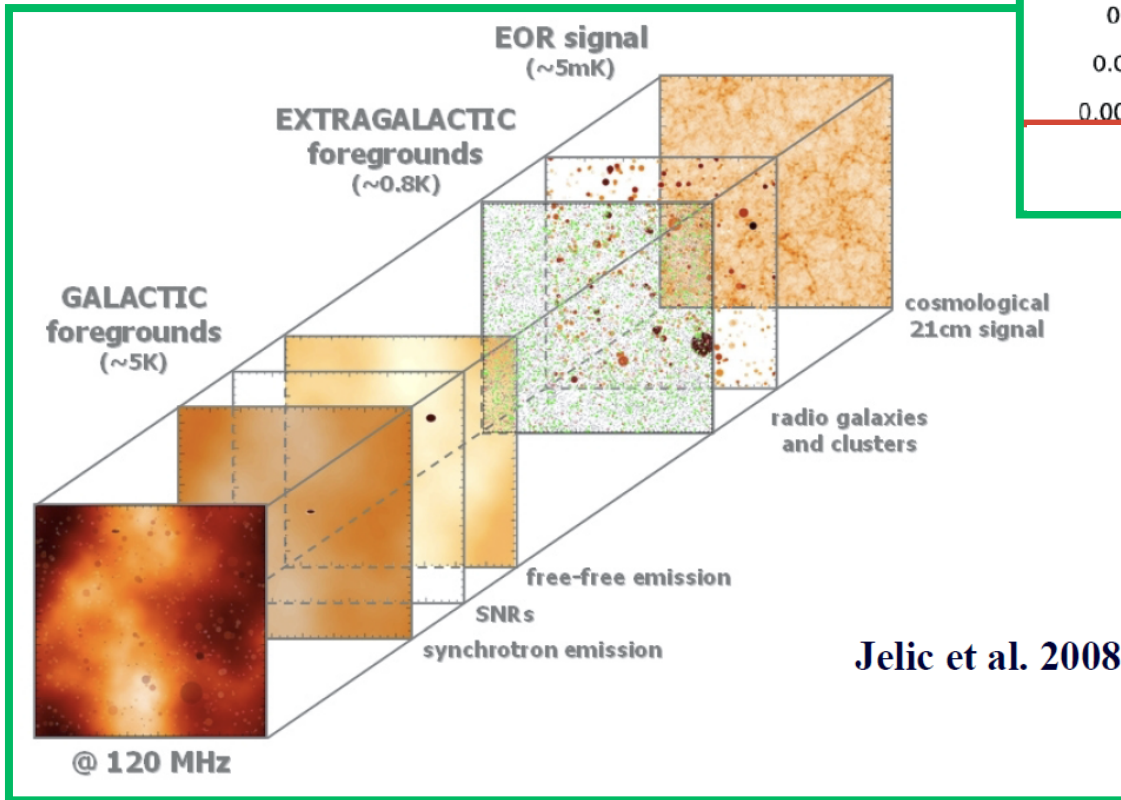


原理的な感度は現行の望遠鏡で足りている

本当に観測できるか？

強烈な前景放射

- ・ 銀河系
- ・ 銀河系外電波天体
- ・ 地球大気



power spectrumで
前景放射は
signalの6桁上！

どう差し引いて
signalを得るか？

前景放射対策

銀河系外点源

- 地球電離層
 - 天体の見かけの位置をずらす
 - 時々刻々と変化
- 望遠鏡特性
 - ビーム形状、周波数応答
 - 視野外からも寄与

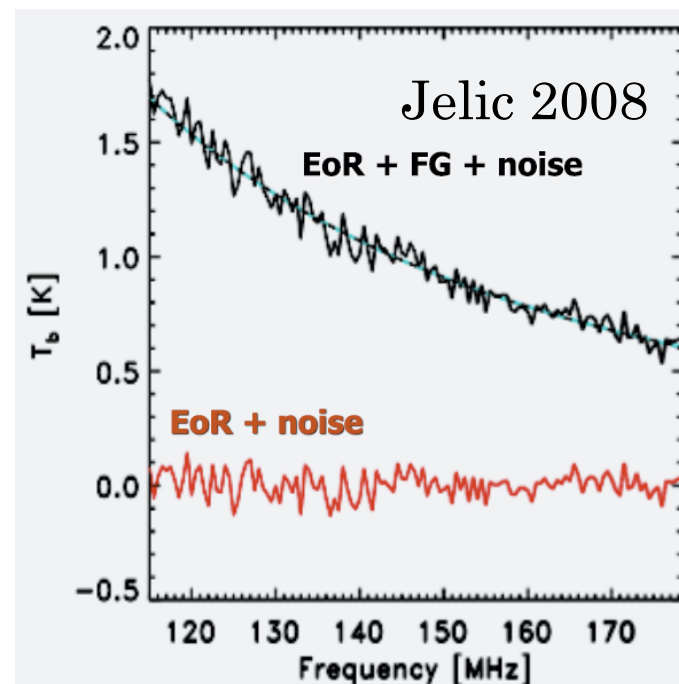
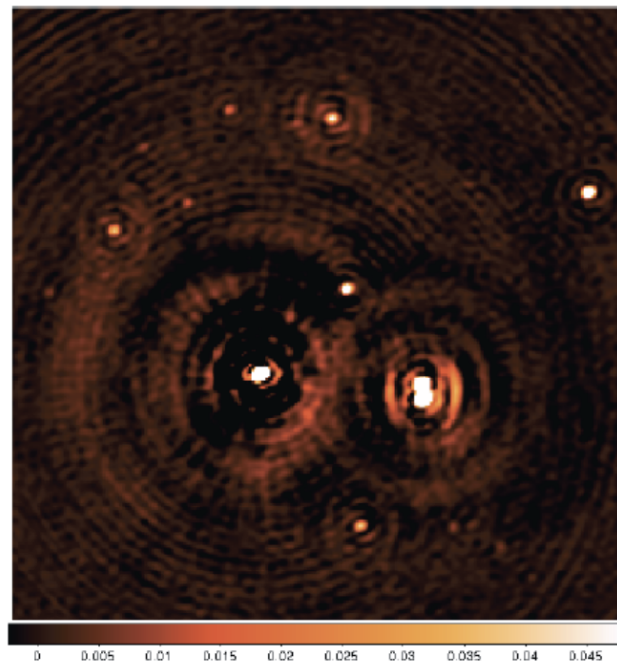
→ sky modelで分布を推定、除去

銀河系電波放射

- シンクロトロン、free-free
- 銀河系放射は空間的にも、
スペクトル的に滑らか

→ 滑らかな成分を差し引く

現在、4桁程度は除去できている



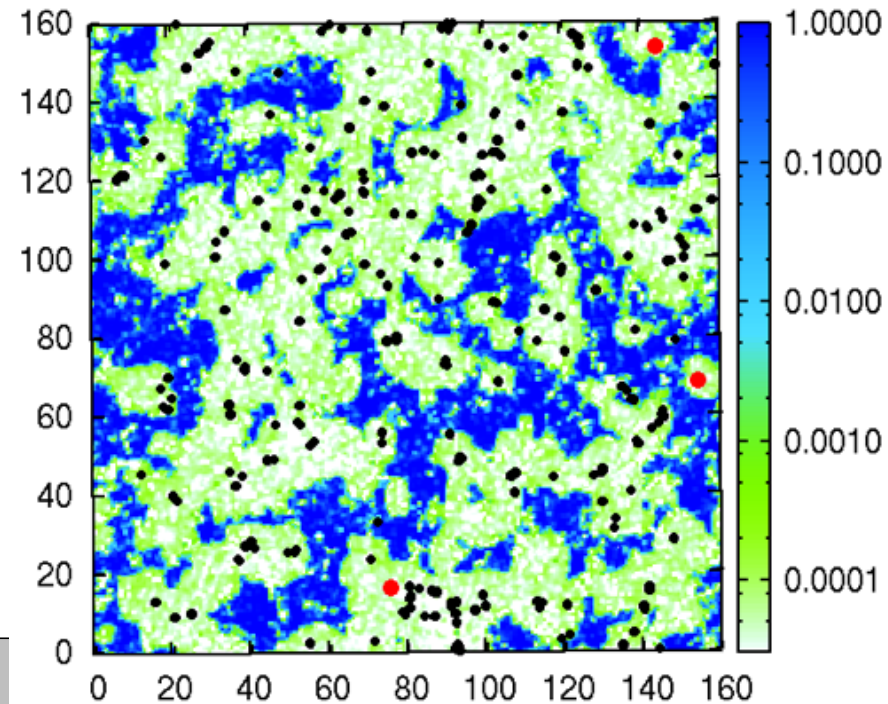
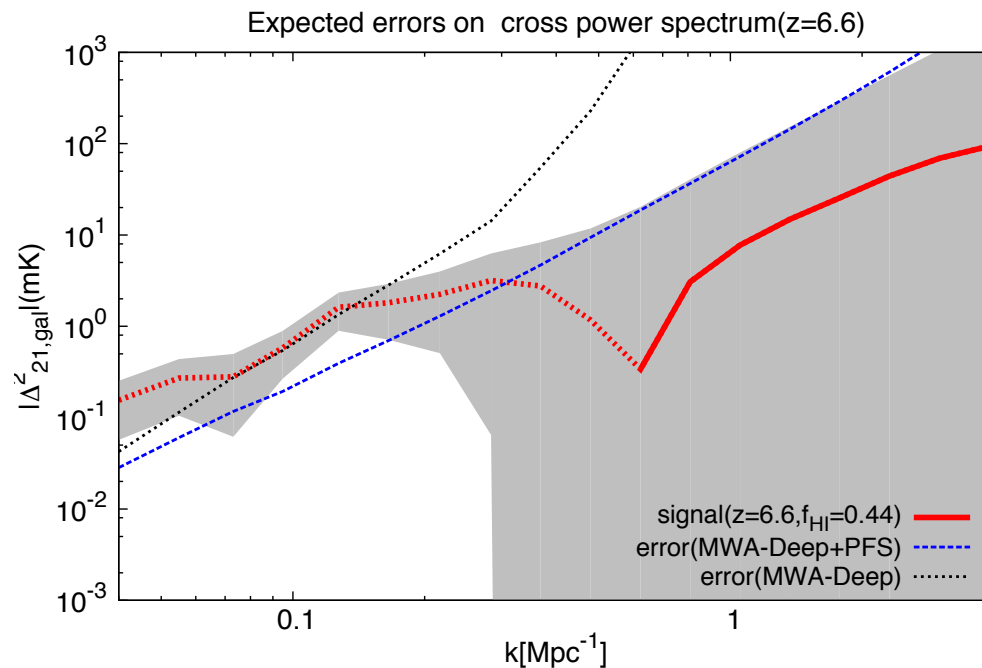
相互相関

銀河（電離源）との相関で
前景放射を統計的に避ける

Subaru HSC + MWA

Kubota, Yoshiura, Hasegawa

KT+ (2017)



4、まとめ

まとめ

これまで未開拓の「宇宙の幼年期」

- ・ 2020年代以降の天文学の最大のトピックの1つ
 - ・ 宇宙論、星形成、銀河形成、超新星、ブラックホール
ガンマ線バーストなどあらゆる天文学を総動員
 - ・ 電波、光赤外、X線など多波長観測が必要
 - ・ MWAなどSKA0で新しい時代が開かれようとしている
 - ・ 近いうちに初検出？
-
- ・ SKA-Japan宇宙再電離チーム：
長谷川（名古屋）代表