

# Lensing reconstruction using redshifted 21cm fluctuations

Oliver Zahn&Matias Zaldarriaga  
Astro-ph/0511547v2

reference) Zaldarriaga,Furlanetto,Hernquist(2004)  
Hu&Okamoto(2002)

名大 At研 修士1年 島袋隼士

# outline

- introduction
- Theory of the redshifted 21cm signal
- Weak lensing reconstruction
- まとめ

introduction

宇宙の大規模構造による重力ポテンシャルによって、銀河からの光や宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の経路に変化が生じる。(弱重力レンズ効果)



経路の変化を通して、大規模構造の重力ポテンシャルを調べる事が可能。



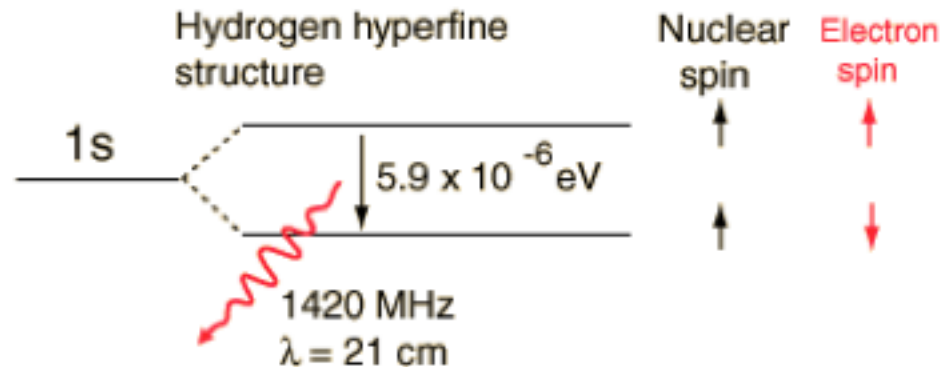
Hu&Okamoto(2002)は、CMBの温度揺らぎや偏光を用いて、重力ポテンシャルをreconstruction(再構築)した。(quadratic estimator technique)



今回、紹介する論文では、Hu&Okamotoの内容を拡張して21cm線へと適用。3次元的な情報を取り扱う事が可能に。

# Theory of the redshifted 21cm signal

# 21cm線とは



中性水素において、陽子のスピンと電子のスピン同士が平行か反平行かでエネルギー準位が異なる(超微細構造)。このエネルギー差が周波数1.4GHz,波長21cmの電波として放射されたものが21cm線である。

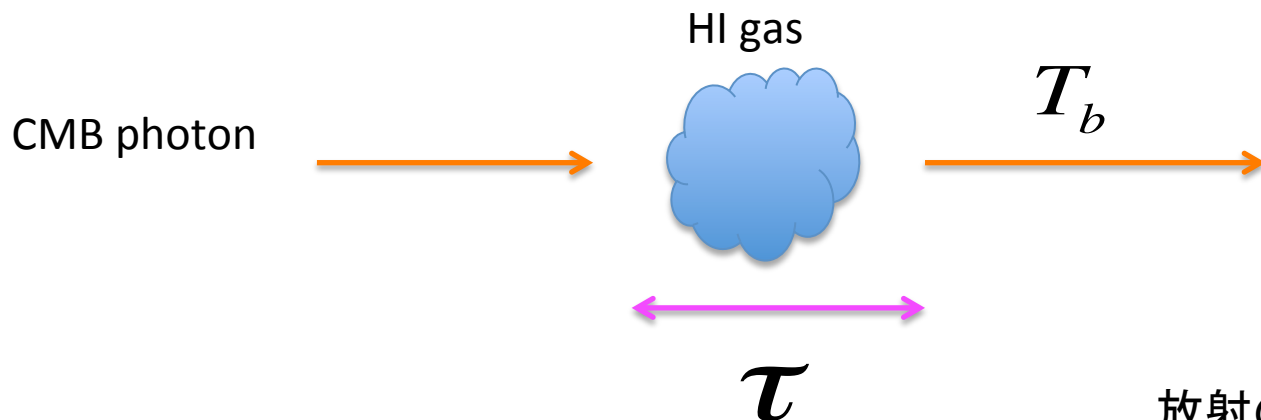
遷移確率:  $2.9 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$



地上で観測される可能性はほぼ無いが、中性水素が大量に存在する星間物質では観測可能。

再電離時の水素からの21cm線を想定。

CMB photonがHIガス(中性水素ガス)を通り抜けてくる場合の図



Radiative transfer(Rayleigh-Jeans limit)

放射の伝搬はradiative transferの式で記述される。

$$T_b = T_{\text{CMB}}e^{-\tau} + T_S(1 - e^{-\tau})$$

Brightness temperature

Spin temperature

電波領域では放射強度は温度で記述できる。

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{g_1}{g_0} \exp\left(-\frac{h\nu_{10}}{kT_S}\right)$$

Optical depth (光学的にどれだけ不透明かを表す量)

$$\tau = \frac{3c^3 \hbar A_{10} n_{\text{HI}}}{16k\nu_0^2 T_S H(z)} \quad T_{\text{CMB}} = 2.73(1+z)$$

$$\approx 8.6 \times 10^{-3} (1 + \delta_s) x_H \left[ \frac{T_{\text{CMB}}(z)}{T_S} \right] \left( \frac{\Omega_b h^2}{0.02} \right) \times \left[ \left( \frac{0.15}{\Omega_m h^2} \right) \left( \frac{1+z}{10} \right) \right]^{1/2}$$

$T_b - T_{\text{CMB}}$  を現在の観測量に置きなおして考える。Radiative transferの式より

観測によって  
求まる。

$$\delta T(\nu) \approx \frac{T_S - T_{\text{CMB}}}{1+z} \tau \quad \psi(\vec{k})$$

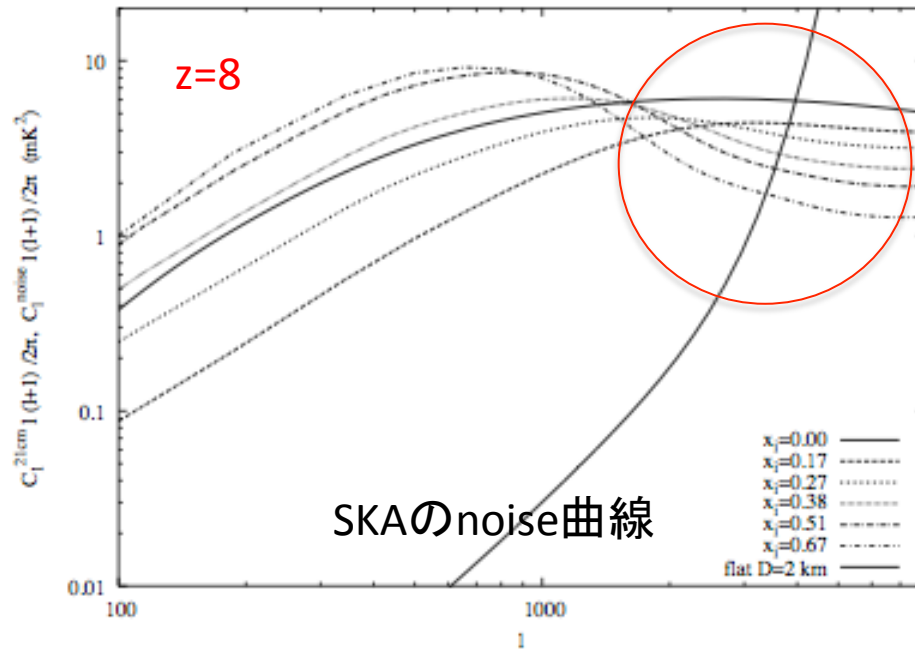
$$\approx 26 (1 + \delta_s) x_H \left( \frac{T_S - T_{\text{CMB}}}{T_S} \right) \left( \frac{\Omega_b h^2}{0.022} \right) \times \left[ \left( \frac{0.15}{\Omega_m h^2} \right) \left( \frac{1+z}{10} \right) \right]^{1/2} \text{ mK.}$$

21cm線の揺らぎにはバリオン密度の揺らぎ、中性水素の割合が含まれている。

興味がある  $z < 15$  では、 $T_S \gg T_{\text{CMB}}$  が成り立っている



## 21cm線の揺らぎから計算されるpower spectrum



イオン化率 大

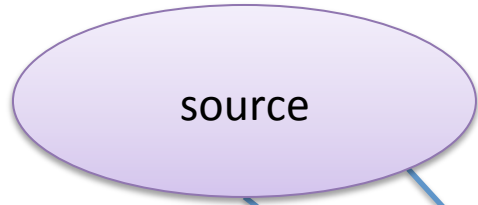
○イオン化率が大きいほど、signalが小さい。(全て中性水素の場合が最もsignal大)

→イオン化していると、揺らぎが小さくなるのでreconstructionが難しくなる。

# Weak lensing reconstruction

ソースから発せられた光が、大規模構造による弱重力レンズ効果を受けて、経路が曲がる。

e.g)galaxies,CMB,21cm線



弱重力レンズ効果は温度揺らぎや偏光に影響を与える。

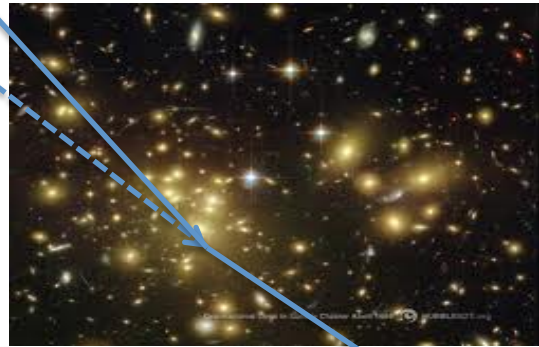
$$\Theta(\hat{n}) = \tilde{\Theta}(\hat{n} + \mathbf{d}(\hat{n})),$$
$$[Q \pm iU](\hat{n}) = [\tilde{Q} \pm i\tilde{U}](\hat{n} + \mathbf{d}(\hat{n}))$$

with

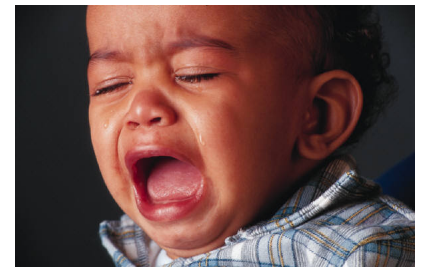
$$\mathbf{d} = \nabla\phi,$$

$$\phi(\hat{n}) = -2 \int dD \frac{(D_s - D)}{D D_s} \Psi(D\hat{n}, D),$$

Lensing potential



大規模構造



Lensingを受けた温度揺らぎの観測結果から、  
Lensing potentialを再構築したい。



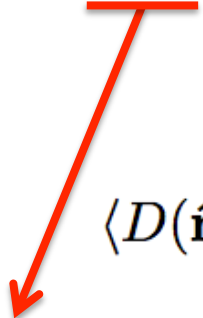
$$C_L^{\phi\phi} \text{ or } C_L^{dd}$$

Estimator

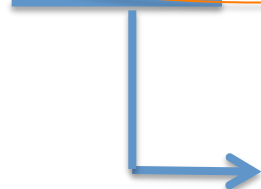
Hu&Okamoto(2002)

観測量

$$D_{\text{est.}}(\mathbf{L}) = A(L) \int \frac{d^2l}{(2\pi)^2} F(l, \mathbf{L} - l) T(l) T(\mathbf{L} - l)$$



$$\langle D(\hat{\mathbf{n}}) \rangle = \delta\theta(\hat{\mathbf{n}})$$



$$F(l, \mathbf{L} - l) = \frac{[C_l \mathbf{L} \cdot l + C_{L-l} \mathbf{L} \cdot (\mathbf{L} - l)]}{2\tilde{C}_l^{\text{tot}} \tilde{C}_{L-l}^{\text{tot}}}$$

$D_{\text{est}}$  の分散を最小にするように決定

$$A(L) = L \left[ \int \frac{d^2l}{(2\pi)^2} \frac{[C_l \mathbf{L} \cdot l + C_{L-l} \mathbf{L} \cdot (\mathbf{L} - l)]}{2\tilde{C}_l^{\text{tot}} \tilde{C}_{L-l}^{\text{tot}}} \right]^{-1}$$

Reconstruction noise power spectrum

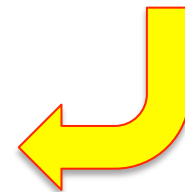
$$\langle D^*(\mathbf{L}) D(\mathbf{L}') \rangle = (2\pi)^2 \delta(\mathbf{L} - \mathbf{L}') (C_L^{DD} + N_L)$$

signal

noise

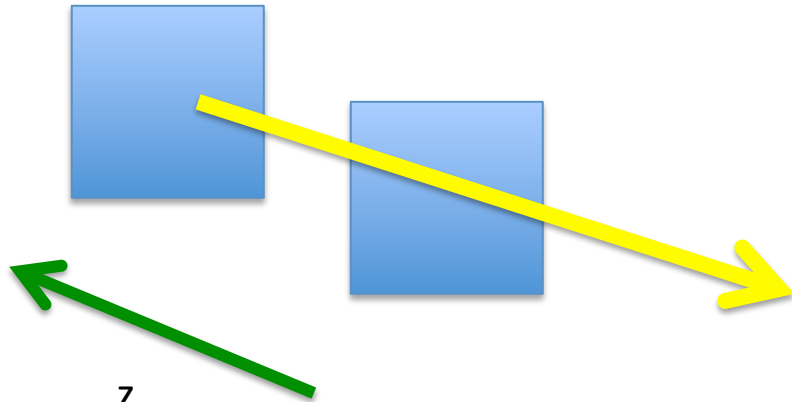
$$N_L(L) = L^2 \left[ \int \frac{d^2l}{(2\pi)^2} \frac{[C_l \mathbf{L} \cdot l + C_{L-l} \mathbf{L} \cdot (\mathbf{L} - l)]^2}{2\tilde{C}_l^{\text{tot}} \tilde{C}_{L-l}^{\text{tot}}} \right]^{-1} \quad (14)$$

$$= A(L)L \quad (15)$$



## Extension to a 3-D signal

CMBと異なり、21cm線の温度揺らぎは、21cm線は3次的に分布しているため redshift毎の情報を含んでいる。



実空間では、異なるplane間の相関が容易に分からない。

∴ Redshift, planeの性質などに依存。

フーリエ空間での温度揺らぎ  $\delta\tilde{T}(\vec{k})$  を考える。

このとき、波数  $\vec{k}$  を視線方向に垂直な成分  $\vec{k}_\perp$  と、振動数方向成分  $k_\parallel$  に分ける。

$$k_\perp = \frac{l}{D}, k_\parallel = j \frac{2\pi}{L}$$

Real spaceでz軸方向を離散化

離散化

波数を離散化する条件では、離散化したangular power spectrumを定義することができる。

$$C_{l,j} \equiv (1 + \mu_k^2)^2 \frac{P(\sqrt{(l/D)^2 + (j 2\pi/\mathcal{L})^2})}{\mathcal{D}^2 \mathcal{L}}$$

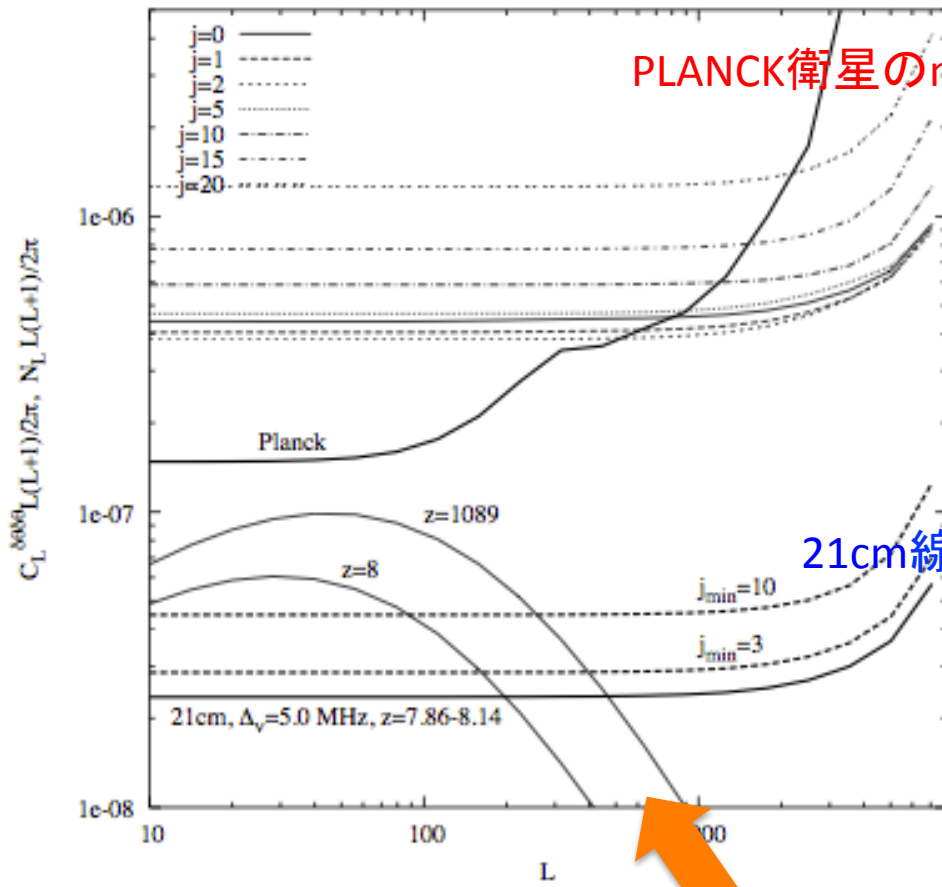
Redshift distortionを考慮

Redshift毎の3次元的な情報を含んだ形のpower spectrum

また、3次元のlensing reconstruction noiseも考えることができる。

$$\langle D(\mathbf{L}) D^*(\mathbf{L}') \rangle = (2\pi)^2 \delta(\mathbf{L} - \mathbf{L}') N_L^D$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow N_L^D &= \frac{1}{\sum_k \frac{1}{L^2} \int \frac{d^2l}{(2\pi)^2} \frac{[C_{l,k} L \cdot l + C_{L-l,k} L \cdot (L-l)]^2}{2\tilde{C}_{l,k}^{\text{tot}} \tilde{C}_{L-l,k}^{\text{tot}}}} \\ &= \frac{1}{\sum_k N_{L,k}^{-1}} \end{aligned}$$



PLANCK衛星のnoise曲線

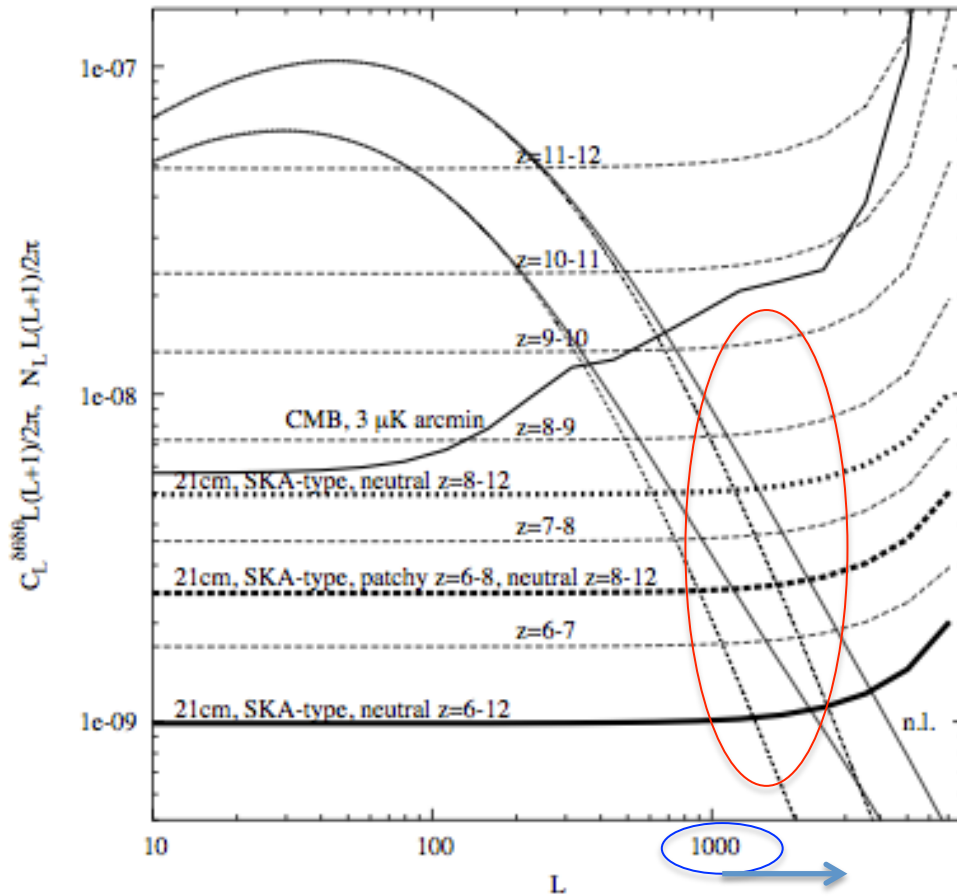
21cm線を用いると、lensing potentialの  
パワースペクトルの観測はCMB観測衛星  
PLANCKよりも1桁程ノイズの小さい観測  
ができる。

21cm線観測のnoise曲線

deflection angle(lensing potential)のpower-spectrum

$$C_L^{\delta\theta\delta\theta} = \frac{9H_0^4\Omega_0^2}{L(L+1)c^2} \int_0^{D_s} dD_l \left( \frac{D_{ls}}{D_s a(D_l)} \right)^2 \times \\ \times P_\delta(k = \frac{L}{D_l}, D_l)$$

# 理想的なCMB experimentとSKAの場合でのノイズ曲線



太字はNon-linear  
点字はlinear

21cm線による観測では、 $l > 1000$ でCMBのquadratic estimator techniqueで達成可能なnoise levelよりも低いnoise levelで観測することができるので、非線形効果まで見えてくる。



# まとめ

○Quadratic estimator formalismを3次元的な情報を用いることができるように拡張。

○21cm線を用いると、CMB quadratic estimatorの場合よりもnoiseを減らせる。(ex.SKA)

→弱重力レンズ効果を引き起こす大規模構造の物質密度分布を、よりhigh  $l$ まで探査可能。

→非線形の効果まで見えてくる。