

CMB弱重力レンズ効果と21cm線の相互通関の検出可能性と 宇宙論パラメータの制限

銀河進化と遠方宇宙 神奈川大学

2019.03.11

熊本大学 自然科学教育部 博士前期課程 1年

田中 章一郎

共同研究者：吉浦伸太郎、久保田賢志、高橋慶太郎(熊本大学)
西澤淳、杉山直(名古屋大学)

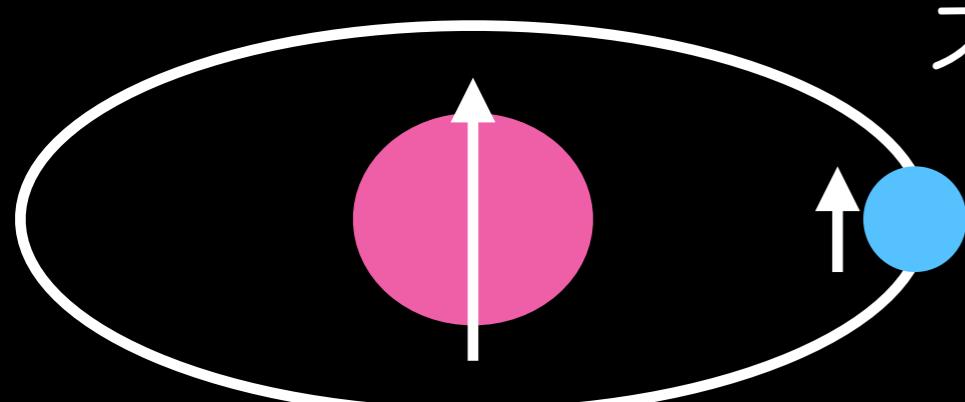
outline

1. 21cm線とは
2. CMB弱重力レンズ(WGL)
3. HI-WGL相互相関
4. Fisher解析を用いた Ω_{HI} 制限の予測
5. 今後の研究・まとめ

1. 21cm線とは

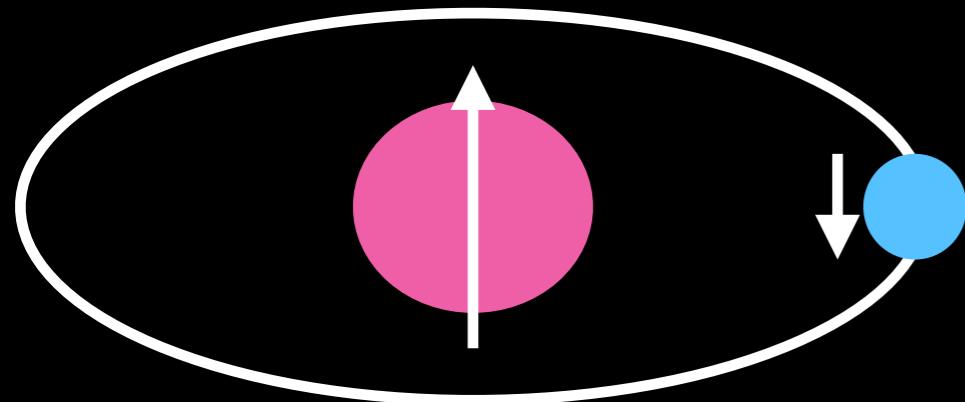
中性水素の超微細構造由来の21cm線

中性水素：模式図

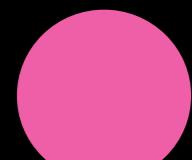


スピン状態：平行状態のエネルギー準位が高い

$$\Delta E = 5.9 \times 10^{-6} \text{ eV} \quad \lambda = 21\text{cm}$$



これに相当する電磁波が吸収or放出される



: proton



: electron

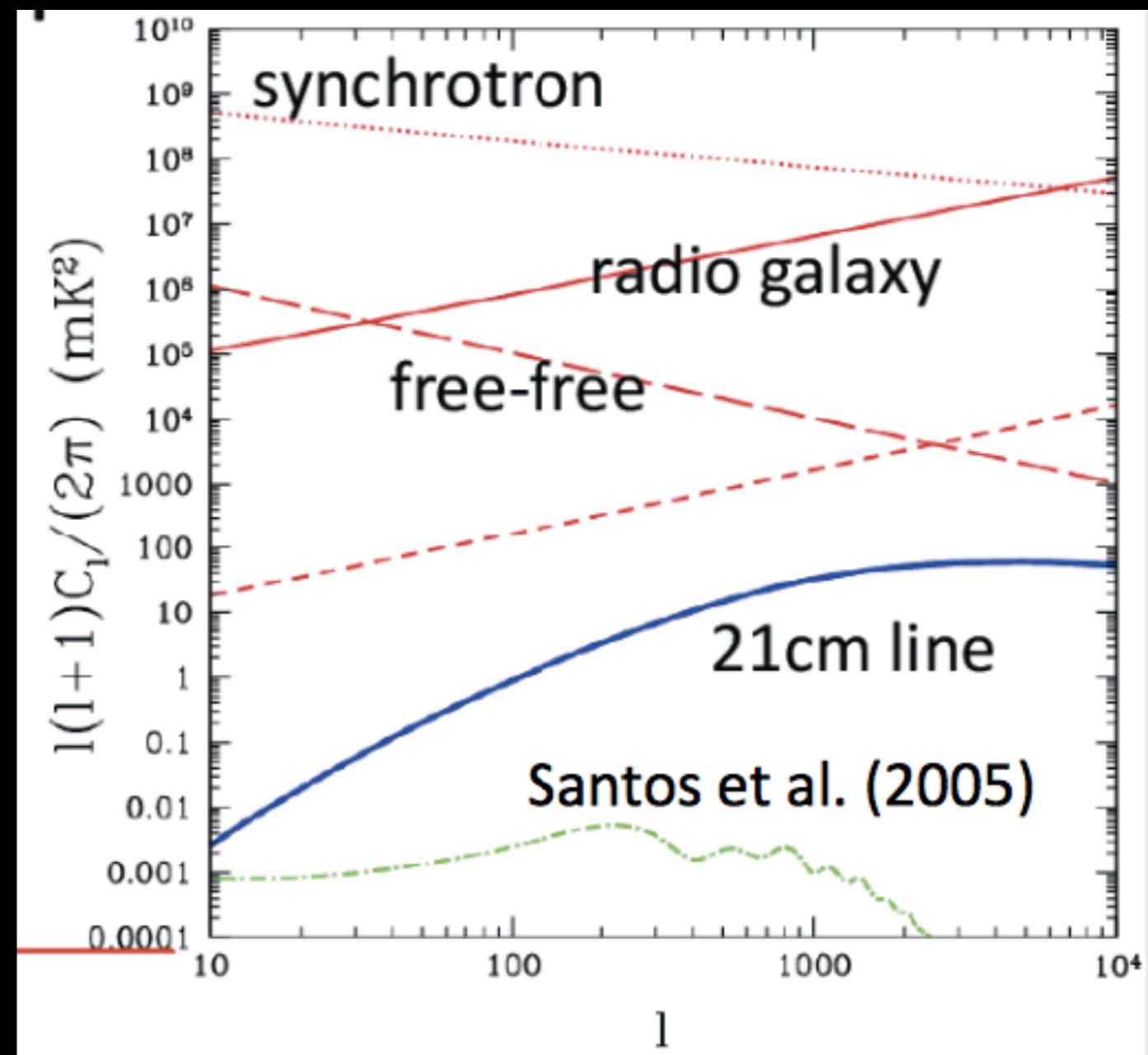
→この電磁波を21cm線

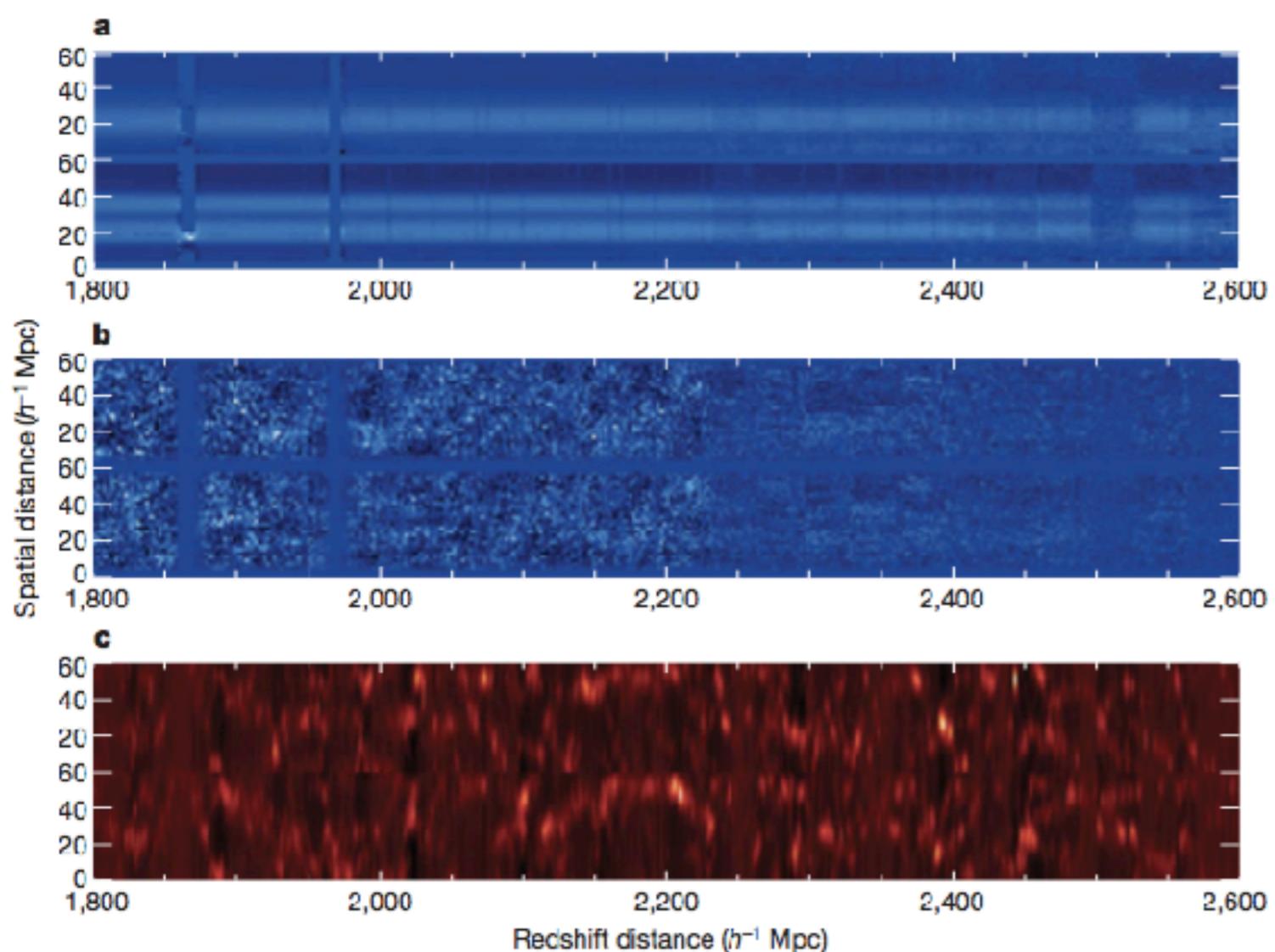
1-2. 21cm線観測の困難さ

宇宙論的なスケールにおいて
21cmの観測は
前景放射によって妨げられている

前景放射と相関がなく
21cm線と相関のある
観測量が必要

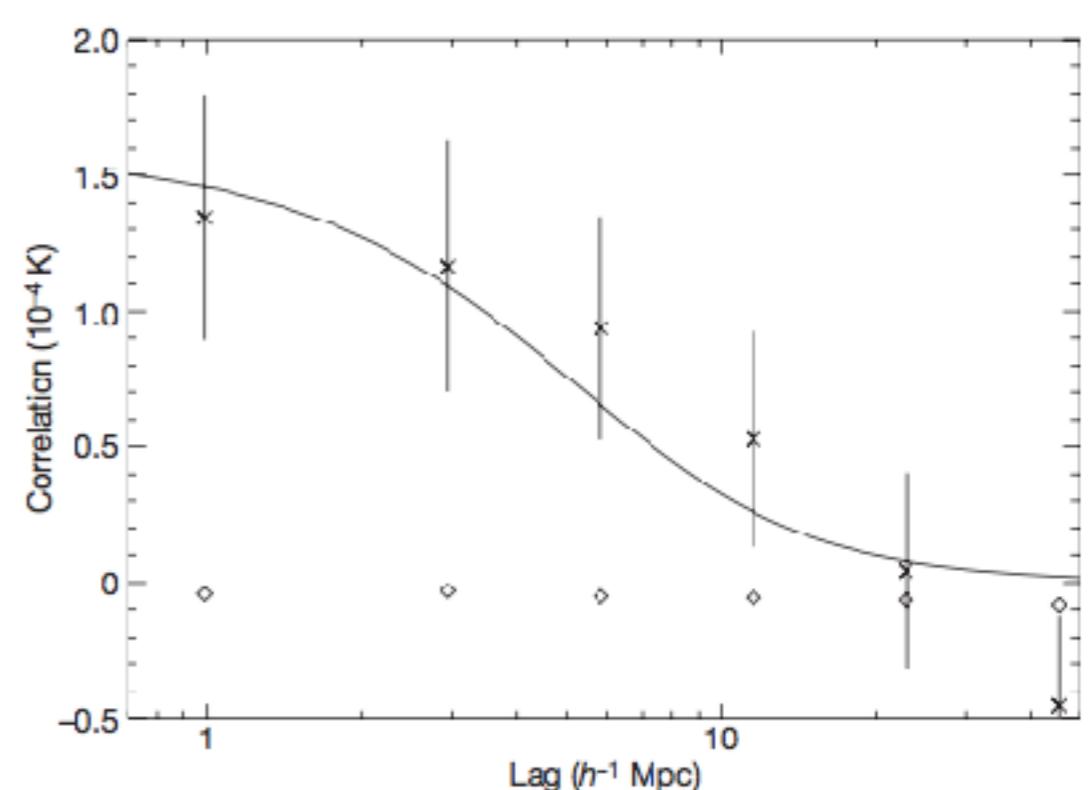
$z=9$ ($\nu=140\text{MHz}$)での角度パワースペクトル





bとcの相互相関→

Green Bank Telescopeから
得られたデータ($z=0.8$)
continuum sourcesを差し引き
DEEP2(可視光)の銀河



2. CMBの弱重力レンズ効果

CMBの輝度温度マップにおいて二次的な非等方性として現れる

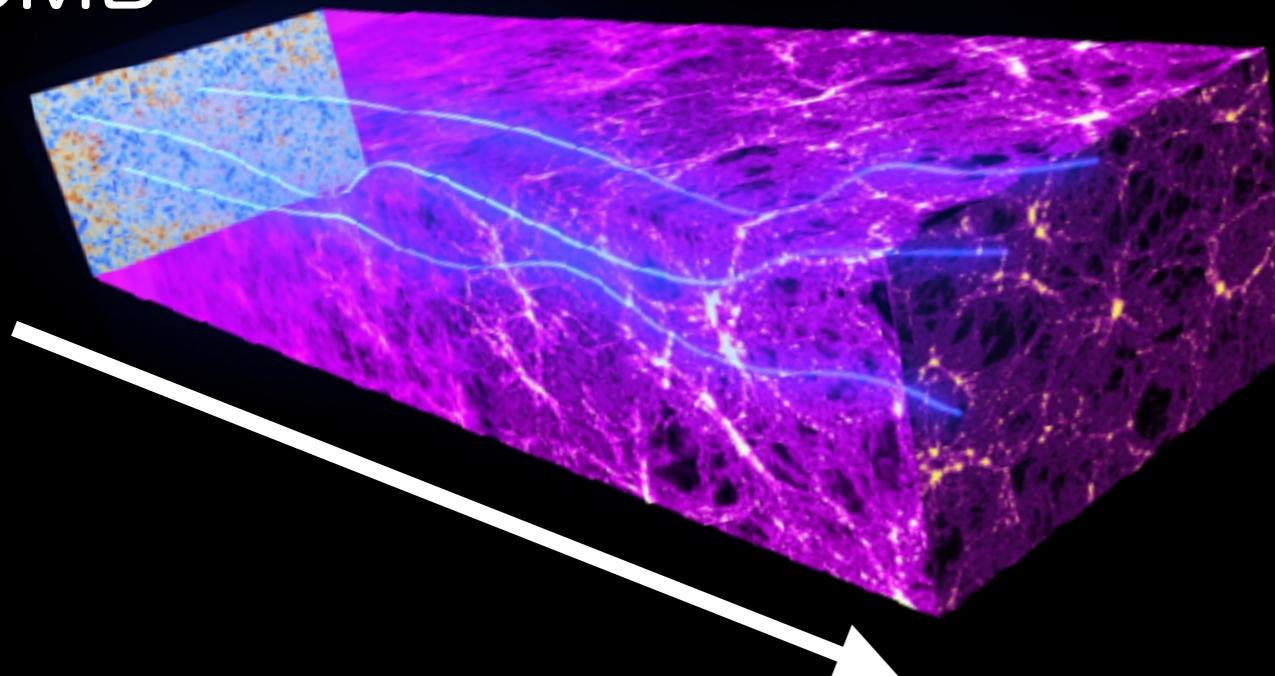
$$\tilde{T}(\hat{\mathbf{n}}) = T(\hat{\mathbf{n}} + \boldsymbol{\alpha}) \quad \boldsymbol{\alpha} : \text{まがり角}$$

WGLの影響 : 収束場(κ)で表される

視線方向の密度ゆらぎの積分

WGLによる像の歪みを定量化

CMB



Credit: ESA and the Planck Collaboration

$$\boldsymbol{\alpha} = \nabla \phi$$

ϕ : レンズポテンシャル

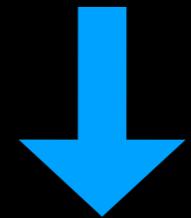
$$\kappa = \frac{1}{2} \nabla \cdot \boldsymbol{\alpha}$$

$$= \frac{1}{2} \Delta \phi$$

2-1. Convergence field

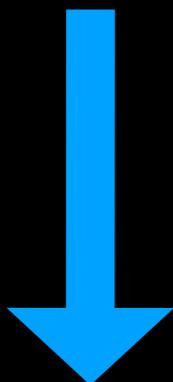
レンズポテンシャル

$$\phi = \frac{2}{c^2 S_K(x_{LSS})} \int_0^{x_{LSS}} dx \frac{S_K(x_{LSS} - x)}{S_K(x)} \Phi(x, \theta, t(x))$$



$$\kappa = \frac{1}{2} \Delta \phi$$

$$\kappa(\theta) = \frac{1}{c^2} \int_0^{x_{LSS}} dx \frac{S_K(x_{LSS} - x) S_K(x)}{S_K(x_{LSS})} \Delta \Phi(x, \theta, t(x))$$



ポアソン方程式 : $\Delta \Phi = 4\pi G a^2 \rho_{m0} \delta = \frac{3H_0^2 \Omega_{m0}}{2a} \delta$

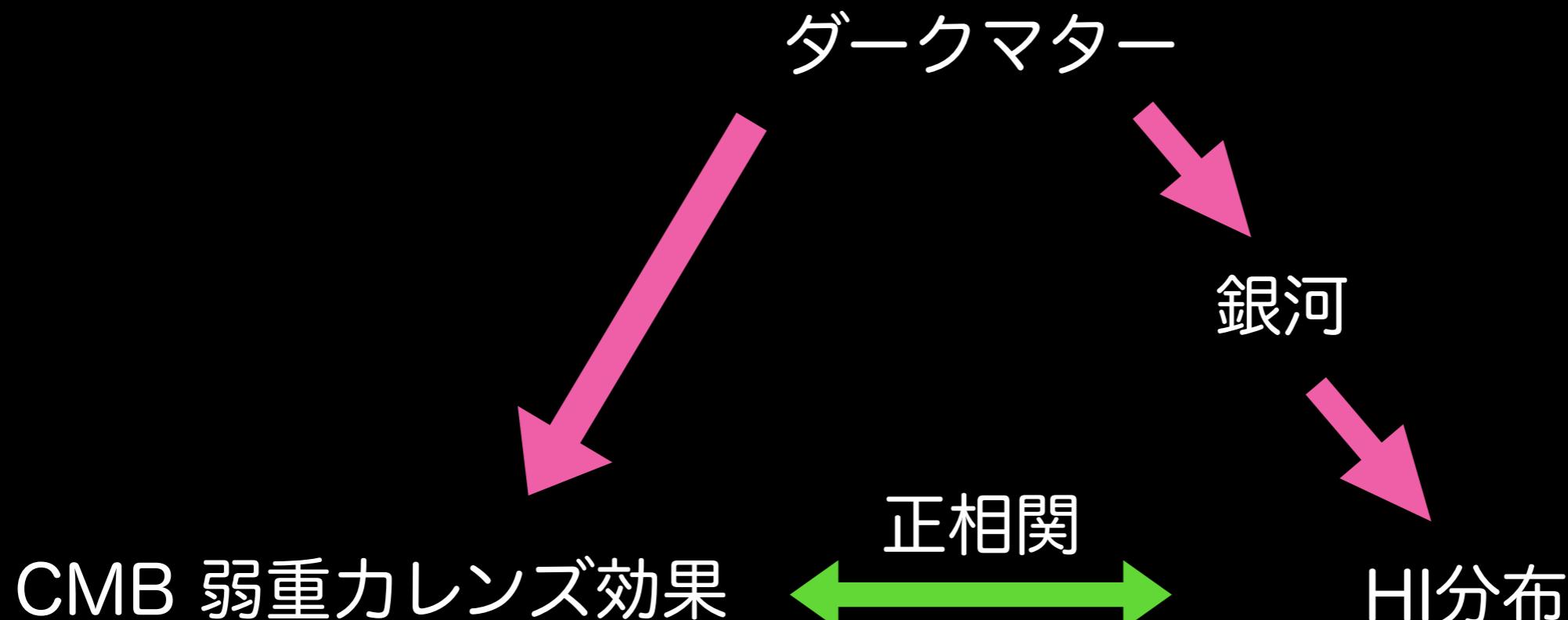
曲率 $K=0$ 、 $S_K(x)=x(z)$ 、光源 : CMB

$$\kappa(\hat{n}) = \frac{3}{2} \Omega_{m0} \left(\frac{H_0}{c} \right)^2 \int_0^{z_{LSS}} dz F(z) \delta(d_A(z) \hat{n}, z)$$

視線方向の密度ゆらぎの積分

$$F(z) = \frac{d_A(z_{LSS} - z) d_A(z) D_+(z)}{d_A(z_{LSS}) a(z)}$$

3. HI-WGL相互相関



HI-WGL クロスパワースペクトル(CPS)

WGLには赤方偏移の情報がないが、HIにはある

3-1. Cross Power Spectrum

Convergenceと輝度温度を球面調和展開

$$a_{lm}^\kappa = \int d\omega_{\hat{n}} \kappa(\hat{n}) Y_{lm}^*(\hat{n}) \quad a_{l'm'}^{HI} = \int d\omega_{\hat{n}} \delta T_b(\hat{n}) Y_{l'm'}^*(\hat{n})$$

定義 : $\langle a_{lm}^\kappa a_{l'm'}^{*HI} \rangle = C_l^{HI-\kappa} \delta_{ll'} \delta_{mm'}$

HI分布のbiasをbとした時の計算結果

$$C_l^{HI-\kappa} \approx \frac{\pi}{2} A(z_{HI})(b + f) \frac{F(z_{HI})}{d_A(z_{HI})^2} P\left(\frac{l}{r_{HI}}\right)$$

$$A(z) = \frac{3}{\pi} \Omega_{m0} \left(\frac{H_0}{c} \right)^2 \bar{T}(z) D_+(z) \quad f = \Omega_m^{0.6}$$

3-2 先行研究[Guha.2009]による理論予測

$$C_l^{HI-\kappa} \approx \frac{\pi}{2} A(z_{HI})(b+f) \frac{F(z_{HI})}{d_A(z_{HI})^2} P\left(\frac{l}{r_{HI}}\right)$$

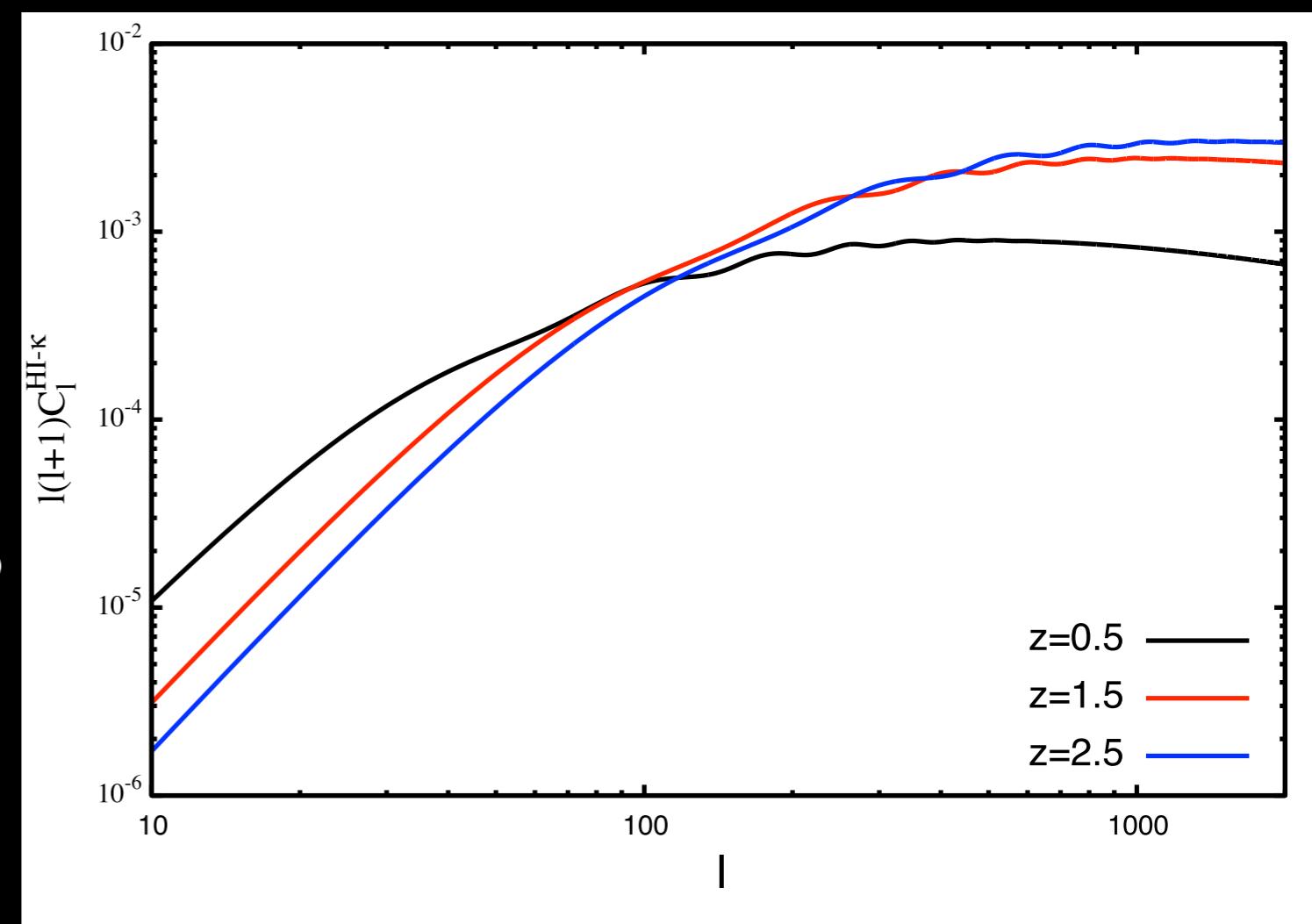
CAMBで計算

宇宙論モデル： Λ -CDMモデル

(Planck2018のデータをfiducial)

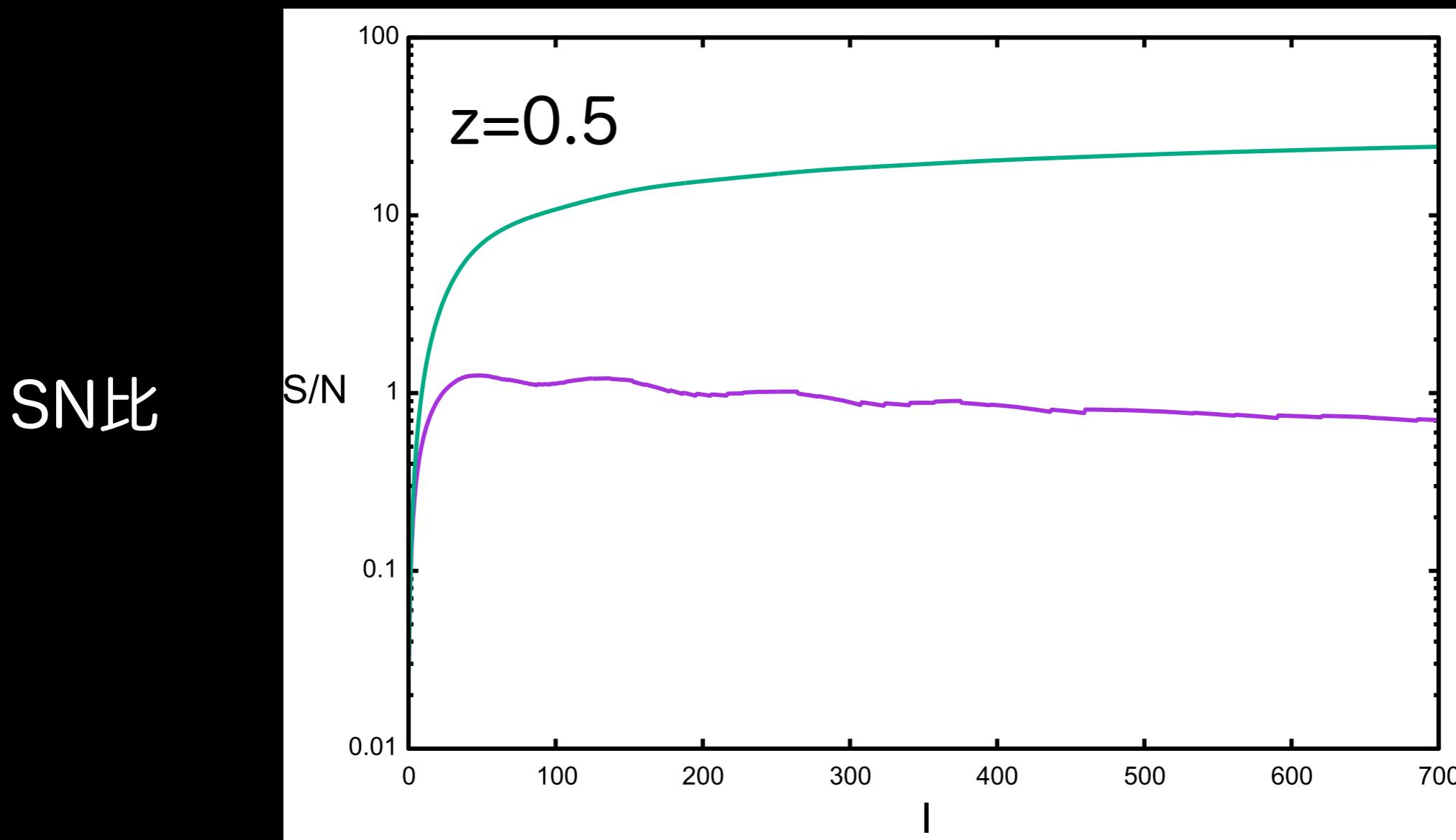
HIゆらぎは
ダークマターゆらぎに比例

簡単のためbiasは1としている



HI-WGL CPSの検出可能性

sample varianceの影響のみを考慮した場合



実際には、instrumental noises , foregroundの影響が大きい

SKA-Planck観測を想定し、instrumental noisesを考慮する

SKA(Square Kilometre Array)

2020年代にアフリカとオーストラリアに電波望遠鏡を建設する計画

センチ波・メートル波の観測を可能とする

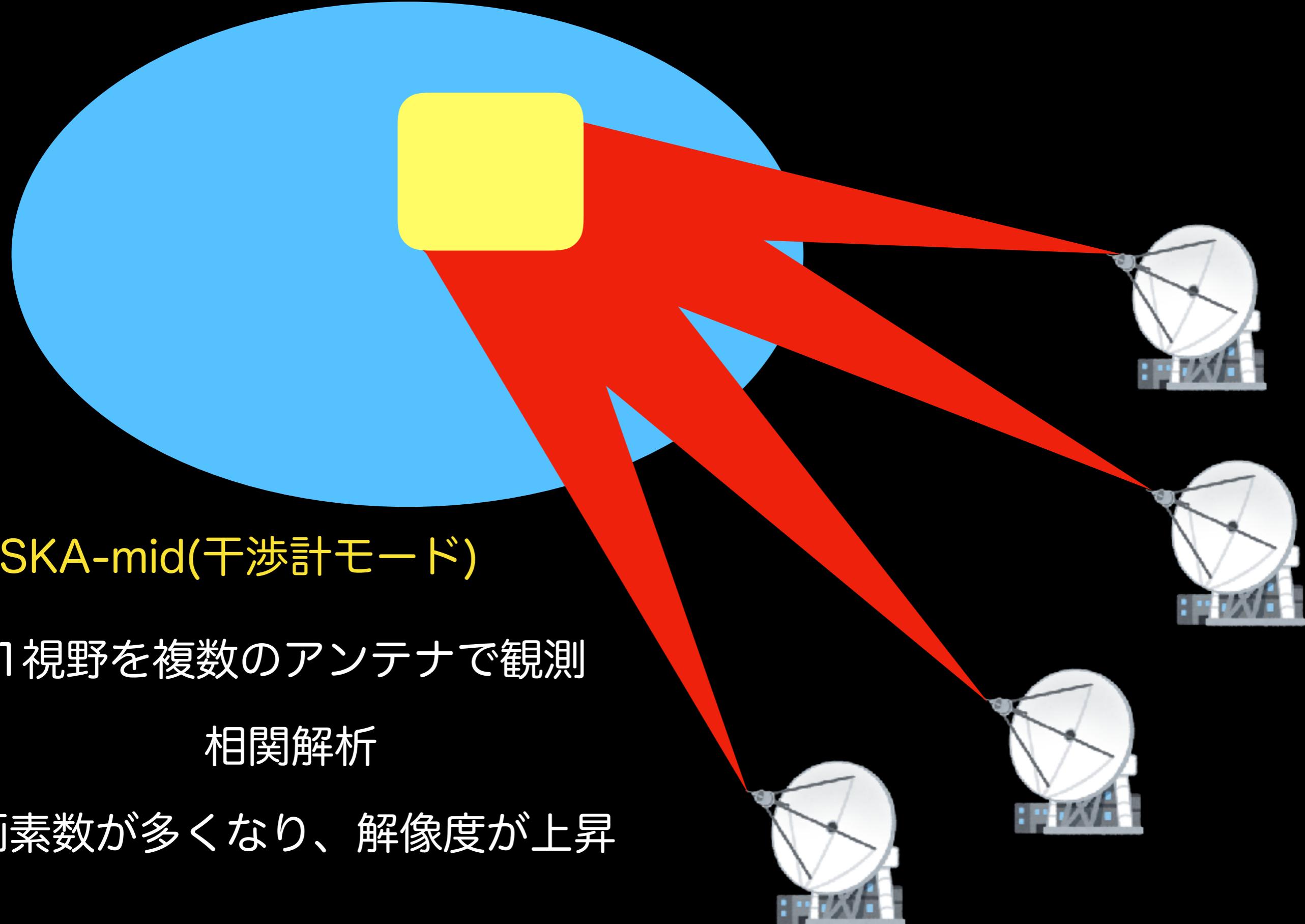
	SKA1-MID
周波数	350MHz-14GHz
redshift	~3
建設地	南アフリカ
集光面積	33,000m ²
最大基線長	150km

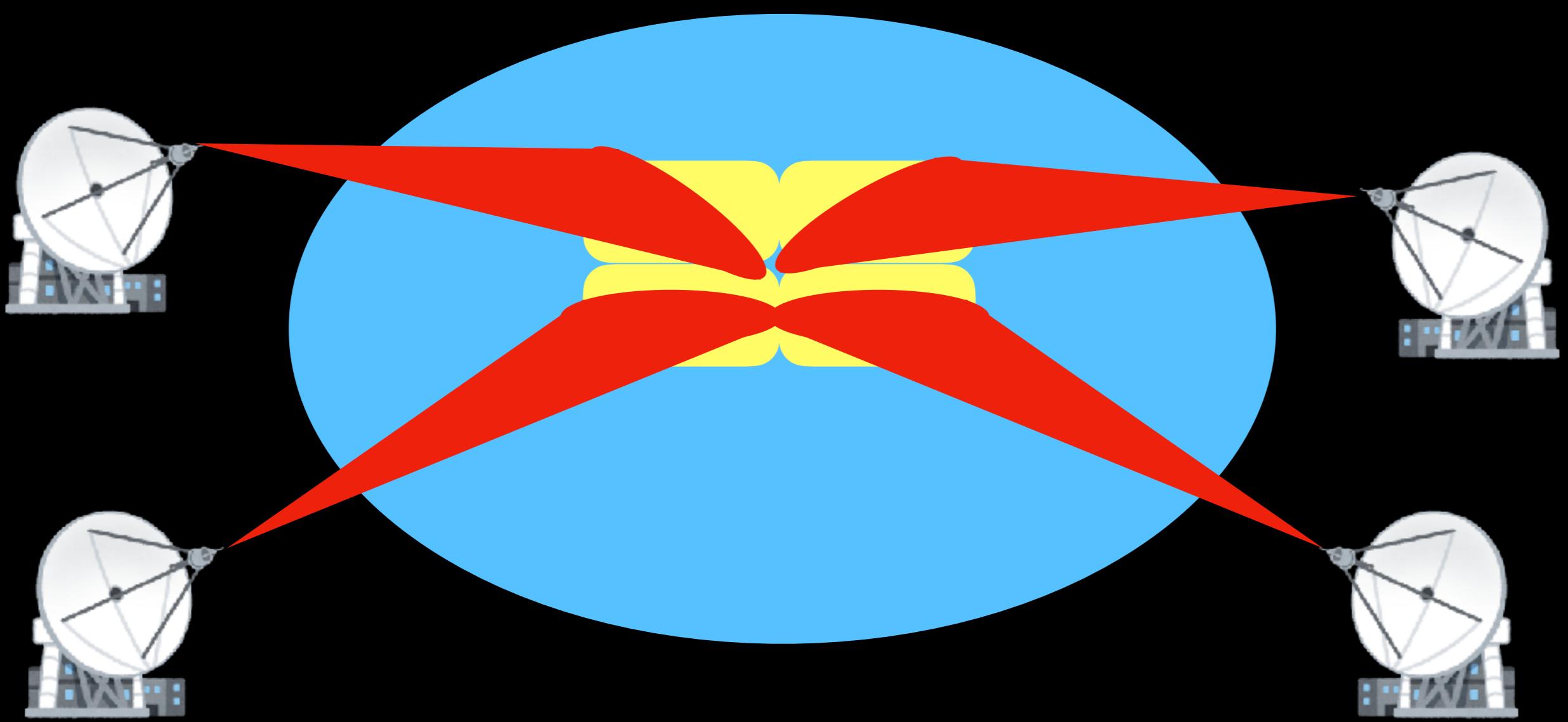


<https://www.skatelescope.org/multimedia/image/ska-mid-africa-close-up-artists-impression/>

SKA1-MIDのスペックは(Bull et al.2015)を元に

観測モード





SKA-mid(single dish)

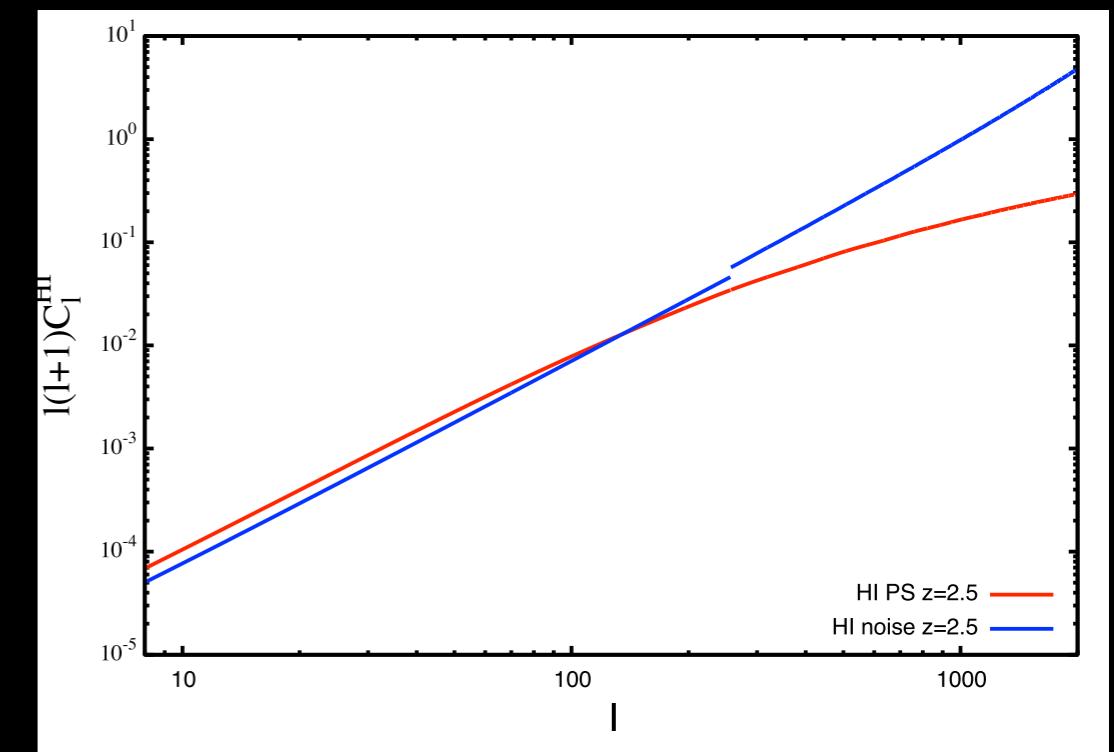
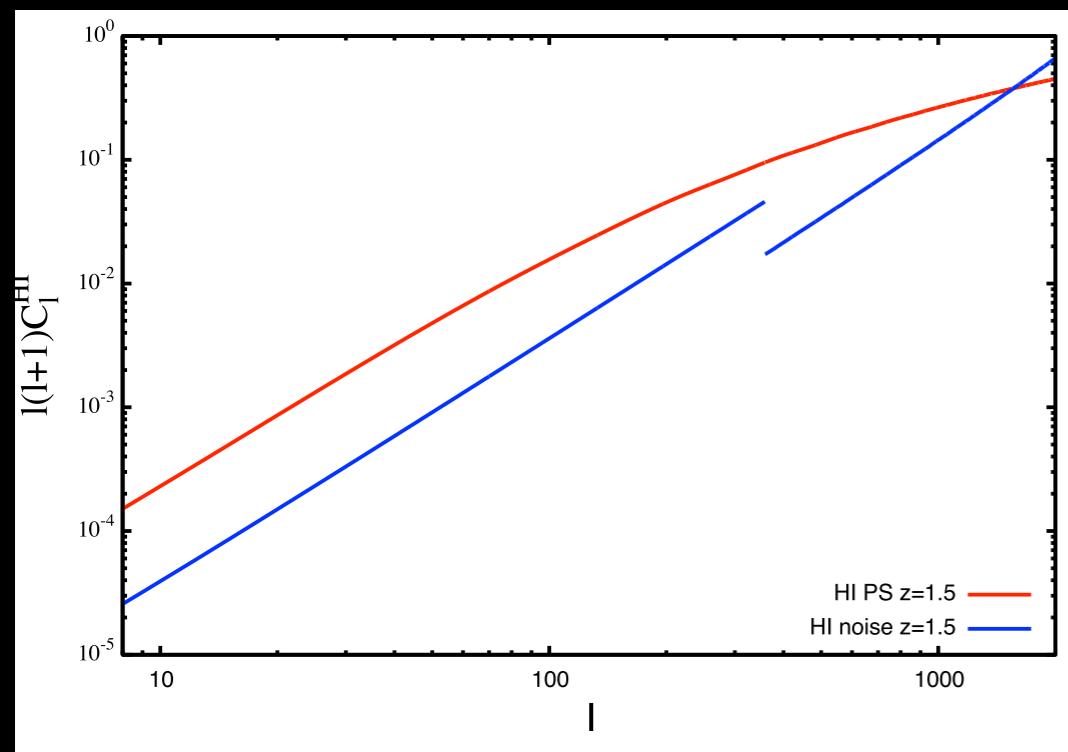
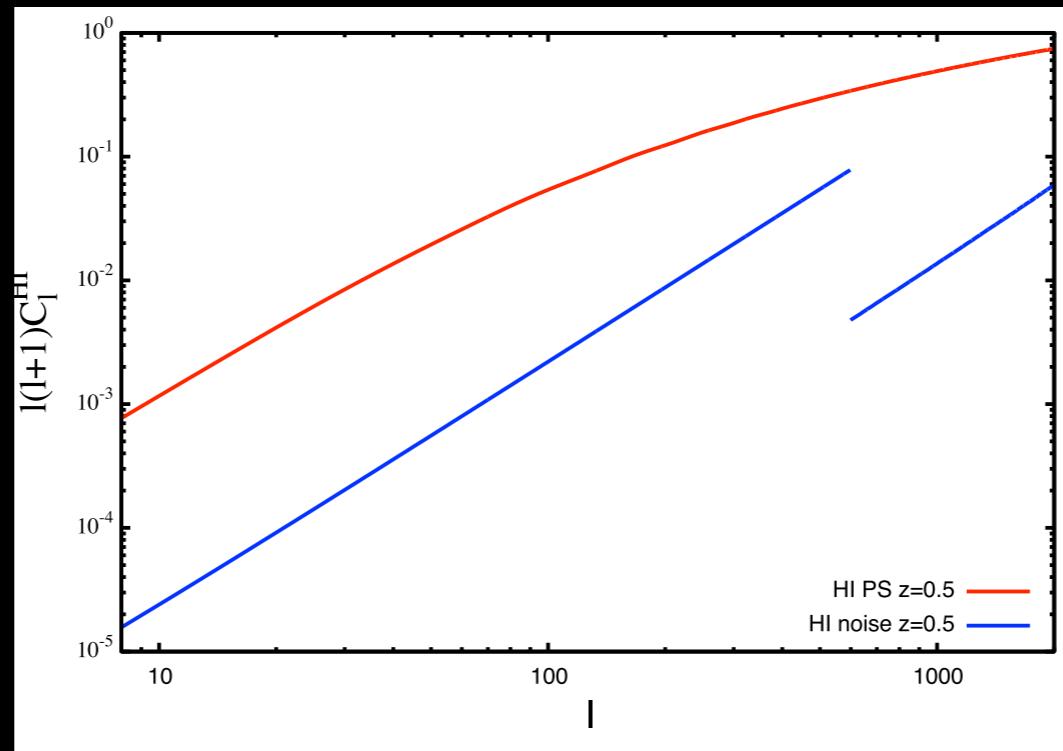
1視野をそれぞれ1つのアンテナで観測する

f_{sky} 大きくなる

signalとnoiseの関係

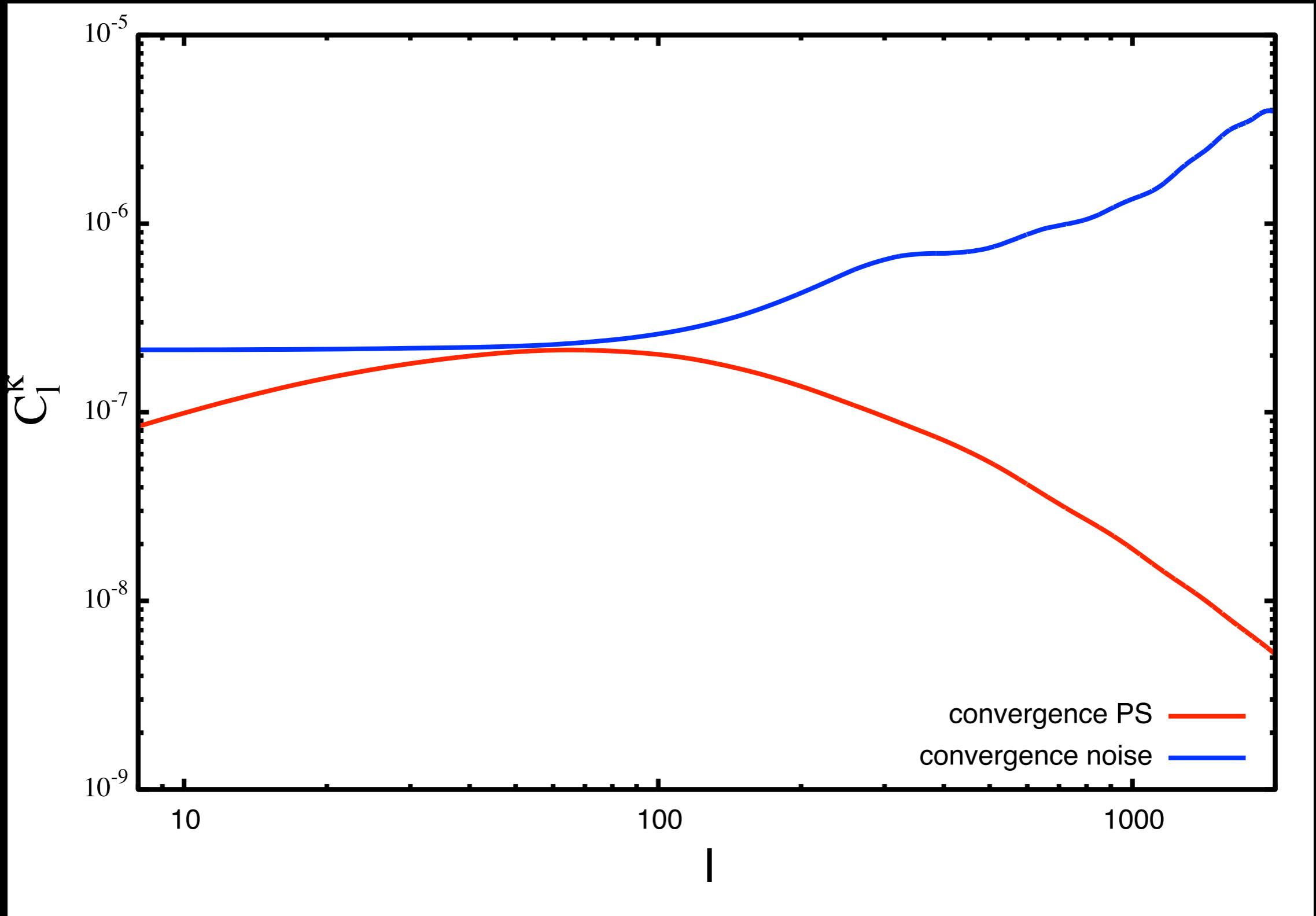
C^{HI} とSKA-mid noise
($8 < \ell < 2000$)

$$\sigma^2 = \frac{(C_l^\kappa + N_l^\kappa)(C_l^{HI} + N_l^{HI}) + (C_l^{HI-\kappa})^2}{(2l+1)\sqrt{N_c}f_{sky}\Delta l}$$



C_K とPlanck観測 noise($8 < \ell < 2000$)

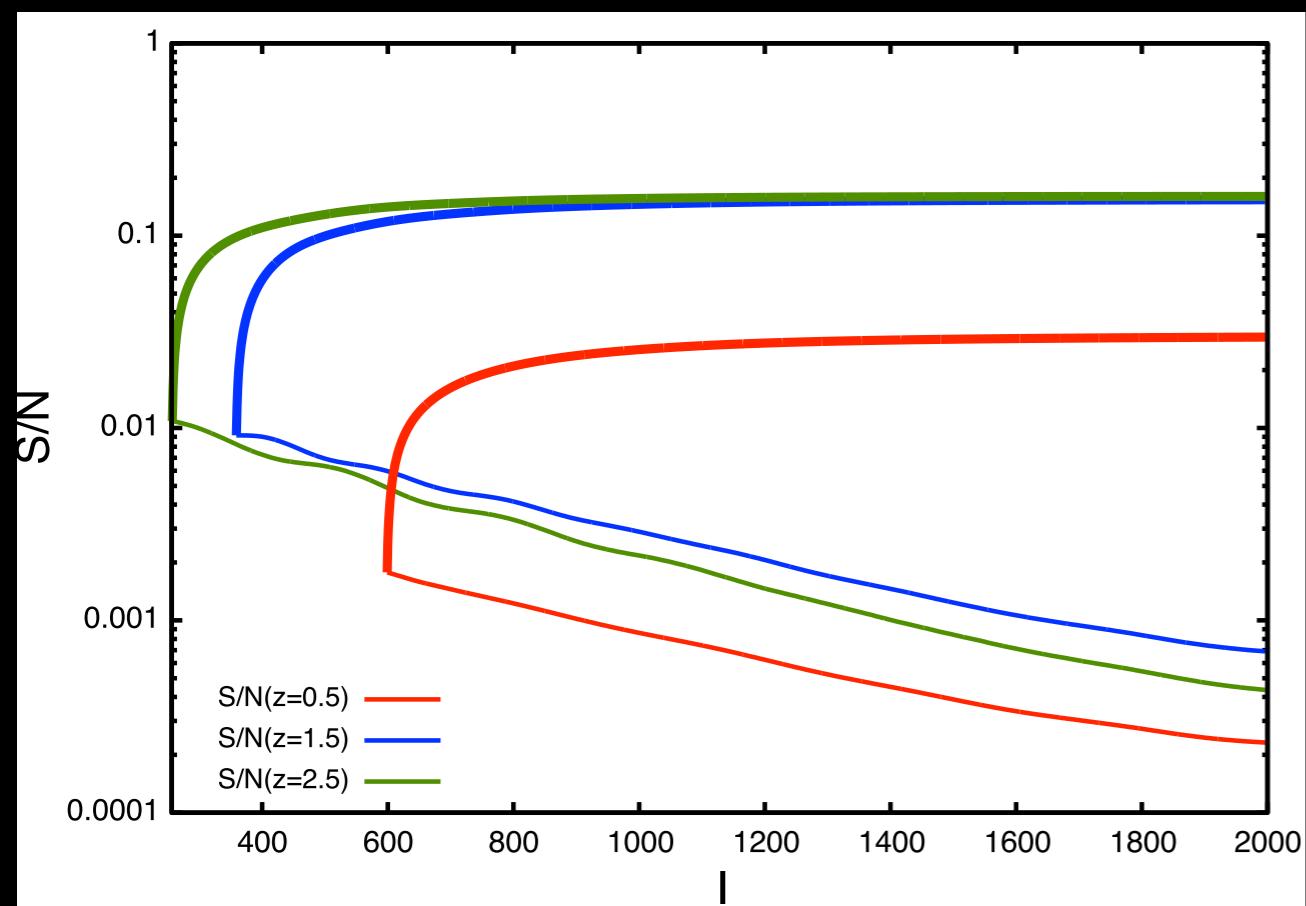
収束場はPlanck(2015)のデータを使用



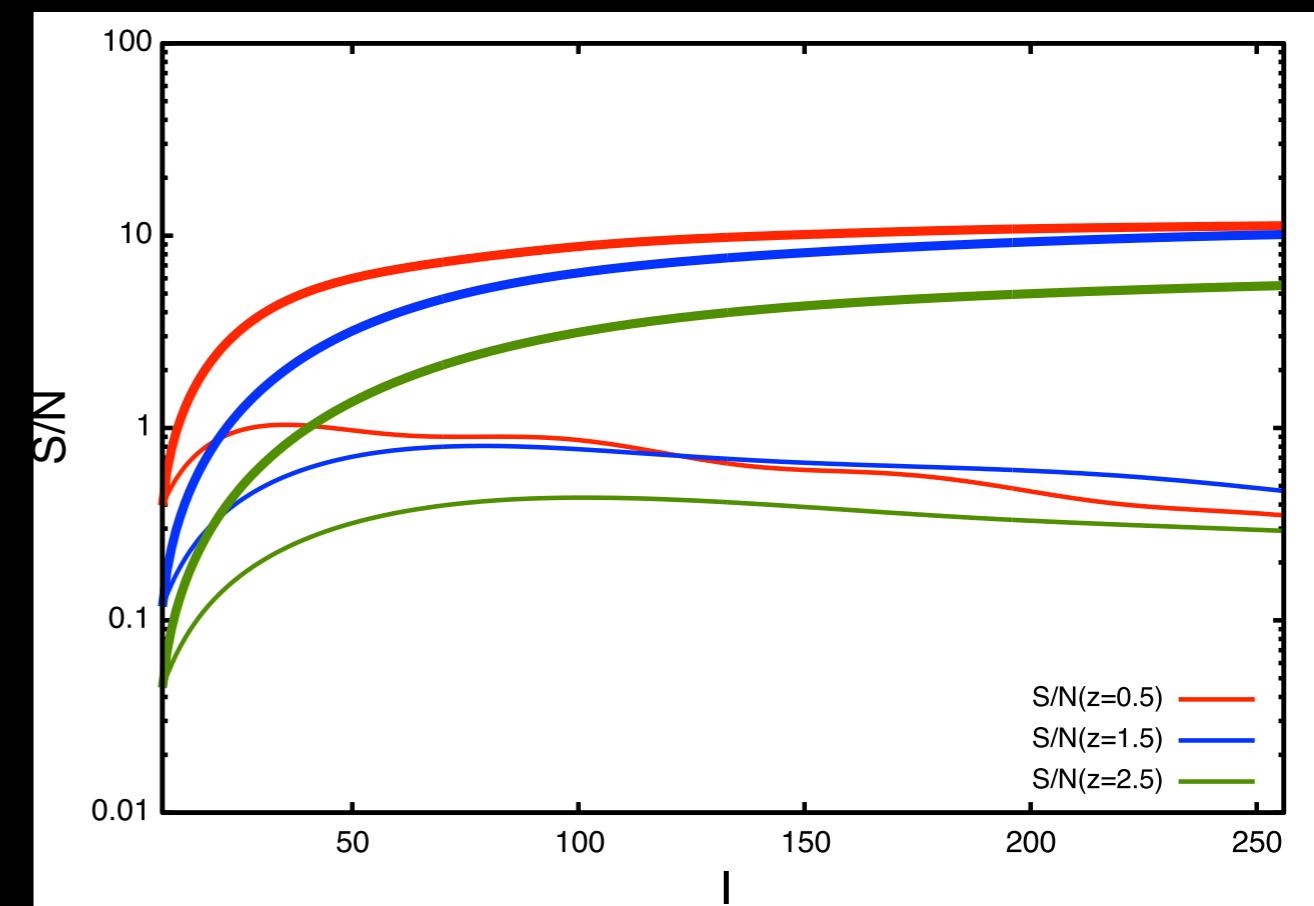
HI-WGL CPSの検出可能性

instrumental noises(SKA-Planck観測)を考慮した場合

干渉計



single dish



S/N > 3で十分な検出可能性

4. Fisher解析を用いた Ω_{HI} 制限の予測

手法：Fisher解析

宇宙論パラメータ：Planck 2018(fiducial)

$$\Omega_{\text{HI}} = 1.0 \times 10^{-3}$$

$$n_s = 0.9665$$

$$\Omega_c h^2 = 0.11933$$

$$H_0 = 67.66$$

この他のパラメータは固定する(Planck2018のデータ)

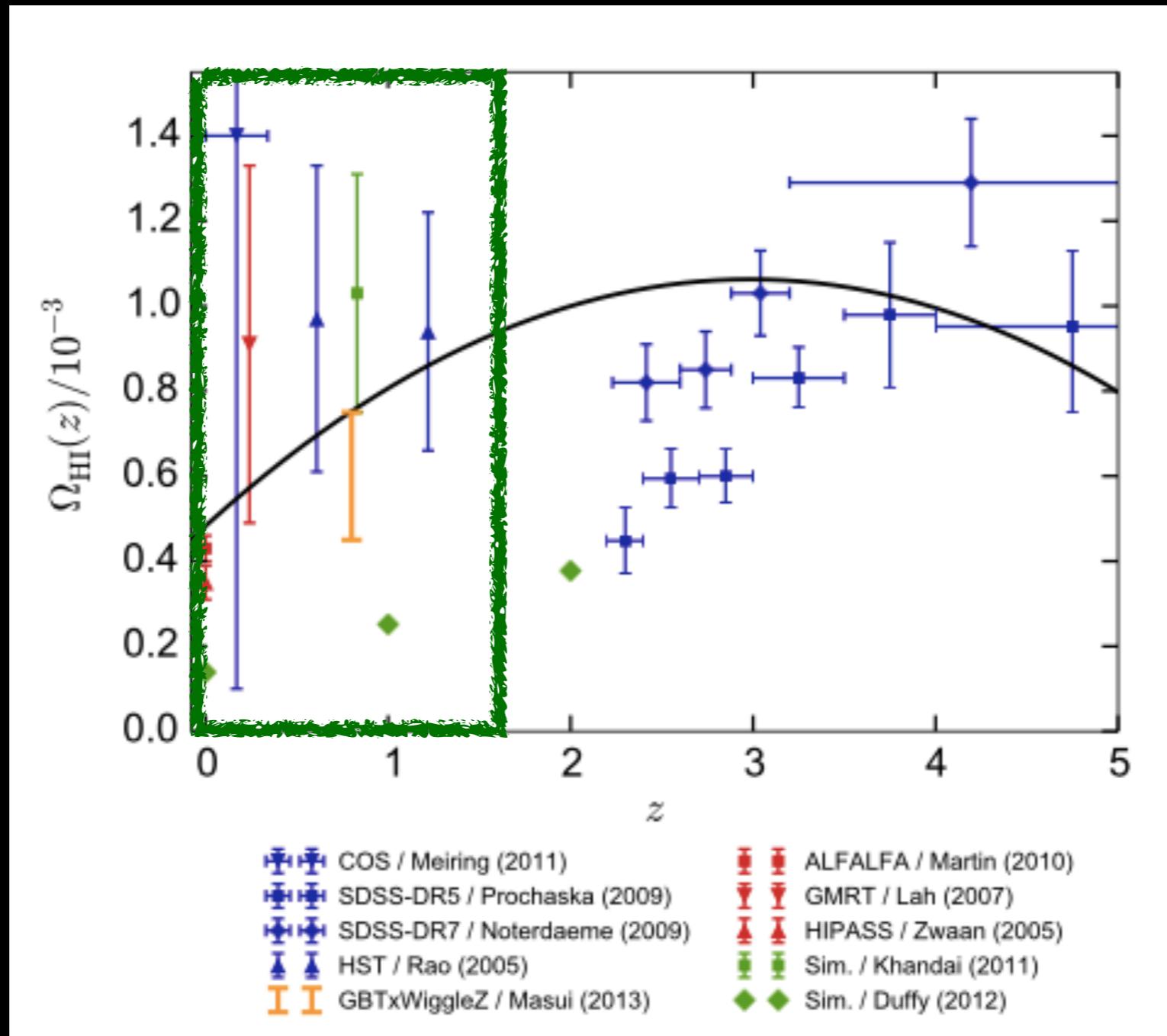
中性水素(HI)の重要性

宇宙全体の中性水素の量(Ω_{HI})

宇宙のバリオンのほとんどを占める水素の物理状態

Ω_{HI} の赤方偏移進化は
宇宙論、銀河進化、銀河内での星形成の物理において重要

これまでの研究による Ω_{HI} の制限



Bull et al. 2015

現状の制限は良いところもあるが、ばらつきがある
 $z < 1$ ではあまり制限が良くない

結果

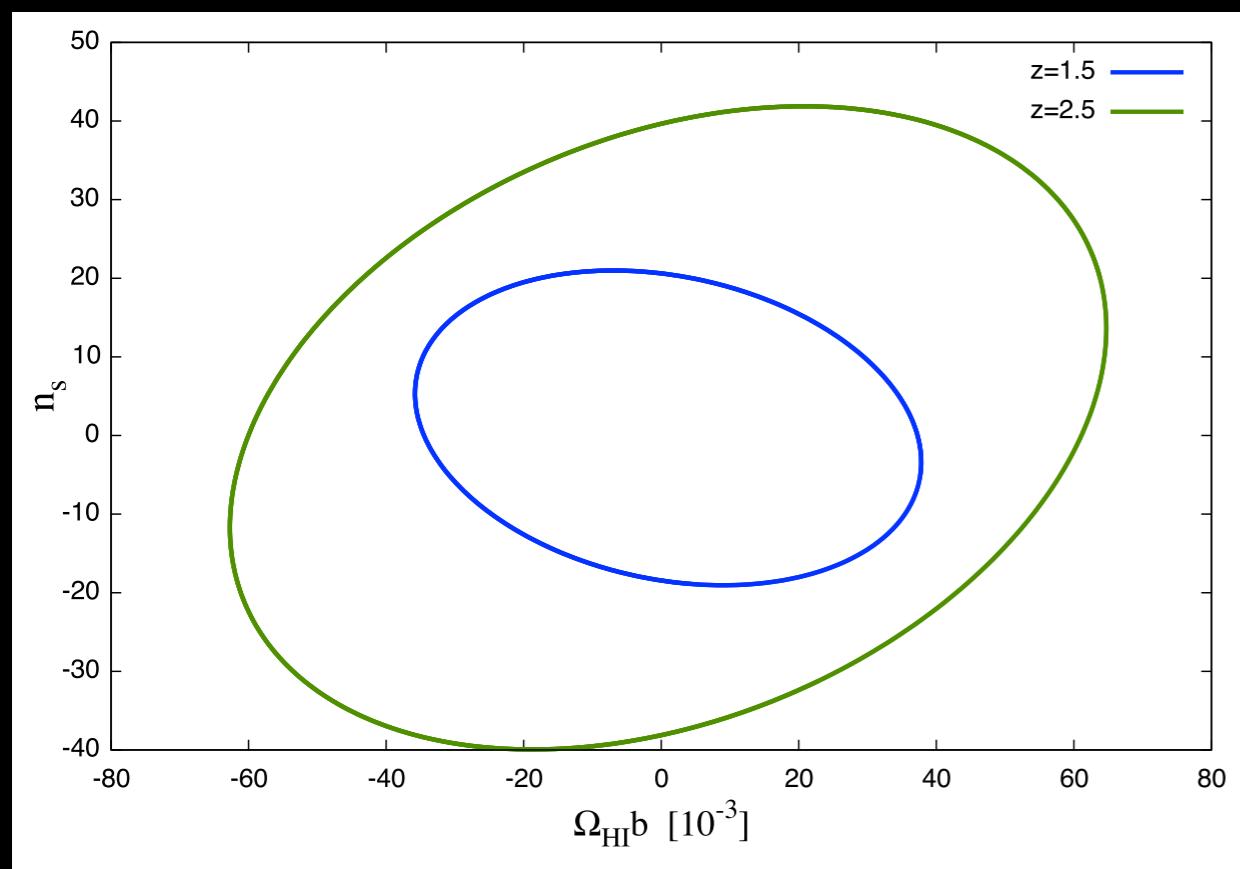
$(\Omega_{\text{HI}}, n_s)$, 1σ

SKA観測時間 : 1,000h

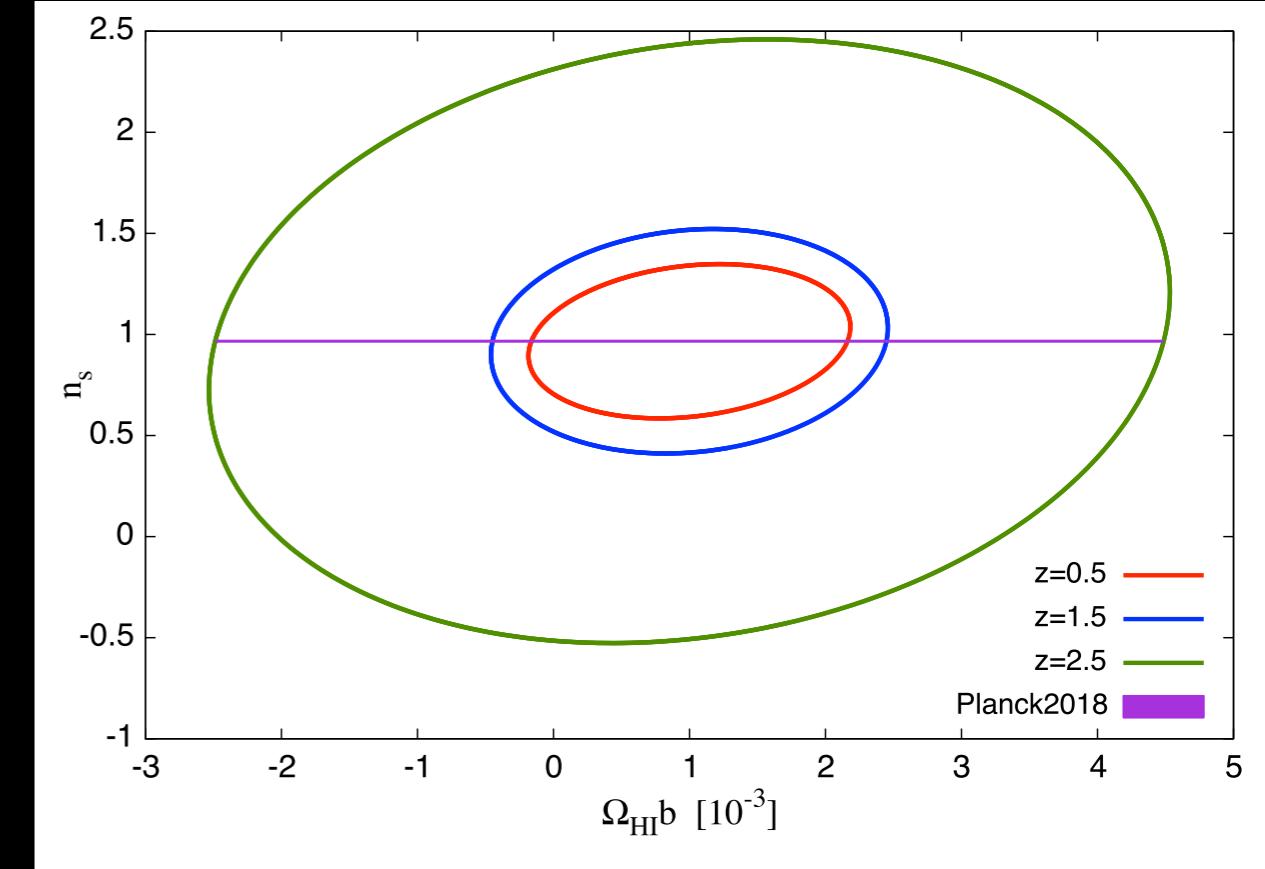
$f_{\text{sky}} : 0.79 \times 10^{-4}$ (干渉計)

0.6(single dish)

干渉計($400 < l < 2,000$)



single dish ($8 < l < 400$)



$$\underline{n_s = 0.9665 \pm 0.0038}$$

Ω_{HI} の制限は見込めない

結果

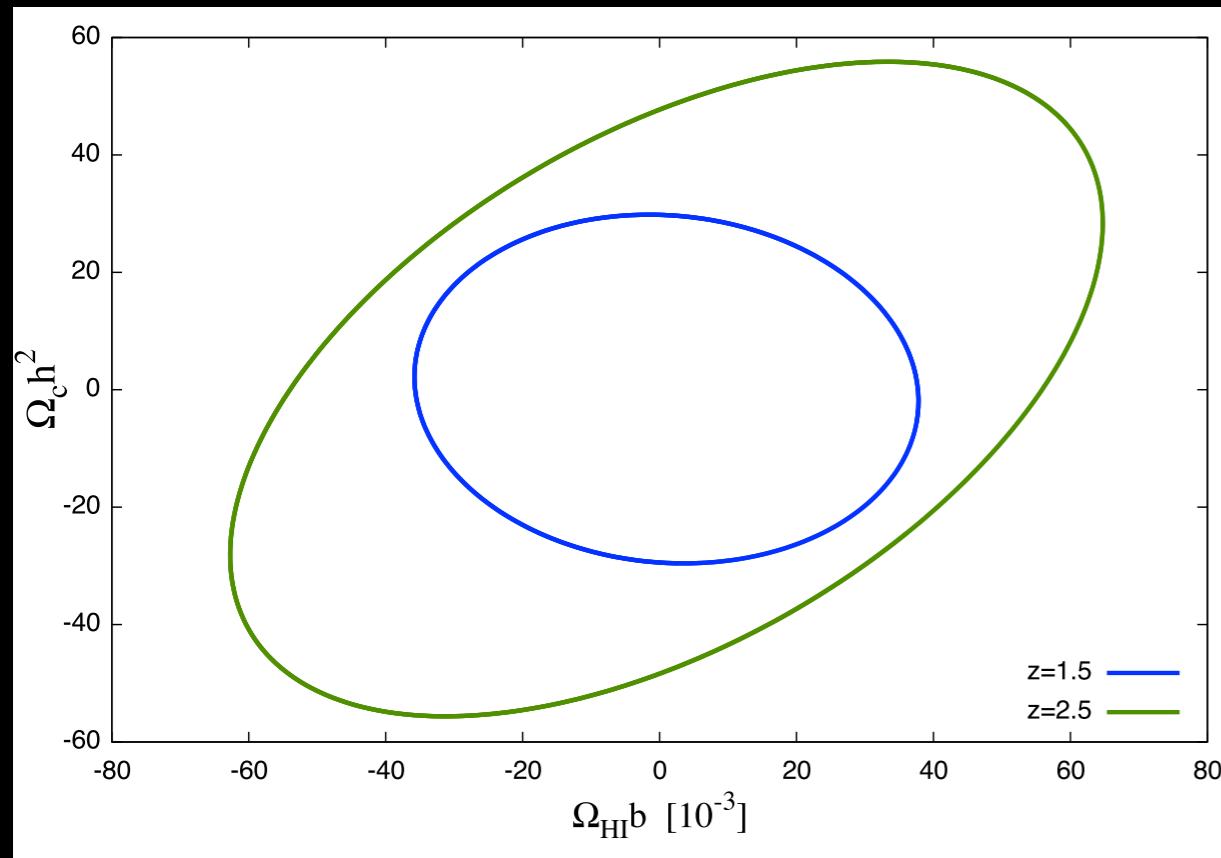
$(\Omega_{\text{HI}}, \Omega_{\text{ch}}^2), 1\sigma$

観測時間 : 1,000h

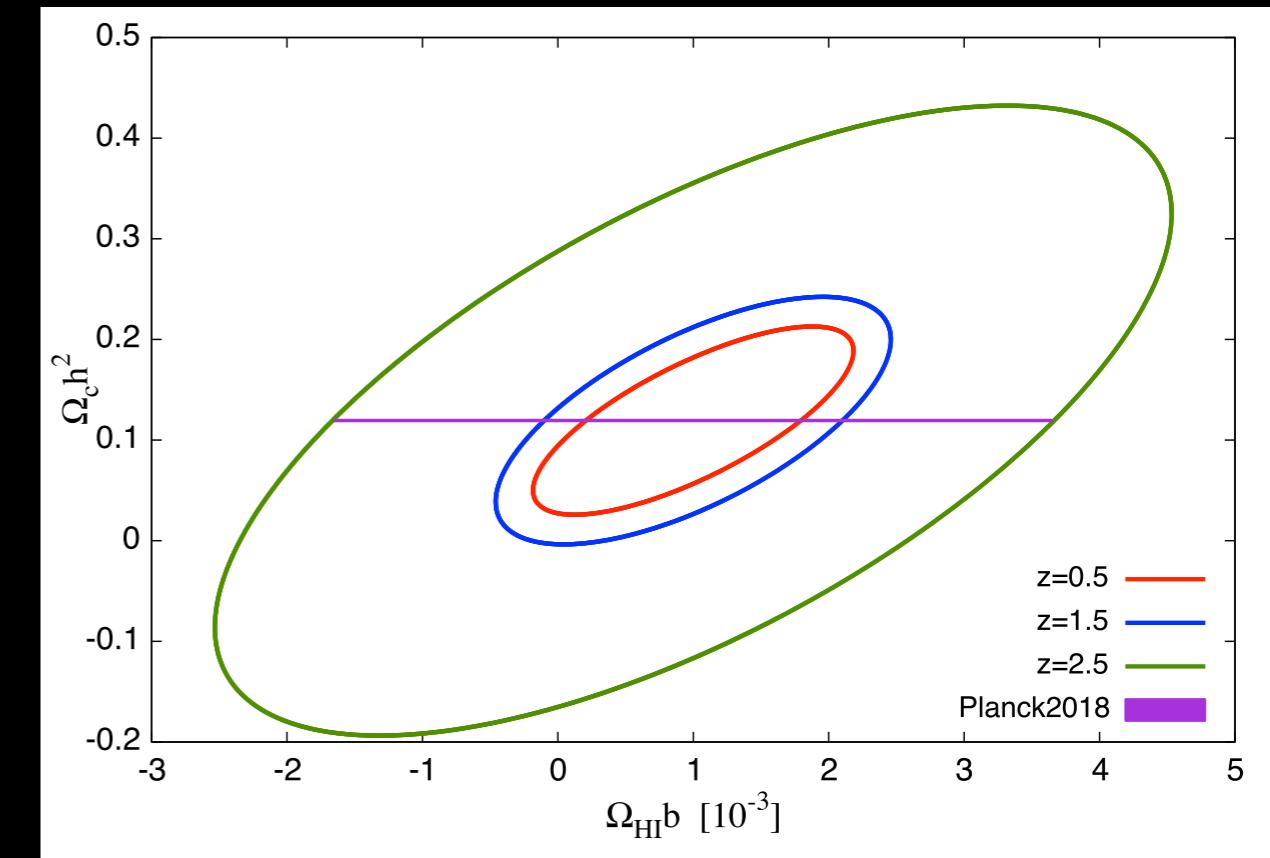
$f_{\text{sky}} : 0.79 \times 10^{-4}$ (干渉計)

0.6(single dish)

干渉計($400 < l < 2,000$)



single dish ($8 < l < 400$)



$$\Omega_{\text{ch}}^2 = 0.11933 \pm 0.00091$$

priorを用いて Ω_{HI} を80%の誤差で制限が可能

結果

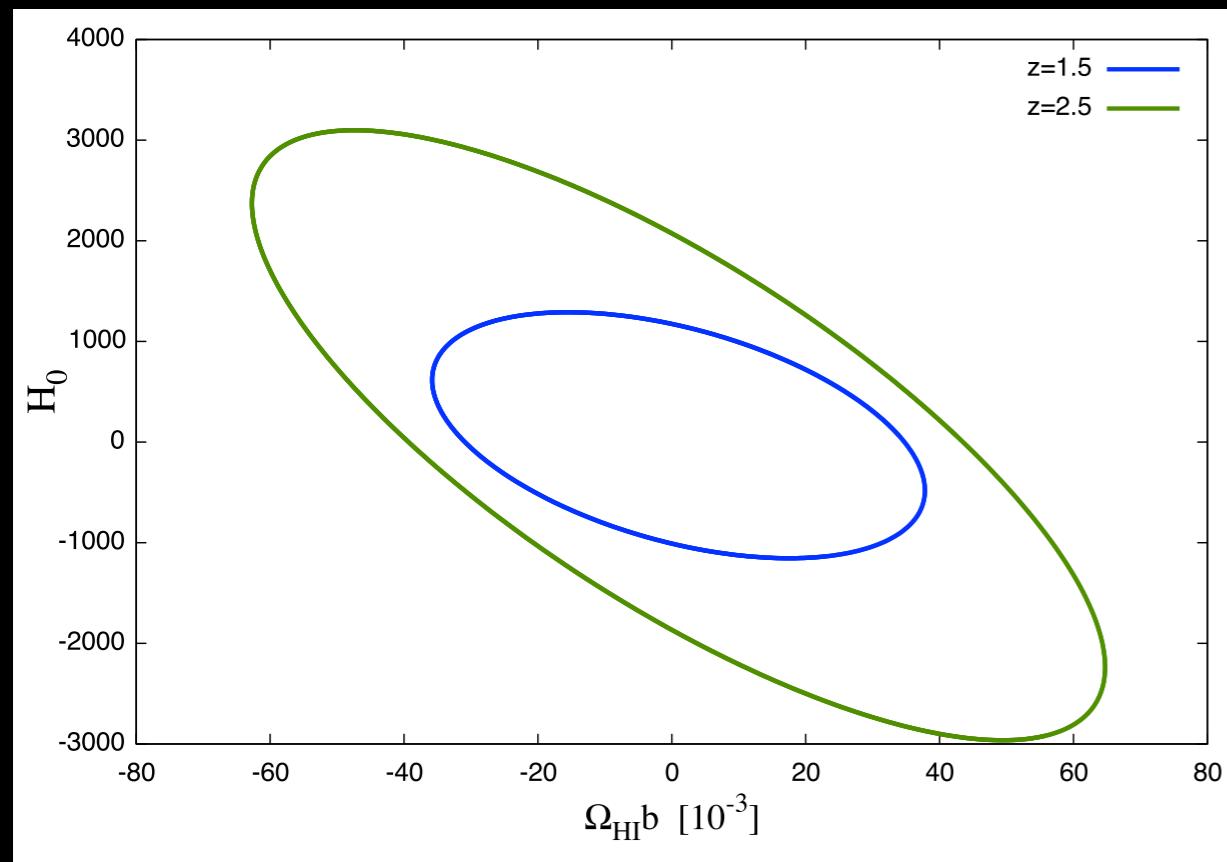
$(\Omega_{\text{HI}}, H_0)$, 1σ

観測時間 : 1,000h

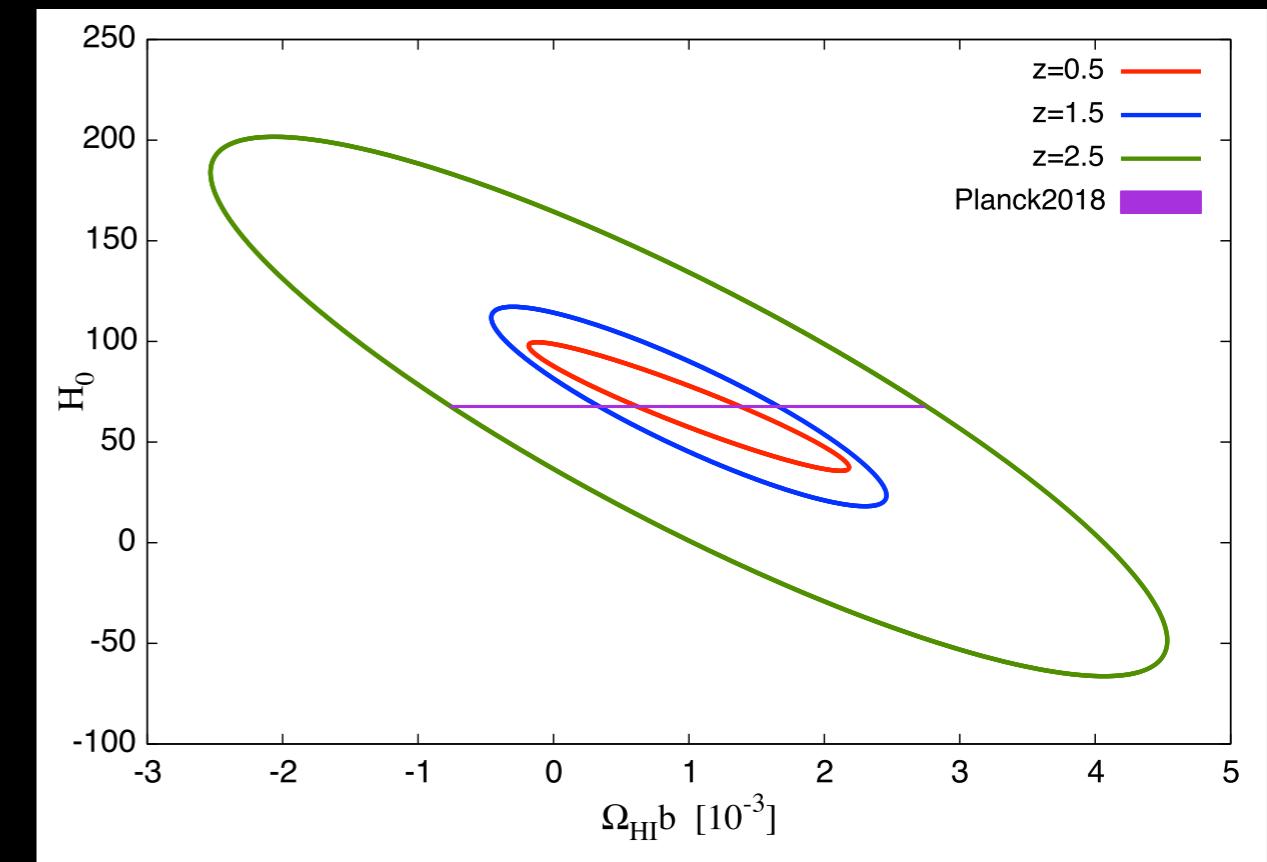
$f_{\text{sky}} : 0.79 \times 10^{-4}$ (干渉計)

0.6(single dish)

干渉計($400 < l < 2,000$)



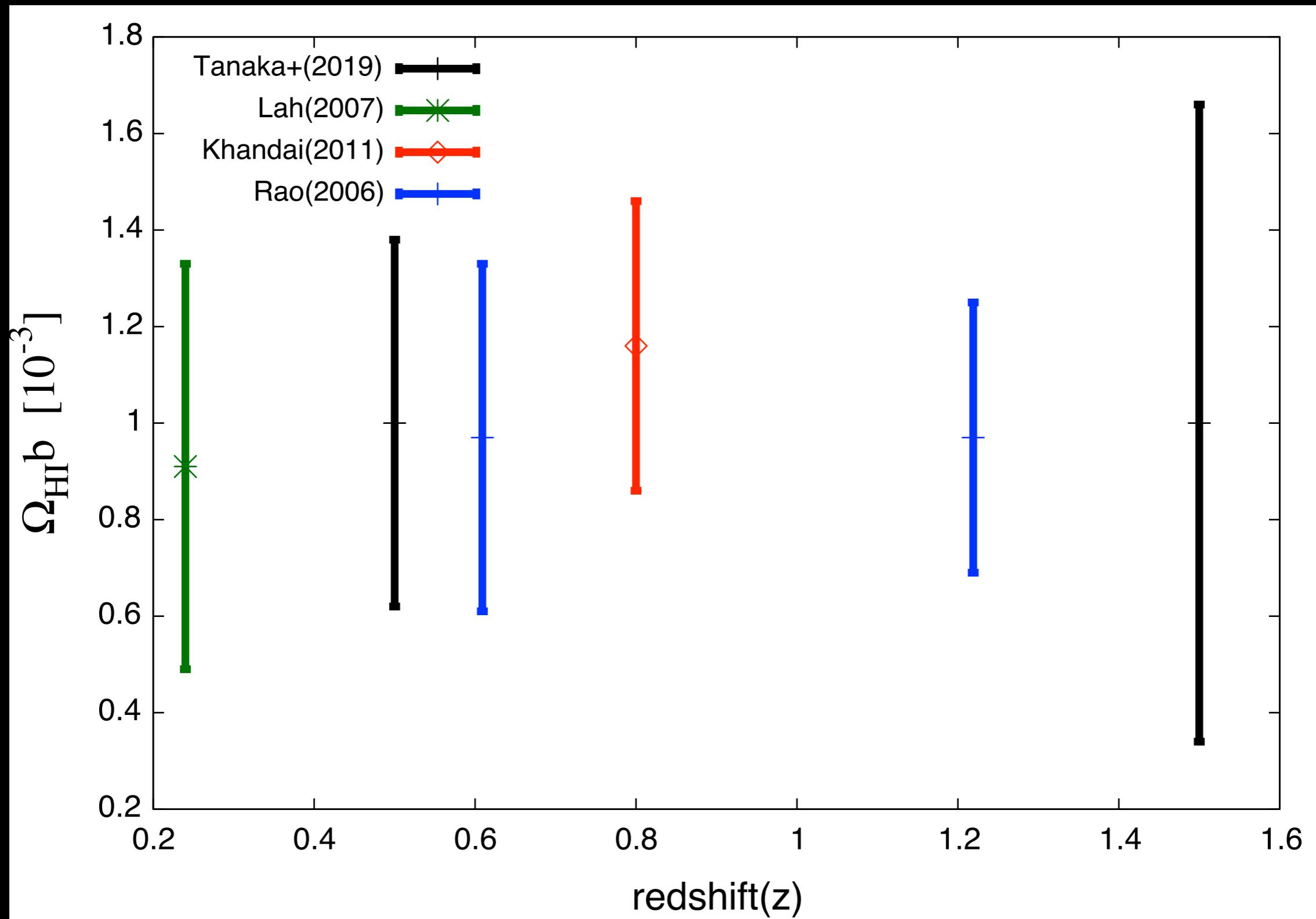
single dish ($8 < l < 400$)



$$H_0 = 67.66 \pm 0.42$$

priorを用いて Ω_{HI} を 38% ($z=0.5$), 66% ($z=1.5$) の誤差で制限が可能

これまでの結果との比較



5. 今後の研究・まとめ

- HI-WGLクロスワースペクトルの観測は期待できる
→より厳しい宇宙論パラメーターの制限への期待
Fisher解析を用いることで Ω_{HI} の制限(38%の誤差)が期待されることがわかった
- small scaleでの制限について
 C_K とPlanck noiseの関係
→どのellでもnoiseがdominantである
ACTPol観測では感度の良い観測が期待される
- biasの影響を考慮

prior込みでの結果の一つ

