

WMAP 5th yearの報告

高橋慶太郎

京都大学基礎物理学研究所

2008年4月15日@宇宙論ゼミ

目次

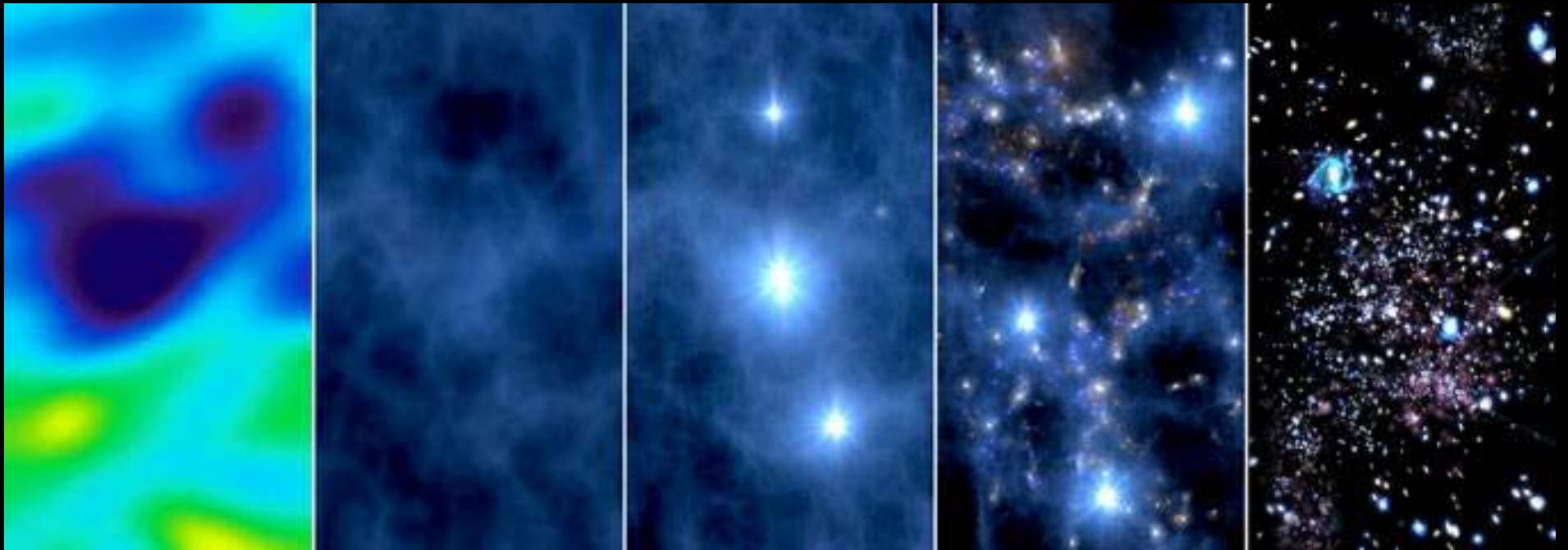
- 1、宇宙背景放射の基礎
- 2、minimal Λ CDM model
- 3、extended Λ CDM model
- 4、インフレーションへの示唆
- 5、将来計画とまとめ

1、宇宙背景放射の基礎

宇宙論的摂動

摂動 = 一様等方からのずれ

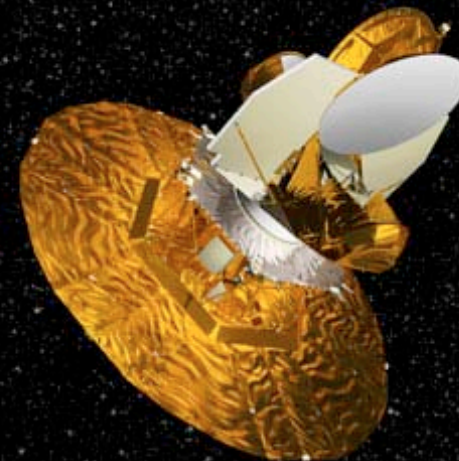
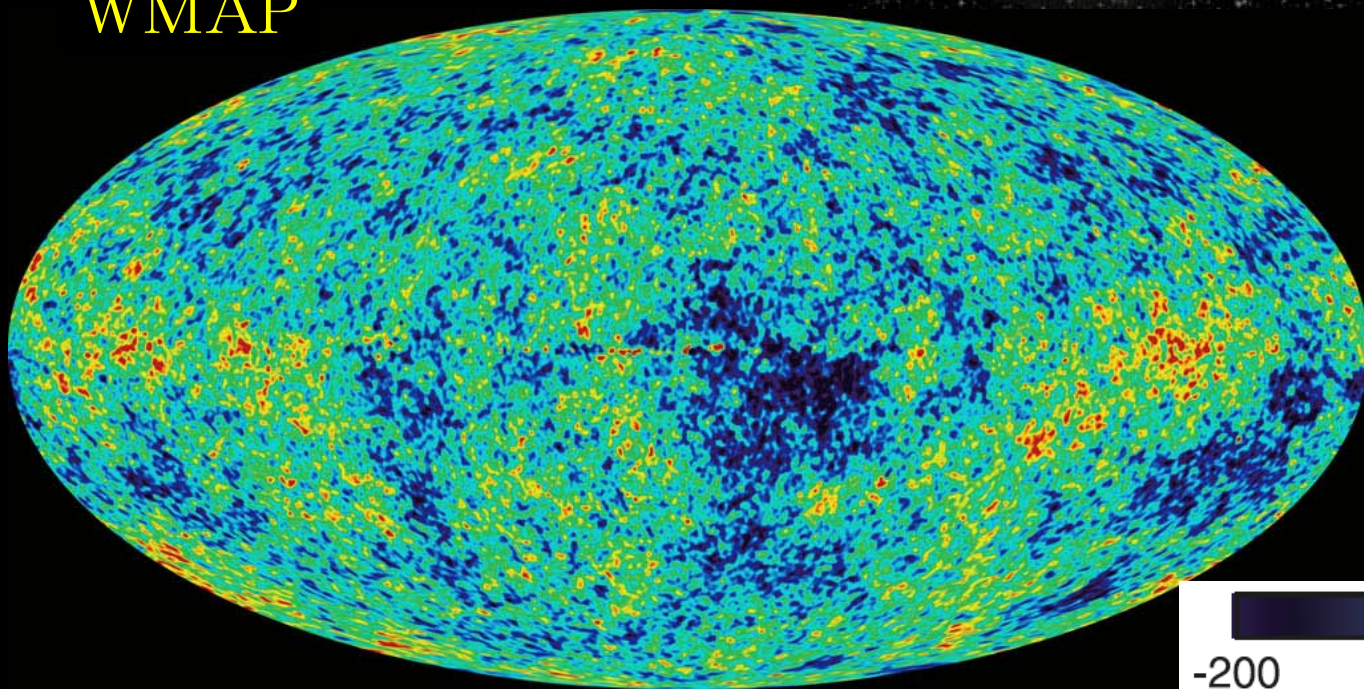
- ・ インフレーションで量子的に生成
→ 密度ゆらぎ・重力波
- ・ その後、線形に発展
→ CMB・構造形成



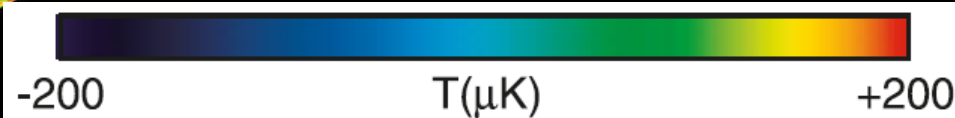
宇宙背景放射

宇宙背景放射の
温度に10万分
の1のゆらぎ

WMAP

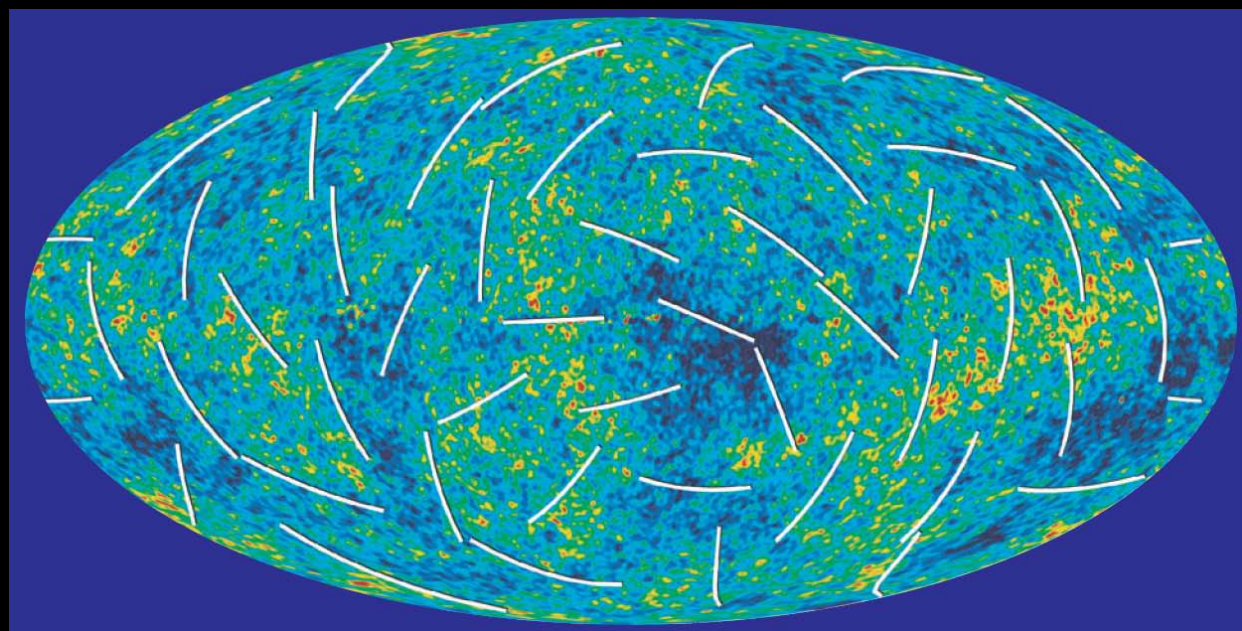
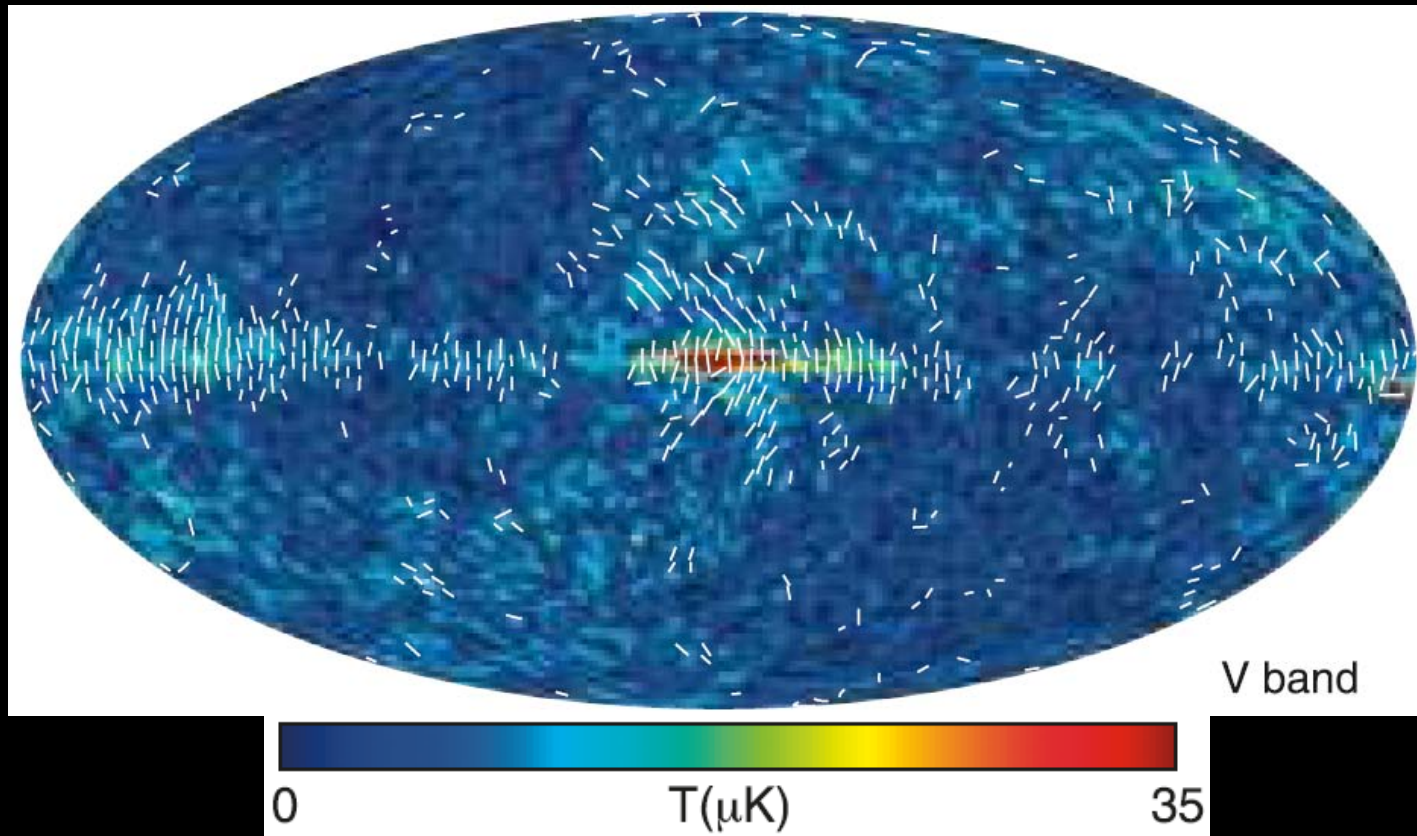


精密宇宙論
の始まり



偏光

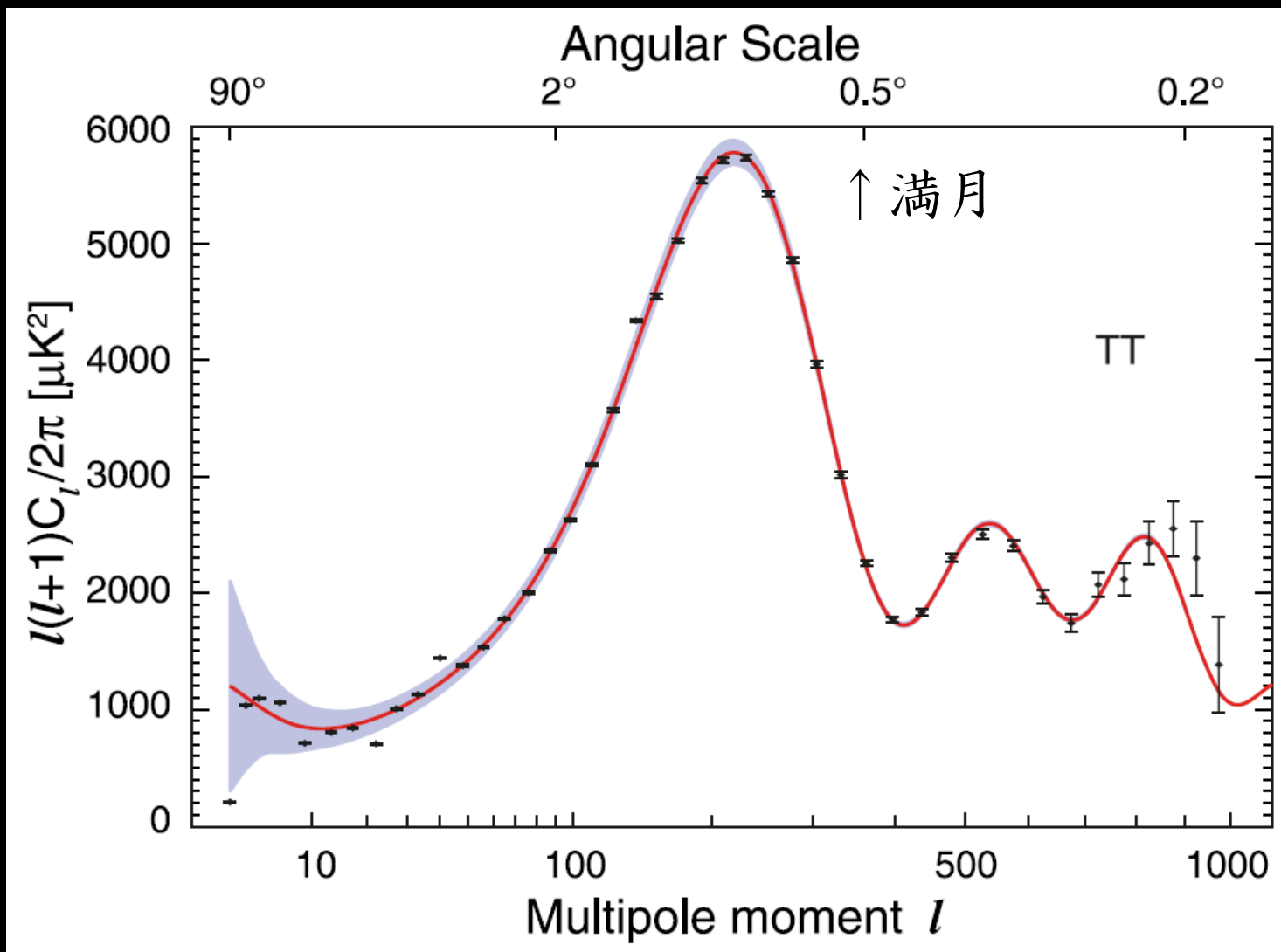
温度ゆらぎよりもっと小さい偏光ゆらぎが存在する。



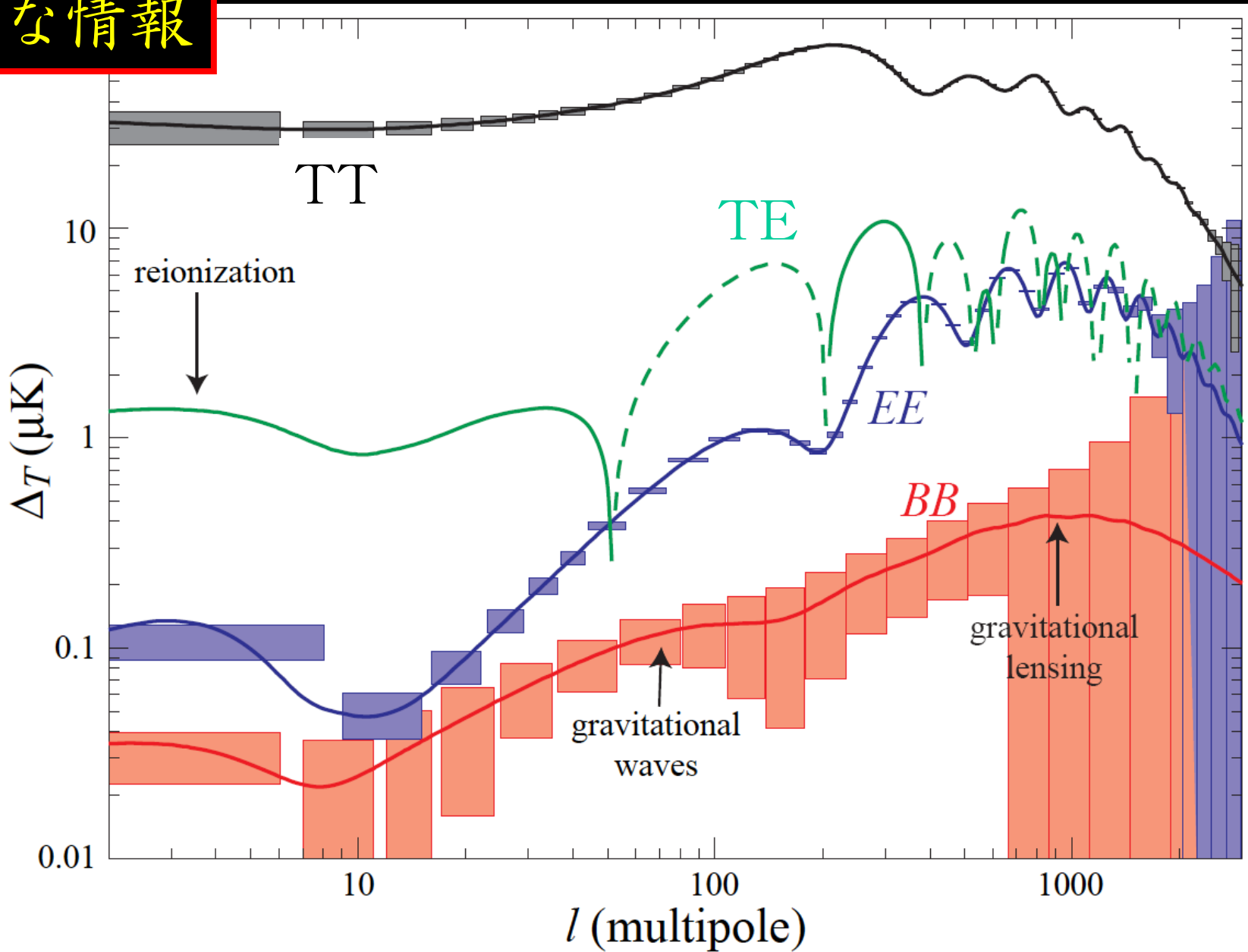
温度ゆらぎ

$$\Theta(\hat{\mathbf{n}}) = \frac{T(\hat{\mathbf{n}}) - \bar{T}}{\bar{T}} = \sum_{lm} \Theta_{lm} Y_{lm}(\hat{\mathbf{n}})$$

$$\langle \Theta_{lm}^* \Theta_{l'm'} \rangle = \delta_{ll'} \delta_{mm'} C_l$$



膨大な情報



いろいろな特徴にいろいろな物理、いろいろな情報

目標

とりあえず温度ゆらぎをある程度理解する。
再結合前後のプラズマの音波振動でたいていは理解できる。

心に留めておくべき数字

$$\frac{\rho_m}{\rho_r} = 3.6 \left(\frac{\Omega_m h^2}{0.15} \right) \left(\frac{a}{10^{-3}} \right)$$

$$R \equiv \frac{(\rho_b + p_b)v_b}{(\rho_\gamma + p_\gamma)v_\gamma} = \frac{\rho_b + p_b}{\rho_\gamma + p_\gamma} = \frac{3\rho_b}{4\rho_\gamma}$$
$$\approx 0.6 \left(\frac{\Omega_b h^2}{0.02} \right) \left(\frac{a}{10^{-3}} \right),$$

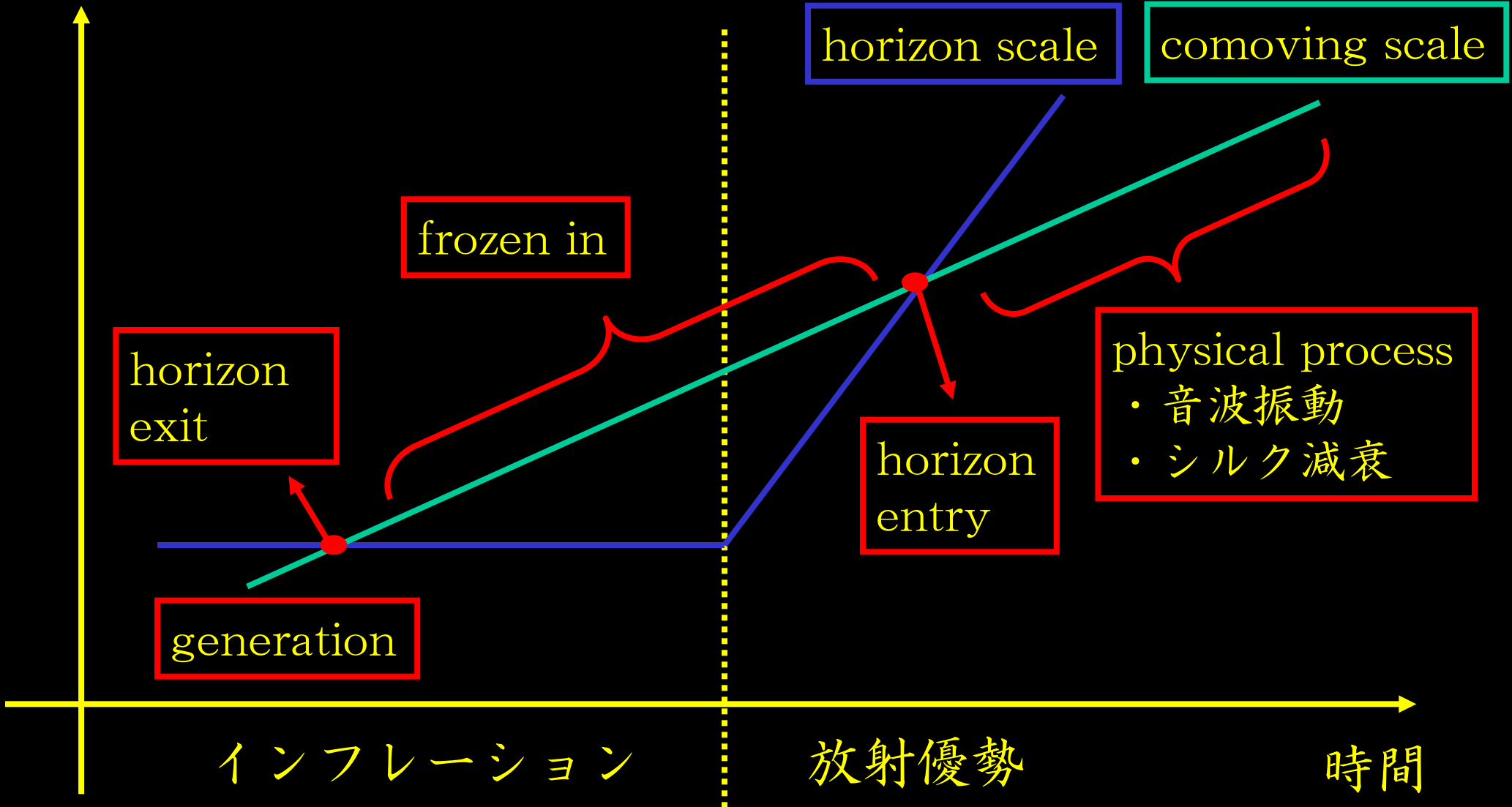
photon mean free path ~ 2.5 Mpc

horizon scale ~ 100 Mpc

今回は絵とグラフだけで

ゆらぎの時系列

大きさ



ゆらぎの定式化

登場人物と解くべき方程式

● インフレーション中のゆらぎの生成

- ・ インフラトン
- ・ 重力

曲がった時空での量子ゆらぎ

● インフレーション後の発展

- ・ 光子
- ・ ニュートリノ
- ・ バリオン
- ・ ダークマター
- ・ 重力

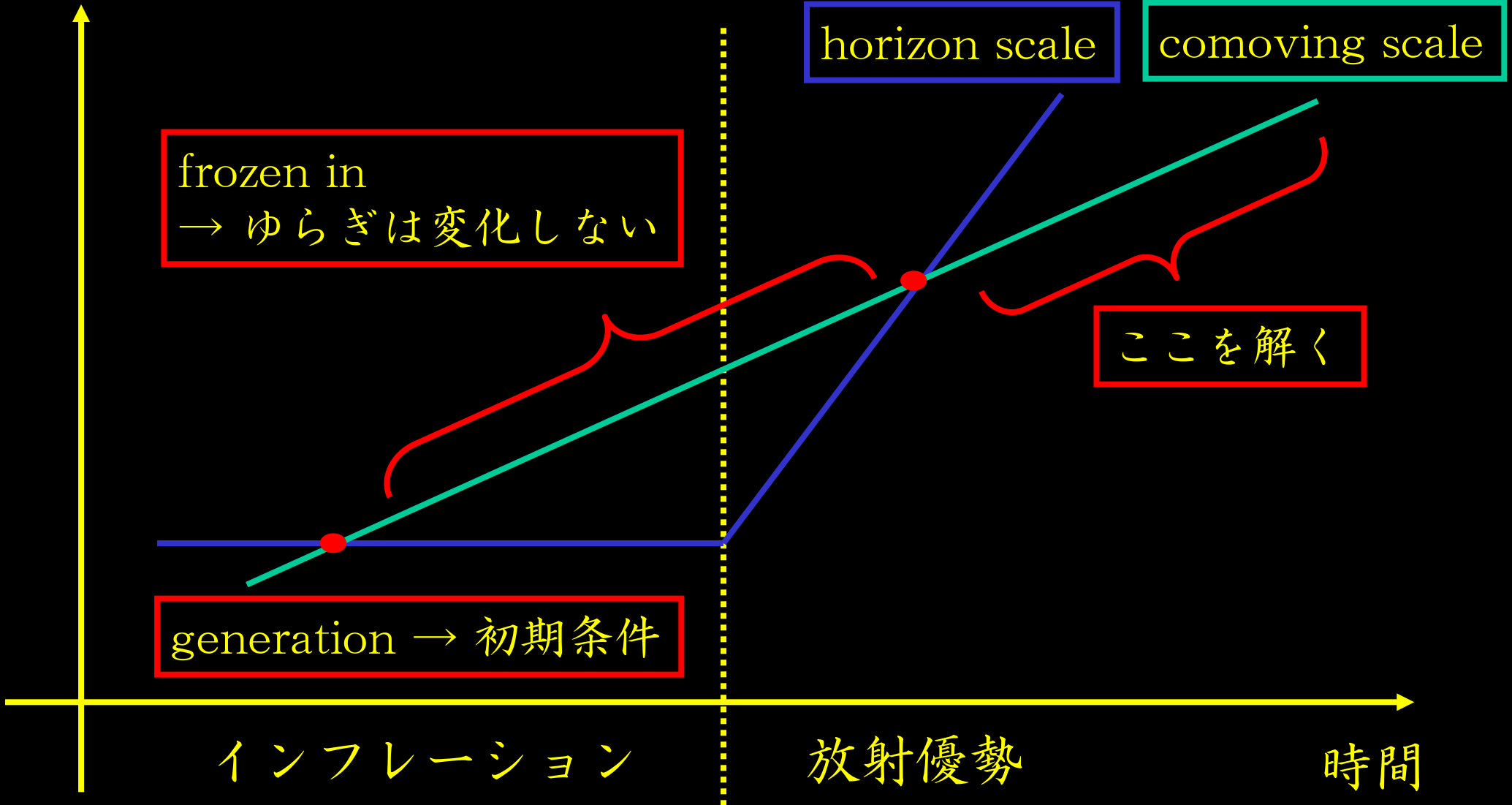
一般相対論的ボルツマン方程式

一般相対論的流体方程式

これらを線形化して解く

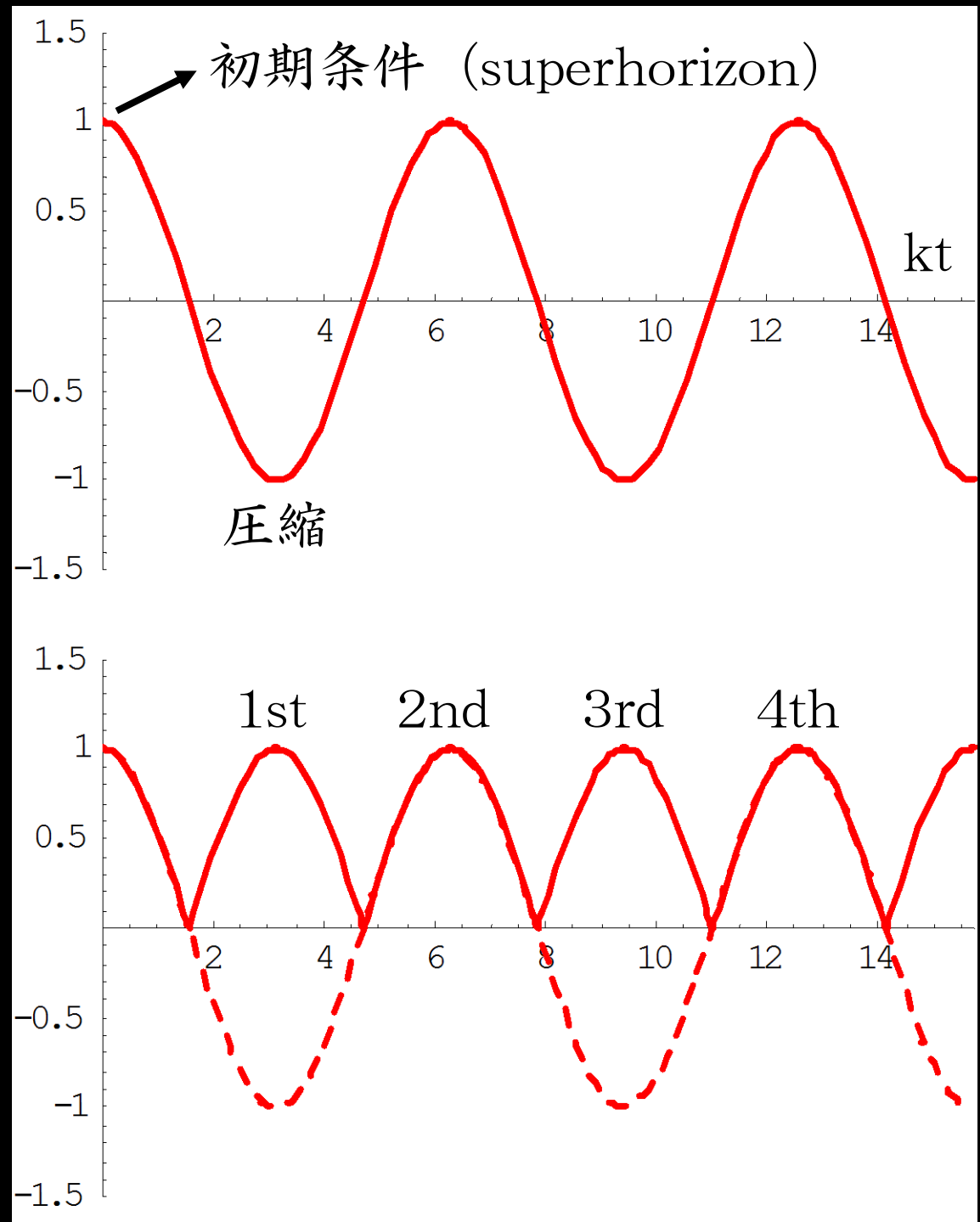
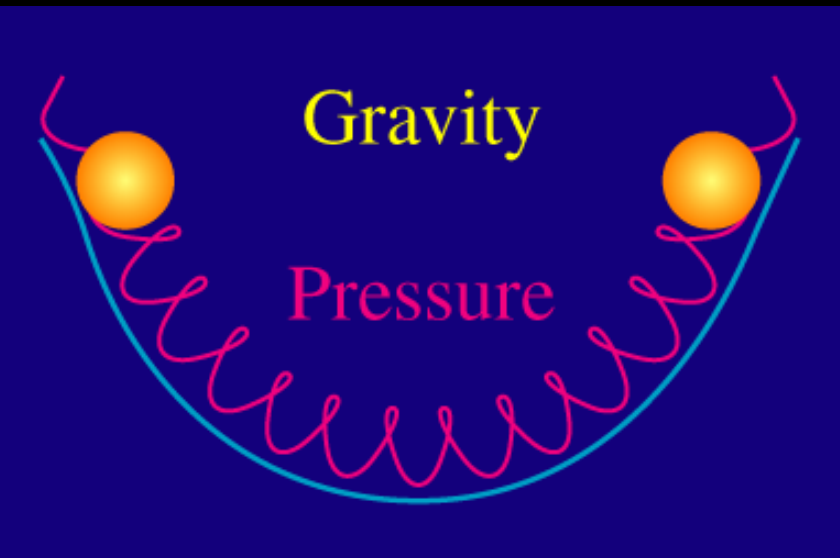
ゆらぎの時系列

大きさ



音波振動

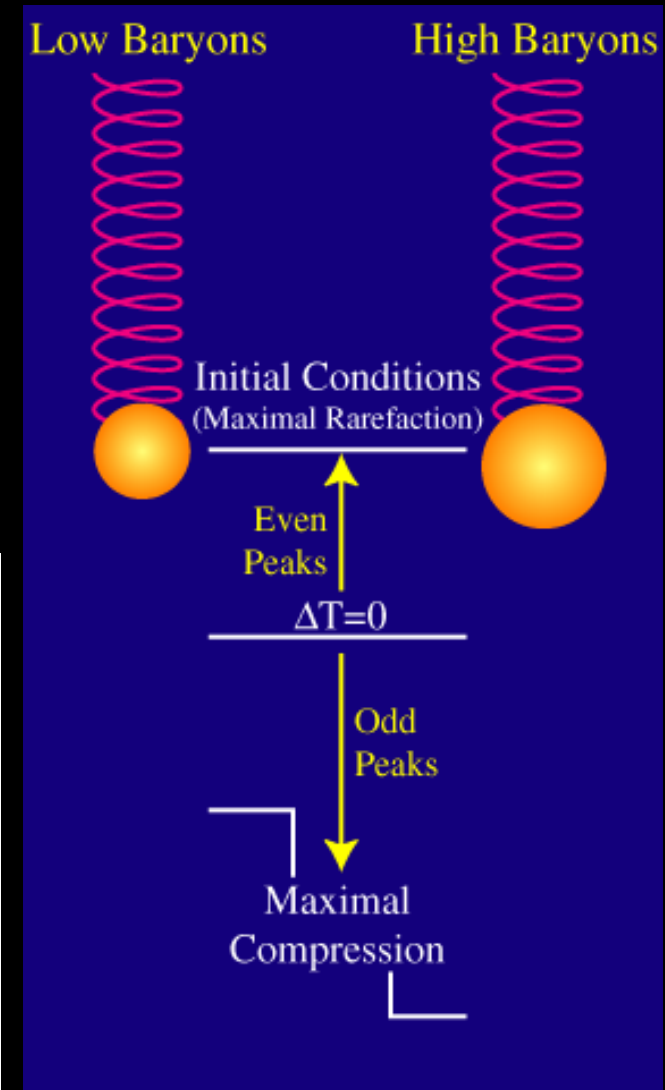
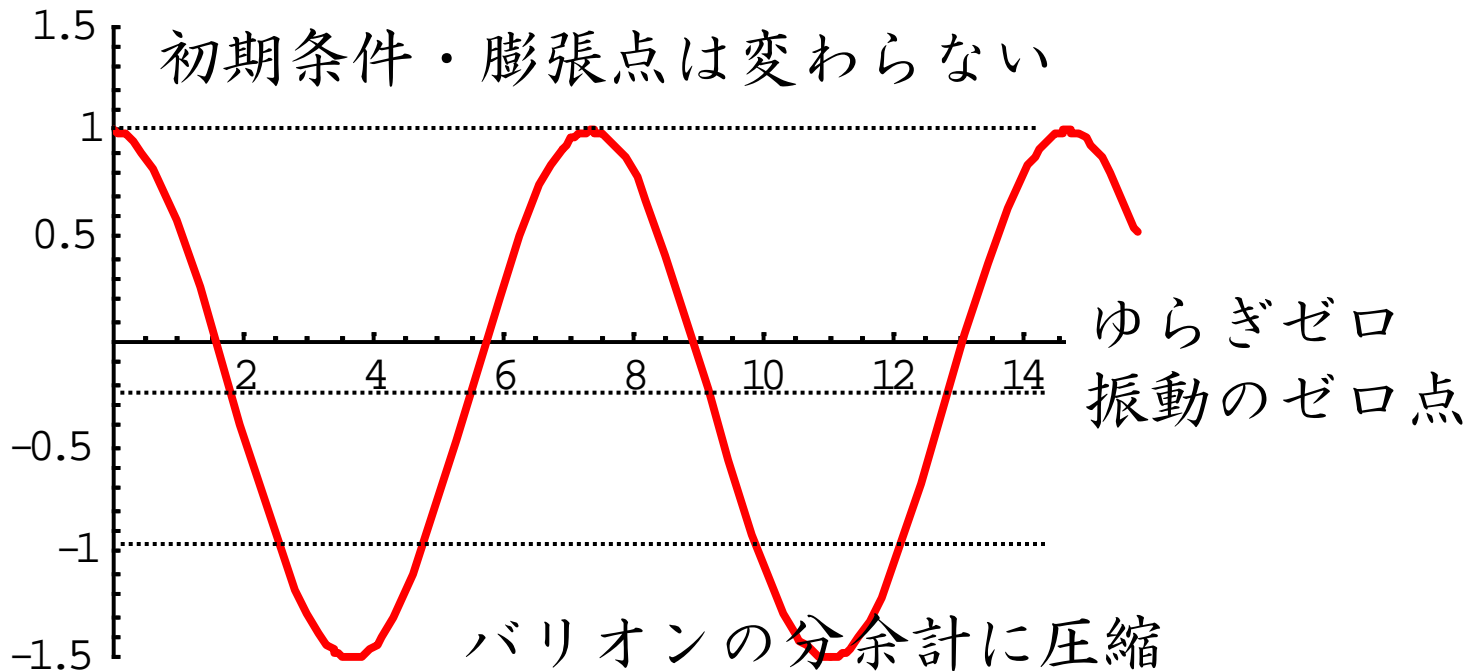
まずは単なる音波。
horizonに入るまでは
引き伸ばされたまま。
horizonに入ると収縮
してガスは圧縮される。
観測量は符号によらない
ので最初の圧縮点が
first peakになる。



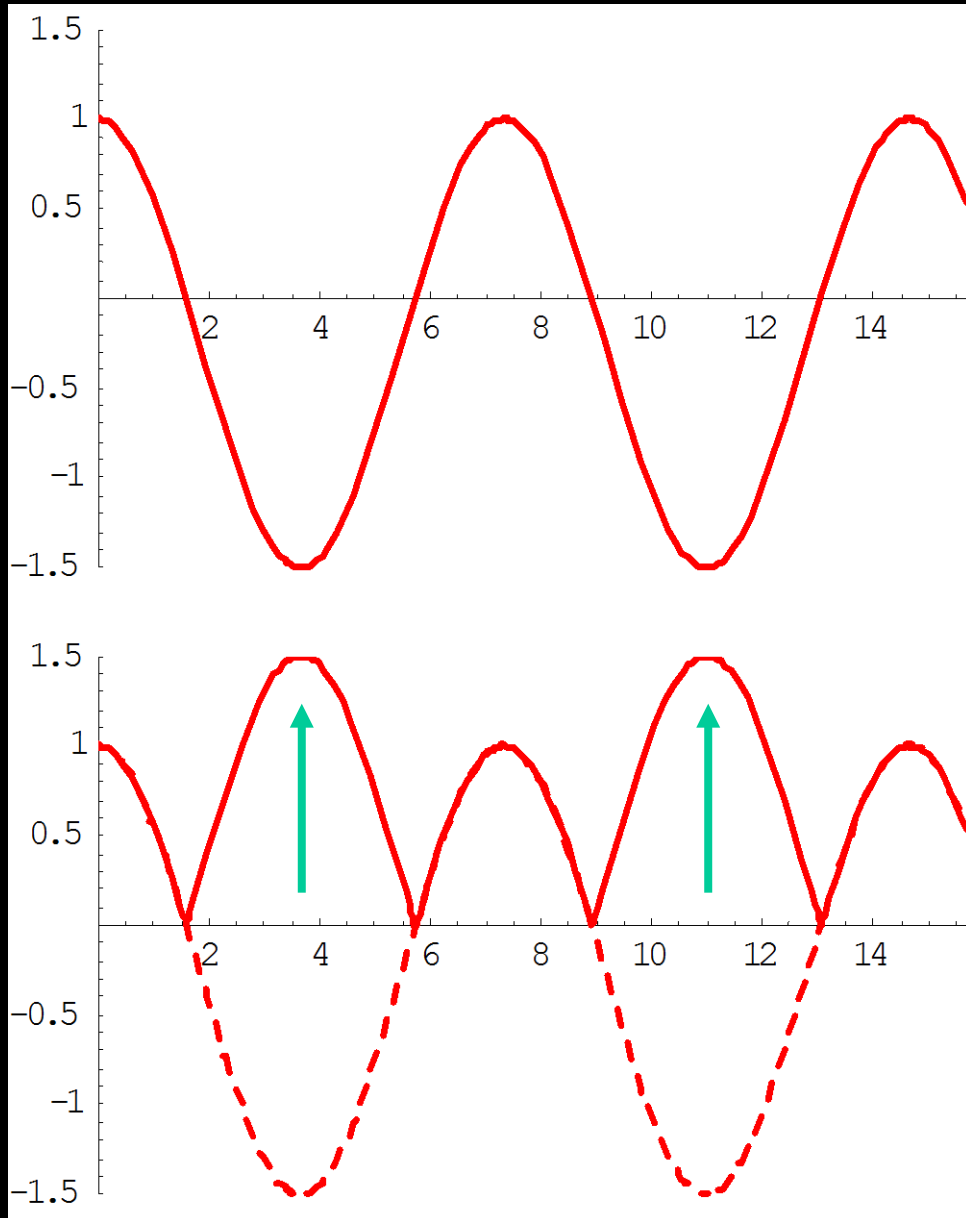
baryon loading I

バリオンを加える。
バリオンは圧力には寄与しないが
質量には寄与する。

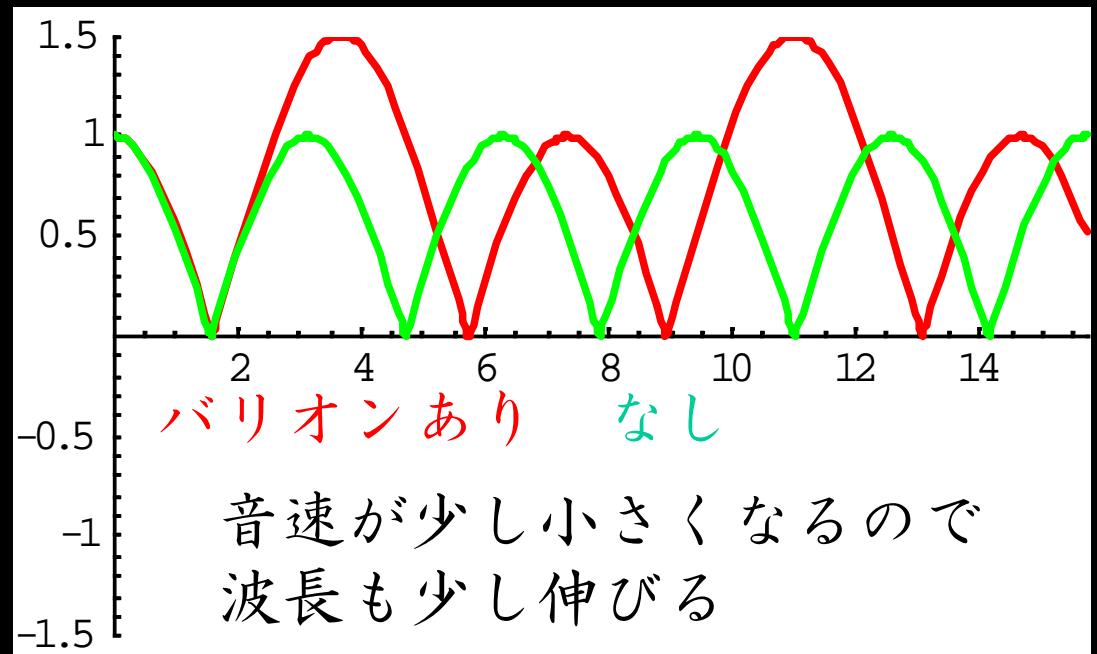
- ・ もっと圧縮される
- ・ 振動のゼロ点がゆらぎゼロの
点からずれる



baryon loading II



絶対値を取ると、
奇数番目のピークが
偶数番目のピークに
比べて高くなる。

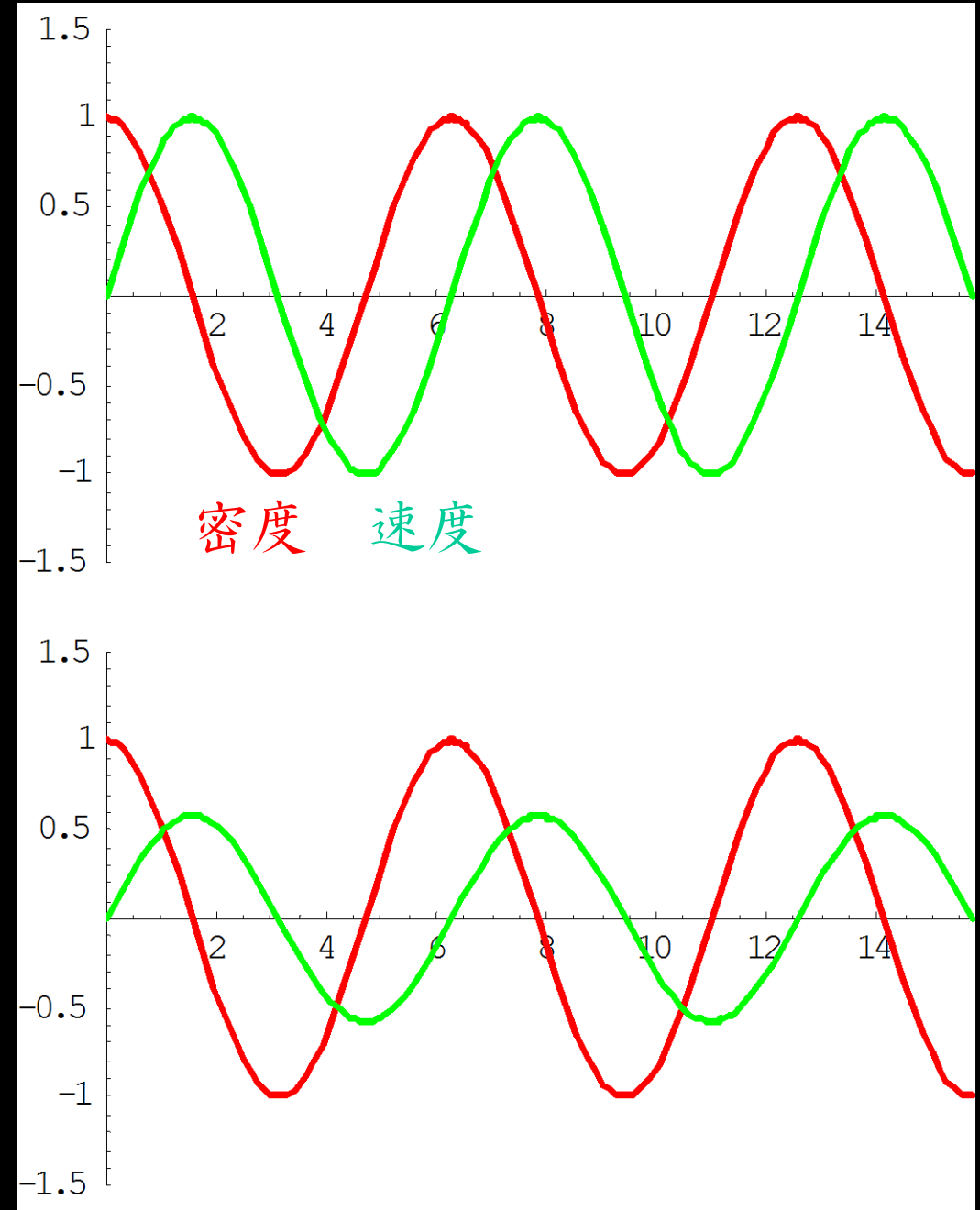


Doppler effect I

とりあえずバリオンはまたゼロにする。

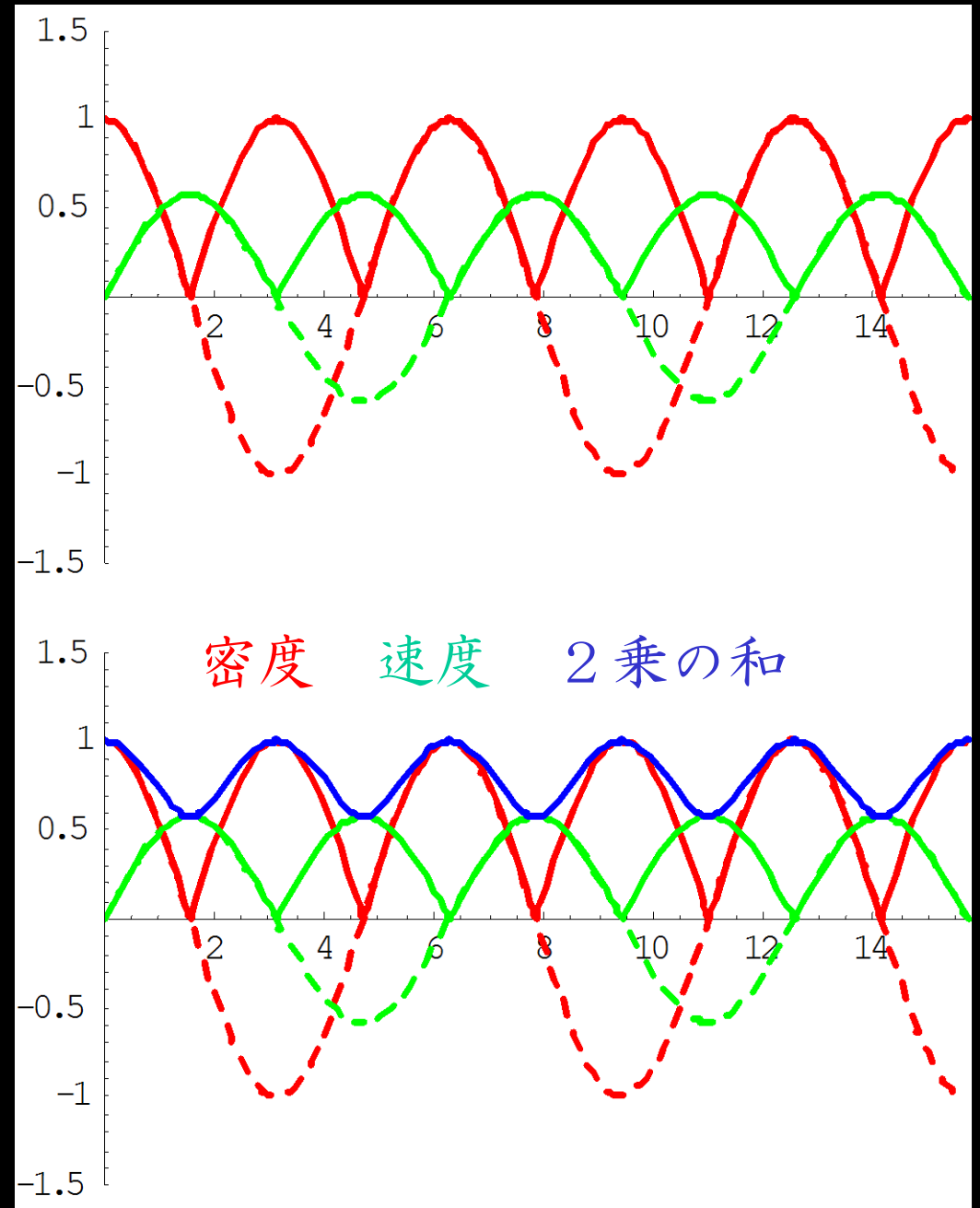
流体の速度によるドップラー効果も温度ゆらぎを生む。

- ・初期条件ではゼロ
- ・密度とは位相がずれる
- ・視線方向の速度だけが温度ゆらぎになるので平均すると振幅は密度よりも小さくなる



Doppler effect II

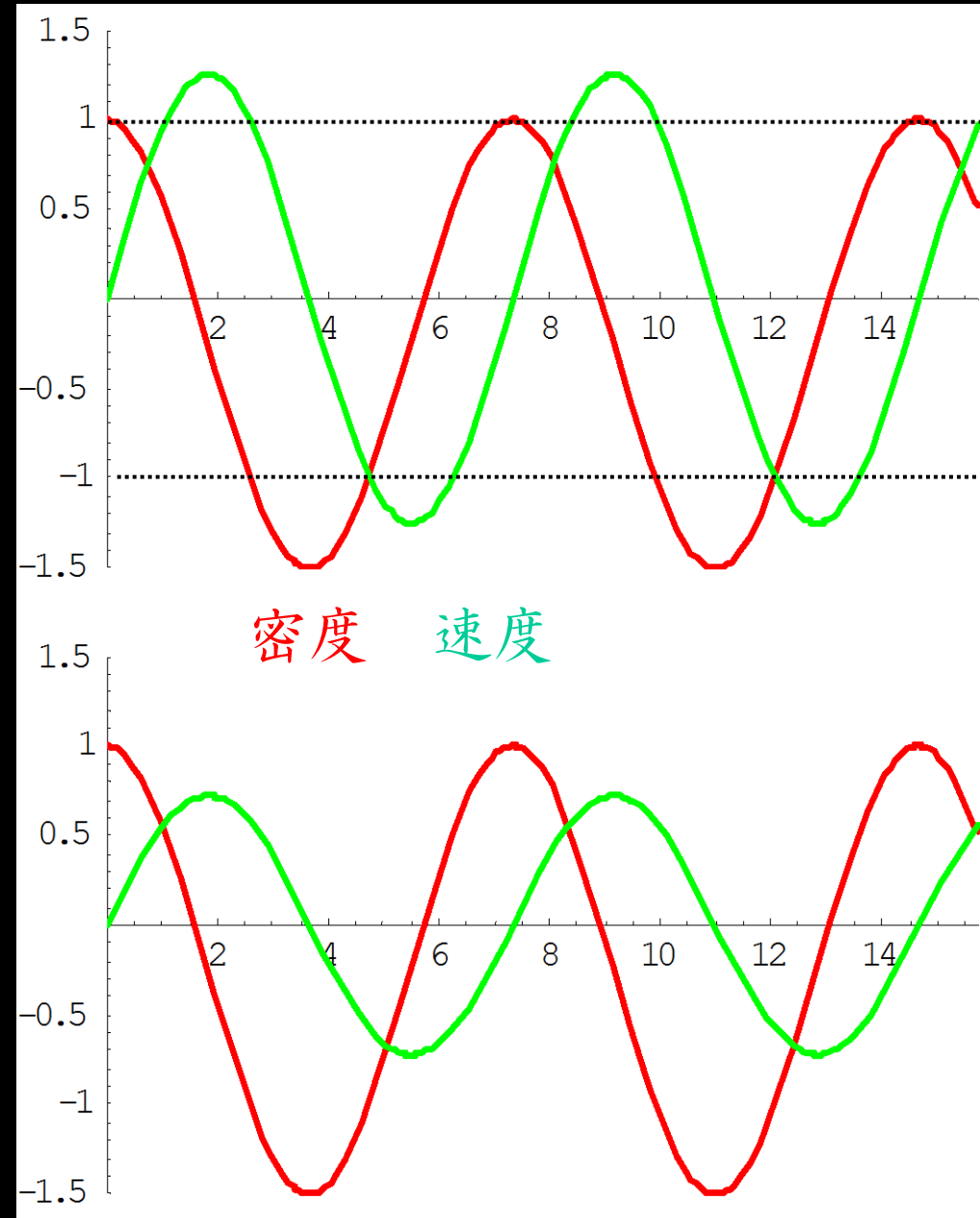
密度と速度それぞれの
2乗を足す。密度ゆらぎが
ゼロのところでは速度が
あるので温度ゆらぎが
ゼロになることはない。



Doppler effect with baryon I

またバリオンを加える。

- ・速度の振幅も大きくなる
- ・しかし速度のゼロ点は変わらない
- ・方向で平均したらやはり振幅は密度よりも小さい



Doppler effect with baryon II

密度と速度それぞれの
2乗を取って足す。

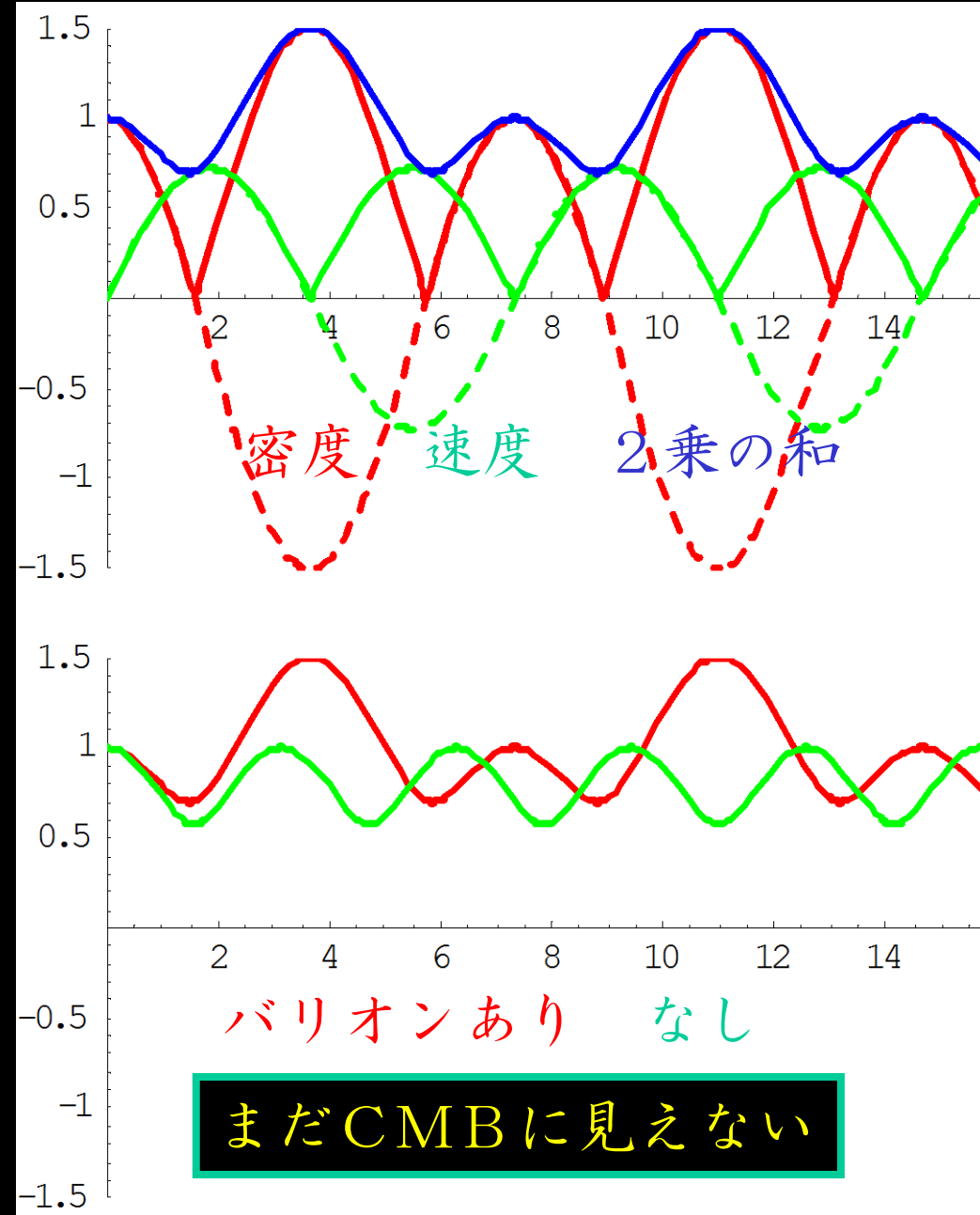
以上までが光子+バリオン
流体の音波振動。

バリオン

- ・余分に圧縮してゼロ点がずれる
- ・音速が小さくなり
波長が短くなる

ドップラー効果

- ・密度と位相がずれる
- ・方向で平均したら
振幅が小さくなる



radiation driving I

これまでの描像は物質優勢で成り立つ。

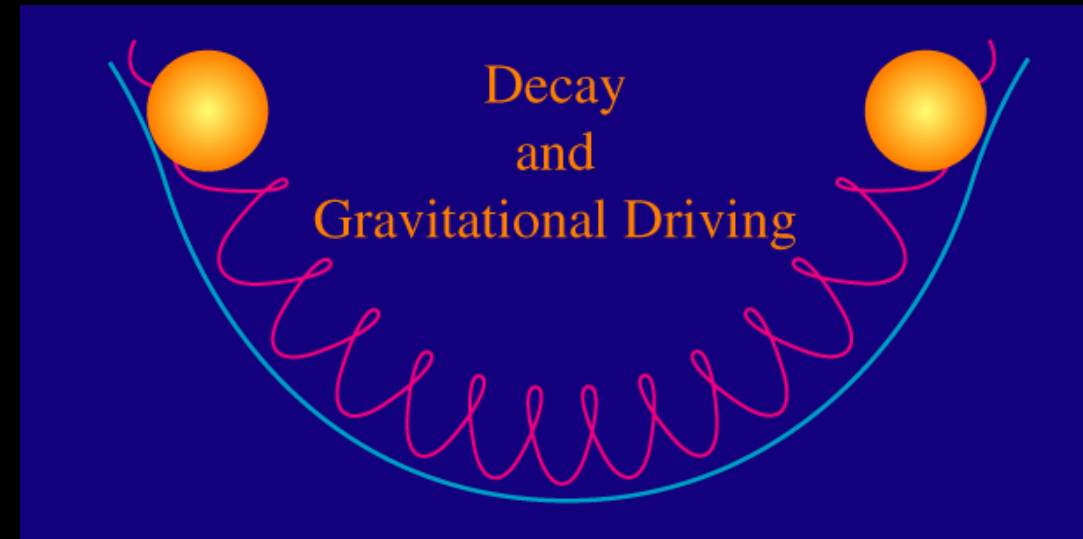
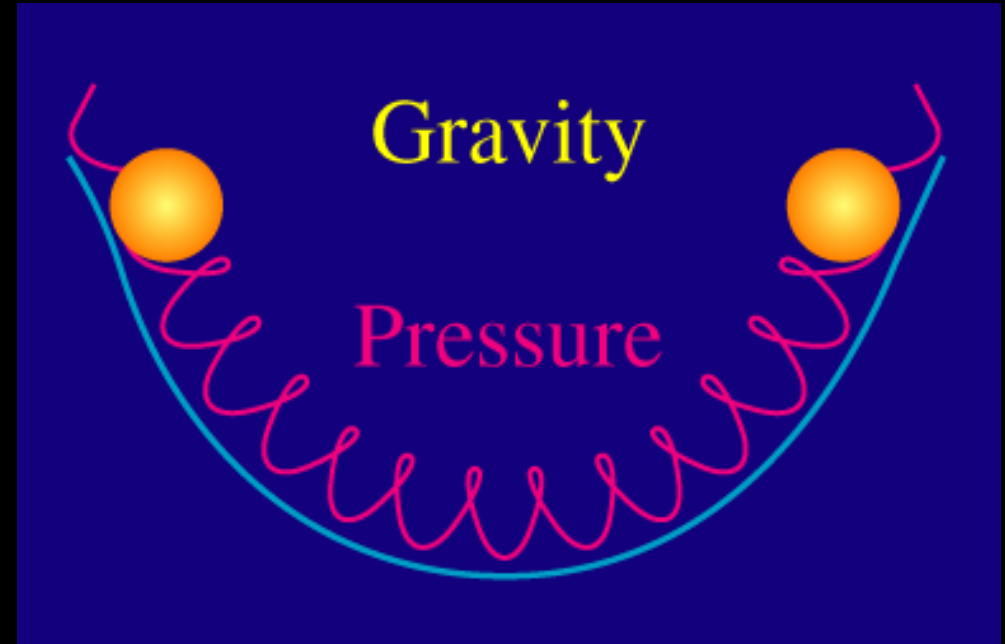
物質優勢

→ constant potential

放射優勢

→ potential decay

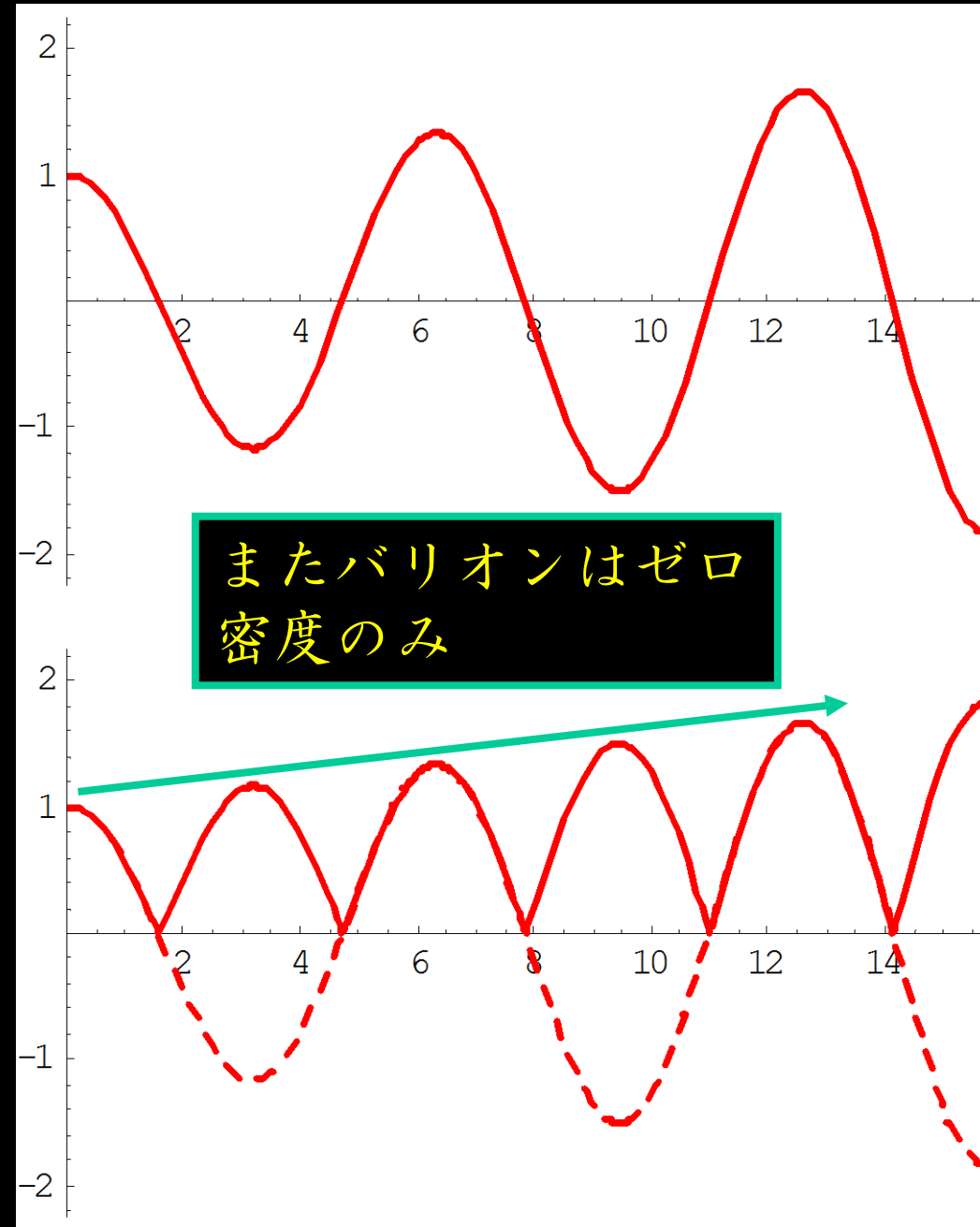
ポテンシャルが崩壊すると振幅が増幅される。



radiation driving II

matter radiation equalityは
 $z \sim 3000$ なので再結合の
ときには物質優勢だが
やや放射の影響も残っている。

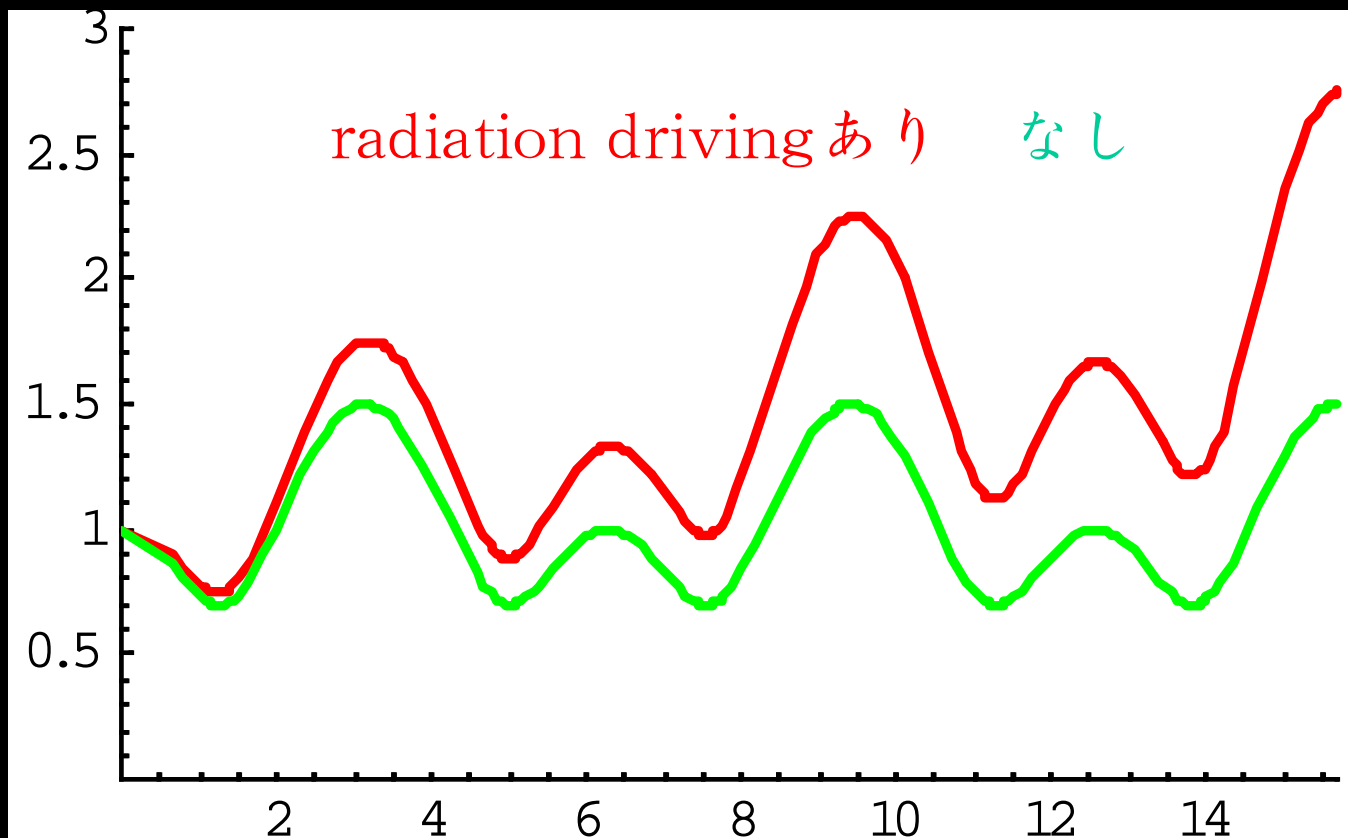
早く horizon に入るほど
radiation driving を受ける。
→ 小スケールほど振幅が
大きい



radiation driving with baryon

バリオンを入れる。

- ・奇数番目のピークが上がる
- ・小スケールのピークが上がる



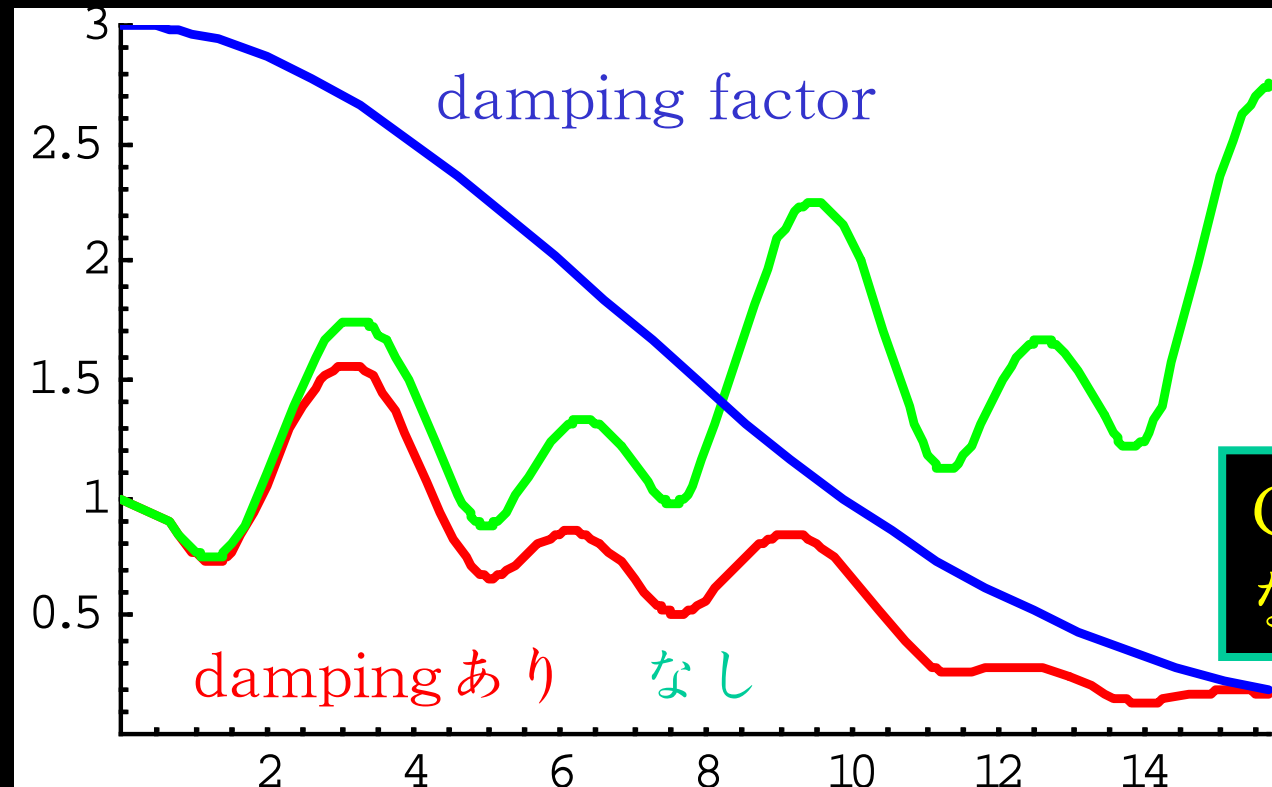
Silk damping

光子の有限な平均自由行程のため、ゆらぎは拡散する。

$$\delta(k, t) \propto \exp[ikt - k^2 \lambda_{\text{diff}}^2(t)]$$

$$\lambda_{\text{diff}} = \sqrt{\lambda_{\text{mfp}} t}$$

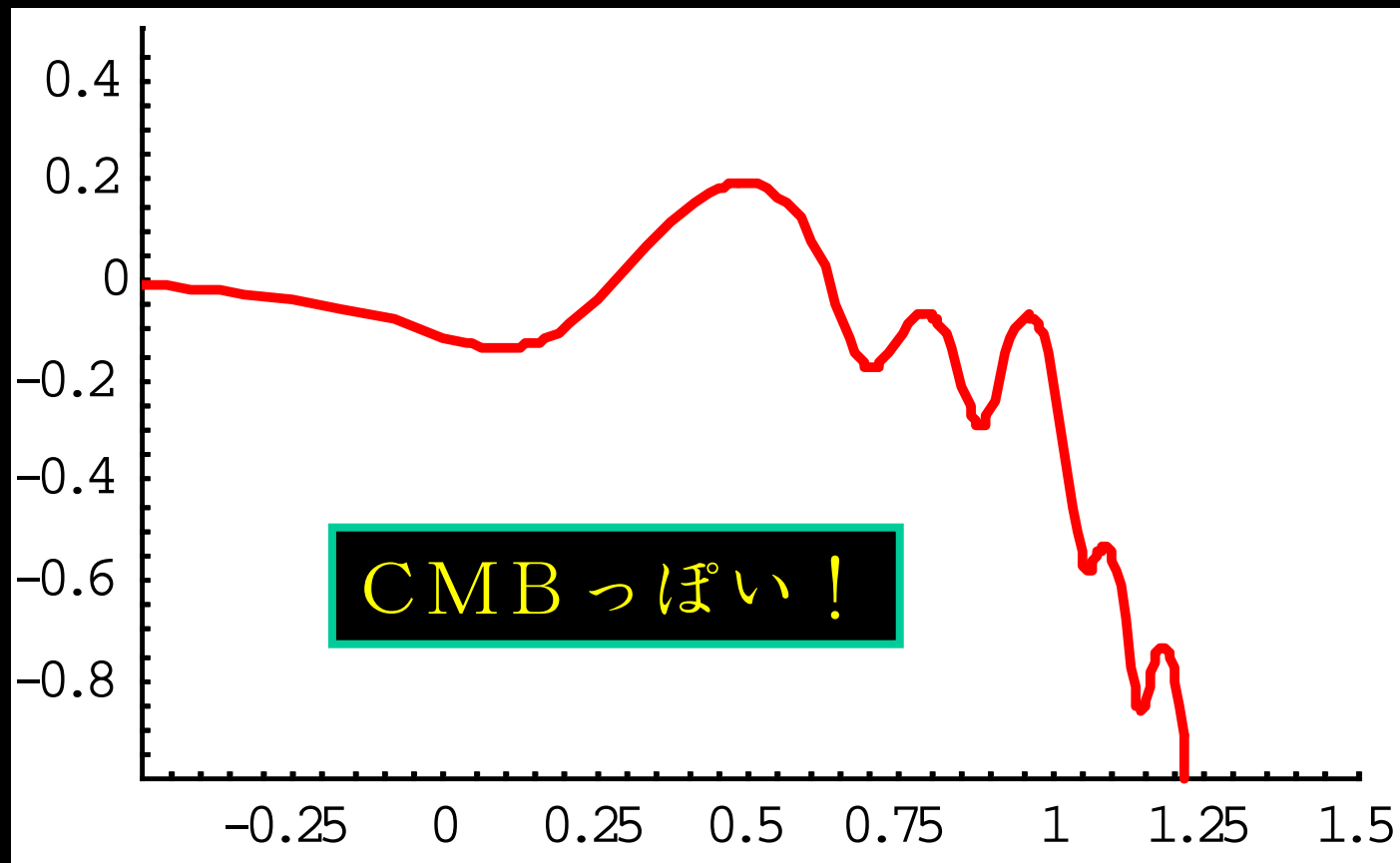
さらに平均自由行程も時間と共に大きくなる。



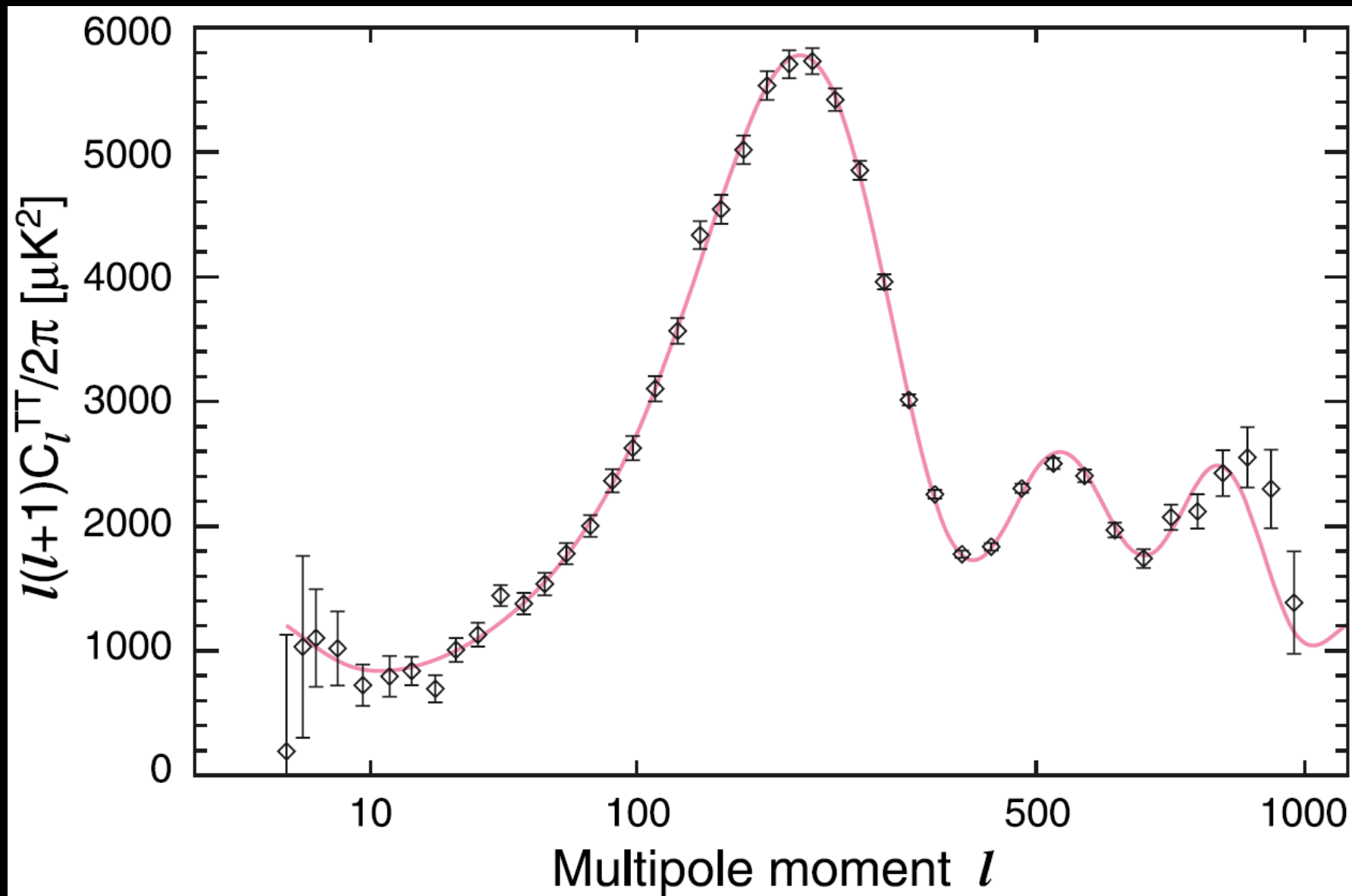
CMBっぽく
なってきた

しあげ

最後にlog-logにして終わり。

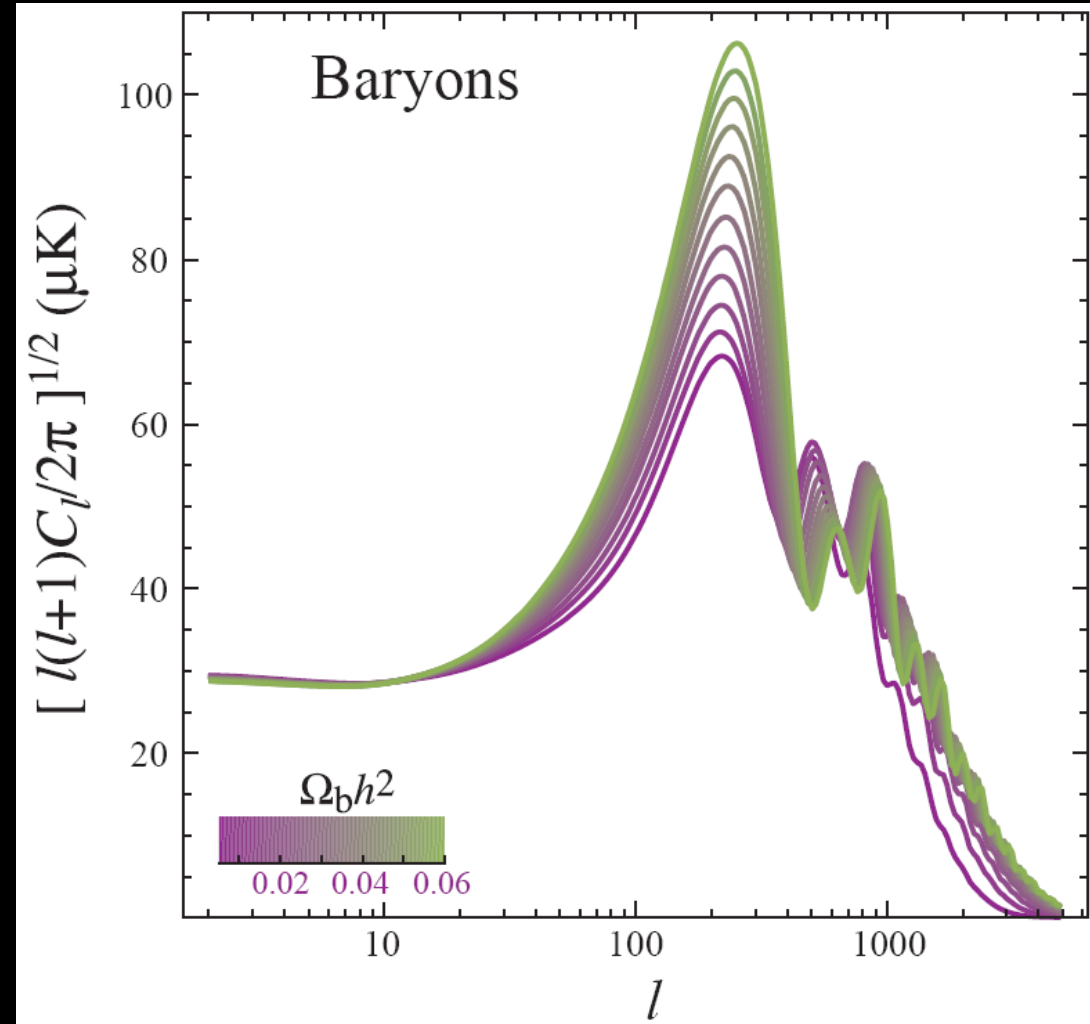


本物のスペクトル



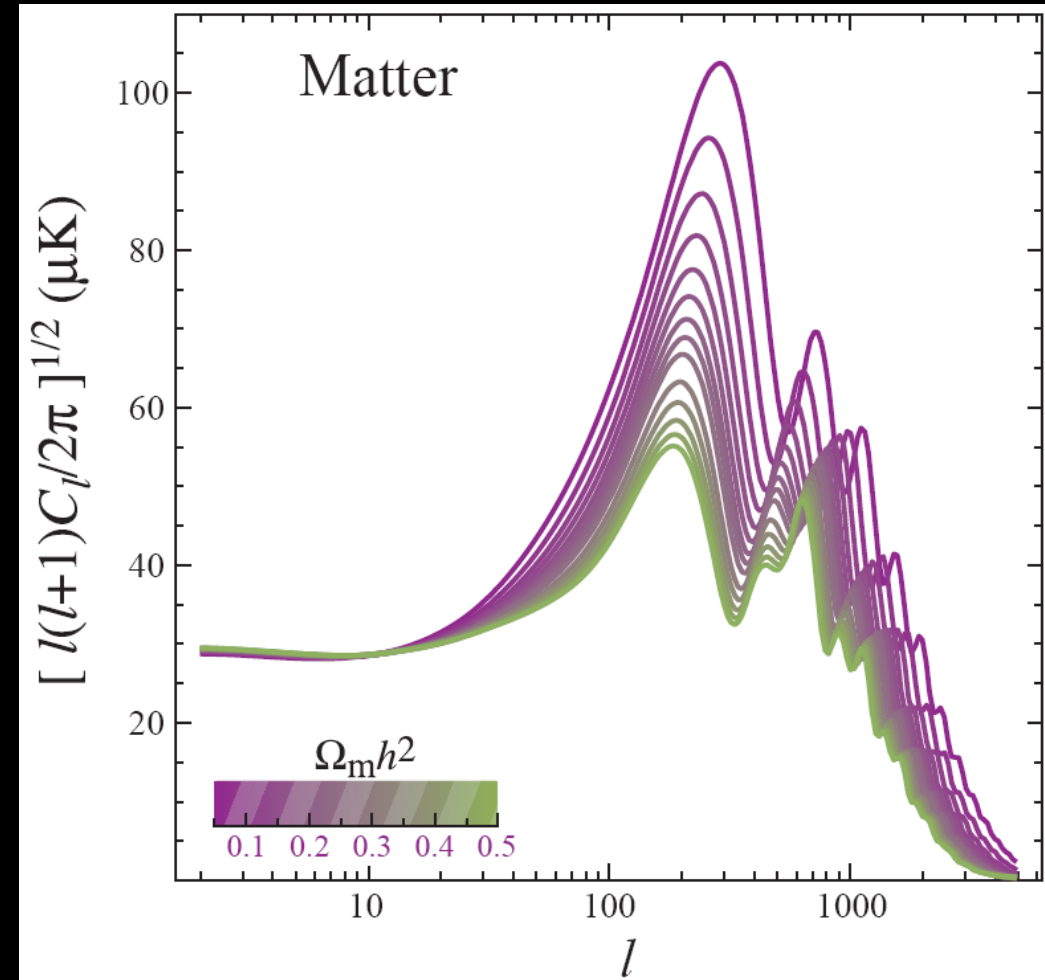
バリオン密度依存性

- バリオンを増やすと
- ・ 奇数番目のピークを
(相対的に) 上げる
- ・ 音速が小さくなるので
ピークは小スケールに
ずれる
- ・ 光子の平均自由行程が
短くなるのでdampingの
スケールが小さくなる



CDM密度依存性

- CDMが減ると・・・
- ・大スケールのピークも radiation driving を受けるようになる
 - ・baryon loading の効果が小さくなって奇数番目と偶数番目の差がなくなる



音波振動まとめ

acoustic oscillation

- + baryon loading
- + Doppler effect
- + radiation driving
- + Silk damping

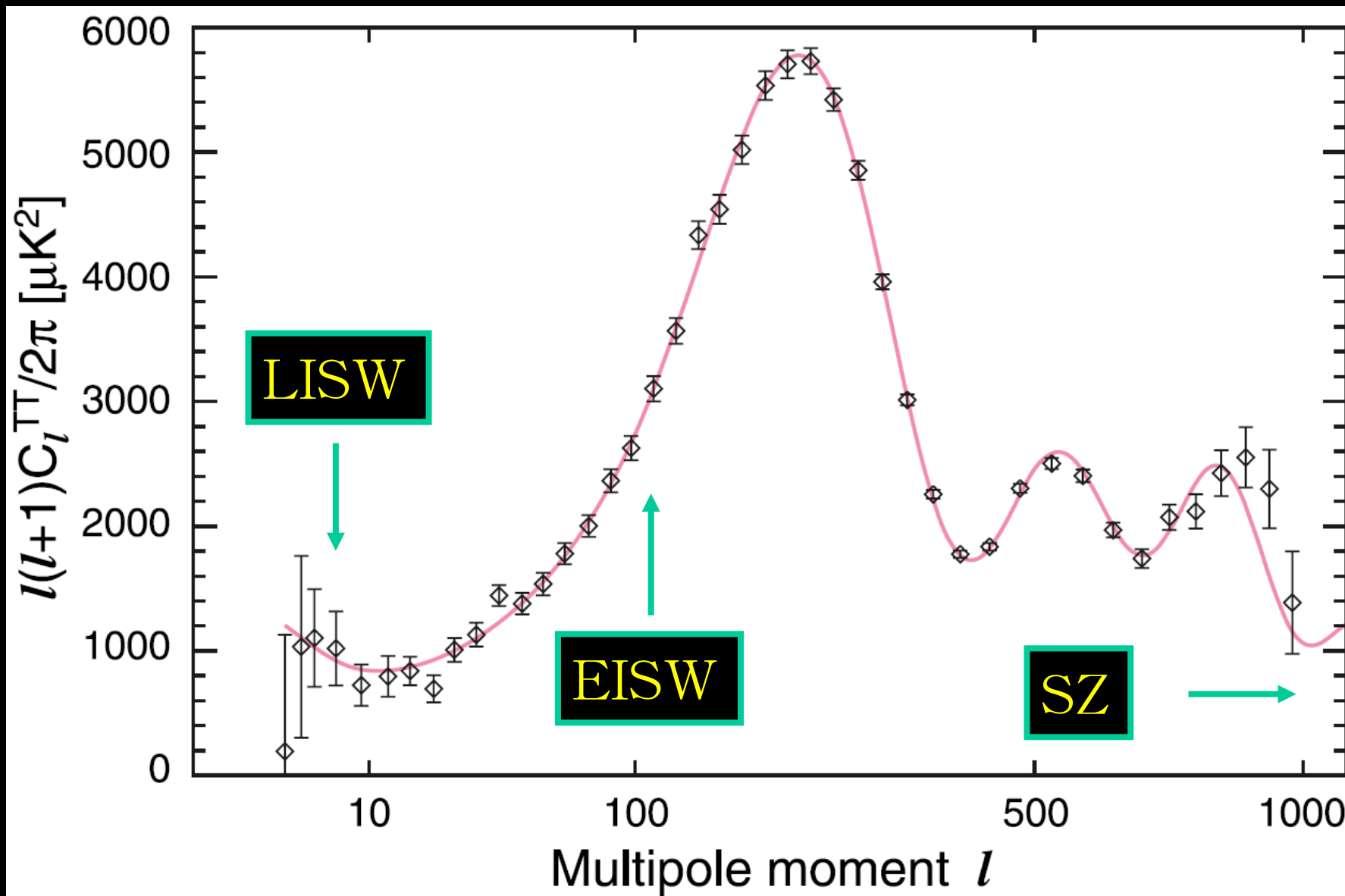
説明してないこと

secondary anisotropy

- ・ integrated Sachs–Wolfe (dark energy ・ 重力波)
- ・ 再イオン化 (後でやる)
- ・ Sunyaef–Zel’dovich effect (後でやる)

偏光

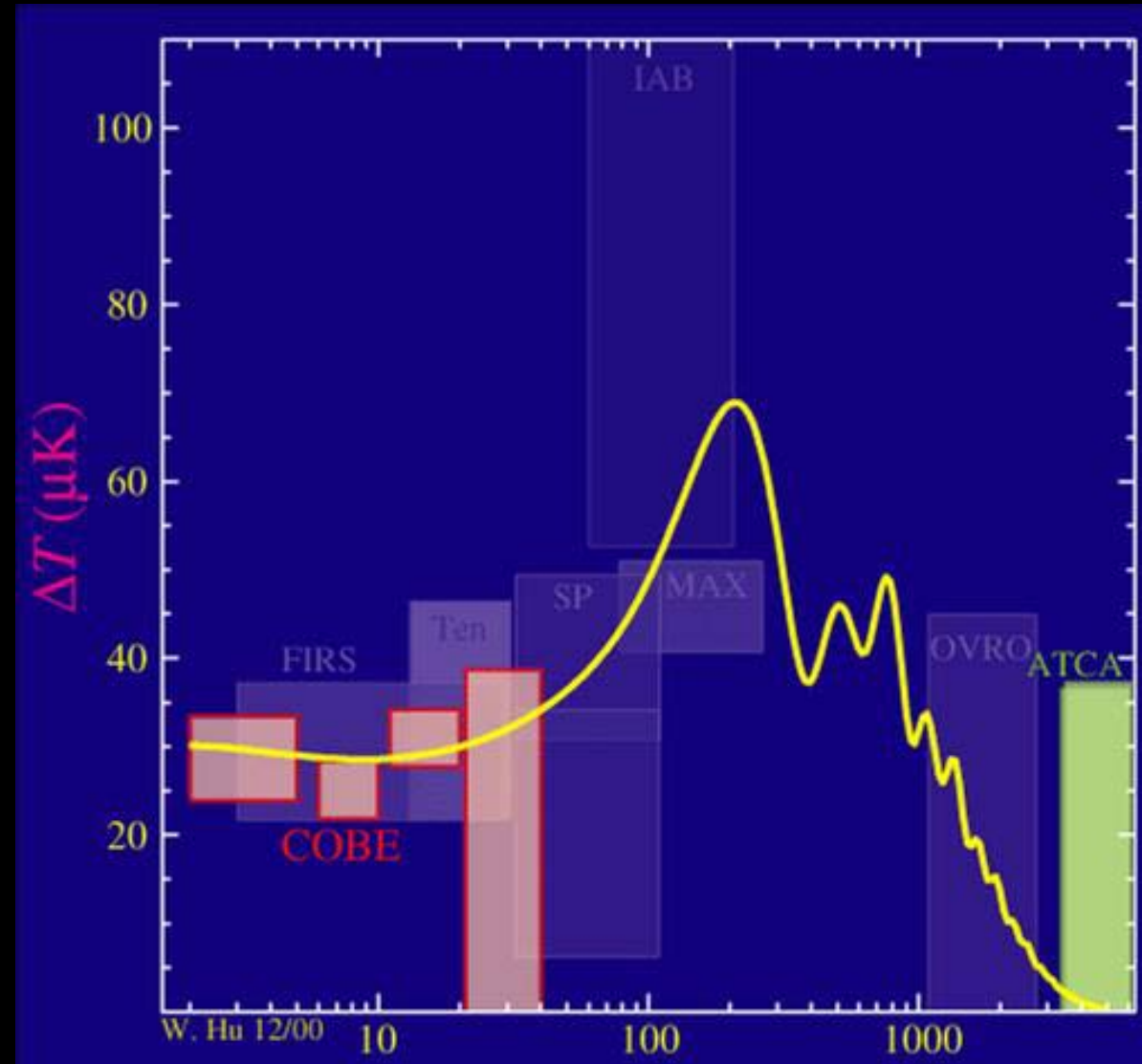
音波振動以外の効果



ゆらぎの発見 - 1992 -

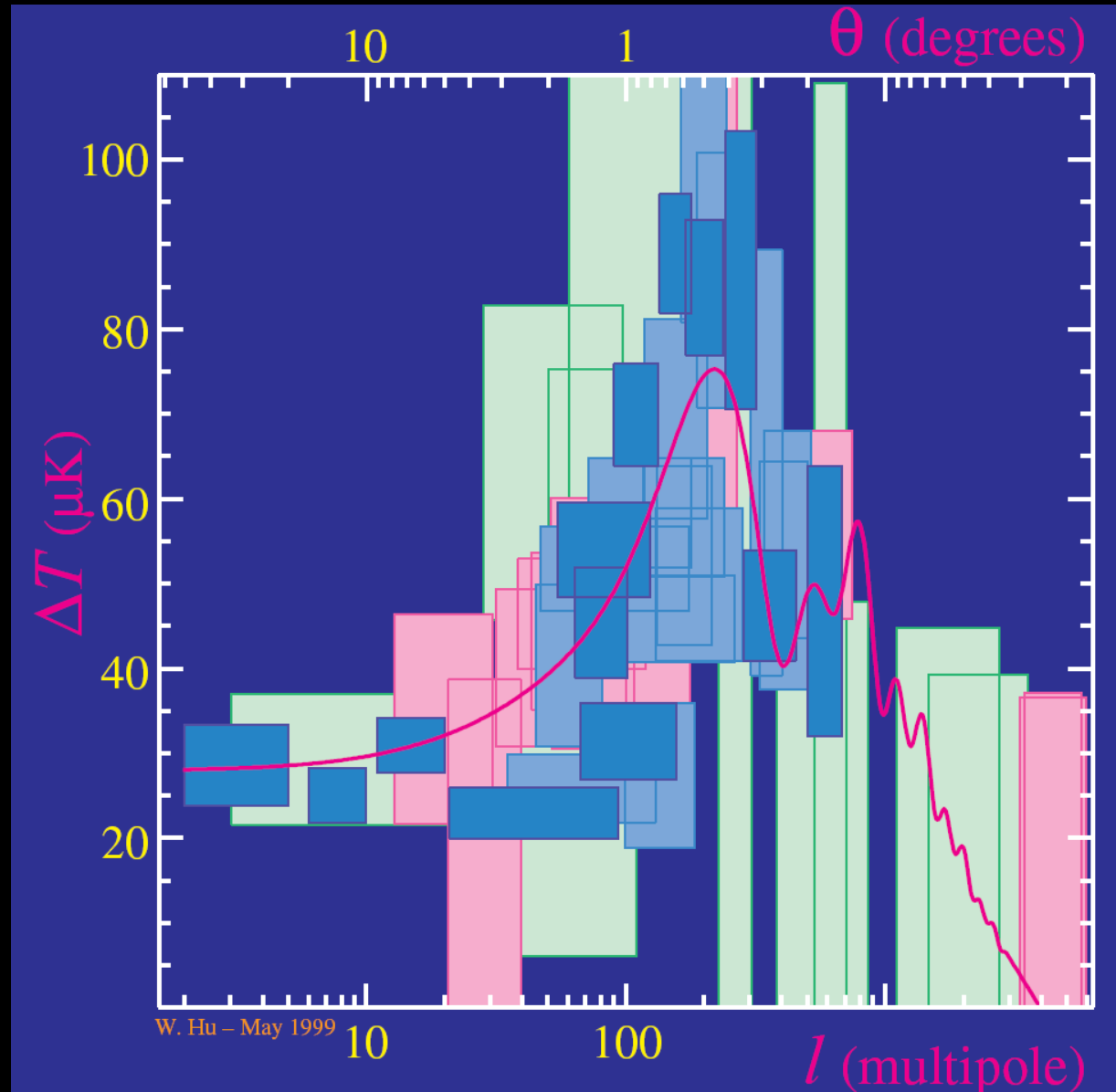
COBEによるゆらぎの発見

- ・ ゆらぎの大きさ
 - ・ ほぼscale invariant
- インフレーション



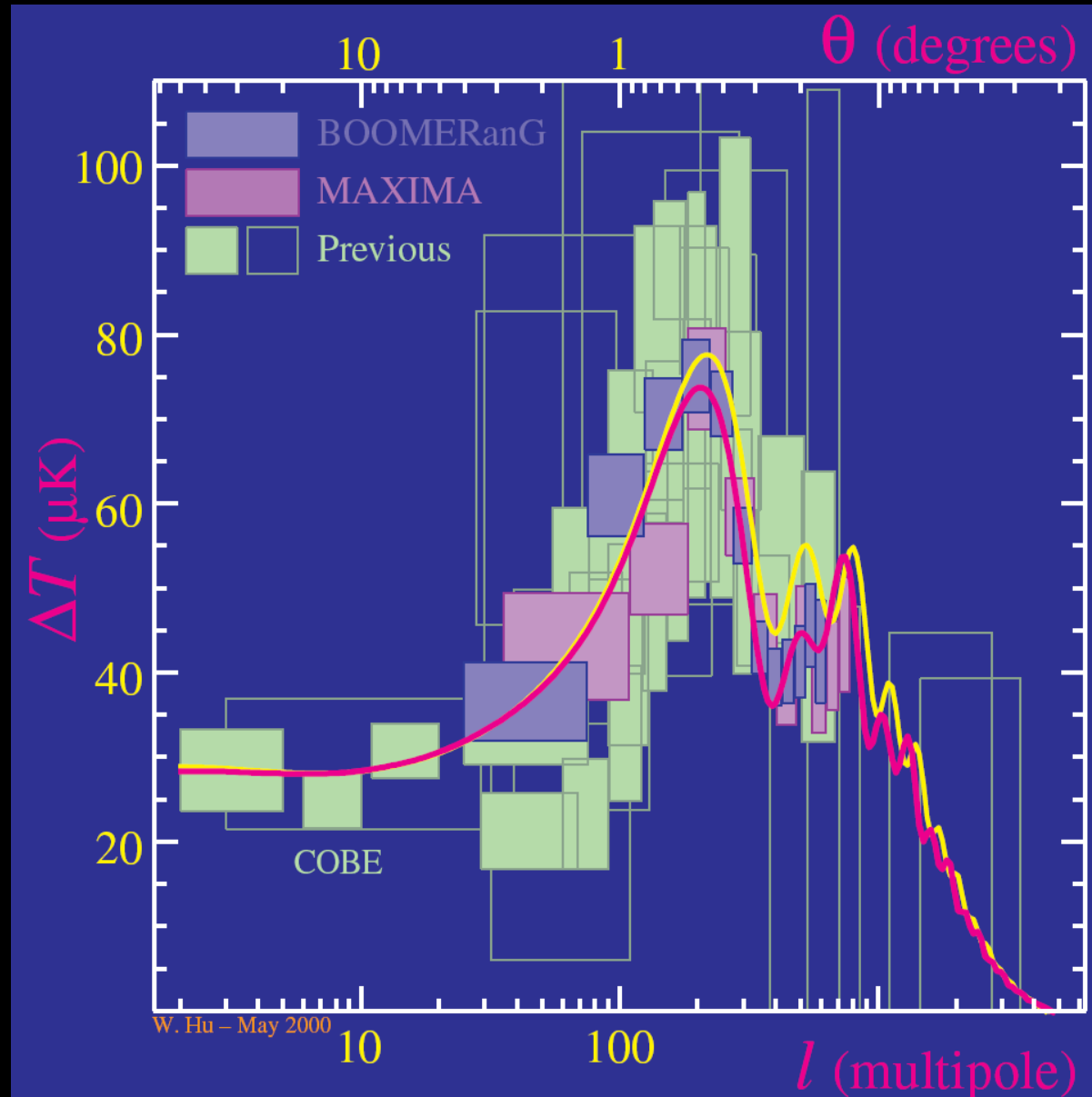
小スケールゆらぎ - 1993~1999 -

O(1)度スケールの
ゆらぎの観測が始まる。
first peakがなんとなく
見えているがまだ微妙。



ピークの発見 - 1999~2000 -

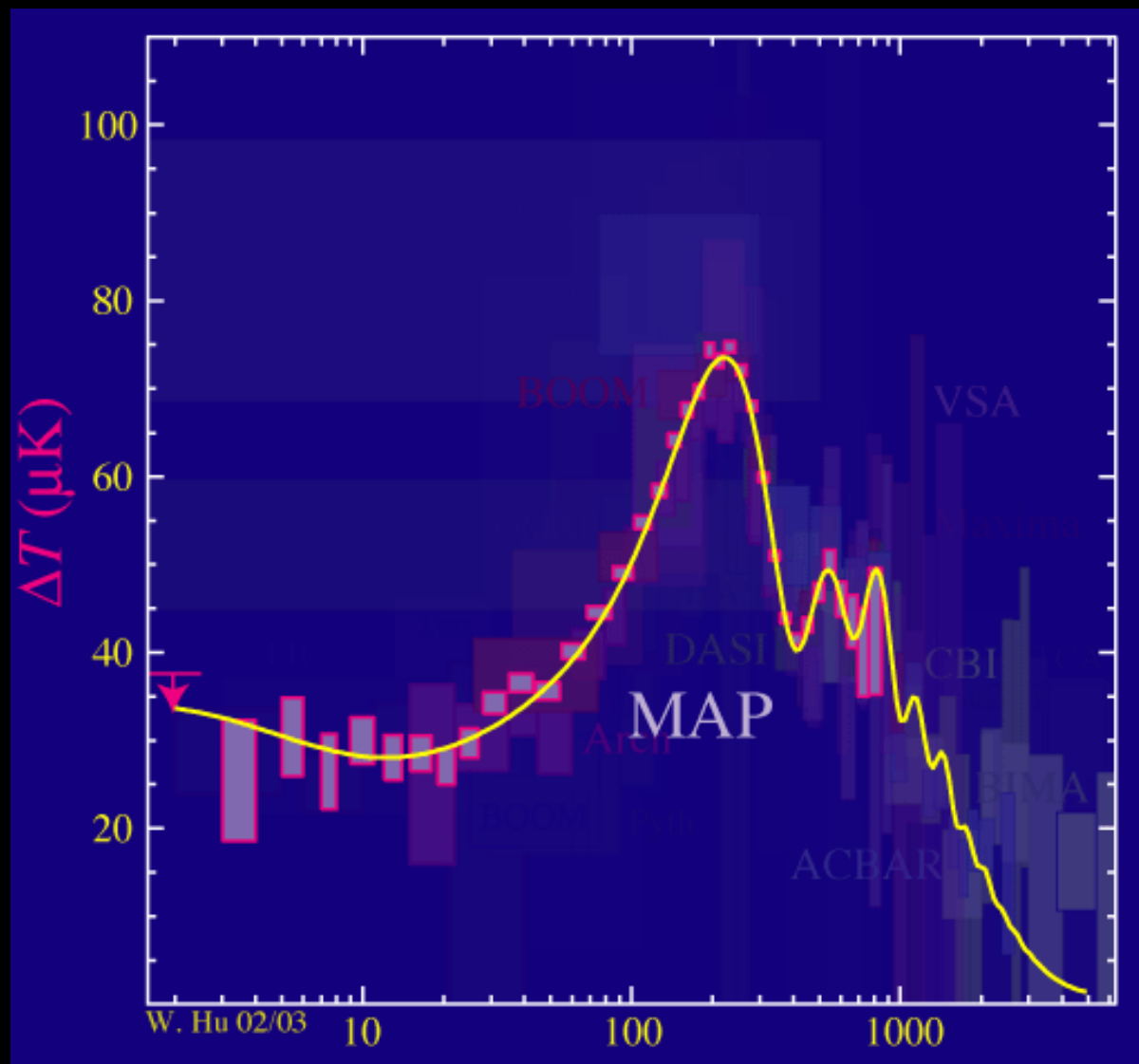
first peakの存在が
はっきりした。
second peakも
なんとなく見える。
→ 宇宙論パラメータが
決まり始めた



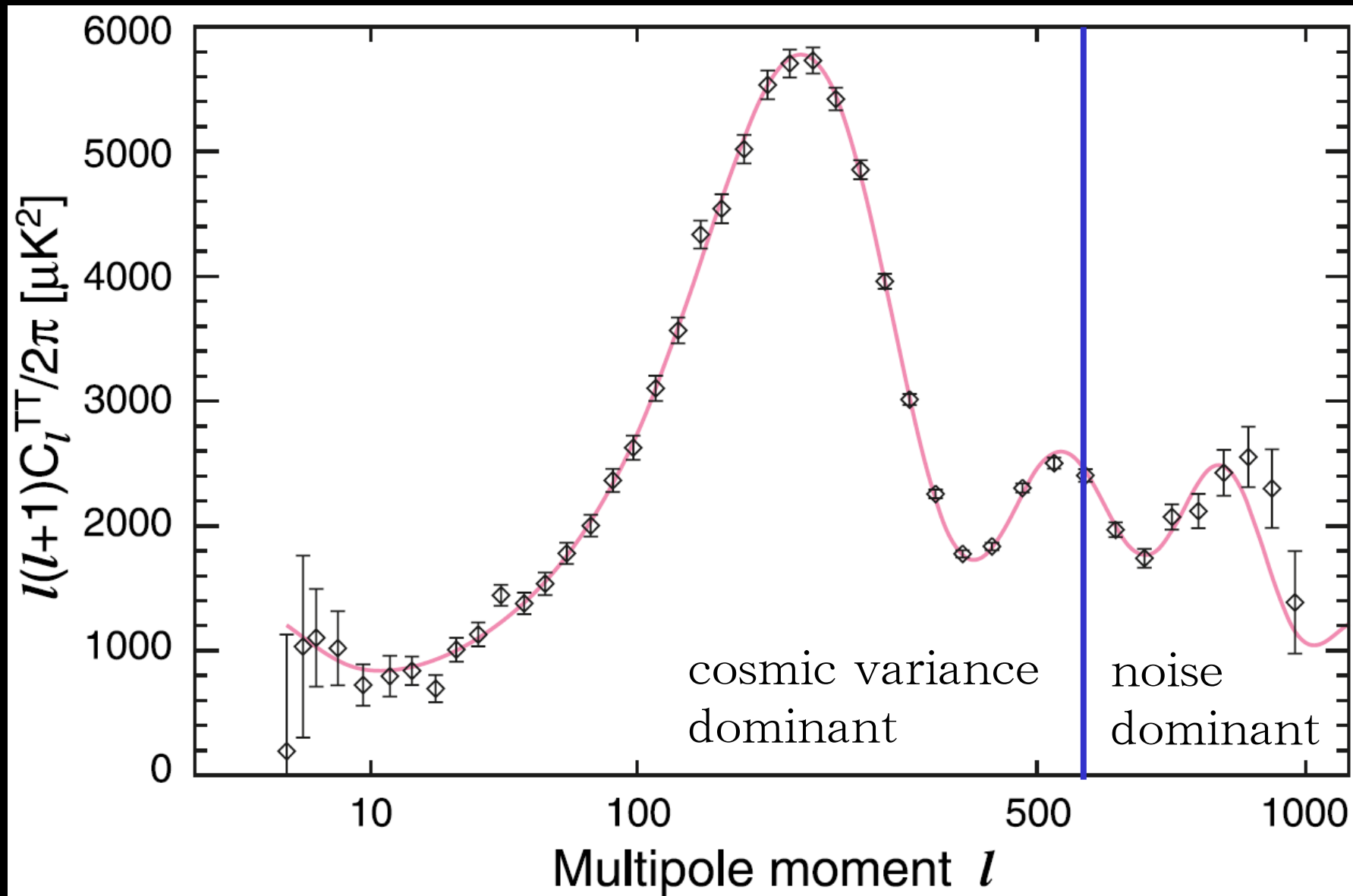
大スケール観測の完了 - 2003 -

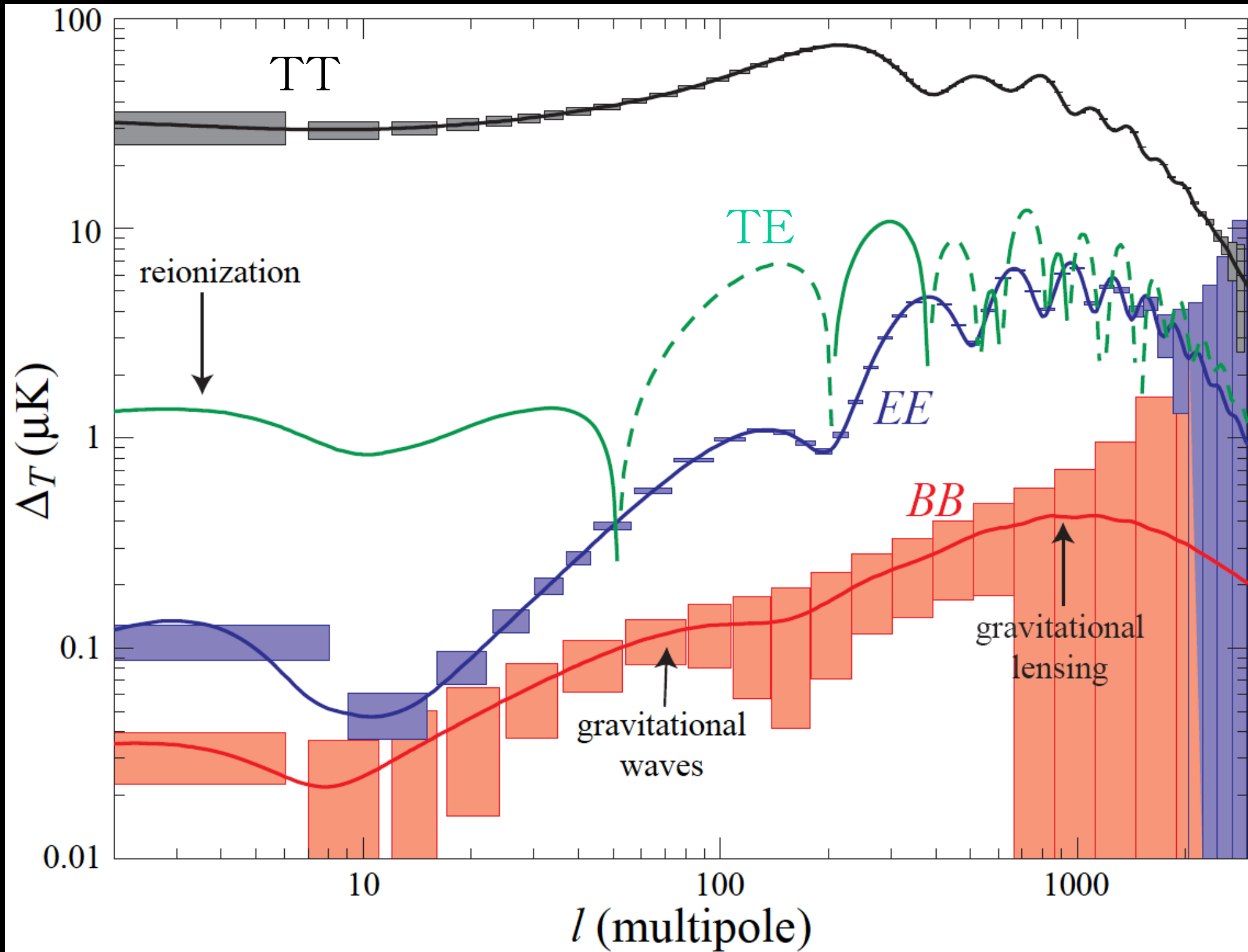
COBEスケールから
3rd peakまでconsistentに
観測。1st, 2nd peakの
位置と振幅がきっちり
決まる。2nd peakまでは
完全に観測。

→ 精密宇宙論へ



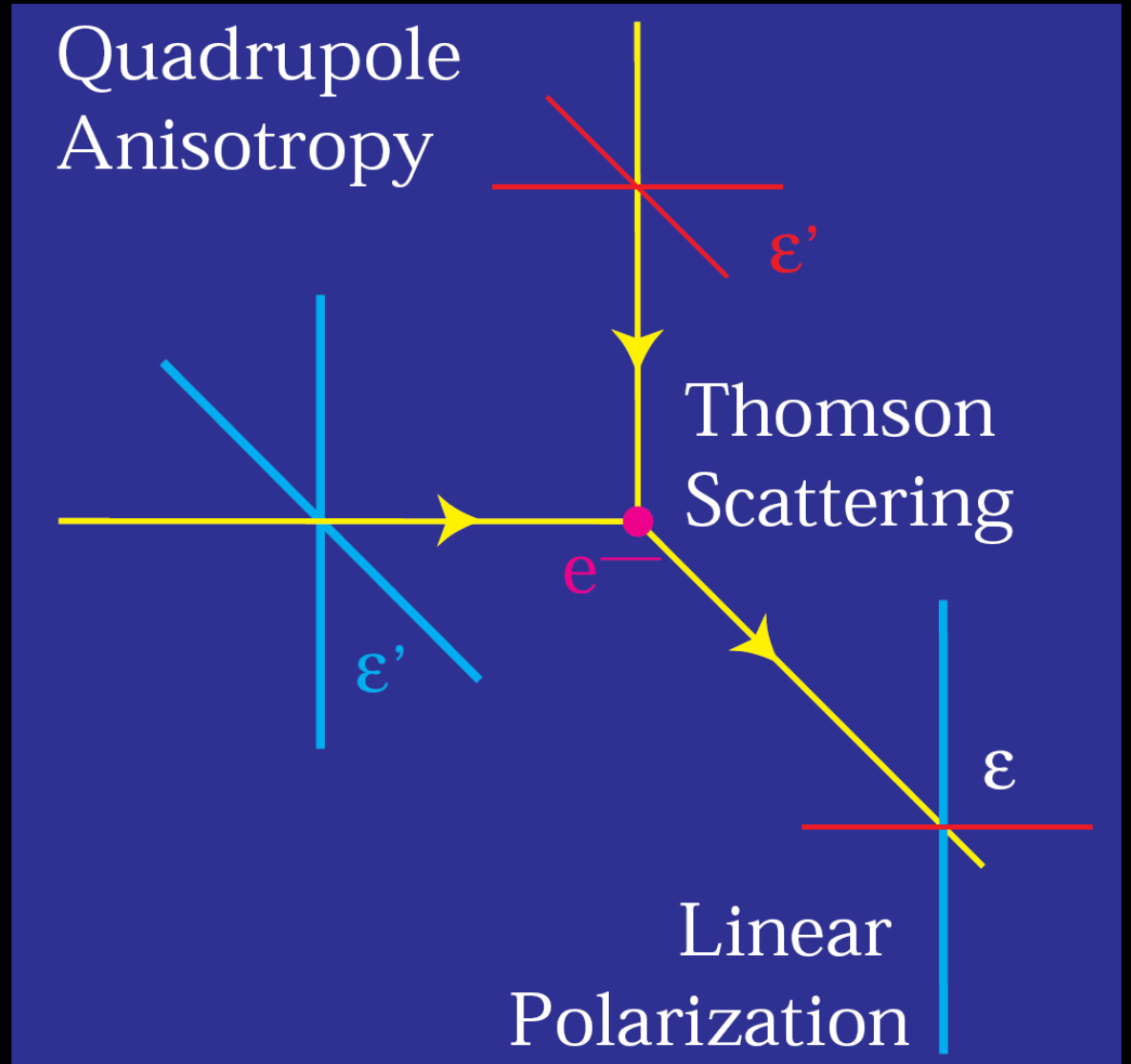
温度ゆらぎの観測





偏光の生成

磁場の起源？



偏光：E mode と B mode

E mode

gradient mode

scalar, vector, tensor

何かとよくできる

再イオン化

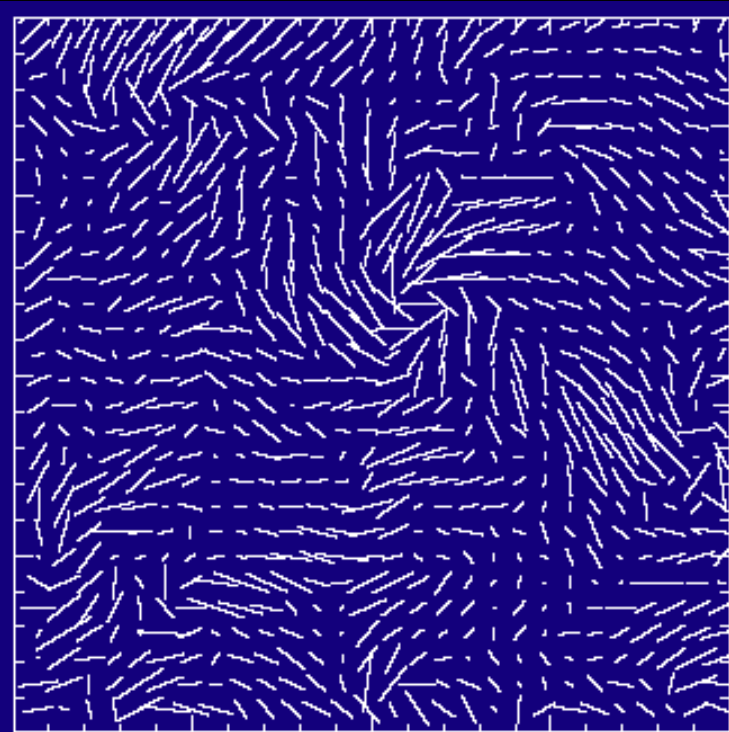
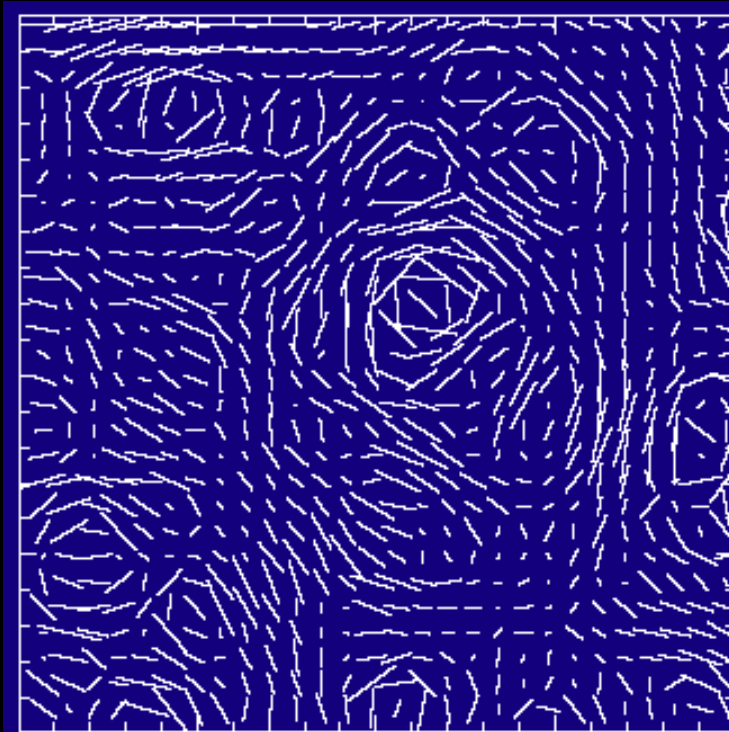
B mode

rotation mode

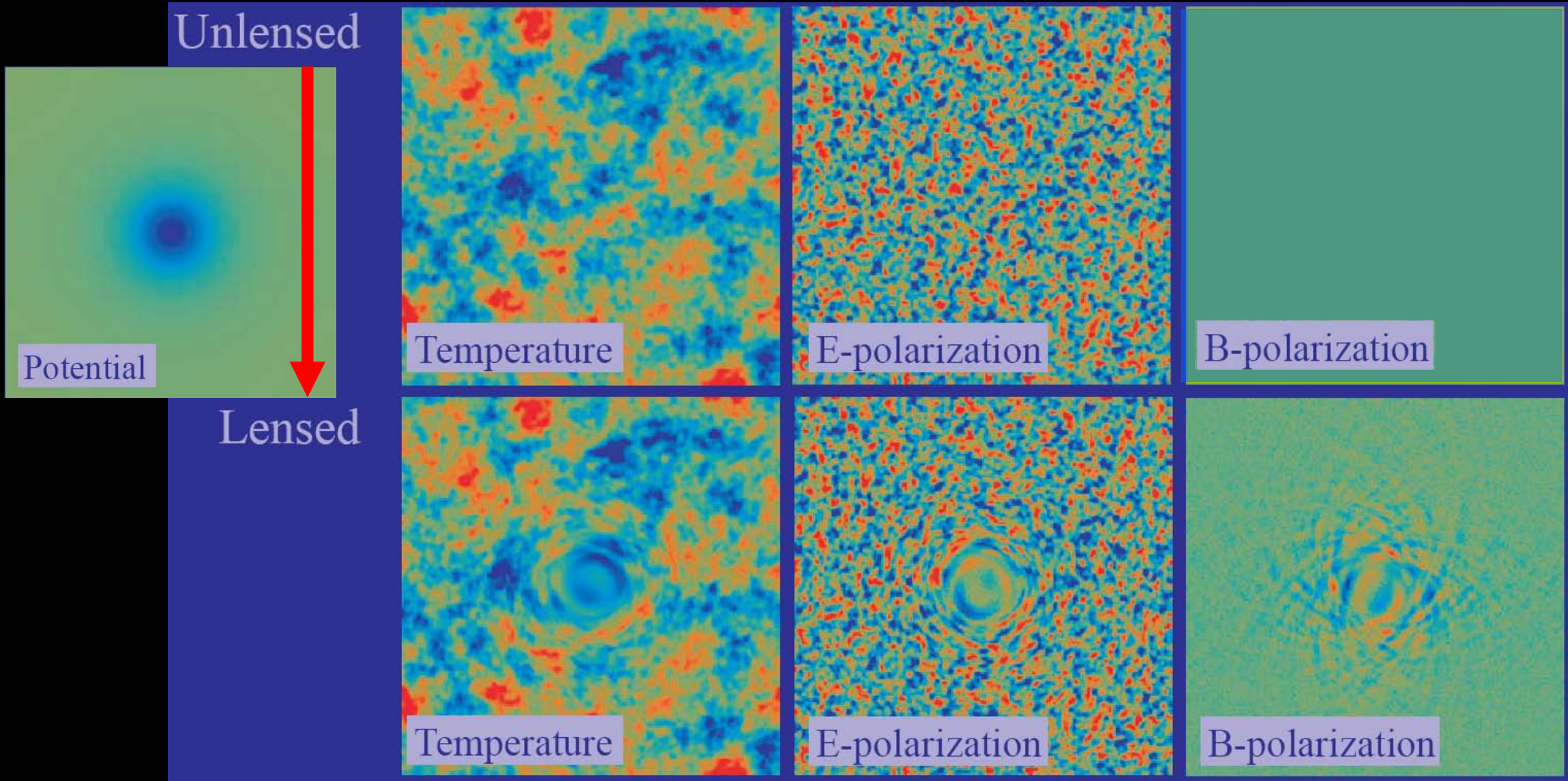
vector, tensor

あまり生成されない

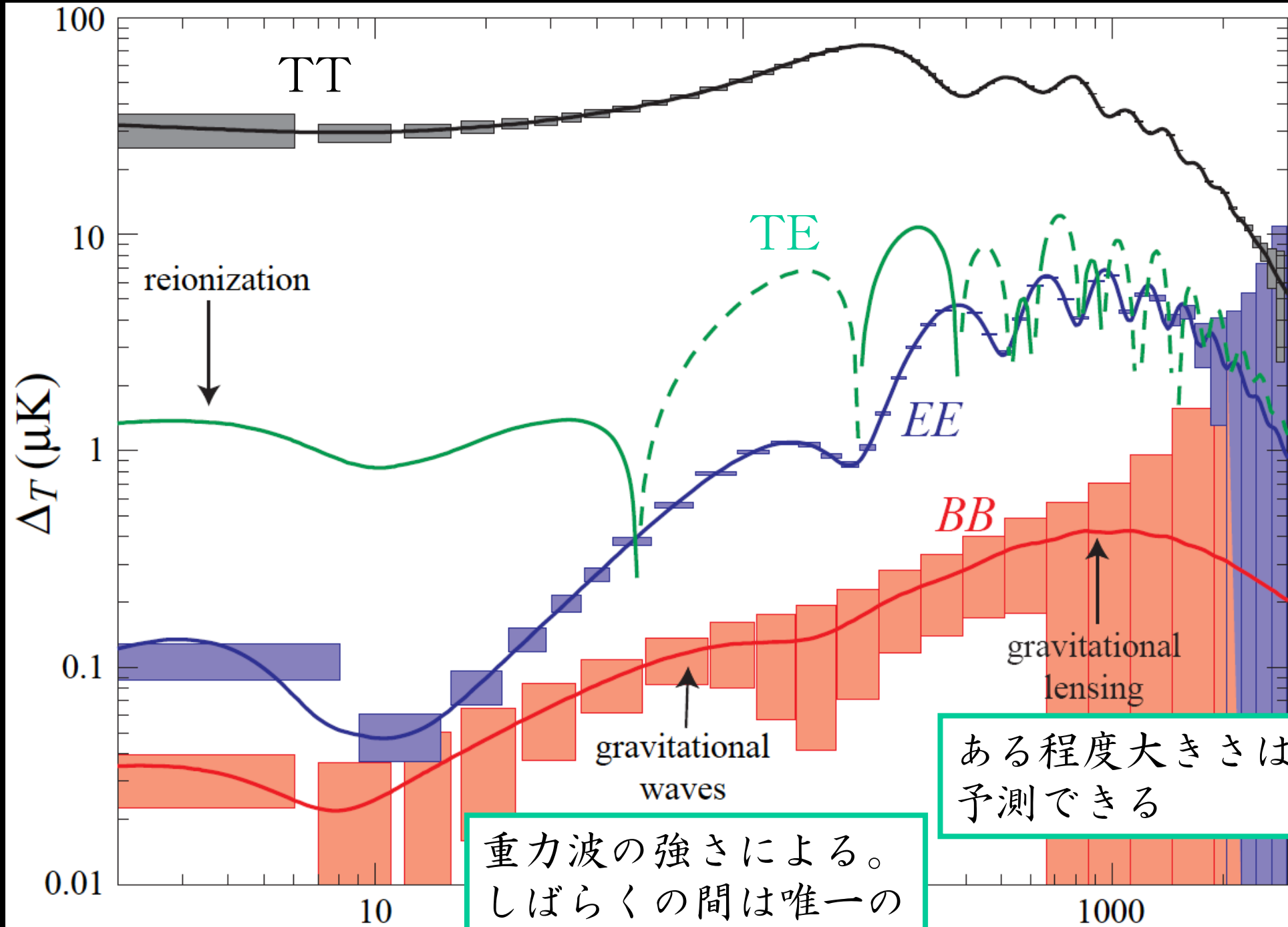
重力波・重力レンズ・磁場



重力レンズによるB modeの生成



B modeが生まれた！



重力波の強さによる。
 しばらくの間は唯一の
 宇宙論的重力波検出法

ある程度大きさは
 予測できる

偏光の観測

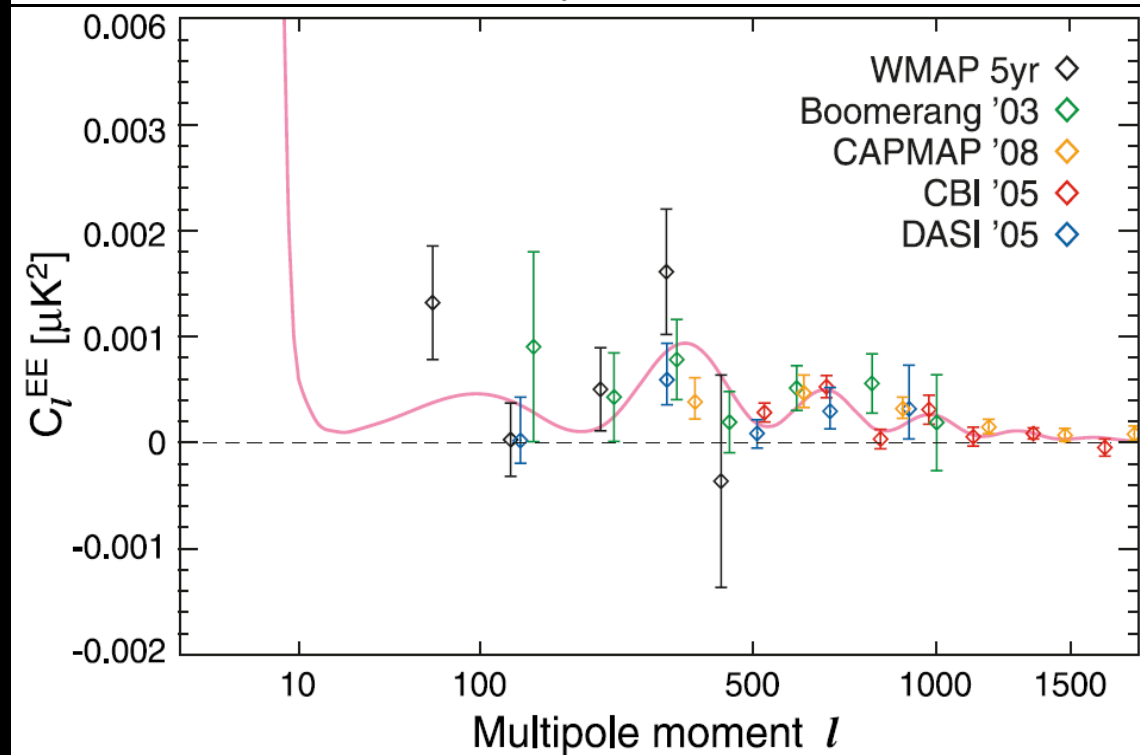
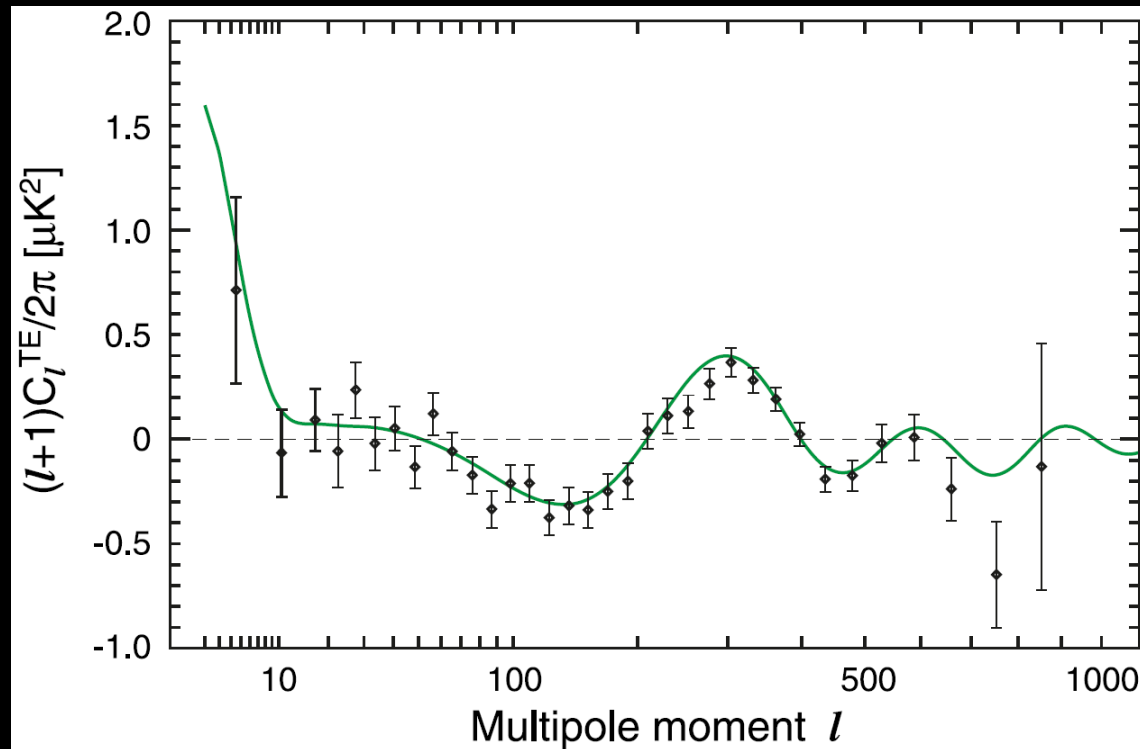
E modeはスカラーから
できるので温度ゆらぎと
相関がある。

$\langle TE \rangle$ は $\langle EE \rangle$ に比べて
シグナルが大きいので
観測しやすい。

$\langle TE \rangle$ ：かなり観測

$\langle EE \rangle$ ：観測され始め

$\langle BB \rangle$ ：未検出 → お宝！



宇宙背景放射の基礎：まとめ

CMBゆらぎ：インフレーションの化石

- ・ 温度 → かなり観測が進んできた
- ・ E mode → シグナルが受かり始めた
- ・ B mode → まだまだこれから

それぞれに多種多様な物理、情報

- ・ primary
acoustic oscillation + baryon loading + Doppler effect
+ radiation driving + Silk damping
- ・ secondary
integrated Sachs-Wolfe (dark energy・重力波)
再イオン化
Sunyaef-Zel'dovich effect

うまく観測データの山を処理すればいろんなことがわかる

2、minimal Λ CDM model

WMAP 5 years

- Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations:
Data Processing, Sky Maps, and Basic Results
Hinshaw et al., arXiv:0803.0732
- Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations:
Galactic Foreground Emission
Gold et al., arXiv:0803.0715
- Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations:
Angular Power Spectra
Nolta et al., arXiv:0803.0593
- ◎ Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations:
Likelihoods and Parameters from the WMAP data
Dunkley et al., arXiv:0803.0586
- The Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Source Catalog
Wright et al., arXiv:0803.0577
- Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations:
Beam Maps and Window Functions
Hill et al., arXiv:0803.0570
- ◎ Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations:
Cosmological Interpretation
Komatsu et al., arXiv:0803.0547

minimal Λ CDM model

全てのデータを説明できる最もシンプルなモデル
仮定：flat, Gaussian, adiabatic, power-law

Class	Parameter	
Primary	$100\Omega_b h^2$	physicalなバリオン密度
	$\Omega_c h^2$	physicalなCDM密度
	Ω_Λ	宇宙定数
	n_s	ゆらぎのpower-law index
	τ	晴れ上がり後のoptical depth (再イオン化)
	$\Delta_{\mathcal{R}}^2(k_0)$	ゆらぎの振幅
Derived	σ_8	8 Mpcスケールでのゆらぎの大きさ
	H_0	ハッブル定数
	Ω_b	バリオン密度
	Ω_c	CDM密度
	$\Omega_m h^2$	physicalな物質密度
	z_{reion}	再イオン化の時刻
	t_0	宇宙年齢

これらだけで
CMB, SNIa, BAO
など全てfitできる

上の6つの
パラメータから
計算できる

注意

データからパラメータを決めるときの注意

●何のデータを使うか

- ・現象：それぞれ独自の系統誤差、物理的理解、信頼性

CMB, SNIa, BAO, cluster, weak lensing, Ly α . . .

- ・観測グループ：時として互いに矛盾

small scale CMB : ACBAR, CBI, VSA . . .

BAO : 2dFGRS, SDSS . . .

- ・データのどの部分を使うか：

BAO : power spectrum, angular diameter distance

●何をパラメータとするか

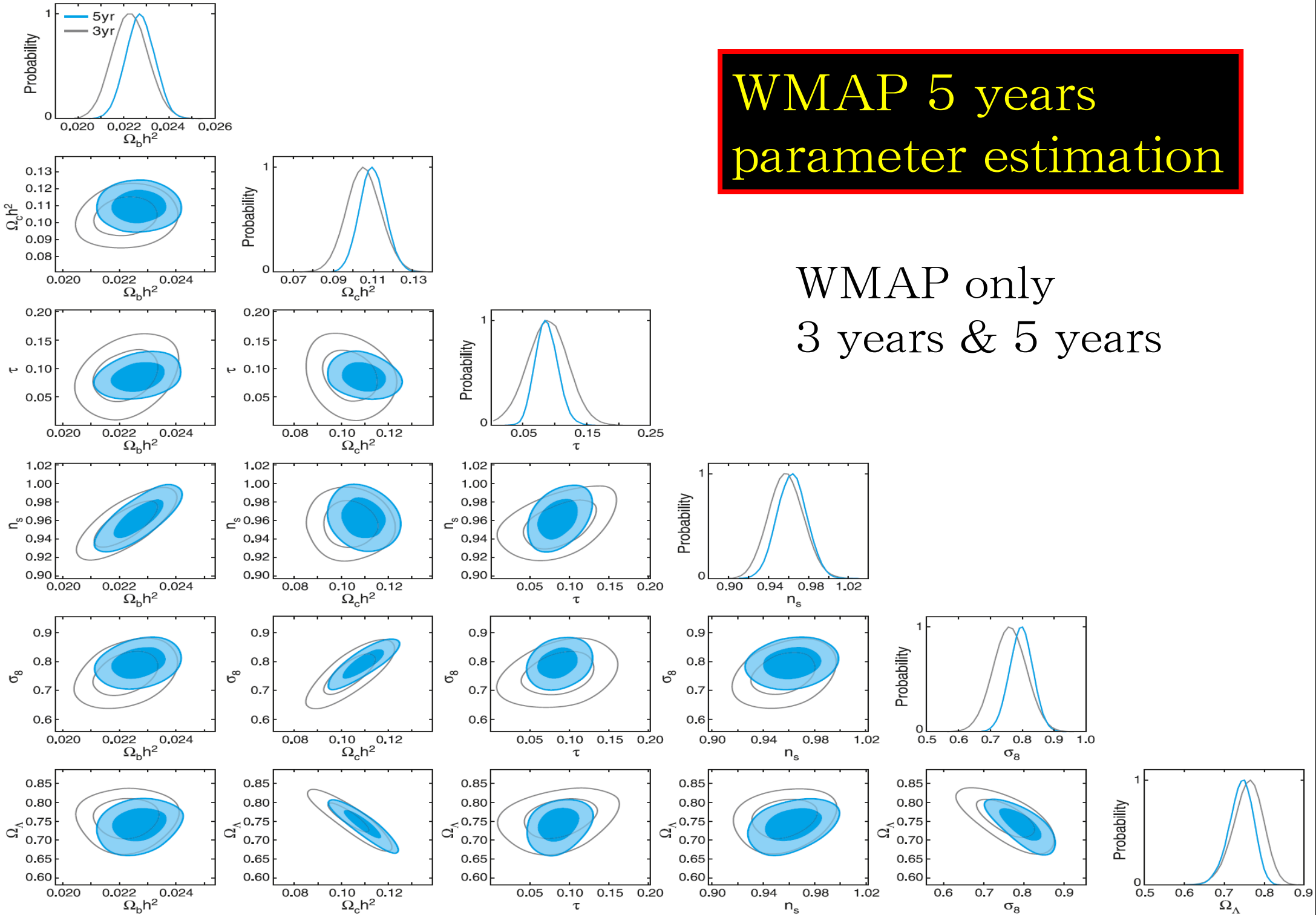
過少：制限が非物理的に強くなる

過多：意味のある制限ができない。計算が大変。

データ解析の論文はたくさんあり、しばしば結果が異なる

WMAP 5 years parameter estimation

WMAP only
3 years & 5 years



WMAP 5 years parameter estimation

Parameter	3 Year Mean	5 Year Mean	5 Year Max Like
$100\Omega_b h^2$	2.229 ± 0.073	2.273 ± 0.062	2.27
$\Omega_c h^2$	0.1054 ± 0.0078	0.1099 ± 0.0062	0.108
Ω_Λ	0.759 ± 0.034	0.742 ± 0.030	0.751
n_s	0.958 ± 0.016	$0.963^{+0.014}_{-0.015}$	0.961
τ	0.089 ± 0.030	0.087 ± 0.017	0.089
$\Delta_{\mathcal{R}}^2$	$(2.35 \pm 0.13) \times 10^{-9}$	$(2.41 \pm 0.11) \times 10^{-9}$	2.41×10^{-9}
σ_8	0.761 ± 0.049	0.796 ± 0.036	0.787
Ω_m	0.241 ± 0.034	0.258 ± 0.030	0.249
$\Omega_m h^2$	0.128 ± 0.008	0.1326 ± 0.0063	0.131
H_0	$73.2^{+3.1}_{-3.2}$	$71.9^{+2.6}_{-2.7}$	72.4
z_{reion}	11.0 ± 2.6	11.0 ± 1.4	11.2
t_0	13.73 ± 0.16	13.69 ± 0.13	13.7

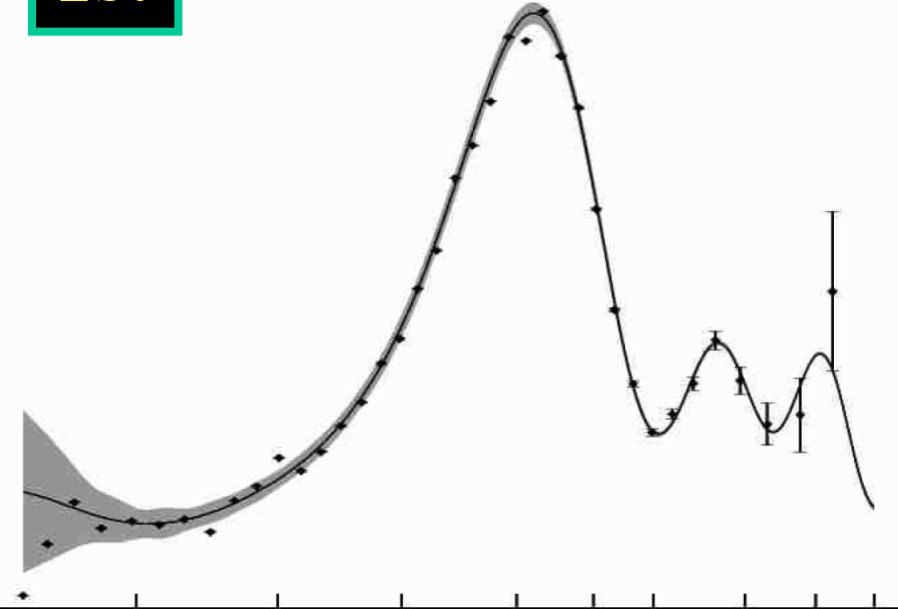
- 基本的に3 yearsとあまり変わらない
- optical depthの精度はだいぶよくなった
- 後は多少精度がよくなったり値がずれたり

温度ゆらぎ観測の推移

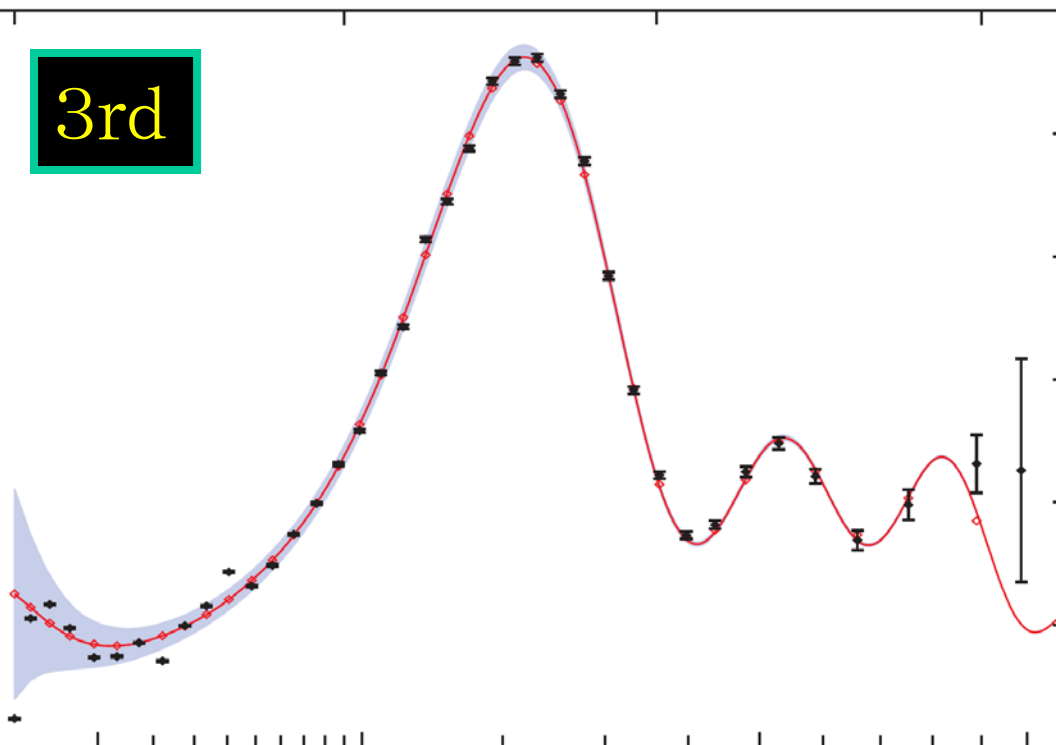
小スケール観測の精度が
徐々に上がっている

- ・ 観測時間
- ・ 観測機器の特性の理解

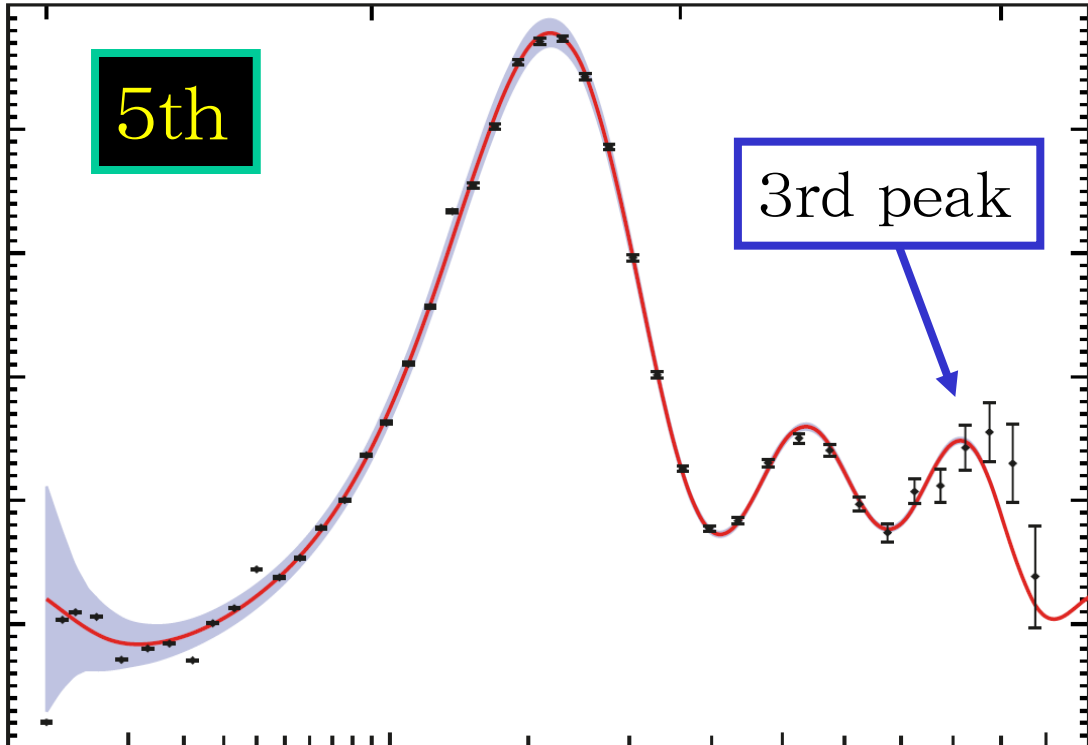
1st



3rd

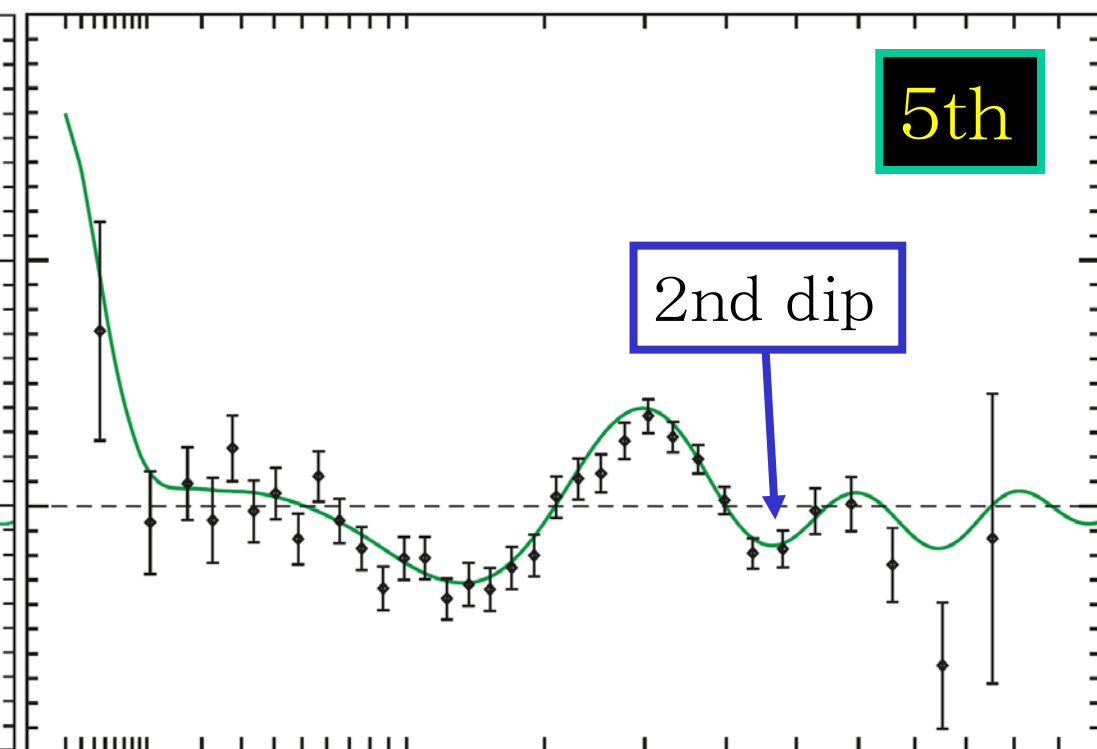
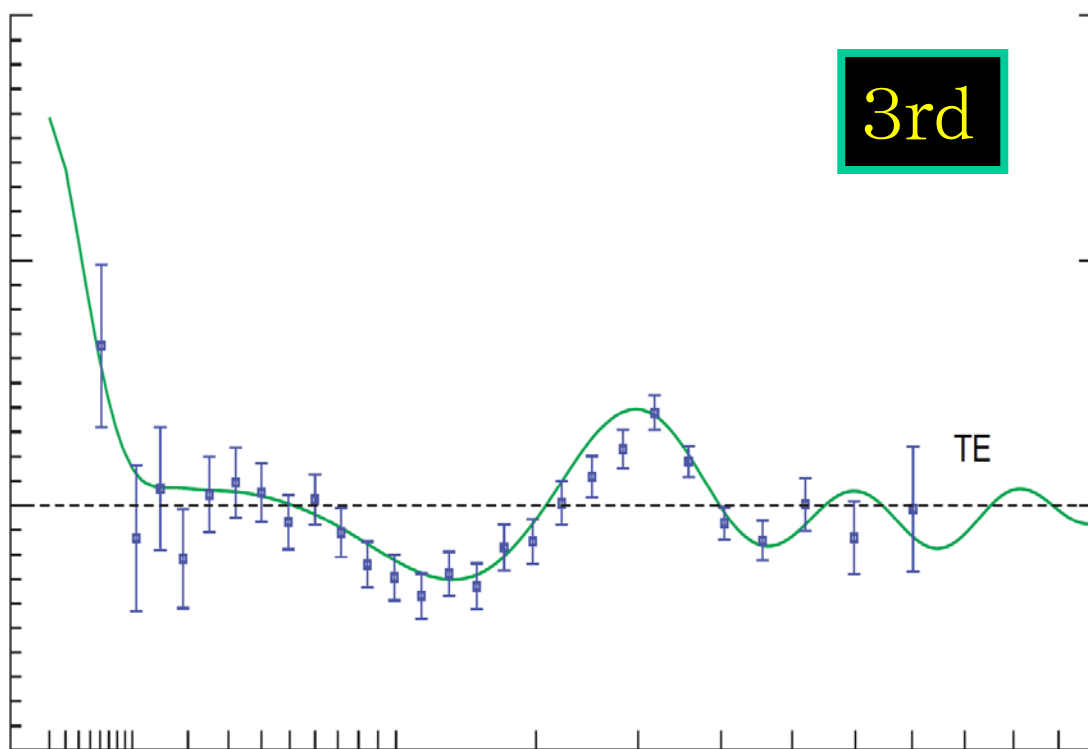
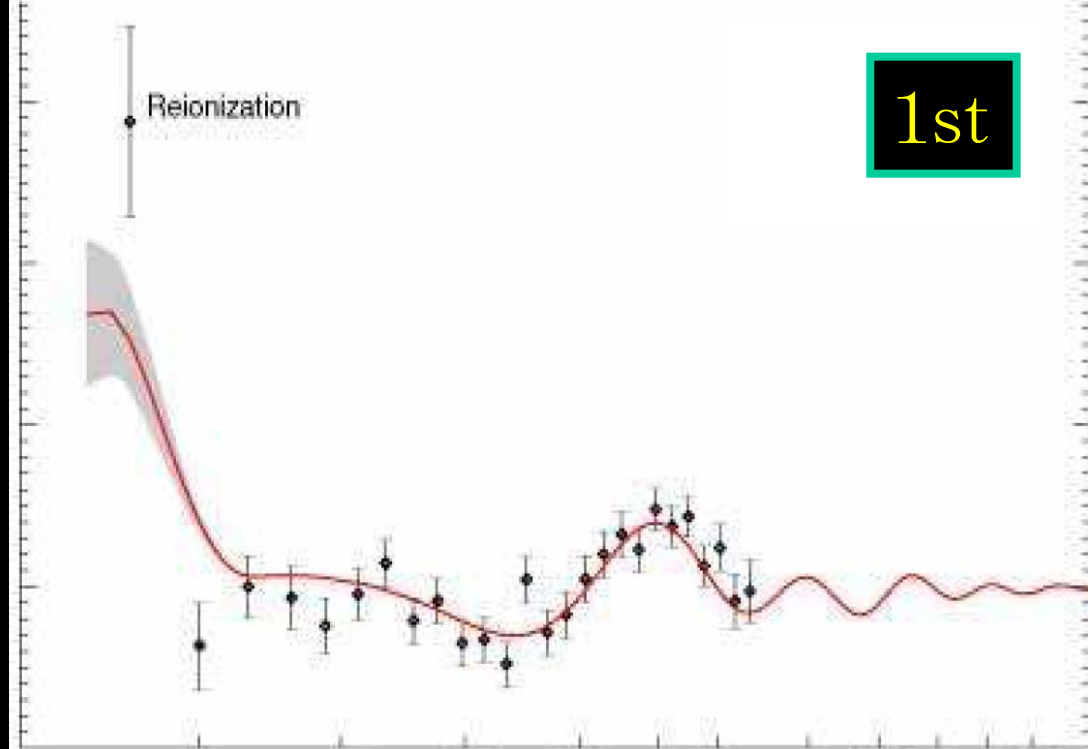


5th



偏光観測の推移

銀河系自身の放射の偏光が
かなりのノイズになるが
だいぶ理解が進んできた。

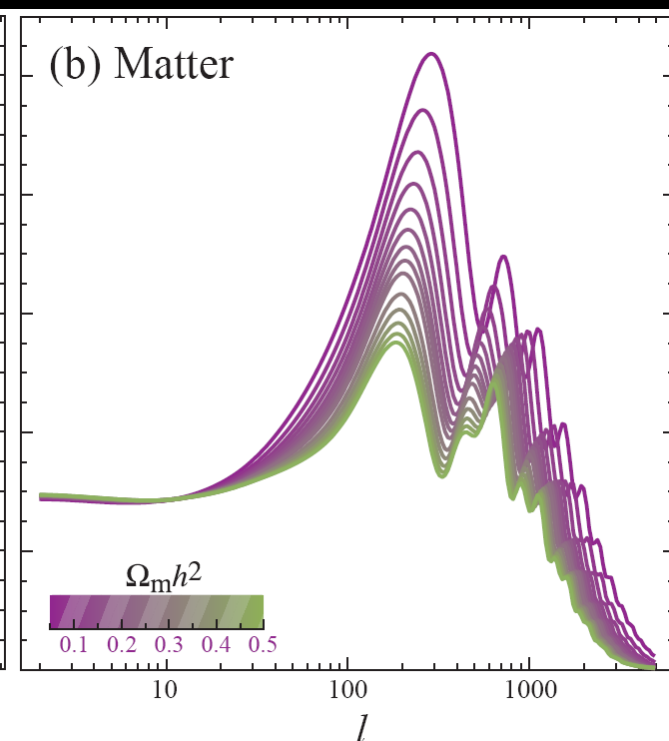
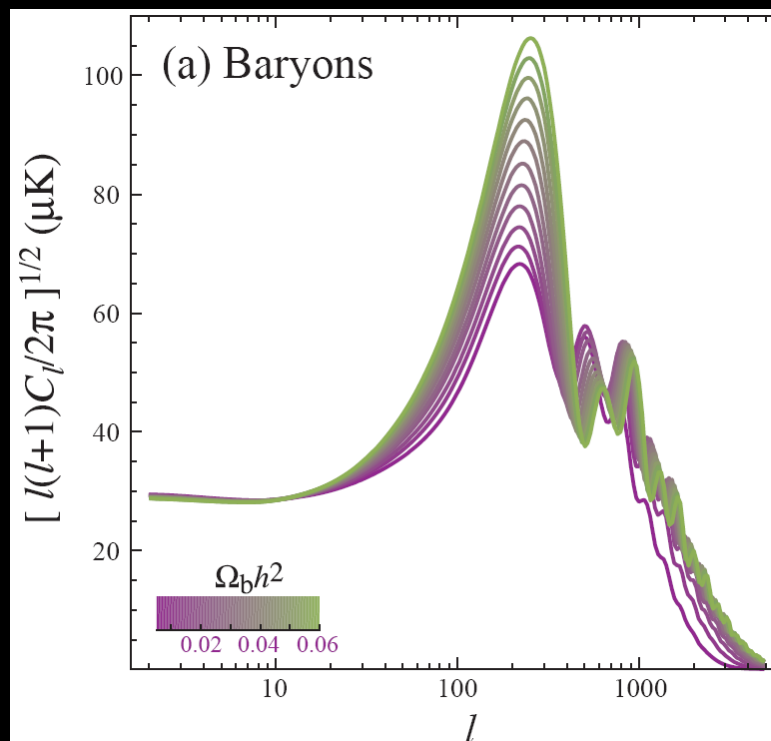
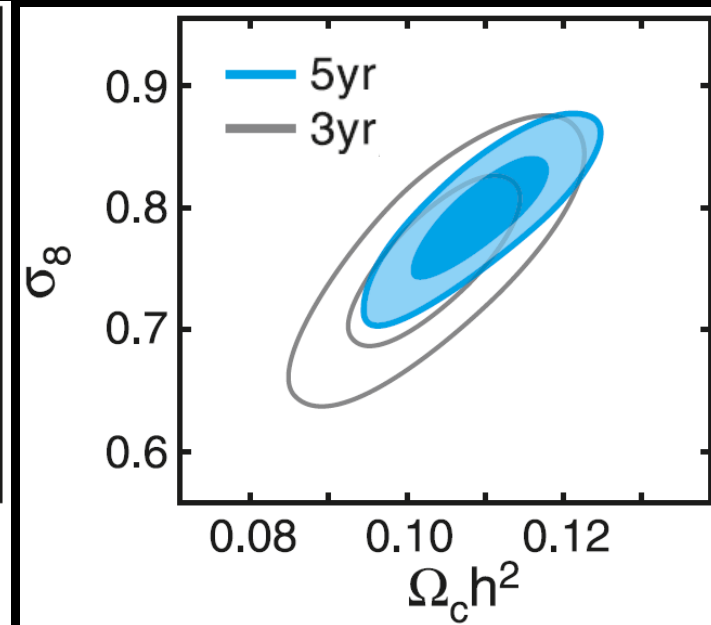
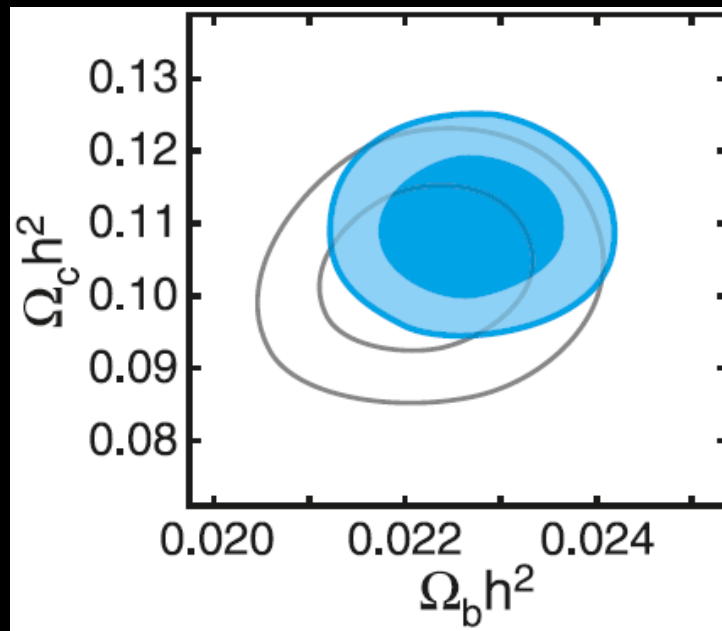


3rd peak観測

3rd peakが観測され
これまでの見積もり
よりピークが高い
ことがわかった。

1st, 2ndを保ちつつ
3rdを上げる。

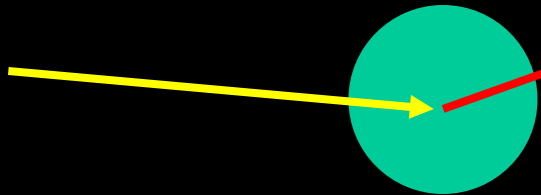
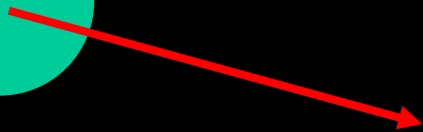
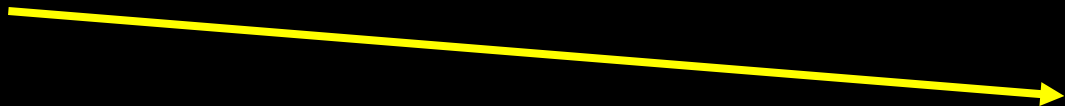
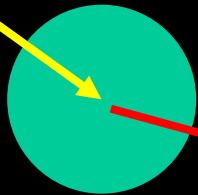
まあいずれにしても
たいした変化では
ない。



σ_8 と Sunyaev-Zel'dovich effect I

銀河団の高温ガスによる
コンプトン散乱でCMB光子
がエネルギーをもらう。

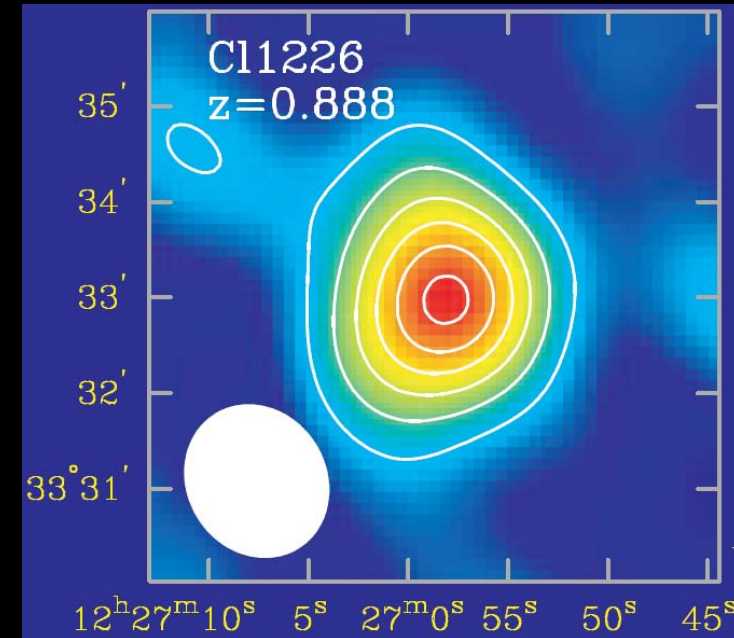
銀河団



銀河団



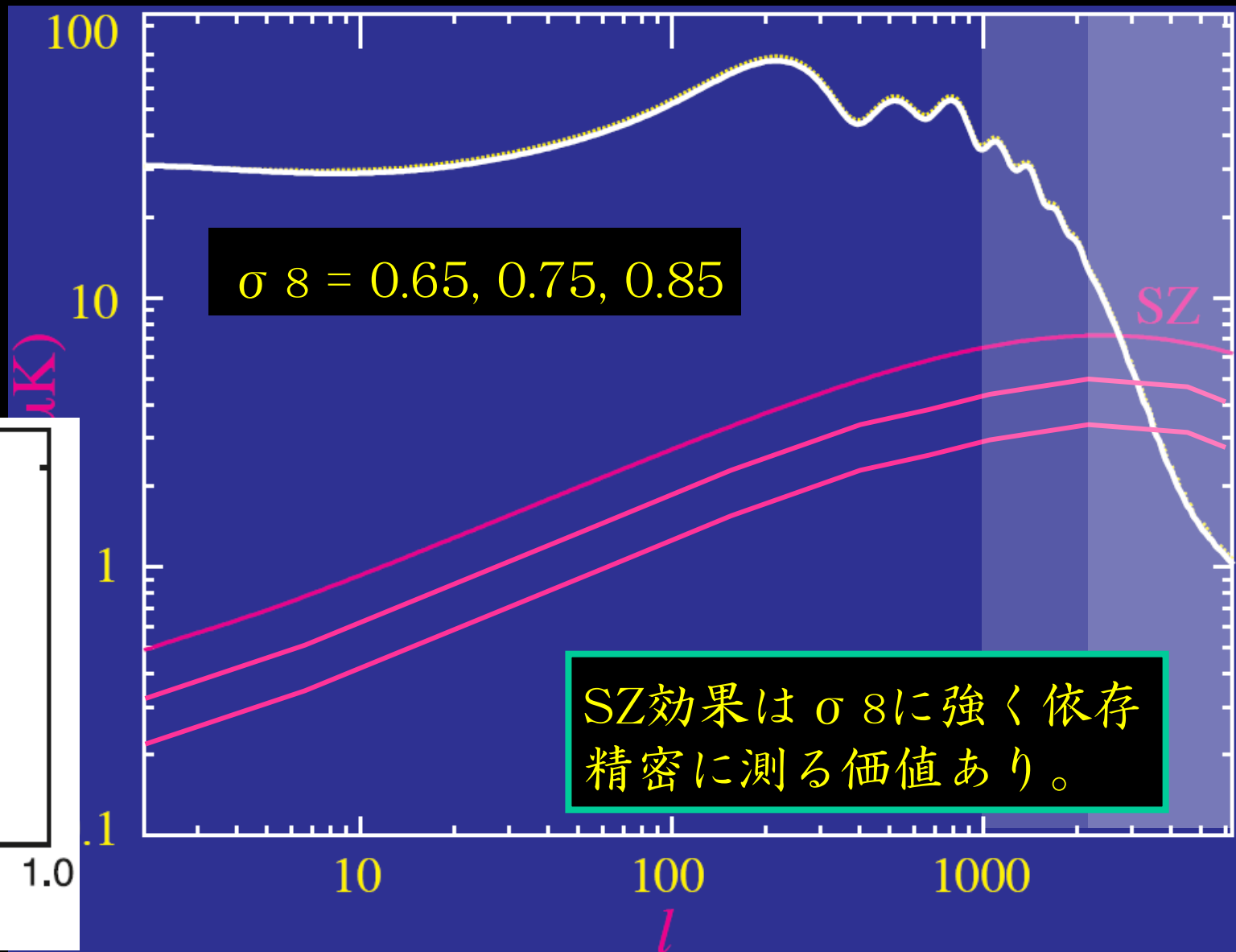
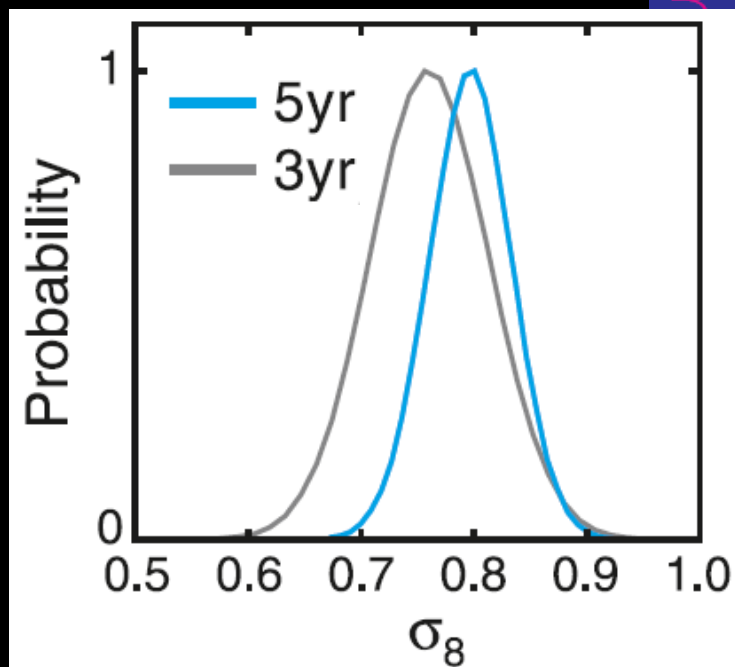
ランダムに分布する銀河団により
小スケールのゆらぎができる。
そのでき方は銀河団の数密度の
進化に依存する。



σ_8 とSunyaev-Zel'dovich effect II

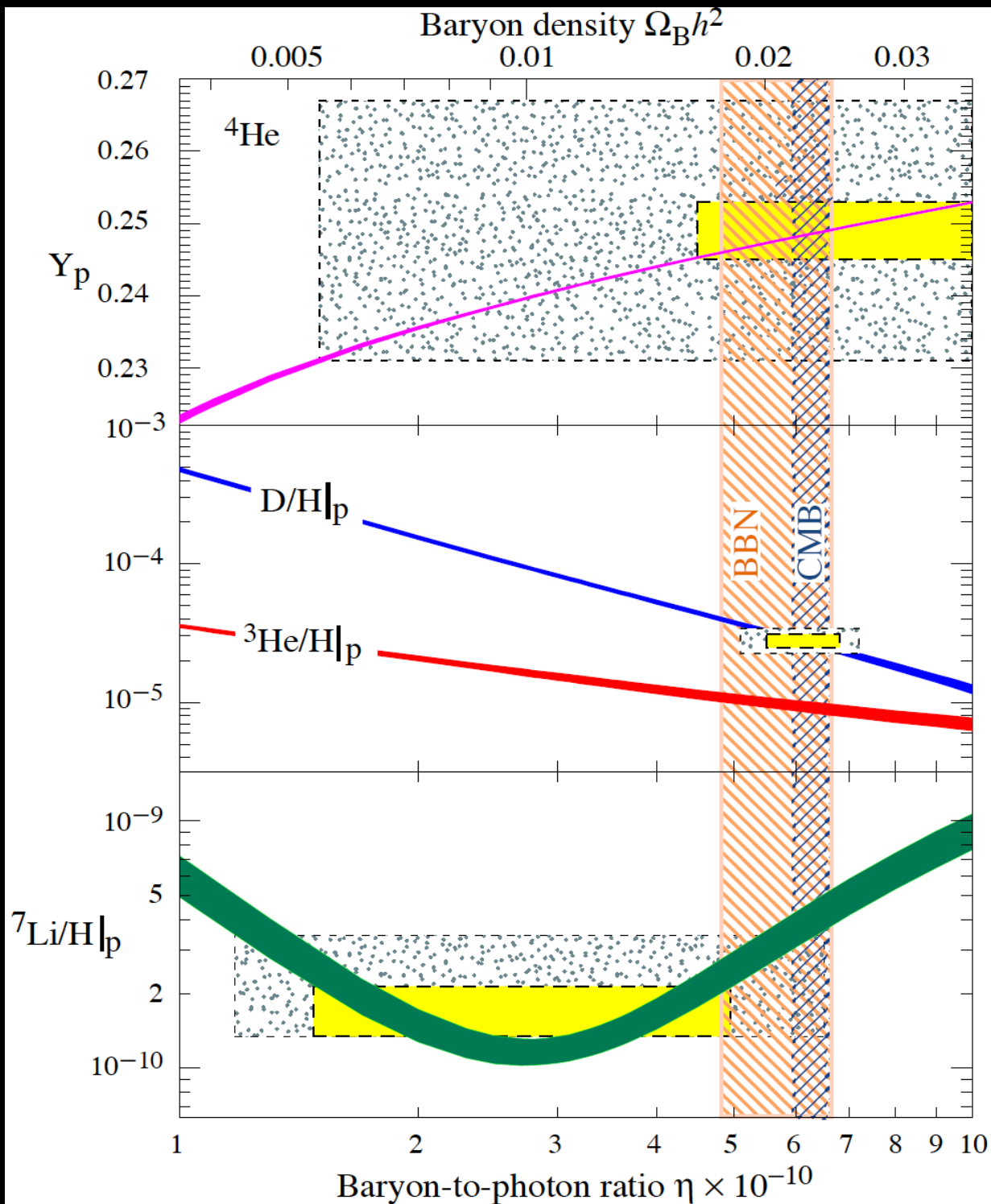
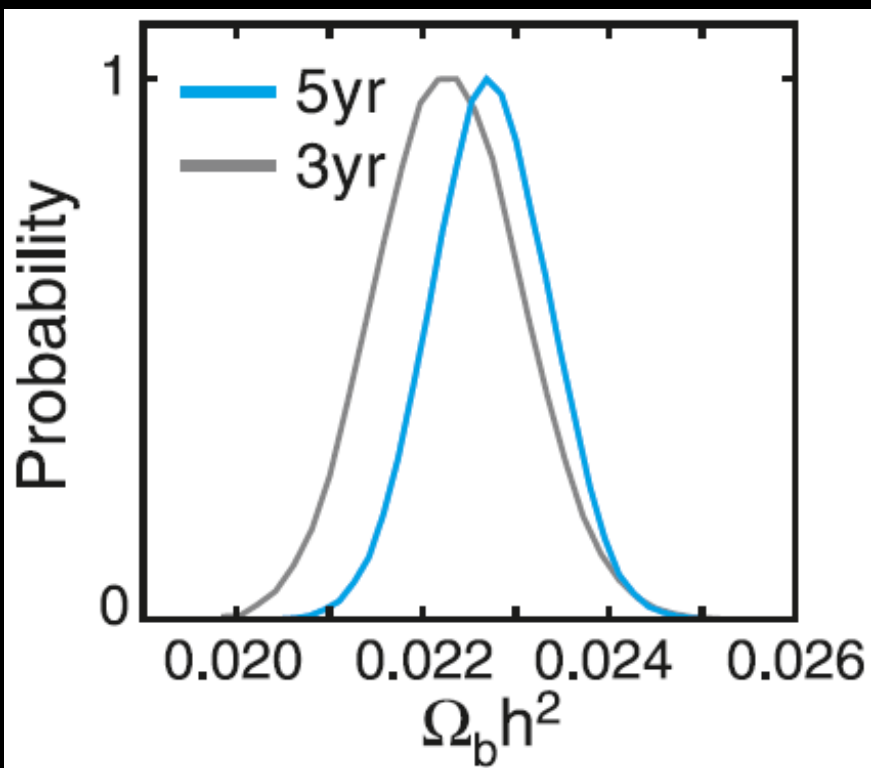
ゆらぎが大きいと
銀河団がたくさん
できる。

$$C_l \propto \sigma_8^7 (\Omega_b h)^2$$



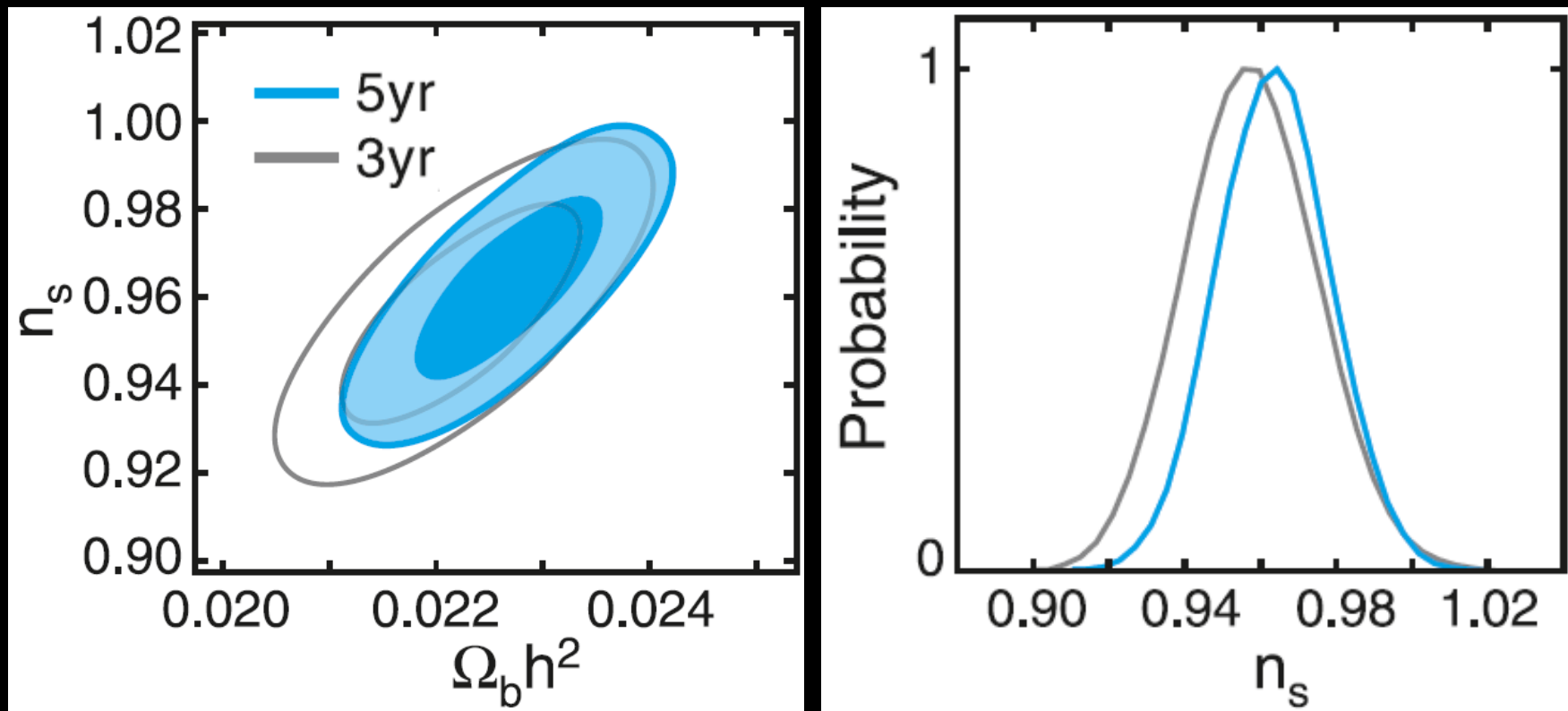
ビッグバン元素合成

BBNとCMBによる
バリオン密度の
見積もりの違いが
少し広がった。



spectral index

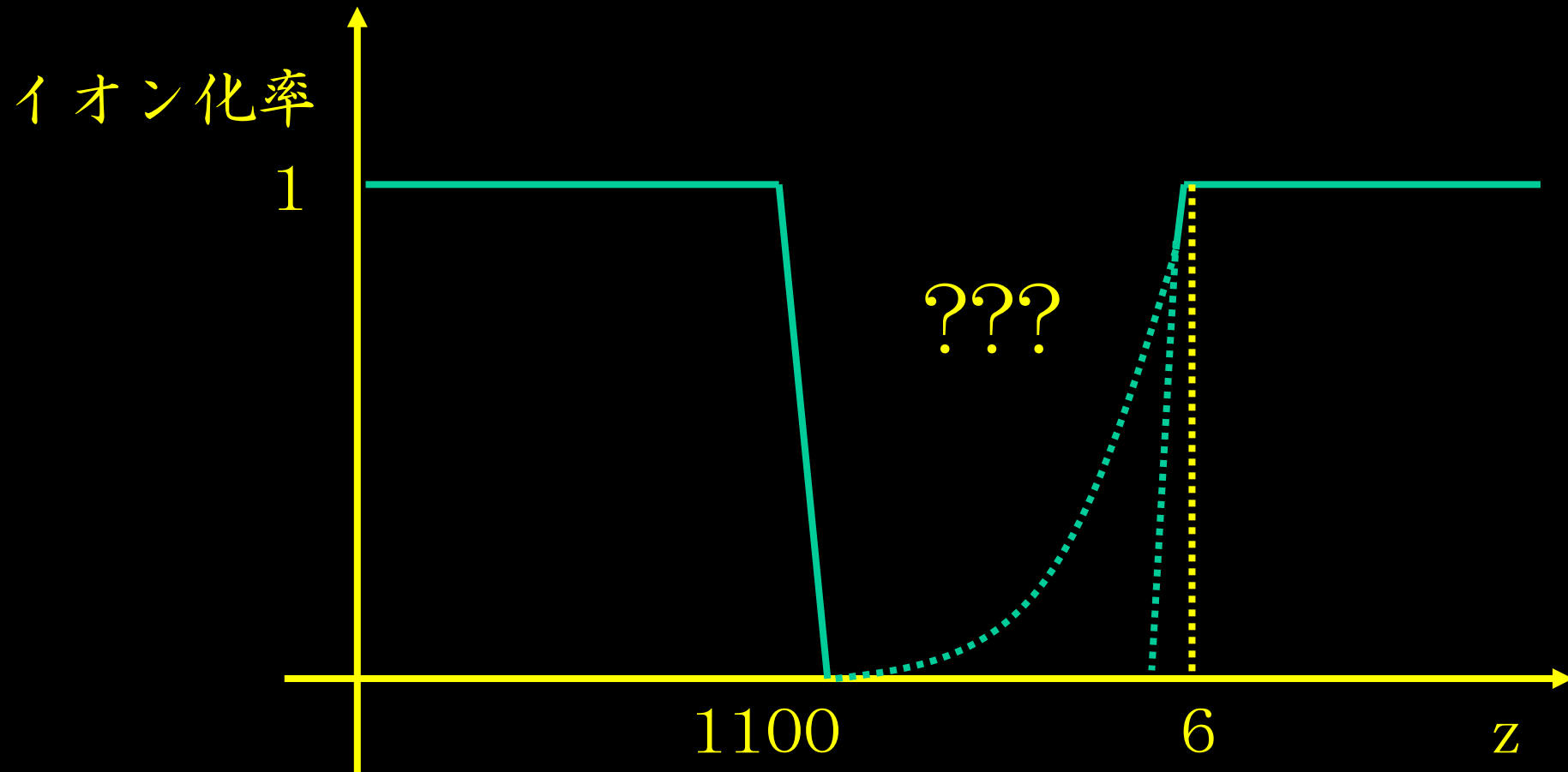
3rd peakが上がったことにより spectral index も
少々大きくなった。



しかし $n_s=1$ は 2.9σ で棄却

再イオン化1

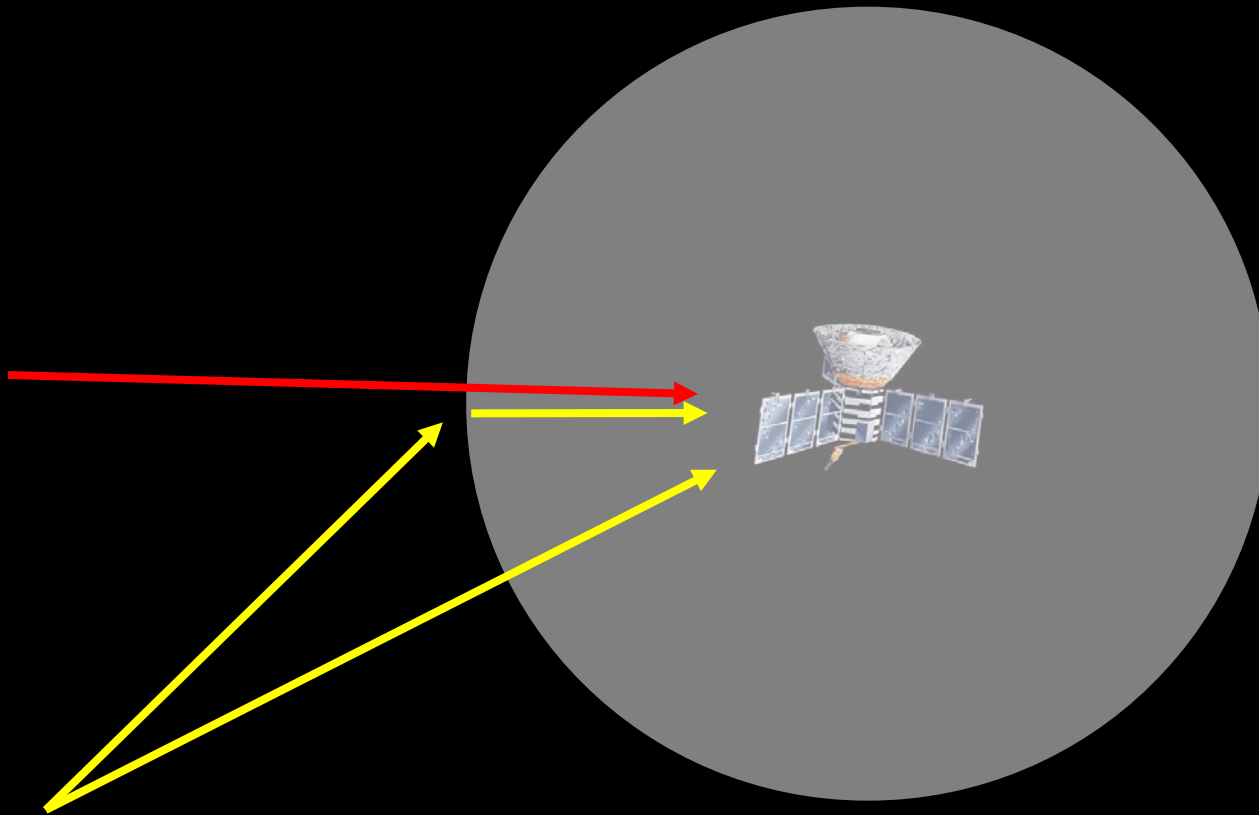
晴れ上がりで宇宙は一旦中性化する。
しかしその後いつからか再イオン化が始まって
 $z=6$ あたりで再イオン化が完了したことがわかっている。



再イオン化2

再イオン化とCMB

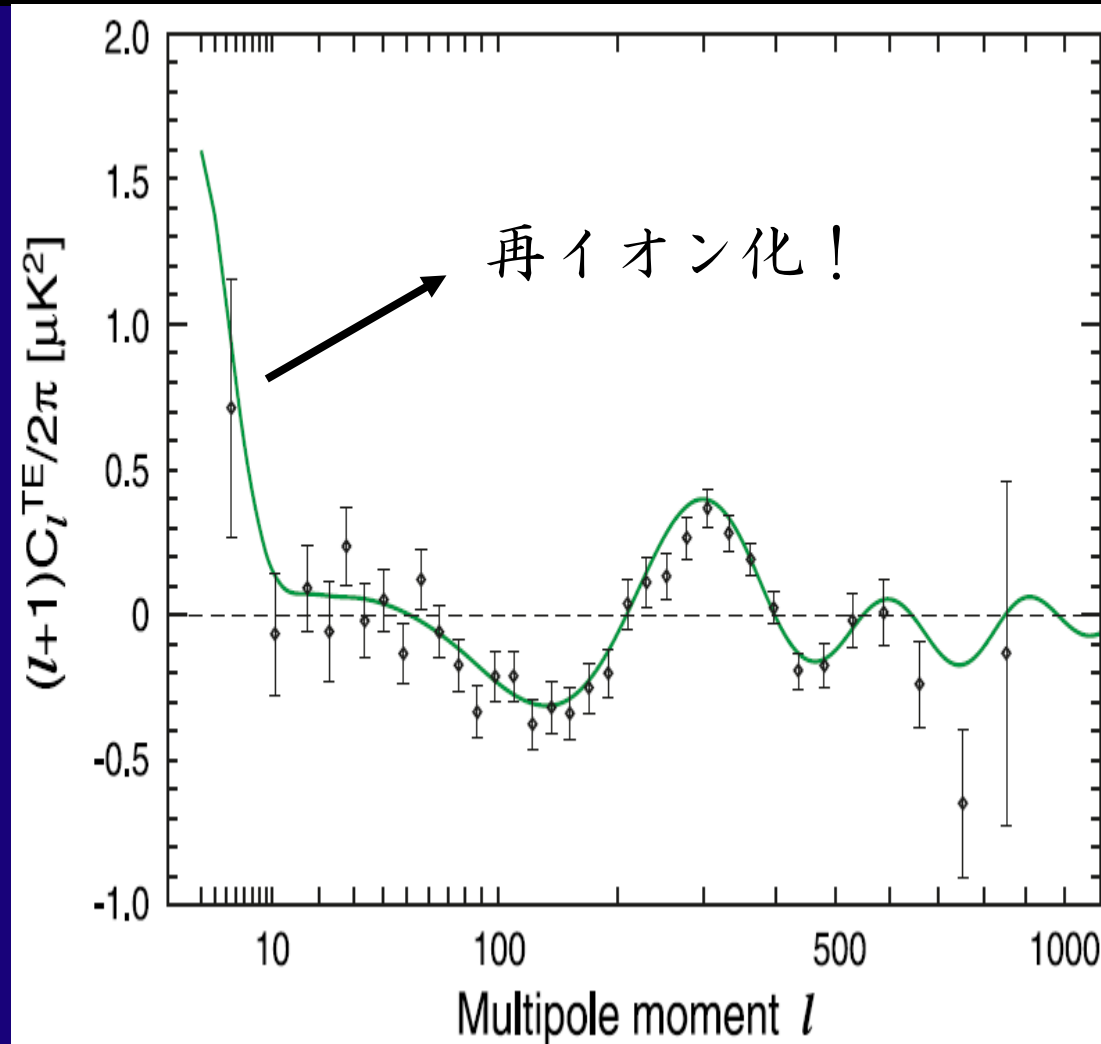
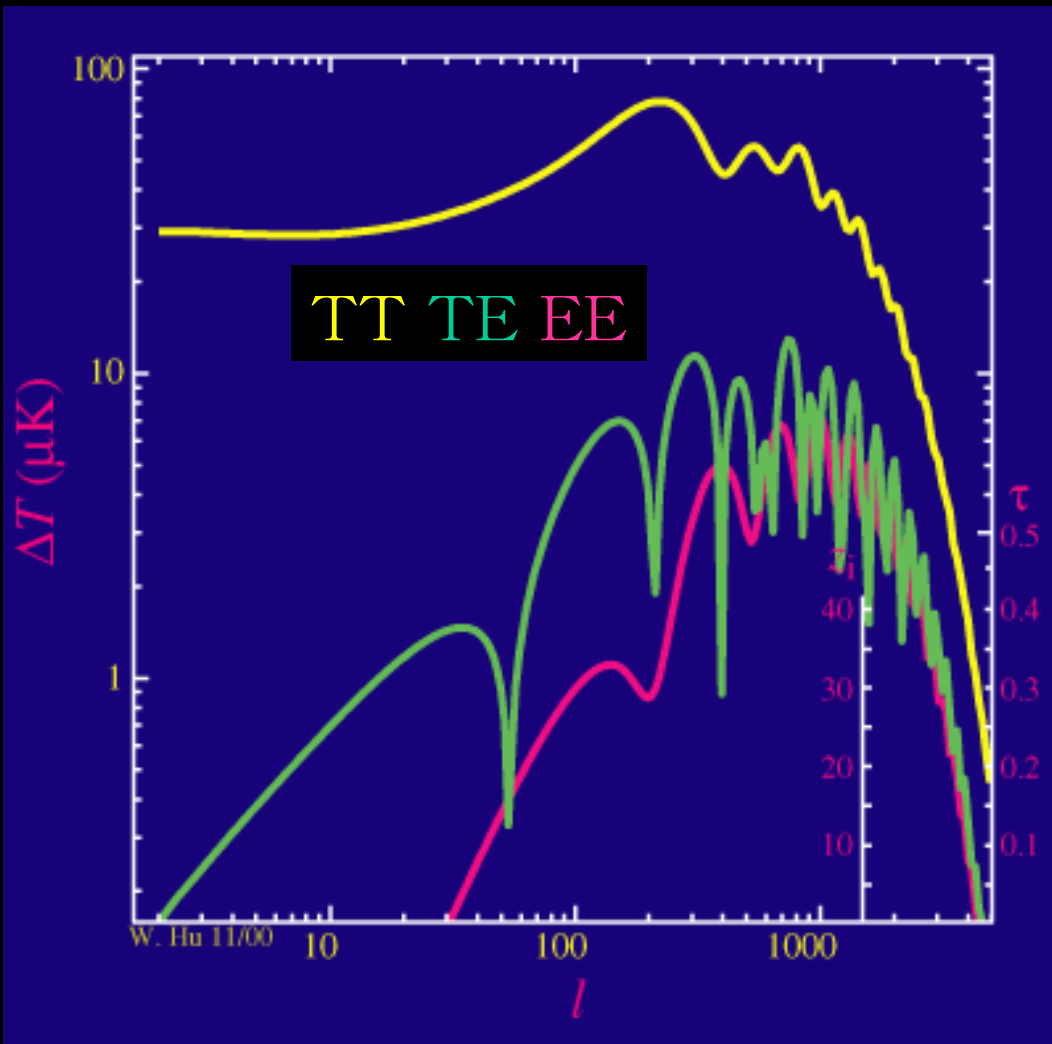
再イオン化すると自由電子が生まれるのでCMB光子を散乱する。するともともとあったゆらぎは減衰する。



散乱した場所での四重極から偏光が生まれる。これは当時のhorizonのスケールなのでだいぶ大スケール。

再イオン化3

再イオン化が起こると小スケールでパワーが落ち、大スケールの偏光ができる。

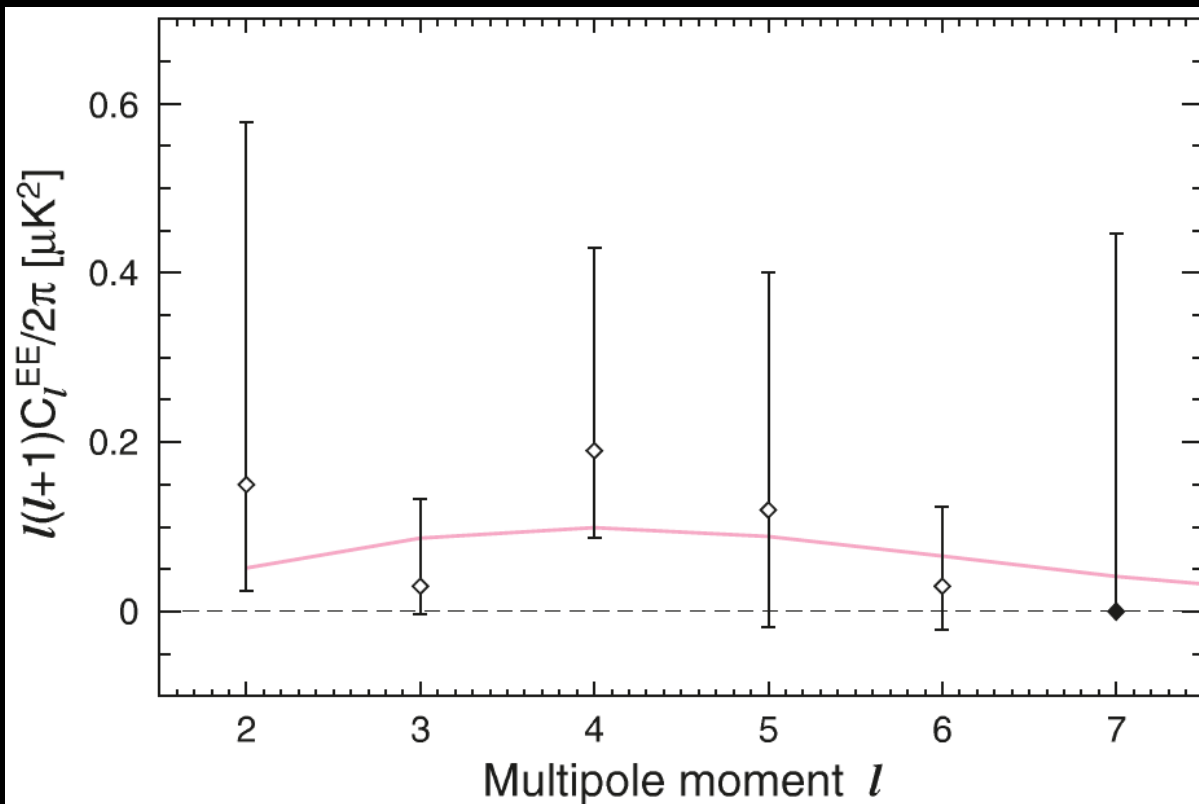


再イオン化4

E mode観測

foregroundの理解が進んだことにより、偏光の multipoleを求めるのにQ、VバンドだけでなくKaバンドも使えるようになった。

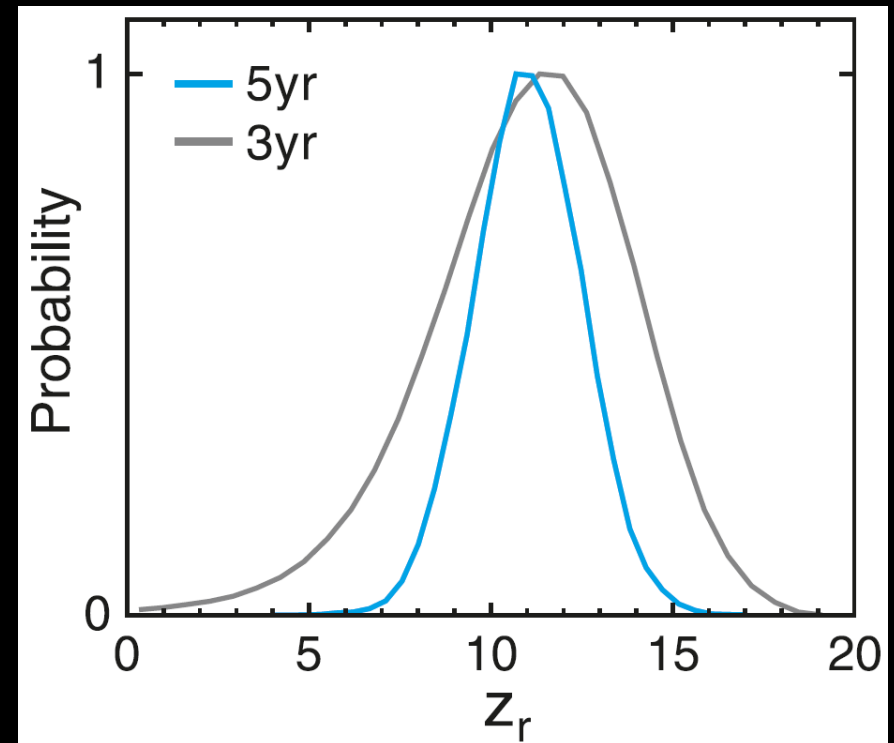
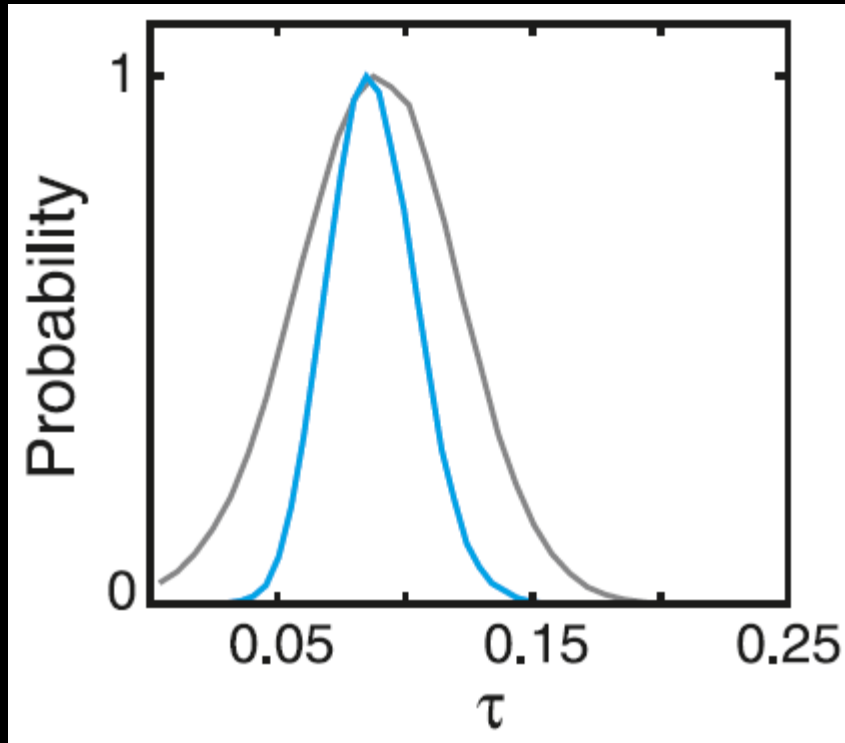
→ EE、BBのノイズがfactor 2ほど減る。



個々のmultipoleでは微妙だが、2-7を平均すると $S/N > 10$ 。cosmic varianceとforegroundやその他のsystematic errorがdominantになった。

再イオン化 5

ある z で瞬間的に完全に再イオン化したとする。
→ optical depthと再イオン化の z は1対1対応。



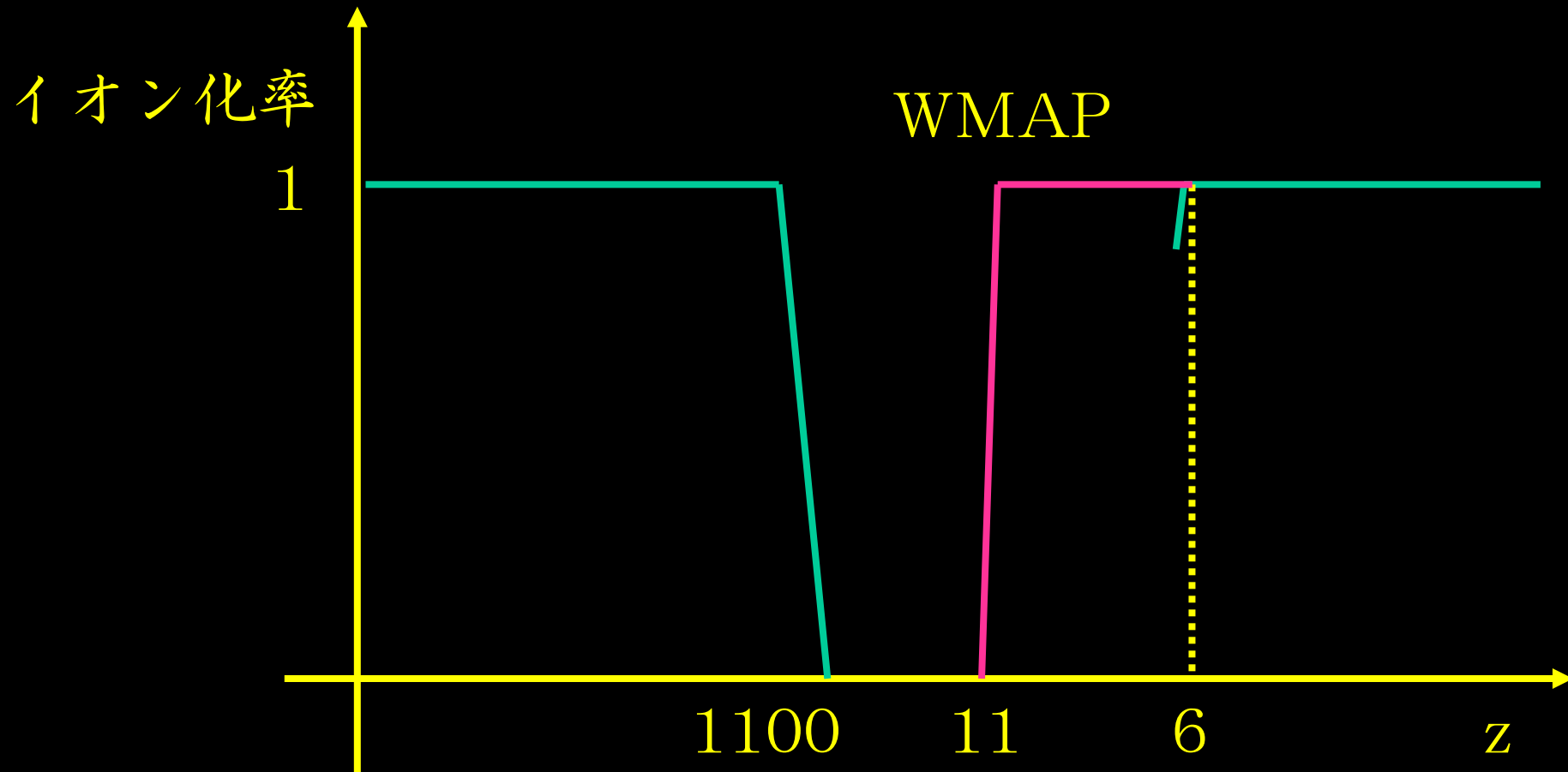
$$z_{\text{reion}} = 11.0 \pm 1.4$$

$\tau = 0$ を 5σ で棄却

「 $z = 6$ で再イオン化」を
99.9%以上で棄却

再イオン化6

- これまでの知見とWMAPの結果は矛盾している。
→「ある z で瞬間的に完全に再イオン化」が間違っている
→再イオン化はもっとじわじわと起こった



minimal Λ CDM model : まとめ

観測データの改善

- ・ 観測時間の増加
- ・ 観測機器の特性の理解
- ・ foregroundの理解

→ 小スケールTT・TE、大スケールEEの誤差が減る

全てのデータを説明できる最もシンプルなモデル

- ・ 仮定 : flat, Gaussian, adiabatic, power-law
- ・ 3 yearsと比べて大きな変化はなく、全体的にパラメータがよく制限されるようになった。
- ・ optical depth (再イオン化時刻) に関しては精度がだいぶよくなった。z = 6での再イオン化を99.9%で棄却。
- ・ scale invariantなゆらぎを 2.9σ で棄却

3、extended Λ CDM model

extended Λ CDM model

新たなパラメータとminimal modelでの値

$dn_s/d \ln k$	running spectral index : 0
r	tensor/scalar ratio : 0
α_{-1}	エントロピー摂動 (curvaton) : 0
α_0	エントロピー摂動 (axion) : 0
N_{eff}	ニュートリノ (相対論的自由度) の数 : 3.04
ω_ν	質量のあるニュートリノの密度 : 0
Ω_k	空間曲率 : 0
w	dark energyの状態方程式 : -1
Y_P	primordial helium abundance : 0.24
x_e	2ステップ再イオン化 : 1ステップ目のイオン化率
z_r	1ステップ目の時刻

だいたいの場合、1つだけをonにしてそれに制限をつける

外部データ

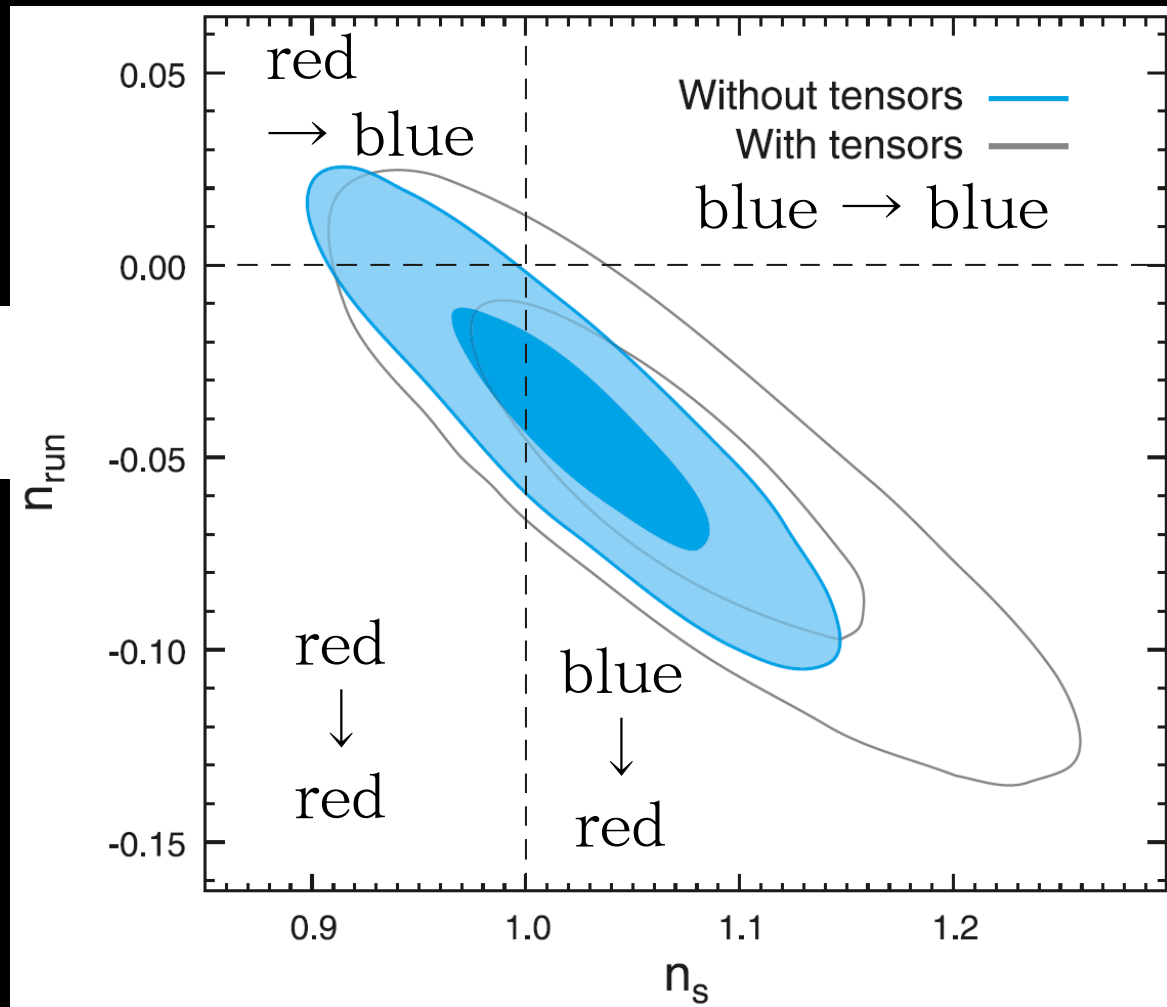
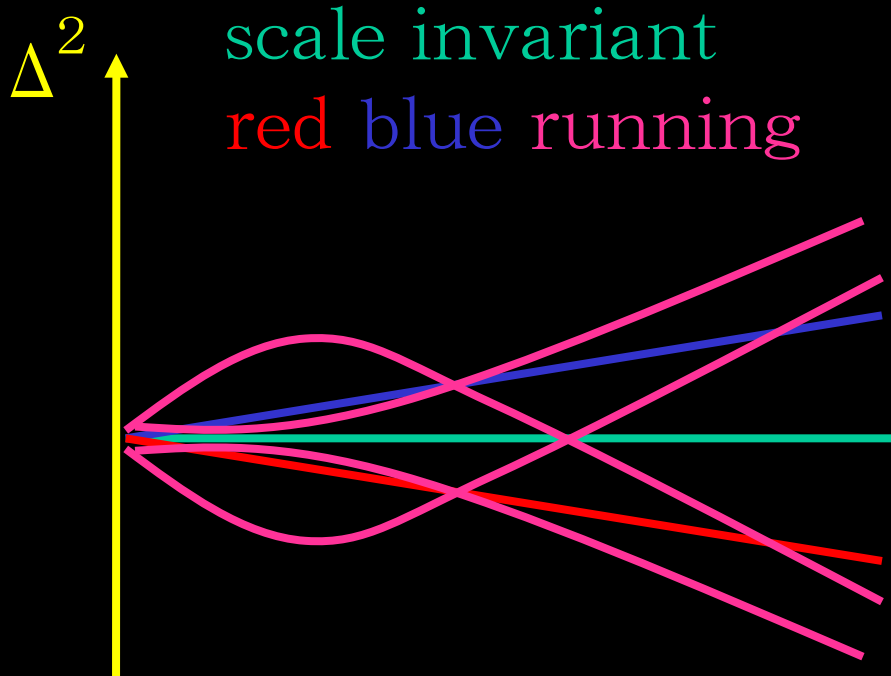
- Hubble constant from Hubble Key Project
 $h = 0.72 \pm 0.08 \text{ km/s/Mpc}$
minimal modelではWMAPだけでもっと精度よく決まるが、extended modelでは有用。
- luminosity distance from SNIa
- distance at $z = 0.2$ and 0.35 from BAO
matter power spectrumはSDSSと2dFGRSでデータに矛盾があるので使わない。

running spectral index

ゆらぎのスペクトル

$$\Delta_{\mathcal{R}}^2(k) \propto \left(\frac{k}{k_0}\right)^{n_s-1}$$

$$n_s(k) = n_s(k_0) + \frac{1}{2} \frac{dn_s}{d \ln k} \ln \left(\frac{k}{k_0}\right)$$



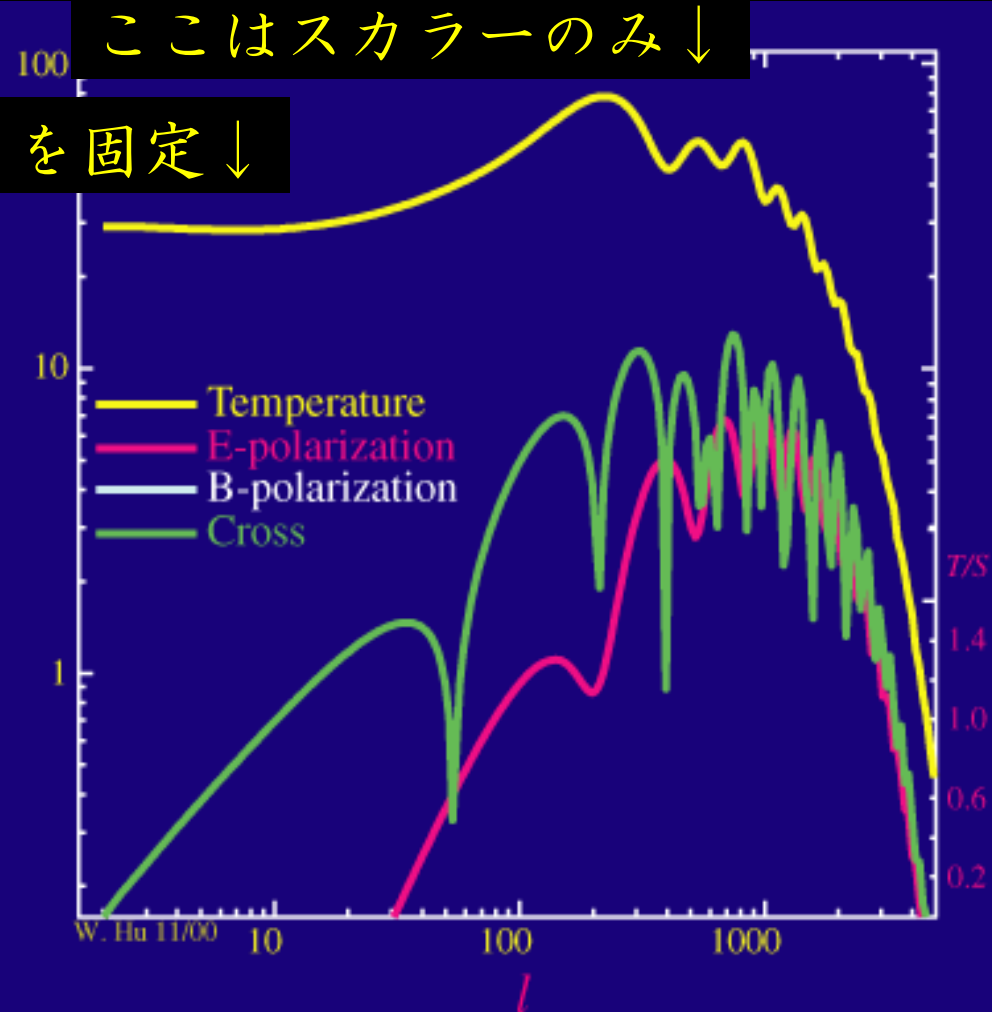
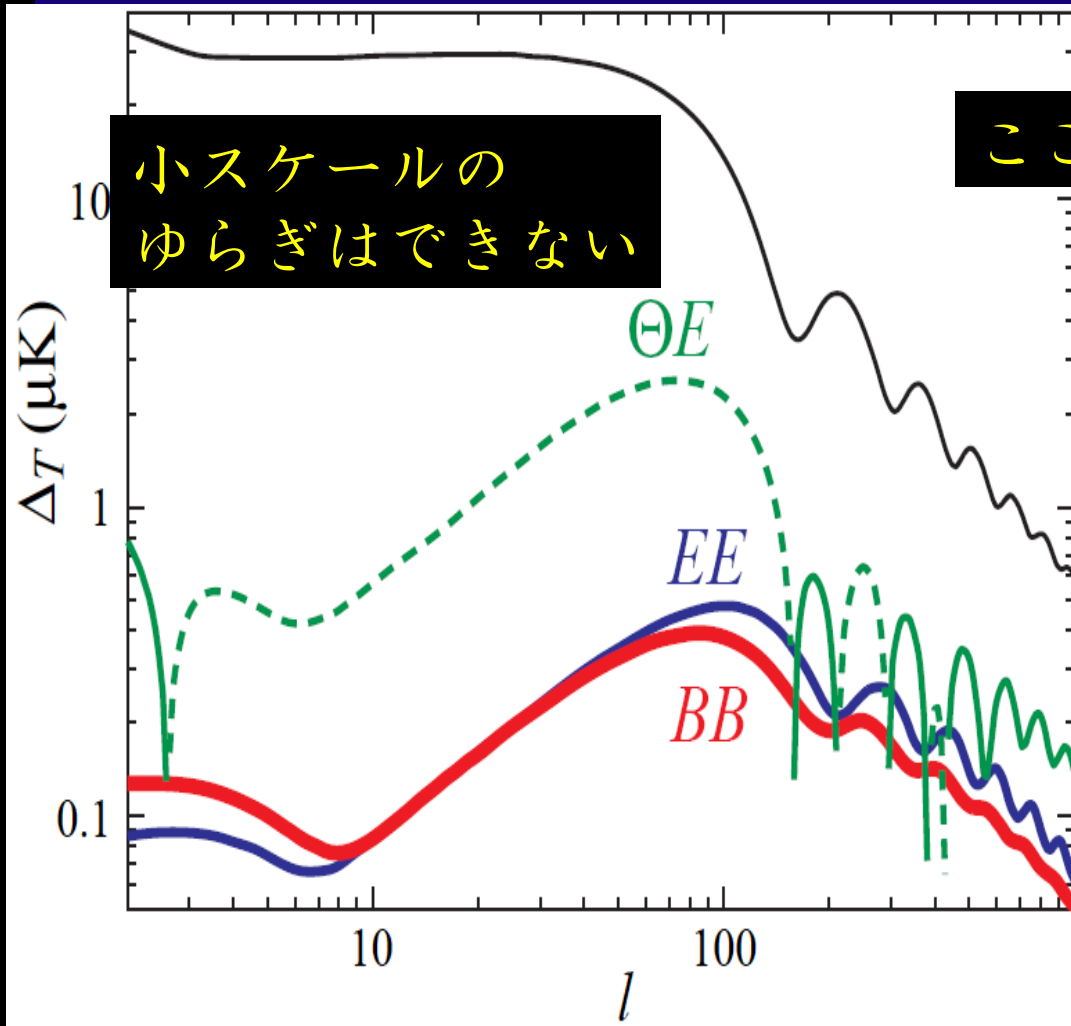
n_s	$1.031^{+0.054}_{-0.055}$
$dn_s/d \ln k$	-0.037 ± 0.028

重力波 1

温度ゆらぎ：ISWで大スケールに

E mode：スカラーにまぎれる

B mode：LSS時のhorizon scaleにピーク



重力波 2

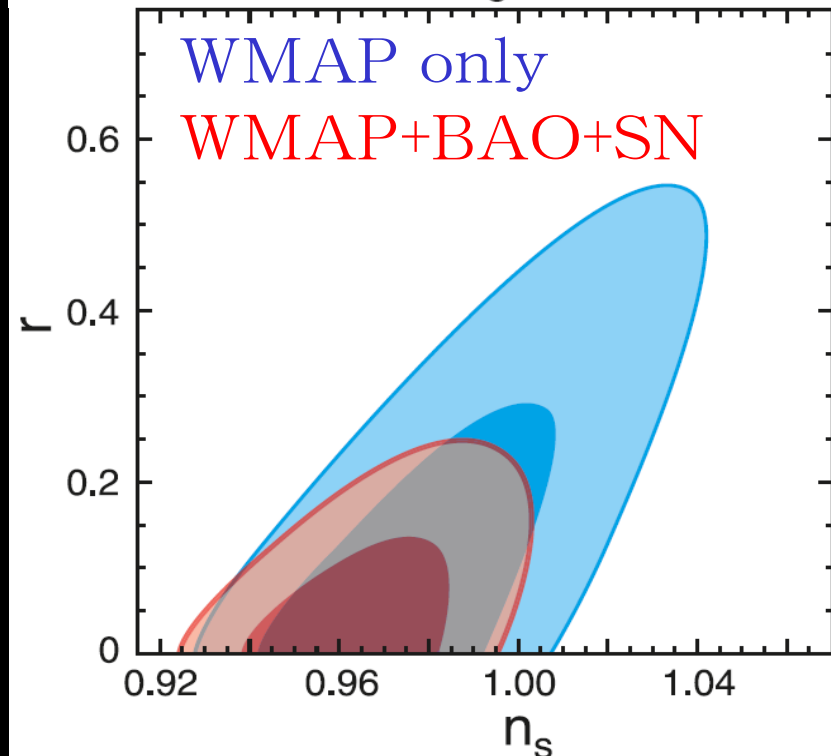
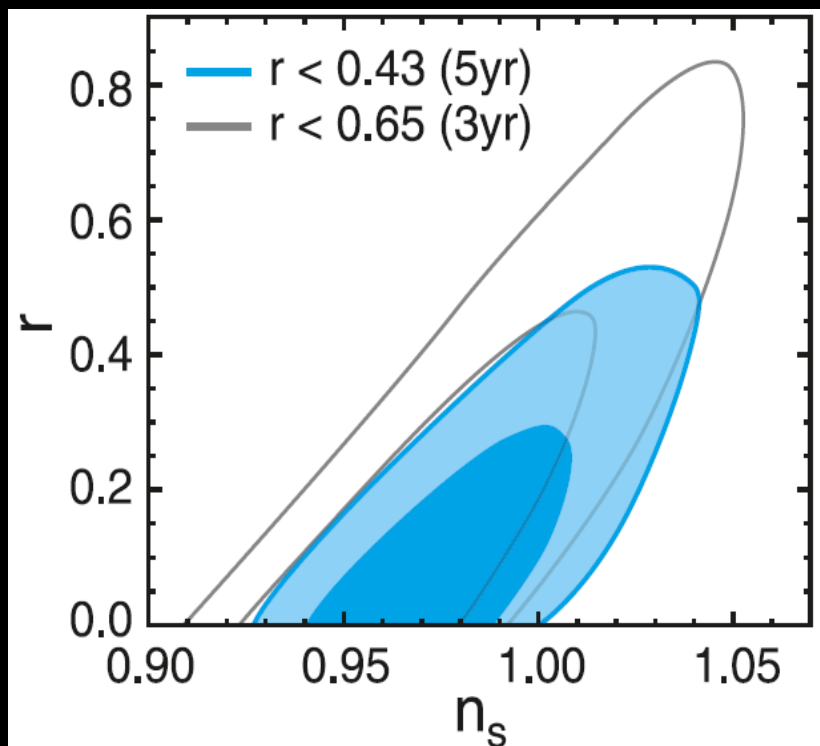
重力波を入れても小スケール
 だけでゆらぎを大きくできれば
 釣り合いが取れる
 → ゆらぎのスペクトルを
 blueにする
 → n_s と重力波 ($r=T/S$) は縮退

5 years

	WMAP only	WMAP+BAO+SN
n_s	0.986 ± 0.022	0.968 ± 0.015
r	< 0.43 (95% CL)	< 0.20 (95% CL)

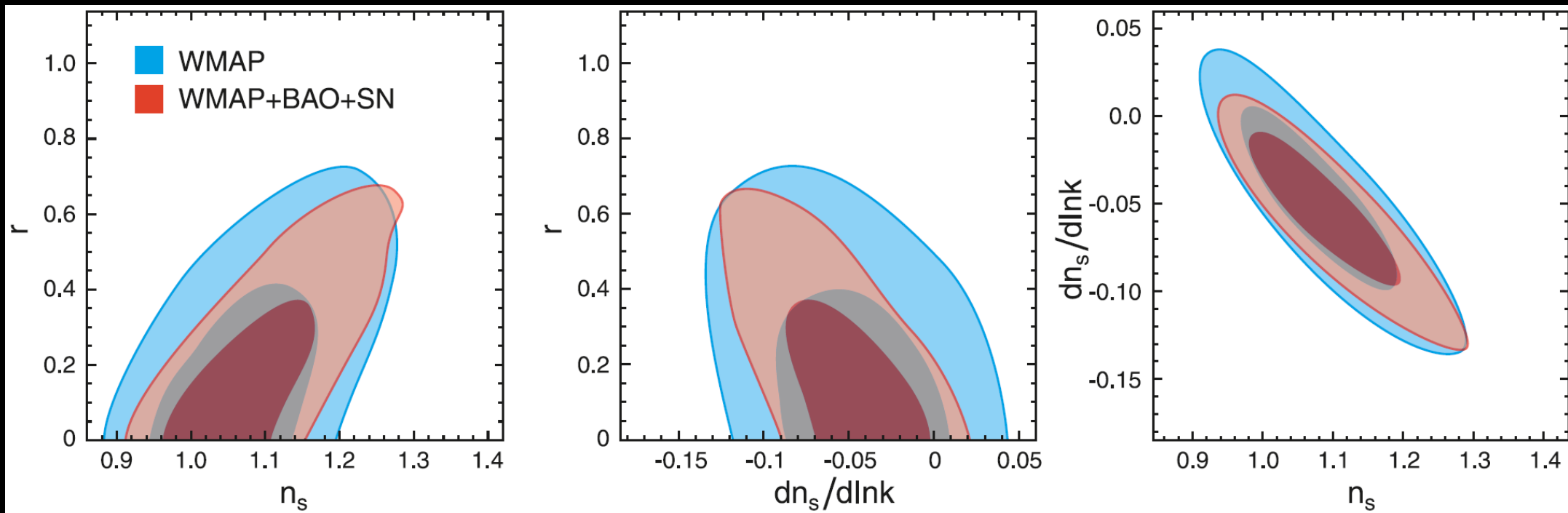
3 years

WMAP	< 0.65 (95% CL)
WMAP+BOOM+ACBAR	< 0.68 (95% CL)
WMAP+CBI+VSA	< 0.62 (95% CL)
WMAP+2df	< 0.38 (95% CL)
WMAP+SDSS	< 0.30 (95% CL)



running spectral index、重力波

running spectral indexと重力波を同時に入れる。
→ 当然制限はゆるくなる



	WMAP only	WMAP+BAO+SN
n_s	$1.087^{+0.072}_{-0.073}$	$1.093^{+0.068}_{-0.069}$
r	< 0.58 (95% CL)	< 0.54 (95% CL)
$dn_s/d\ln k$	-0.050 ± 0.034	$-0.055^{+0.027}_{-0.028}$

ニュートリノの数 (1)

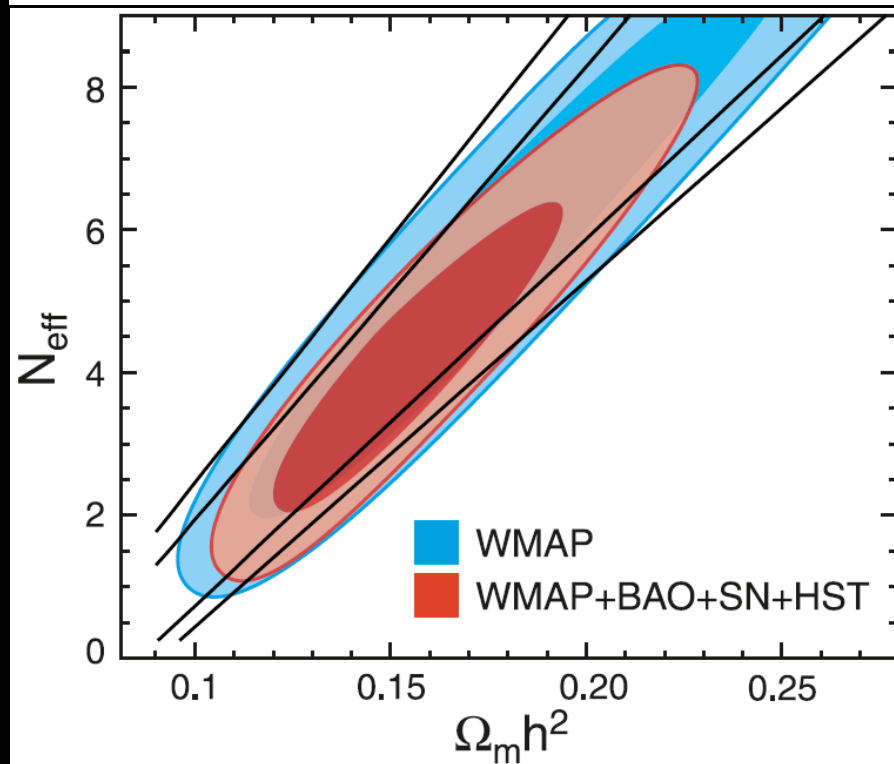
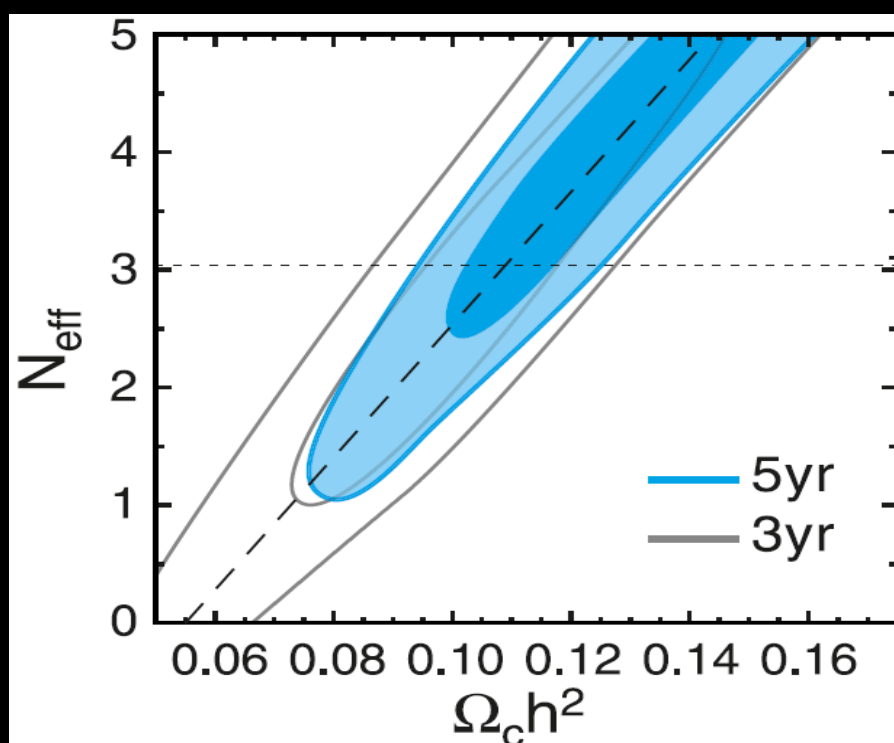
ニュートリノ (相対論的自由度) のeffectiveな数は普通3.04。
これをパラメータとして動かす。
するとmatter-radiation equality
の時間が変わる。

$$1 + z_{\text{eq}} = \frac{\Omega_m}{\Omega_r} = \frac{\Omega_m h^2}{\Omega_\gamma h^2} \frac{1}{1 + 0.2271 N_{\text{eff}}}$$

初期宇宙では

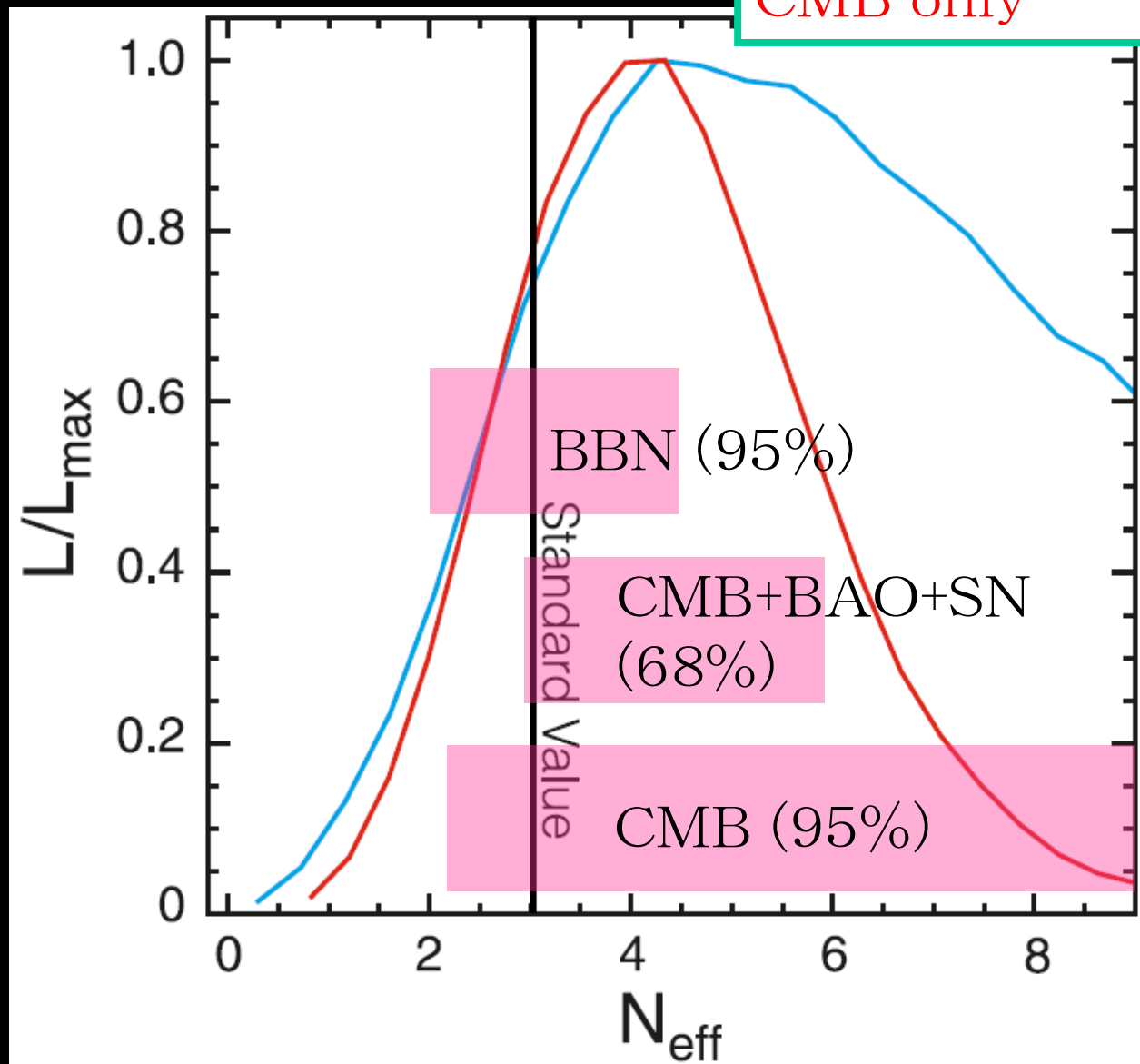
$$\Omega_r + \Omega_\nu + \Omega_c + \Omega_b = 1$$

であり、 Ω_r は知っているので
ニュートリノを増やすことは
CDMを減らすようなもの。



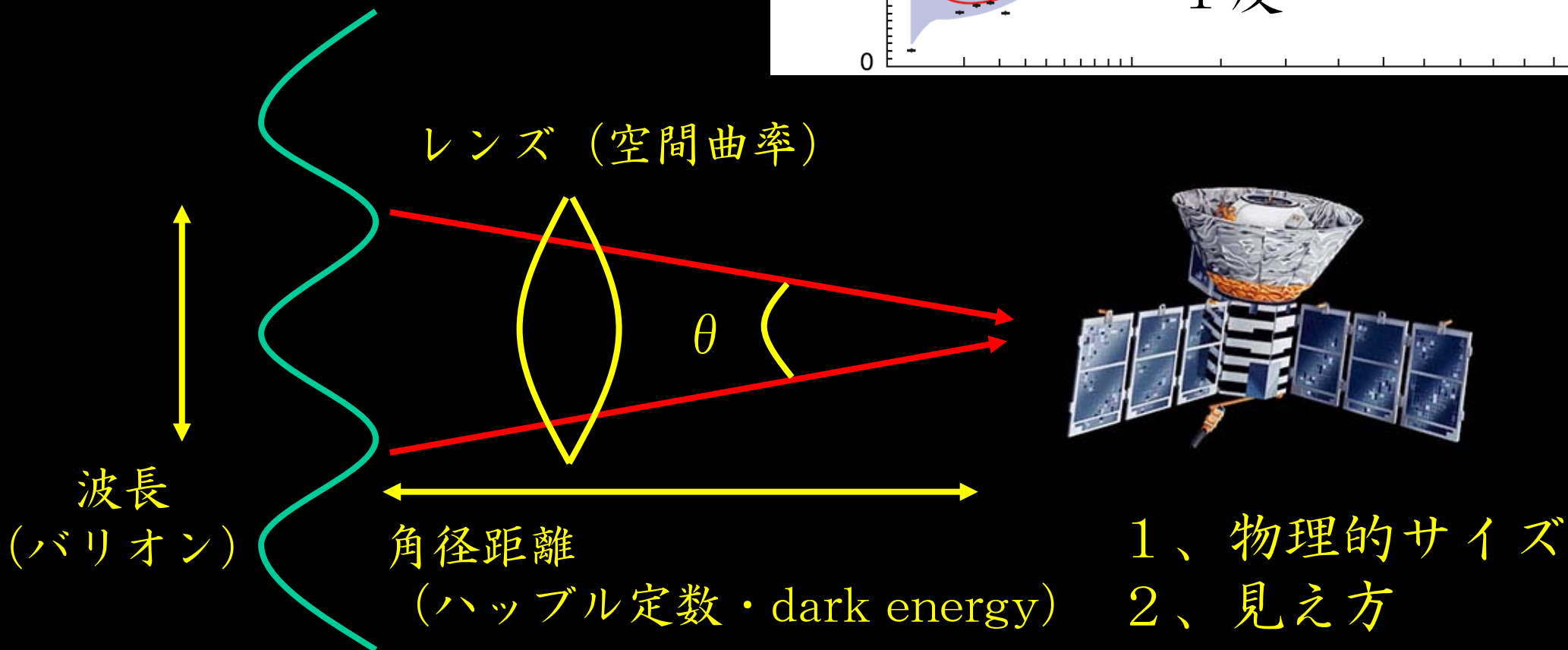
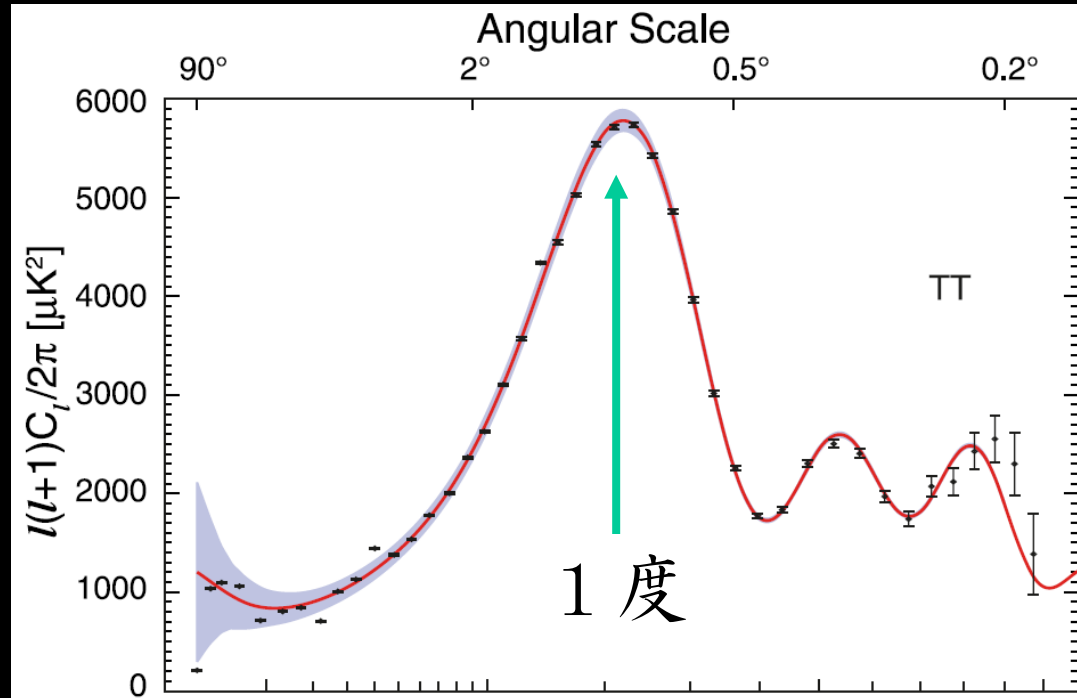
ニュートリノの数 (2)

BBNと独立に
背景ニュートリノの
存在を始めて示した。



空間曲率 1

1st peakがどの角度スケールで見えるかは空間曲率の情報を与える。

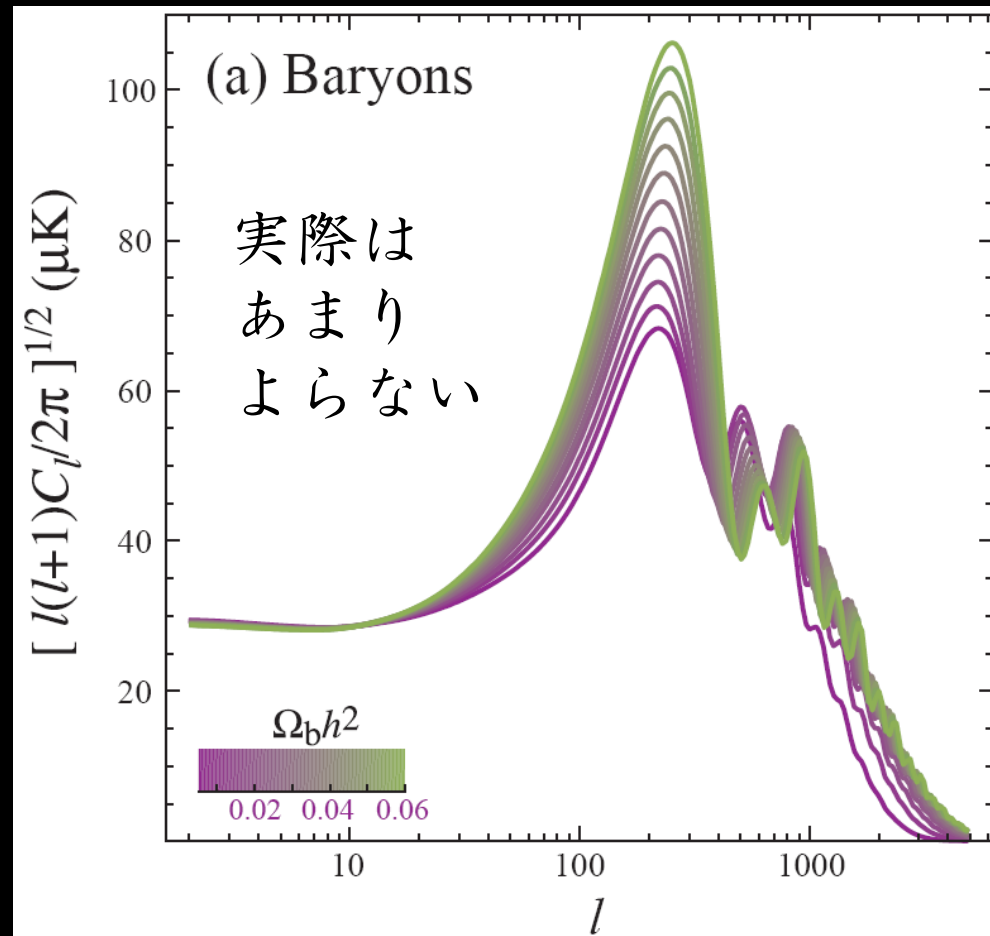


空間曲率 2

物理的なサイズは当時の音速から決まる

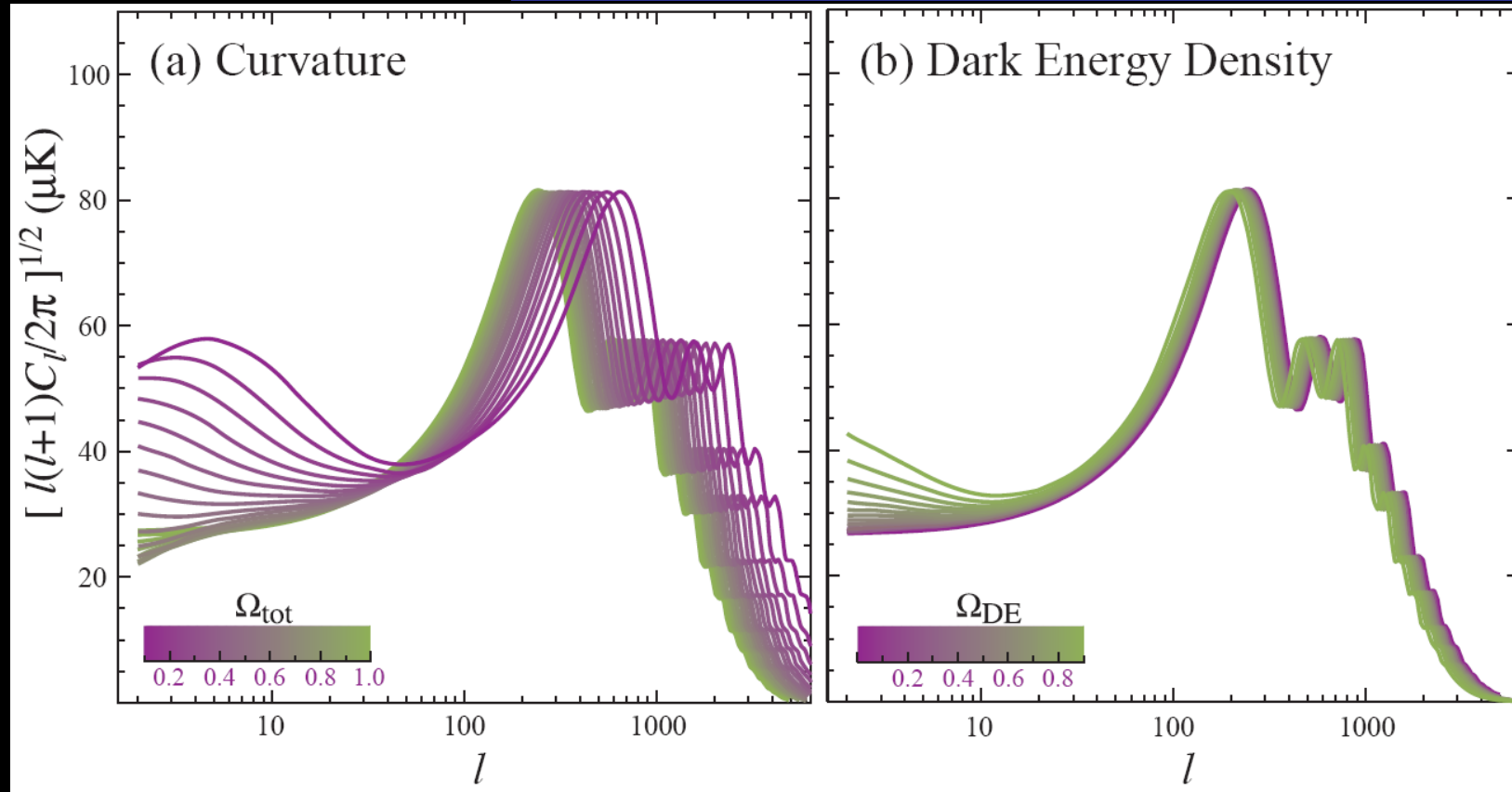
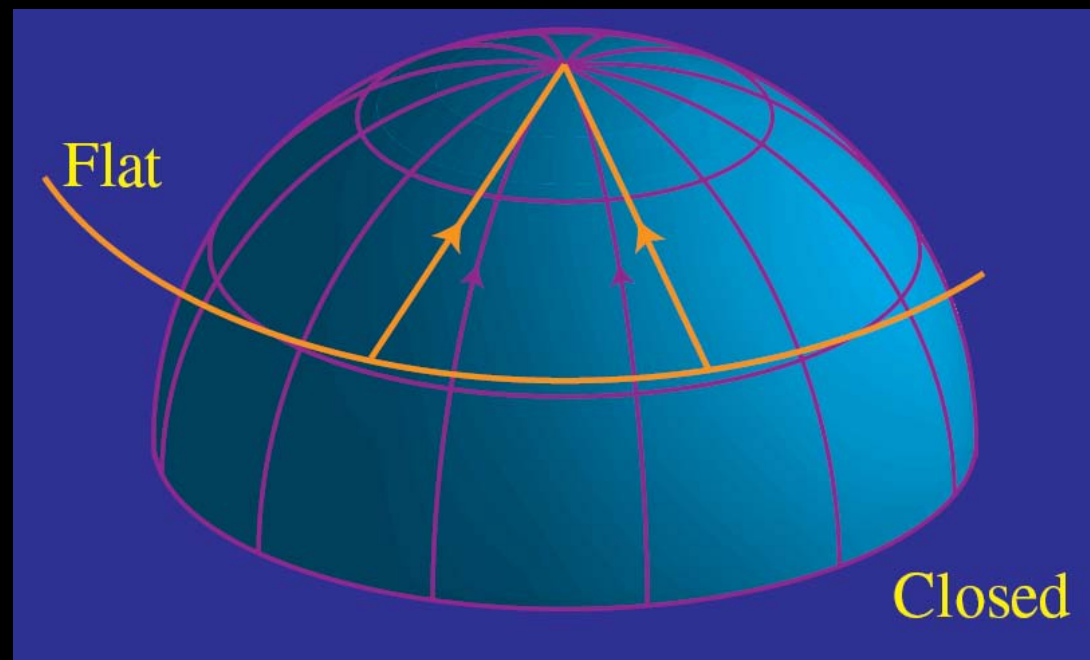
$$c_s^2 = \frac{\dot{p}_\gamma + \dot{p}_b}{\dot{\rho}_\gamma + \dot{\rho}_b} = \frac{1}{3(1+R)}$$

$$R \equiv \frac{3}{4} \frac{\rho_b}{\rho_\gamma} = 0.729 \left(\frac{\Omega_b h^2}{0.024} \right) \left(\frac{a}{10^{-3}} \right)$$



空間曲率 3

見え方 (角度スケール) は空間曲率や距離による。
正曲率 ($\Omega_k < 0$) があると同じ物理的サイズでも大きく見える。



空間曲率 4

angular diameter distance

$$r = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{K}} \sin(\sqrt{K} \chi) & K > 0 \\ \chi & K = 0 \\ \frac{1}{\sqrt{-K}} \sinh(\sqrt{-K} \chi) & K < 0 \end{cases}$$

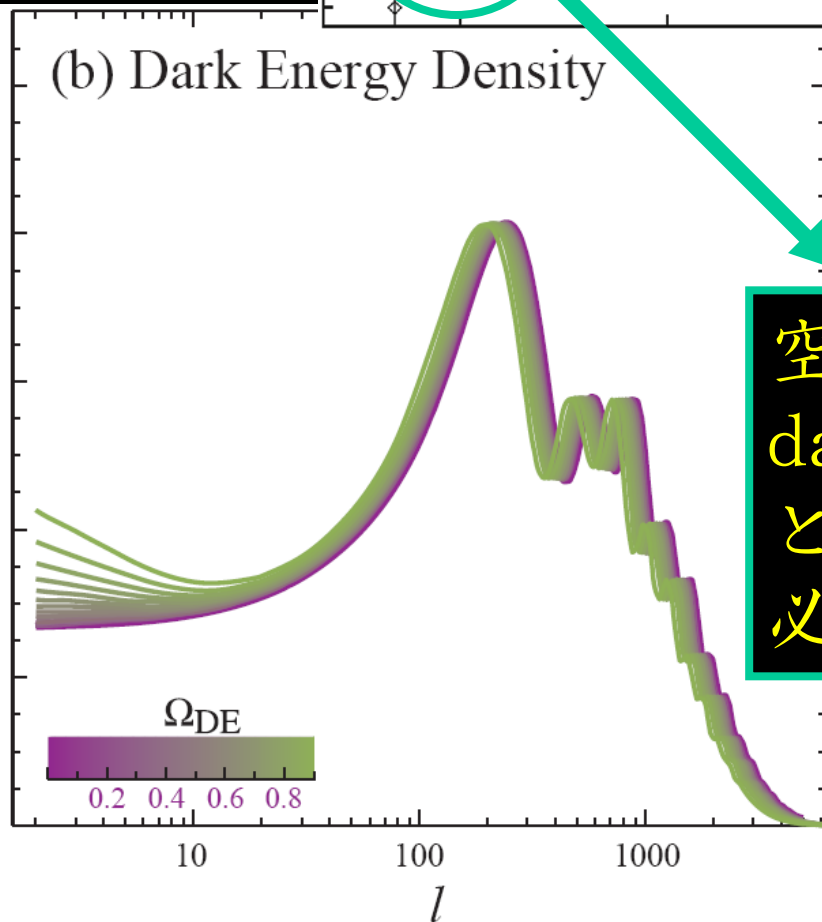
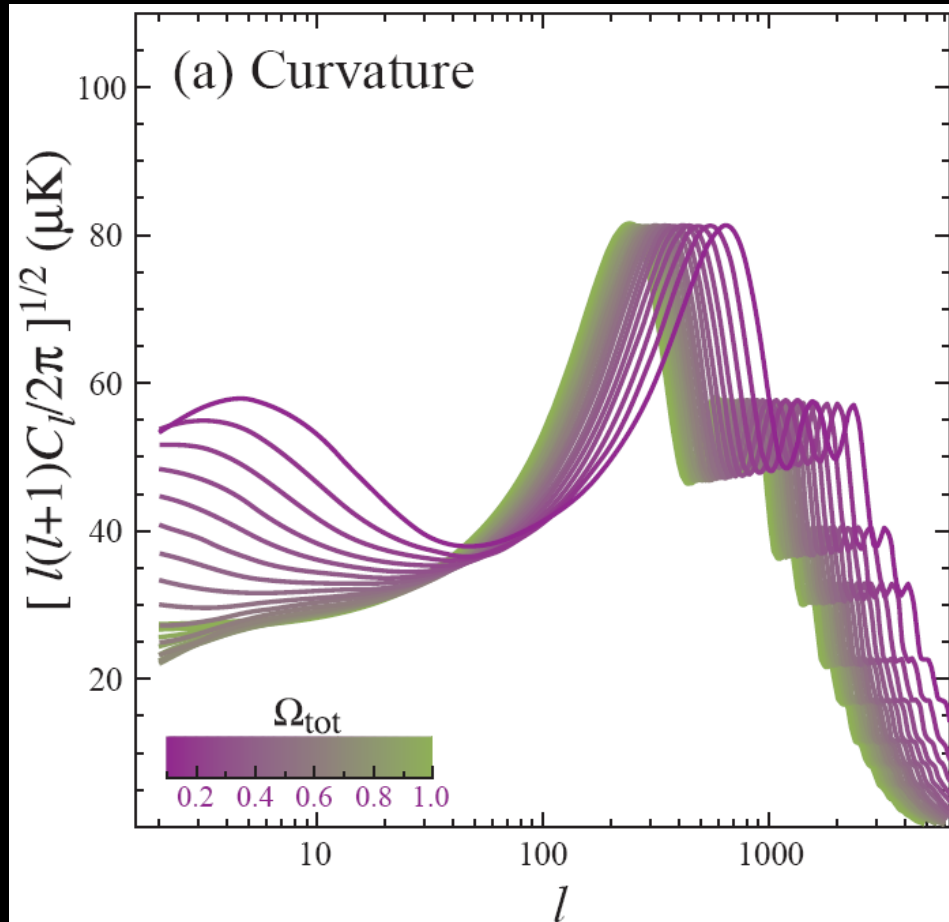
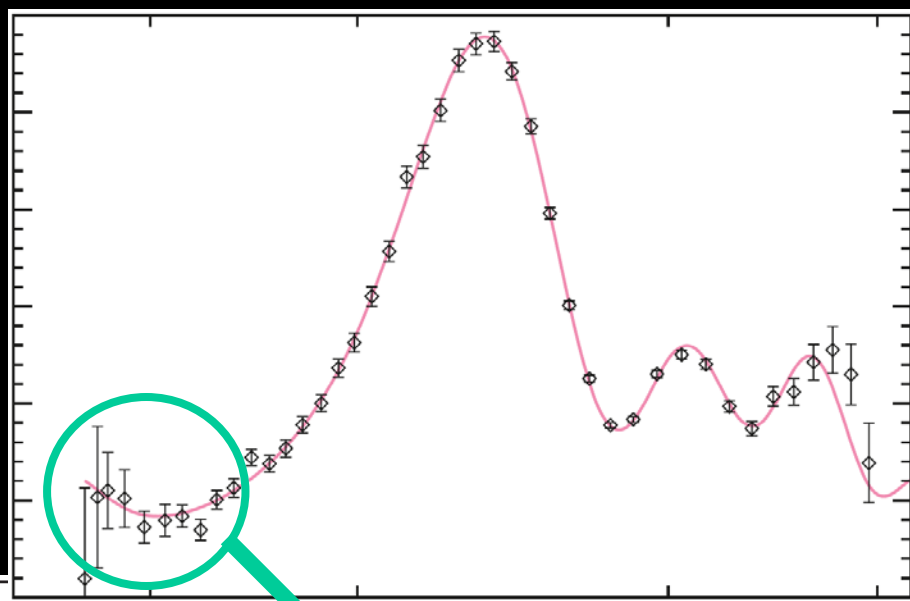
$$\chi = \int_t^{t_0} \frac{cdt}{a(t)} = c \int_a^1 \frac{da}{a\dot{a}} = c \int_a^1 \frac{da}{a^2 H(a)} = c \int_0^z \frac{dz}{H(z)}$$

$$H(z) = H_0 \sqrt{(1+z)^3 \Omega_{m0} + (1+z)^4 \Omega_{r0} + \Omega_{\Lambda 0} - (1+z)^2 \Omega_{K0}}$$

物理的サイズを固定するとピークの角度スケールから
空間曲率・dark energy・ハッブル定数の間に
1つの関係を与える。

空間曲率 5

もう1つのポイント
→ 大スケールゆらぎの形

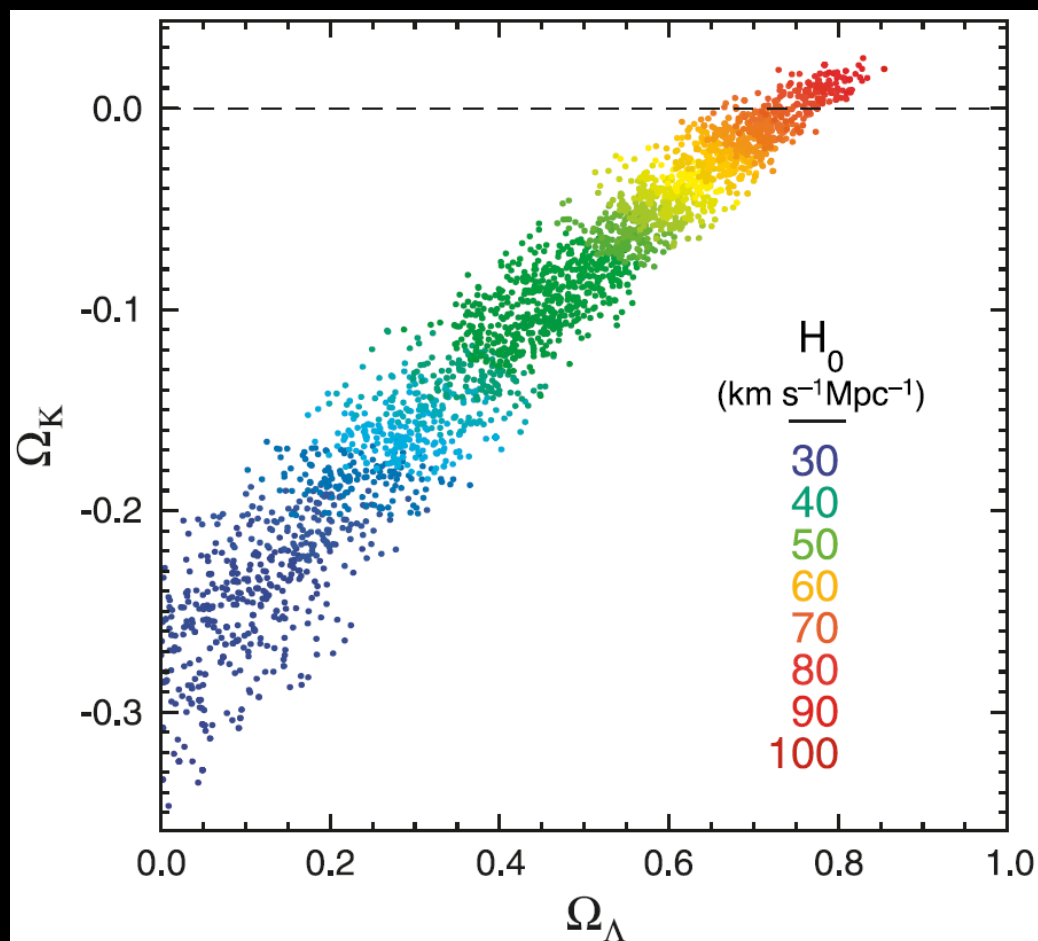


空間曲率か
dark energy
どちらかが
必要

空間曲率 6

空間曲率・dark energy・ハッブル定数

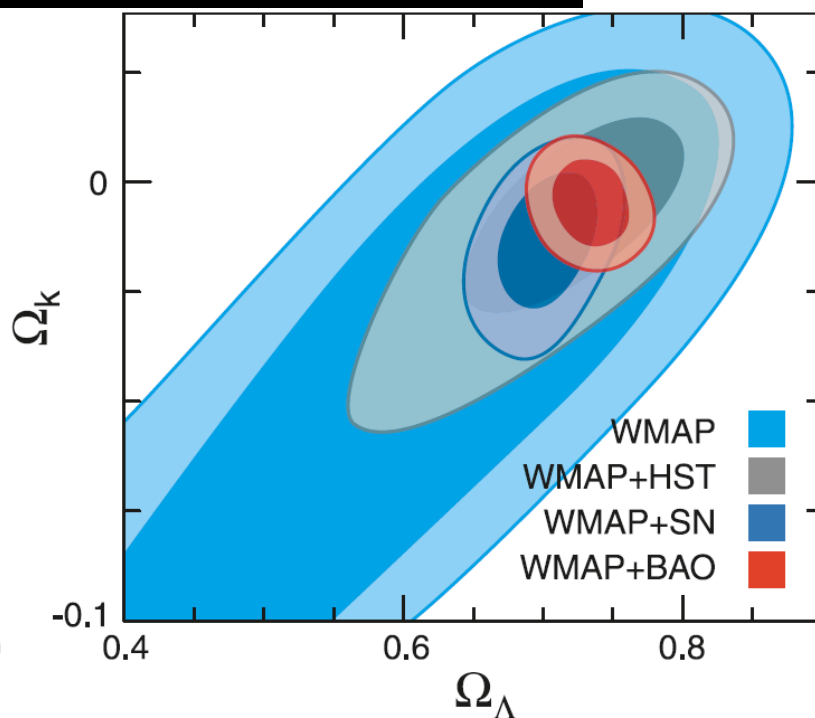
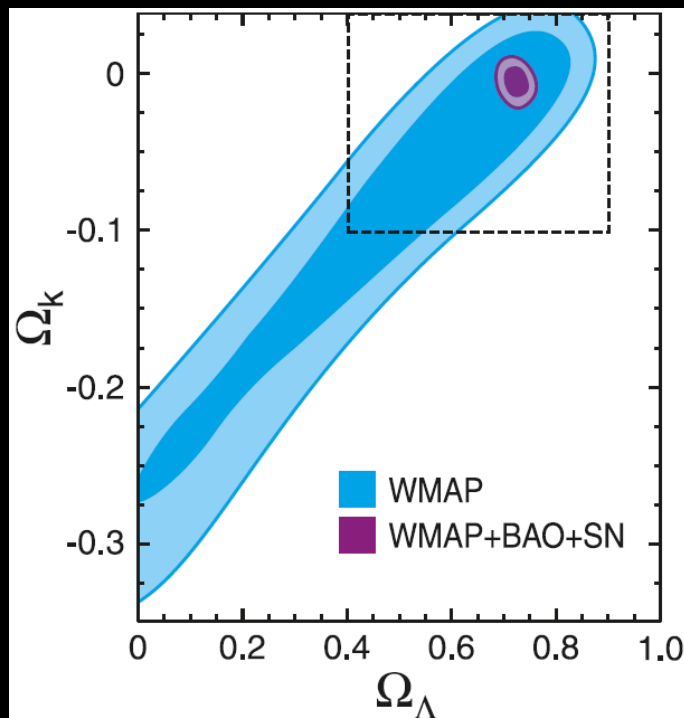
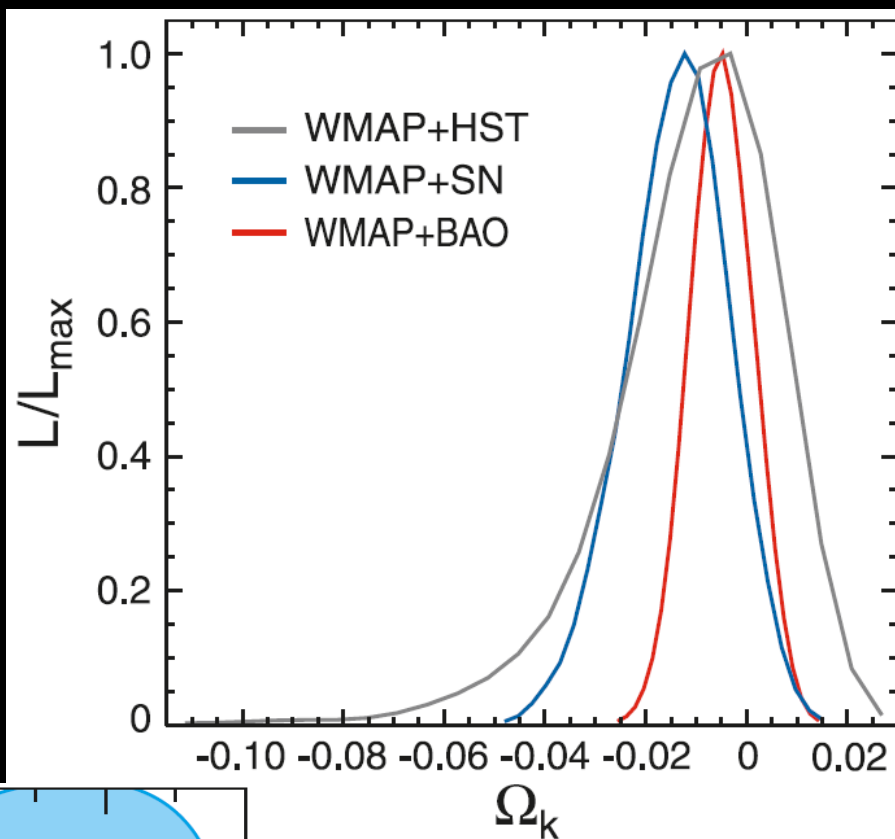
- 1、ピーク的位置
 - 2、大スケールゆらぎの形で2つの関係が得られる。
- 1次元的な縮退がある



空間曲率 7

この縮退は他の観測データで解ける。

- Hubble Key Project
- SNIa
- バリオン振動



5 years
WMAP+BAO+SN

$$\Omega_k = -0.0052 \pm 0.0064$$

3 years
WMAP+SN

$$\Omega_k = -0.011 \pm 0.011$$

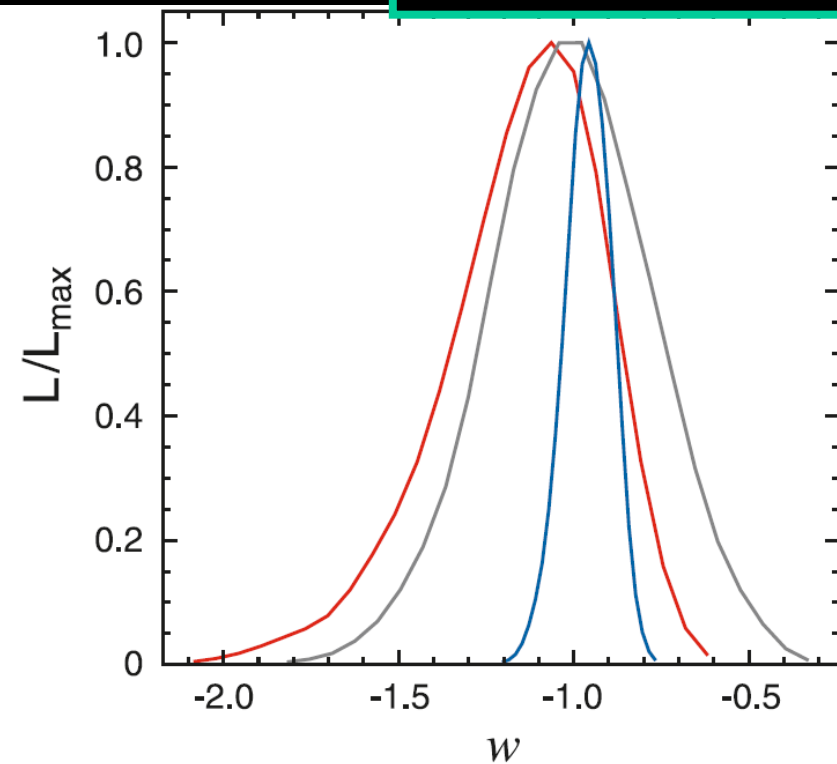
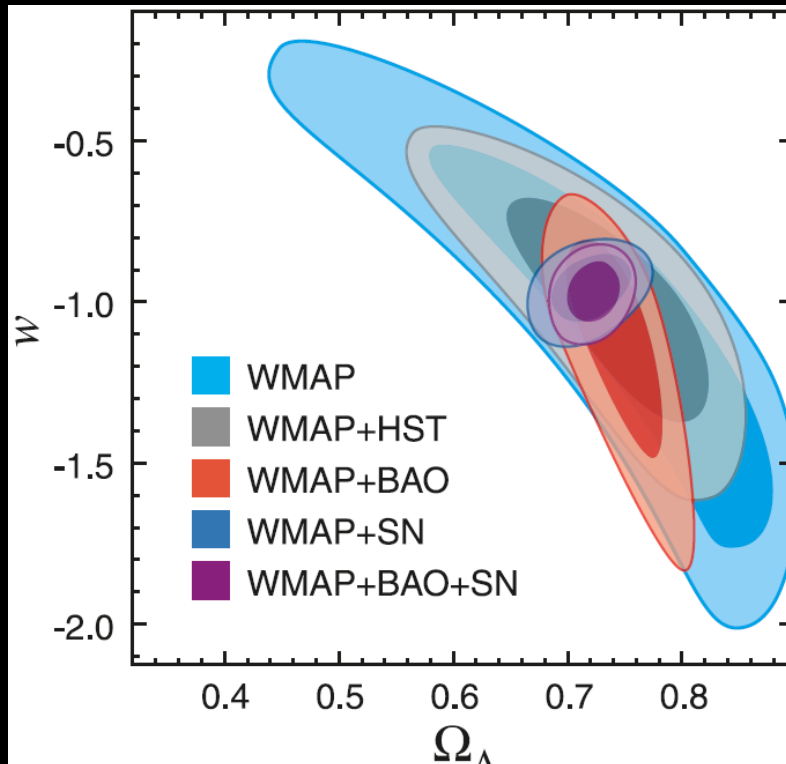
dark energy I

一般の状態方程式のdark energy

$$H(a) = H_0 \left[\frac{\Omega_m}{a^3} + \frac{\Omega_r}{a^4} + \frac{\Omega_k}{a^2} + \frac{\Omega_\Lambda}{a^{3(1+w_{\text{eff}}(a))}} \right]^{1/2}$$

$$w_{\text{eff}}(a) \equiv \frac{1}{\ln a} \int_0^{\ln a} d \ln a' w(a')$$

constant w , flat

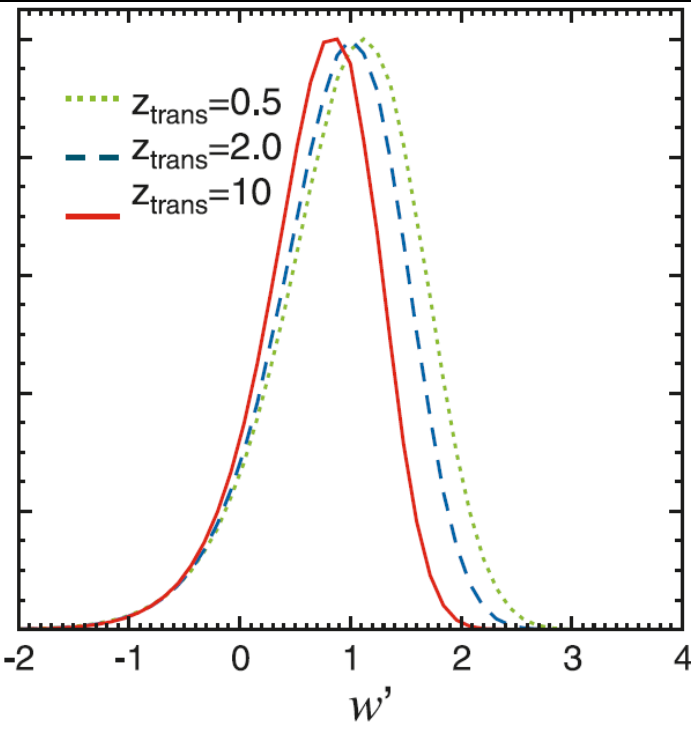
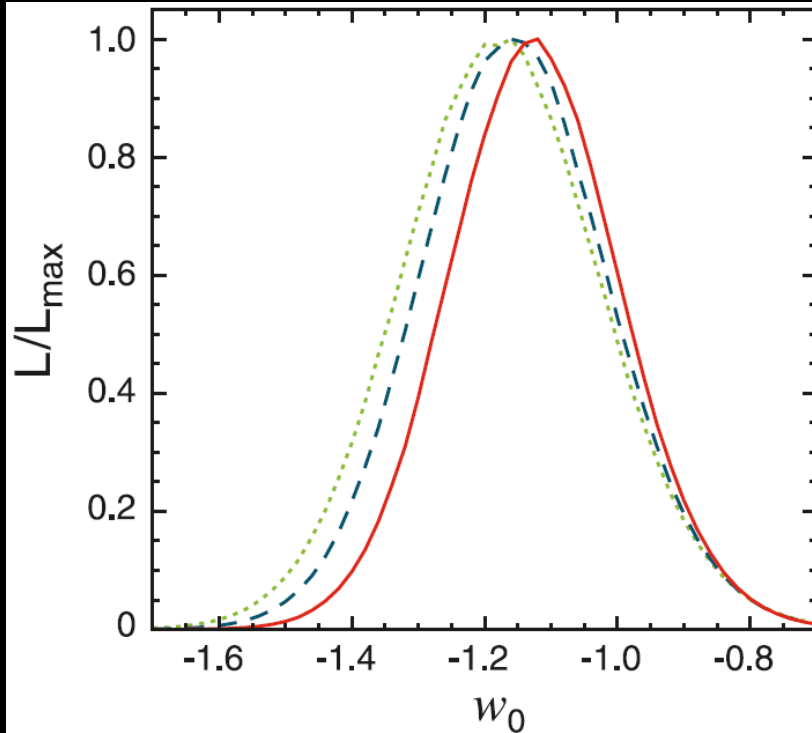
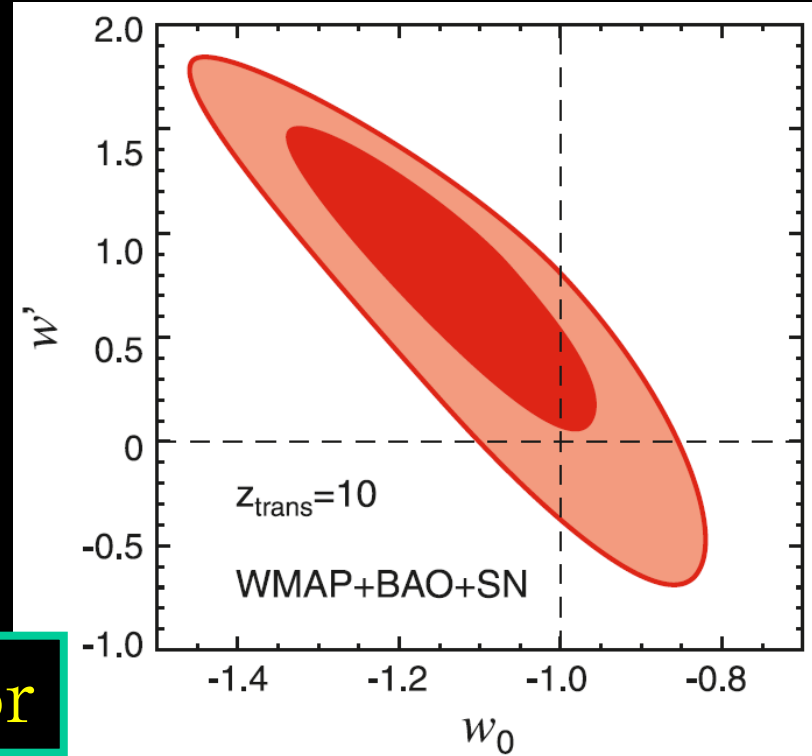


dark energy II

variable equation of state

$$w(a) = \frac{a\tilde{w}(a)}{a + a_{\text{trans}}} - \frac{a_{\text{trans}}}{a + a_{\text{trans}}}$$

flat, WMAP distance prior



primordial helium abundance

primordial helium abundanceの量によって再結合の過程が変わってくる。

WMAP only

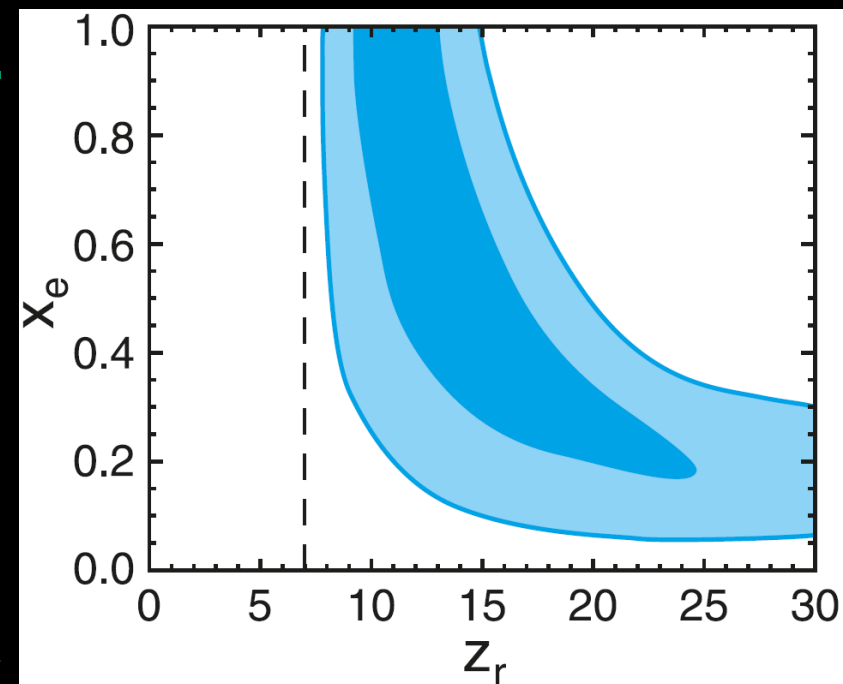
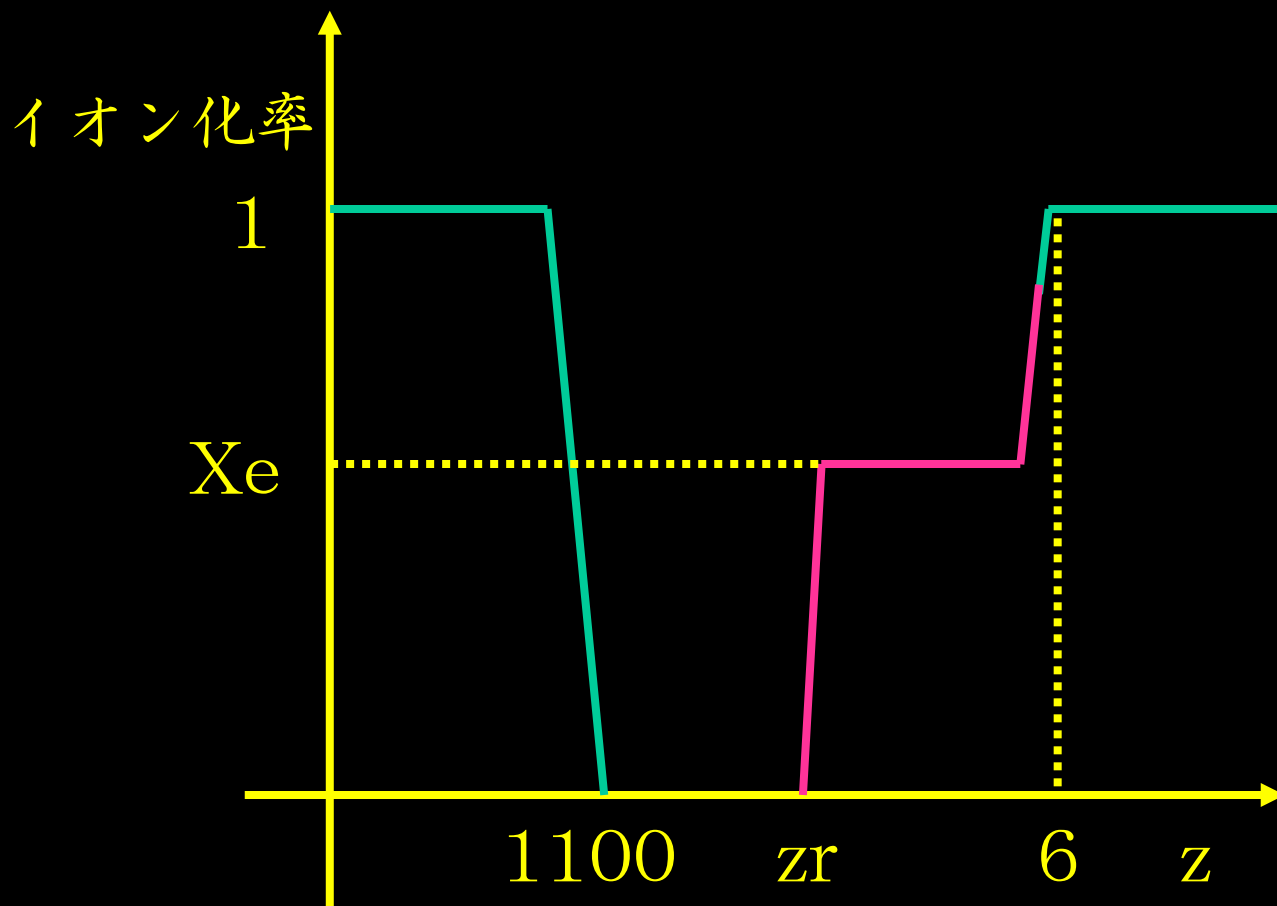
$$Y_p < 0.45 \text{ (95\% CL)}$$

c.f. $Y_p < 0.61$ (95% CL), for 3 years

$$= 0.25 \pm 0.10, \text{ with small scale CMB}$$

2ステップ再イオン化

1ステップ再イオン化では、WMAPとGunn-Peterson testで矛盾が生じることがわかった。なので2ステップを考える。



nonGaussianity I

nonGaussianity

$$\Phi = \Phi_L + f_{NL}^{\text{local}} \Phi_L^2$$

- 2つの項の大きさの比 $\sim f_{NL} \ll 10^{-5} f_{NL}$
- single scalar field, slow roll inflation では $f_{NL} \sim \mathcal{O}(10^{-2})$
- multi fields, breaking of slow roll, ekpyrotic scenario
などで大きな (> 1) nonGaussianityが出来るかも

bispectrum

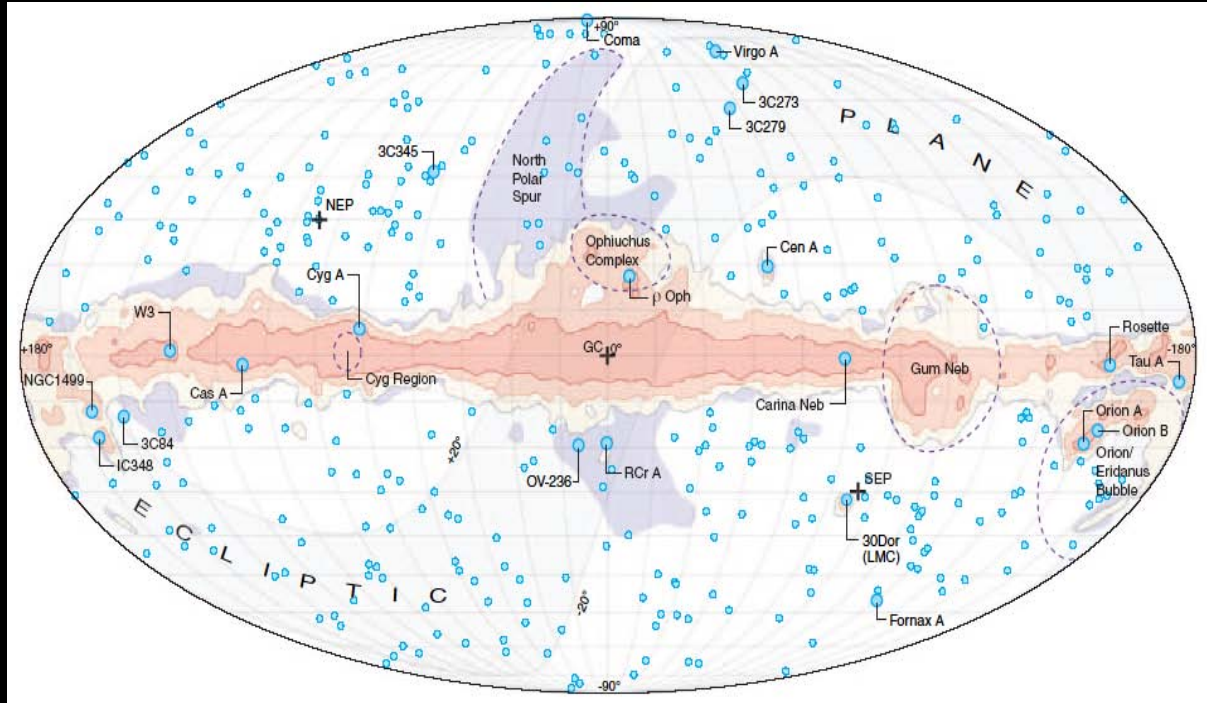
$$\langle \Psi(\mathbf{k}_1) \Psi(\mathbf{k}_2) \Psi(\mathbf{k}_3) \rangle = (2\pi)^3 F(k_1, k_2, k_3) \delta(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3)$$

Φ がGaussianならこれはゼロ。これがゼロでなければ nonGaussianityがある。ただし実際問題として nonGaussianityの解析の結果はmaskの取り方に依存する。foregroundはモデル化してある程度差っ引ける。しかし強すぎる所はmaskで隠して解析には使わない。

nonGaussianity II

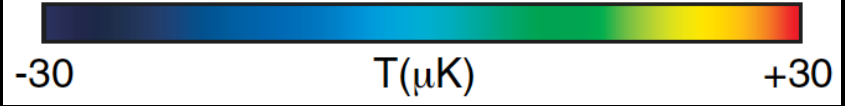
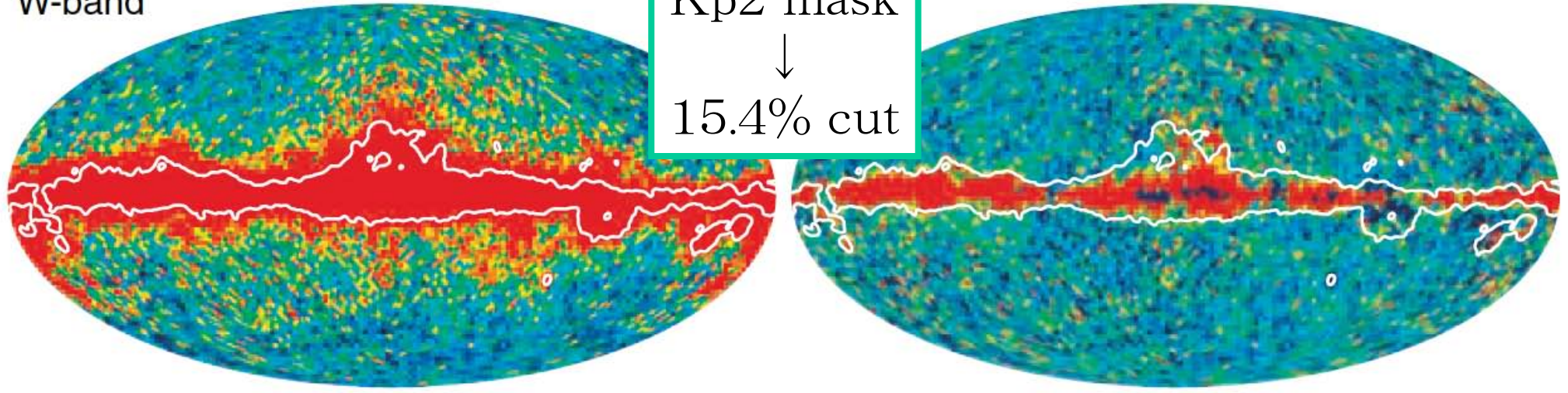
for power spectrum:
Kp2 (84.6%) → KQ85 (81.7%)
for Gaussianity:
Kp0 (76.5%) → KQ75 (71.8%)

3 years よりも conservative な mask を使う。



W-band

Kp2 mask
↓
15.4% cut



nonGaussianity III

bispectrumによる解析結果

Band	Mask	l_{\max}	f_{NL}^{local}	$\Delta f_{NL}^{\text{local}}$	b_{src}
V+W	<i>KQ85</i>	400	50 ± 29	1 ± 2	0.26 ± 1.5
V+W	<i>KQ85</i>	500	61 ± 26	2.5 ± 1.5	0.05 ± 0.50
V+W	<i>KQ85</i>	600	68 ± 31	3 ± 2	0.53 ± 0.28
V+W	<i>KQ85</i>	700	67 ± 31	3.5 ± 2	0.34 ± 0.20
V+W	<i>Kp0</i>	500	61 ± 26	2.5 ± 1.5	
V+W	<i>KQ75p1^a</i>	500	53 ± 28	4 ± 2	
V+W	<i>KQ75</i>	400	47 ± 32	3 ± 2	-0.50 ± 1.7
V+W	<i>KQ75</i>	500	55 ± 30	4 ± 2	0.15 ± 0.51
V+W	<i>KQ75</i>	600	61 ± 36	4 ± 2	0.53 ± 0.30
V+W	<i>KQ75</i>	700	58 ± 36	5 ± 2	0.38 ± 0.21

KQ85, Kp0 ($l_{\max} = 500$) $\rightarrow 6.5 < f_{NL} < 110.5$ (95% C.L.)

KQ75 ($l_{\max} = 500$) $\rightarrow -9 < f_{NL} < 111$ (95% C.L.)

(3 years, Kp0, $l_{\max} = 350 \rightarrow -54 < f_{NL} < 114$, 95% C.L.)

nonGaussianityの証拠ナシ (95% C.L.)

nonGaussianity IV

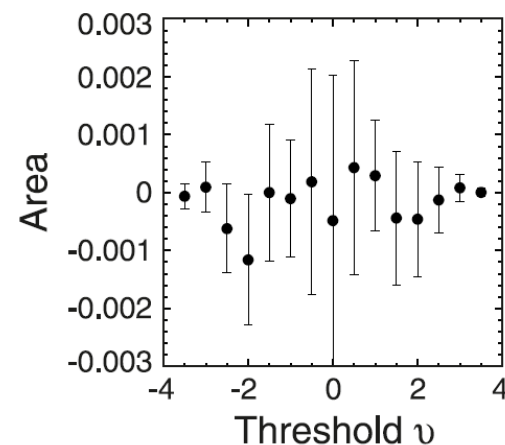
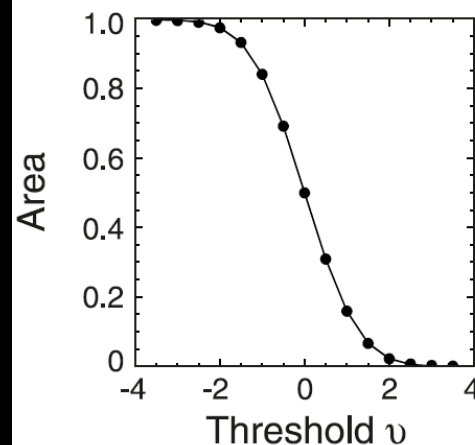
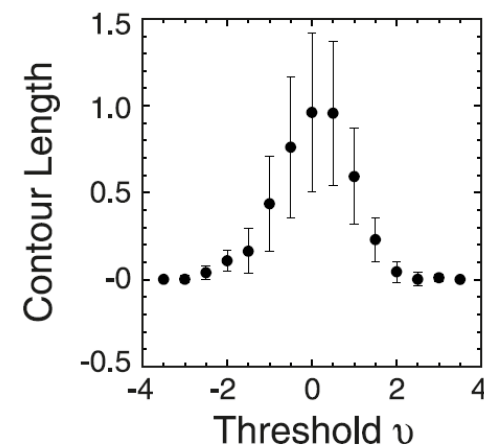
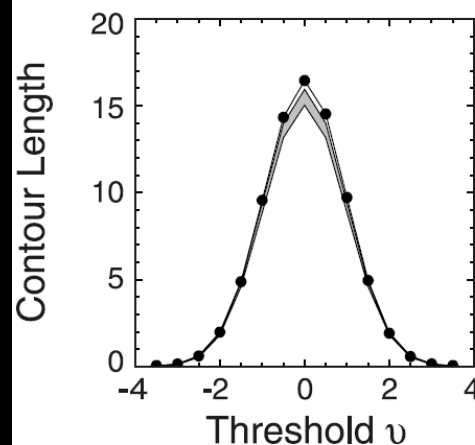
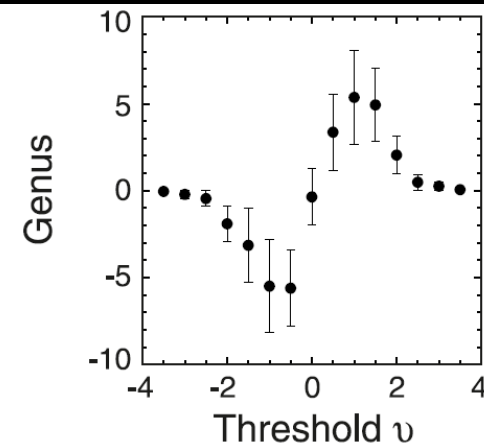
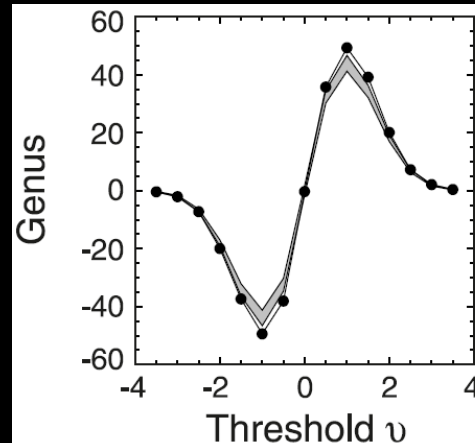
エラーはまだ大きいけど正の nonGaussianity がありそう？

Minkowski functional による解析結果

$$-178 < f_{NL} < 64 \text{ (95\% C.L.)}$$

こちらはむしろ負。

いろんな統計的指標を使おう。

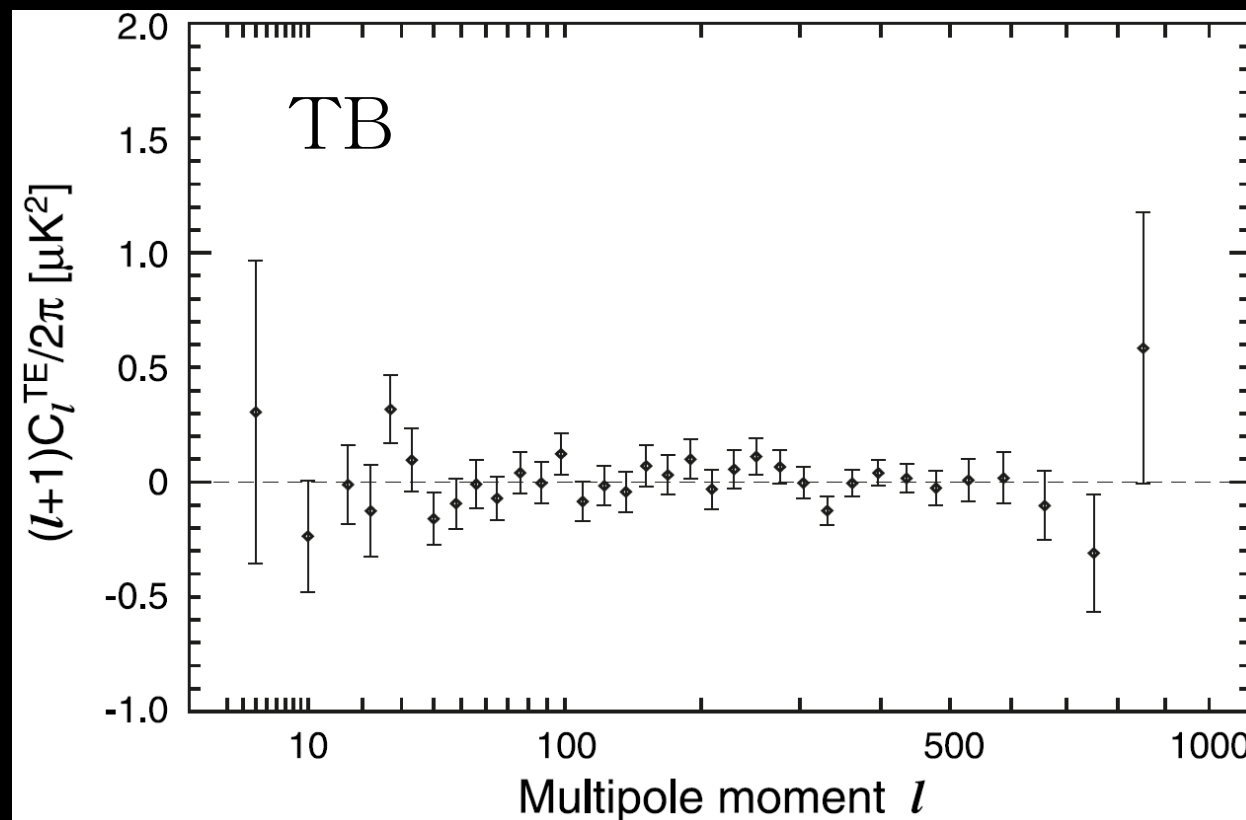


その他

Tはparity even、Bはparity oddなのでそれらの相関TB correlationというものはパリティを破る (EBも)。宇宙論的なパリティの破れがあればこれが現れる。

- Chern-Simons term
- 磁場の helicity

今のところゼロと consistent。



extended Λ CDM model : まとめ

beyond minimal modelについてもBAOやSNを組み合わせて有意な制限が得られるようになってきた。

Name	Type	WMAP 5-year	WMAP+BAO+SN
Gravitational Wave ^a	No Running Ind.	$r < 0.43^b$	$r < 0.20$
Running Index	No Grav. Wave	$-0.090 < dn_s/d \ln k < 0.019^c$	$-0.0728 < dn_s/d \ln k < 0.0087$
Curvature ^d		$-0.063 < \Omega_k < 0.017^e$	$-0.0175 < \Omega_k < 0.0085^f$
Curvature Radius ^g	Positive Curv.	$R_{\text{curv}} > 12 h^{-1} \text{Gpc}$	$R_{\text{curv}} > 23 h^{-1} \text{Gpc}$
	Negative Curv.	$R_{\text{curv}} > 23 h^{-1} \text{Gpc}$	$R_{\text{curv}} > 33 h^{-1} \text{Gpc}$
Gaussianity	Local	$-9 < f_{NL}^{\text{local}} < 111^h$	N/A
	Equilateral	$-151 < f_{NL}^{\text{equil}} < 253^i$	N/A
Adiabaticity	Axion	$\alpha_0 < 0.16^j$	$\alpha_0 < 0.067^k$
	Curvaton	$\alpha_{-1} < 0.011^l$	$\alpha_{-1} < 0.0037^m$
Parity Violation	Chern-Simons ⁿ	$-5.9^\circ < \Delta\alpha < 2.4^\circ$	N/A
Dark Energy	Constant w^o	$-1.37 < 1 + w < 0.32^p$	$-0.11 < 1 + w < 0.14$
	Evolving $w(z)^q$	N/A	$-0.38 < 1 + w_0 < 0.14^r$
Neutrino Mass ^s		$\sum m_\nu < 1.3 \text{ eV}^t$	$\sum m_\nu < 0.61 \text{ eV}^u$
Neutrino Species		$N_{\text{eff}} > 2.3^v$	$N_{\text{eff}} = 4.4 \pm 1.5^w (68\%)$

4、インフレーションへの示唆

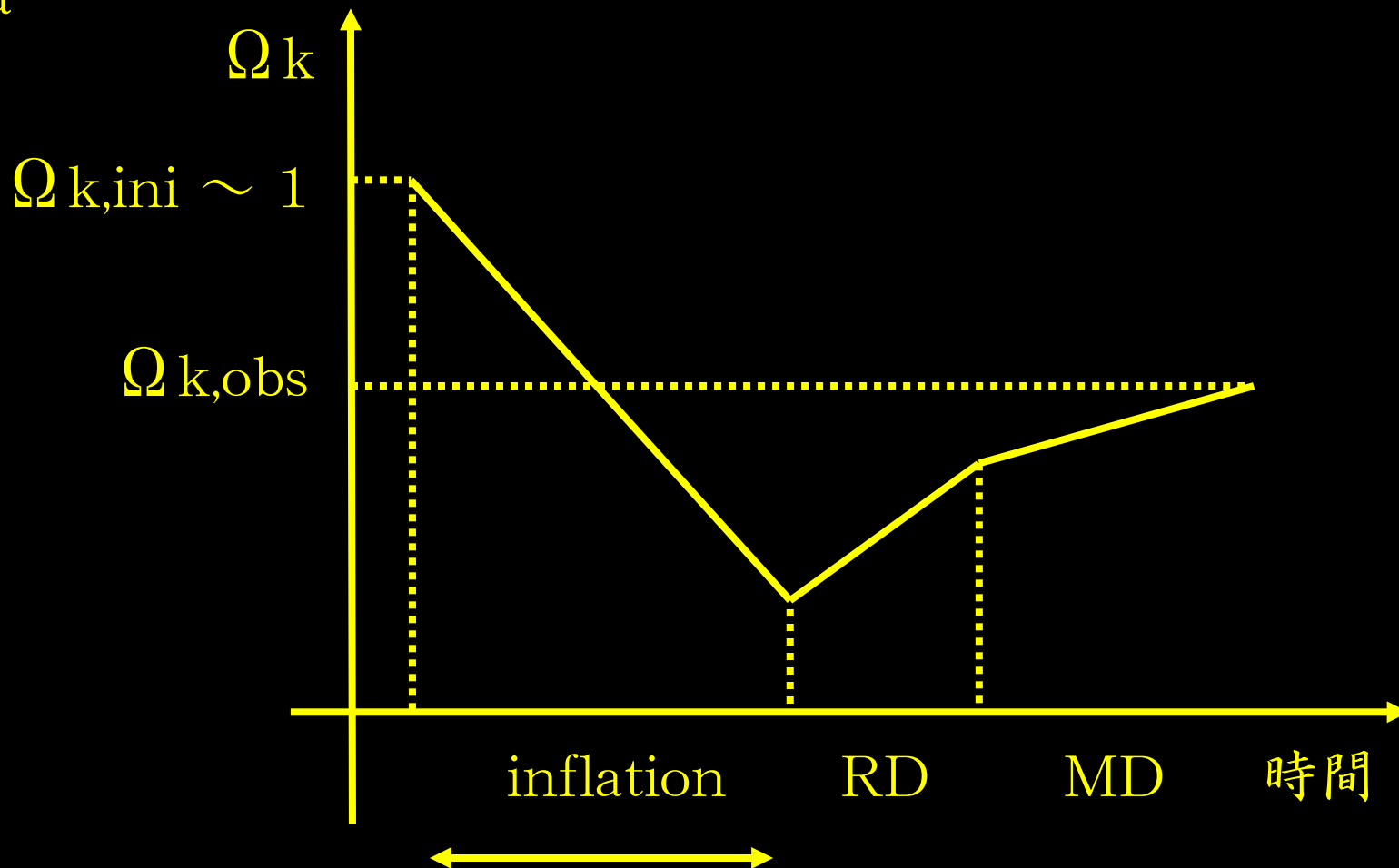
空間曲率 1

空間曲率の進化

inflation : a^{-2}

RD : a^2

MD : a



空間曲率の制限からinflationのdurationが制限できる

空間曲率 2

5 years WMAP+BAO+SN

$$\Omega_k = -0.0052 \pm 0.0064$$

現在の空間曲率

$$\begin{aligned} \frac{\Omega_k^{\text{obs}}}{\Omega_k^{\text{begin}}} &= \left(\frac{a_{\text{today}}}{a_{\text{eq}}} \right) \left(\frac{a_{\text{eq}}}{a_{\text{end}}} \right)^2 \left(\frac{a_{\text{begin}}}{a_{\text{end}}} \right)^2 \\ &= (1 + z_{\text{eq}}) \left(\frac{T_{\text{end}} g_{*,\text{end}}^{1/3}}{T_{\text{eq}} g_{*,\text{eq}}^{1/3}} \right)^2 e^{-2N_{\text{tot}}} \end{aligned}$$

RDの長さは再加熱温度による。逆に解いて

$$N_{\text{tot}} = 47 - \frac{1}{2} \ln \frac{\Omega_k^{\text{obs}}/0.01}{\Omega_k^{\text{begin}}} + \ln \frac{T_{\text{end}}}{10^8 \text{ GeV}} + \frac{1}{3} \ln \frac{g_{*,\text{end}}}{200}$$

現在得られる制限はあまり大したものではない。

$$N_{\text{tot}} > 36 + \ln \frac{T_{\text{end}}}{1 \text{ TeV}}$$

spectral index と 重力波 1

spectral index と 重力波の量はポテンシャルで決まる

$$1 - n_s = 3M_{pl}^2 \left(\frac{V'}{V} \right)^2 - 2M_{pl}^2 \frac{V''}{V}$$
$$r = 8M_{pl}^2 \left(\frac{V'}{V} \right)^2,$$

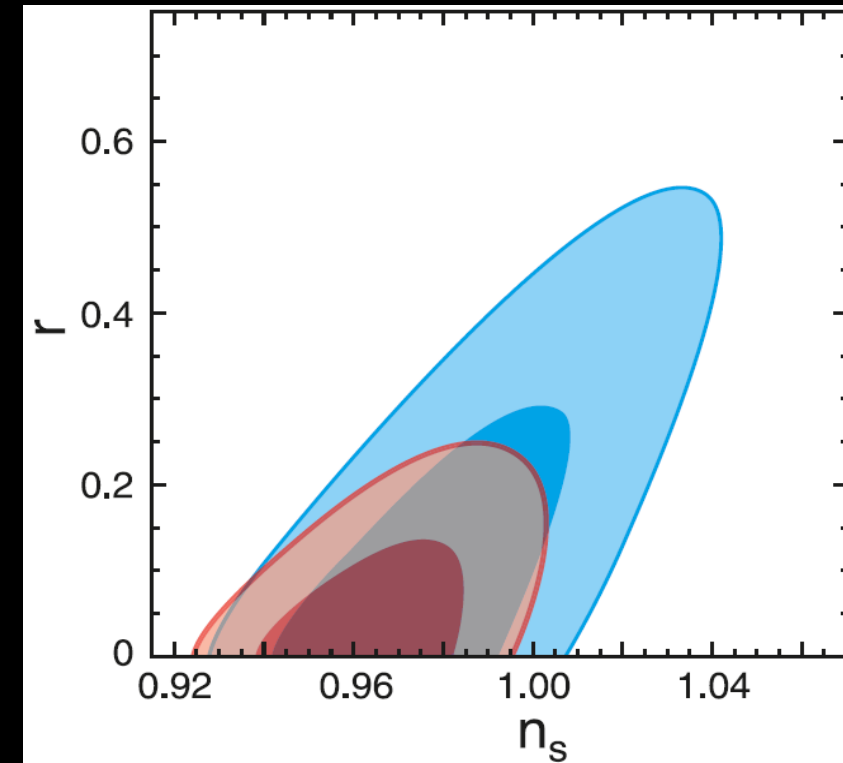
ポテンシャルを決め、COBEスケールのe-folding number N を決めると $n_s - r$ 平面で1点が決まる。

ここでは代表的なインフレーションモデルを3つ考える。

(a)chaotic inflation

(b)power-law inflation

(c)hybrid inflation



spectral index と重力波 2

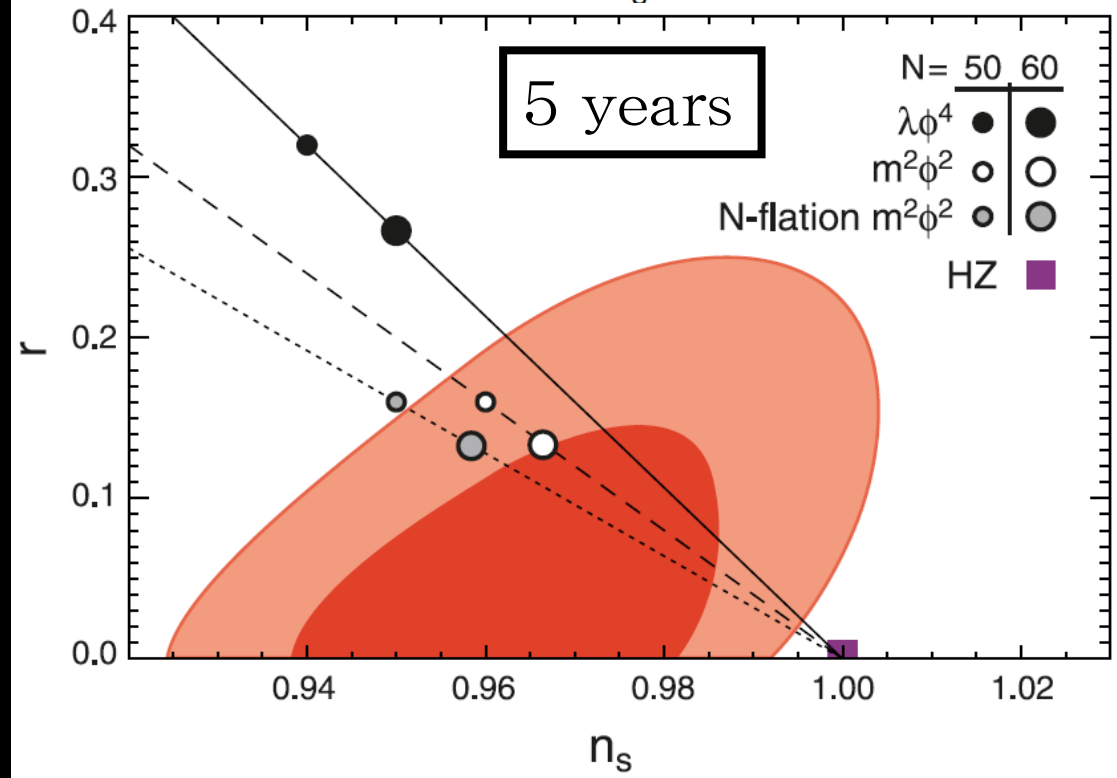
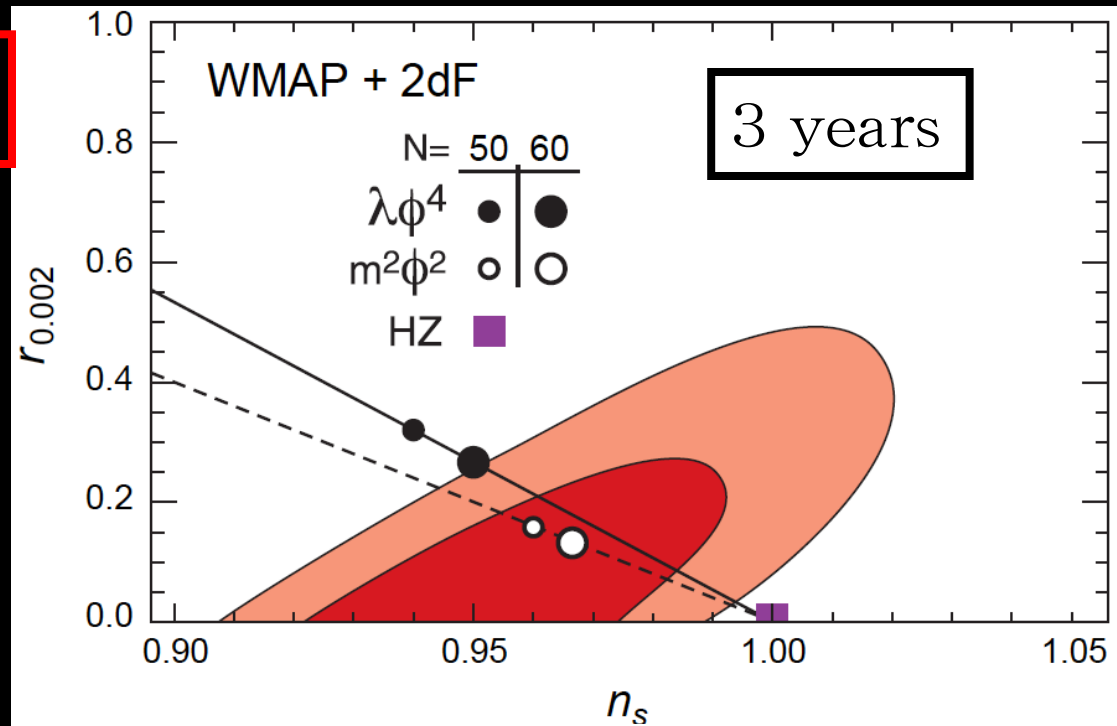
chaotic inflation

$$V(\phi) \propto \phi^\alpha$$

$$r = \frac{4\alpha}{N}, \quad 1 - n_s = \frac{\alpha + 2}{2N}$$

$$r = 8(1 - n_s) \frac{\alpha}{\alpha + 2}$$

α によって直線の傾きが
決まり、 N でその位置が
決まる。



spectral index と重力波 3

power-law inflation

$$V(\phi) \propto \exp[-(\phi/M_{pl})\sqrt{2/p}]$$

$$r = \frac{16}{p}, \quad 1 - n_s = \frac{2}{p}$$

$$r = 8(1 - n_s)$$

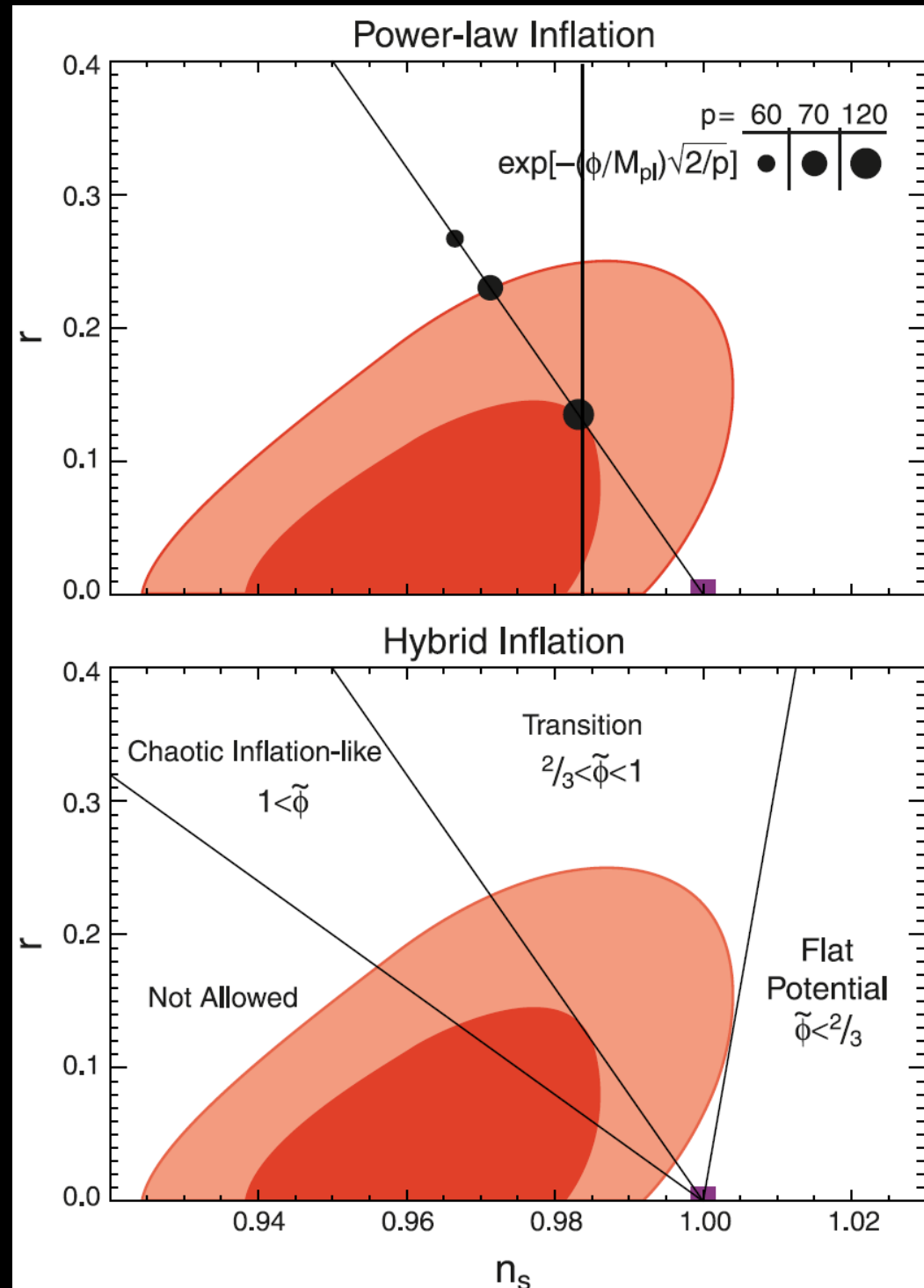
1本の直線に乗る。pでその位置が決まる。

hybrid inflation

$$V(\phi) = V_0 + m^2\phi^2/2$$

$$r = 8(1 - n_s) \frac{\tilde{\phi}^2}{2\tilde{\phi}^2 - 1}$$

2つ目のスカラー場のポテンシャルによる



インフレーションへの示唆：まとめ

空間曲率でインフレーションのdurationを制限

- ・あまり有意義な制限ではない
- ・観測の精度を上げててもあまり変わらなさそう

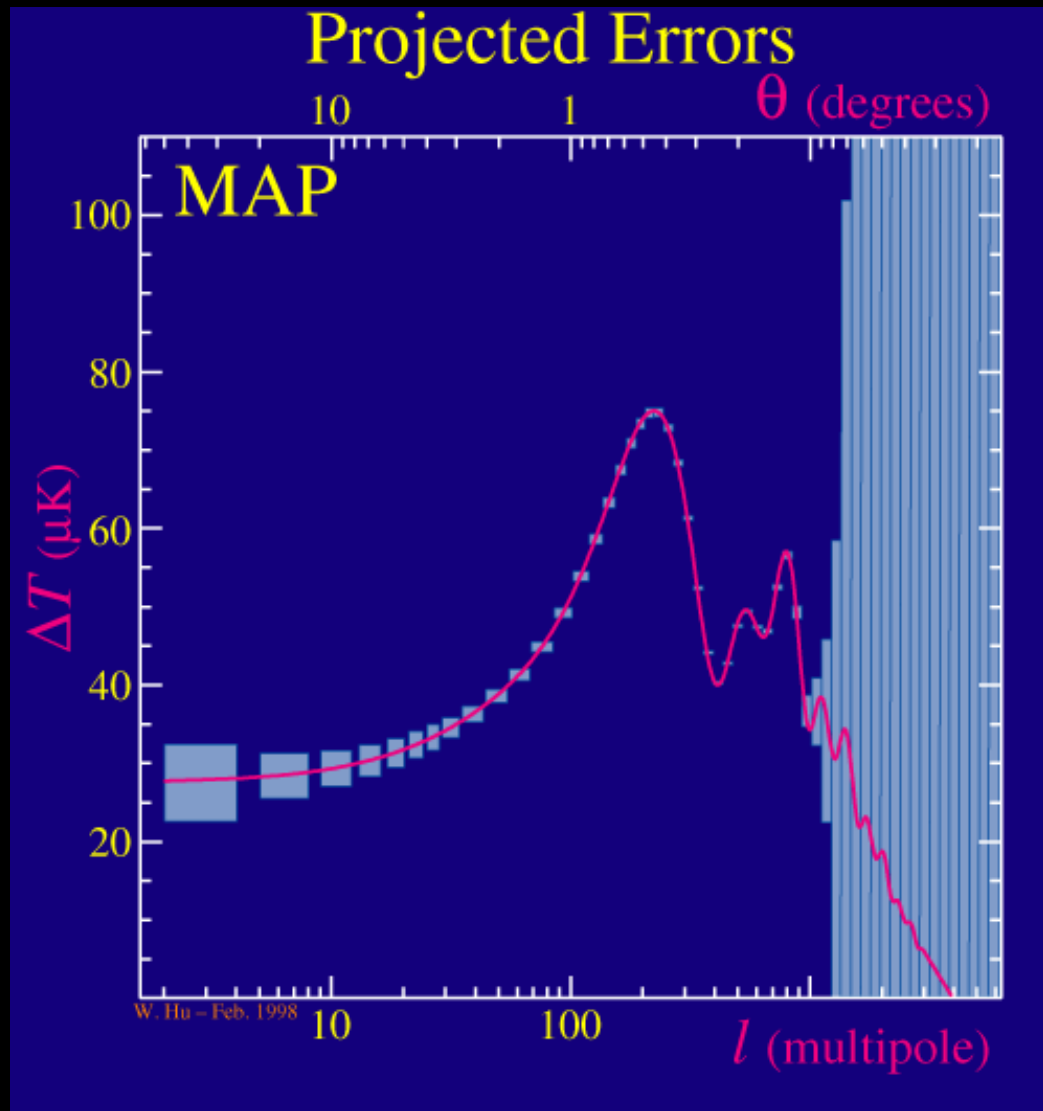
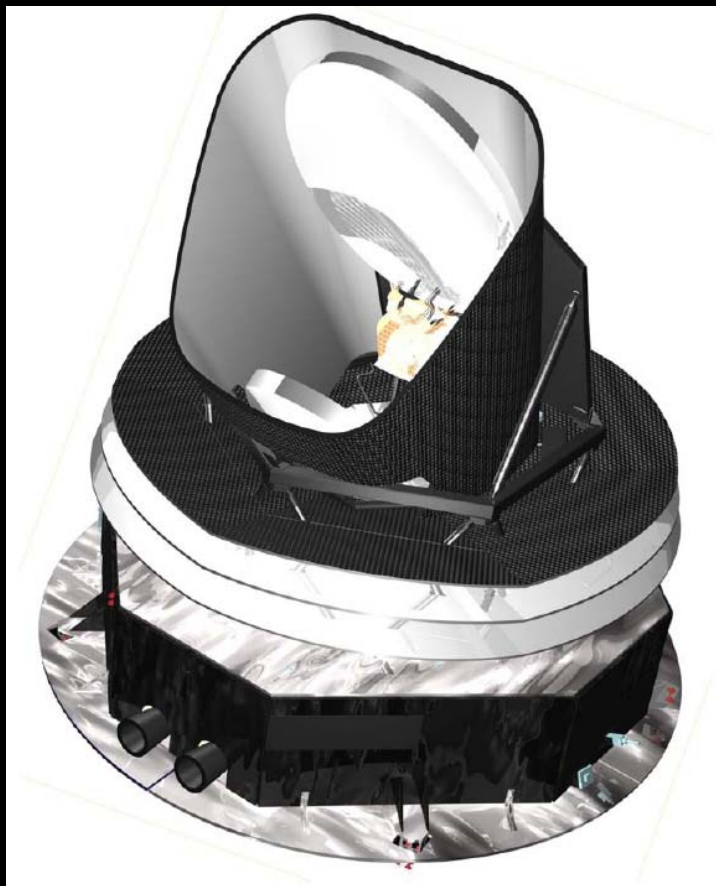
spectral indexと重力波でインフレーションモデルを制限

- ・代表的ないくつかのモデルを棄却し始めている
- ・最もシンプルなchaotic inflationは棄却？
- ・もっと観測の精度が上がってrunning indexも制限に使えればより有意義なことが言えそう

5、将来計画とまとめ

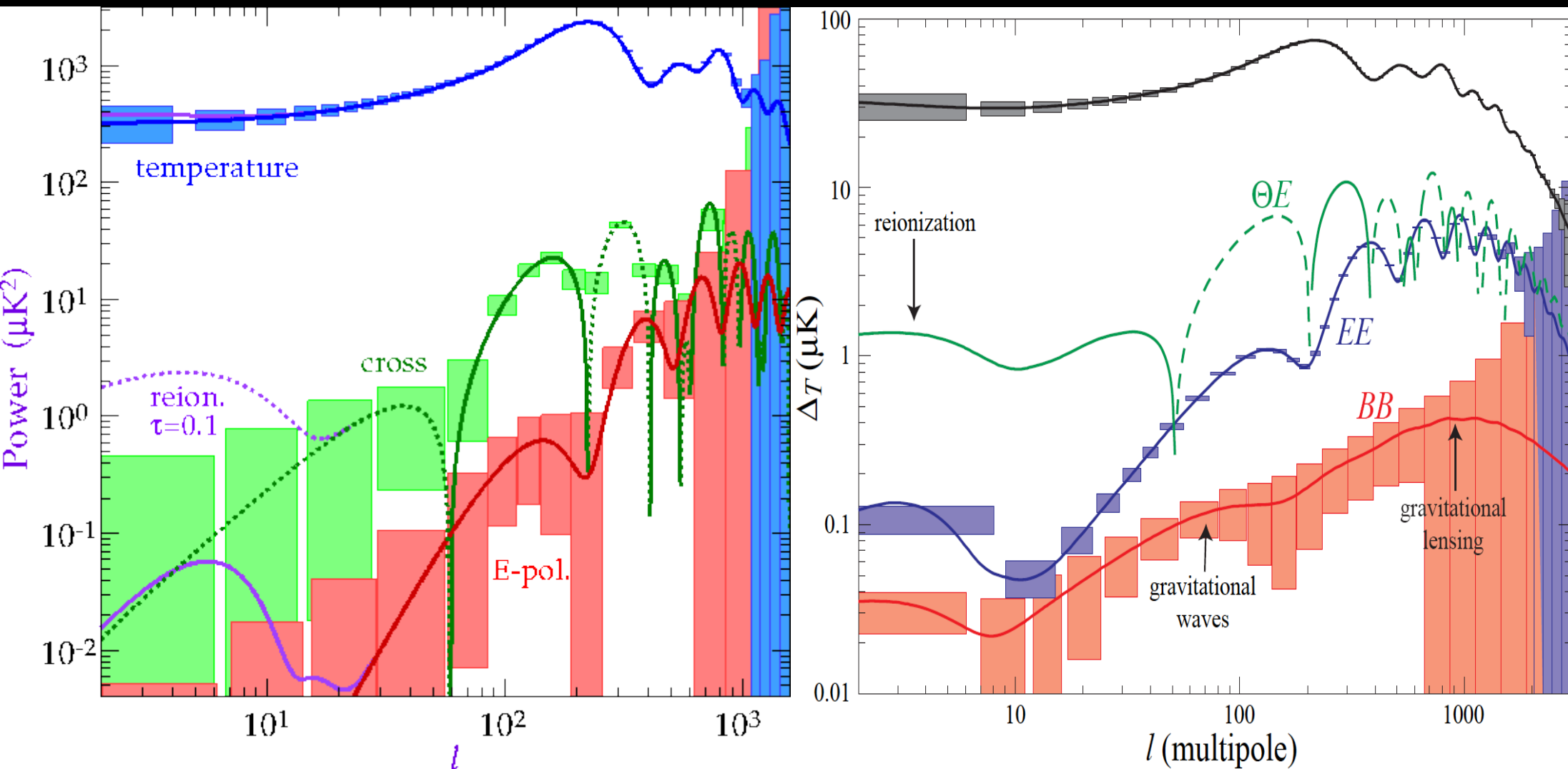
Planck I

Planck, 2008(?) ~



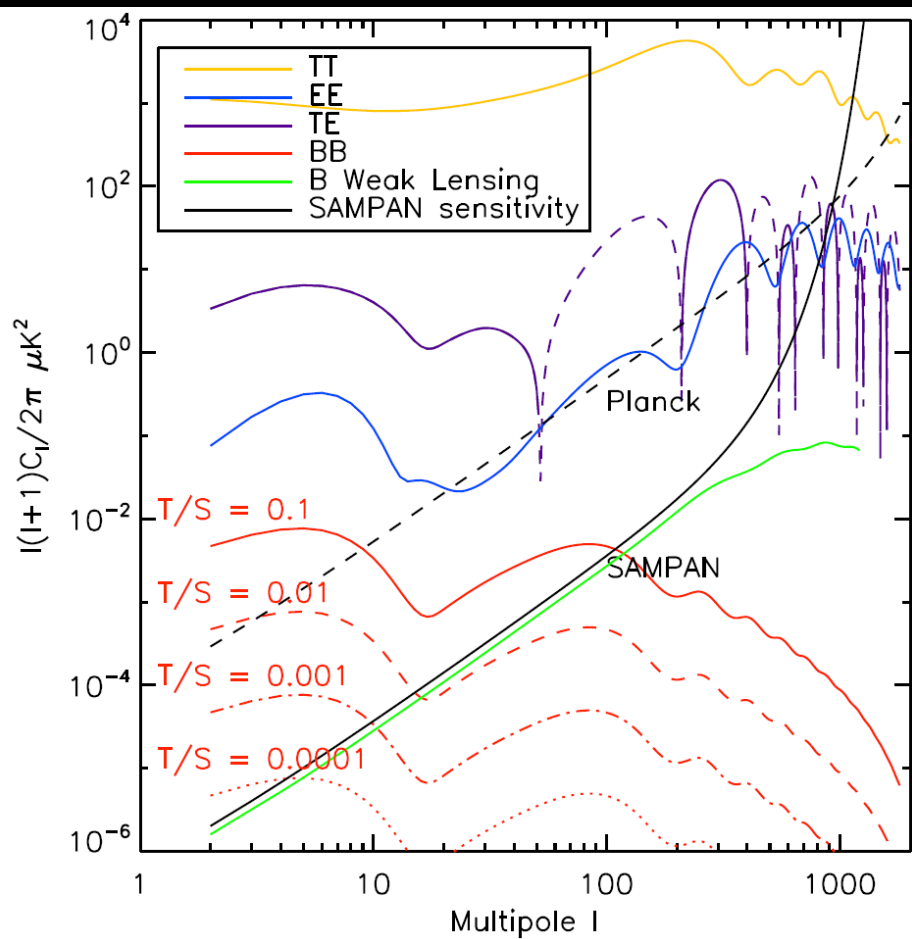
Planck II

E mode、B modeが大スケールから小スケールまでかなりの精度で観測できる。



他にも

他にもいろいろ
 計画中のものがある。
 日本でもB mode観測
 の計画を立てている。



Experiment	f_{sky}	ν	θ_b	Δ_T	Δ_E
BICEP [45]	0.03	100	60'	0.33	0.47
		150	42'	0.35	0.49
QUaD [52]	0.025	100	6.3'	3.5	5.0
		150	4.2'	4.6	6.6
BRAIN [47]	0.03	100	50'	0.23	0.33
		150	50'	0.27	0.38
		220	50'	0.40	0.56
CLOVER [48]	0.018	100	15'	0.19	0.30
		143	15'	0.25	0.35
		217	15'	0.55	0.76
		217	15'	0.55	0.76
PLANCK [53]	0.65	30	33'	4.4	6.2
		44	23'	6.5	9.2
		70	14'	9.8	13.9
		100	9.5'	6.8	10.9
		143	7.1'	6.0	11.4
		217	5.0'	13.1	26.7
		353	5.0'	40.1	81.2
		857	5.0'	18300	∞
SAMPAN [50]	0.65	100	42'	0.13	0.18
		143	30'	0.16	0.22
		217	20'	0.26	0.37
Inflation Probe (hypothetical) [51]	0.65	70	6.0'	0.29	0.41
		100	4.2'	0.42	0.59
		150	2.8'	0.63	0.88
		220	1.9'	0.92	1.30

まとめ

CMBは大量の情報を含んでいる

	大スケール	小スケール
温度	◎	○
E mode	△	△
B mode	×	×

さらに<TB>やnonGaussianityについてもデータが得られ始めている。これでようやくインフレーションについて意味のある制限ができるようになってきた。

しかし観測的にはまだまだ進歩の余地があり、さらなる情報を与えてくれるだろう。

終わり

5 yearsとこれまでとの違い

- 5年に渡る木星の観測とbeam optics modelingの進化で beam transfer functionの理解が進んだ
 - point source contaminationが減る
- foregroundの理解が進んだことにより、偏光の multipoleを求めるのにQ、VバンドだけでなくKaバンドも使う
 - EE、BBのノイズがfactor 2ほど減る
- TTの3rd peakが見えてpowerが大きくなった
 - ns、dns/dlnk、 σ_8 が大きくなった
- TEの2nd dipが見えた

外部データ

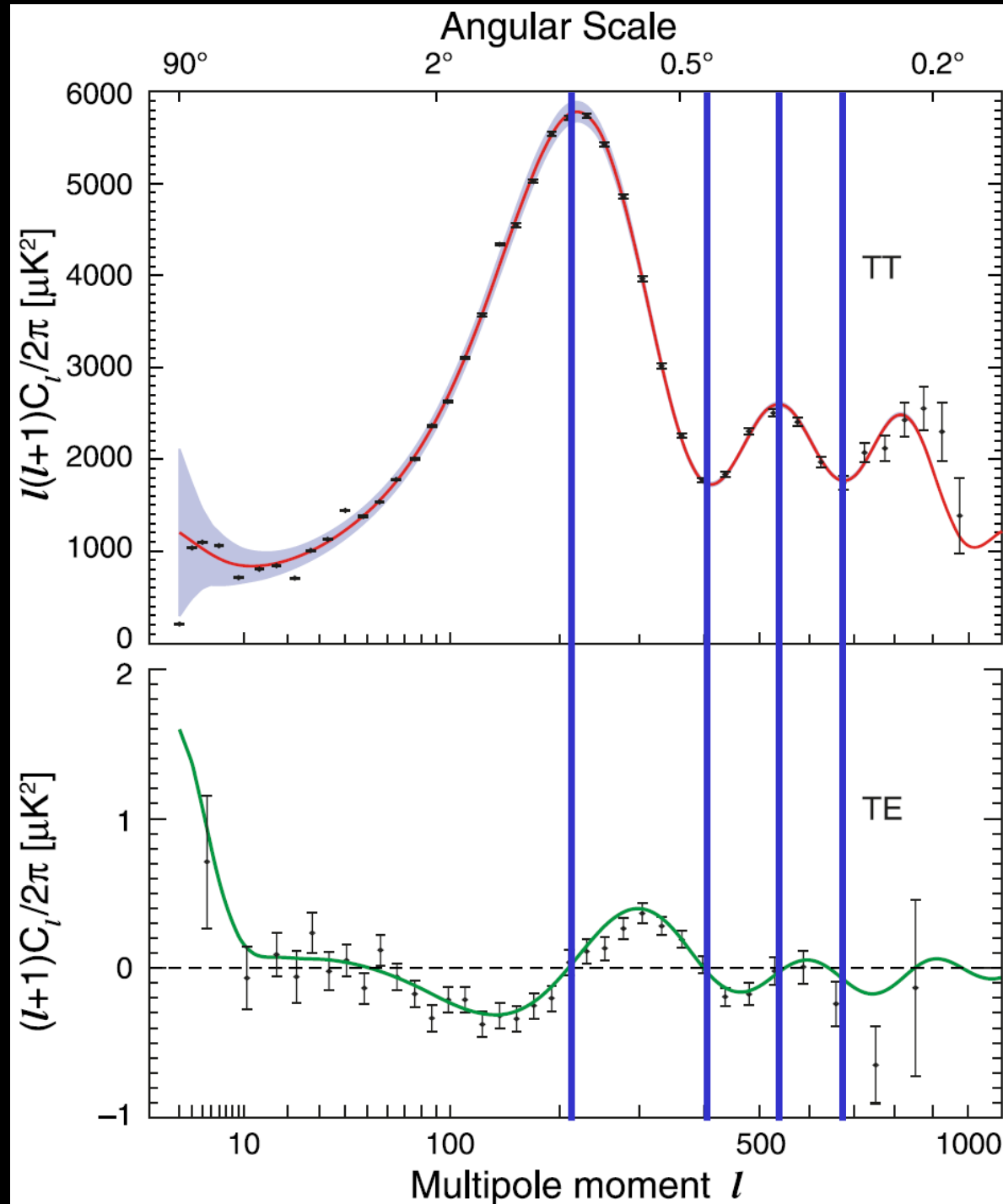
- Hubble constant from Hubble Key Project
 $h = 0.72 \pm 0.08 \text{ km/s/Mpc}$
minimal modelではWMAPだけでもっと精度よく決まるが、extended modelでは有用。
- luminosity distance from SNIa
- ratio $r_s/D_v(z)$ at $z = 0.2$ and 0.35 from BAO
本来はangular diameter distance $D_a(z)$ とHubble $H(z)$ が両方求まるが、まだ精度が悪くspherical averageをしないとBAOが見つからないので今のところ別々には求まらない。また、matter power spectrumはSDSSと2dFGRSでデータに矛盾があるので使わない。

質問 (解決済み)

- optical depth τ の profile は関係ないのか
イオン化率の時間発展をステップ関数にしてしまうと再イオン化の時刻と optical depth は 1 対 1 に対応する (WMAP の解析ではそうしている)。
- ニュートリノ
理論的にニュートリノがないということはありませんが、今回 CMB のデータだけから相対論的要素があるということが言えた。 $N_{\text{eff}} = 3.04$ が標準なのは、ニュートリノの decoupling が電子・陽電子の対消滅の時期重なるので熱平衡の分布にならないためである。ちなみにこの値はちゃんと数値計算で出したもの。
- 磁場による nonGaussianity
transfer function をかけてちゃんと観測量まで持っていくことはやるべきだ。

E mode

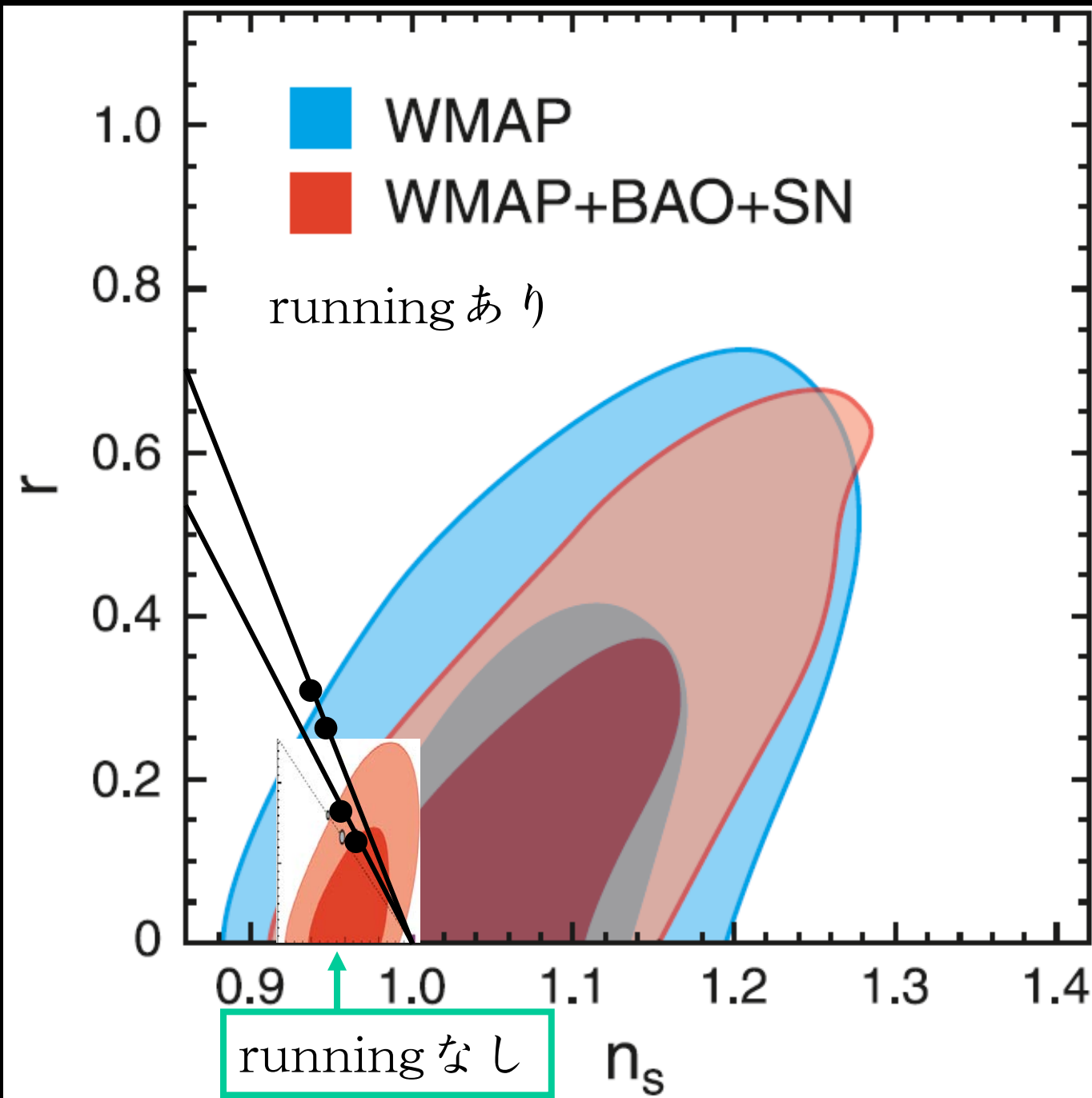
偏光は速度勾配があるところで生まれる。したがって音波振動のピークのところでは偏光はない。したがってadiabaticなゆらぎでは温度ゆらぎとE modeに相関が生まれる。primaryのスカラーから生まれるE modeは温度ゆらぎとは独立な情報にはなるが、特に何か新しいことがわかるわけではない。観測的にE modeが有用なのは再イオン化を探索できるという点だろう。またE modeの正負は偏光が放射状か円状かの違いのようだ。



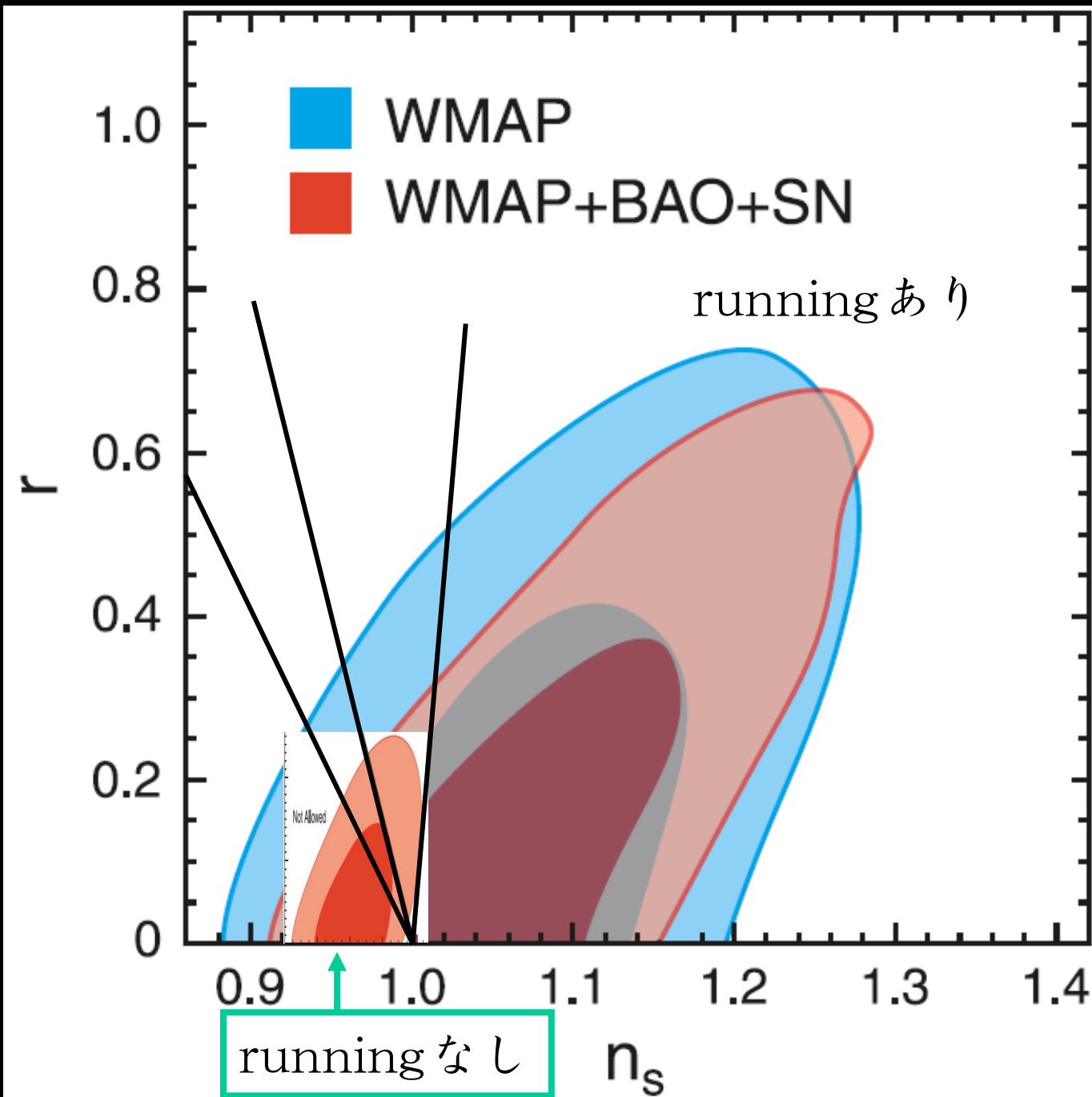
質問（未解決）

- ・ TTのdipのところでもTEがゼロになっているのはなぜか
- ・ 精密に求めたいパラメータ、そうでないパラメータは何か
- ・ インフレーションモデルへの制限はrunning indexを入れてやるべきではないのか
- ・ 2nd peak以降の小スケールの観測はBoomerangやACBARなどの方が温度ゆらぎもE modeも精度よく測れている。WMAPの存在意義は大スケールにあるのか？

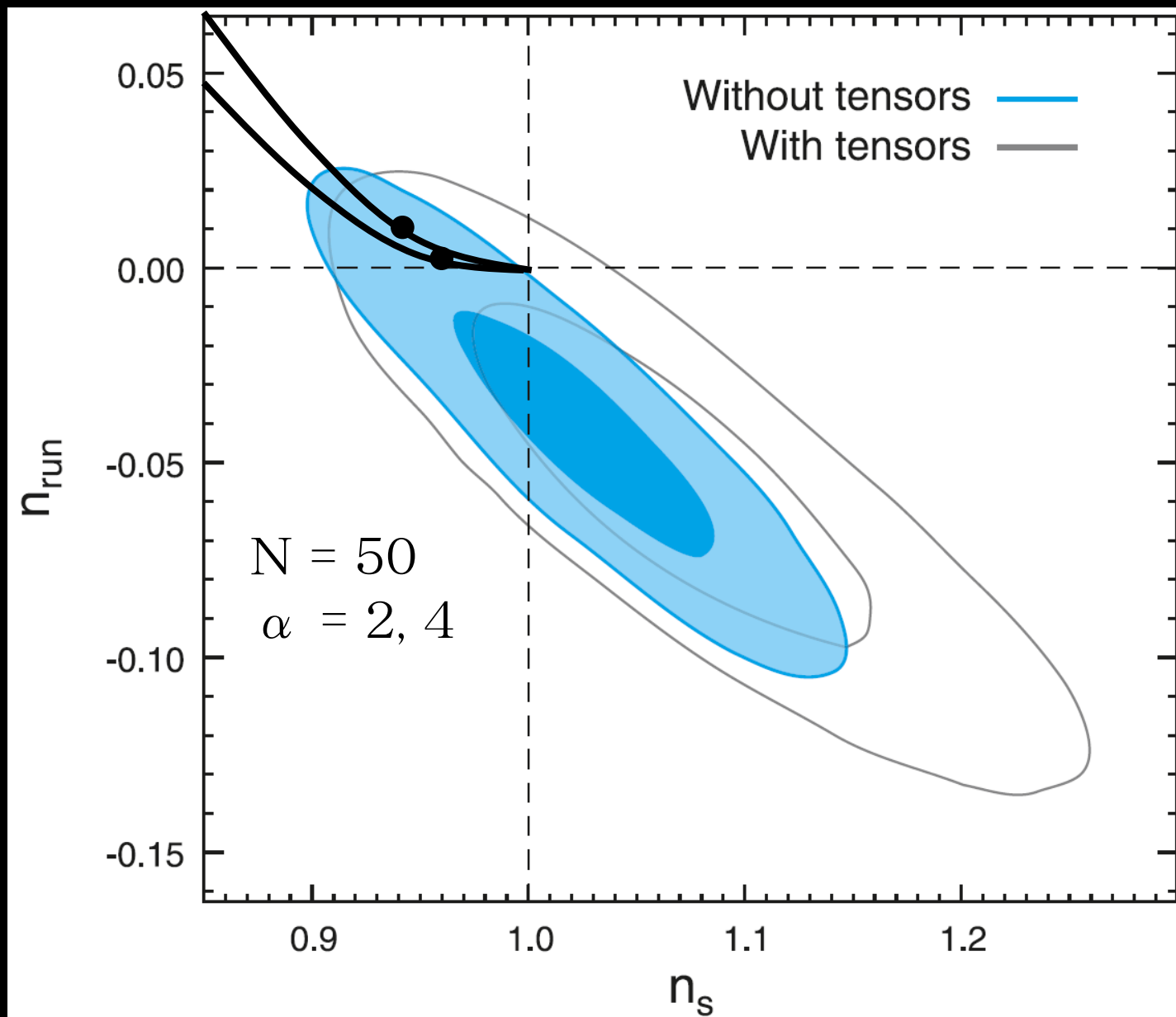
ユビキタス磁場



ユビキタス磁場



ユビキタス磁場



ユビキタス磁場

磁場の起源？

