

素粒子物理学の進展2013
2013/08/06 @ 基研

CMB観測を用いた観測的宇宙論の現状
PLANCKの結果を中心に

市来淨與 (名古屋大学 KMI)



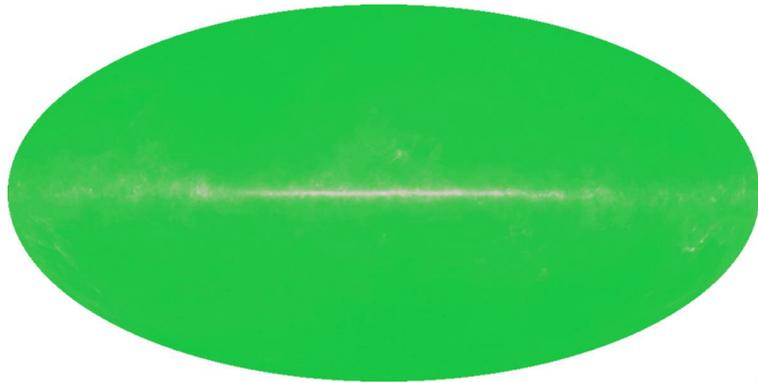
内容

- 宇宙背景輻射温度揺らぎ (CMB) と PLANCK 衛星
 - 宇宙論パラメタの測定
 - CMB レンズ効果とその応用
 - CMB レンズと CMB 相互相関とダークエネルギー
 - CMB レンズと赤外線背景輻射
 - PLANCK による銀河団宇宙論
- CMB 観測の今後とまとめ

内容

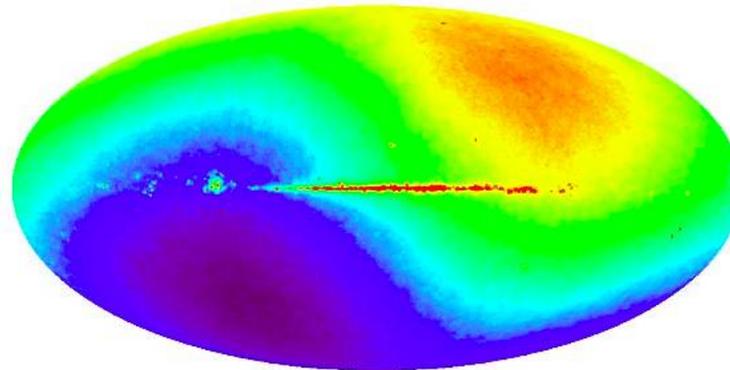
- 宇宙背景輻射温度揺らぎ (CMB) と PLANCK 衛星
 - 宇宙論パラメタの測定
 - CMB レンズ効果とその応用
 - CMB レンズと CMB 相互相関とダークエネルギー
 - CMB レンズと赤外線背景輻射
 - PLANCK による銀河団宇宙論
- CMB 観測の今後とまとめ

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)



Penzias and Wilson (1965)

~ 3K (ビッグバンの残光 黒体輻射)



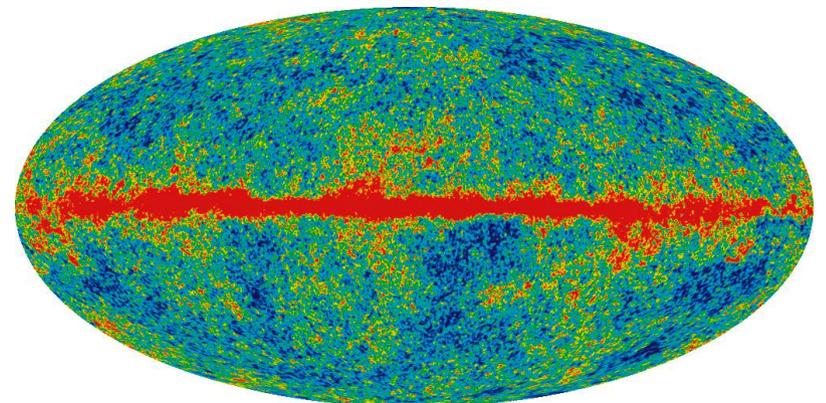
MAP990100

-4 mK +4 mK

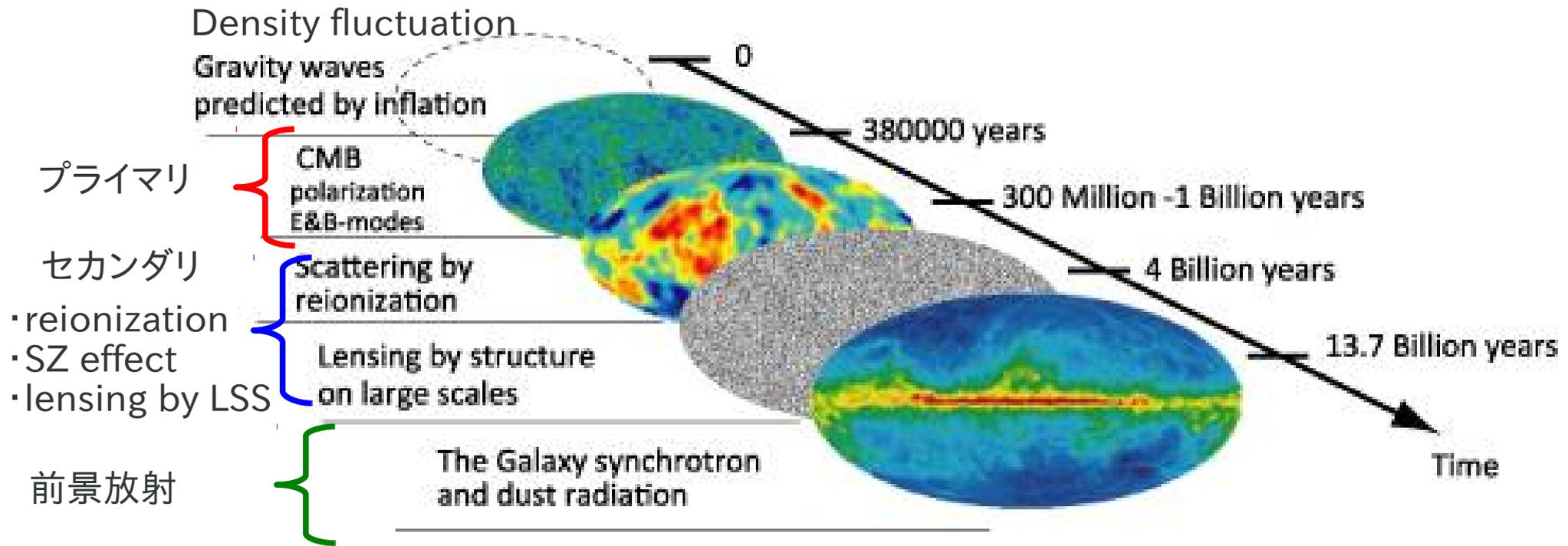
~ 3mK

(我々のCMBに対する
固有運動 620km/s)

(宇宙論的初期密度揺らぎ+その他) ~ 30 μ K



実際に見ているもの



(CMB sky) = (初期宇宙に作られた揺らぎ)+(様々なsecondary)+(前景放射)

PLANCK衛星



- CMB観測衛星 – 第3世代
 - WMAPから2-3倍の分解能up!
- cosmic variance limitedな温度揺らぎの観測
- 全天で偏光も観測
- 幅広い周波数幅をカバー (30-857 GHz)
 - WMAP(23-94 GHz)
- 2009年5月14日打ち上げ
- 2013年3月 宇宙論の結果とデータリリース
 - ただし偏光は来年(6月?)

PLANCK検出器

- LFI(HEMT) & HFI(Bolometer)

Table 3. *Planck* performance parameters determined from flight data.

ArXiv:1101.2022

	CHANNEL	$N_{\text{detectors}}^a$	ν_{center}^b [GHz]	MEAN BEAM ^c		WHITE-NOISE ^d SENSITIVITY		CALIBRATION ^e UNCERTAINTY [%]	FAINTEST SOURCE ^f IN ERCSC $ b > 30^\circ$ [mJy]
				FWHM	Ellipticity	$[\mu\text{K}_{\text{RJ}} \text{s}^{1/2}]$	$[\mu\text{K}_{\text{CMB}} \text{s}^{1/2}]$		
LFI	30 GHz	4	28.5	32.65	1.38	143.4	146.8	1	480
	44 GHz	6	44.1	27.92	1.26	164.7	173.1	1	585
	70 GHz	12	70.3	13.01	1.27	134.7	152.6	1	481
HFI	100 GHz	8	100	9.37	1.18	17.3	22.6	2	344
	143 GHz	11	143	7.04	1.03	8.6	14.5	2	206
	217 GHz	12	217	4.68	1.14	6.8	20.6	2	183
	353 GHz	12	353	4.43	1.09	5.5	77.3	2	198
CMB study	545 GHz	3	545	3.80	1.25	4.9	...	7	381
	857 GHz	3	857	3.67	1.03	2.1	...	7	655

- HFI ... good sensitivity, good resolution

順調にデータ取得。今年1月で30ヶ月の運用終了。

標準宇宙模型 (6パラメタモデル)

- 宇宙の幾何学

- h ハッブルパラメタ,

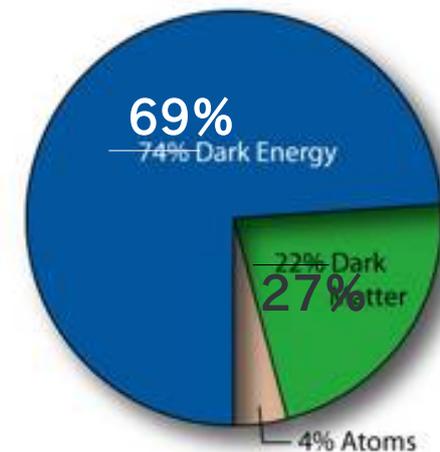
- 初期条件

- 物質密度... $\Omega_b h^2$ バリオン密度, $\Omega_c h^2$ ダークマター密度

- 密度揺らぎ... $P_{\mathcal{R}} = A_s (k/k_0)^{n_s - 1}$ A_s 揺らぎの振幅, n_s 巾指数

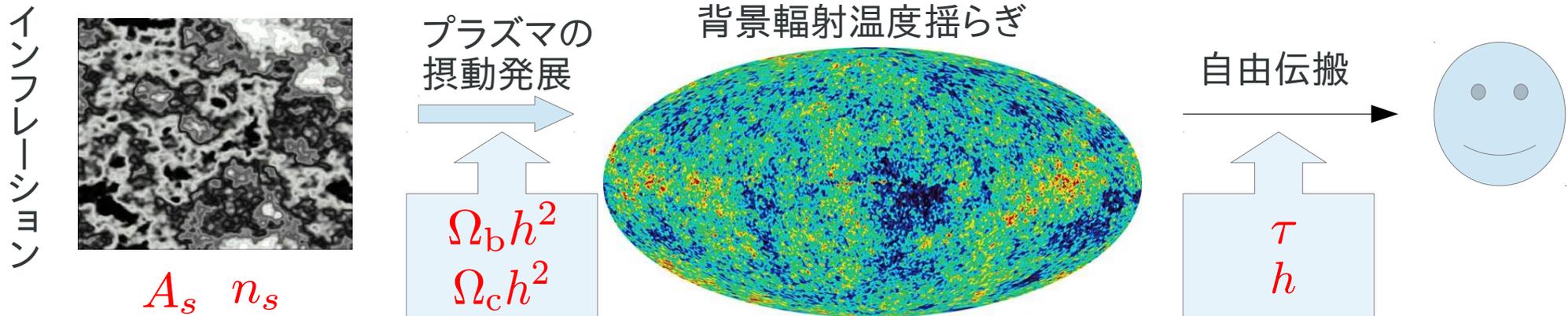
- 宇宙物理

- τ 再イオン化時の光学的厚み

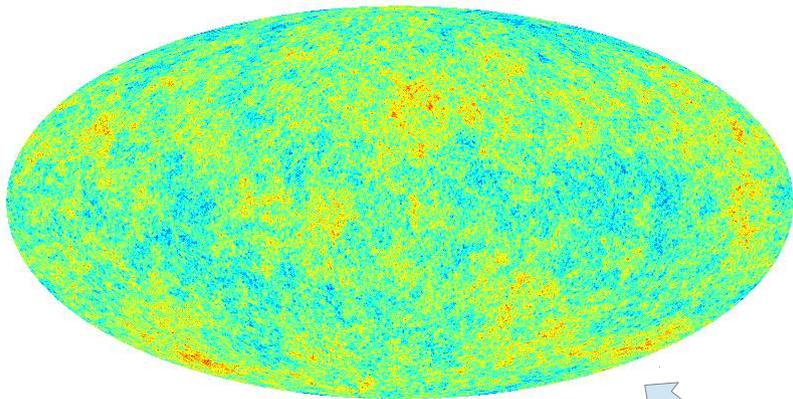


標準宇宙模型 (6パラメタモデル)

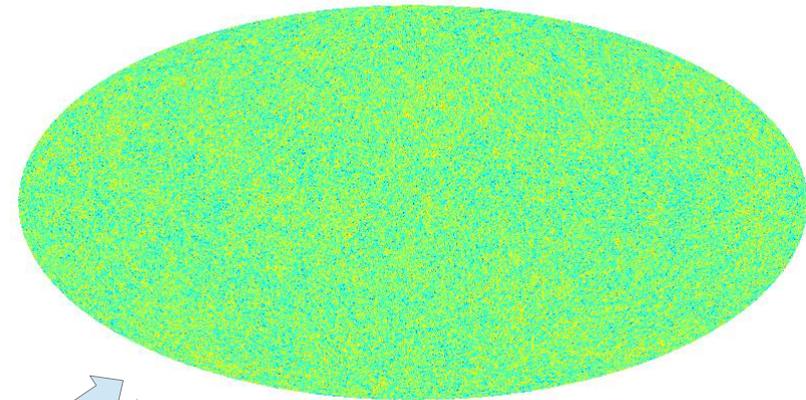
- 宇宙の幾何学
 - h ハッブルパラメタ,
- 初期条件
 - 物質密度… $\Omega_b h^2$ バリオン密度, $\Omega_c h^2$ ダークマター密度
 - 密度揺らぎ… $P_{\mathcal{R}} = A_s (k/k_0)^{n_s - 1}$ A_s 揺らぎの振幅, n_s 巾指数
- 宇宙物理
 - τ 再イオン化時の光学的厚み



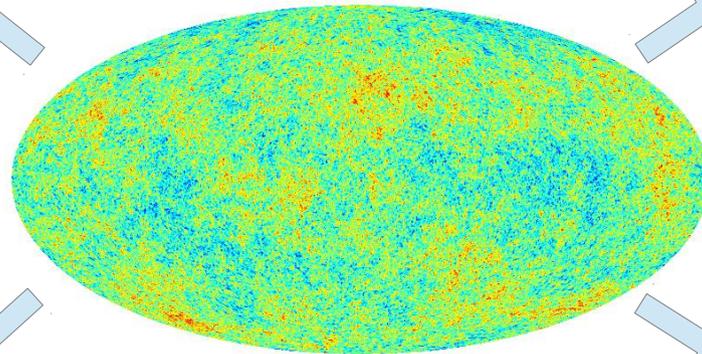
パラメタ依存性 (実空間)



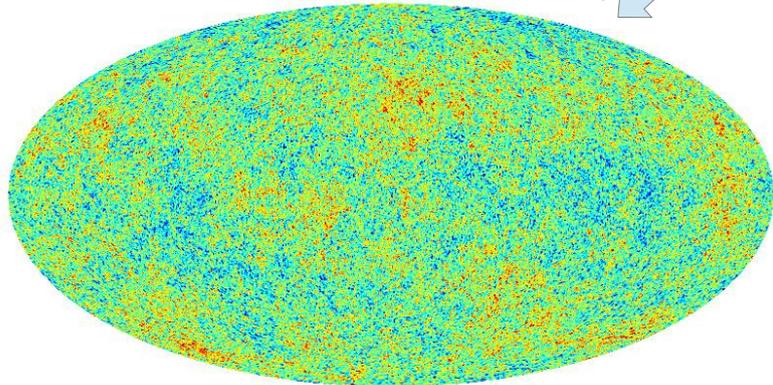
CDM 多め



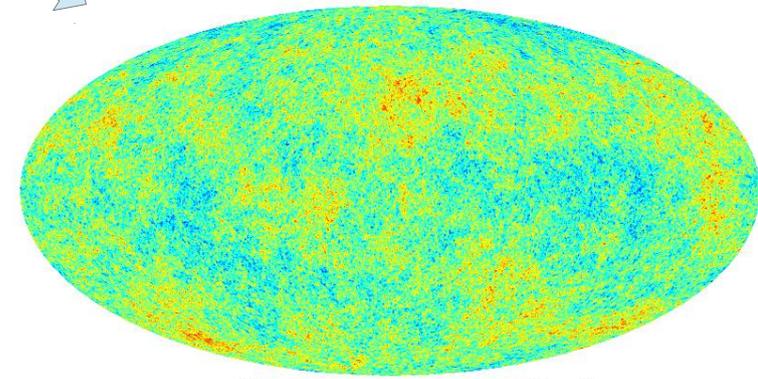
n_s 大きめ



Λ CDMモデル

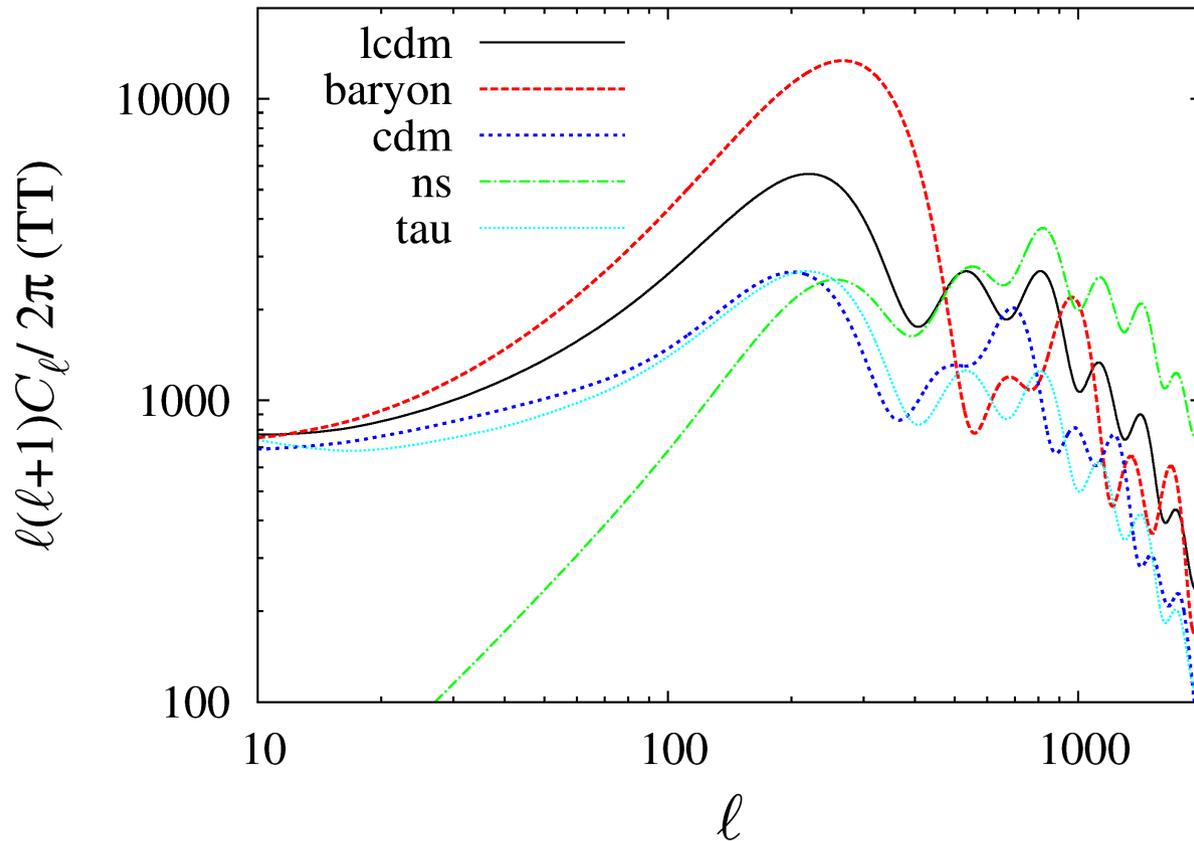


バリオン 多め



τ (光学的厚さ) 大きめ

宇宙論パラメタ依存性



初期宇宙プラズマ(光子+電子)
の音波振動を離れた我々が
どう見るか、という問題

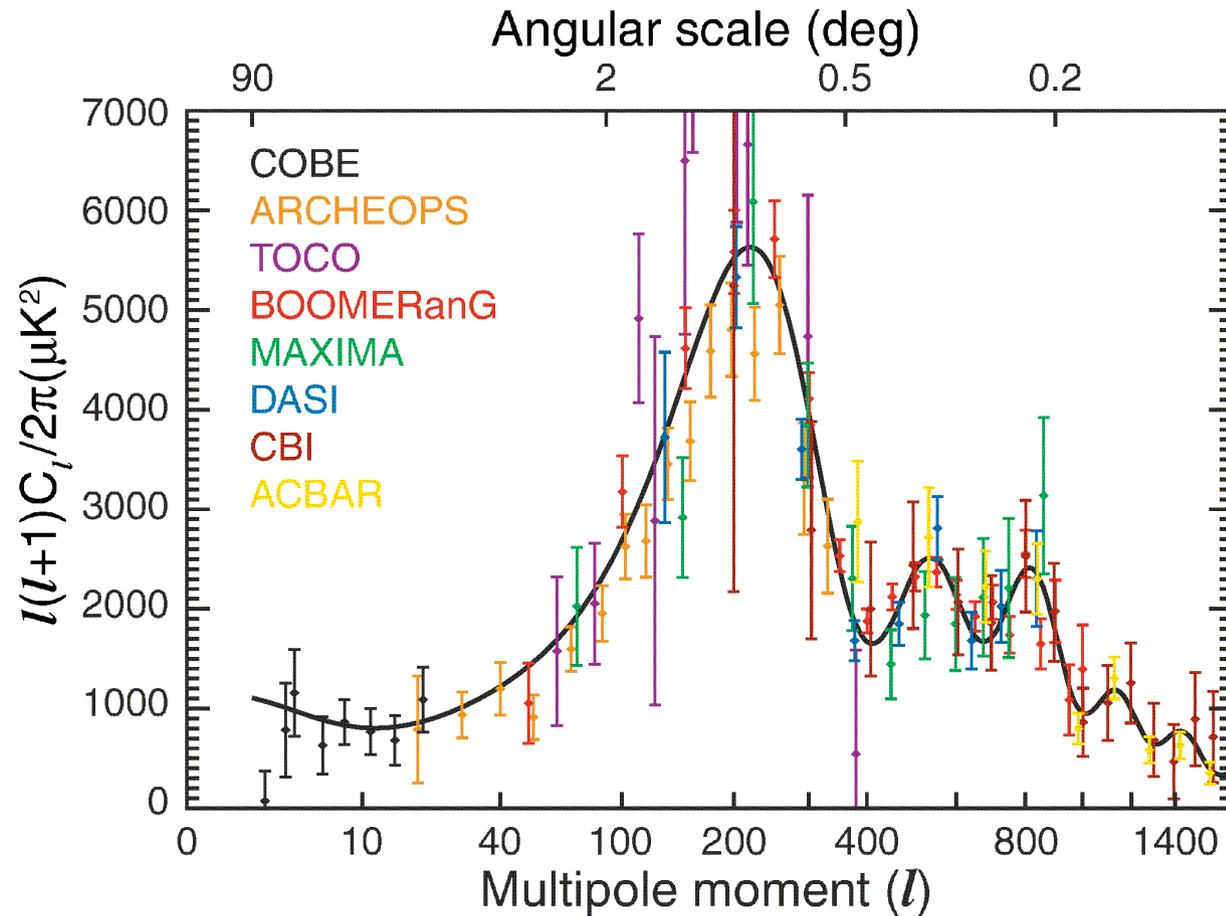
Peakの位置が最も測定しやすい
観測量 (0.1% precision)

$$\theta_{\text{acoustic}} = 0.596724^\circ \pm 0.00038^\circ$$

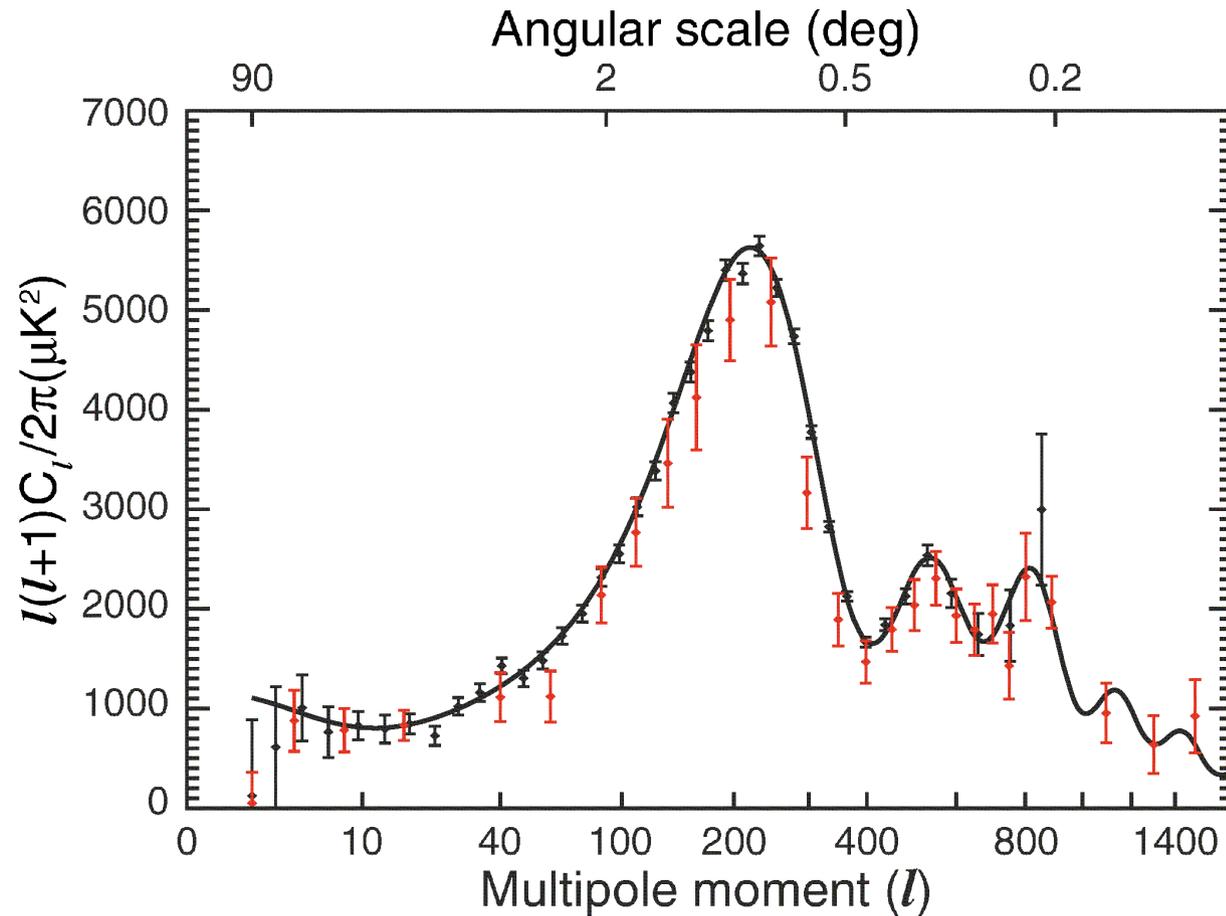
$$\theta_{\text{acoustic}} \propto \Omega_m h^3$$

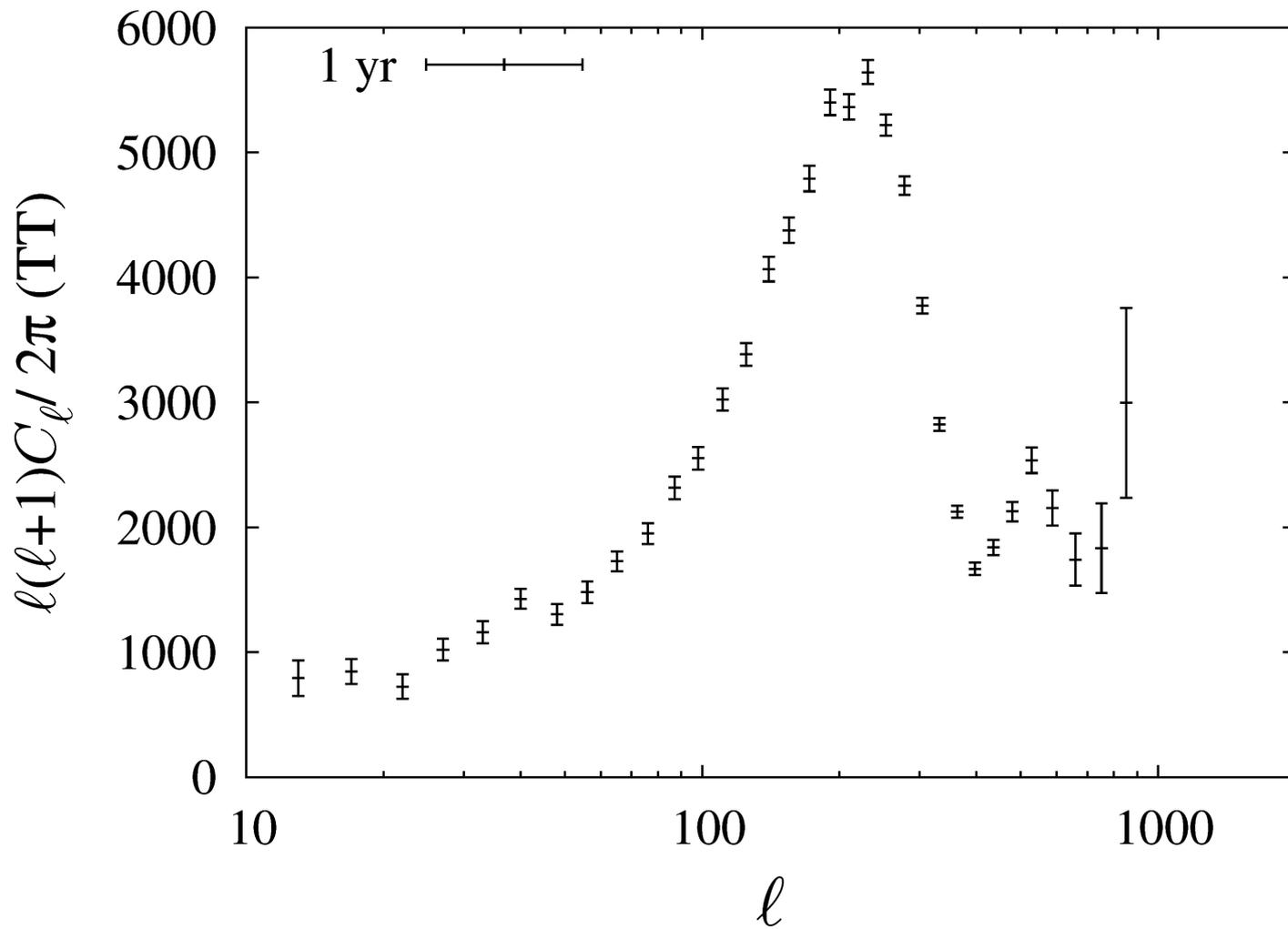
(おおよそ; Percival et al., 2002)

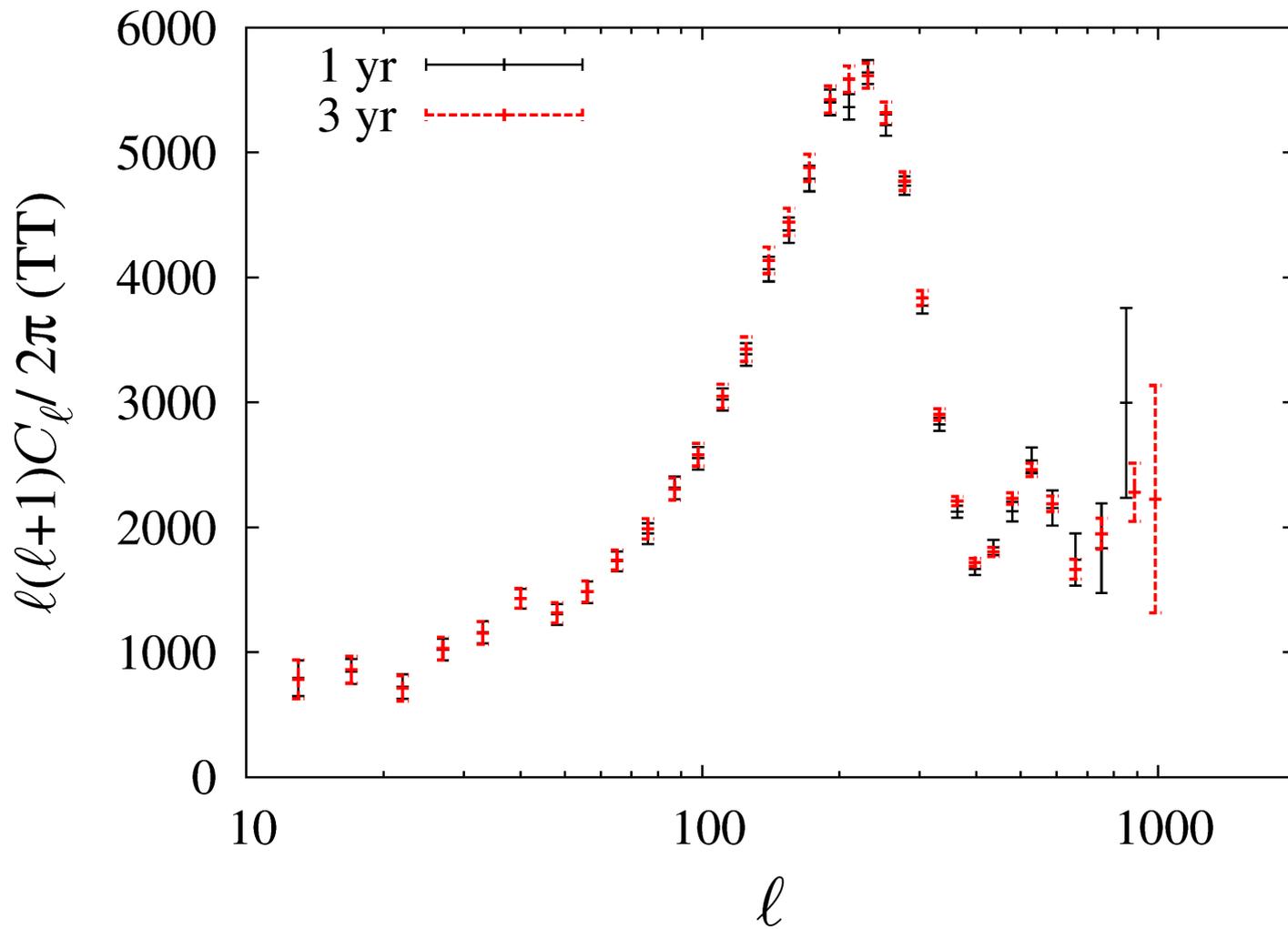
1996-2003

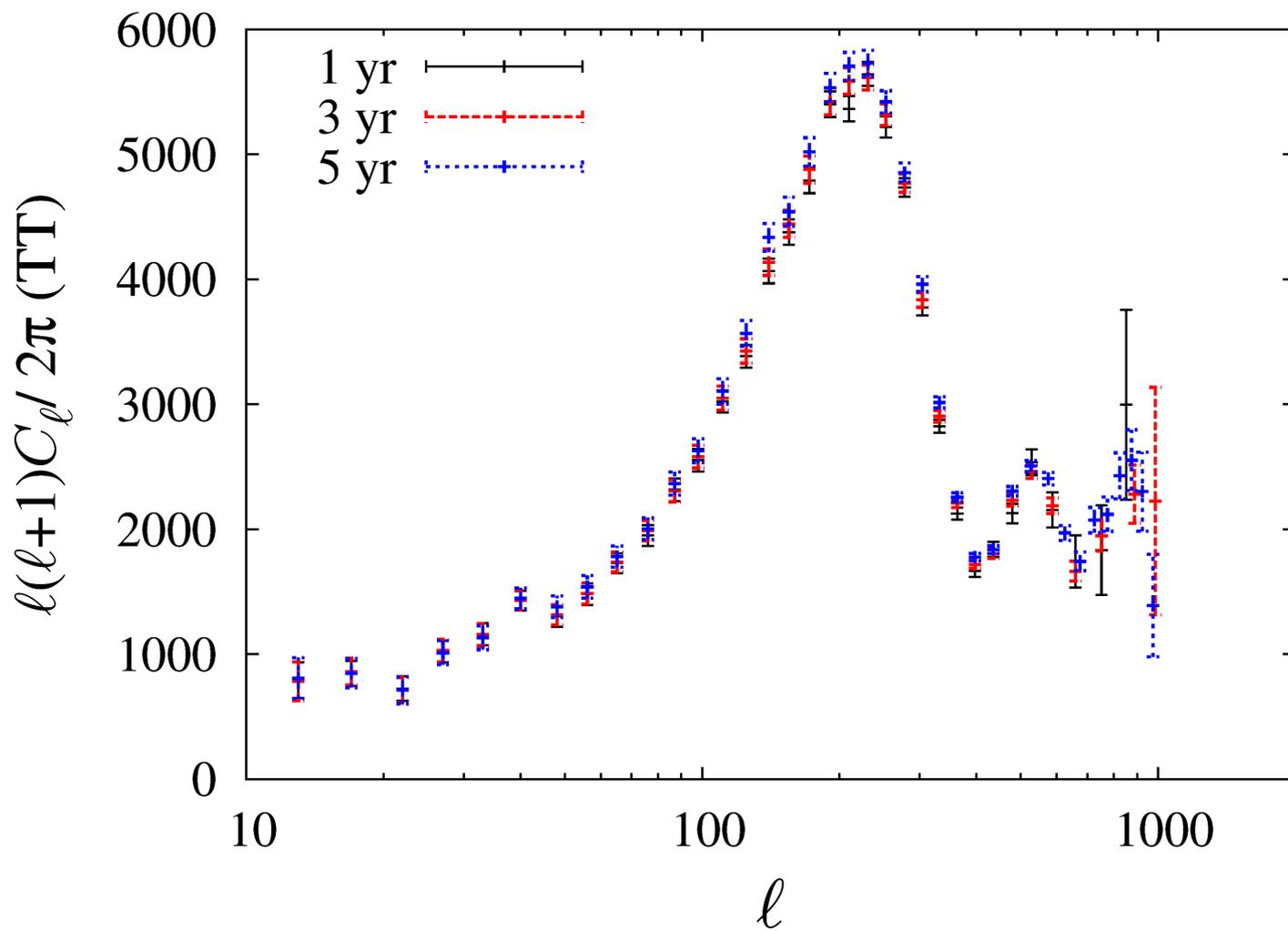


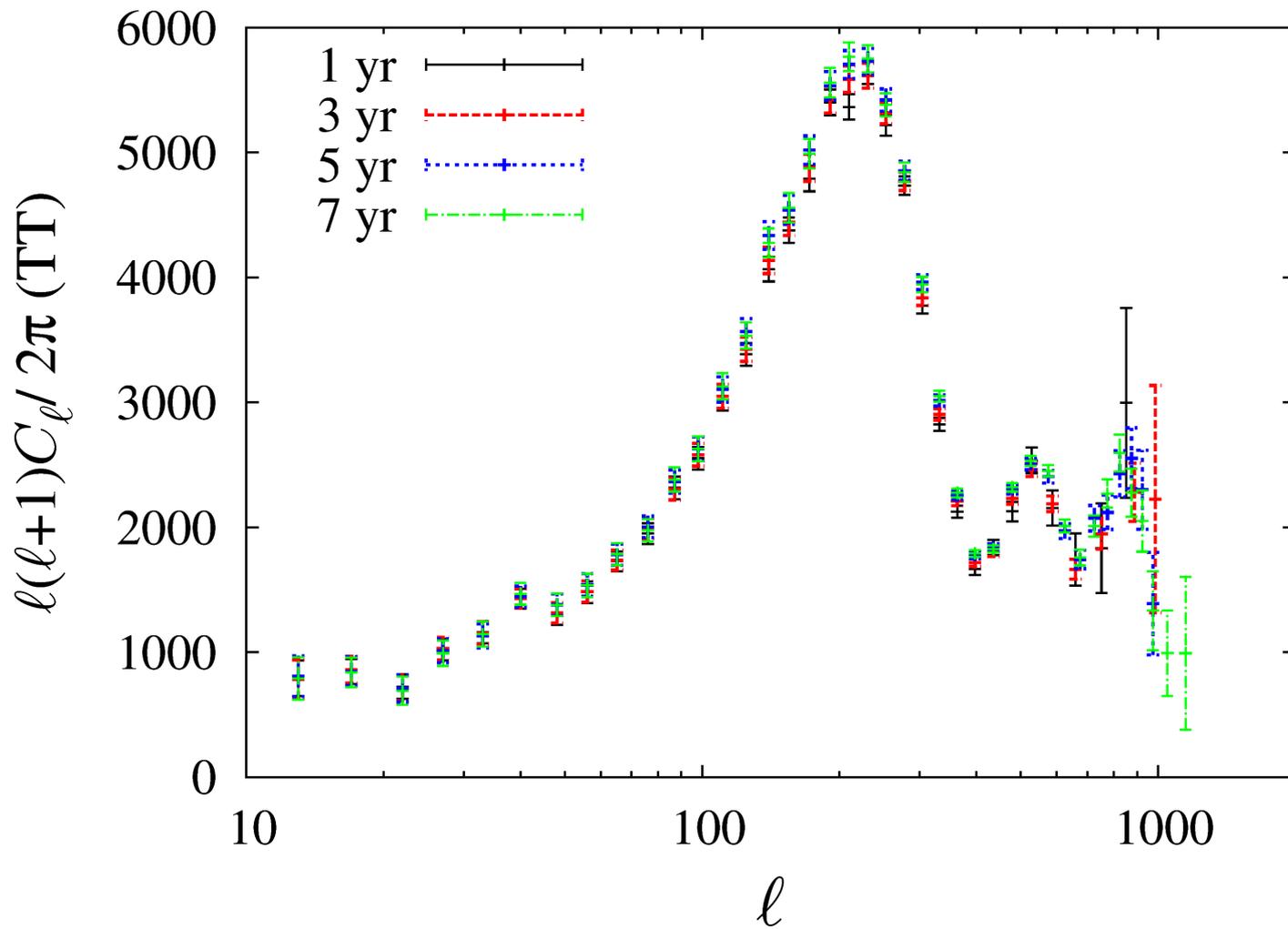
2003 (WMAP1)

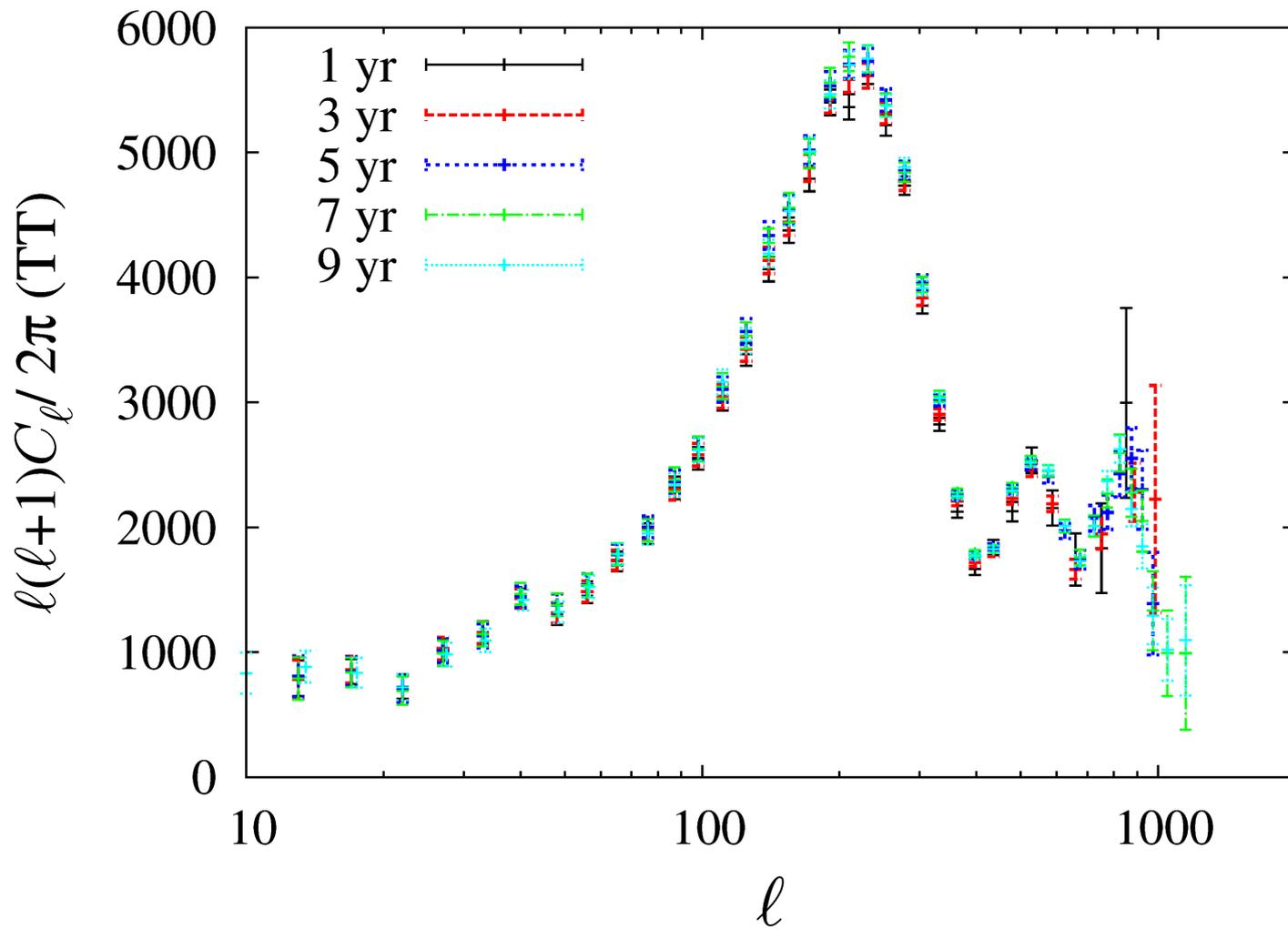


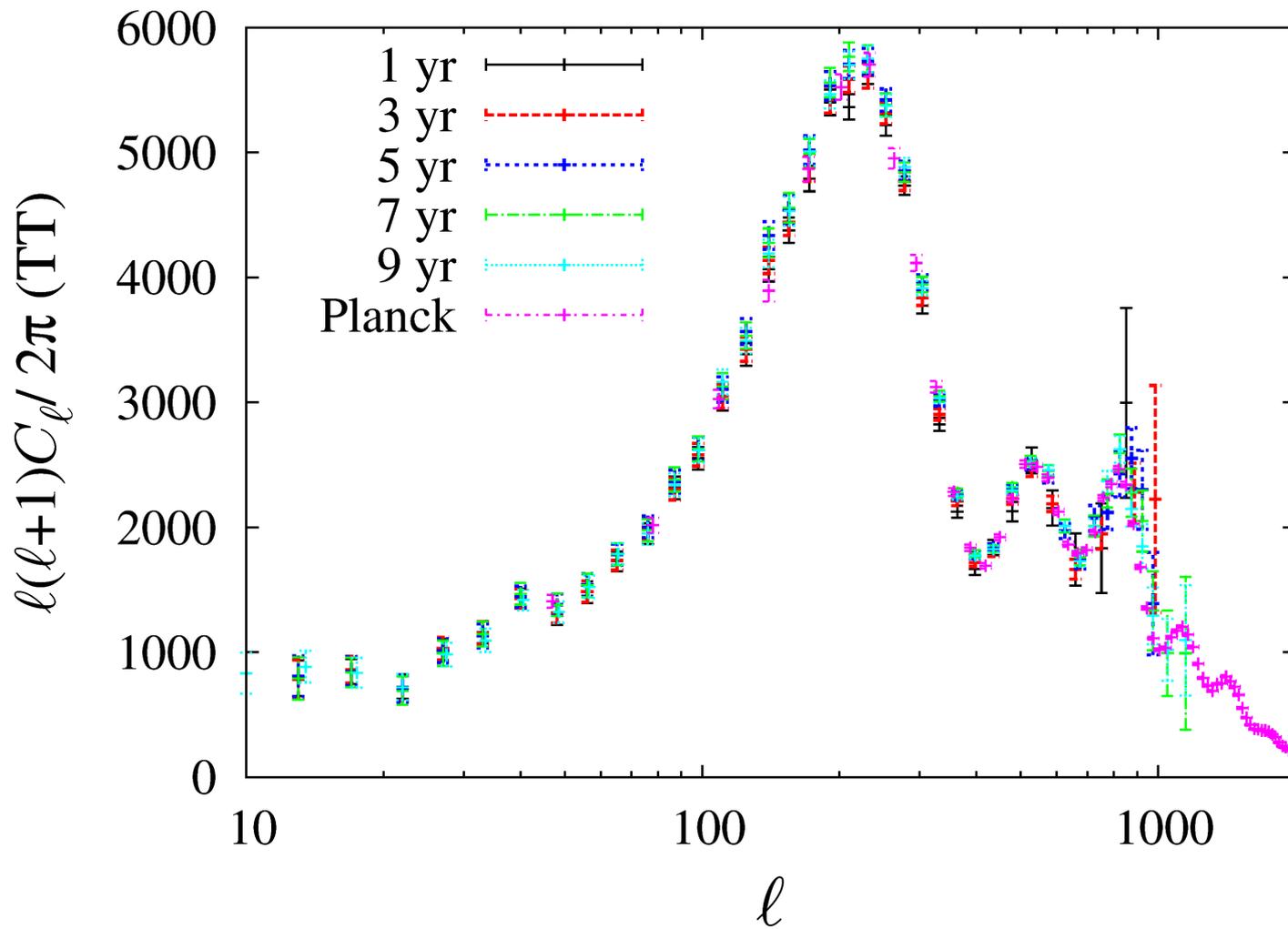




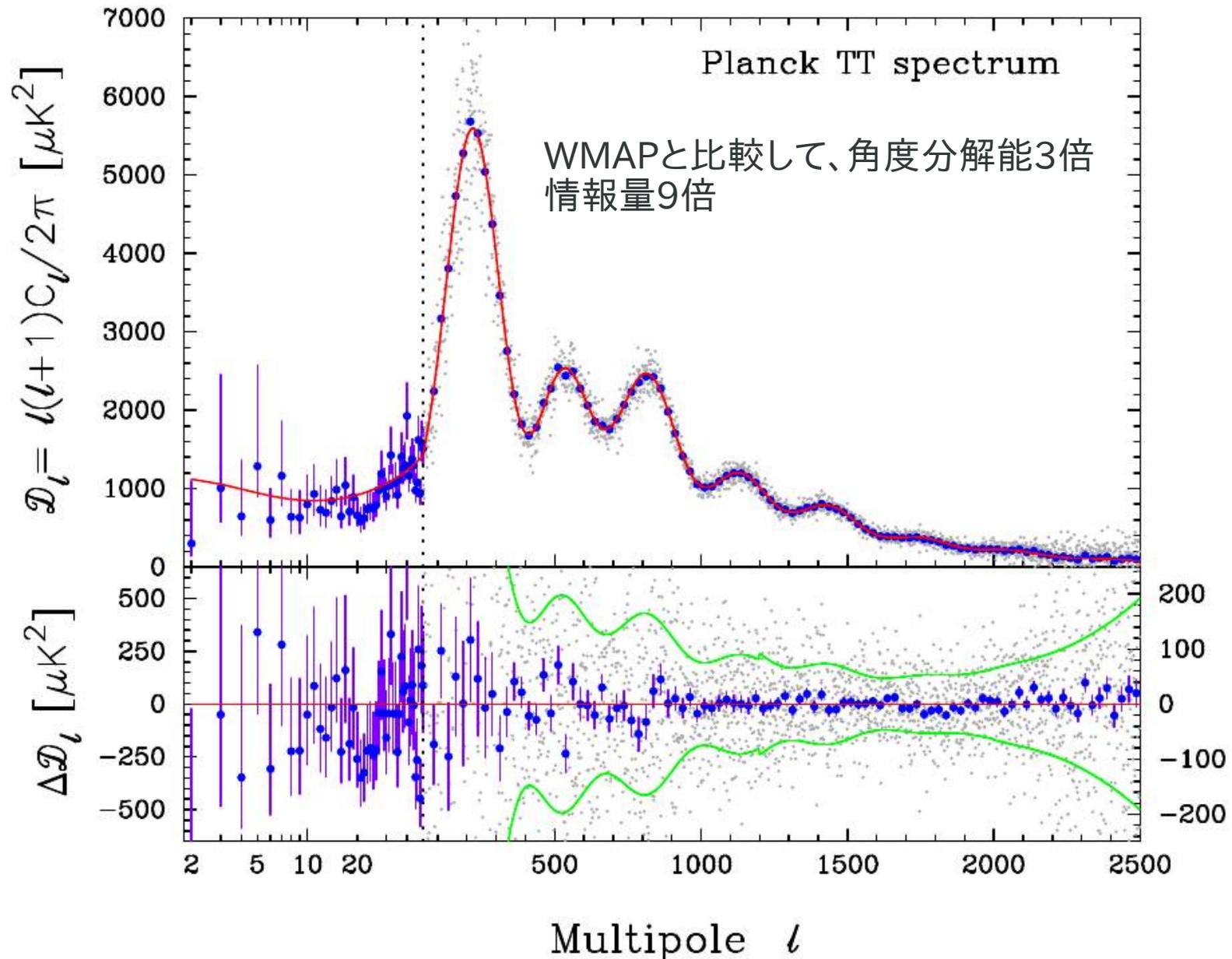


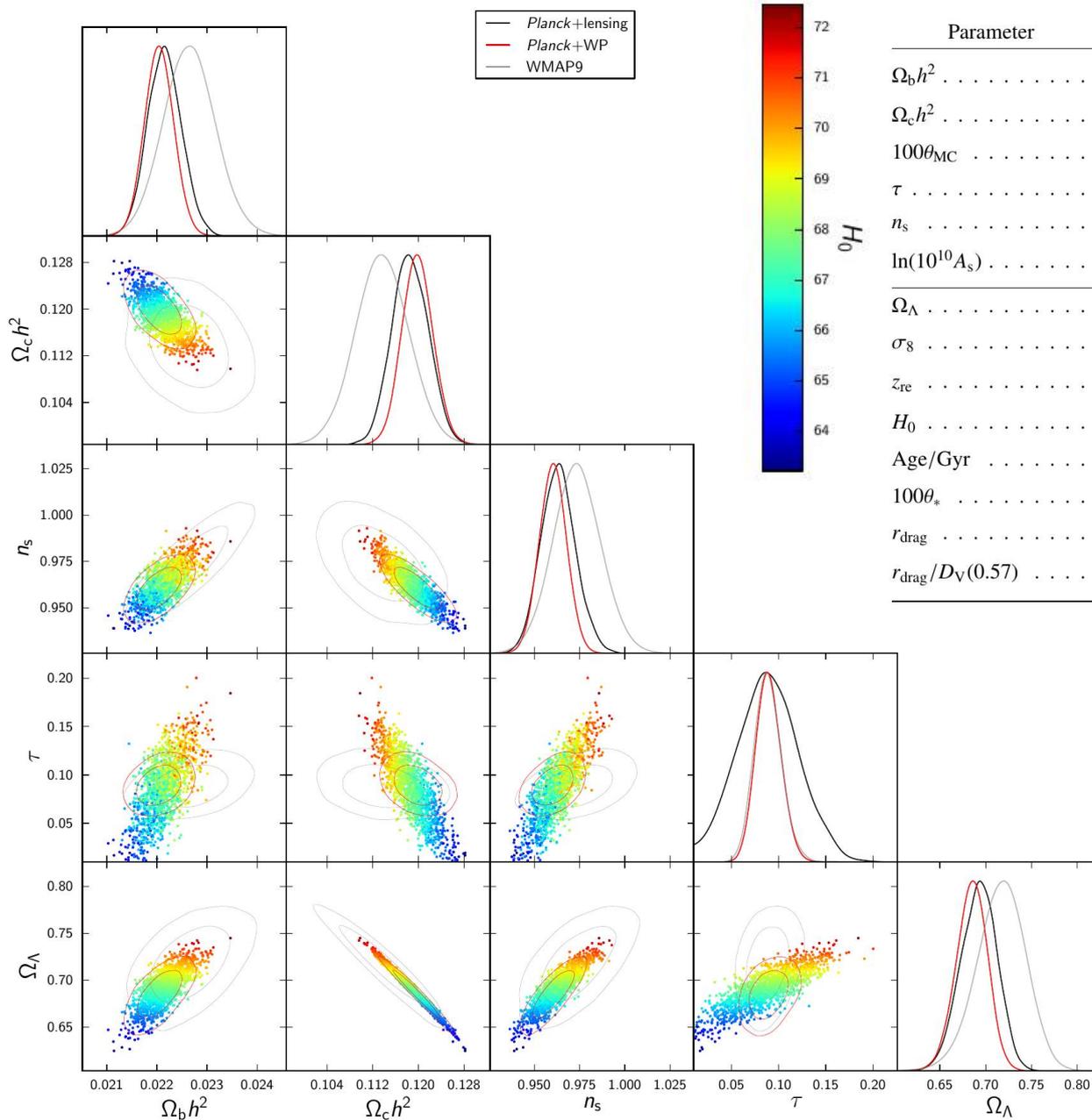






2013 (PLANCK)

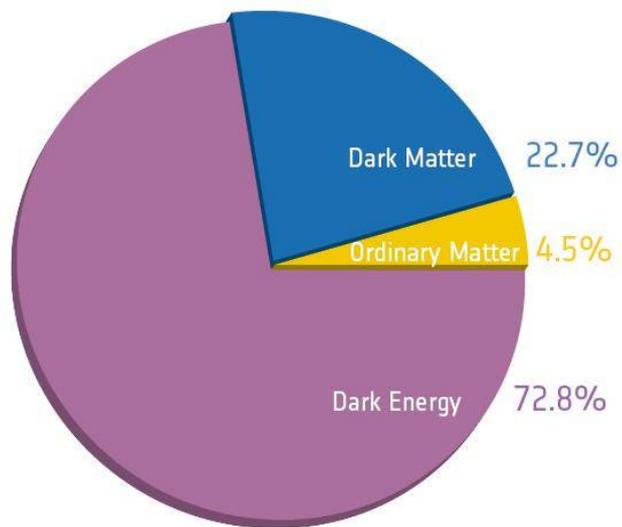




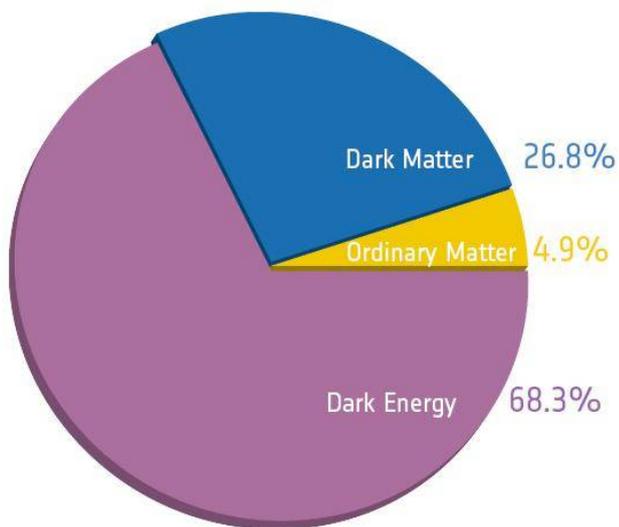
バリオン密度 CDM密度 揺らぎのべき 再イオン化 宇宙項

Parameter	<i>Planck</i> (CMB+lensing)		<i>Planck</i> +WP+highL+BAO	
	Best fit	68 % limits	Best fit	68 % limits
$\Omega_b h^2$	0.022242	0.02217 ± 0.00033	0.022161	0.02214 ± 0.00024
$\Omega_c h^2$	0.11805	0.1186 ± 0.0031	0.11889	0.1187 ± 0.0017
$100\theta_{MC}$	1.04150	1.04141 ± 0.00067	1.04148	1.04147 ± 0.00056
τ	0.0949	0.089 ± 0.032	0.0952	0.092 ± 0.013
n_s	0.9675	0.9635 ± 0.0094	0.9611	0.9608 ± 0.0054
$\ln(10^{10} A_s)$	3.098	3.085 ± 0.057	3.0973	3.091 ± 0.025
Ω_Λ	0.6964	0.693 ± 0.019	0.6914	0.692 ± 0.010
σ_8	0.8285	0.823 ± 0.018	0.8288	0.826 ± 0.012
z_{re}	11.45	$10.8_{-2.5}^{+3.1}$	11.52	11.3 ± 1.1
H_0	68.14	67.9 ± 1.5	67.77	67.80 ± 0.77
Age/Gyr	13.784	13.796 ± 0.058	13.7965	13.798 ± 0.037
$100\theta_*$	1.04164	1.04156 ± 0.00066	1.04163	1.04162 ± 0.00056
r_{drag}	147.74	147.70 ± 0.63	147.611	147.68 ± 0.45
$r_{drag}/D_V(0.57)$	0.07207	0.0719 ± 0.0011		

Base parametersはほぼ WMAPとconsistent



Before Planck



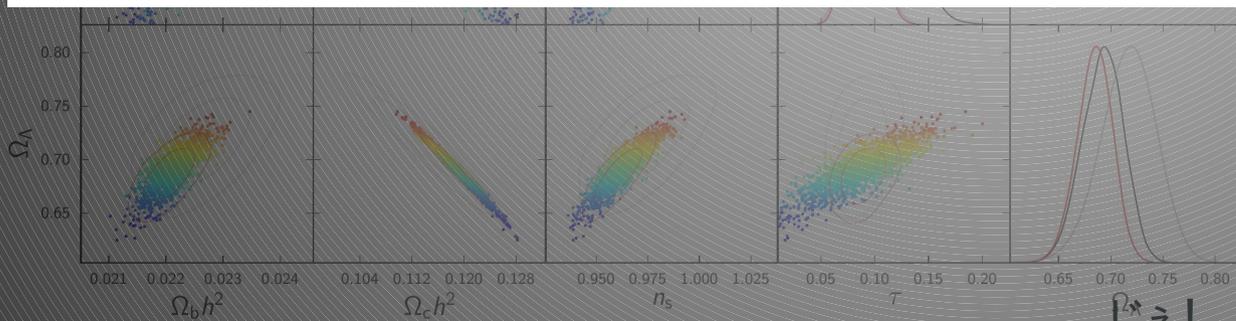
After Planck

宇宙年齢

137億年



138億年



バリオン密度

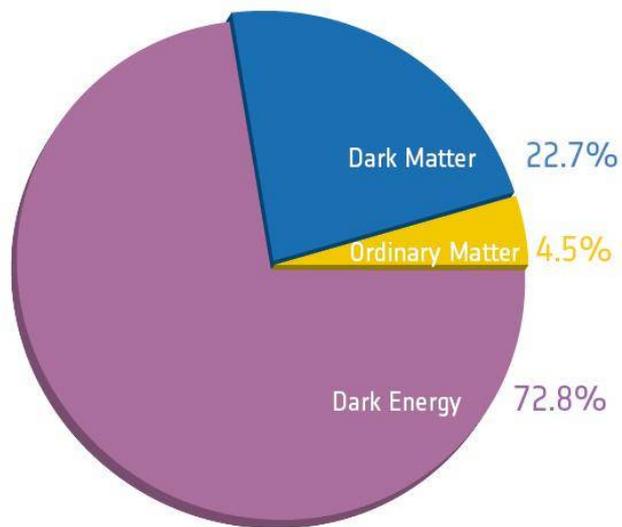
CDM密度

揺らぎのべき

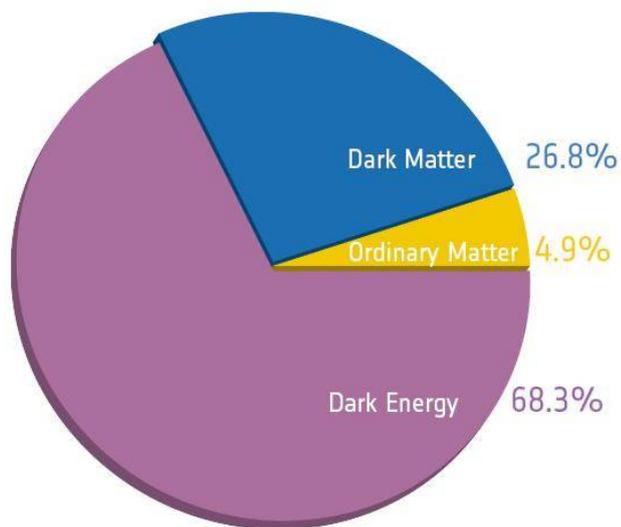
再イオン化

宇宙項

Base parametersはほぼ WMAPとconsistent



Before Planck



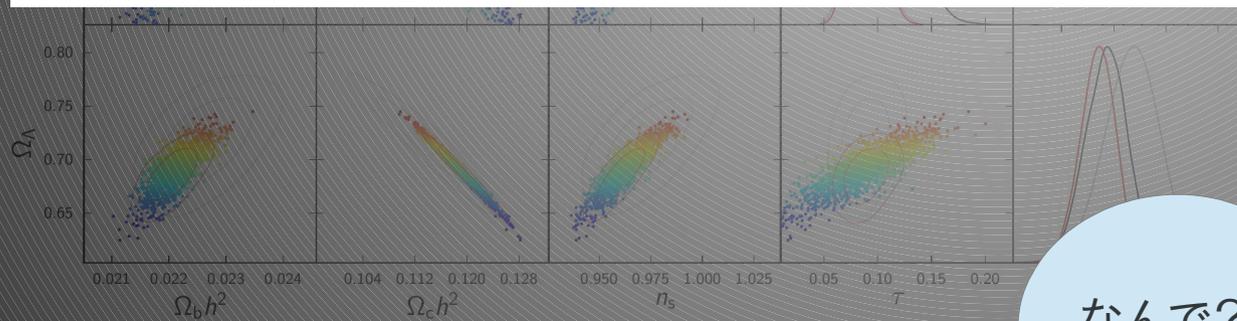
After Planck

宇宙年齢

137億年



138億年



バリオン密度

CDM密度

揺らぎのべき

再イオン化

なんで?

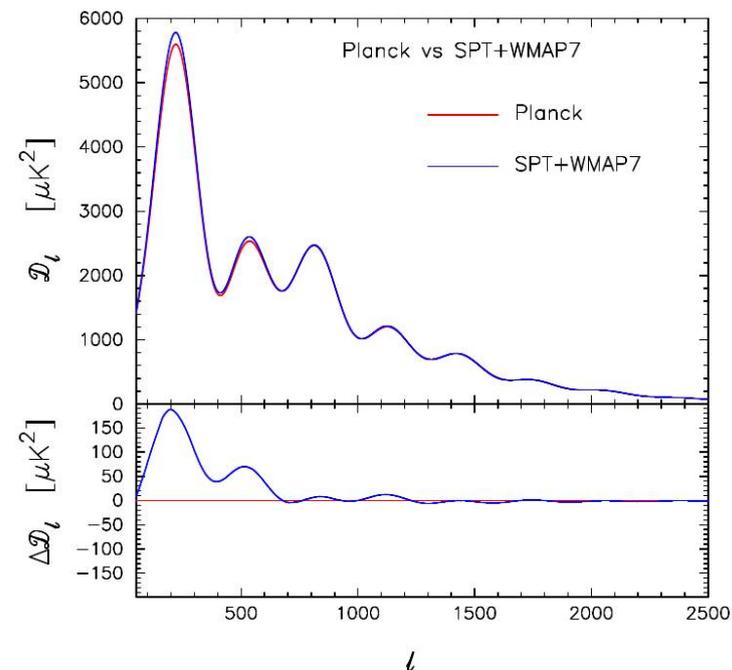


PlanckとSPT(S12)はconsistentだが、
それに対してWMAPデータは2.6%程度
「大きい」



$\Omega_c h^2$ が2.6 σ ほどwmapより大きくなり、
それによって Ω_Λ , H_0 もずれた。
(3.2 σ , 2.7 σ)

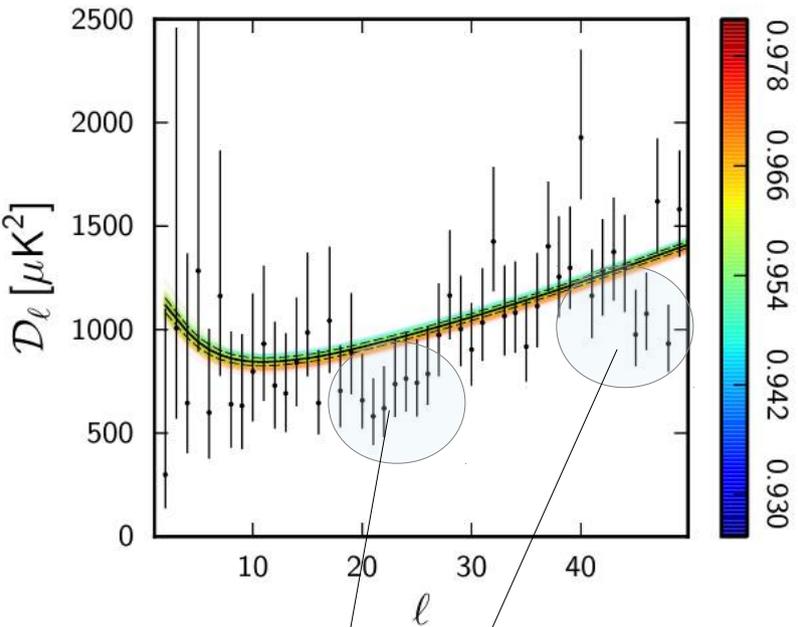
WMAP+SPTはBOSSのBAOデータとも
矛盾していると主張している。



じえ!じえ!



Anomalies?



low -ell regionでパワーが若干足りない(2.7σ)

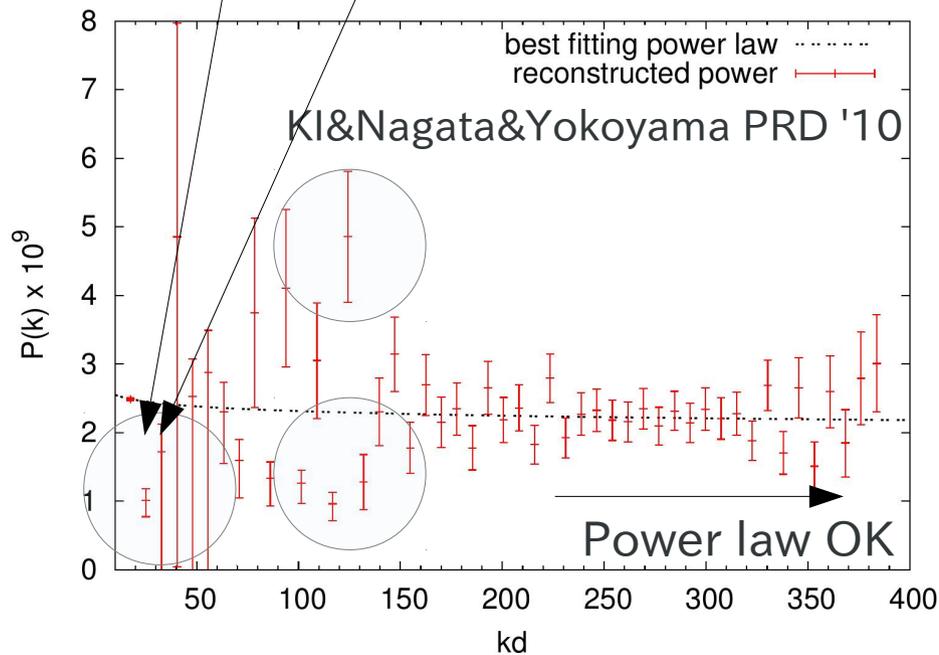


negative running

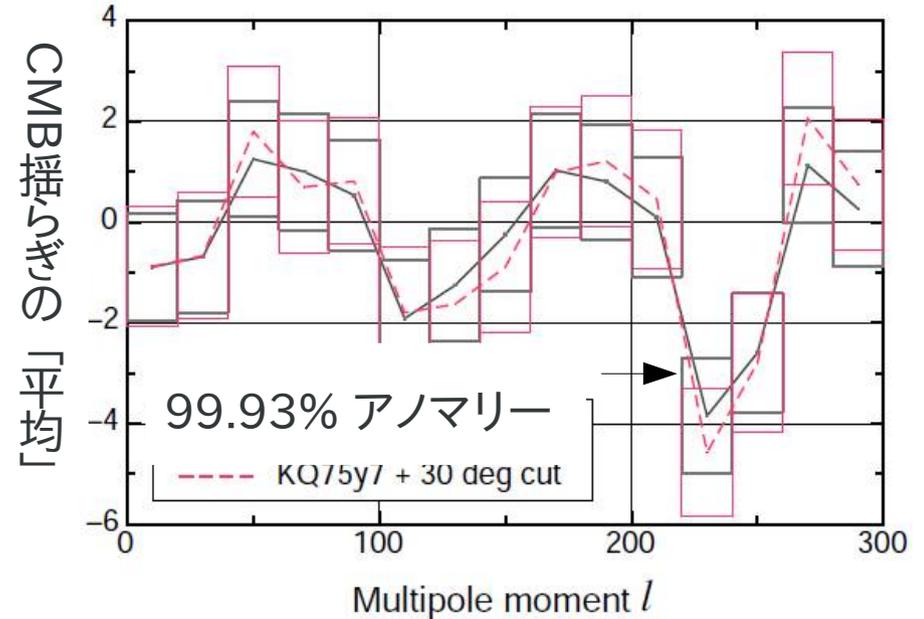
$$dn_s/d \ln k = -0.022 \pm 0.010 \text{ (68\%; Planck+WP+highL),}$$

Unphysical lensing power on TT

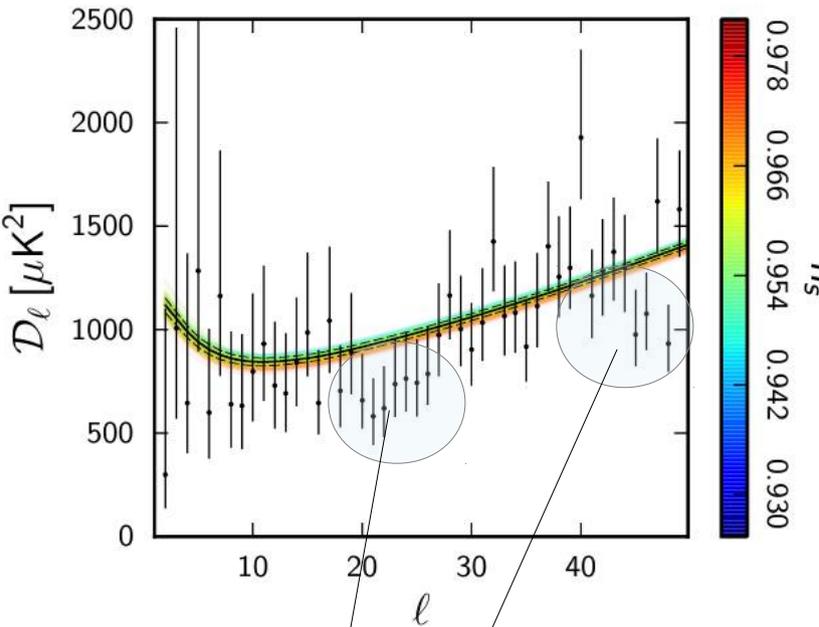
$$A_L = 1.23 \pm 0.11 \text{ (68\%; Planck+WP+highL),}$$



Kashino, KI, Takeuchi, PRD '12



Anomalies?



low -ell regionでパワーが若干足りない(2.7σ)



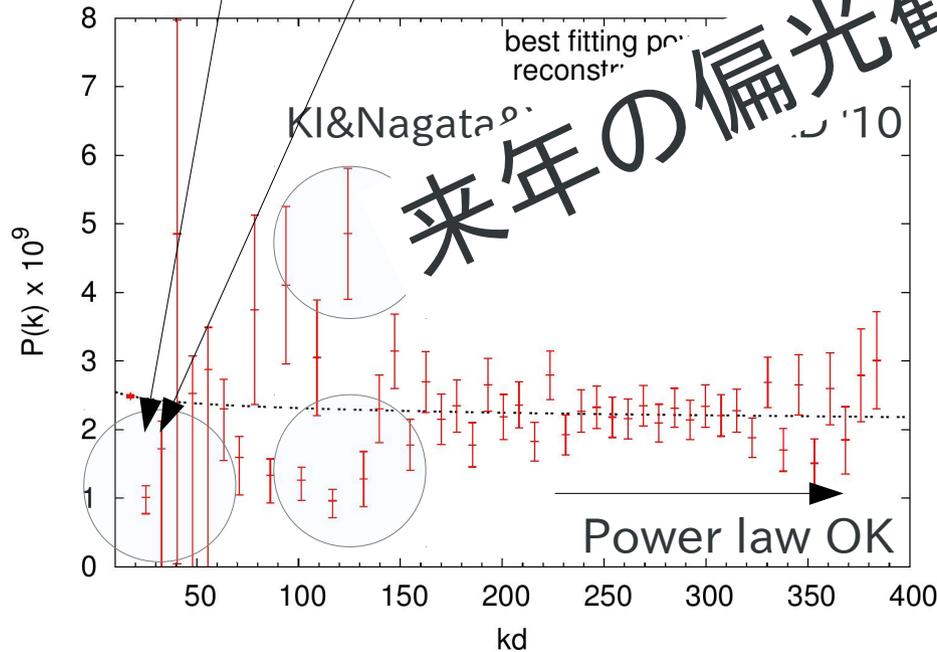
negative running

$$dn_s/d \ln k = -0.022 \pm 0.010 \text{ (68\%; Planck+WP+highL),}$$

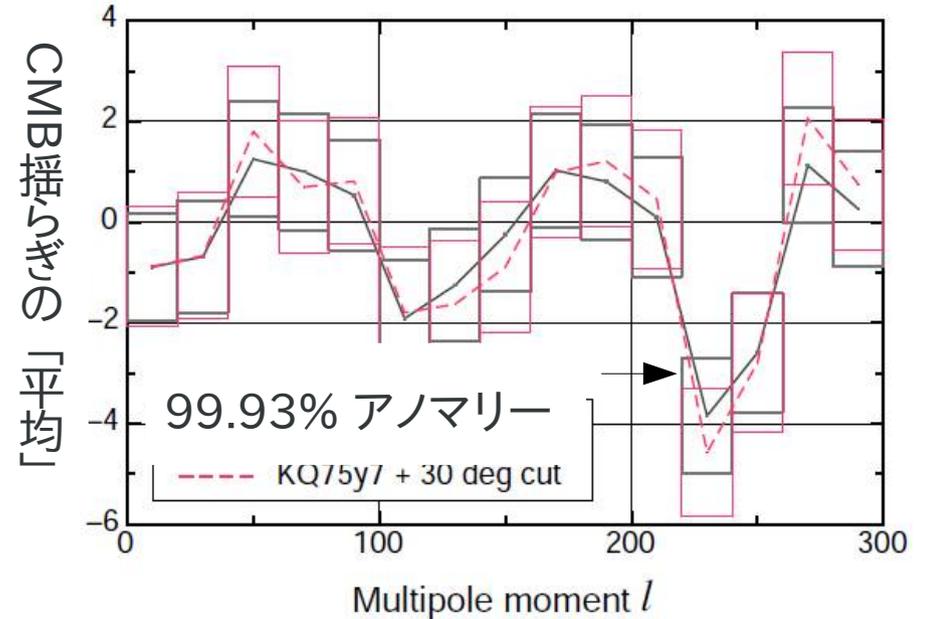
Unphysical lensing power

$$A_L = 1.23 \pm 0.11 \text{ (68\%; Planck+WP+highL),}$$

来年の偏光観測結果に期待



Kashino, KI, Takeuchi, PRD '12



標準宇宙論モデルを越えて

- 宇宙の幾何学

- Ω_K 空間曲率,

- 初期条件

- 物質密度… $\sum m_\nu$ [eV] ニュートリノ質量, N_{eff} Extra radiation component
 Y_p ヘリウムの存在量

- 密度揺らぎ… $dn_s/d \ln k$ 巾指数の波数依存性

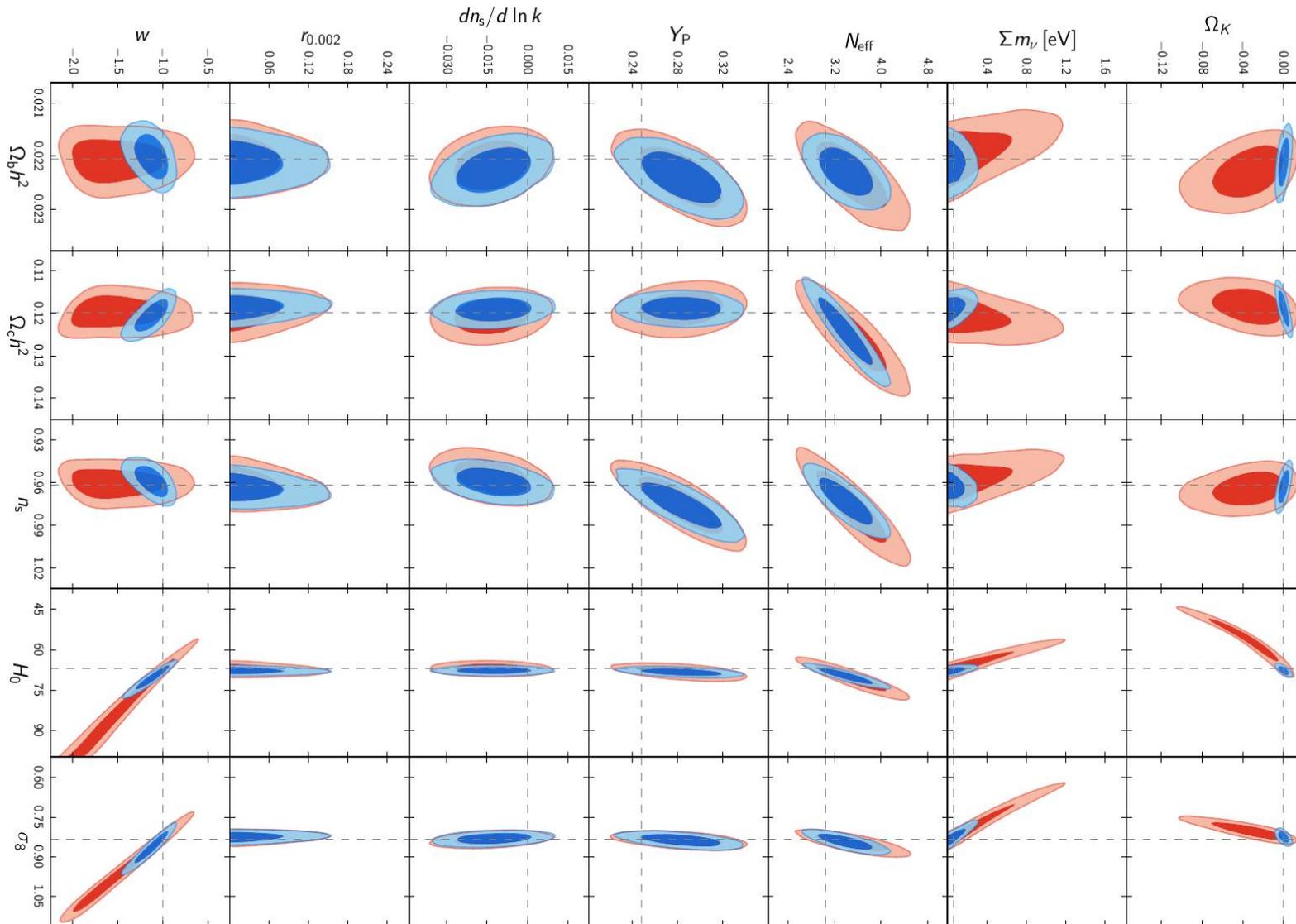
- 重力波… $r_{0.002}$ $k=0.002[1/\text{Mpc}]$ での重力波の割合

- 宇宙物理

- w ダークエネルギー(宇宙項成分)の状態方程式

同時に動くことを許すとややこしいので、順番に動かしてみる

Extensions to the base LCDM

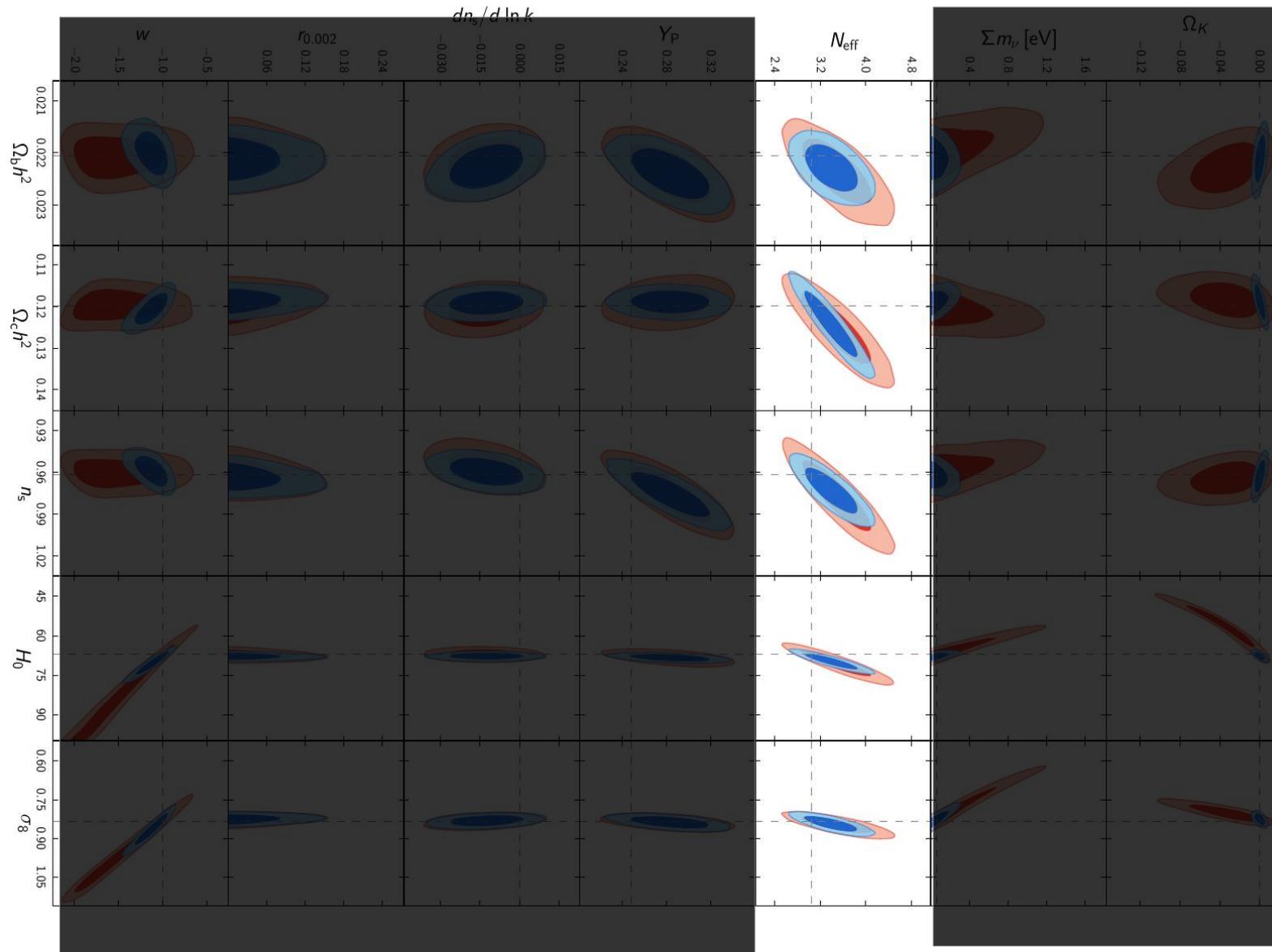


縮退しているパラメタは
BAO(近傍宇宙距離指標)
と組み合わせるとよく
決まる

Running indexが若干
外れているが、基本的には
6 parameter model
で無矛盾

Fig. 21. 68% and 95% confidence regions on one-parameter extensions of the base Λ CDM model for *Planck*+WP (red) and *Planck*+WP+BAO (blue). Horizontal dashed lines correspond to the fixed base model parameter value, and vertical dashed lines show the mean posterior value in the base model for *Planck*+WP.

Extensions to the base LCDM



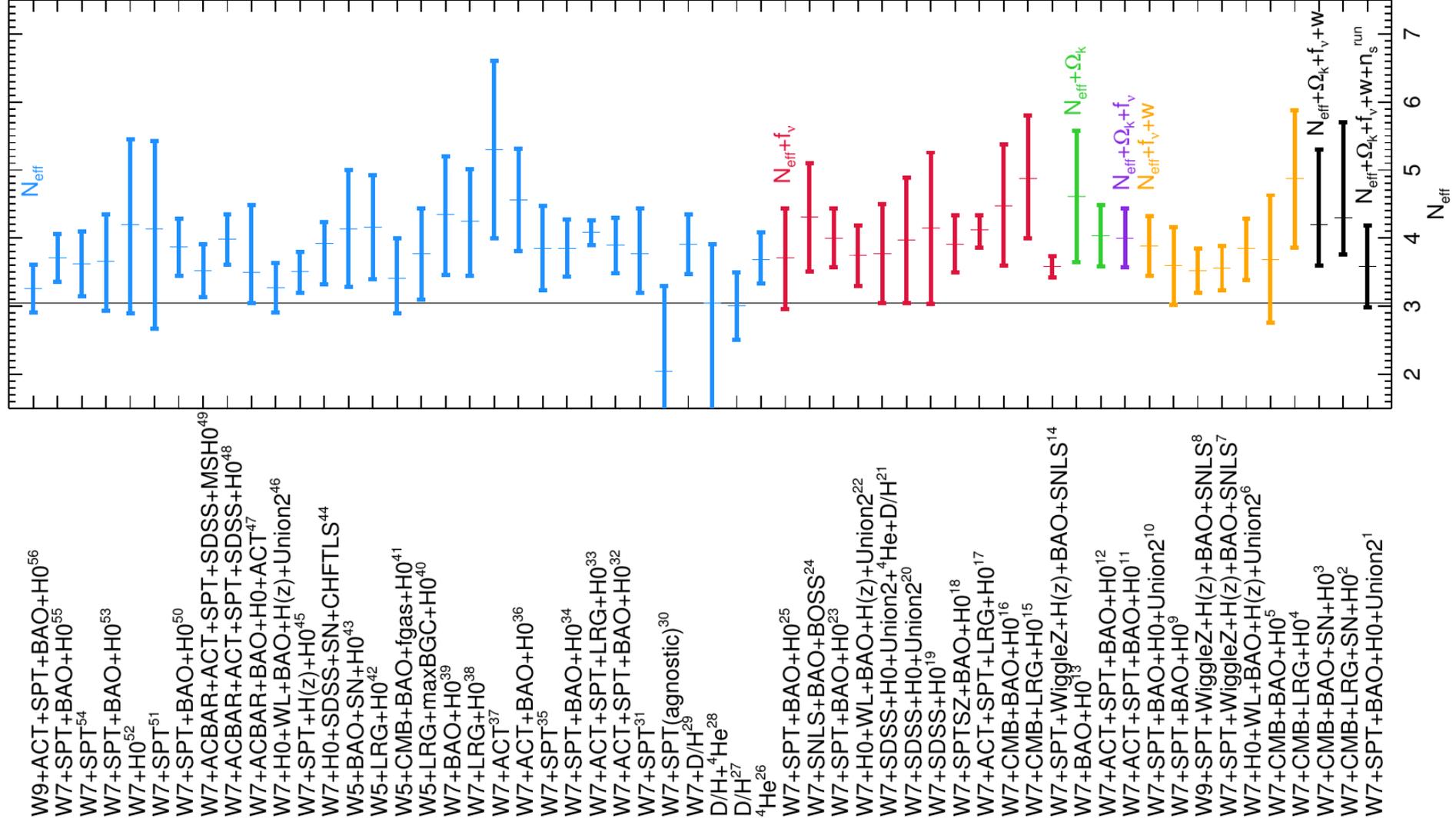
縮退しているパラメタは
BAO(近傍宇宙距離指標)
と組み合わせるとよく
決まる

Running indexが若干
外れているが、基本的には
6 parameter model
で無矛盾

Fig. 21. 68% and 95% confidence regions on one-parameter extensions of the base Λ CDM model for *Planck*+WP (red) and *Planck*+WP+BAO (blue). Horizontal dashed lines correspond to the fixed base model parameter value, and vertical dashed lines show the mean posterior value in the base model for *Planck*+WP.

最近の暗黒輻射問題

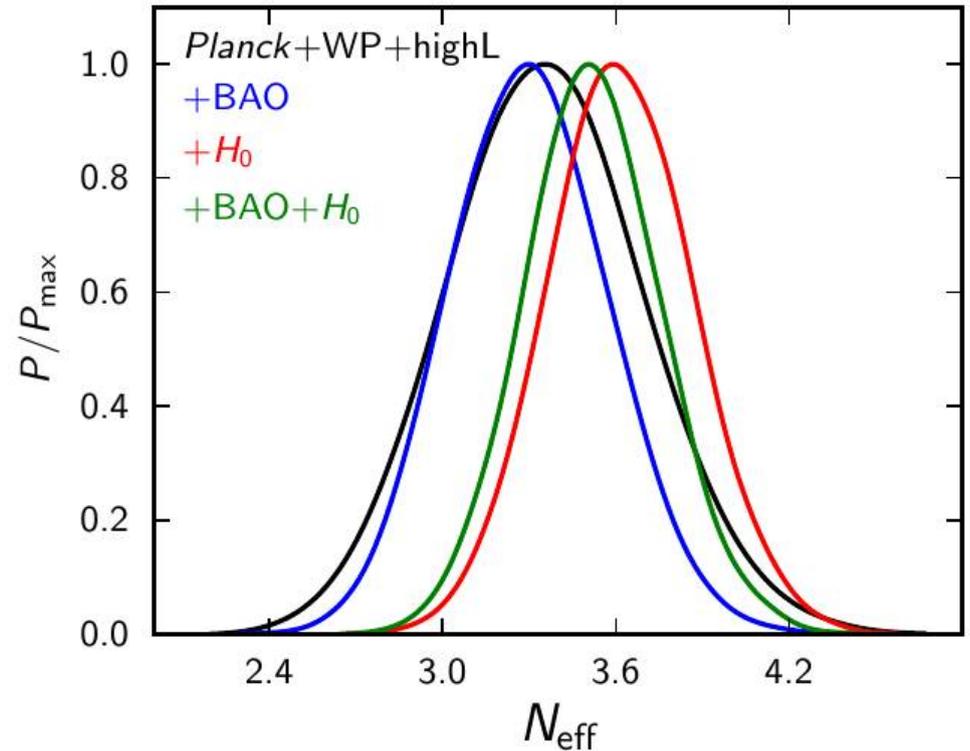
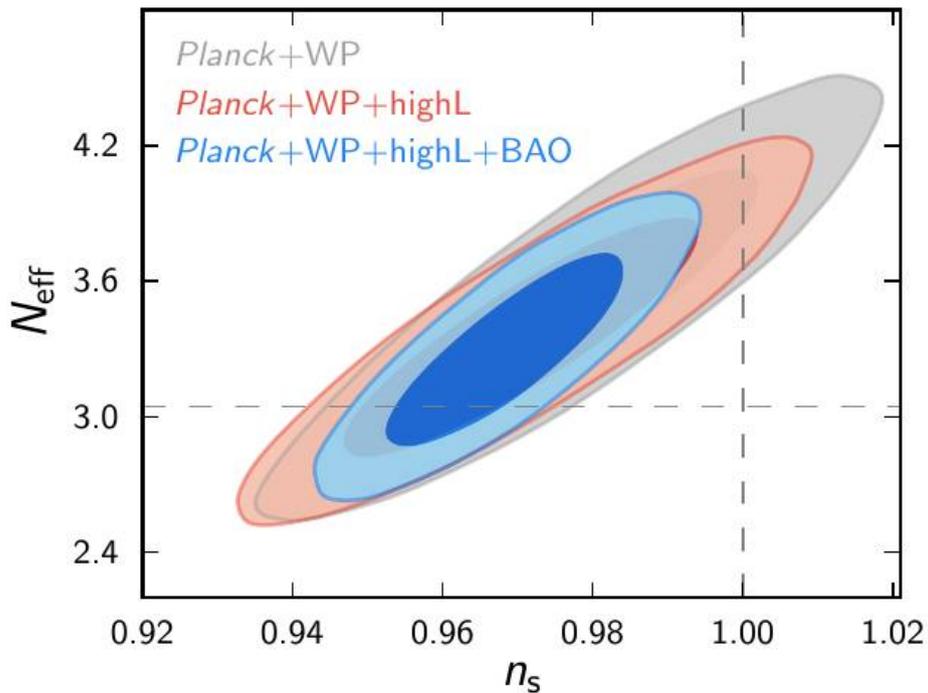
“Dark radiation” S. Mukohyama, PLB, 2000



“What is half a neutrino?” Riemer-Sorensen et al. (arXiv:1301.7102)

PLANCK Result

$$N_{\text{eff}} = 3.36^{+0.68}_{-0.64}$$



$N_{\text{eff}} = 3.04$ でconsistent

N_{eff} を大きくすると、CMBからは大きなハッブル定数が示唆されるので、大きな H_0 を示すデータと組み合わせると、 $N_{\text{eff}} > 3.04$ がでてくる

内容

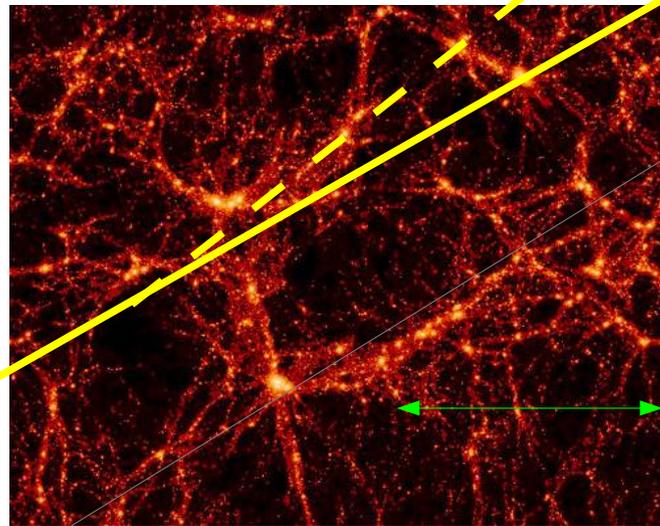
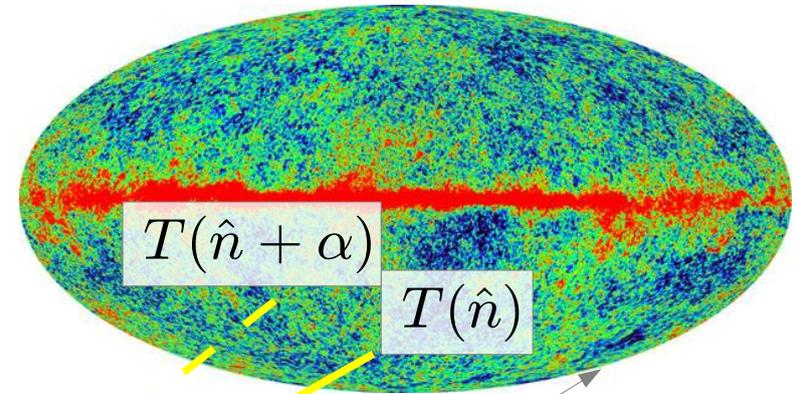
- 宇宙背景輻射温度揺らぎ (CMB) と PLANCK 衛星
 - 宇宙論パラメタの測定
 - CMB レンズ効果とその応用
 - CMB レンズと CMB 相互相関とダークエネルギー
 - CMB レンズと赤外線背景輻射
 - PLANCK による銀河団宇宙論
- CMB 観測の今後とまとめ

線形理論を越えて – CMB lensing

“そんな観測は現時点では夢物語だが、、、
将来的にはこの効果は検出されるだろう”

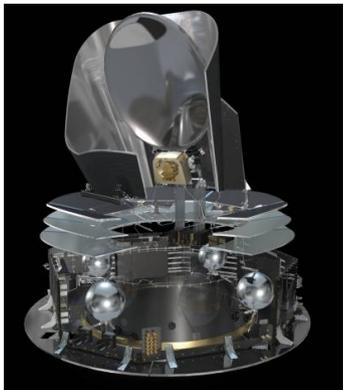
(Blanchard & Schneider, 1987)

CMB lensing



CMBまでの距離
 $\sim 14000\text{Mpc}$

宇宙の大規模構造 $\sim 300\text{Mpc}$ @ $z=2$



CMB lensing

- 重力レンズ効果による曲がり角 α

$$\alpha \sim 2\phi \times \sqrt{\frac{14000}{300}} \sim 2'$$

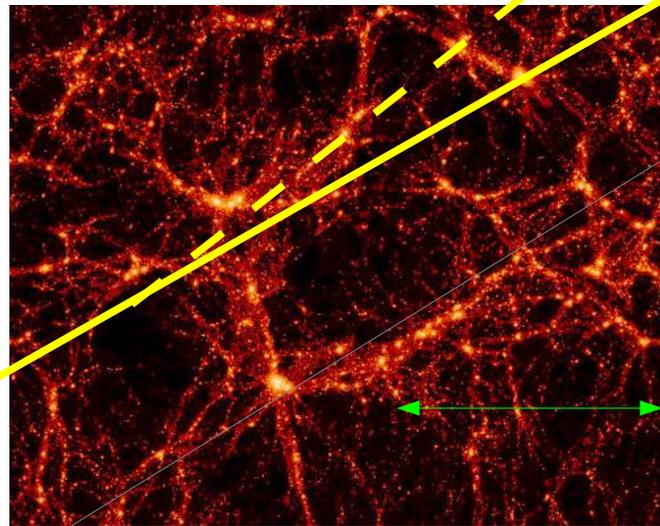
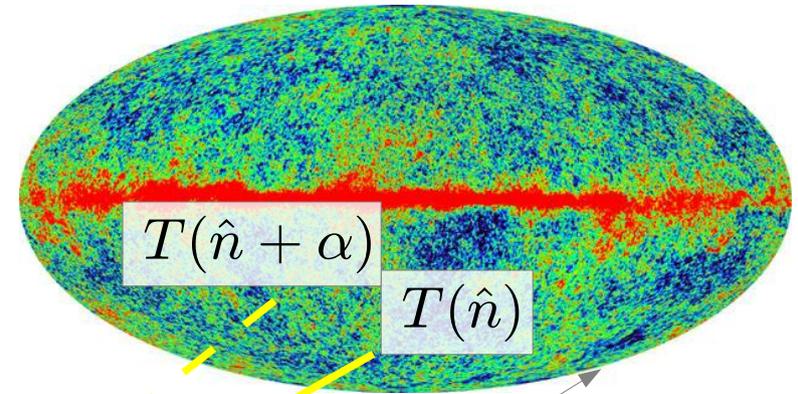
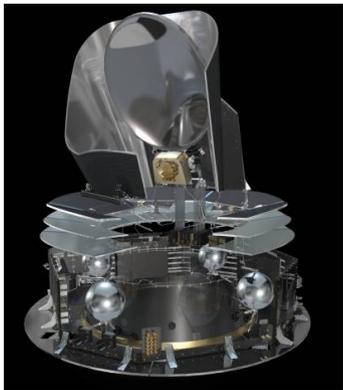
重力ポテンシャル

散乱回数

- coherent over

$$300 / (14000 / 2) \sim 2^\circ$$

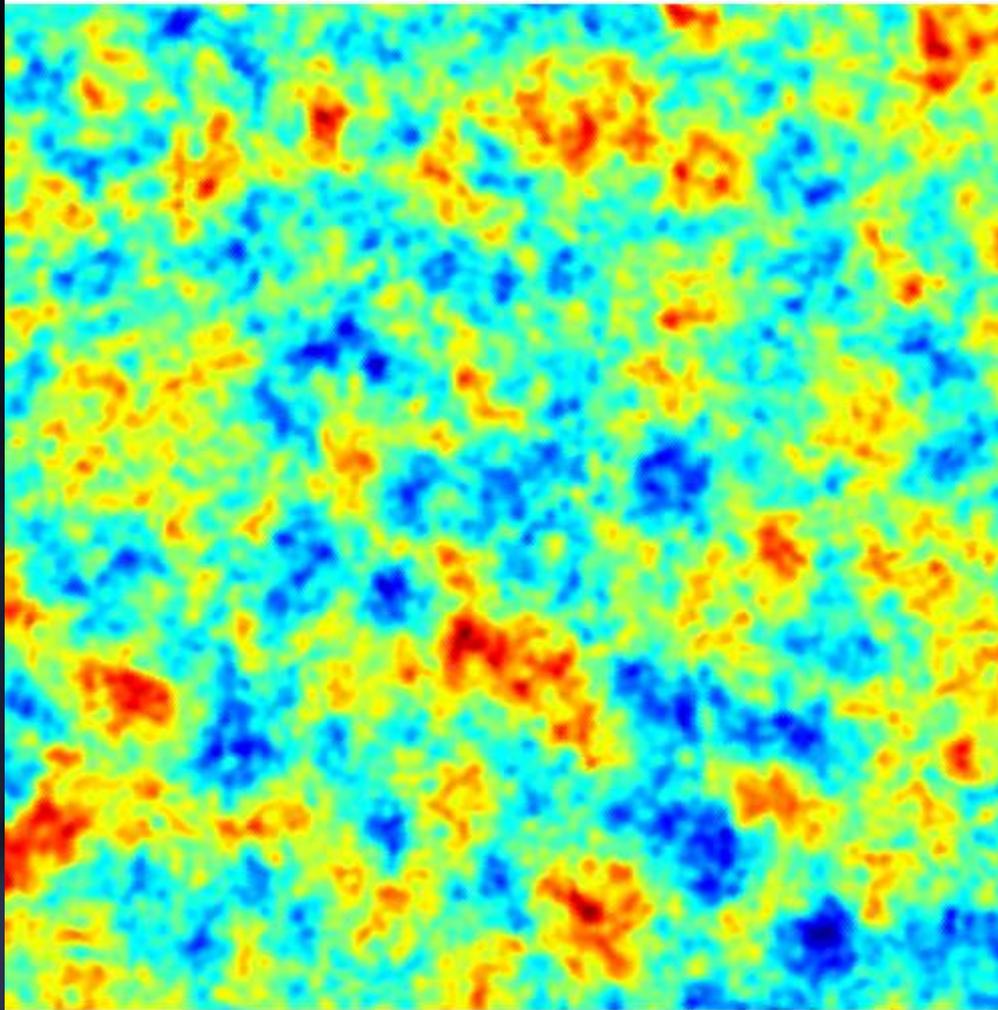
(=CMB peak scale)



CMBまでの距離
 $\sim 14000\text{Mpc}$

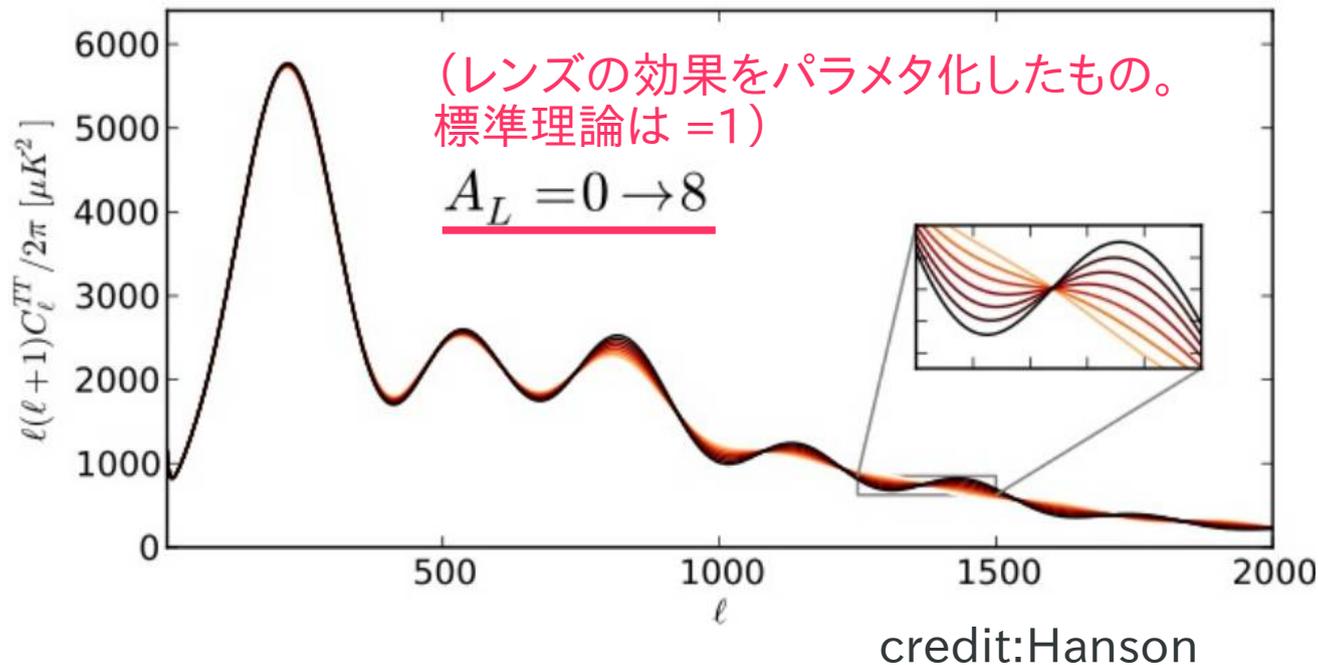
宇宙の大規模構造 $\sim 300\text{Mpc}$ @z=2
(ダークマター)

TO SEE IS TO BELIEVE



CMB温度揺らぎへの影響

- 視線方向に依存して拡大や縮小、歪みを受ける(レンズ)
 - 音響振動がなまされる (2 σ 検出 ACBAR+WMAP5 Reichardt, ApJ '09)
 - (E-B modeが混ざる)
- 局所的にCMBの一様等方性を破る
 - レンズポテンシャルの再構築

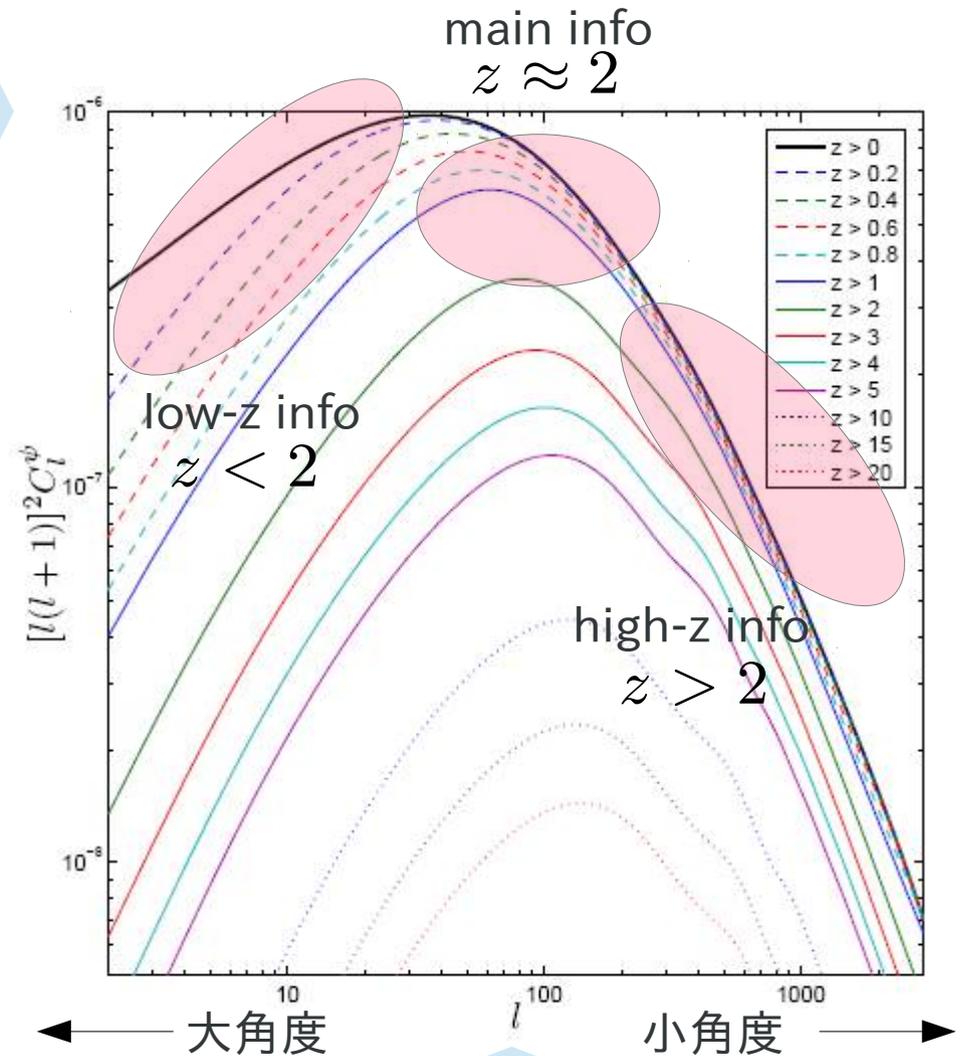


CMB lensing power spectrum

- 曲がり角 ~ 2 分
 - PLANCKでなんとか
- ~ 2 度で揃って曲がる
- $z \sim 2$ くらいの情報

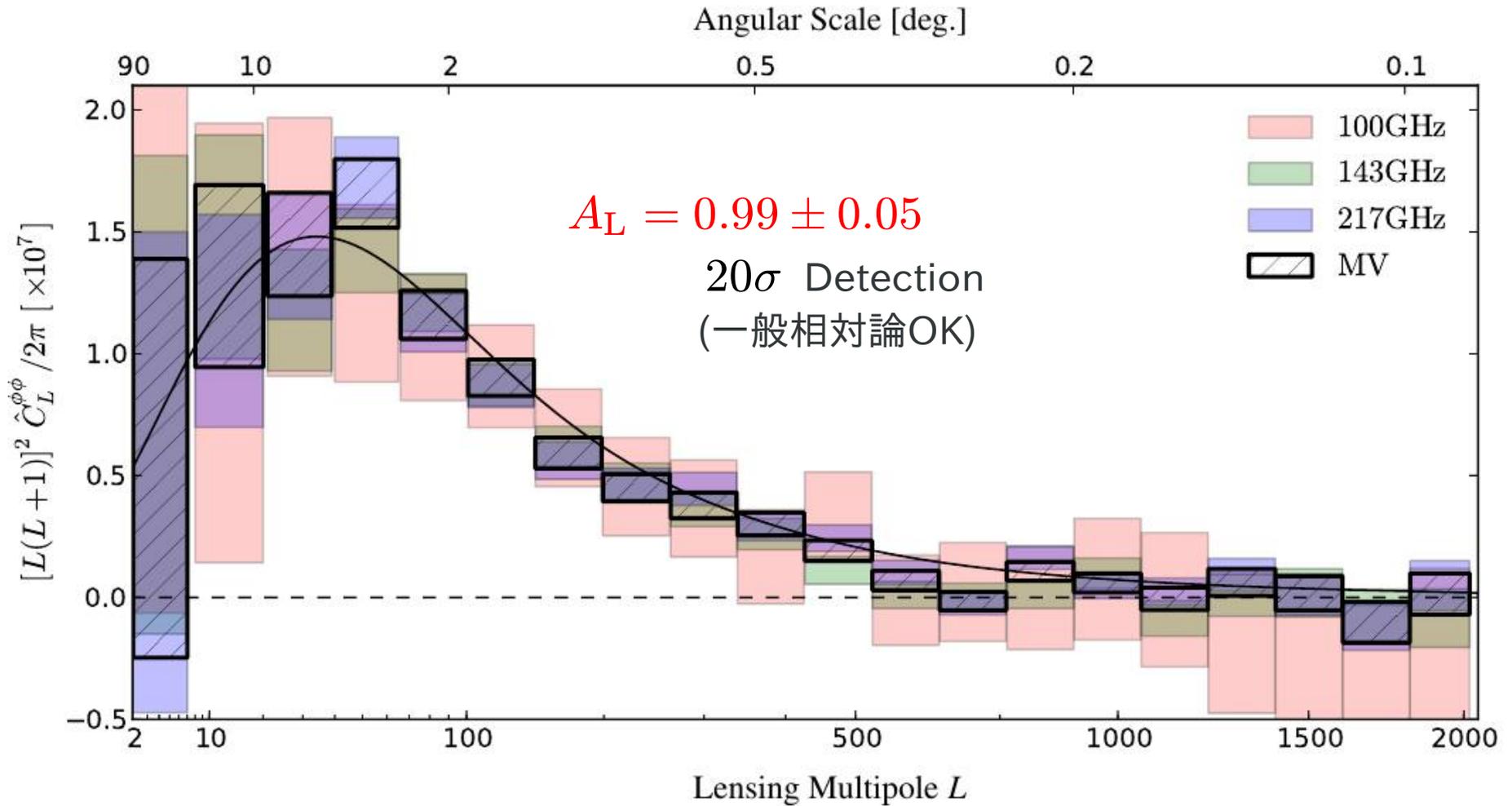
お持ち帰り情報

CMB lensing: キーワードは
 ~ 2 (曲り角、相関、赤方偏移)



Lewis&Challinor, '06

PLANCK lensing power spectrum

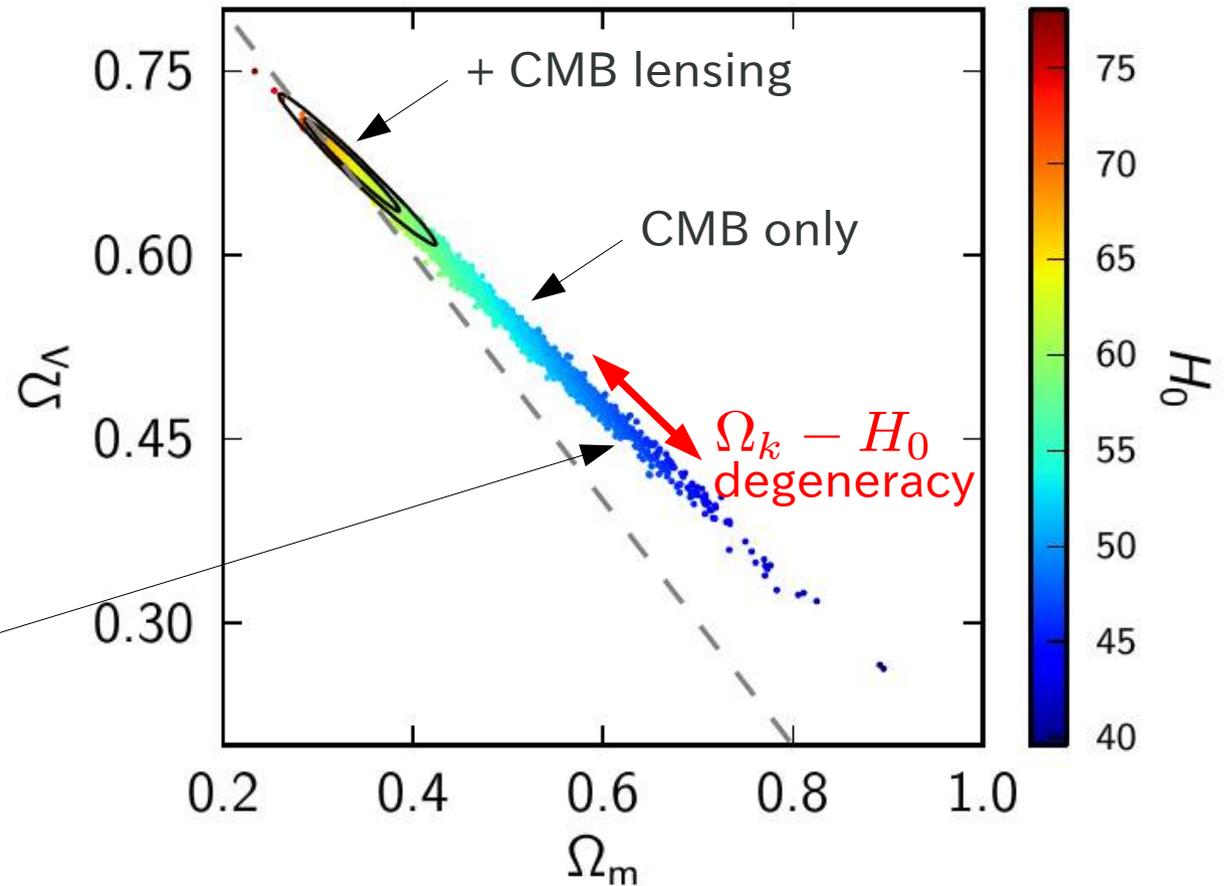


宇宙論へのインパクト

- $z=2$ までの
 - 距離の情報
 - 構造形成の様子 (Ω_m)



CMB温度揺らぎの振幅と、
最終散乱面までの距離に
付随する縮退が解ける!



*温度揺らぎとCMB lensingで光学的厚さについても制限がつく

neutrino massへの制限

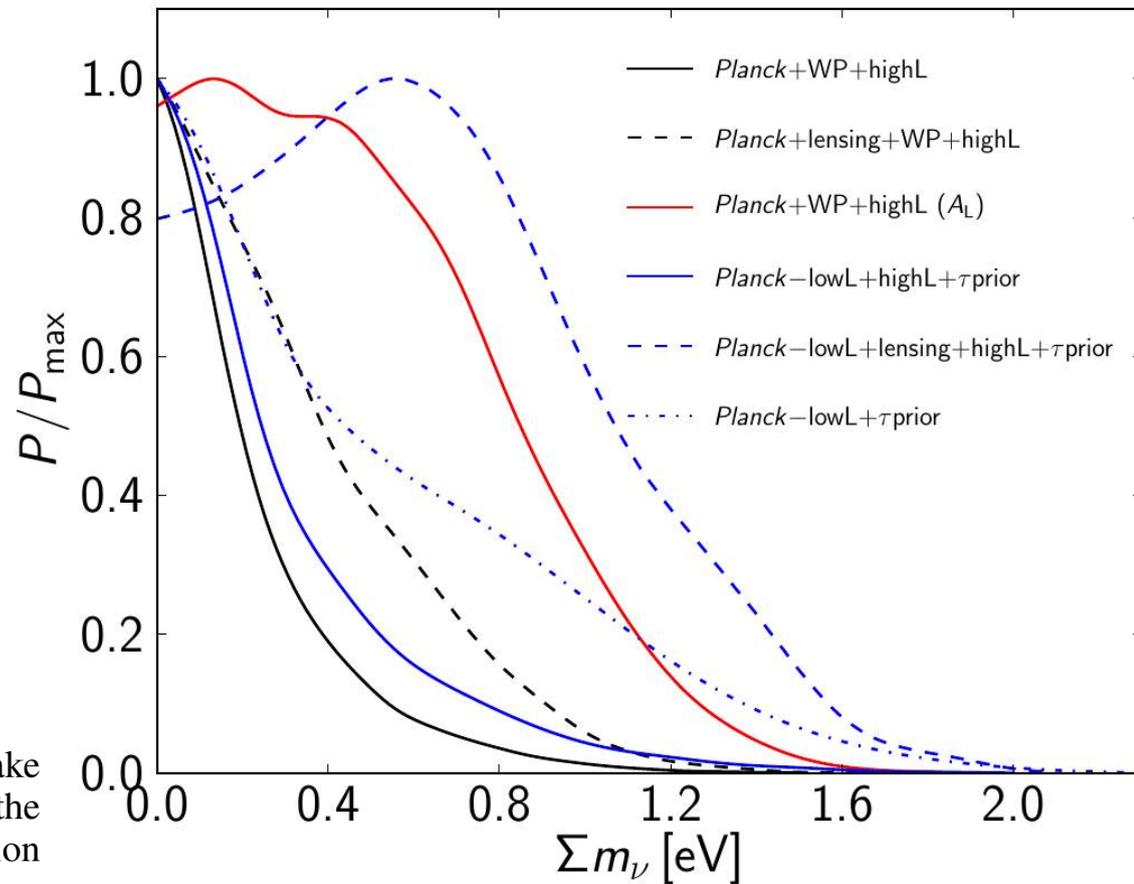
- $\sum m_\nu < 0.66\text{eV}$ (CMB only)

- $\sum m_\nu < 0.23\text{eV}$ (+BAO)

- $\sum m_\nu < 0.85\text{eV}$ (+Lensing)

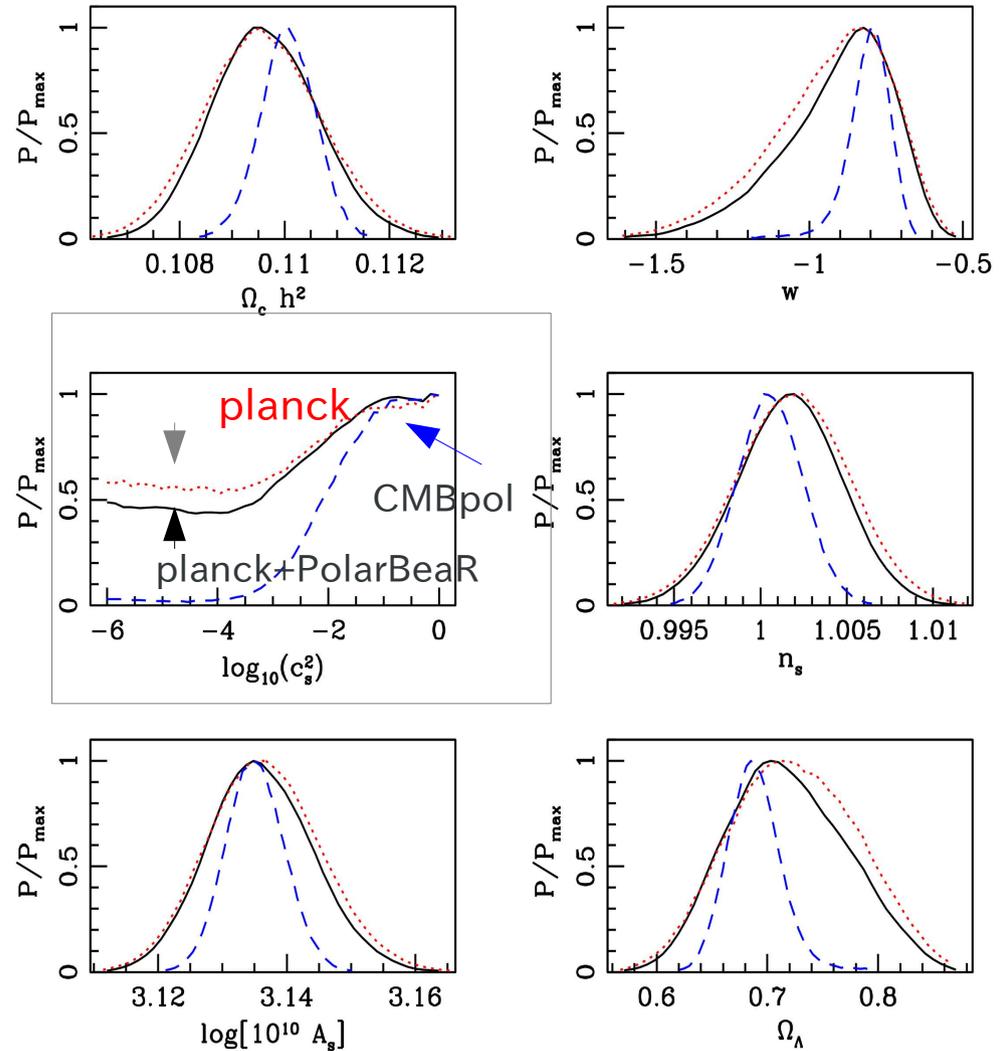


At this stage it is unclear what to make of this mild tension between neutrino mass constraints from the 4-point function and those from the 2-point, and we caution over-interpreting the results. We expect to be able to say more on this issue with the further data, including polarization, that will be made available in future *Planck* data releases.



More on CMB lensing

- 曲がり角 2~3分
 - 小角度スケールのCMB実験が効果的
 - Bモード偏光
- Lensing timeline
 - 相互相関
 - WMAP+SDSS('07)
 - スムージング
 - ACBAR('08)
 - Power spectrum
 - ACT('11),SPT('12),PLANCK('13)
- ACTPol, SPTPol, PolarBear (KEK)
 - ..., CMBpol



(KI, Takada, Takahashi, '09 unpublished)

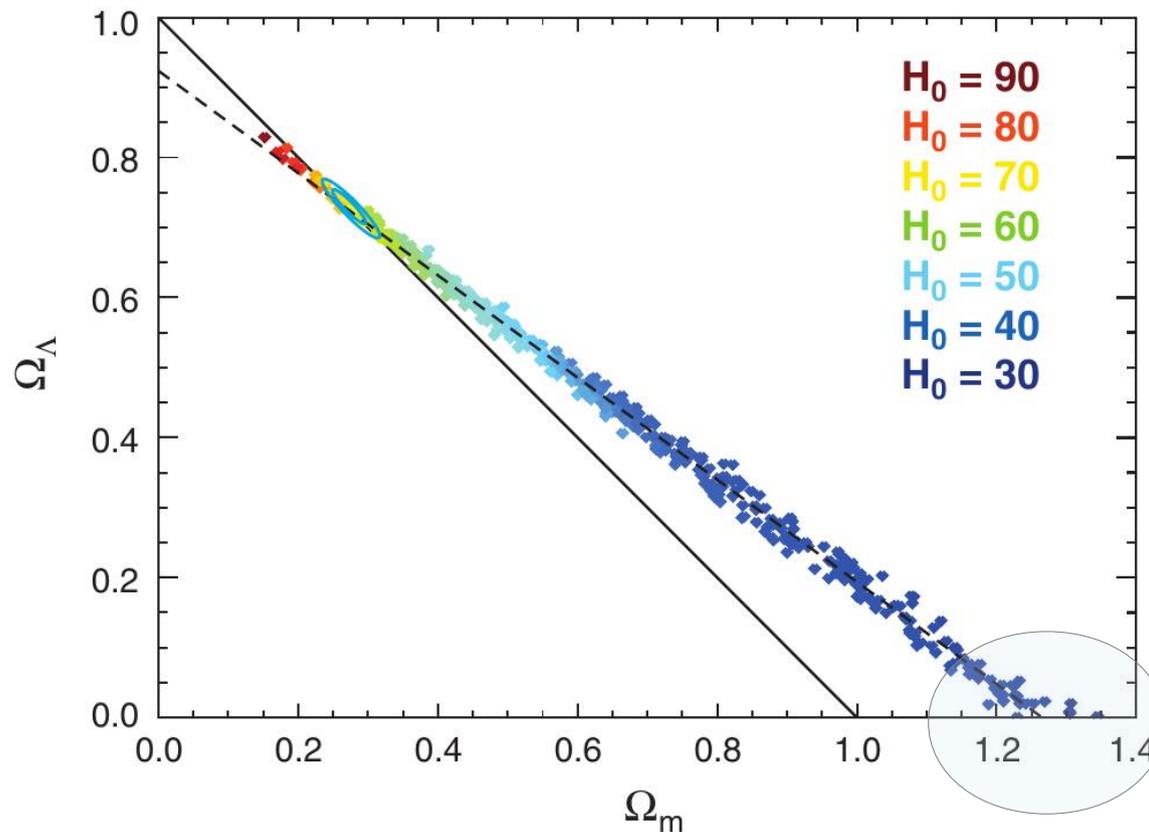
Fluctuating dark energy

内容

- 宇宙背景輻射温度揺らぎ (CMB) と PLANCK 衛星
 - 宇宙論パラメタの測定
 - CMB レンズ効果とその応用
 - CMB レンズと CMB 相互相関とダークエネルギー
 - CMB レンズと赤外線背景輻射
 - PLANCK による銀河団宇宙論
- CMB 観測の今後とまとめ

CMBとDARK ENERGY

- ダークエネルギー、宇宙の曲率などのパラメタの影響はCMBの温度揺らぎのピーク的位置にある。
 - 影響は縮退する



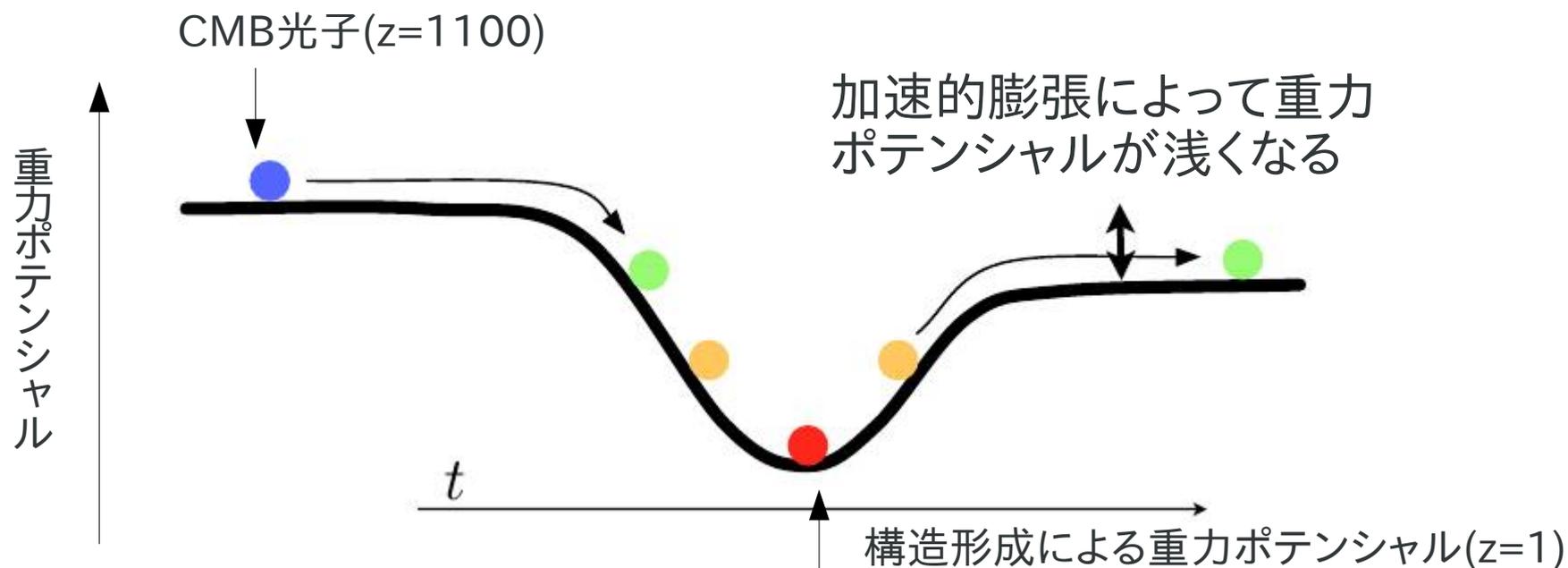
CMBだけなら
宇宙項なしでもOK

Dark EnergyとCMB

- 問:CMBの観測のみから、ダークエネルギーの直接的な証拠が得られるか？
- 答:はい。ISW効果が受ければ可能です。

Dark EnergyとCMB

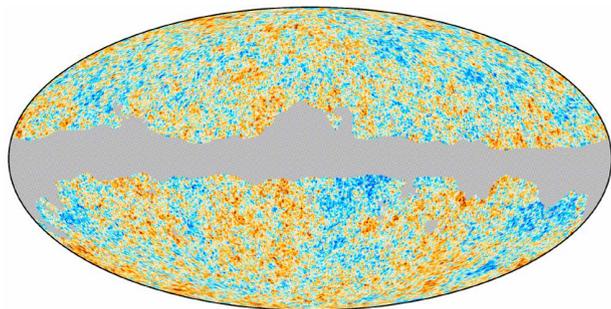
- 問:CMBの観測のみから、ダークエネルギーの直接的な証拠が得られるか?
- 答:はい。ISW効果が受ければ可能です。



$z=1$ 付近で作られる温度揺らぎだけを抜き出すにはどうしたらよいのか?

ISW x CMB lensing

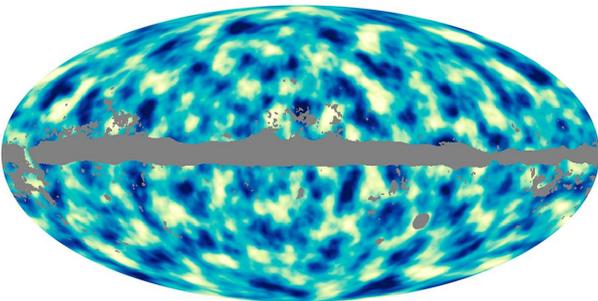
- $z=1$ 付近で作られる温度揺らぎを抜き出す(1)
 - CMBと重力レンズマップの相互相関をとる (2013 NEW!)



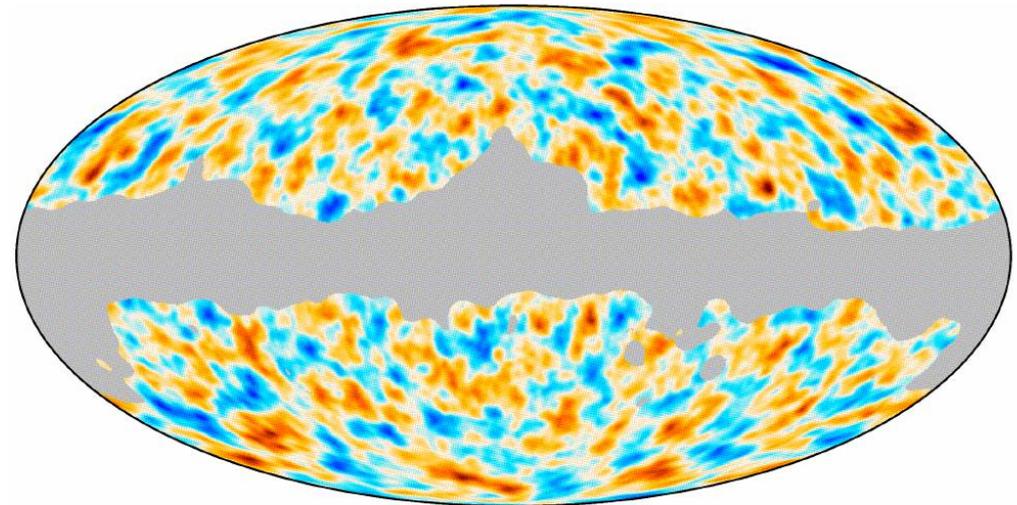
-300 μK 300

CMB

(主に $z=1100$ だが一部は $z=1$ 付近)



CMB Lensing (主に $z=[1,2]$)



-12 μK 12

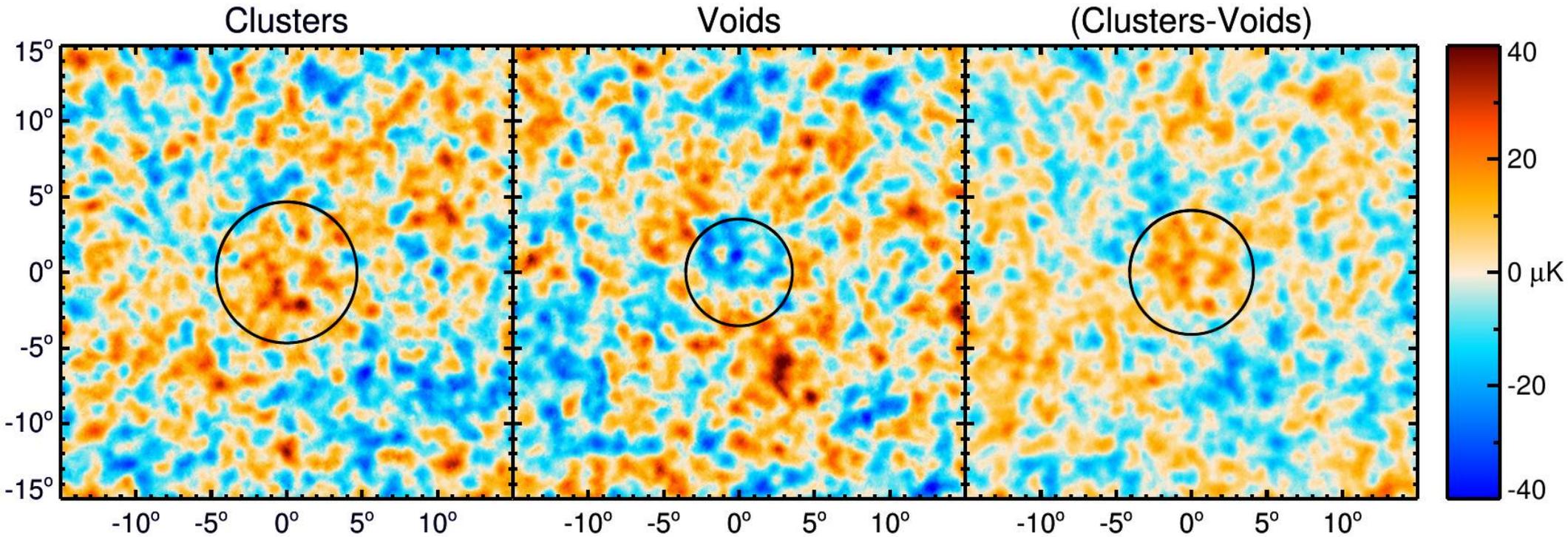
推定されたISW起源の温度揺らぎMap

$\lesssim 2.7\sigma$ 検出

究極観測でも 9σ が限界 (Lewis+, JCAP '11)

ISW x 大規模構造

- $z=1$ 付近で作られる温度揺らぎを抜き出す(2)
 - CMBと銀河分布マップの相互相関をとる



Granett et al., 08で得られたsuperstructures (50 voids and clusters)の位置でstacking

→ $\approx 3\sigma$ 検出

内容

- 宇宙背景輻射温度揺らぎ (CMB) と PLANCK 衛星
 - 宇宙論パラメタの測定
 - CMB レンズ効果とその応用
 - CMB レンズと CMB 相互相関とダークエネルギー
 - CMB レンズと赤外線背景輻射
 - PLANCK による銀河団宇宙論
- CMB 観測の今後とまとめ

アイデア (Song et al., ApJ '03)

- CMB lensingに効く質量スケールと赤方偏移は、赤外線背景輻射を発する質量スケールと赤方偏移と大体同じという予想

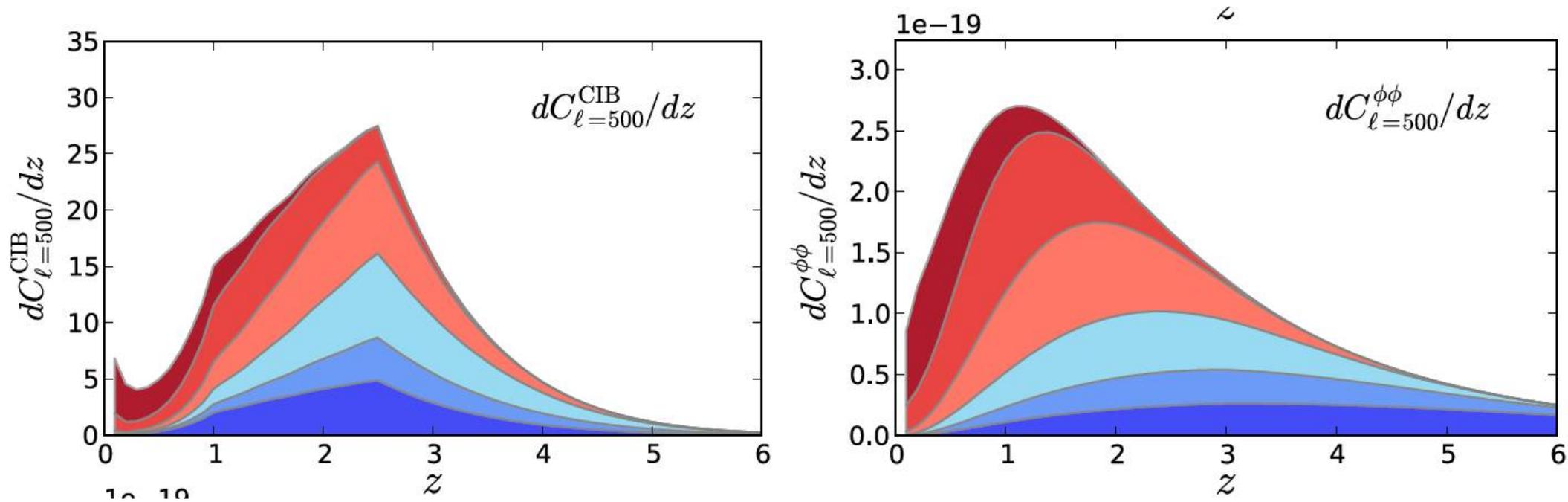
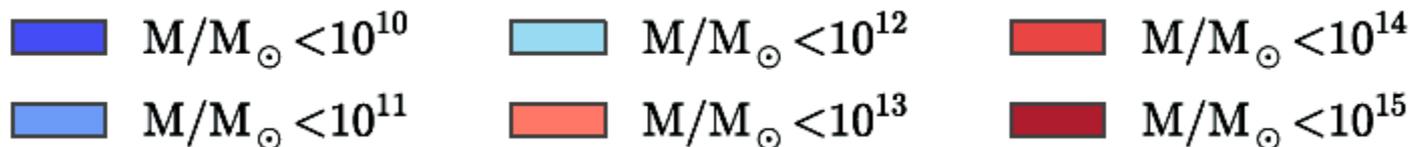
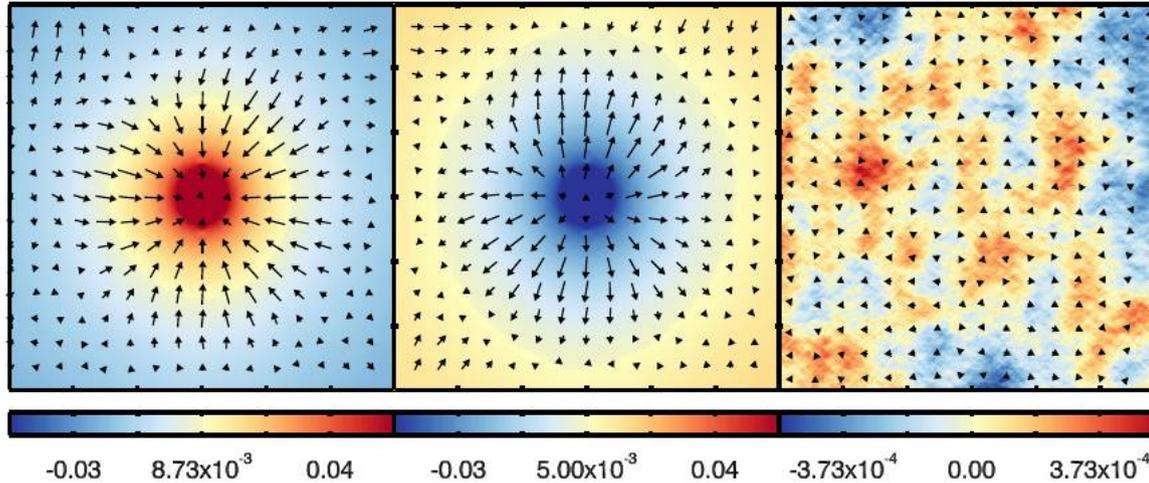


Fig. 1



直感的な理解 (stacking technique)

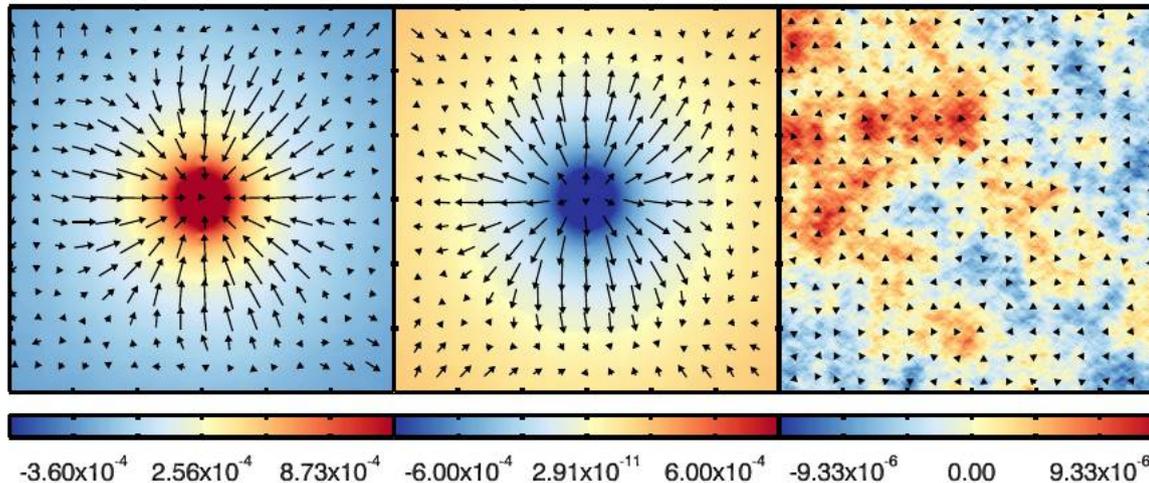
857 GHz



温度揺らぎmapから20,000の極値を見つけてきて、周辺1x1度の領域を足していく。

($l=200-400$ でfilteringする)

545 GHz



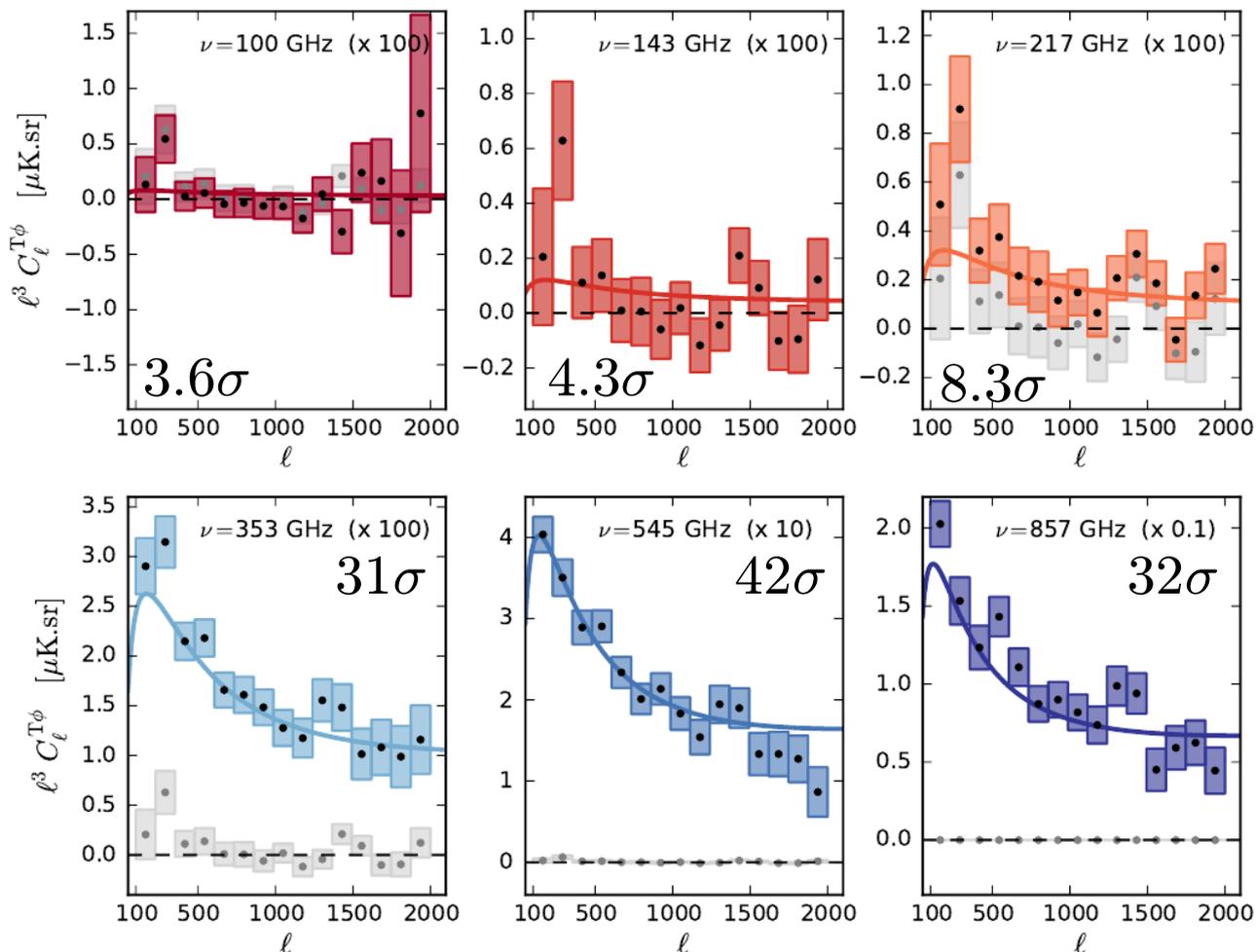
同じ領域で、lensing mapも足し合わせていき、微分を計算してdeflection angleを計算する

Deflection angleは最大で6.3" (ただしfilteringしているので実際はもっと曲がってる)

高温領域の平均 低温領域の平均 ランダムに取って平均

Cross correlation signal

- 重カレンズmapの球面調和関数展開の係数とCMBを引いた温度揺らぎマップのそれとの相関 (2013 New!)



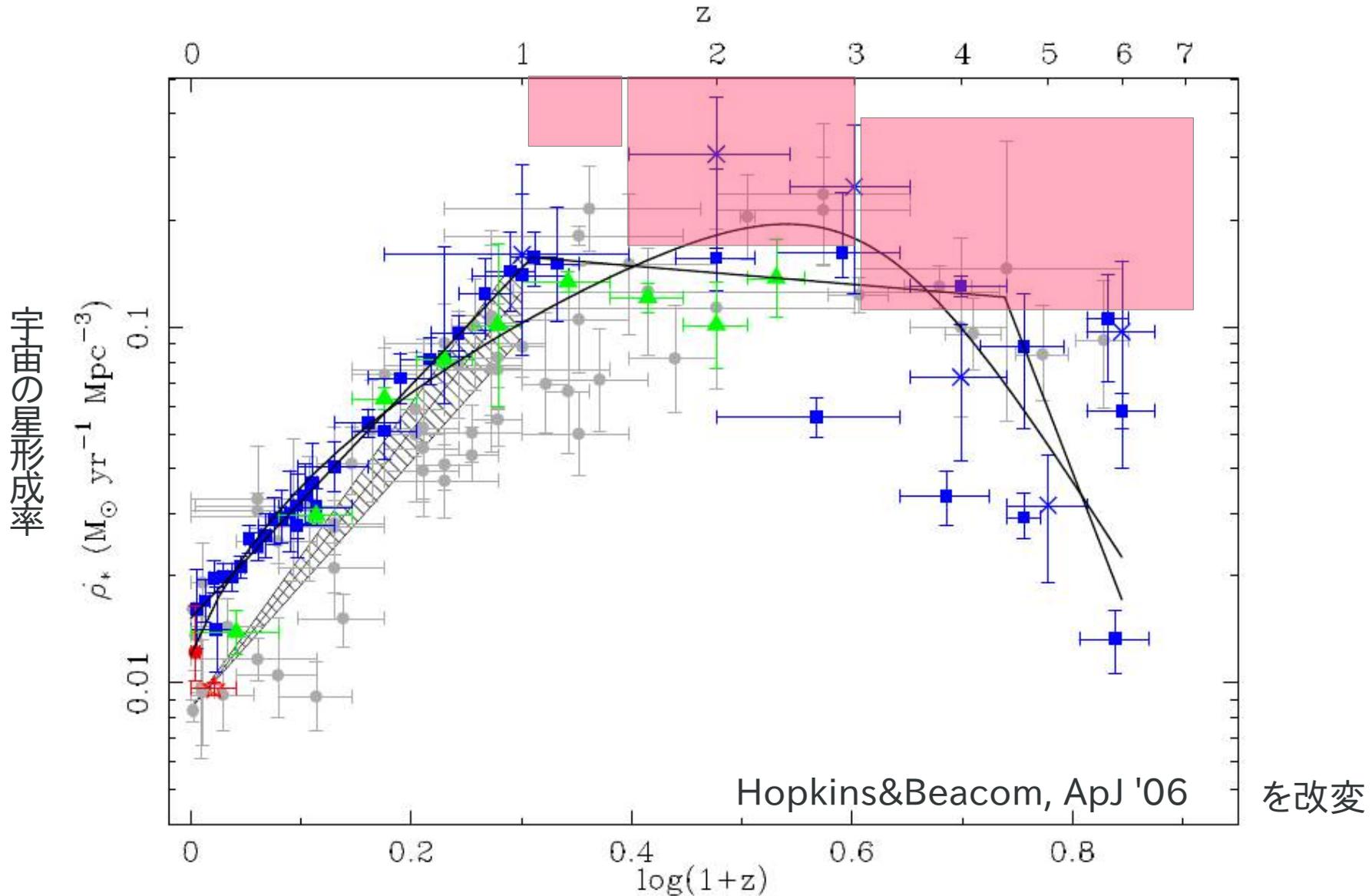
$$\hat{C}_\ell^{t\phi} = \frac{1}{2\ell + 1} \sum \hat{t}_{\ell m} \hat{\phi}_{\ell m}$$

実線は、赤外線背景放射のモデルからの予想であって、**Fitting**ではない。

エラーバーはbin中の分散(x1.2)

Fig. 3

New data points from Planck

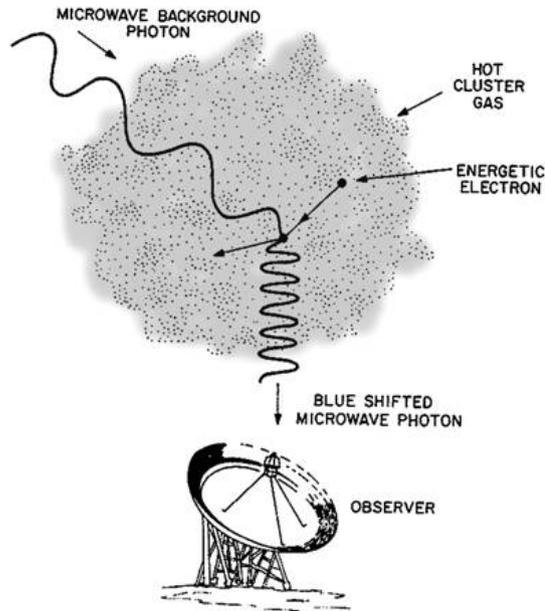


内容

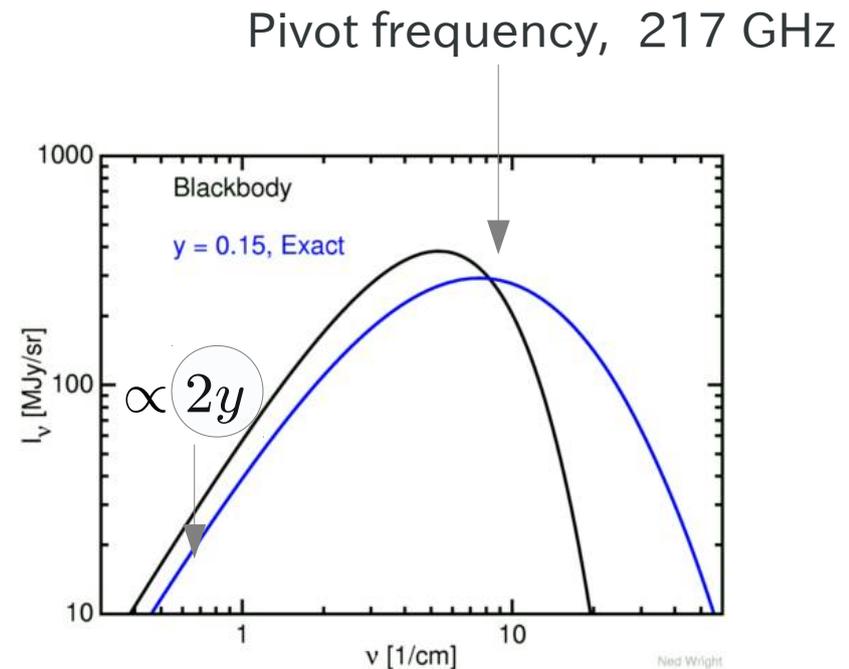
- 宇宙背景輻射温度揺らぎ (CMB) と PLANCK 衛星
 - 宇宙論パラメタの測定
 - CMB レンズ効果とその応用
 - CMB レンズと CMB 相互相関とダークエネルギー
 - CMB レンズと赤外線背景輻射
 - PLANCK による銀河団宇宙論
- CMB 観測の今後とまとめ

SZ effect

- 銀河団にある高温プラズマがCMB光子を逆コンプトン散乱することにより、スペクトルを特徴的に歪める
- 銀河団を検出する強力な手段



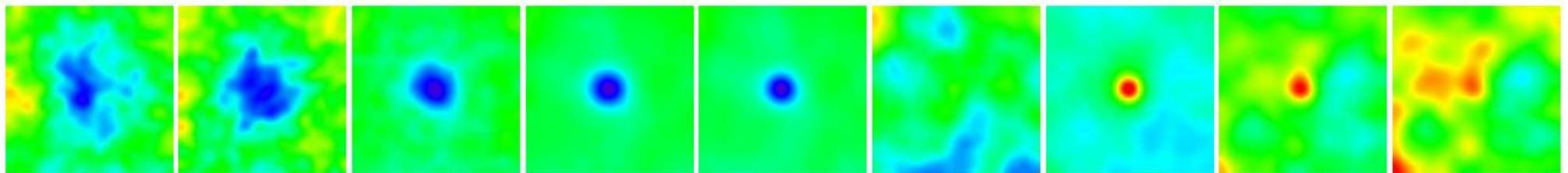
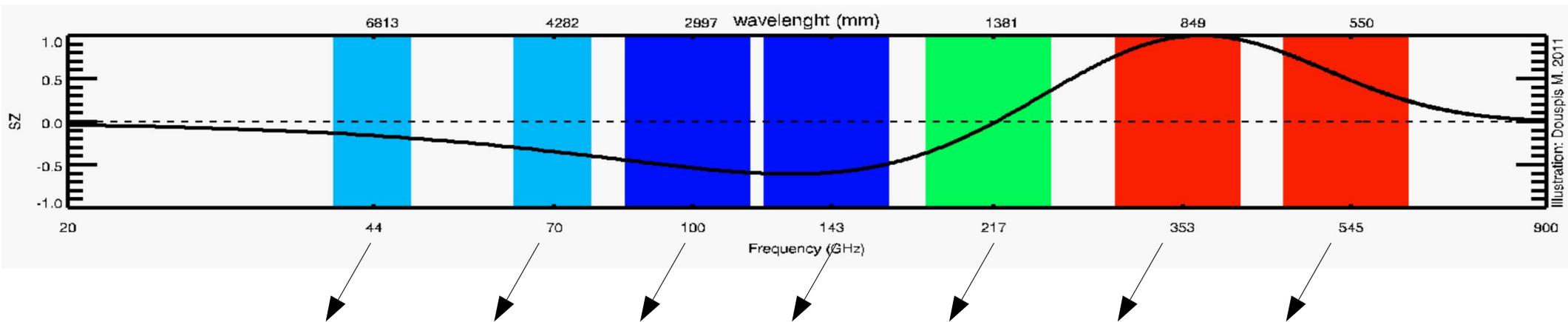
Weisskopf
arXiv:1003.1990



SZ signal from Planck

$$Y = \int y d\Omega = \frac{\sigma_T}{d_A^2} \frac{\int dV n_e k_B T}{m_e c^2}$$

- Total thermal energy \rightarrow unbiased mass-limited selection
- All-sky survey \rightarrow rarest clusters \rightarrow cosmology (DE, ν -mass)
- Can probe high-z clusters



Stacked signal from PLANCK

Samples for cosmology

- A sample of 187 clusters with $S/N > 7$
 - 1227 clusters & candidate
 - 683 previously known
 - 178 new clusters
 - 366 candidates
- Important inputs:
 - Mass function
 - Scaling relation
 - completeness

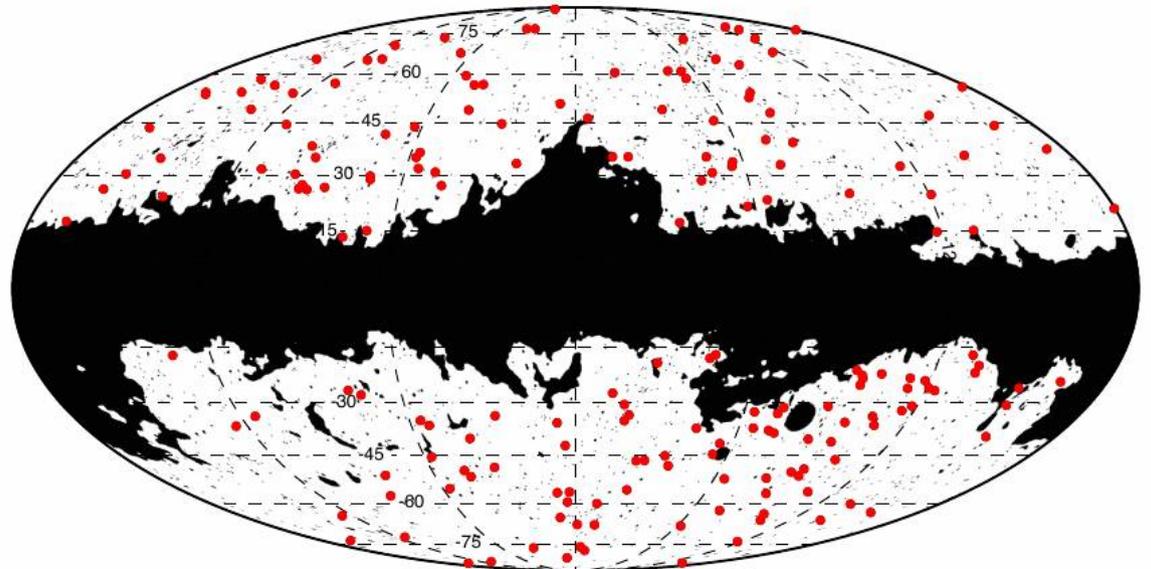
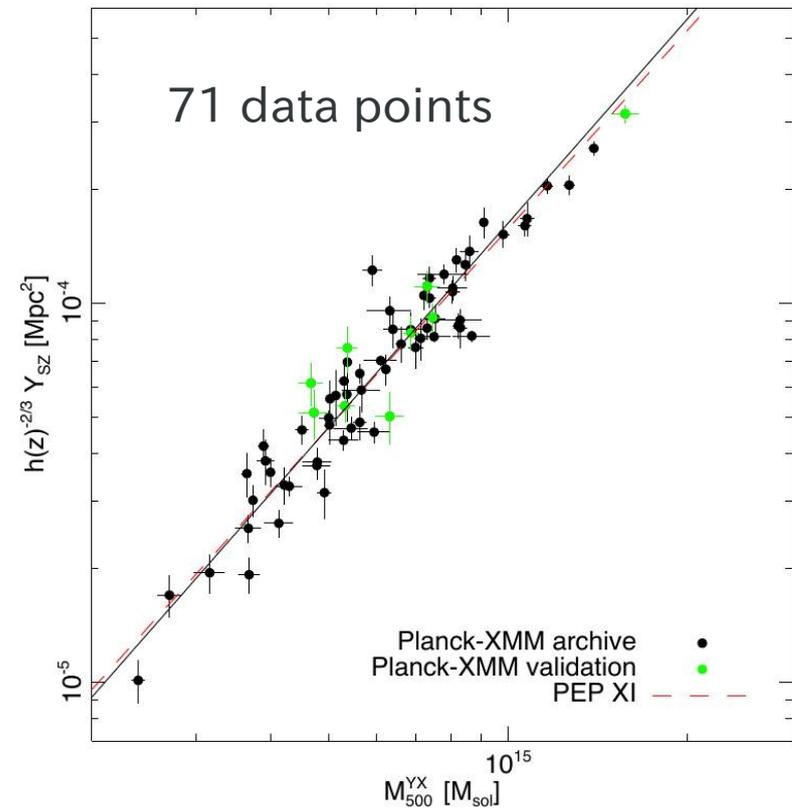
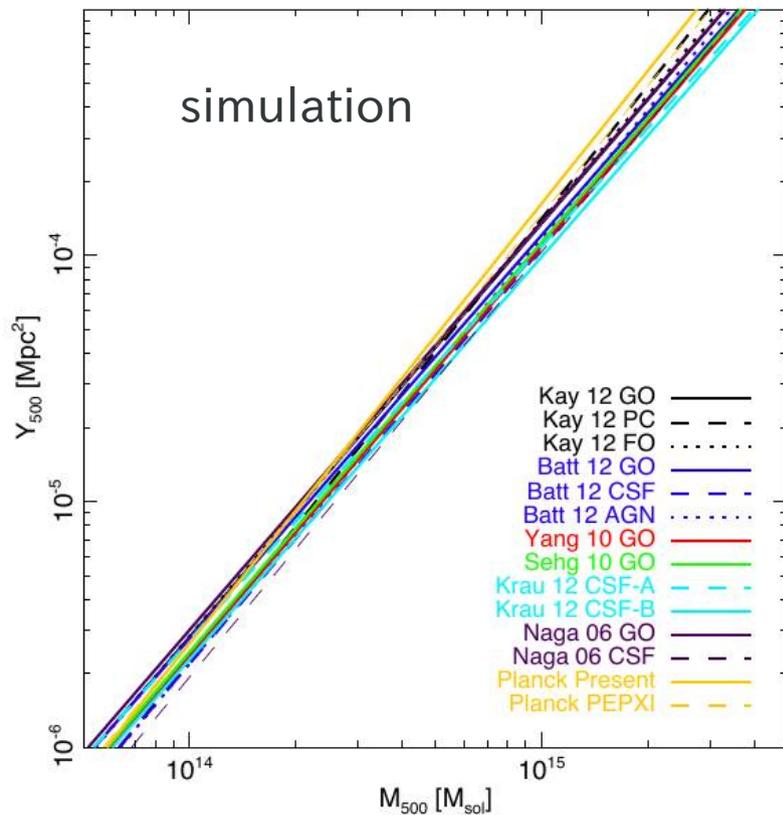


Fig. 1. The distribution on the sky of the *Planck* SZ cluster sub-sample used in this paper, with the 35% mask overlaid.

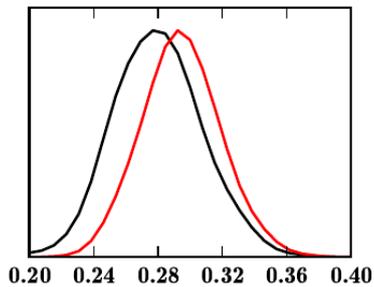
Scaling relation

· fitting to the XMM Newton 71 clusters

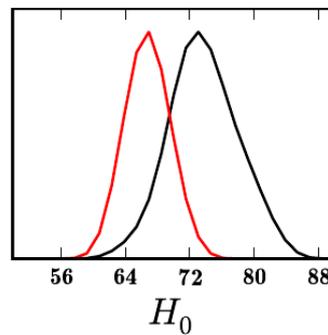
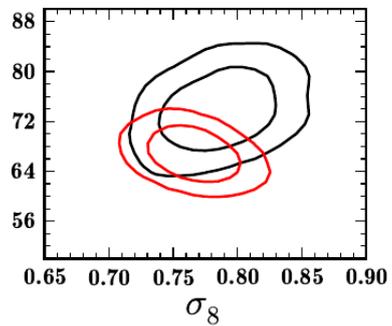
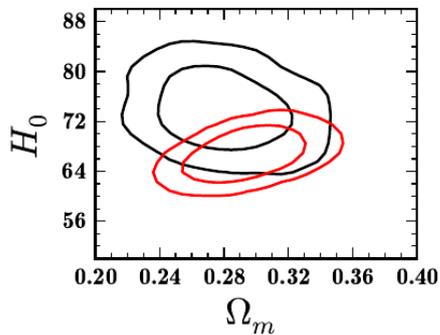
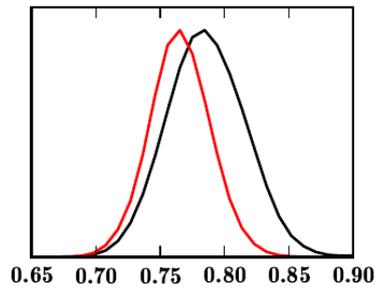
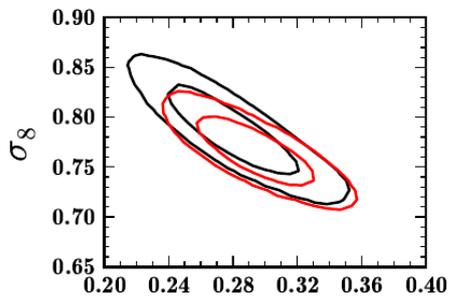
$$E^{-2/3}(z) \left[\frac{D_A^2 Y_{500}}{10^{-4} \text{Mpc}^2} \right] = 10^{-0.19 \pm 0.01} \left(\frac{M_{500}^{Y_x}}{6 \times 10^{14} M_\odot} \right)^{1.79 \pm 0.06}$$



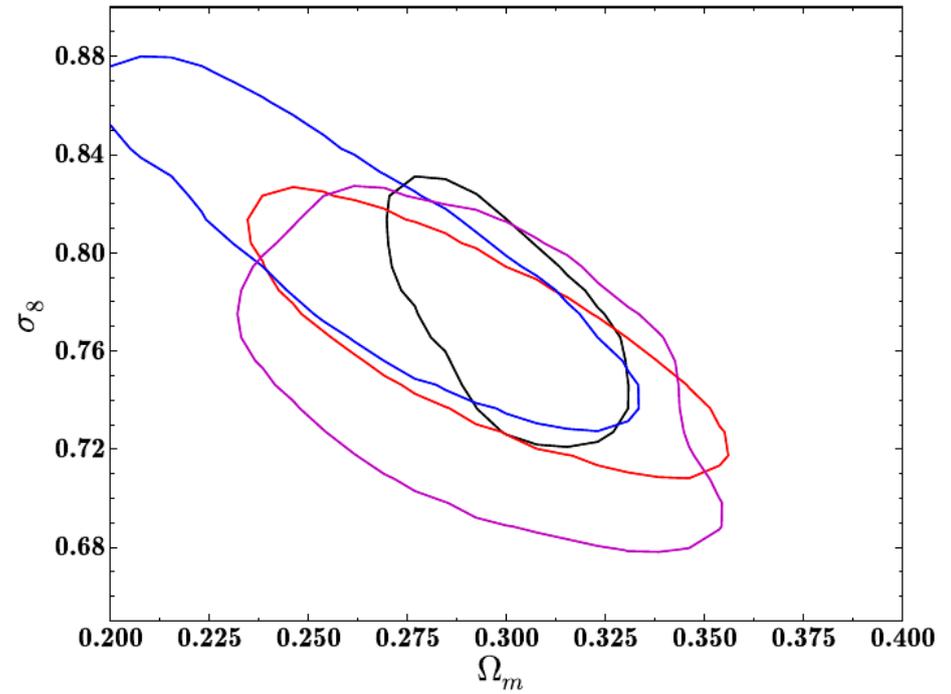
Results



黒: SZ+H0
赤: SZ+BAO



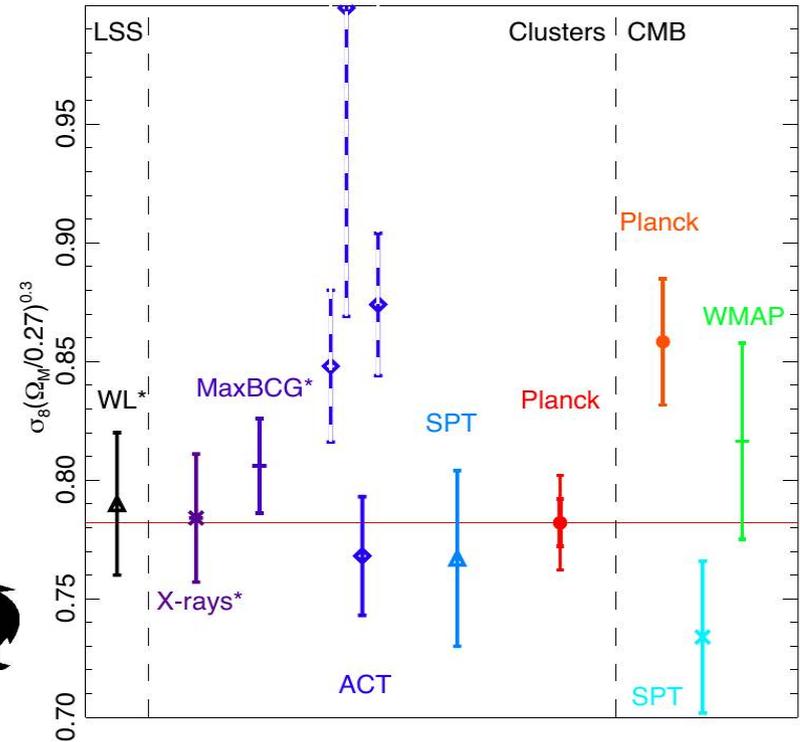
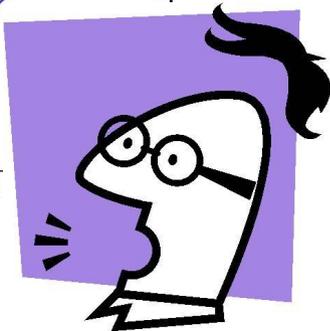
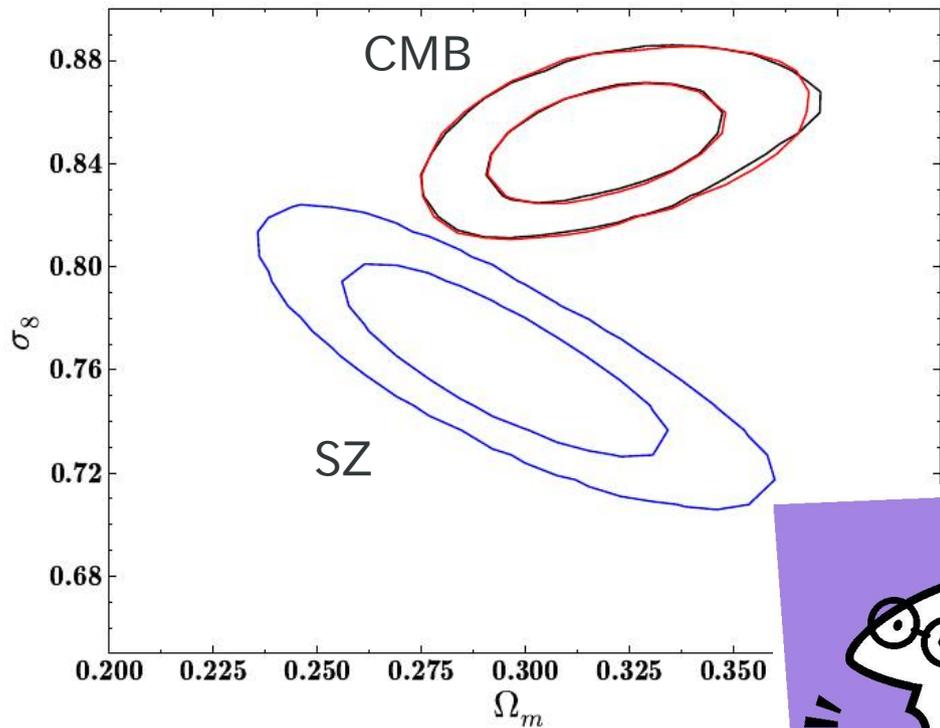
揺らぎの大きさ



ダークマター密度 (割合)

赤: reference(SZ+BAO)
黒: Watson mass func.
紫: mass bias free[0.7-1]
青: z-evolution of scaling

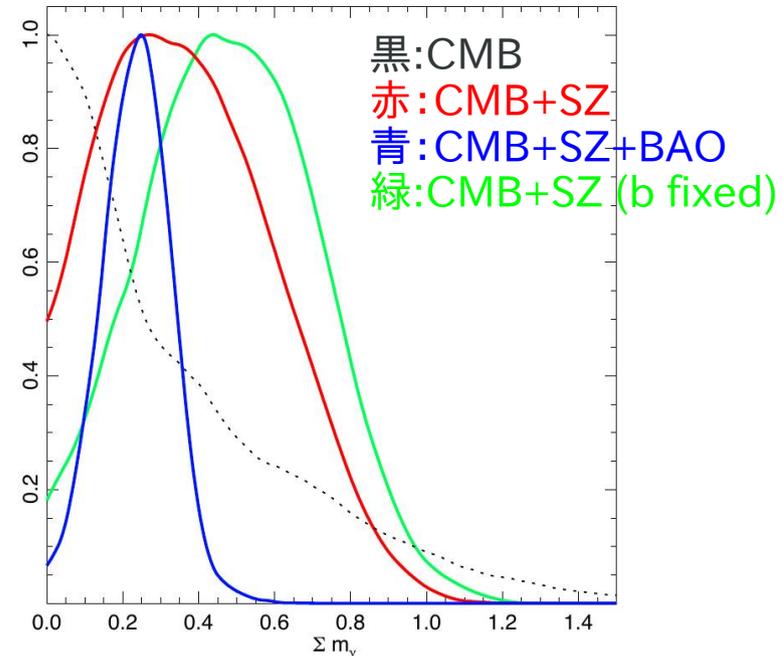
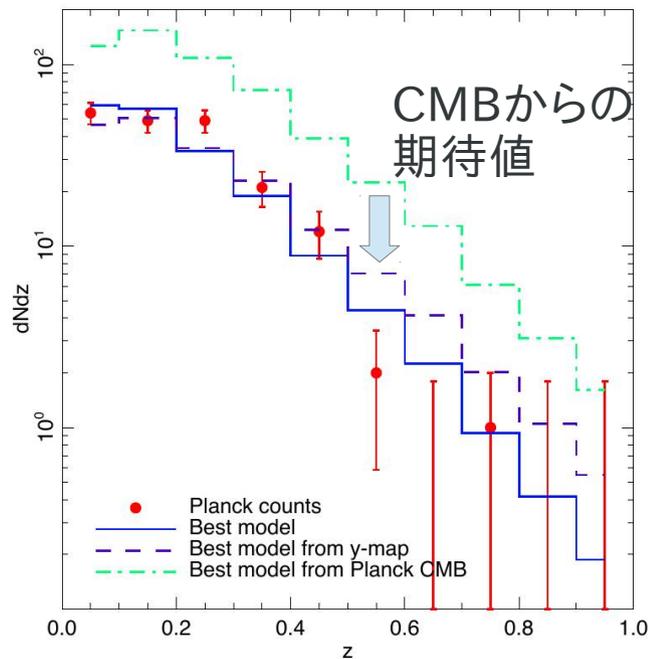
3sigma tension in PLANCK data



*Planckによる銀河団観測の結果は他の銀河団の結果とconsistent
*CMBとSZ clusterの結果を合わせるにはどうしたらよいか？

Non-zero neutrino mass?

- CMBとClusterの結果を合わすには?
 - CMBの方で Ω_m が15%程度大きい (精密宇宙論?)
 - 銀河団質量推定を45%間違っている (ありそうもない)
 - 2/3程度の銀河団を見失っている (ありえない)
 - ニュートリノ質量を0.2eV程度とする (わからない)

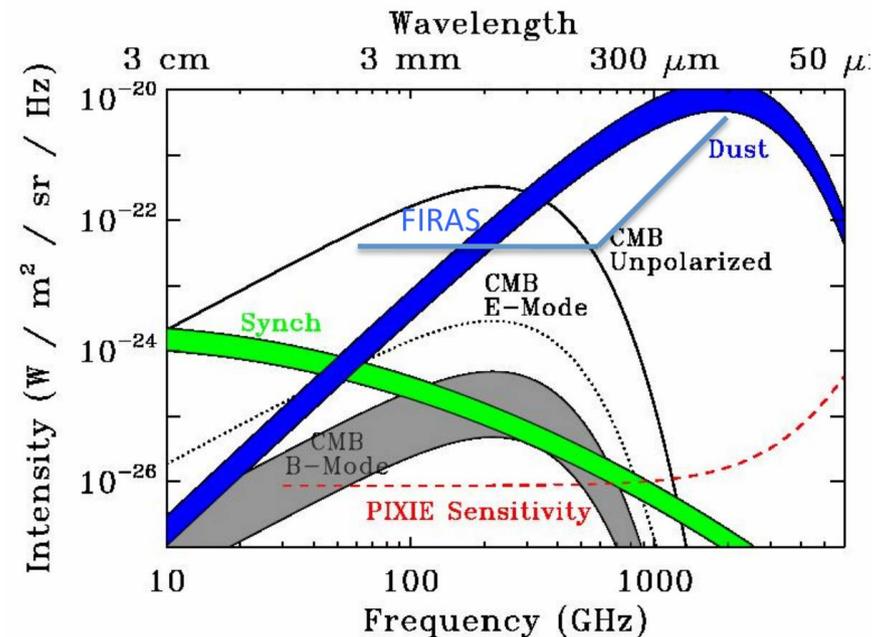
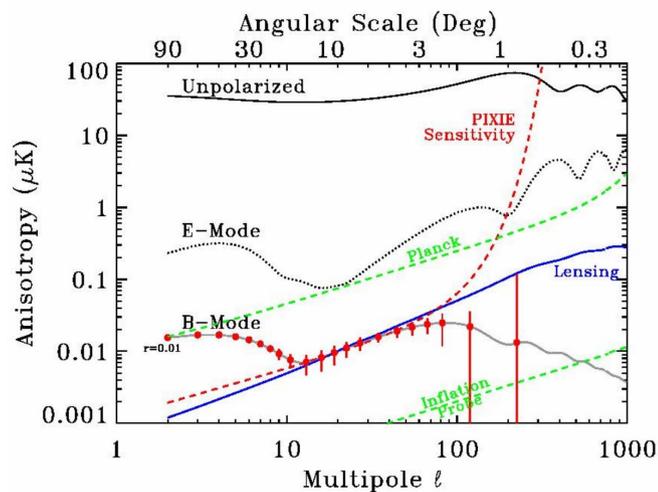


内容

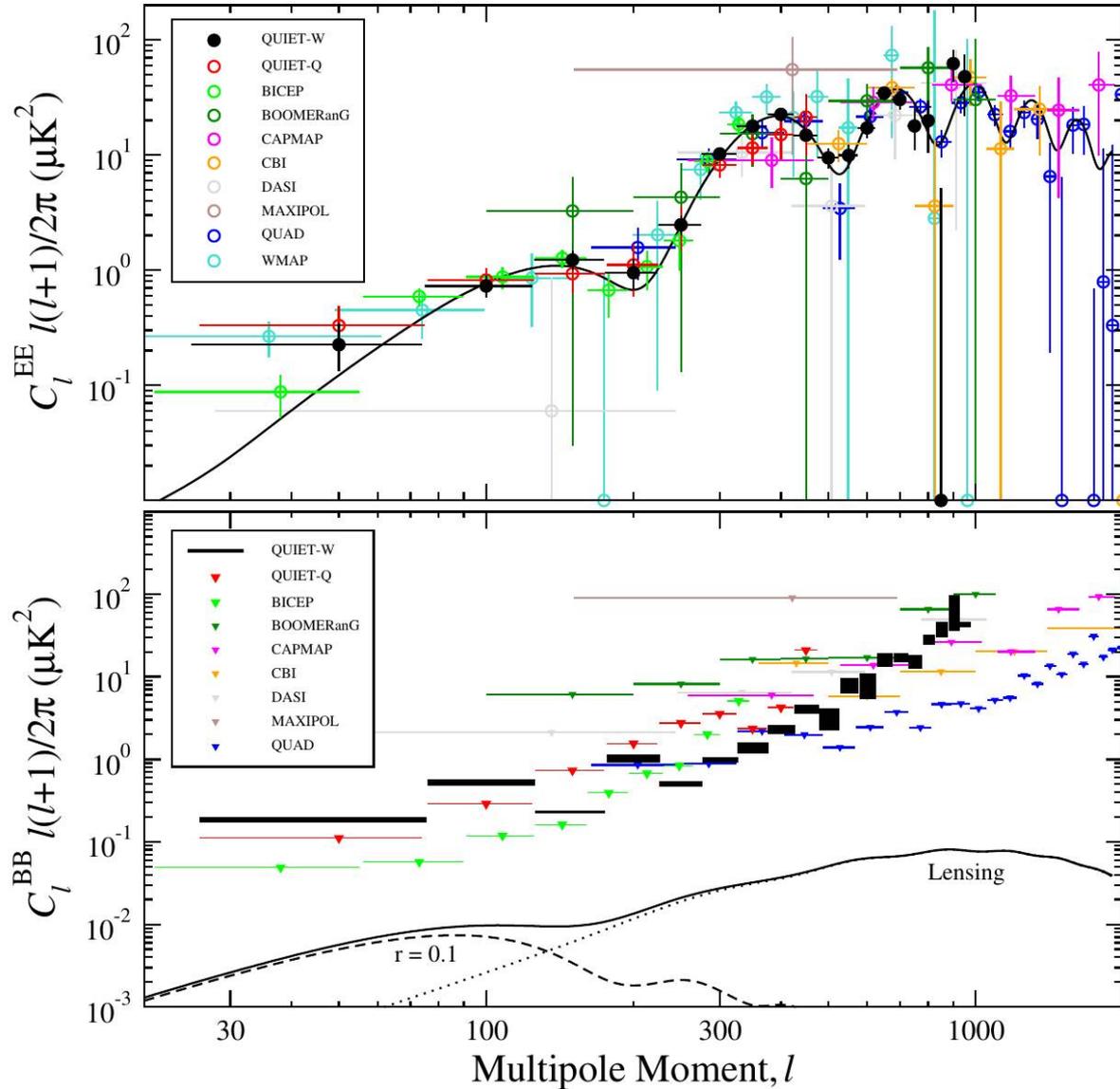
- 宇宙背景輻射温度揺らぎ (CMB) と PLANCK 衛星
 - 宇宙論パラメタの測定
 - CMB レンズ効果とその応用
 - CMB レンズと CMB 相互相関とダークエネルギー
 - CMB レンズと赤外線背景輻射
 - PLANCK による銀河団宇宙論
- CMB 観測の今後とまとめ

CMB 将来計画(二つの方向性)

- 初期重力波によるB-mode 偏光
 - Spider(2013-), EVEX(2013-), QUIET, PolarBeaR, QUBIC(2014-), QUIJOTE(2014-), PLANCK(-2014) LiteBird(?), COrE(?), EPIC(?), ... and more!
- Spectrometer
 - PRISM(?), PIXIE(?)



偏光観測

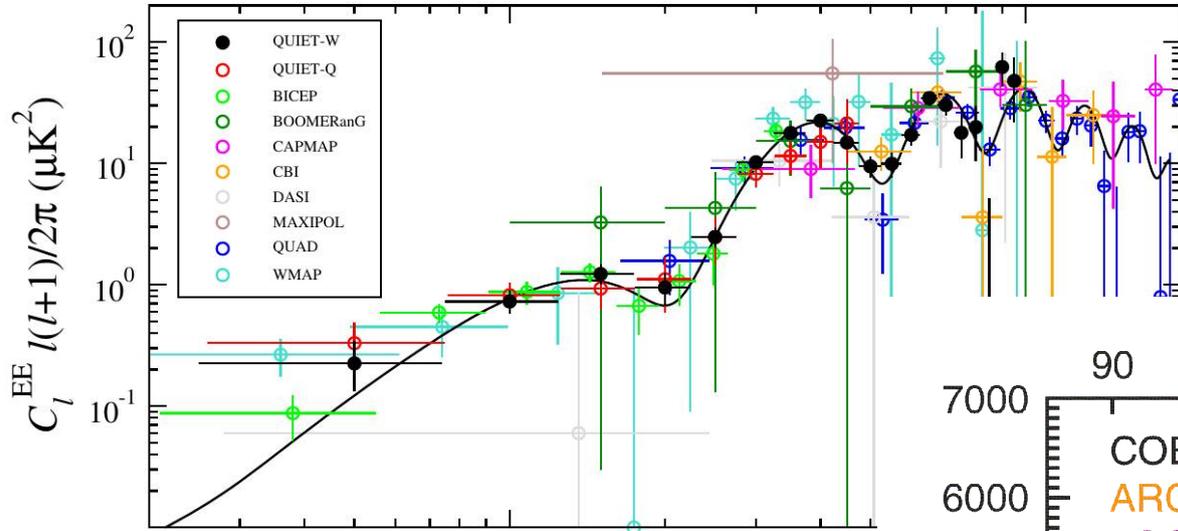


E-modeは検出されている。

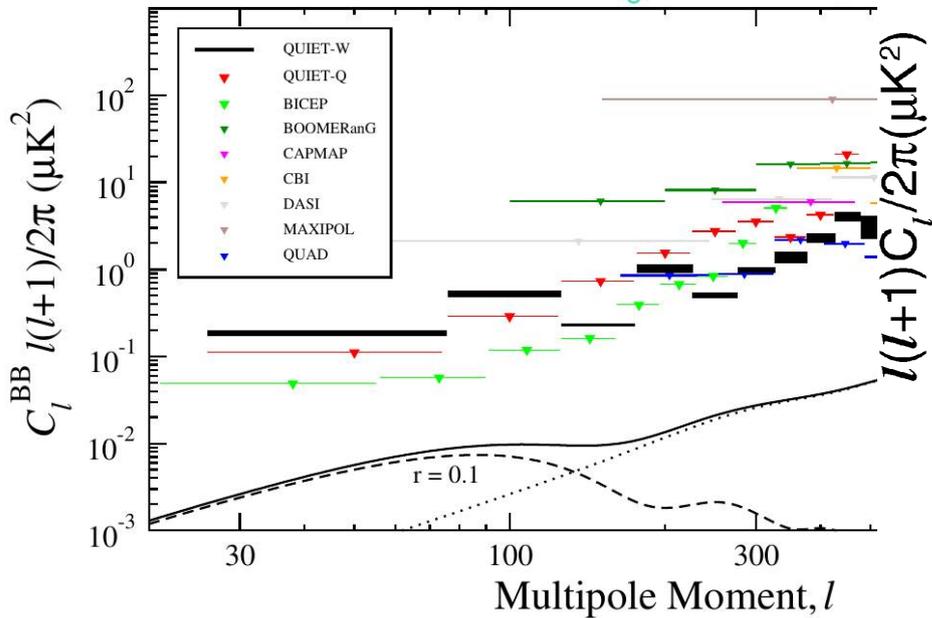
初期密度揺らぎ起源

初期重力波起源

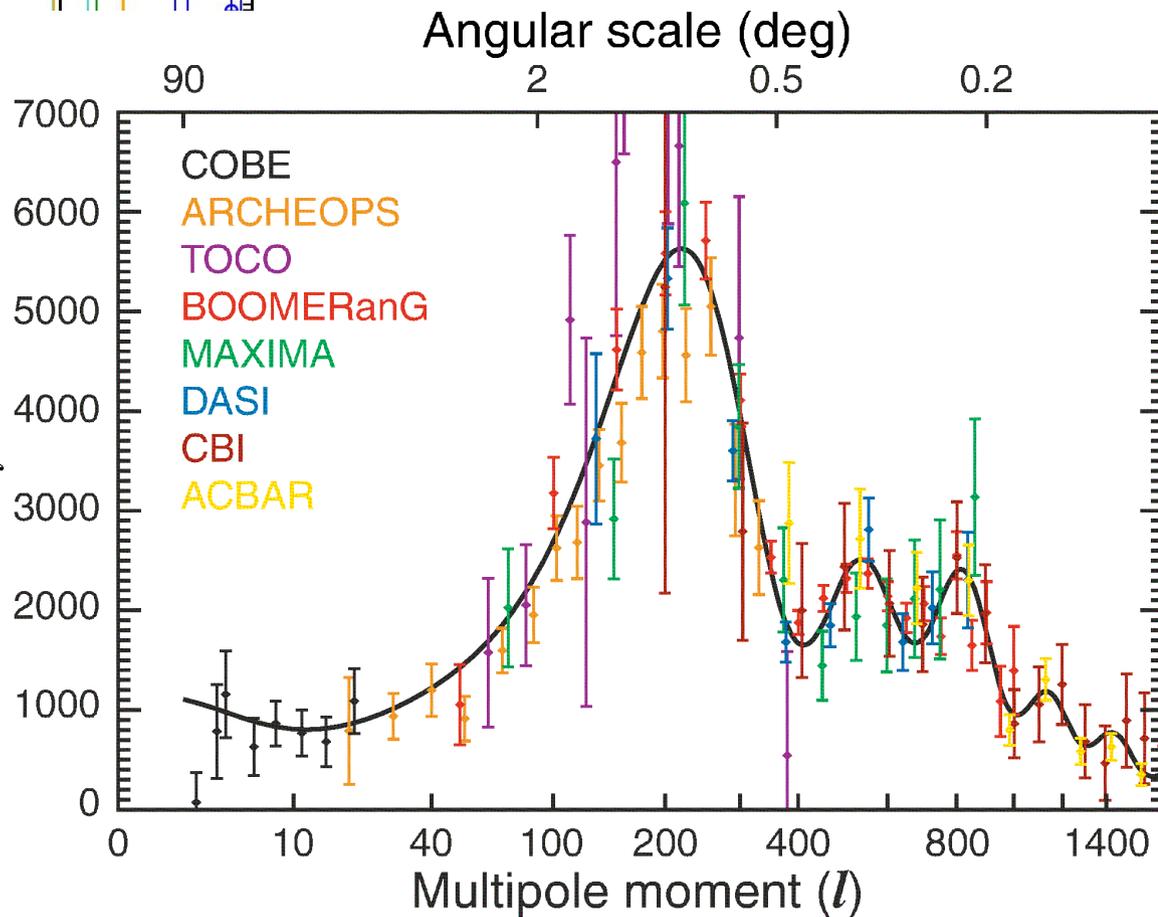
偏光観測



E-modeは検出されている。
B-modeはまだ(但, see 1307.5830)



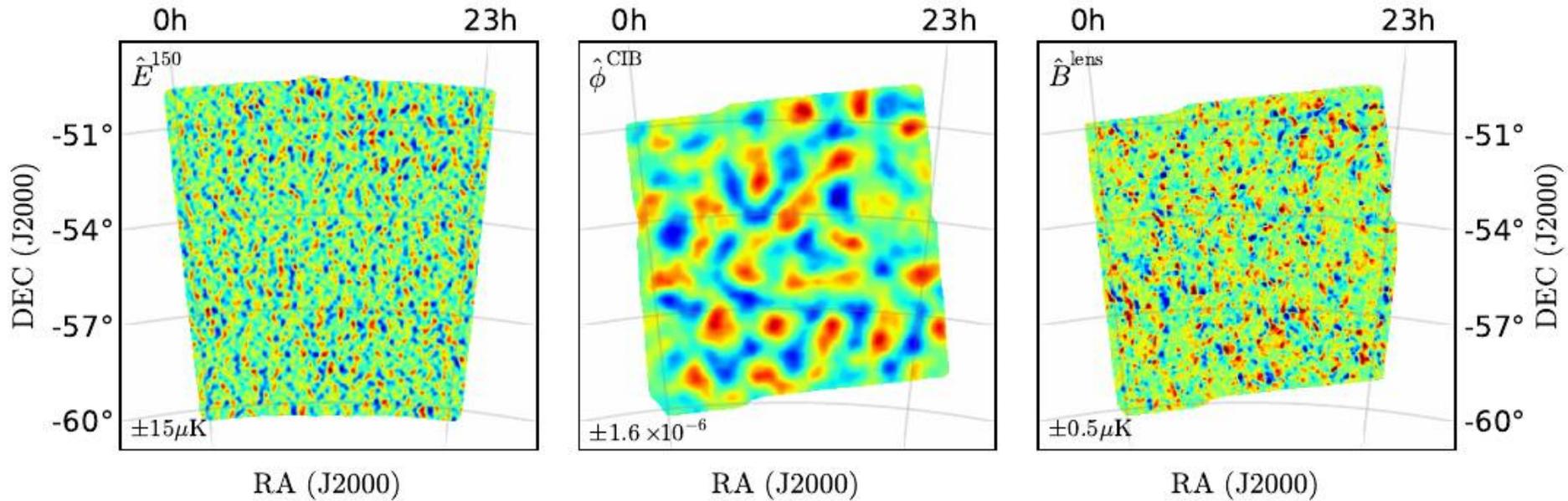
QUIET Collaboratic



B-mode 観測一番のり--- SPTPol

arxiv:1307.5830

$$B^{\text{lens}}(\vec{l}_B) = \int d^2\vec{l}_E \int d^2\vec{l}_\phi W^\phi(\vec{l}_E, \vec{l}_B, \vec{l}_\phi) E(\vec{l}_E) \phi(\vec{l}_\phi), \quad (1)$$



SPTpol E-mode

Herschel (500 μm)
Lensing mapの代わり

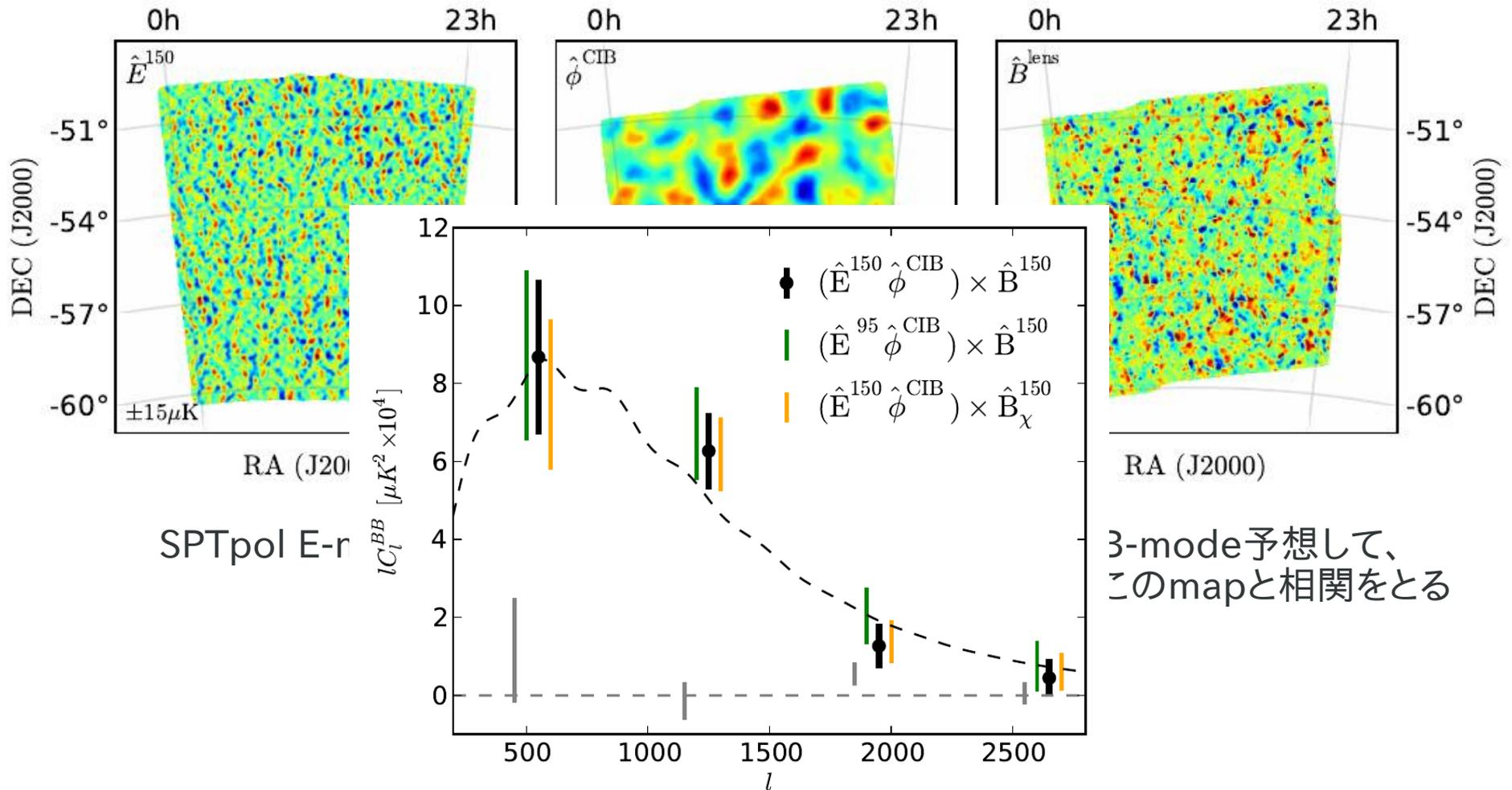
→ B-mode予想して、
このmapと相関をとる

B-mode 観測—番のり-SPTPol

arxiv:1307.5830

$$B^{\text{lens}}(\vec{l}_B) = \int d^2\vec{l}_E \int d^2\vec{l}_\phi W^\phi(\vec{l}_E, \vec{l}_B, \vec{l}_\phi) E(\vec{l}_E) \phi(\vec{l}_\phi),$$

(1)



7.7 σ 検出

PRISM white paper より

<http://www.prism-mission.org>

- PRISM-- (a)cluster survey (b)CIB (c)B-mode (d)spectral distortion (e)Galactic AstroPhys
 - (a) $\gtrsim 10^{14} M_{\odot}$ のクラスターをすべてのredshiftで
 - $z=2-3$ とかでも見つかる
 - $w_0 = -1 \pm 0.003$
 - K-SZでlarge scale velocity field
 - diffuse-SZ \rightarrow cosmic web
 - (d)黒体輻射からのわずかなずれを検出する
 - reionization
 - decaying dark matter, small scale density fluctuations

まとめ

- PLANCK衛星による精密な宇宙論パラメタ
 - 細かいスケールまで観測した。WMAP以前の宇宙論モデルと無矛盾、来年には偏光データリリース
- CMB観測の新しいツール – CMB lensing
 - $>25\sigma$ 検出, 一般相対論OK, full sky lensing map
 - CMB lensing x ISW – ダークエネルギーのシグナル
 - CMB lensing x CIB – 宇宙の星形成史の新しい制限
- Planck SZ 銀河団宇宙論
 - サンプルは十分。今後の鍵は質量推定
 - Planck internal tension (3σ) … neutrino mass?
- 今後も楽しみ
 - B-mode偏光(重力波)、詳細な分光観測