

# 再電離の時期の21cm線輝線観測 による宇宙論

総合研究大学院大学 KEK宇宙物理グループ  
D3 大山祥彦

SKA-Japanワークショップ2015, 2015年3月3日

# contents

1. 21cm線輝線サーベイの概要
2. ニュートリノ質量
3. その他の宇宙論的な利用
4. Summary

# contents

1. 21cm線輝線サーベイの概要

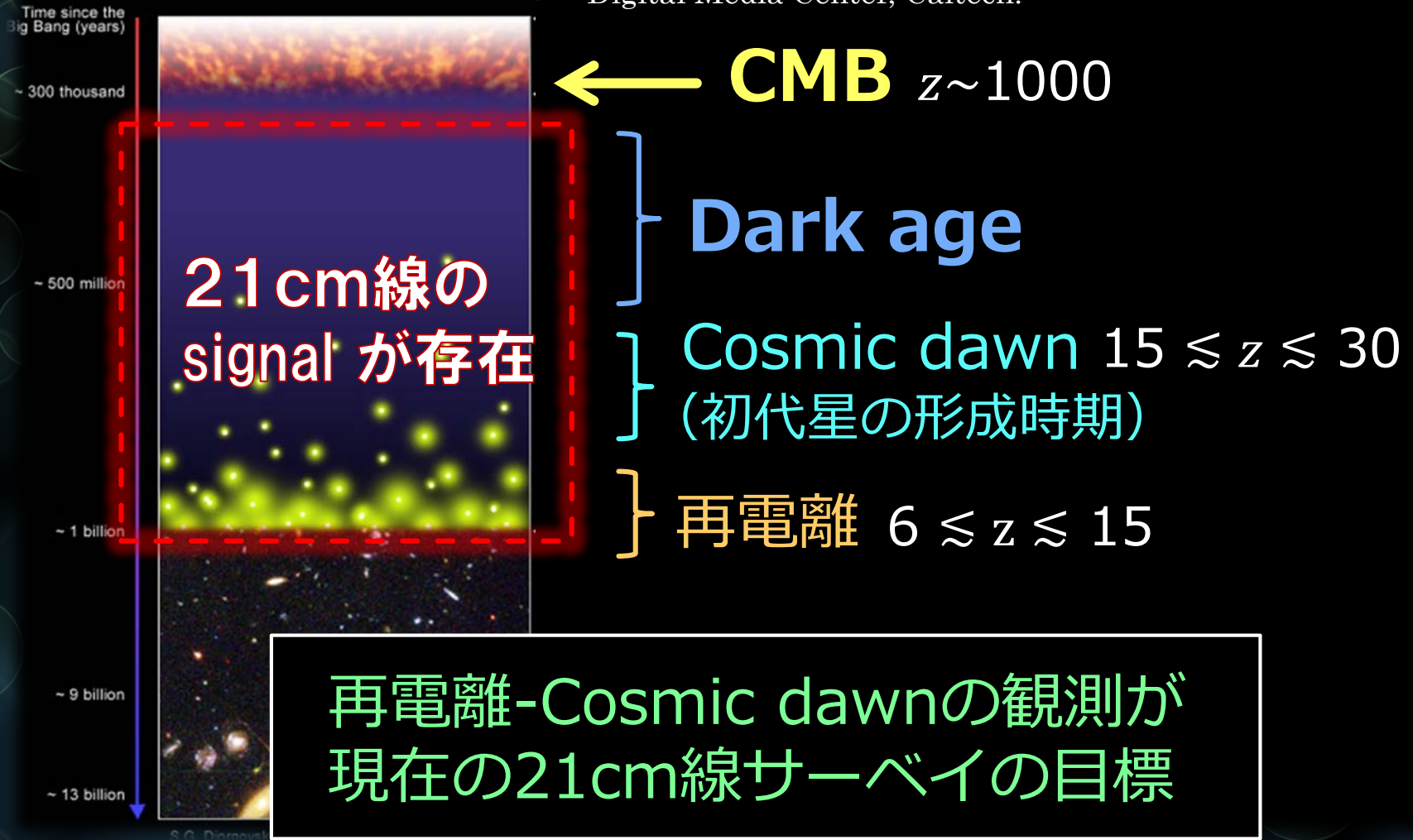
2. ニュートリノ質量

3. その他の宇宙論的な利用

4. Summary

# ◇ 観測対象: Cosmic dawn-再電離

What is the Reionization Era? S.G. Djorgovski et al. &  
A Schematic Outline of the Cosmic History Digital Media Center, Caltech.



◇ 21cm線輝度温度(とCMB温度の差)  $\delta T_b$

$$\delta T_b \approx 27 x_{\text{HI}} (1 + \delta_b) \left( \frac{\Omega_b h^2}{0.023} \right) \left( \frac{0.15}{\Omega_m h^2} \frac{1+z}{10} \right)^{\frac{1}{2}}$$

バリオンの密度ゆらぎ  $\times \left[ 1 - \frac{T_\gamma}{T_S} \right] \left[ \frac{H(z)/(1+z)}{dv_{\parallel}/dr_{\parallel}} \right] \text{mK}$

1. 水素ガスの固有運動
2. 宇宙膨張

$T_S$  : スピン温度

$$\frac{n_1}{n_0} \equiv \frac{g_1}{g_0} \exp\left(-\frac{h\nu_{21}}{k_B T_S}\right)$$

$T_\gamma$  : CMB温度

$x_{\text{HI}}$  : 中性水素比

$T_S > T_\gamma$  放射線 ( $6 \lesssim z \lesssim 15$ )

$T_S < T_\gamma$  吸収線 ( $15 \lesssim z$ )



# ◇ 21cm線輝線サーベイの計画

第1世代

LOFAR



MWA



PAPER



21CMA



## ◆ SKA (Square Kilometer Array)

SKA-low:

$40 - 50\text{MHz} \lesssim \nu \lesssim 190 - 240\text{MHz}$



<http://www.skatelescope.org/>

# contents

1. 21cm線輝線サーベイの概要

2. ニュートリノ質量

3. その他の宇宙論的な利用

4. Summary

# ◇ ニュートリノと関係するパラメータ

## Parameters of neutrino

- Known parameters  
(ニュートリノ振動実験より)

$$\Delta m_{21}^2, |\Delta m_{31}^2|, \theta_{23}, \theta_{12}, \theta_{13}$$

- Unknown parameters

質量の大きさ (質量の絶対値)

Dirac CP位相:  $\delta$ , Majorana CP位相:  $\alpha, \beta$

$\Delta m_{31}^2$ の符号: 質量階層構造



# ◇ 現在のニュートリノ質量の制限

## Tritium beta decay

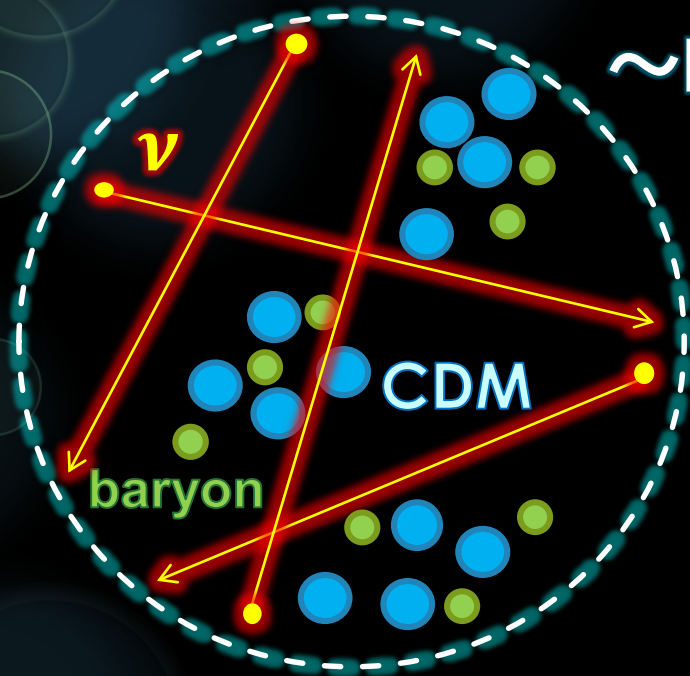
(Troitsk, Mainz)

$$m_{\nu_e} < 2.05 - 2.3\text{eV (95\%CL)}$$

C. Kraus, et al., Eur. Phys. J. C 40 (2005) 447.

V.M. Lobashev, Nucl. Phys. A 719 (2003) 153.

# ◇ 宇宙の構造形成とニュートリノ



~Horizon scale

relativistic  $m_\nu c^2 \ll k_B T$   
な時  $\nu$  は Horizon まで走る  
(Free-streaming)

自由運動によりニュートリノ自身の  
密度ゆらぎは減衰する

◇ 密度ゆらぎの成長  $\delta_m \equiv \frac{\rho - \bar{\rho}}{\bar{\rho}}$

大スケール (Free streaming scale以上)

$$\Omega_m = \Omega_{CDM} + \Omega_b + \Omega_\nu$$

ニュートリノも重力成長に効く  $\delta_m \propto a$ .

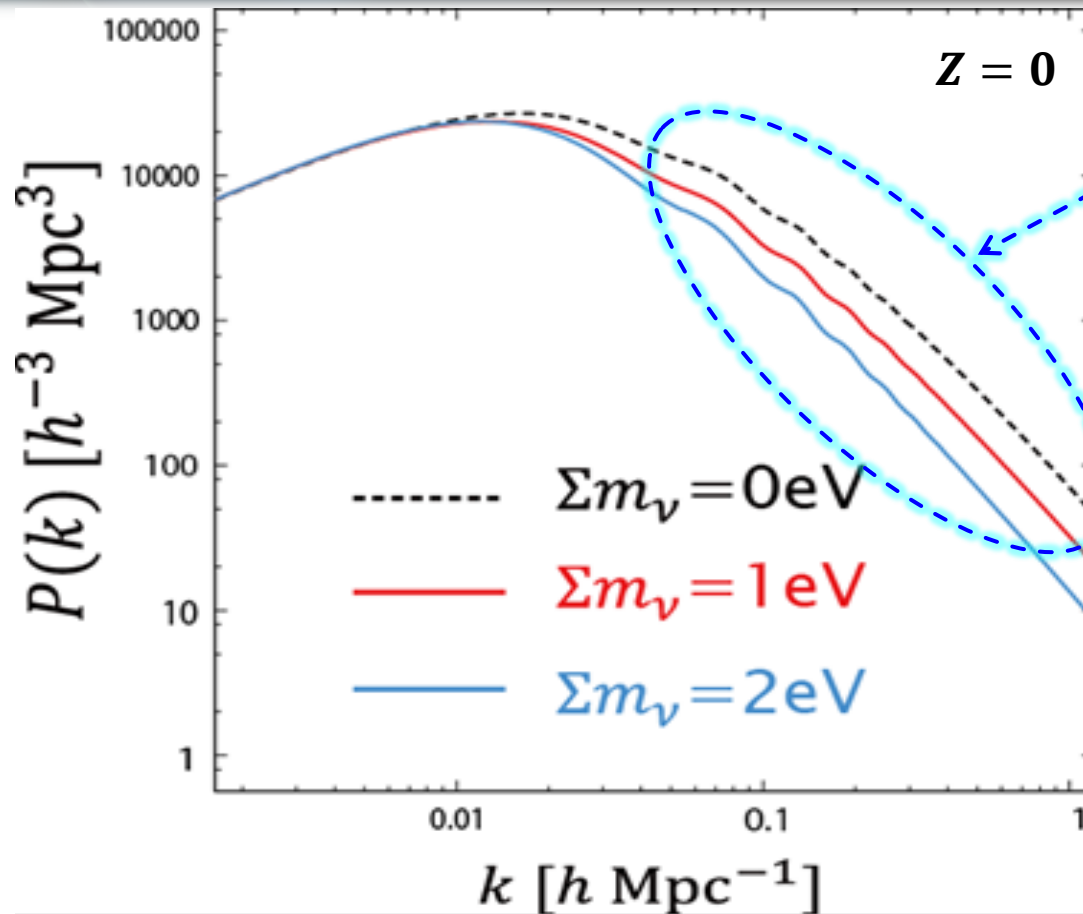
小スケール (Free streaming scale以下)

$$\Omega_m = \Omega_{CDM} + \Omega_b + \Omega_\nu$$

ニュートリノが $\delta_m$ の重力成長に効かない

$$\delta_m \propto a^{1 - \frac{3}{5}f_\nu}, \quad f_\nu \equiv \frac{\rho_\nu}{\rho_m}$$

# 物質の密度ゆらぎのパワースペクトル $P(k) = \langle |\delta_k|^2 \rangle$



ニュートリノの  
Free-streaming  
効果による減衰

3世代の質量和  $\Sigma m_\nu = m_1 + m_2 + m_3$ .  
(ここでは  $m_1 = m_2 = m_3$  と仮定).  $\Omega_m h^2$  は固定

◇ 宇宙論的観測による  
ニュートリノ質量の現在の制限

Planck TT, lowP + lensing  
+ BAO + JLA (SNe Ia) +  $H_0$  (conservative limit)

Planck Collaboration : arXiv:1502.01589v2

$$\Sigma m_\nu < 0.23 \text{ eV (95\% C.L),}$$

21cm線サーベイによって、  
将来更にこの制限を強くすることが可能



- ◆ 再電離の時期の21cm線輝線サーベイによるニュートリノ質量の和  $\Sigma m_\nu$  及びニュートリノの有効世代数  $N_\nu$  に対する将来の制限

Y. Oyama, M. Hazumi, K. Kohri, in preparation.

ニュートリノの有効世代数  $N_\nu$



未知の放射成分 (dark radiation) など

# ◇ 21cm line experiment

## ◆ SKA (Square kilometer Array)



SKA low frequency  
(Australia)

Construction of Phase1  
will start in 2018.

<http://www.skatelescope.org/>

**Phase1 とPhase2を考慮**

**(Phase2はPhase1の10倍の集光面積であると仮定)**

# ◇ SKAのspecification

「SKA baseline design」 : [http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/05/SKA-TEL-SKO-DD-001-1\\_BaselineDesign1.pdf](http://www.skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/05/SKA-TEL-SKO-DD-001-1_BaselineDesign1.pdf)

1. アンテナステーションの有効面積 :  $A_{\text{eff}}(z = 8) = 444 \text{ [m}^2\text{]}$

2. 全ステーション数 :  $N_{\text{station}} = 911$

全有効面積 :  $A_{\text{eff,total}}(z = 8) = 4.04484 \times 10^5 \text{ [m}^2\text{]}$

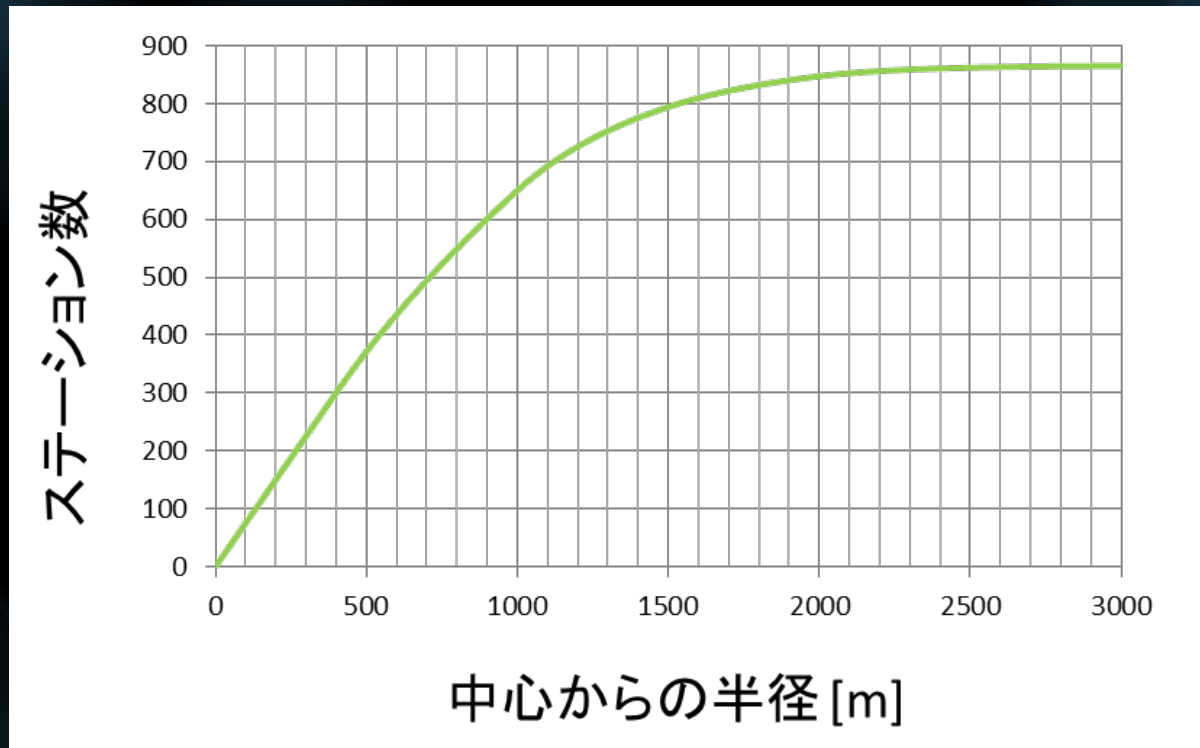
3. 視野 FOV( $z = 8$ )  $\simeq 13.12 \text{ [deg}^2\text{]}$

ただし arXiv:1210.0197, "Reionization and the Cosmic Dawn with the Square Kilometre Array"

で提案されているようにmulti beamを採用すると仮定し、4 beamを同時に使用したとする (つまり全視野 $13.12 \text{ [deg}^2\text{]} \times 4$ )

# アンテナ数の分布

中心から半径3km以内に全ステーションの95%が配置されるように仮定



解析では半径3km（最大基線長6km）以内のアンテナを21cm線観測に使用したと仮定

# ◇ サーベイセットアップ

観測赤方偏移： $z = 7 - 10$ （再電離の時期）



観測周波数範囲： $\nu_{obs} \sim 129 - 178\text{MHz}$

観測時間：4000時間

宇宙論パラメータの制限に使うゆらぎのスケール

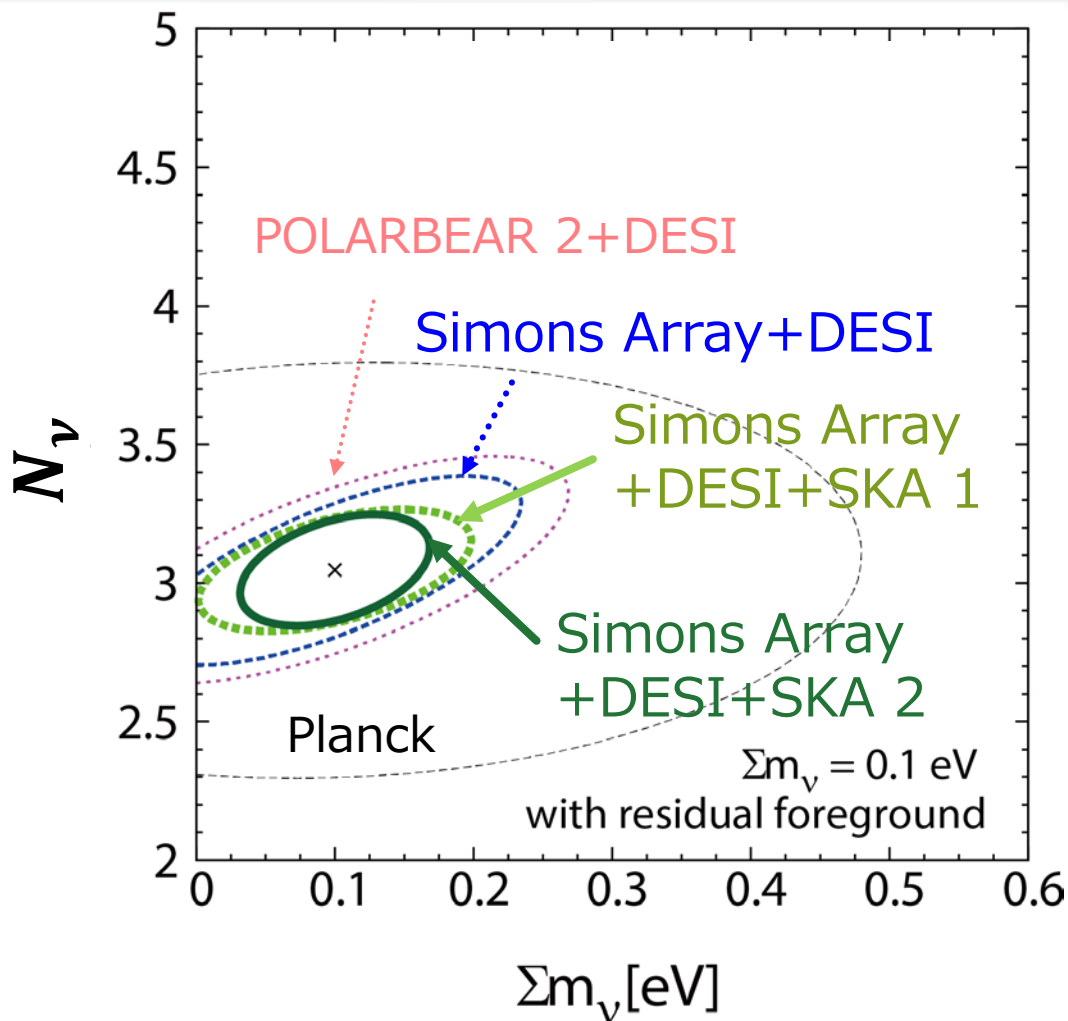
$$k_{\min} = 6 \times 10^{-2} h \text{ Mpc}^{-1} \quad (\text{前景放射除去のため})$$

$$k_{\max} = 2 \text{ Mpc}^{-1} \quad (\text{密度ゆらぎの非線型成長を避けるため})$$



# ◆ 質量和 $\Sigma m_\nu$ と有効世代数 $N_\nu$ の将来の制限

95% C.L.で期待される制限の範囲 ( $\Sigma m_\nu = 0.1 \text{ eV}$ の場合)



CMB偏光観測

POLARBEAR-2

Simons Array

バリオン音響振動観測

DESI

CMB+BAO  
+21cm線サーベイ



ニュートリノ質量を  
測定できる可能性

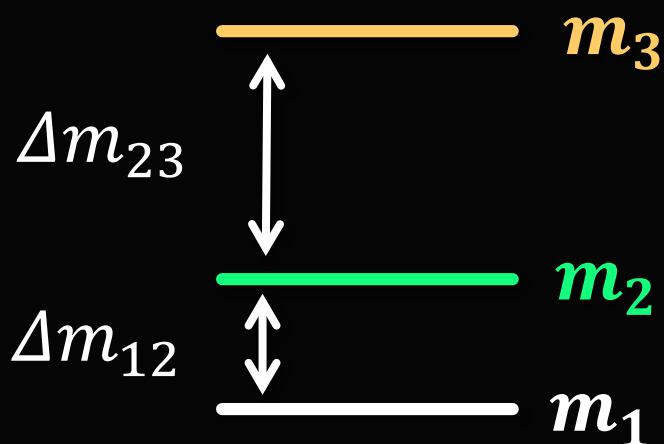
# ◆ ニュートリノ質量階層構造の 決定可能性

Y. Oyama, M. Hazumi, K. Kohri, in preparation.

# ◇ ニュートリノ質量階層構造

正常階層(normal)

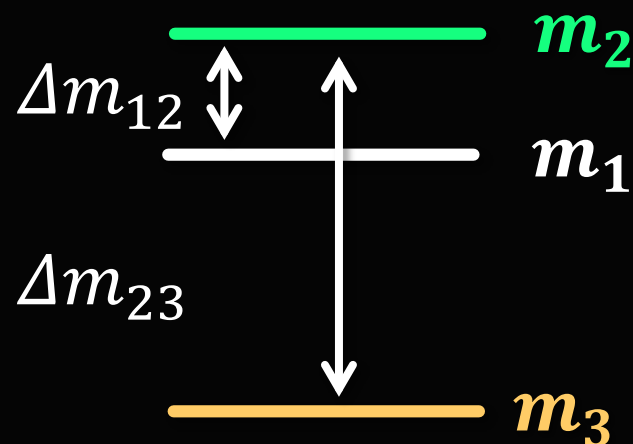
$$m_3 \gg m_2 > m_1$$



$$\Sigma m_\nu \gtrsim 0.05 \text{ eV}$$

逆階層(inverted)

$$m_2 > m_1 \gg m_3$$



$$\Sigma m_\nu \gtrsim 0.1 \text{ eV}$$



非相対論的粒子  $m_\nu c^2 \gg k_B T$

になる時期が異なる

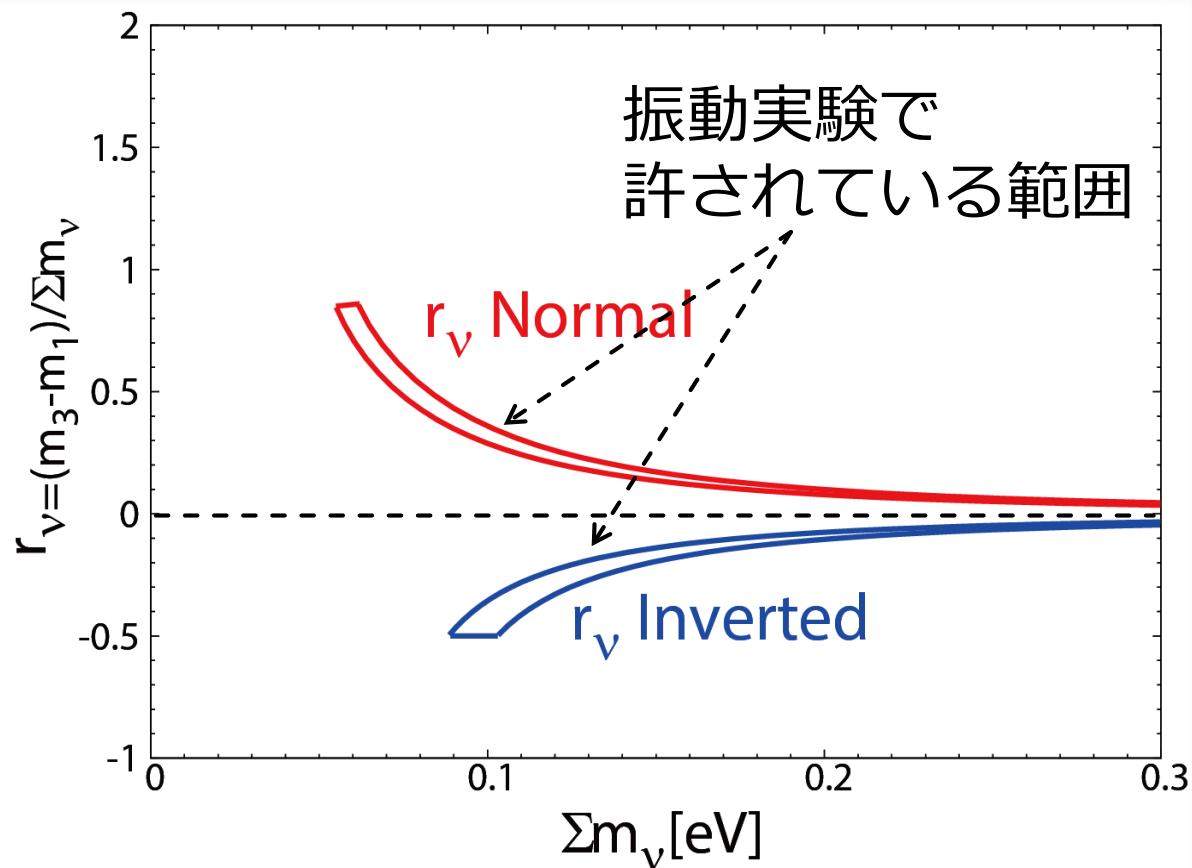
# ◆ 質量階層構造のパラメータ

$$r_\nu \equiv \frac{m_3 - m_1}{\Sigma m_\nu}$$

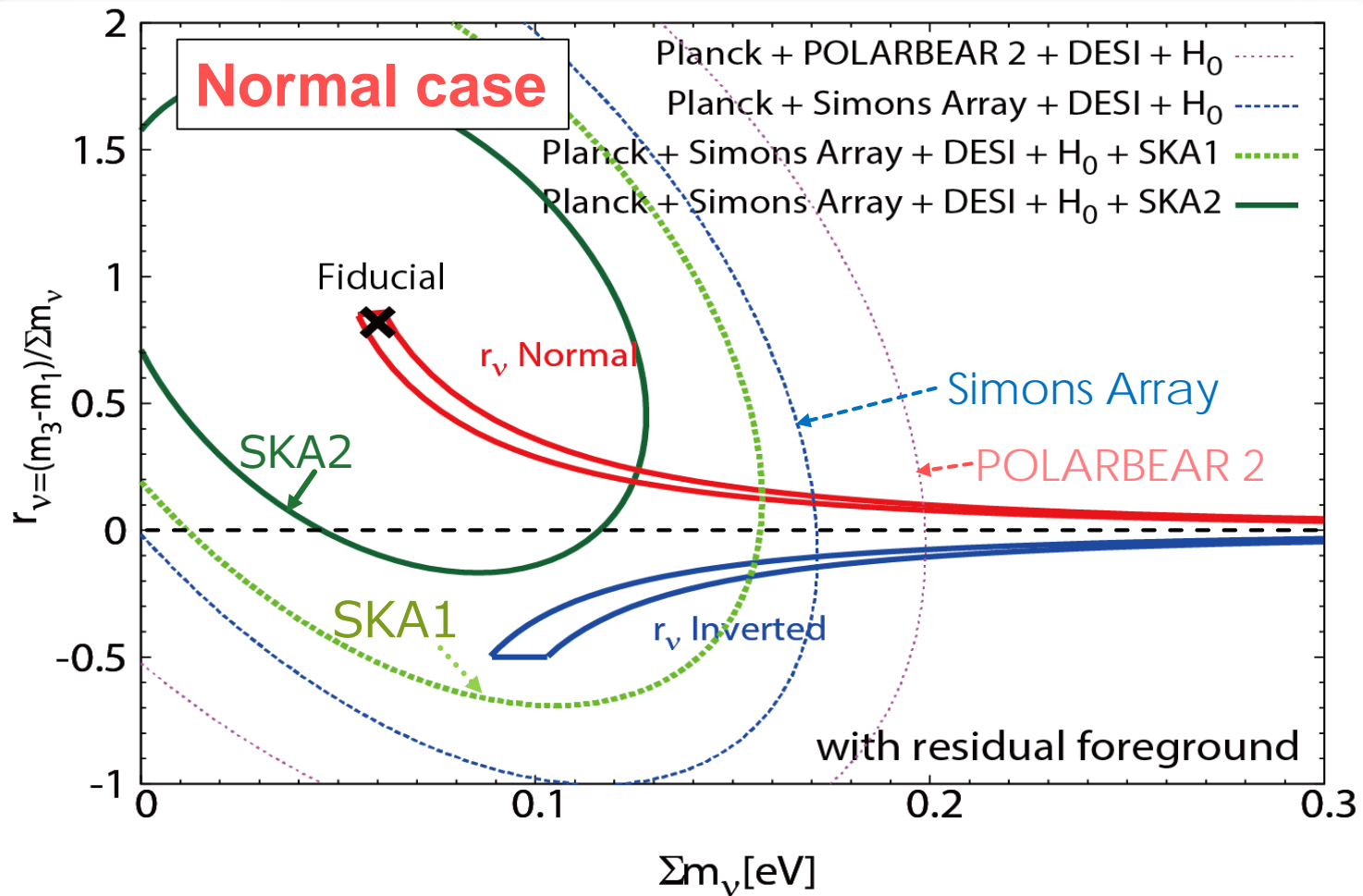
正常階層  $r_\nu > 0$

逆階層  $r_\nu < 0$

T. Jimenez, et al., JCAP 1005:035,2010



# ◆ $r_\nu - \Sigma m_\nu$ の期待される制限 ( 95% C.L. )



質量の和が小さい場合、SKA phase2 + CMB観測  
 によって階層構造を決定できるかもしれない



# contents

1. 21cm線輝線サーベイの概要
2. ニュートリノ質量
3. その他の宇宙論的な利用
4. Summary

# ◇ その他の宇宙論的な利用法

- (1) 初期曲率揺らぎ  $\mathcal{P}_\zeta(k)$  のスケール依存性  
(インフレーションモデルの制限)

SKA+CMB観測 : Running of spectral index  $\sigma(\alpha_s) \sim \mathcal{O}(10^{-3})$

K. Kohri, Y. Oyama, T. Sekiguchi,  
T. Takahashi, JCAP10(2013)065

- (2) レプトン数非対称性  $\xi \equiv \mu_\nu/T_\nu$   
(ニュートリノの化学ポテンシャル)

$\xi \sim \mathcal{O}(0.01)$  程度であれば SKA + CMB観測 に  
よって測定できる可能性がある

K. Kohri, Y. Oyama, T. Sekiguchi,  
T. Takahashi, JCAP09 (2014)014.

# contents

1. 21cm線輝線サーベイの概要
2. ニュートリノ質量
3. その他の宇宙論的な利用
4. Summary

# ◇ Summary

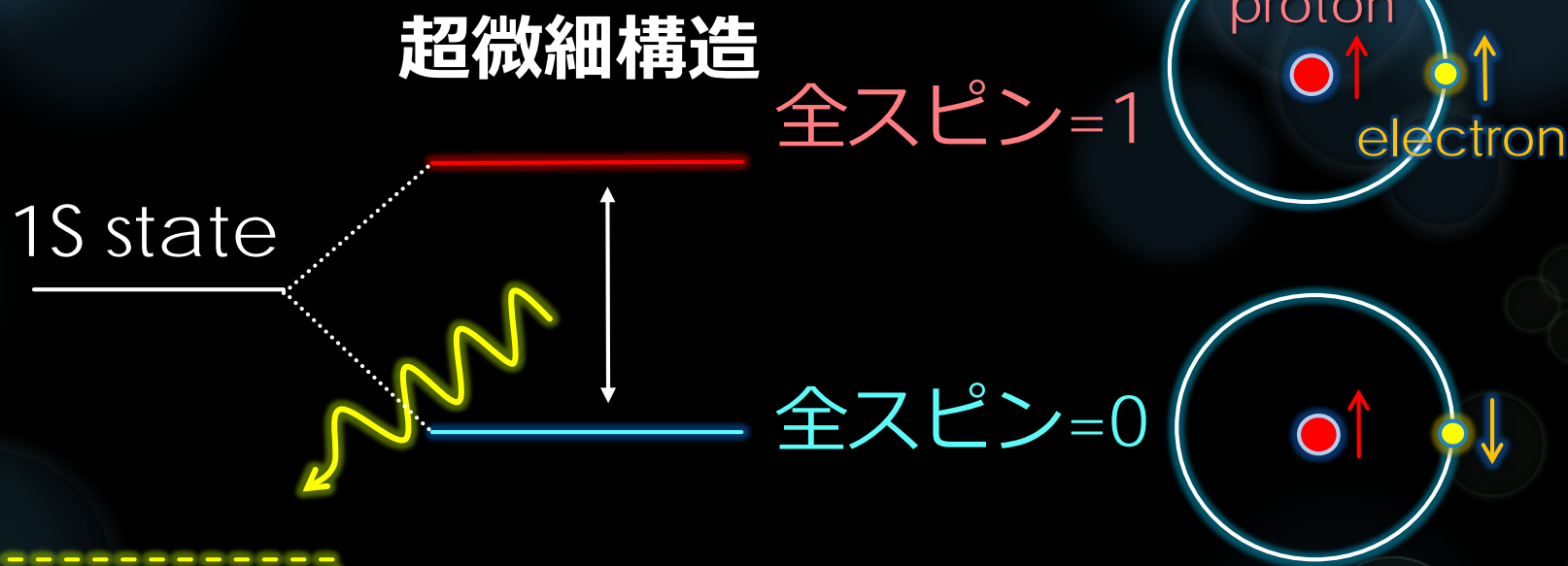
- 21cm線輝線サーベイはニュートリノ質量等の素粒子物理を探索する上で非常に有効な観測である
- SKA+CMB観測によってニュートリノ質量階層構造を決定できる可能性がある
- さらに21cm線輝線サーベイはインフレーション理論を探索する上でも強力な力を発揮できると期待される





# ◇ 21cm線

中性水素原子の超微細構造が起源



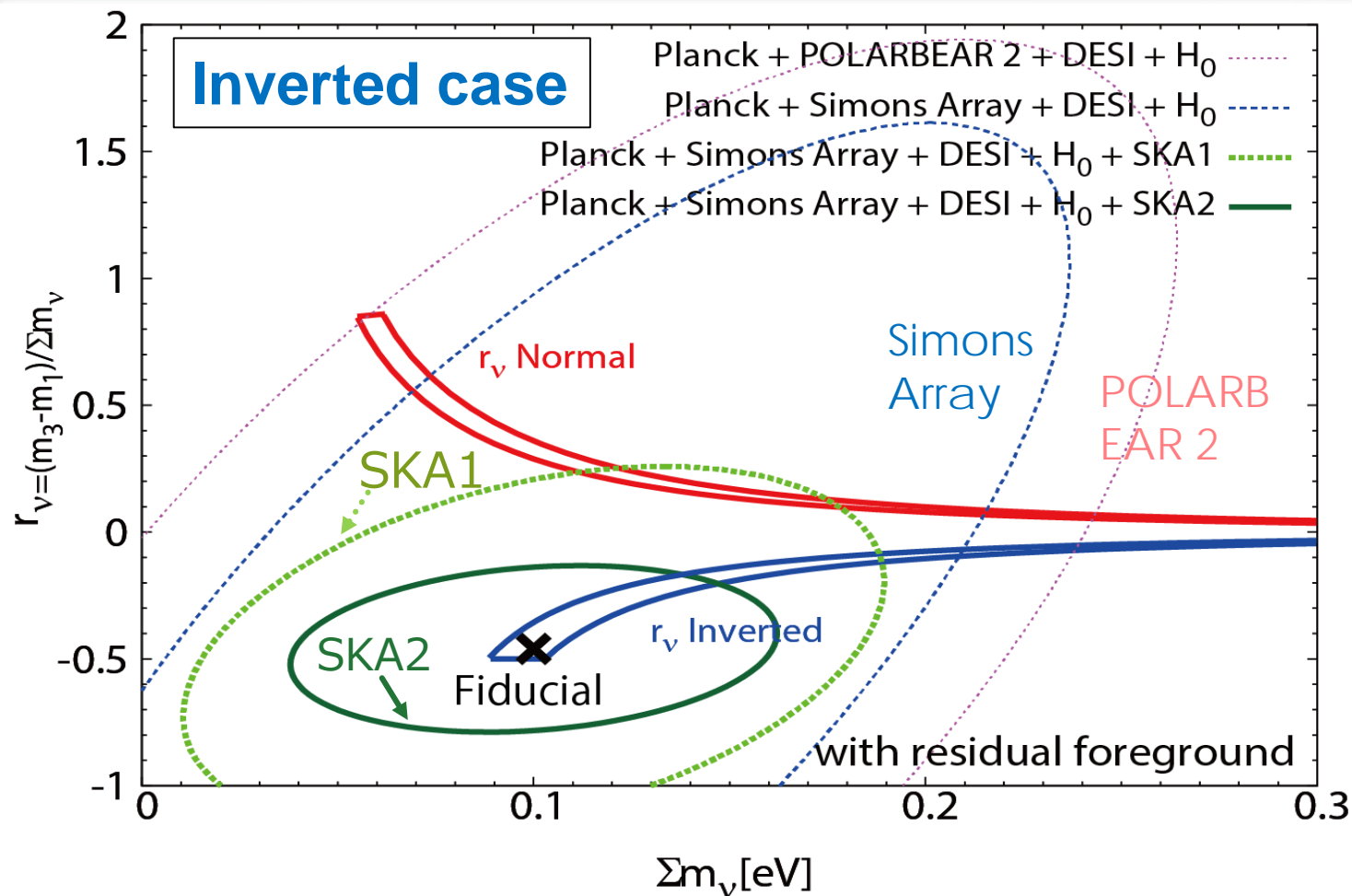
$$\lambda = 21\text{cm}$$
$$\nu_{21} = 1.42\text{GHz}$$

$$z \sim 10, \nu_{obs} \sim 129 \text{ MHz}$$

$$z \sim 20, \nu_{obs} \sim 68 \text{ MHz}$$

SKA-low  
で観測可能

# ◆ Contours of 95% C.L. forecasts in $r_\nu$ - $\Sigma m_\nu$ plane.



In this fiducial model, **SKA phase2 + Simons Array** has enough sensitivity to **determine the mass hierarchy.**

◇ 21cm線輝度温度(とCMB温度の差)  $\delta T_b$

$$\delta T_b \approx 27 x_{\text{HI}} (1 + \delta_b) \left( \frac{\Omega_b h^2}{0.023} \right) \left( \frac{0.15}{\Omega_m h^2} \frac{1+z}{10} \right)^{\frac{1}{2}}$$

バリオンの密度ゆらぎ  $\times \left[ 1 - \frac{T_\gamma}{T_S} \right] \left[ \frac{H(z)/(1+z)}{dv_{\parallel}/dr_{\parallel}} \right] \text{mK}$

1. 水素ガスの固有運動
2. 宇宙膨張

$T_S$  : スピン温度

$$\frac{n_1}{n_0} \equiv \frac{g_1}{g_0} \exp\left(-\frac{h\nu_{21}}{k_B T_S}\right)$$

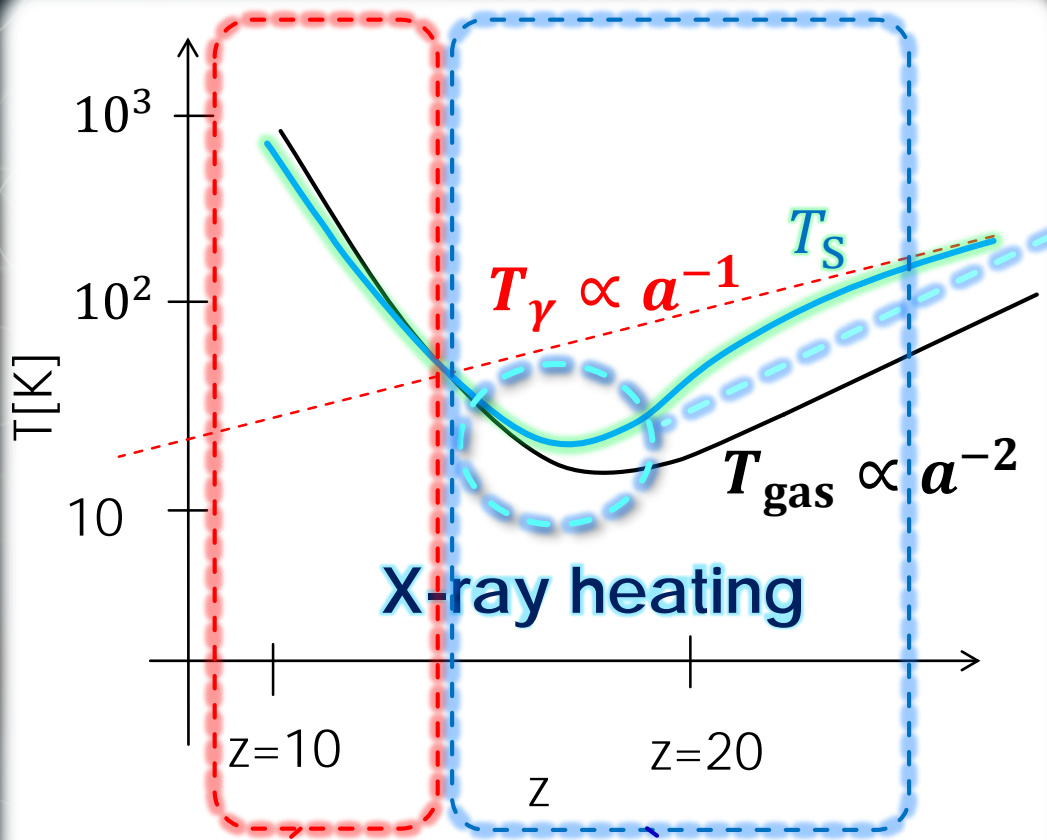
$T_\gamma$  : CMB温度

$x_{\text{HI}}$  : 中性水素比

$T_S > T_\gamma$  放射線 ( $6 \lesssim z \lesssim 15$ )

$T_S < T_\gamma$  吸収線 ( $15 \lesssim z$ )

# ◇ Cosmic Dawn-再電離の時期



$10 \lesssim z < 20$   
 X-ray heating  
 (from SNR)  
 $T_S \approx T_{\text{gas}} \gg T_\gamma$   
 ↑  
 Ly $\alpha$ (from stars)

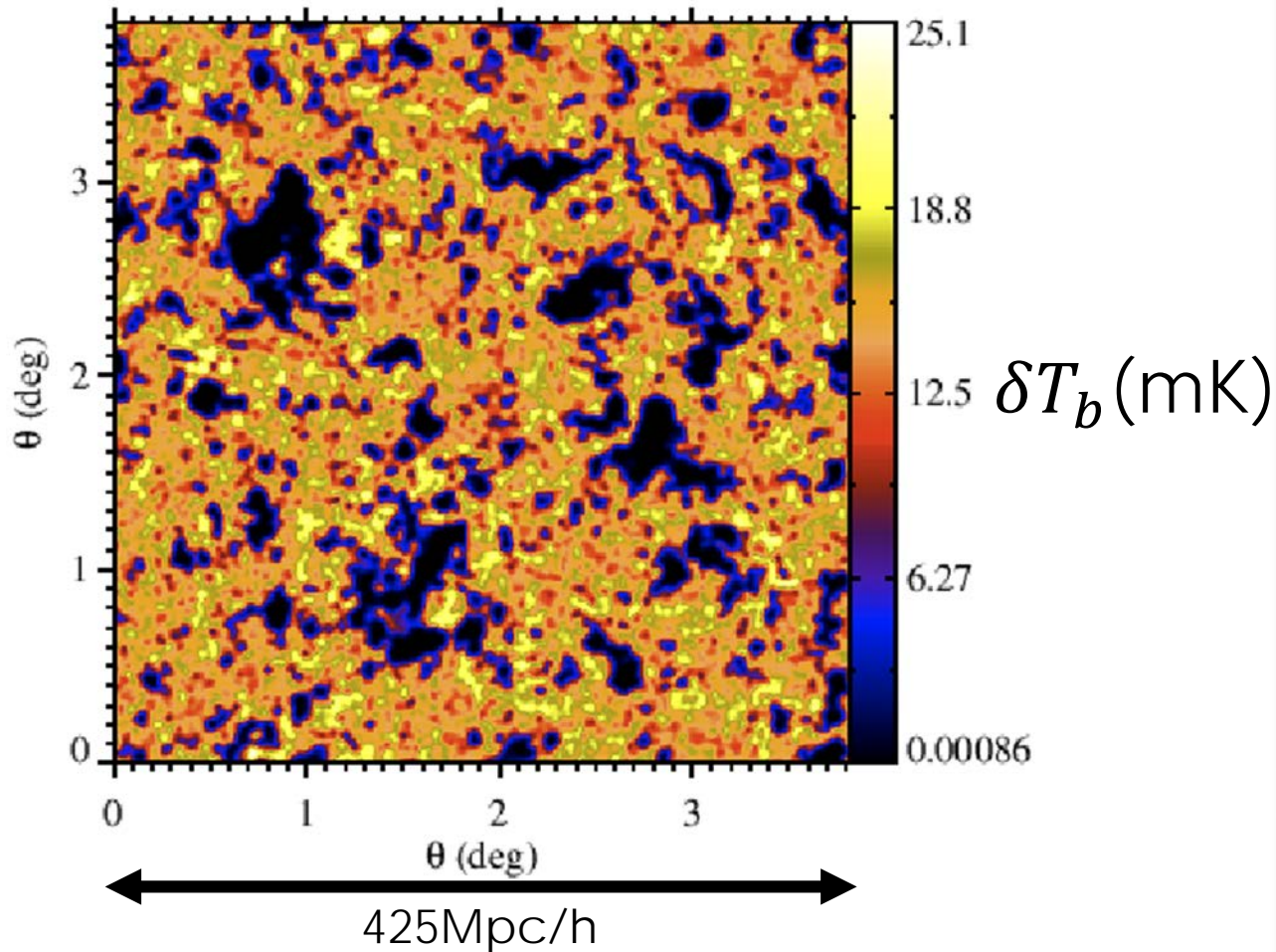
21cm線放射線 (再電離の時期) 21cm線吸収線 (cosmic dawn)



# ◇ 21cm線輝度温度のシミュレーション

SKA white paper, arXiv:1210.0197v1より

$z \sim 7.5$  (再電離の時期) , 167 MHz





# Future constraints of the neutrino mass

**Tritium beta decay  
(KATRIN)**

$$m_{\nu_e} < 0.23 \text{ eV}$$

A. Osipowicz et al, hep-ex/0109033

**CMB + weak lensing**

$$\Sigma m_{\nu} < 0.2 \text{ eV}$$

**Galaxy survey**

$$\Sigma m_{\nu} < 0.1 \text{ eV}$$

K. N. Abazajian et al, arXiv: 1103.5083 (2011)

**By using 21 cm line observation,  
we can constrain the neutrino mass.**

# ◇ 研究の概要

K. Kohri, Y. Oyama, T. Sekiguchi,  
T. Takahashi, JCAP10(2013)065

## ○ 初期曲率揺らぎ $\mathcal{P}_\zeta(k)$ のスケール依存性

Spectral index

Running

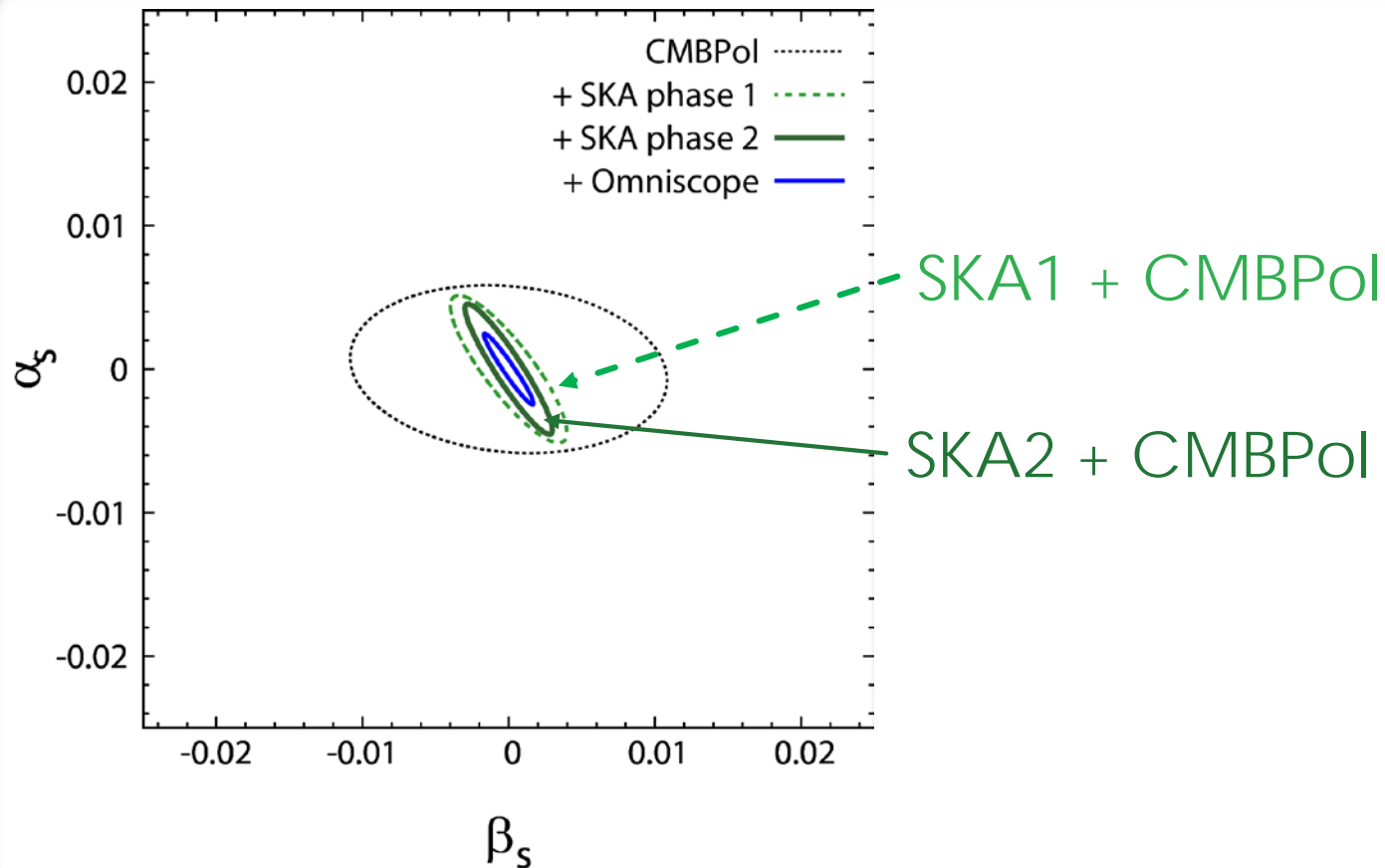
Running of running

$$n_s(k) - 1 \equiv \frac{d \ln \mathcal{P}_\zeta(k)}{d \ln k}, \quad \alpha_s(k) \equiv \frac{dn_s(k)}{d \ln k}, \quad \beta_s(k) \equiv \frac{d\alpha_s(k)}{d \ln k}$$

インフレーションのモデルによって異なる

21 cm線サーベイで、どこまでこれらを  
制限できるか？

# 21cm線サーベイによる制限の推定 (95% C.L.)



1 $\sigma$  error Runnign of running  $\beta_s$  は特に制限が改善する

SKA+CMBPol  $\sigma(\alpha_s): \mathcal{O}(10^{-3}), \sigma(\beta_s): \mathcal{O}(10^{-3})$

# contents

1. 21cm線輝線サーベイの概要
2. ニュートリノ質量
3. インフレーションモデル
4. レプトン数非対称性
5. Summary

# ◇ 研究の概要

K. Kohri, Y. Oyama, T. Sekiguchi,  
T. Takahashi, JCAP09 (2014)014.

## ● レプトン数非対称性 : $\xi$

$$\xi \equiv \frac{\mu_\nu}{T_\nu} \sim \frac{n_\nu - n_{\bar{\nu}}}{s} = \text{const}$$

バリオン生成のモデルによっては  
比較的大きなレプトン数非対称性が生じ得る

有限の $\xi$ が存在する場合

放射成分が増大したように見える

合成されるヘリウムの量が減少する



# ◇ 研究の概要

K. Kohri, Y. Oyama, T. Sekiguchi,  
T. Takahashi, JCAP09 (2014)014.

## ● レプトン数非対称性 : $\xi$

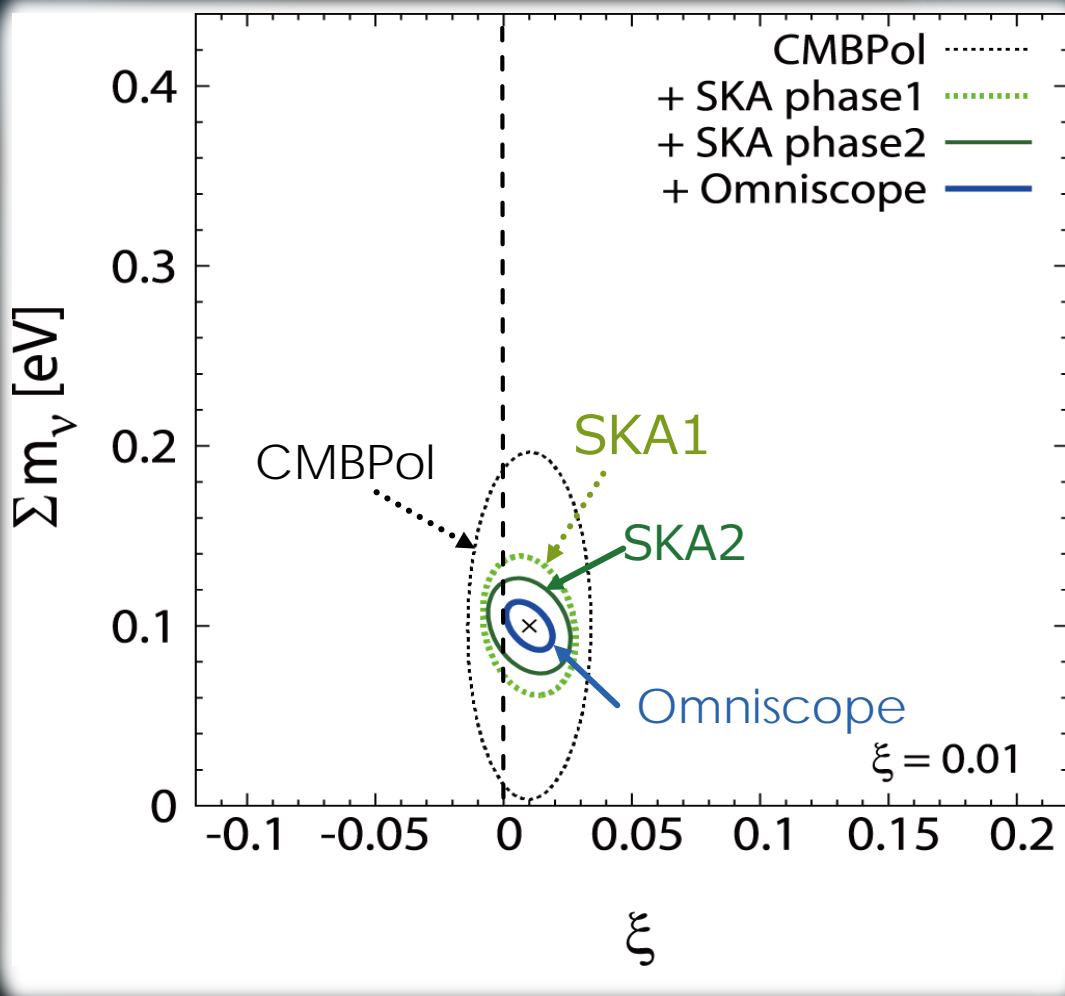
$$\xi \equiv \frac{\mu_\nu}{T_\nu} \sim \frac{n_\nu - n_{\bar{\nu}}}{s} = \text{const}$$

バリオン生成のモデルによっては  
比較的大きなレプトン数非対称性が生じ得る

現在は軽元素の量の観測により  
 $|\xi_\nu| \lesssim \mathcal{O}(0.01 - 0.1)$ 程度の制限

21cm線輝線サーベイやCMBなどの宇宙論的観測  
によって将来どこまで制限できるか？

# ◆ レプトン数非対称性 $\xi$ の制限の推定 (95% C.L.)



$\mathcal{O}(0.01) \lesssim \xi$  であれば SKA + CMBPol によって  
レプトン数非対称性を測定できる可能性がある