

宇宙論的 2 次摂動論のもとでの 弱い重力レンズ効果

嵯峨 承平 [名古屋大学 宇宙論研究室(C研)]

S.S [PRD94,063523(1607.03973)]

S.S, D.Yamauchi, K.Ichiki [PRD92,063533(1505.02774)]

1. イントロダクション

標準宇宙論

初期条件@インフレーション

+ **宇宙論的摂動論** (一般相対論 + ボルツマン方程式)

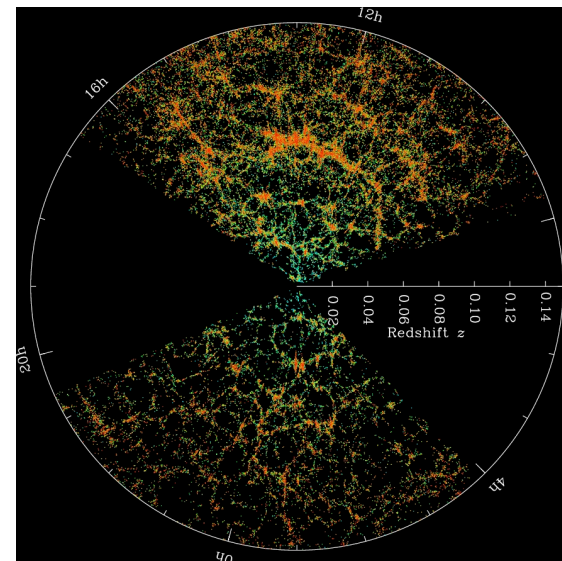
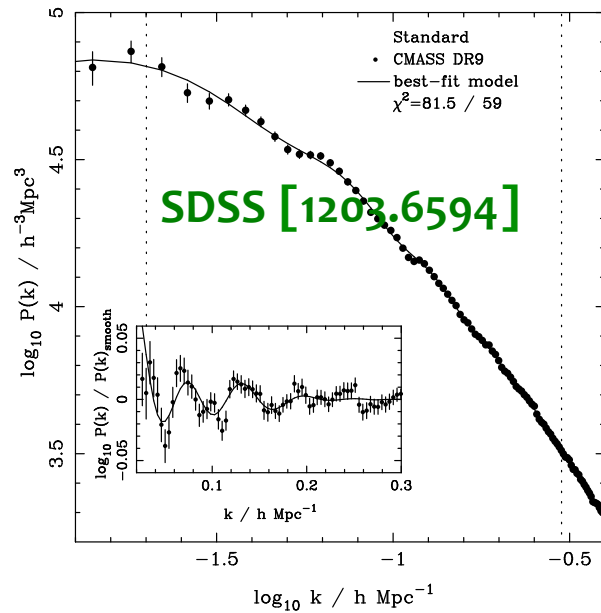
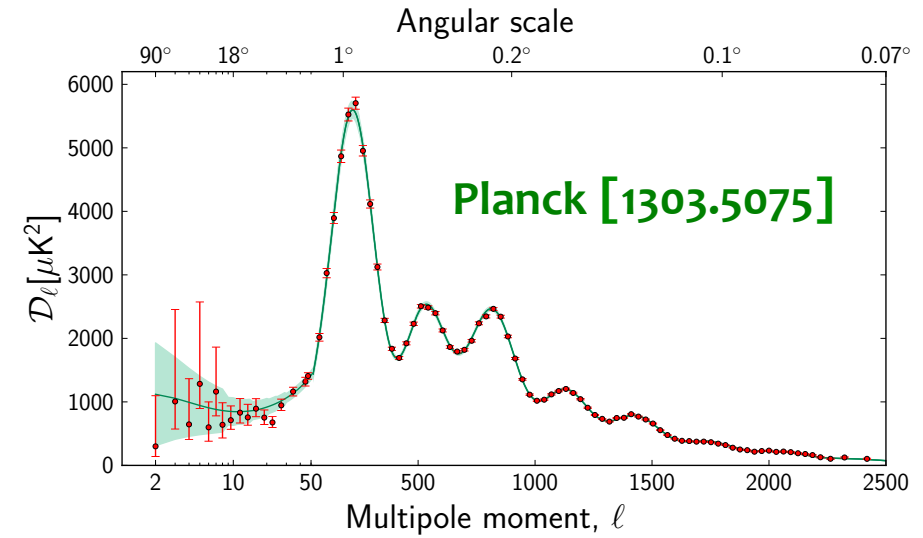
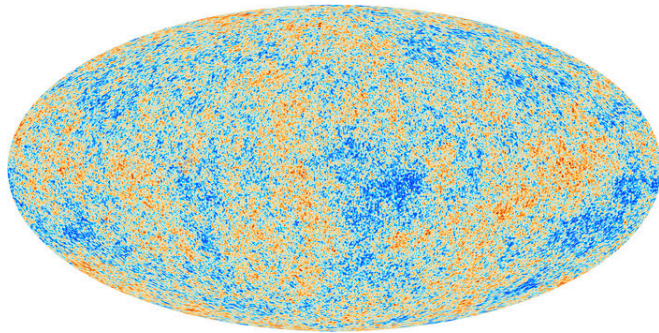
スカラーベクトルテンソル分解

$$X_i(\mathbf{x}) = \partial_i X^S(\mathbf{x}) + X_i^V(\mathbf{x})$$

$$Y_{ij}(\mathbf{x}) = \left(\partial_i \partial_j - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) Y^{S_1}(\mathbf{x}) + \frac{1}{3} \delta_{ij} Y^{S_2}(\mathbf{x}) \\ + \partial_i Y_j^V(\mathbf{x}) + \partial_j Y_i^V(\mathbf{x}) + Y_{ij}^T(\mathbf{x})$$

1.1 イントロダクション

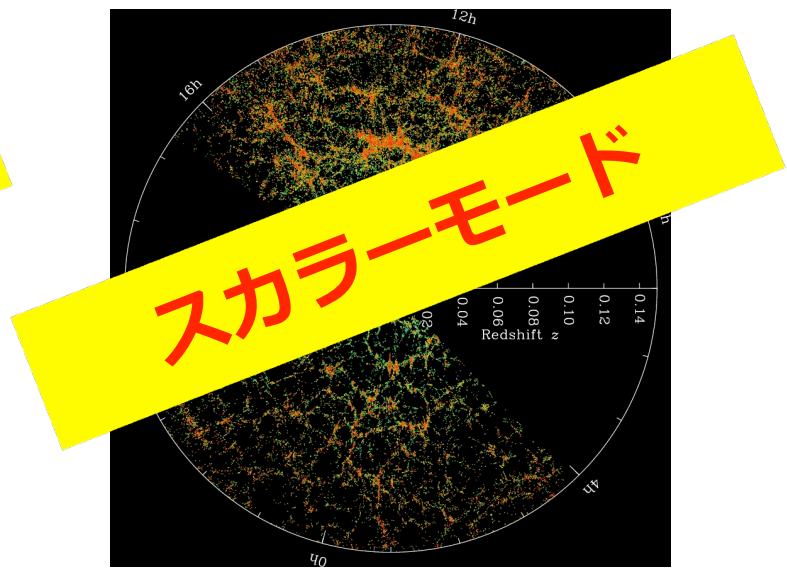
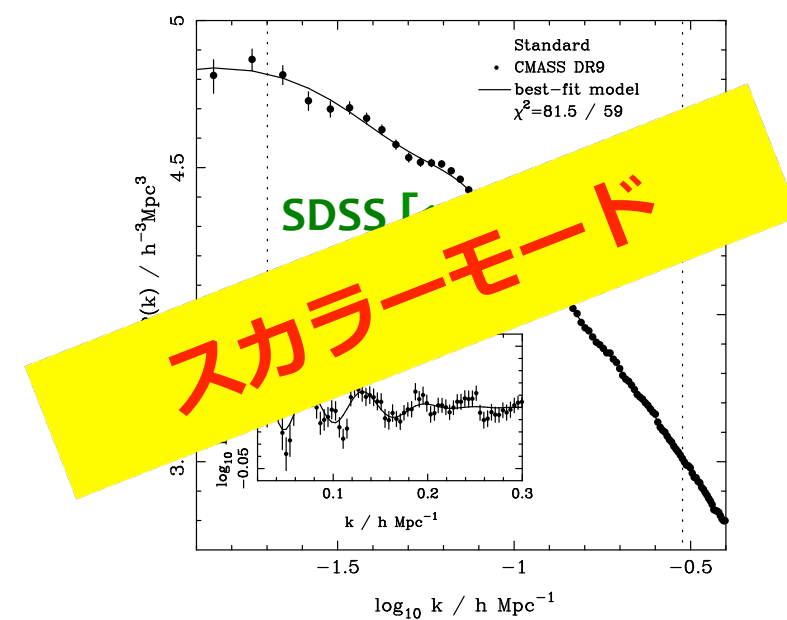
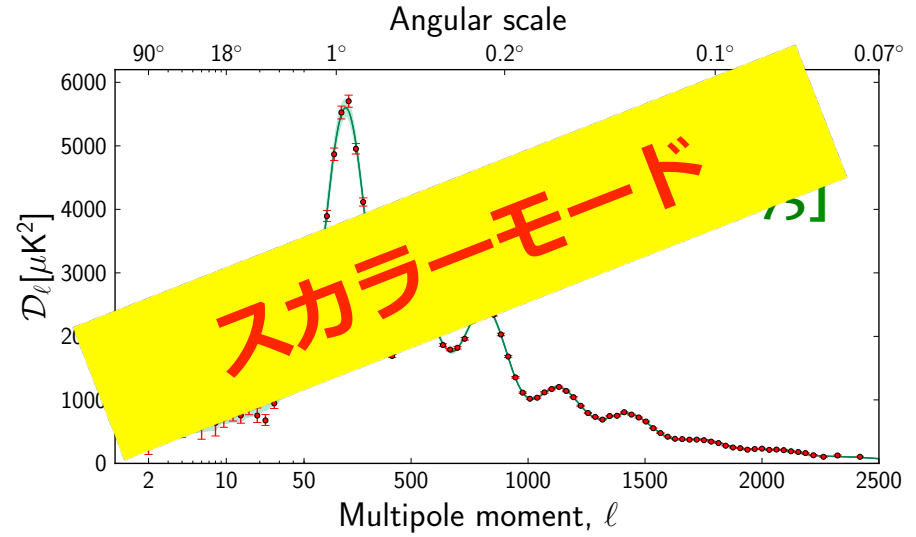
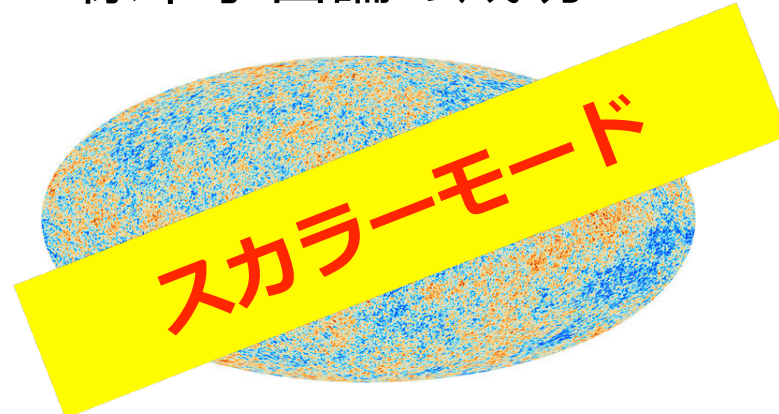
標準宇宙論の成功



1.1

スカラーモード

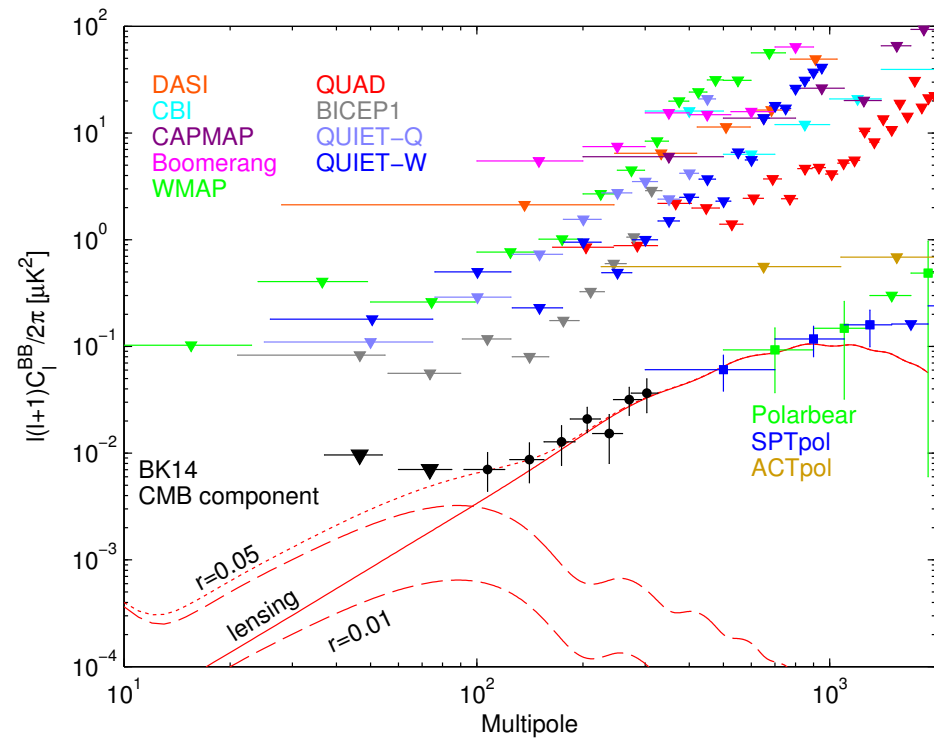
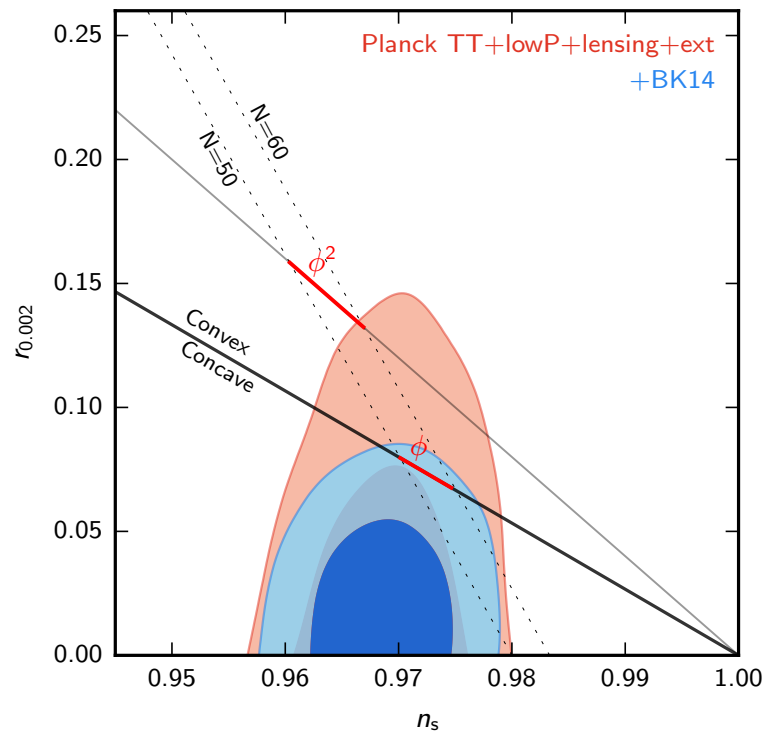
標準宇宙論の成功



1.2 テンソルモード

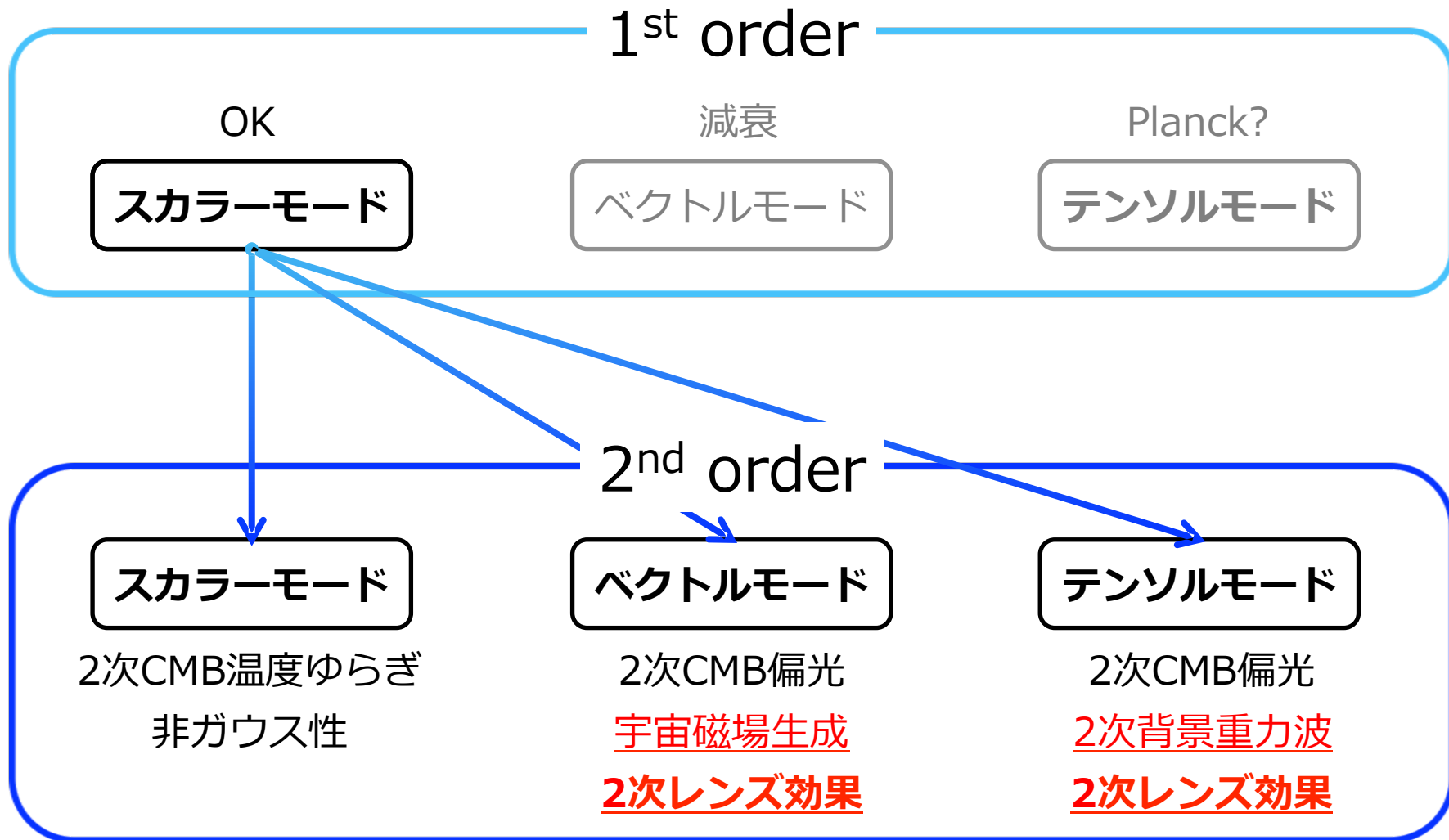
原始重力波 – インフレーションにより予言

BICEP2/Keck 2015 [1510.09217] $r < 0.07$ (95% conf.)



時代は $\delta r \sim O(10^{-3} \sim -4) \wedge ? ?$

1.3 2次摂動論概観

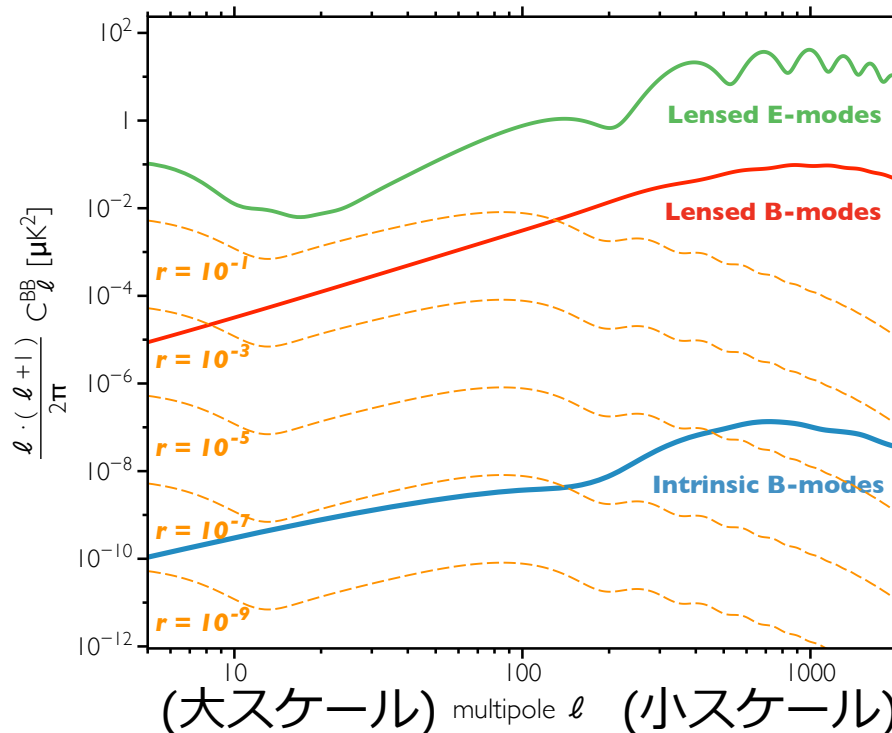


1.4 ベクトルモード

線形理論では無視(減衰モード)

$$\dot{\sigma}_V^{(1)}(\mathbf{k}) + 2 \left(\frac{\dot{a}}{a} \right) \sigma_V^{(1)}(\mathbf{k}) = 0 \quad \sigma_V^{(1)} \propto a^{-2}$$

2次摂動では非線形カップリングにより可能
(例) Intrinsic CMB B-mode polarization



$$r \sim 10^{-7} @ l \sim 100$$

$$r \sim 10^{-9} @ l \sim 2$$

C.Fidler et al. [1401.3296]

1.5 その他応用

Intrinsic CMB Bispectrum (by SONG)

$$\left\langle \delta T_{\text{CMB}}^{(2)} \delta T_{\text{CMB}}^{(1)} \delta T_{\text{CMB}}^{(1)} \right\rangle \approx \left\langle \mathcal{R}^{(1)} \mathcal{R}^{(1)} \mathcal{R}^{(1)} \mathcal{R}^{(1)} \right\rangle$$

G.W.Pettinari et al. [1302.0832]

Abstract. We develop a new, efficient code for solving the second-order Einstein-Boltzmann equations, and use it to estimate the intrinsic CMB non-Gaussianity arising from the non-linear evolution of density perturbations. The full calculation involves contributions from recombination and less tractable contributions from terms integrated along the line of sight. We investigate the bias that this intrinsic bispectrum implies for searches of primordial non-Gaussianity. We find that the inclusion or omission of certain line of sight terms can make a large impact. When including all physical effects but lensing and time-delay, we find that the local-type f_{NL} would be biased by $f_{\text{NL}}^{\text{intr}} = 0.5$, below the expected sensitivity of the Planck satellite. The speed of our code allows us to confirm the robustness of our results with respect to a number of numerical parameters.

1.6 イントロまとめ

【現状】

- 標準宇宙論スカラーモードは成功
- 標準宇宙論テンソルモードはもうすぐ？
- 2次摂動が最低次の効果が多く存在

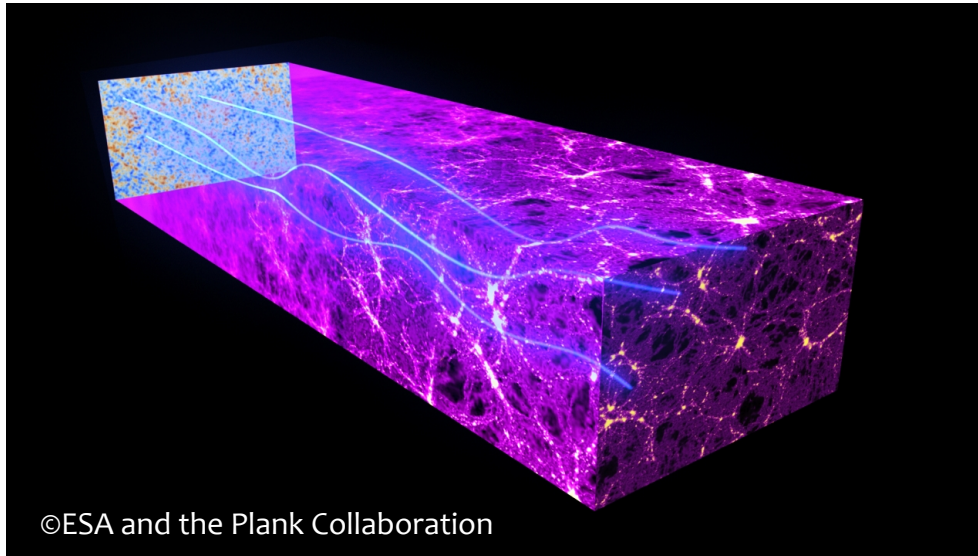
【モチベーション】

- ベクトルモードは観測されうるか？
- スカラーベクトルテンソルが全て成功して初めて宇宙論的摂動論の(真の)成功といえる
- 標準宇宙論で**唯一・必ず**存在する2次ベクトルモードは？

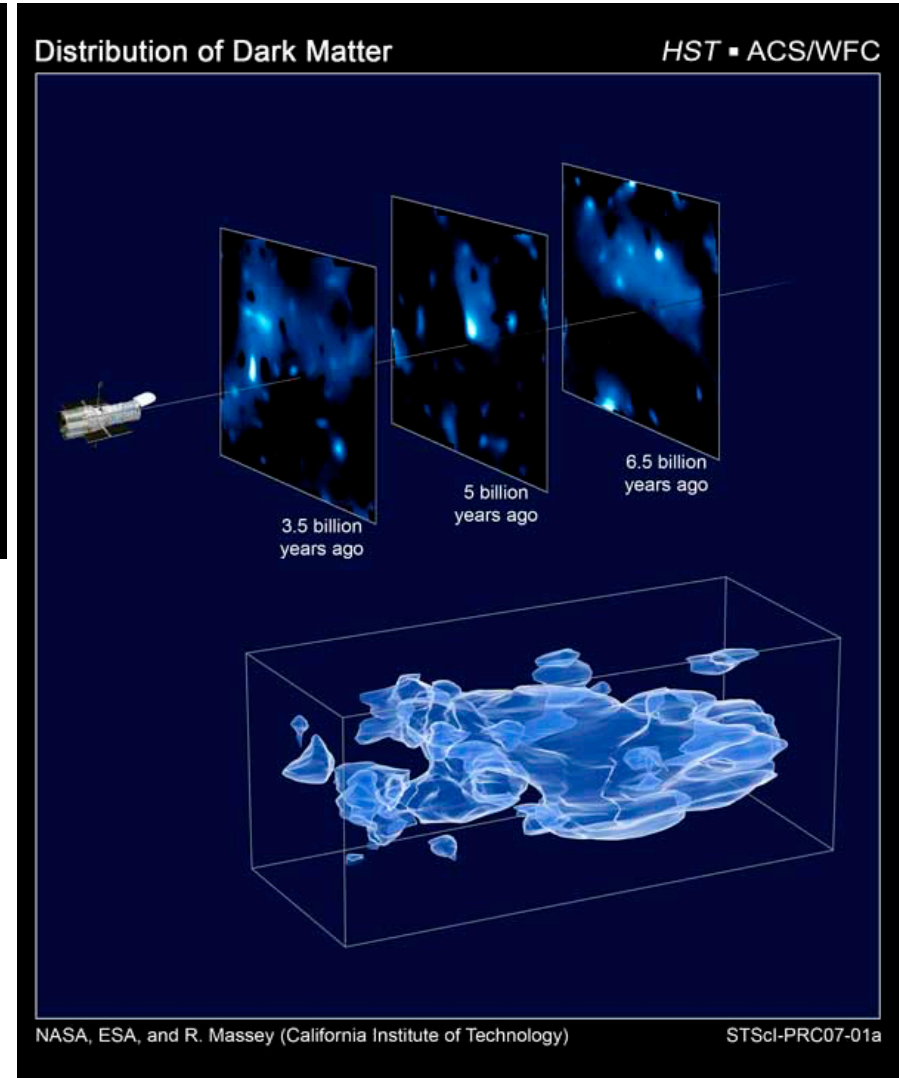
【手法と観測量】

- CMBでは難しそう($r \sim 10^{-7} \sim 10^{-9}$)
- 非線形効果なので宇宙後期の弱い重力レンズ効果に着目

2. 弱い重力レンズ効果



- CMB lensing
- Cosmic shear

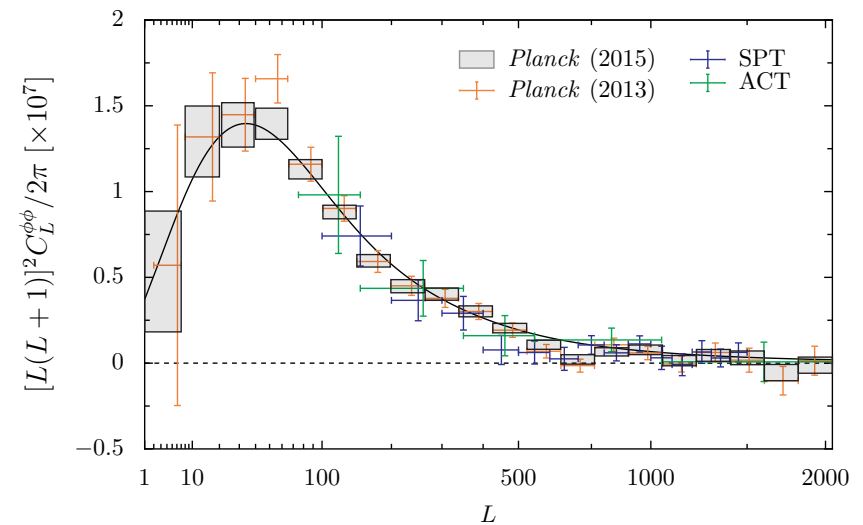
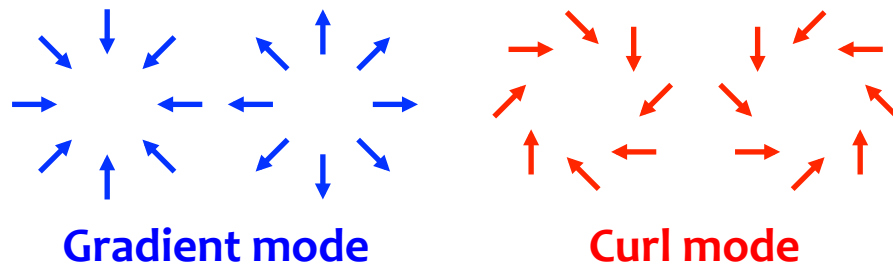


2.1 CMB lensing

- CMB光子は伝搬途中にスカラー/ベクトル/テンソルゆらぎで曲げられる
- レンズ再構築で曲がり角を再構築可能

- 天球面上に射影した曲がり角

$$\Delta_a = \phi_{:a} + \varpi_{:b} \epsilon^b_a$$

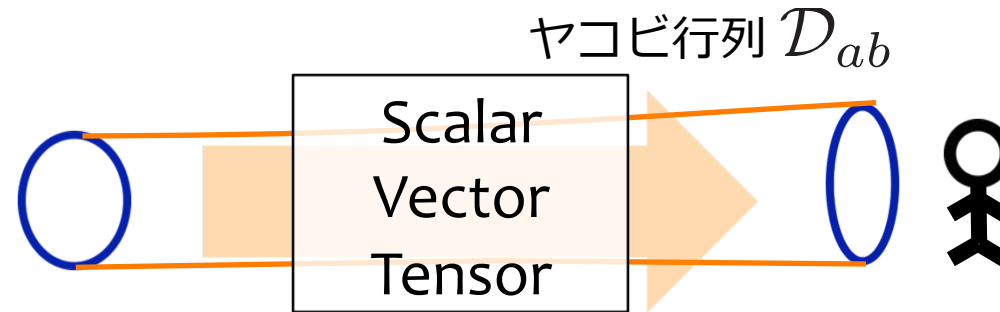


- ノイズ: CMB再構築ノイズ

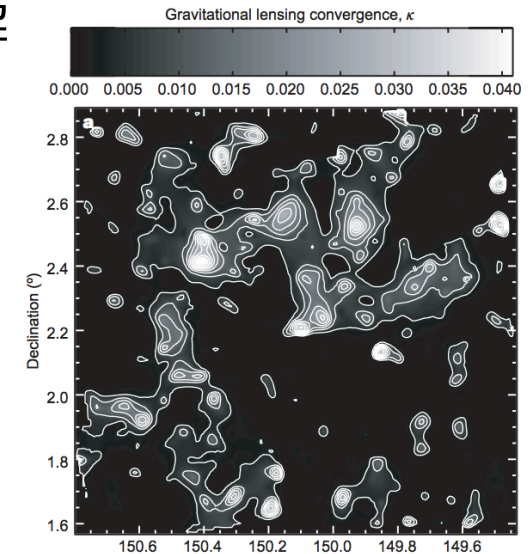
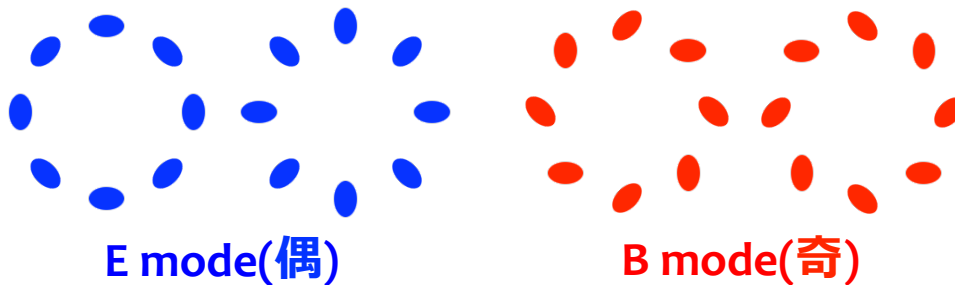
T.Namikawa et al. [1110.1718]

Planck, XV [1502.01591]

2.2 Cosmic shear



- Cosmic shearをパリティ偶モード、奇モードに分解



- ノイズ: 銀河固有の形状からくるショットノイズ

$$N_\ell \propto \frac{1}{\sqrt{2\ell+1}} \frac{\langle \epsilon_{\text{int}}^2 \rangle}{N}$$

R.Massey et al.
[Nature 455, 286-290(2007)]

2.3 観測量

CMB lensing

擬スカラーポテンシャルの角度パワースペクトル

$$\Delta_a = \phi_{:a} + \varpi_{:b} \epsilon^b_a$$

$$\varpi(\hat{n}) = \sum_{\ell,m} \varpi_{\ell,m} Y_{\ell,m}(\hat{n}) \quad C_{\ell}^{\varpi\varpi} = \frac{1}{2\ell+1} \sum_{\ell} \langle \varpi_{\ell,m} \varpi_{\ell,m}^* \rangle$$

Cosmic shear

ヤコビ行列のパリティ奇成分(Bモード)

$${}_0\mathcal{D} = \mathcal{D}_{ab} e_{(+)}^a e_{(-)}^a, \quad {}_{\pm 2}\mathcal{D} = \mathcal{D}_{ab} e_{(\pm)}^a e_{(\pm)}^a$$

$$g = -\frac{{}_{+2}\mathcal{D}}{{}_0\mathcal{D}} \quad g(\hat{n}) = \sum_{\ell,m} (E_{\ell,m} + iB_{\ell,m}) {}_{+2}Y_{\ell,m}(\hat{n})$$

$$C_{\ell}^{BB} = \frac{1}{2\ell+1} \sum_{\ell} \langle B_{\ell,m} B_{\ell,m}^* \rangle$$

3. 結果

ポアソンゲージ

$$ds^2 = a^2 \left[-(1 + 2\Psi)d\eta^2 + 2\sigma_i d\eta dx^i + (\delta_{ij} - 2\Phi\delta_{ij} + h_{ij}) dx^i dx^j \right]$$

$$\sigma^i{}_{,i} = h^{ij}{}_{,j} = h^i{}_i = 0$$

2次アインシュタイン方程式(+2次ボルツマン方程式)

$$\dot{\sigma}_\lambda^{(2)}(\mathbf{k}) + 2\mathcal{H}\sigma_\lambda^{(2)}(\mathbf{k}) = \mathcal{S}_\lambda^{(2)}(\mathbf{k})$$

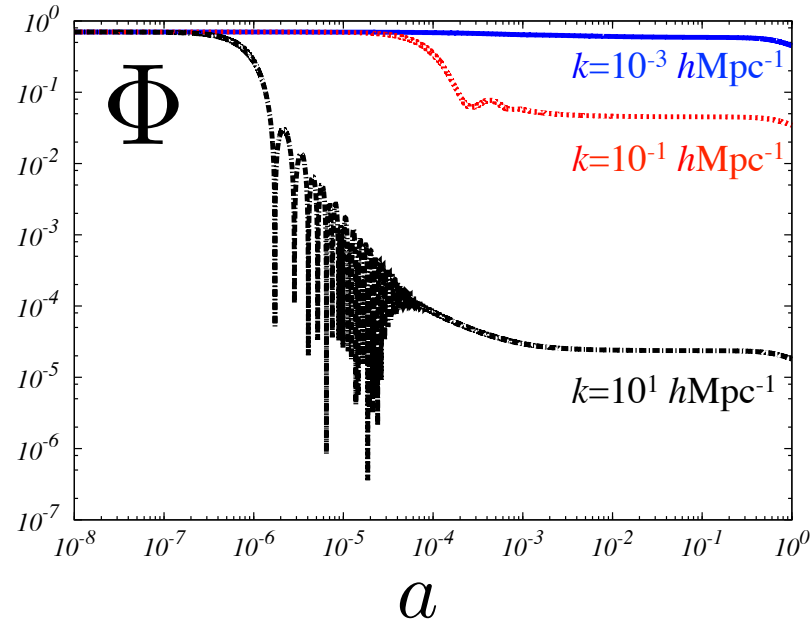


$$\begin{aligned} \mathcal{S}_\lambda^{(2)}(\mathbf{k}) = & \int \frac{d^3k_1}{(2\pi)^3} 4k_1 \left[\Phi^{(1)}(\mathbf{k}_1)\Psi^{(1)}(\mathbf{k}_2) \right] \sqrt{\frac{4\pi}{3}} Y_{1,\lambda}^*(\hat{\mathbf{k}}_1) \\ & - \int \frac{d^3k_1}{(2\pi)^3} \frac{4}{\sqrt{3}} \frac{k_1^2}{k} \left[\Phi^{(1)}(\mathbf{k}_1)\Phi^{(1)}(\mathbf{k}_2) + \Psi^{(1)}(\mathbf{k}_1)\Psi^{(1)}(\mathbf{k}_2) \right] \sqrt{\frac{4\pi}{5}} Y_{2,\lambda}^*(\hat{\mathbf{k}}_1) \\ & + \sum_{m=b, dm} 8\pi G a^2 \rho_m^{(0)} \int \frac{d^3k_1}{(2\pi)^3} \left[\frac{4}{k} v_{m0}^{(1)}(\mathbf{k}_1)v_{m0}^{(1)}(\mathbf{k}_2) \right] \sqrt{\frac{4\pi}{3}} Y_{1,0}^*(\hat{\mathbf{k}}_1) \sqrt{\frac{4\pi}{3}} Y_{1,\lambda}^*(\hat{\mathbf{k}}_2) \end{aligned}$$

$$\sigma_\lambda^{(2)} \sim \Phi^{(1)} \times \Phi^{(1)} \longrightarrow C_\ell^{\varpi\varpi} C_\ell^{BB} \propto \left\langle \sigma_\lambda^{(2)} \sigma_\lambda^{(2)} \right\rangle$$

3.1 線形スカラーポテンシャル再考

➤ スカラーポテンシャルの振る舞い



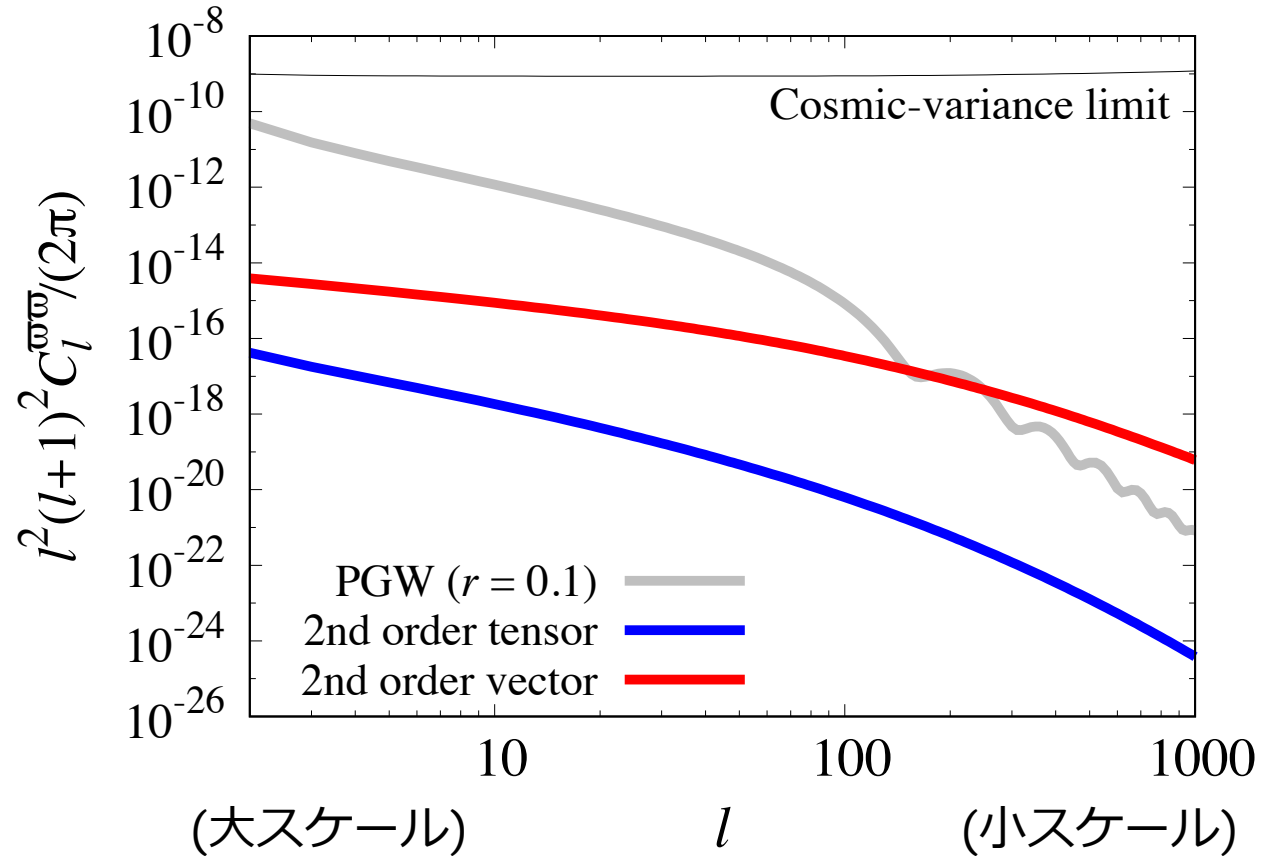
	輻射優勢	物質優勢
Subhorizon	減衰	一定
Superhorizon	一定	一定

- 物質優勢では, convolution とかは無関係に決まる
- 輻射優勢では, スケールによって振舞いが違うのできちんと取り扱う必要あり

$$\Phi^{(1)} \propto \frac{1}{1 + (k\eta)^2} \quad (\eta < \eta_{\text{eq}})$$

D.Baumann et al. [hep-th/0703290]

3.2 結果: CMB lensing curl-mode

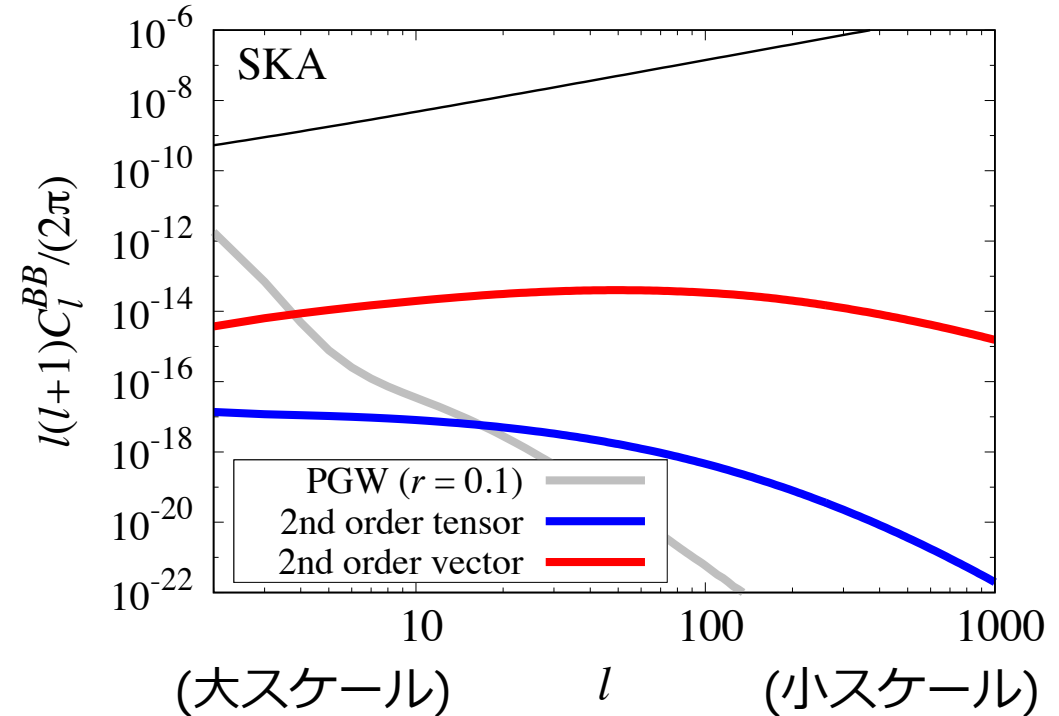


- 大スケールで原始重力波, 小スケールで2次ベクトルモード優勢
- 2次重力波は, 常にsubdominantとなる

3.3 結果: Cosmic shear B-mode (SKA case)

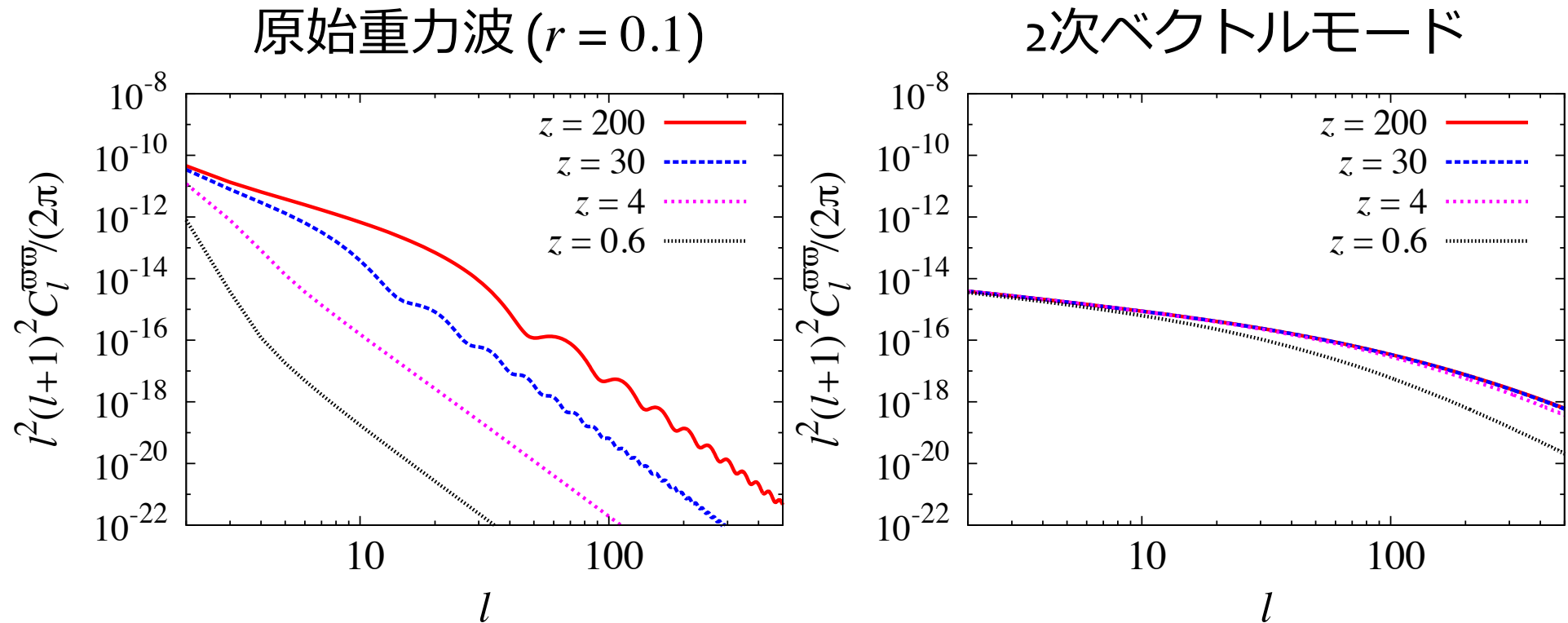
Survey designs:

	f_{sky}	z_m	$N_g[\text{arcmin}^{-2}]$
DES	0.125	0.5	12
HSC	0.05	1.0	35
SKA	0.75	1.6	10
LSST	0.5	1.5	100



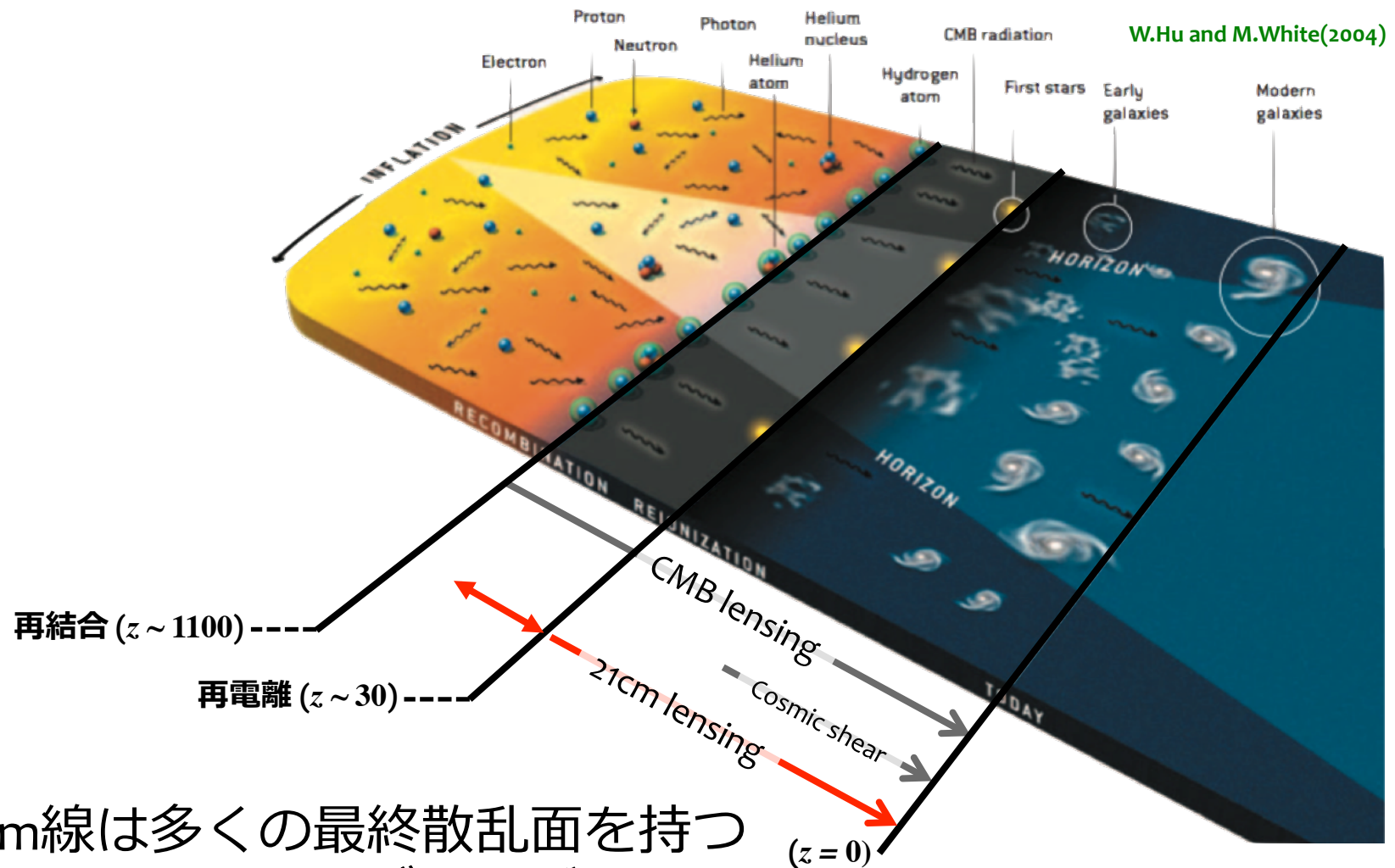
- ほぼ全てのスケールで2次ベクトルモードが支配的
- 線形/2次テンソルモードは効かない

3.4 光源の位置



- 原始重力波はホライズンに入ると減衰するのみ
- 2次モードはスカラーゆらぎによって駆動する

3.5 21cm lensing from the dark ages



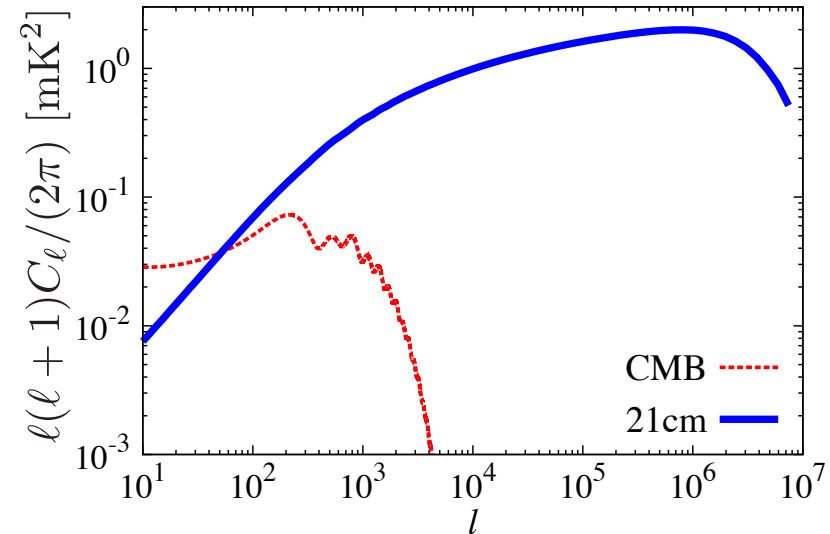
- 21cm線は多くの最終散乱面を持つ
- 小スケールまでシグナルが大きい

3.6 21cm角度パワースペクトル

CMBの場合:

シルク減衰 $l \lesssim 10^4$
 単一の最終散乱面

$$C_l^{(\text{CMB})}(z_{\text{CMB}})$$



21cm線の場合:

小スケールにわたるシグナル $l \approx 10^5 \sim 10^6$
 複数の赤方偏移スライス

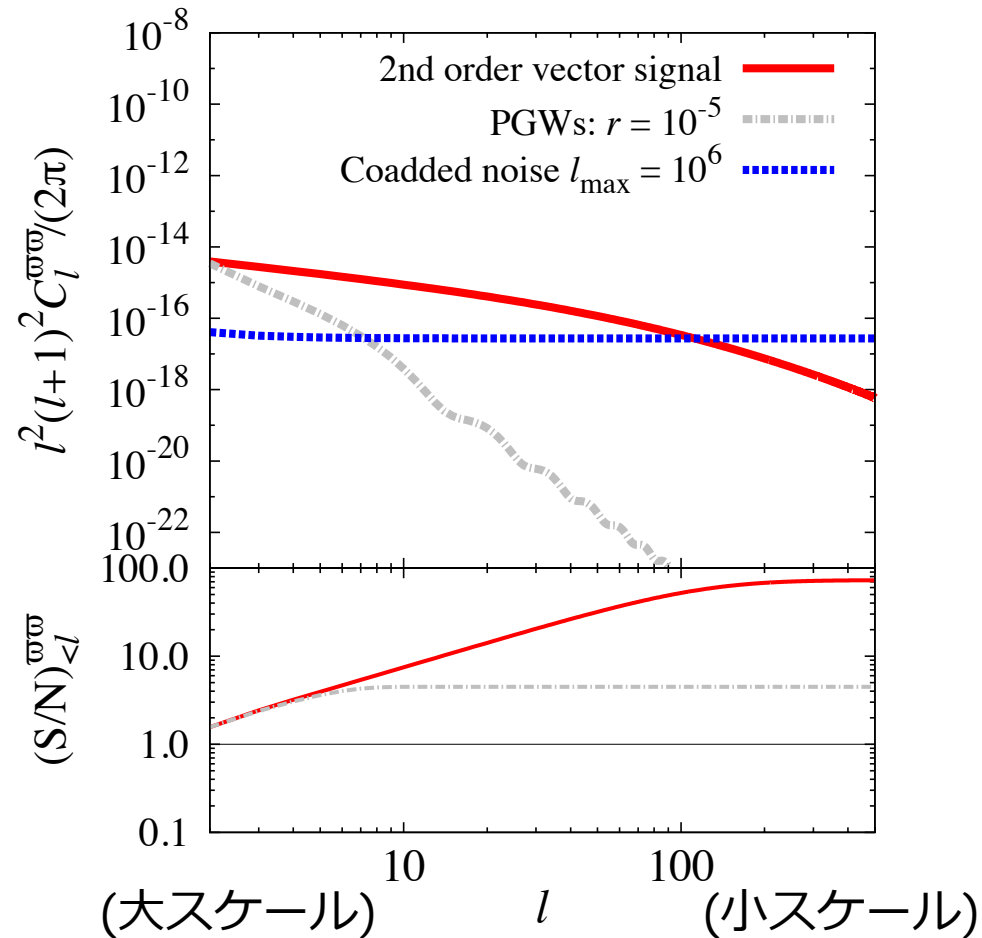
$$30 \lesssim 1 + z \lesssim 300 \quad C_l^{(21\text{cm})}(z_1), C_l^{(21\text{cm})}(z_2), \dots$$

原理的にはノイズの劇的な改善が可能
 小さなテンソルスカラー比も検出可能

$$r \approx 10^{-9}$$

L.Book et al. [1112.0567]

3.7 21cm Ideal experiment



2次ベクトルモードは原理的には観測可能であるが、
すなわちそれは原始重力波検出の邪魔をすることに等しい

4. まとめ

- **CMB lensing / cosmic shear** → 観測は困難
- **21cm lensing** は非常に魅力的
 - しかし現実的には大変
 - 光源があって理論計算できればもっと近い赤方偏移でもOK
- $r \sim 10^{-5}$ が達成可能な宇宙論的観測は、2次ベクトルモードが無視できない
 - スケール($l \sim 100$)によっては **$r \sim 0.1$ ですら効く**
 - IntrinsicなCMB B mode偏光より寄与がある

ある観測で $r \sim O(10^{-2} \sim -5)$ が見れる！ と思った際は2次ベクトル振動も考えましょう

Future works

- ベクトルモードが影響を与える他の宇宙論的観測量, 相互相関
- 大規模構造の文脈でのベクトルモード(vorticity: ソースが必要)