

CMB温度揺らぎ観測の今後 及び東北大学3Kプロジェクト

服部 誠

(東北大学理学部天文学教室)

- 1 今後の観測が目指すサイエンス
- 2 今後の計画
- 3 東北大学3Kプロジェクト

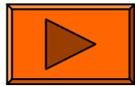
1 今後の観測計画が目指すサイエンス

Primary成分

T/T 高角度分解能観測



偏光Eモードパワースペクトル高精度、高角度分解能観測



偏光マップ作成

テンソルモードの検出: 偏光のBモード検出



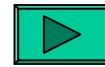
Secondary 成分

銀河団SZ パワースペクトル



σ_8 測定等

銀河団のSZマッピング

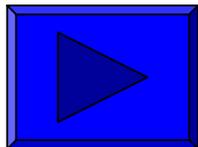


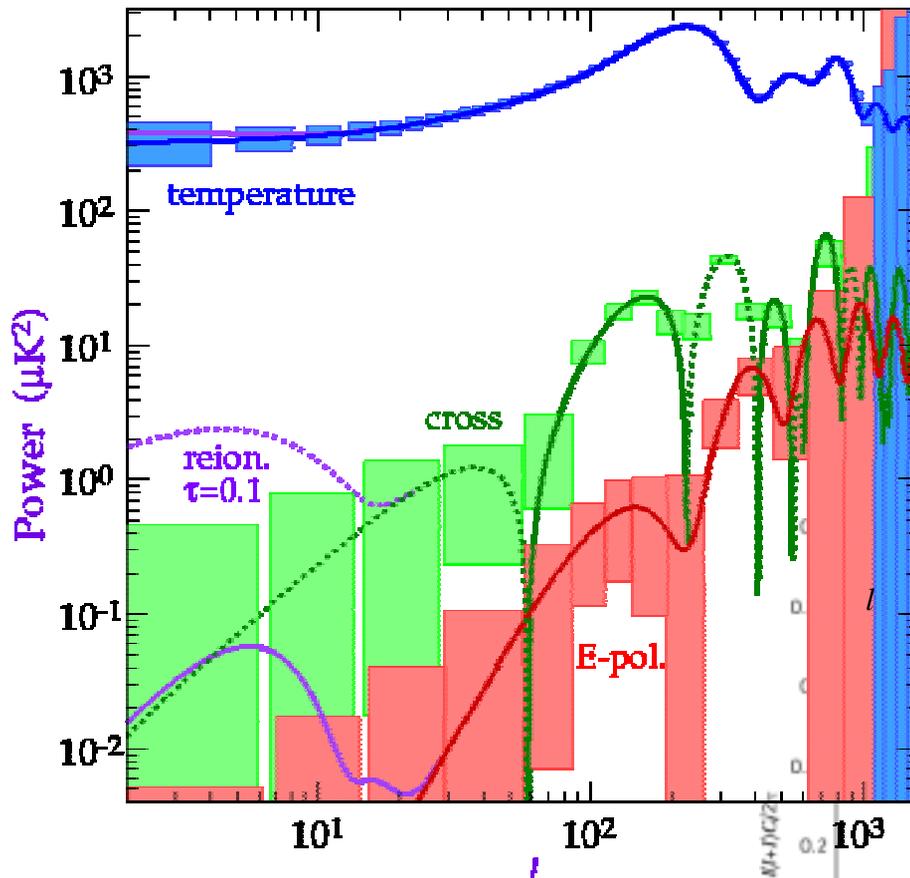
磁場分布 (Faraday回転
Vモード)

銀河団のCMB偏光マッピング ⇒

銀河団の固有運動測定

偏光観測 ⇒ 宇宙の再イオン化

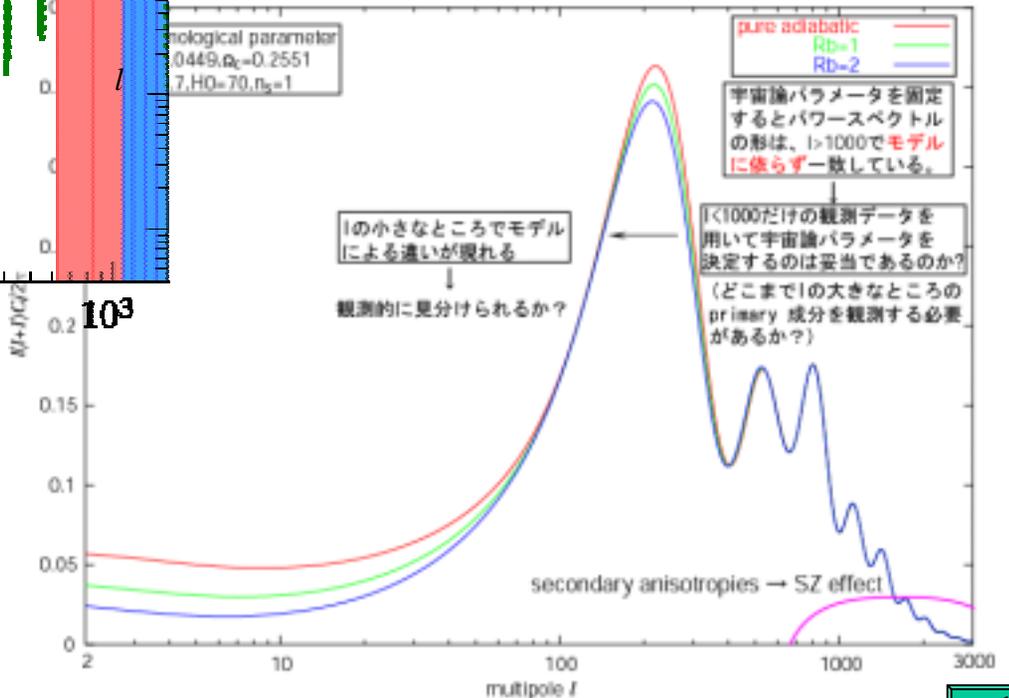




スカラーモード起源の
温度揺らぎ、偏光
パワースペクトル+
銀河団SZ効果の例

$$l \approx 100 \Rightarrow \theta \approx 1^\circ$$

$$\left(\frac{\theta}{1^\circ}\right) \approx \left(\frac{100}{l}\right)$$



密度揺らぎパワースペクトル詳細測定 によるinflaton potential への制限

$$\frac{dn}{dk} \quad n(\text{inflaton})$$
$$n(\text{mass less field})$$



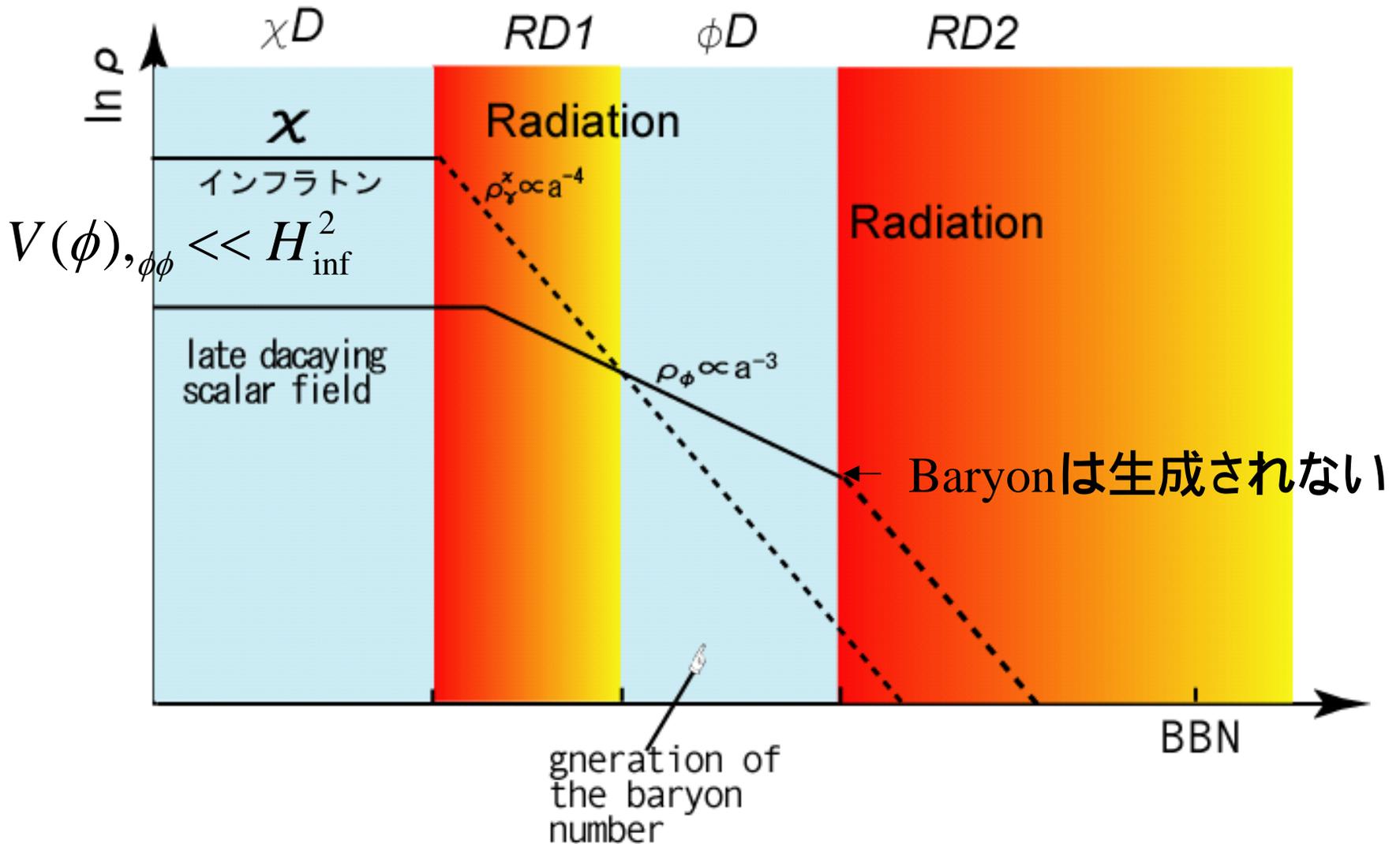
$$\varepsilon_H \equiv -\frac{\dot{H}}{H^2} \approx \varepsilon \equiv \frac{M_{pl}^2}{2} \left(\frac{V(\chi),_{\chi}}{V(\chi)} \right)^2$$

$$\eta \equiv M_{pl}^2 \frac{V(\chi),_{\chi\chi}}{V(\chi)}$$

$$\xi^2 \equiv M_{pl}^4 \frac{V',_{\chi} V',_{\chi\chi\chi}}{V^2}$$



例 Correlated isocurvature perturbation Moroi -Takahashi-Kawasaki model



$$u \equiv a\delta\phi \quad @ \text{ spatially flat gauge}$$

揺らぎの発展方程式(moroton) 但し、 $V(\phi),_{\phi\phi} \ll H_{\text{inf}}^2$

$$u'' + \left[k^2 - \frac{a''}{a} \right] u = 0, \quad ' \text{ は conformal time } (\tau) \text{ 微分}$$

$$\frac{a''}{a} \approx \frac{1}{\tau^2} (2 + \varepsilon_H), \quad \varepsilon_H \equiv -\frac{\dot{H}}{H^2} \approx \varepsilon \equiv \frac{M_{pl}^2}{2} \left(\frac{V(\chi),_{\chi}}{V(\chi)} \right)^2$$

$$\therefore n_{\phi} = 1 - 2\varepsilon_H$$

$$u \equiv a\delta\chi \quad @ \text{ spatially flat gauge}$$

揺らぎの発展方程式(inflaton)

$$u'' + \left[k^2 - \frac{z''}{z} \right] u = 0, \quad z \equiv \frac{\dot{\chi}_0}{H}$$

$$\frac{z''}{z} \approx \frac{1}{\tau^2} \left(2 + 3\varepsilon_H - \frac{3}{2}\eta_H \right)$$

$$\eta_H \equiv -\frac{\dot{\chi}_0}{H \chi_0} = \eta - \varepsilon, \quad \eta = M_{pl}^2 \frac{V(\chi),_{\chi\chi}}{V(\chi)}$$

$$\therefore n_\chi = 1 - 4\varepsilon_H + 2\eta_H$$

• • n_ϕ, n_χ が測定出来れば、

$|V(\chi),_\chi|$ と $V(\chi),_{\chi\chi}$ が測定できる。

$$V(\chi),_{\chi\chi} > 0$$

真空の相転移

$$V(\chi),_{\chi\chi} < 0$$

Chaotic inflation

2. WMAP(TT+TE)+ ACBAR+2dF による制限

CosmoMC使用

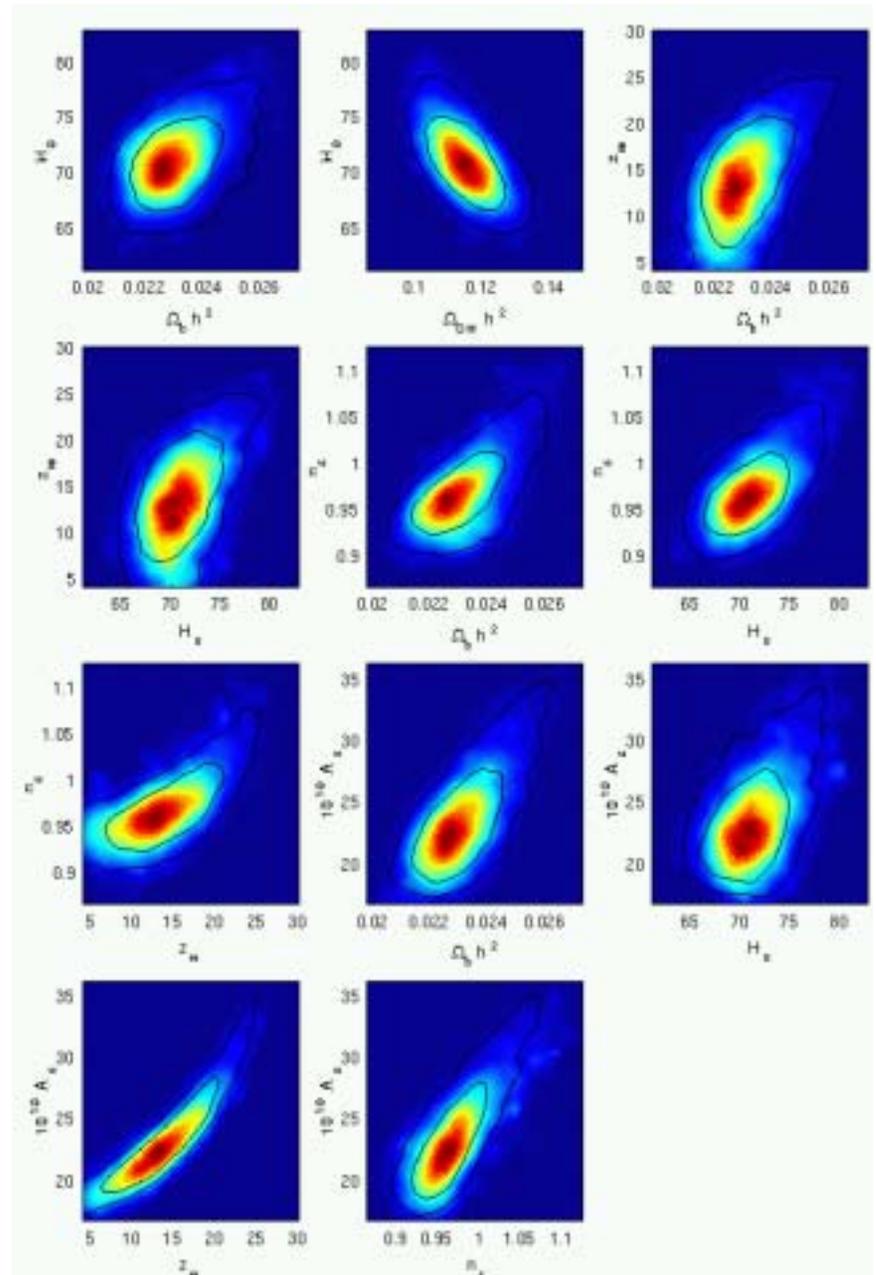
Prior:

軽元素合成

Age top hat

Hubble key project

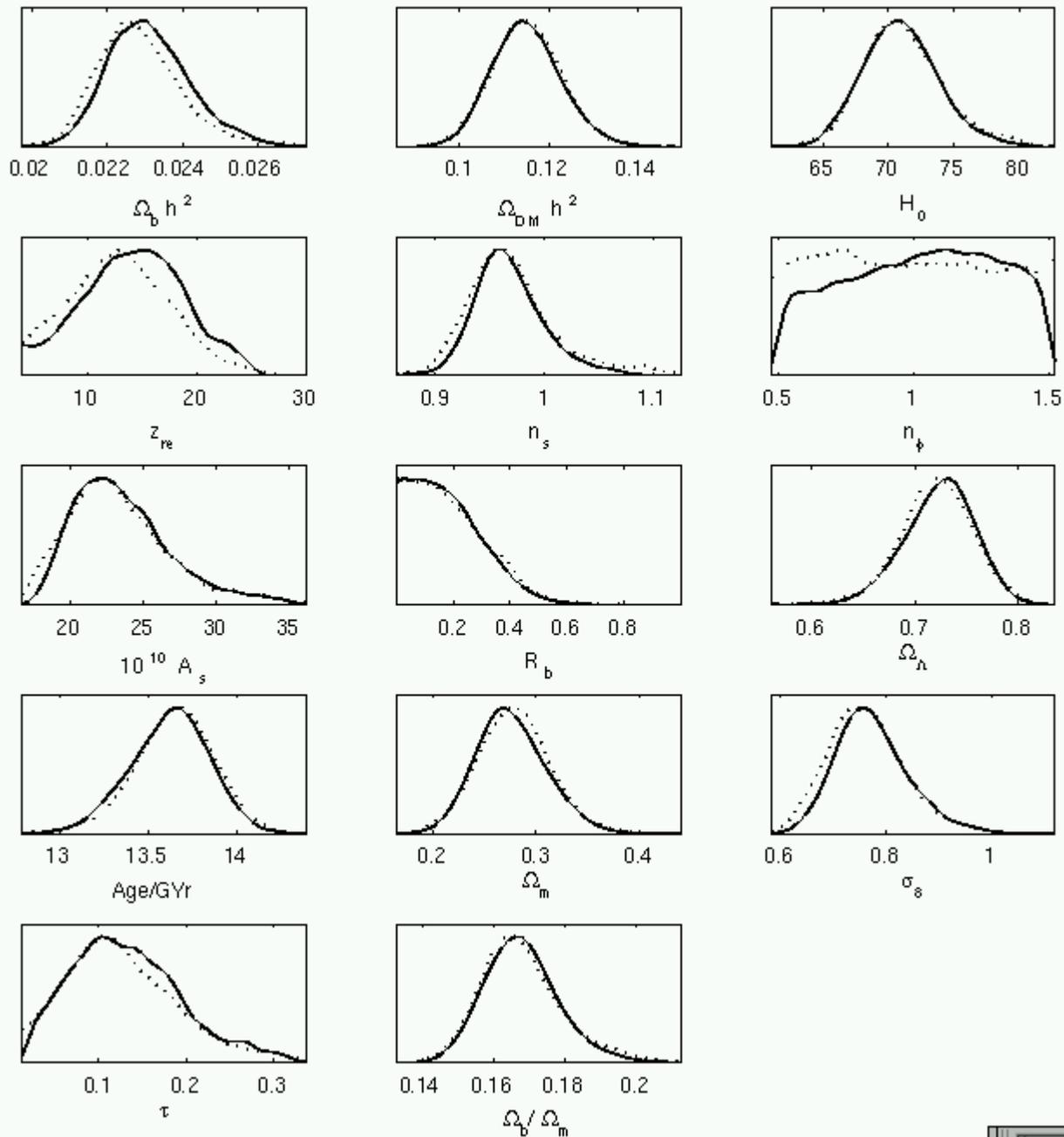
10万サンプル



$$R_b \equiv \frac{\delta T_\phi}{\delta T_\chi}$$

$$n_s = n_\chi$$

実線
頻度分布
破線
likelihood



Parameters best fit & 1σ error ()

$$R_b = 0.179(0.052, 0.308)$$

$$n_s = 0.968(0.952, 0.979)$$

$$n_\phi = 1.03(0.875, 1.19)$$

Correlated isocurvature の

CMB温度揺らぎへの寄与は、67% confidence で9%以下

n_ϕ の意味ある制限が出来ない。

3 . 高角度分解能観測による制限

$$n_{run} = 0 : A_s = 23.6,$$

$$n_s = 0.97, z_{re} = 15,$$

$$H_0 = 73, \Omega_b h^2 = 0.023,$$

$$\Omega_{dm} h^2 = 0.111$$

$$n_{run} \neq 0 : \frac{dn_s}{d \ln k} = -0.031$$

$$A_s = 24.8, n_s = 0.93,$$

$$z_{re} = 17, \Omega_b h^2 = 0.022,$$

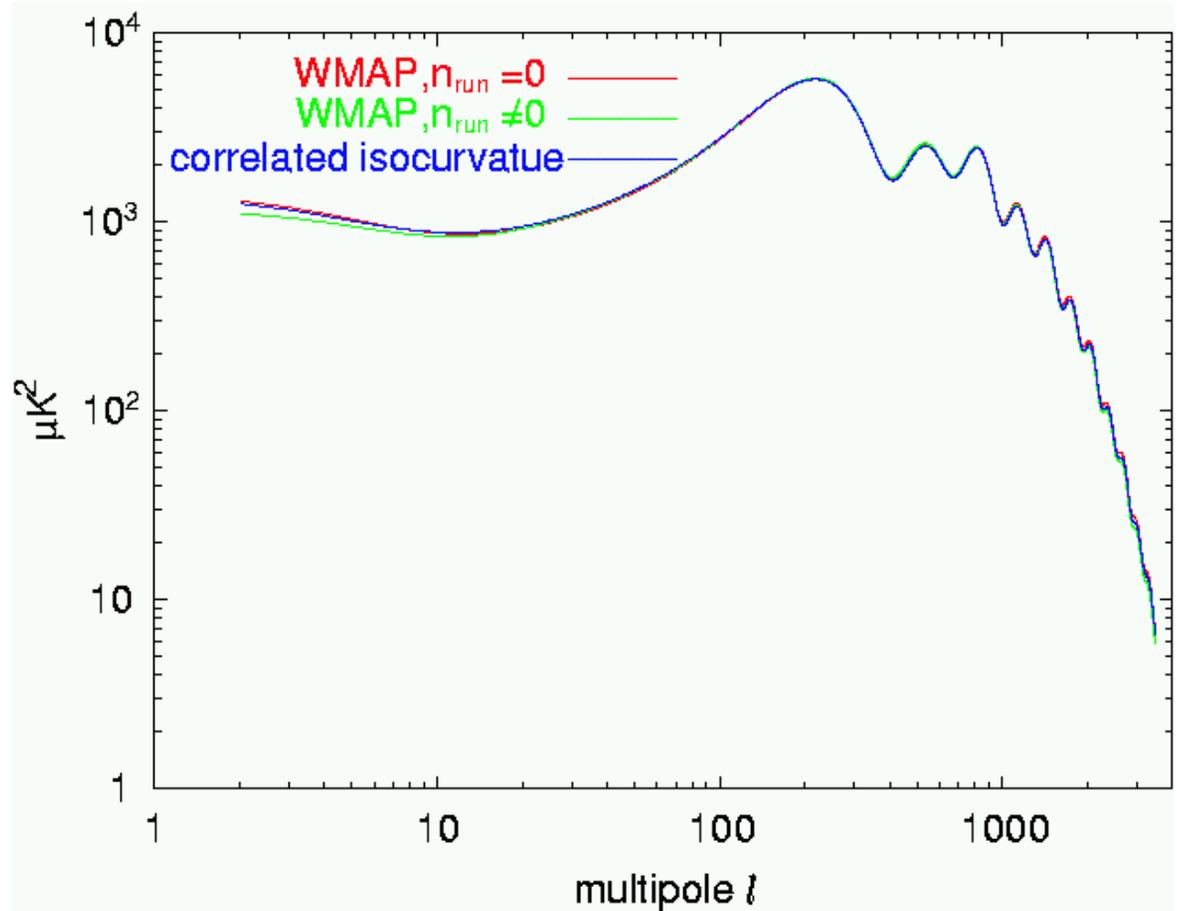
$$\Omega_{dm} h^2 = 0.114, H_0 = 71$$

$$C - ISO : R_b = 0.3,$$

$$n_\phi = 0.97, A_s = 21.7,$$

$$n_s = 0.93, z_{re} = 12, \Omega_b h^2 = 0.0228,$$

$$\Omega_{dm} h^2 = 0.116, H_0 = 69.3$$



$$\frac{dn_s}{d \ln k} \neq 0$$

モデルの識別の方が
より現実的？

$l = 901 - 3000$ のデータをシミュレート

仮定したパラメータ値

$$C - ISO : R_b = 0.3, n_\phi = 0.97, A_s = 21.7,$$

$$n_s = 0.93, z_{re} = 12, \Omega_b h^2 = 0.0228,$$

$$\Omega_{dm} h^2 = 0.116, H_0 = 69.3$$

$l < 901$ WMAP (TT, TE)の結果使用
2dF も使用

Prior

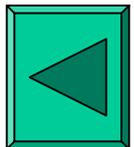
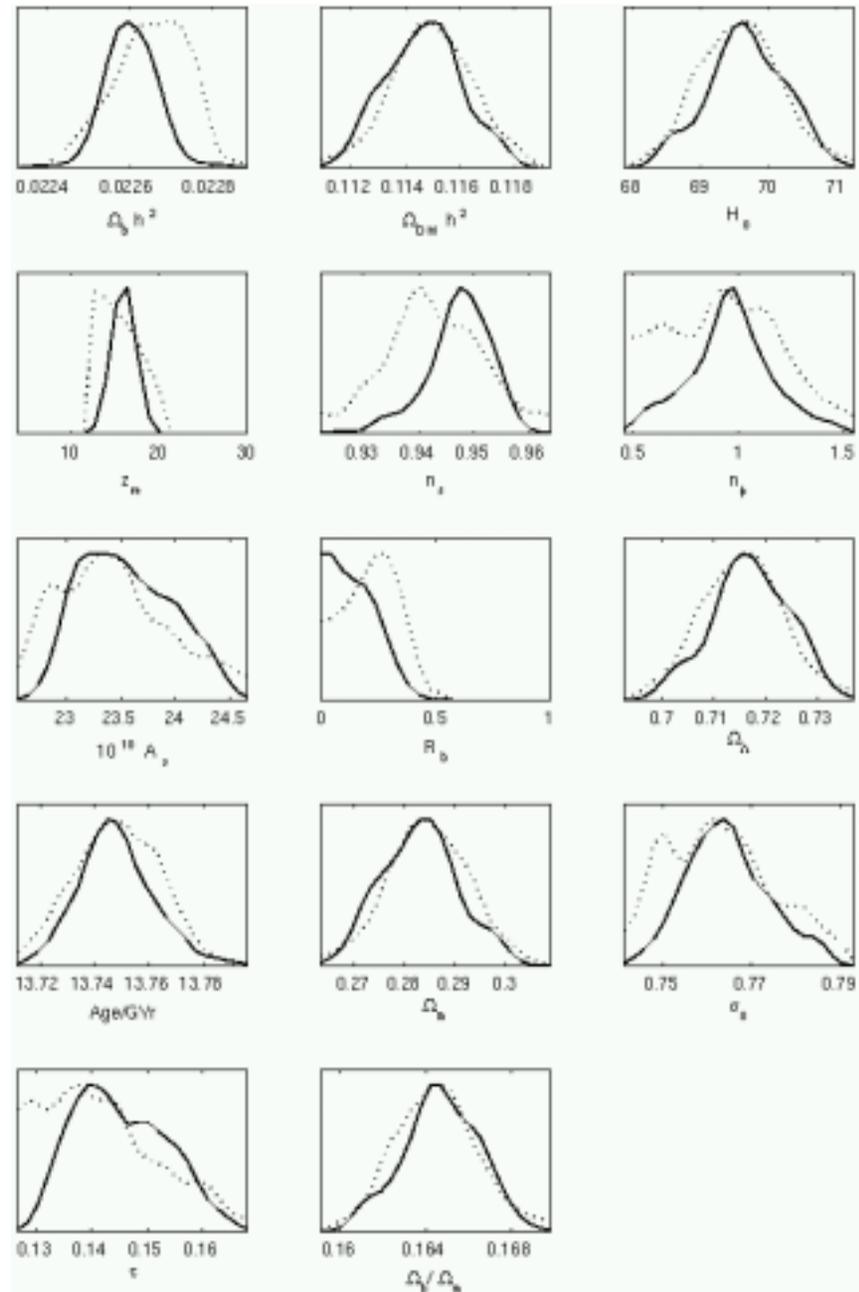
$$\Omega_b h^2 = 0.022 \pm 0.002, H_0 = 72 \pm 8, \text{ Gaussian}$$

$$t_0 = 10 - 20 \text{ Gyr} \quad \text{Top hat}$$

5360サンプル

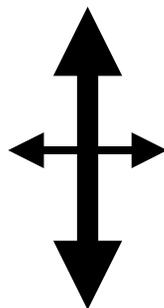
実線
頻度分布
破線
likelihood

多少は気配が見える。
しかし、統計的には難しい。



テンソルモード

スピン = 2



パリティ

$$d_{lm} \propto \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -X_{lm} / \sin \theta & \sin \theta W_{lm} \\ 0 & \sin \theta W_{lm} & \sin \theta X_{lm} \end{pmatrix} : (-1)^{l+1}$$

Bモード:
奇パリティ
テンソルモードに
特徴的

$$f_{lm} \propto \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_{lm} & X_{lm} \\ 0 & X_{lm} & -\sin^2 \theta W_{lm} \end{pmatrix} : (-1)^l$$

Eモード:
偶パリティ

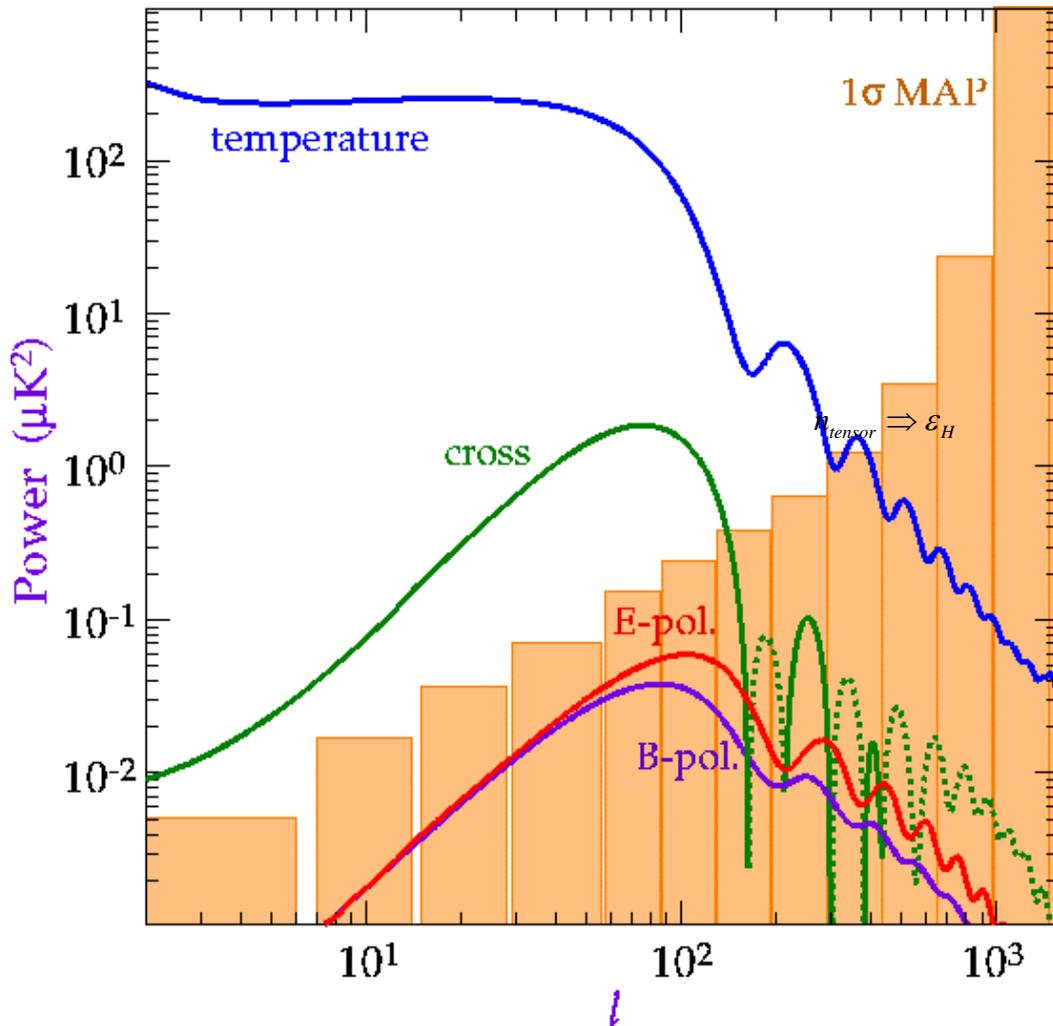
偏光のスピンの2モード

偏光状態を特徴付けるJones MatrixとStokes Parameters

$$\begin{aligned} J &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_1 E_1^* & E_1 E_2^* \\ 0 & E_1^* E_2 & E_2 E_2^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & I + Q & U + iV \\ 0 & U - iV & I - Q \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & iV \\ 0 & -iV & I \end{pmatrix} \text{スピン}_0 + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q & U \\ 0 & U & -Q \end{pmatrix} \text{スピン}_2 \end{aligned}$$

パリティ変換に対してフリップする偏光パターン(Bモード)の検出が直接テンソルモードの検出に繋がる。

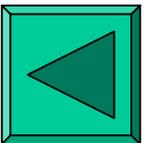
テンソルモード起源の温度揺らぎ、偏光



$$h'' + \left[k^2 - \frac{a''}{a} \right] h = 0$$

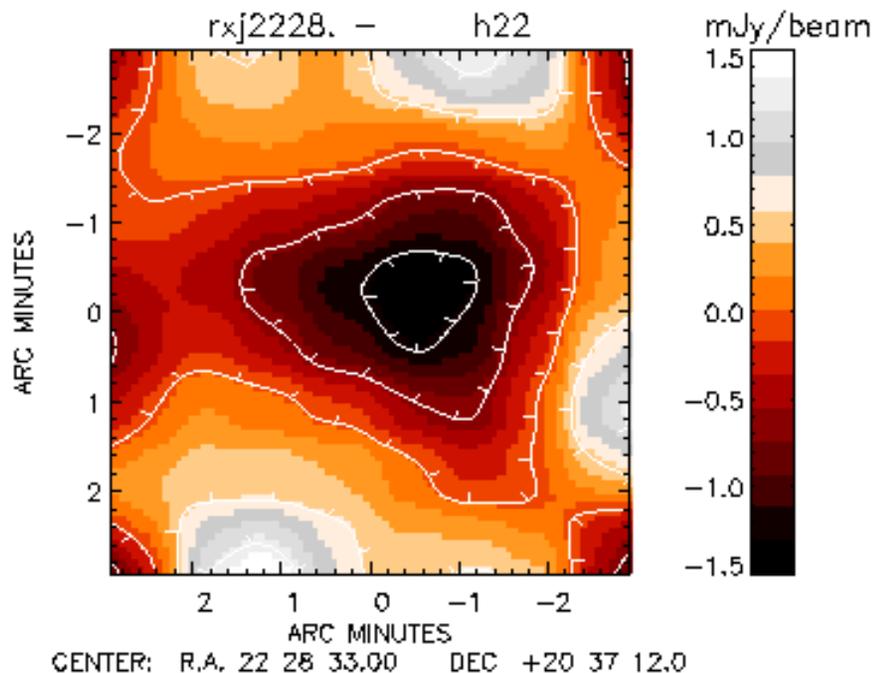
Massless scalar field
と同じ振る舞い。

$$n_{tensor} \Rightarrow \epsilon_H$$



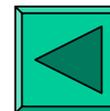
野辺山 22GHz (45m) : 銀河団SZマッピング

RJ側で輝度減少
Wien側で輝度上昇
境目217GHz



銀河団の
熱エネルギー分布
の直接観測

Pointecoutaue, Hattori, etal. 2002



2. CMB観測プロジェクト

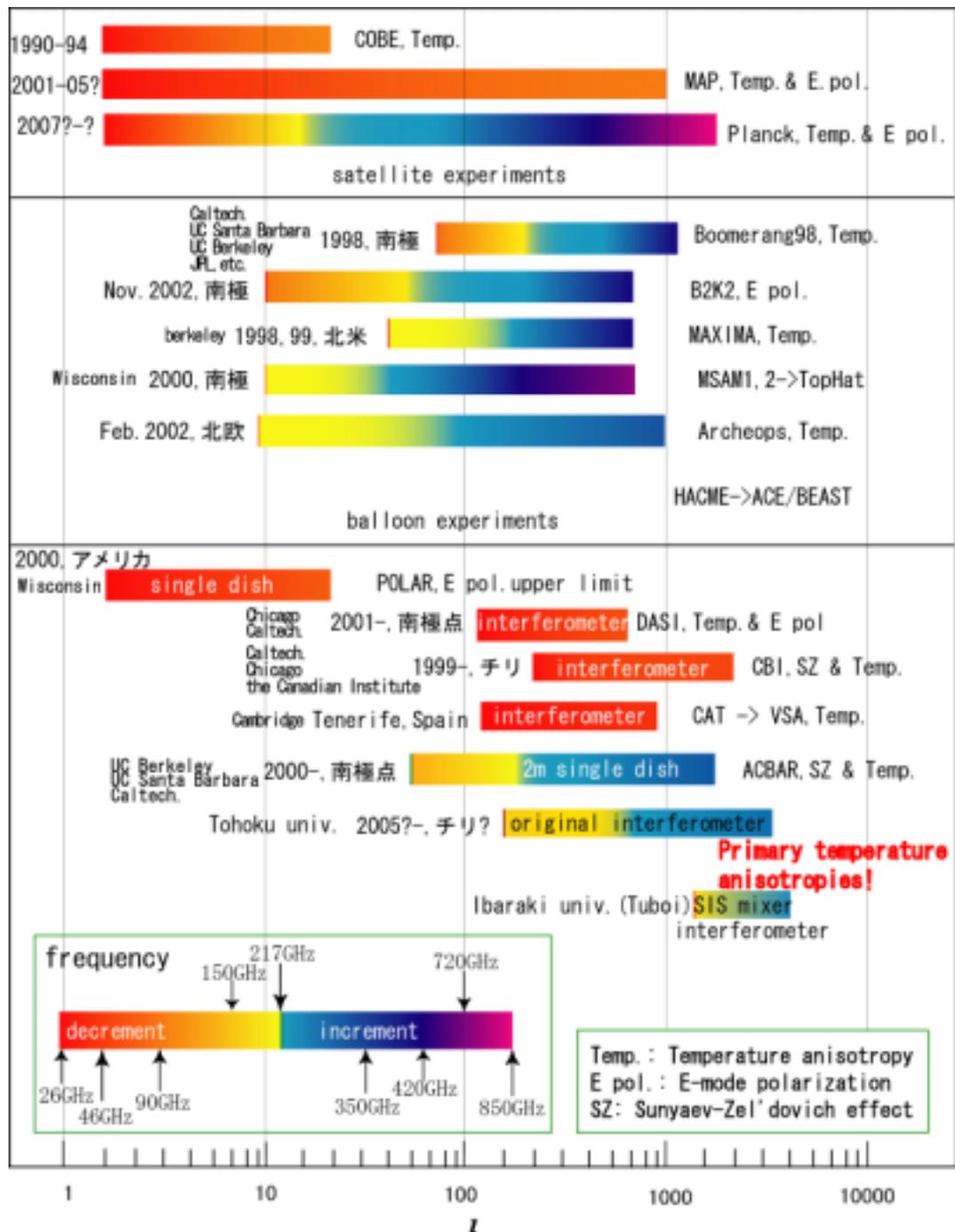


Table 4. Requirements on the bolometer performances. Suffix P indicates a Polarization sensitive Bolometer

Frequency	Optical load	Required NEP	Goal time constant	Required Time cst.
	pW	1.10^{11} WHz ^{1/2}	ms	ms
100	1.0	1.2	3.9	7.8
143	1.1	1.5	2.9	5.7
217	1.1	1.8	2.2	4.4
353	1.0	2.2	2.2	4.4
545	5.0	6.0	2.2	4.4
857	16.0	13.5	2.2	4.4
143P	0.57	1.1	3.0	5.7
217P	0.54	1.3	2.2	4.4
545P	2.50	4.3	2.2	4.4

2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013

NEP: 検出器の感度を表す量。

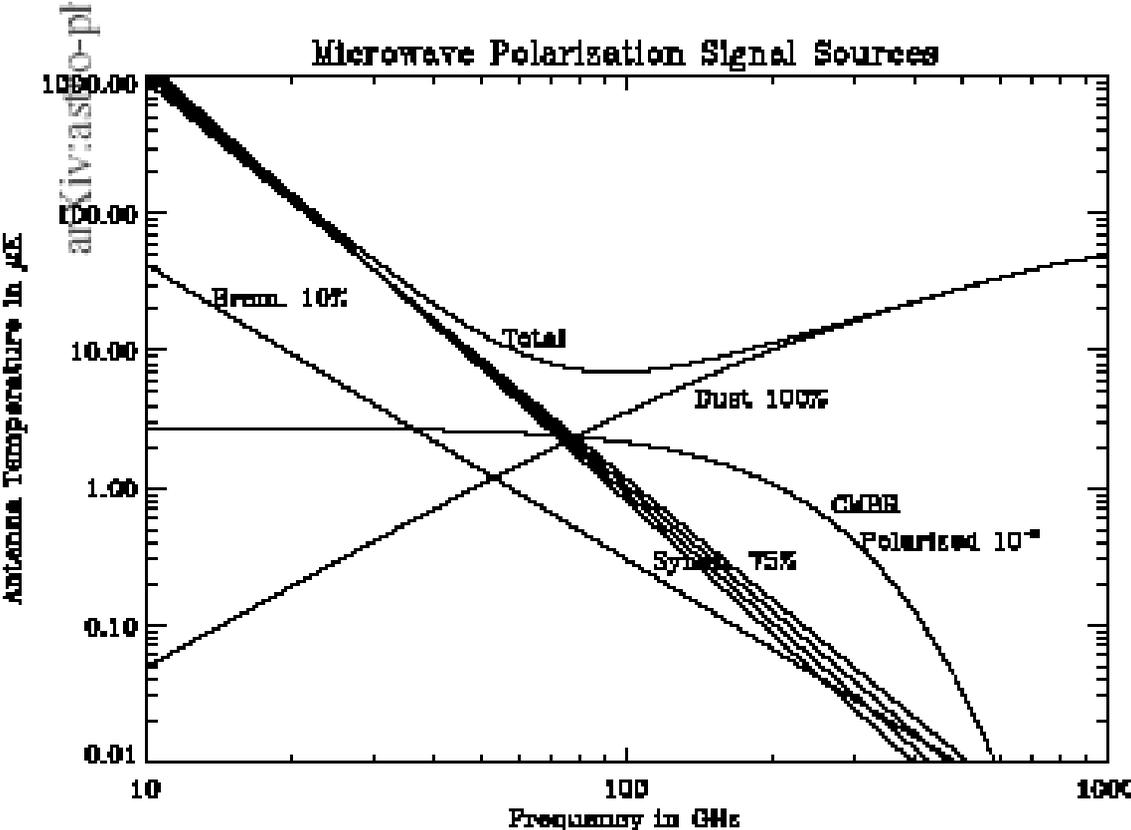
0.5秒の観測でNEPワットのソースをSN = 1で検出できる。

Table 6. Expected Average Noise (EAN) at mission level (see text for detailed definitions)

Central Frequency (ν)	Ghz.	100	143	217	353	545	857
Spectral resolution	v/Δv	3	3	3	3	3	3
Beam Full Width Half Maximum.	arcmin.	9.2	7.1	5.0	5.0	5.0	5.0
ΔT/T _{CMB} Sensitivity (Intensity) (EAN)	μK/K	2.0	2.2	4.8	15	147	6700
ΔT/T _{CMB} polarisation (U and Q) (EAN)	μK/K	–	4.2	9.8	30	–	–
Total Flux Sensitivity per pixel.	mJy.	9.8	10.2	14.3	27	43	49
ySZ per FOV (x10 ⁹).		1.3	2.1	615	6.5	26	605

Foregroundの差し引き

CMB偏光とダスト、シンクロトロンによる偏光



3. 東北大学3Kプロジェクト

サイト:チリ ALMAサイト5,000m以上の高原

■観測周波数域(検出器はボロメータ)

- 150 ± 15GHz

- 200-300GHz(これほど帯域を広く取れるのは我々の装置だけである。)

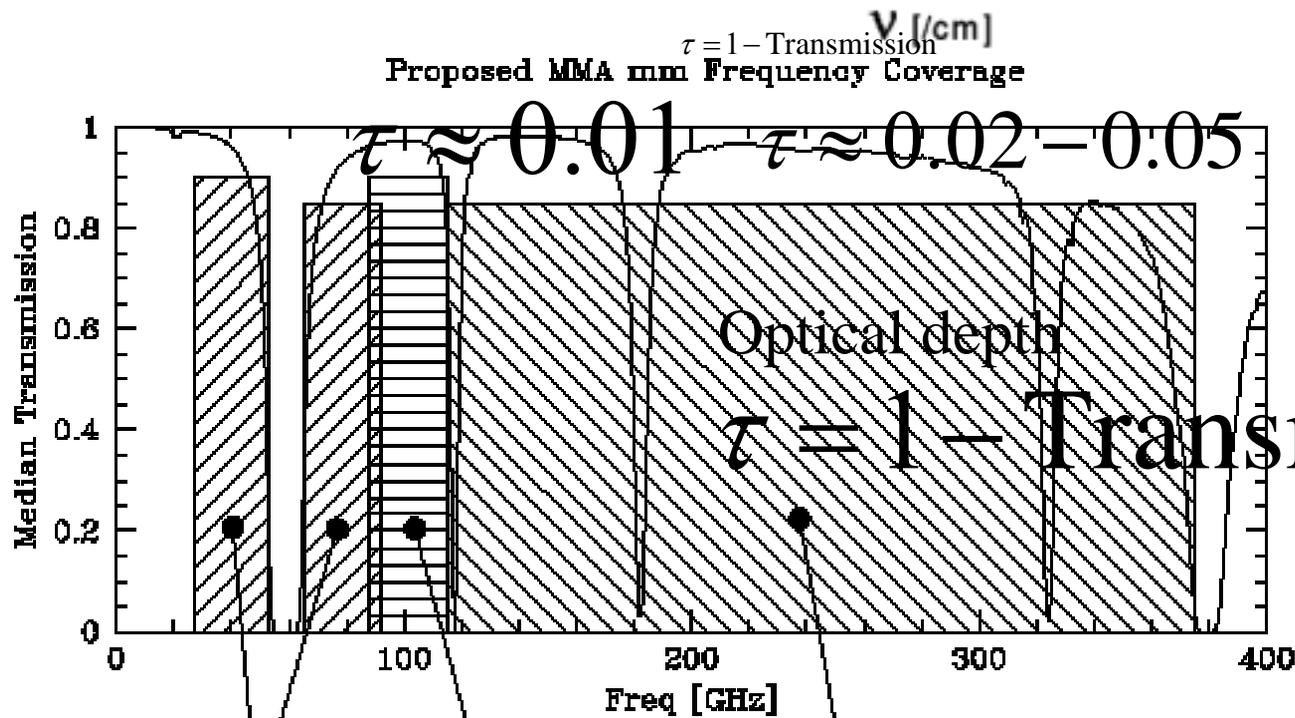
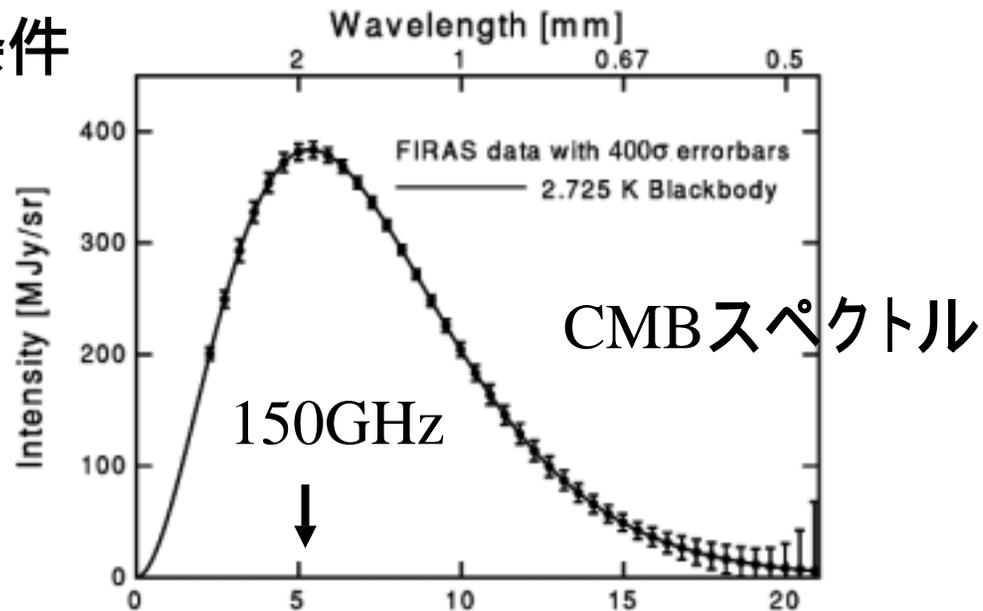
■観測する l の範囲($200 < l < 4000$)

■特徴

- 分光と撮像が同時に行える広帯域ミリ波サブミリ波干渉計

- SZ効果のincrement 側とdecrement 側を連続的に観測できるので、SZによるsecondary anisotropies を取り去ることができ、 $l \sim 3000$ 前後のprimary anisotropies を引き出すことができる。

地上からの観測条件



大気の透過率
@チリ

Transmission

大気の影響

$\tau \ll 1$ の時

$$I = I_s e^{-\tau} + I_{atm} (1 - e^{-\tau}) \approx I_s + I_{atm} \tau$$

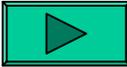
大気による吸収 大気からの熱雑音

大気からの熱雑音

@150 ± 15GHz : NEP = 10⁻¹⁷ W/Hz^{0.5} (= 0.01)

@200 ~ 300GHz : NEP = 10⁻¹⁶ W/Hz^{0.5} (= 0.05)

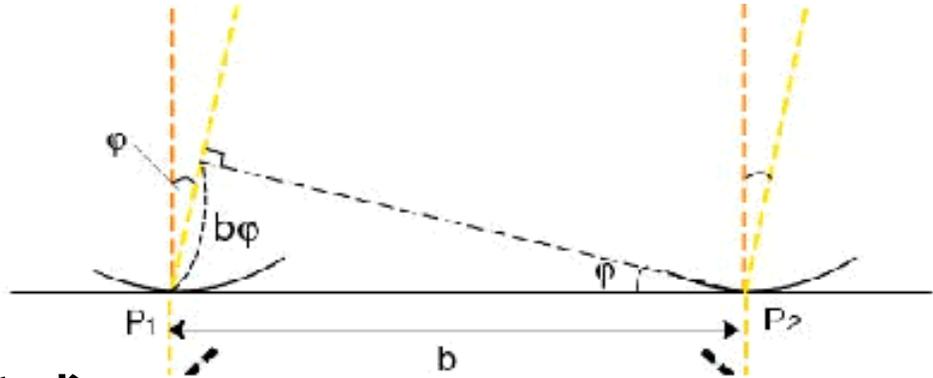
大気の揺らぎ: 大気の時間的、空間的ムラ

干渉計は大気の揺らぎに強い。 

干渉成分にのみ感度があるためだ。

CMB温度揺らぎのみ観る。 

干渉計による撮像： 単色の場合



Wiener - Khintchineの公式

$$I(b) \propto \iint E(t, \phi) E\left(t + \frac{b\phi}{c}, \phi\right) dt d\phi = \iint |\hat{E}(v', \phi)|^2 e^{-2\pi i v' \frac{b\phi}{c}} d\phi dv'$$

$$= \int |\hat{E}(v, \phi)|^2 e^{-2\pi i u \phi} d\phi \quad u \equiv \frac{v}{c} b$$

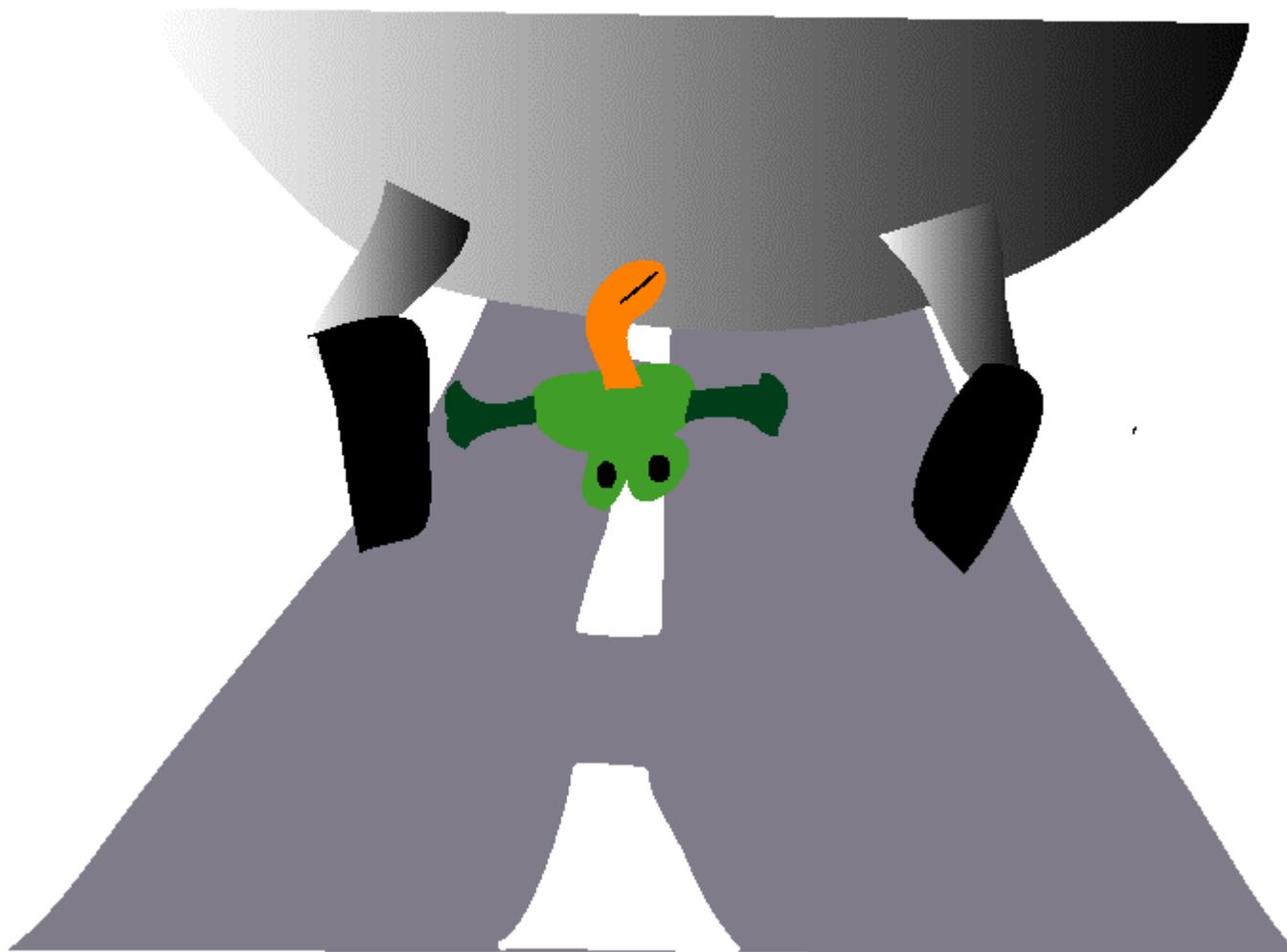
$$I_v(u, v) = \int |\hat{E}_v(\phi_x, \phi_y)|^2 e^{-2\pi i (u \phi_x + v \phi_y)} d\phi_x d\phi_y$$

$$u \equiv \frac{v}{c} b_x, v \equiv \frac{v}{c} b_y$$

様々な(u,v)で観測。
u,vで逆変換 → 天体の像



蛙は何グラム？ $= (M+m) - M$



検出器の選択

150GHz以上のCMB観測には

ボロメータが圧倒的に有利。

通常の干渉計: Coherent 検出器

ソースシグナル I_s に近い周波数 ν の強い基準信号 I_{LO} を混ぜて
うなりシグナルを作る。周波数を落とす。増幅。

$$(\text{アウトプット})^2 = (I_s/h\nu)(I_{LO}/h\nu)$$

$$(\text{量子限界ノイズ})^2 = (I_{LO}/h\nu)$$

$$(\text{アウトプット})^2 / (\text{量子限界ノイズ})^2 = 1 \text{ より}$$

$NEP^2 > h$: Coherent 検出器の量子限界
帯域 も広げられない(高々1GHz程度)

アレー化(多素子化)実質不可能

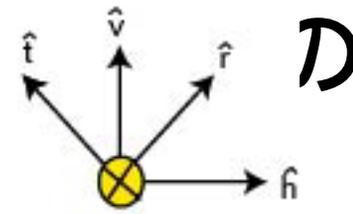
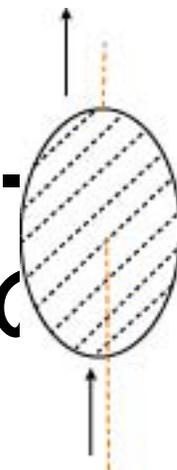
ボロメータ: Incoherent検出器(位相情報取れない。時定数遅い。)

150GHz以上では、

$NEP^2 / \text{帯域}$ (大気ノイズリミット) $< NEP^2 / \text{帯域}$ (coherent det.)
は好きなだけ取れる。アレー化の実績あり。

干渉計 + ボロメータの
組み合わせがベスト

Martin & Puplett型フーリエ開口合成へ



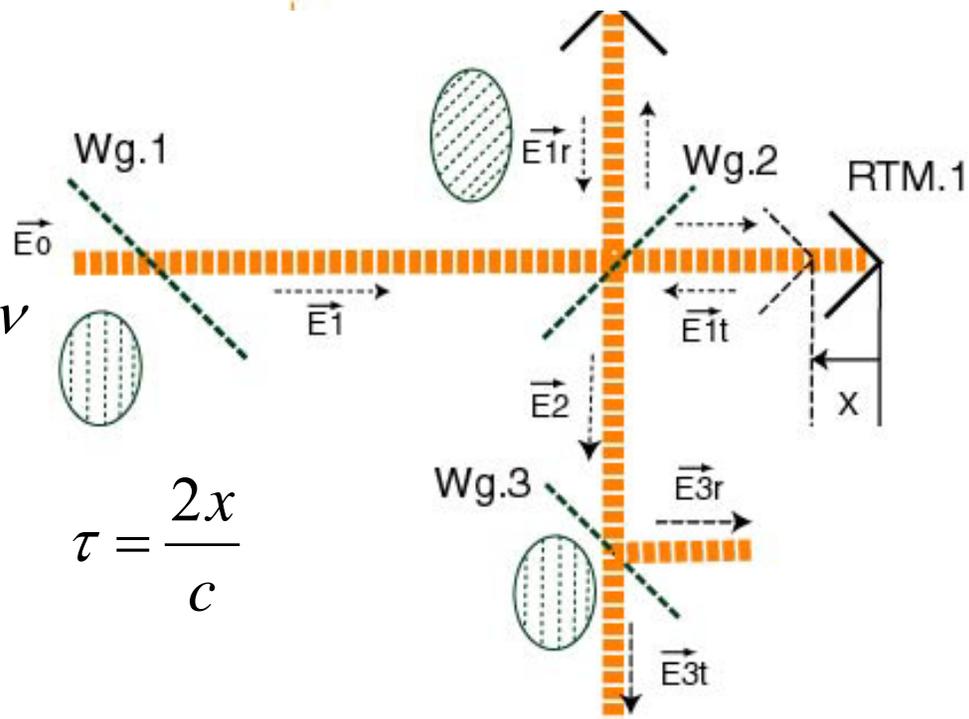
Wiener - Khintchineの公式

$$I(\tau) \equiv$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} E(t + \tau)E(t)dt = \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{E}(\nu)|^2 e^{2\pi i \nu \tau} d\nu$$

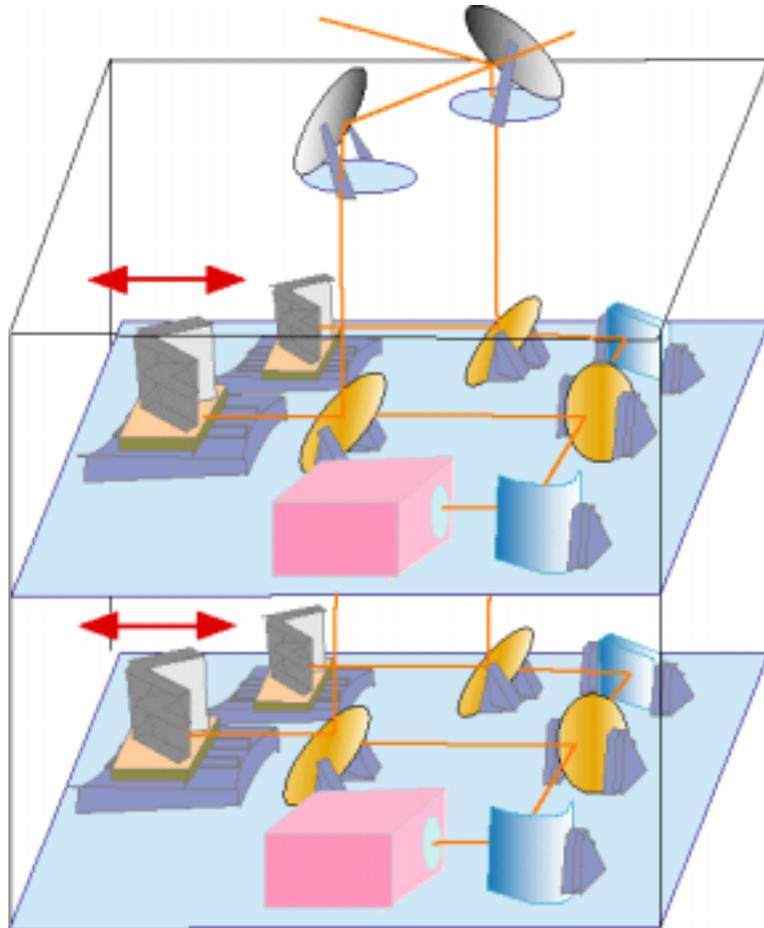
$$|\hat{E}(\nu)|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} I(\tau) e^{-2\pi i \nu \tau} d\tau$$

$$\tau = \frac{2x}{c}$$

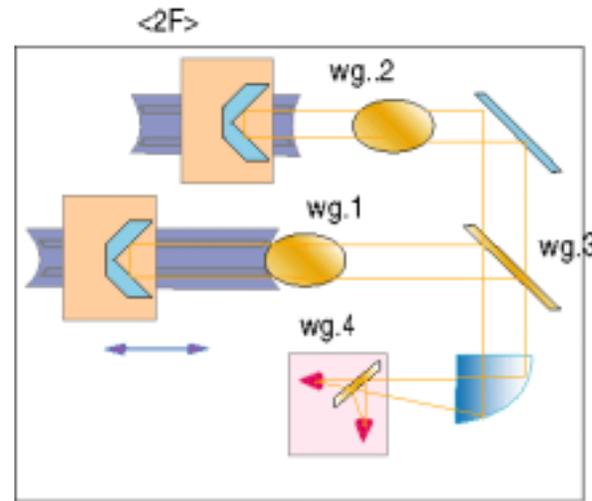


検出器にボロメータ使用可

開口合成への応用

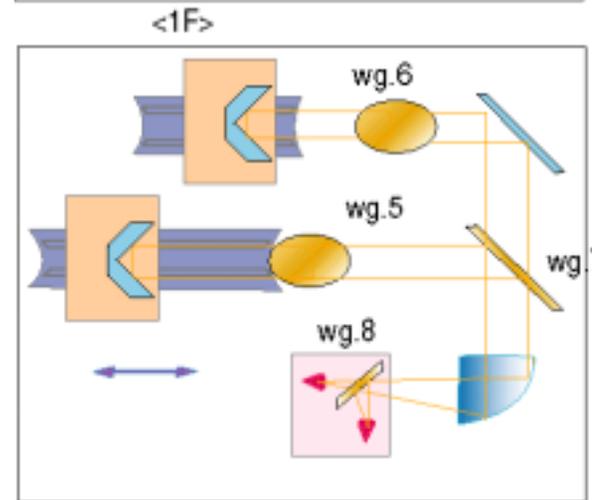


Jones Matrix
の測定になっている



$$E_1 E_1^*$$

$$(E_1 E_2^*)$$



$$E_2 E_2^*$$

$$(E_1^* E_2)$$

試作機

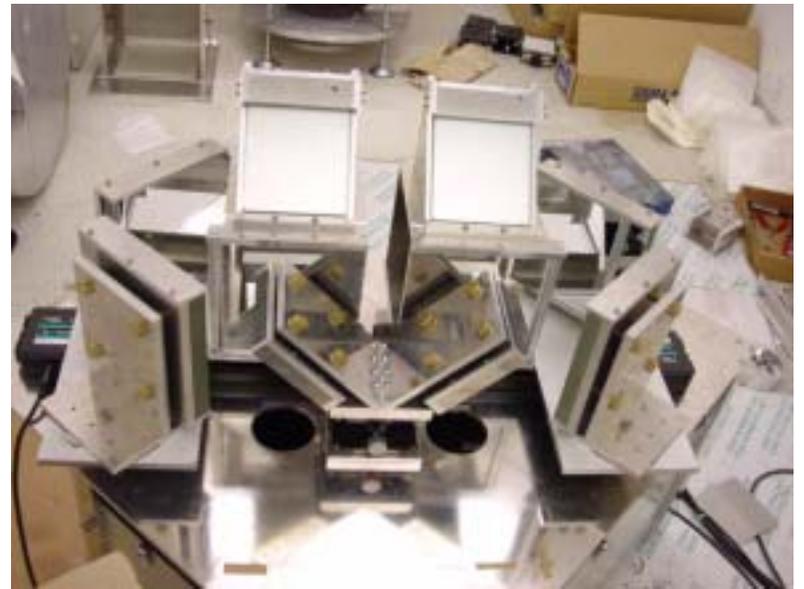
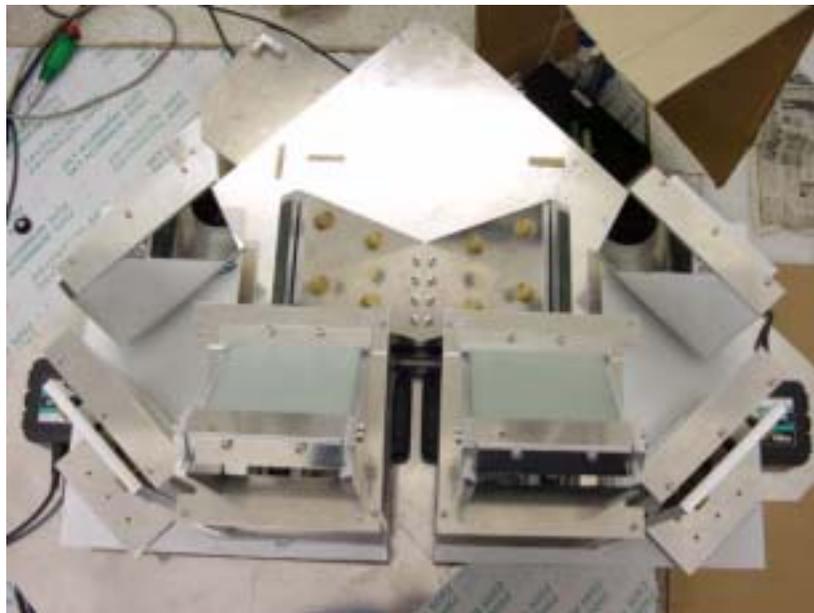
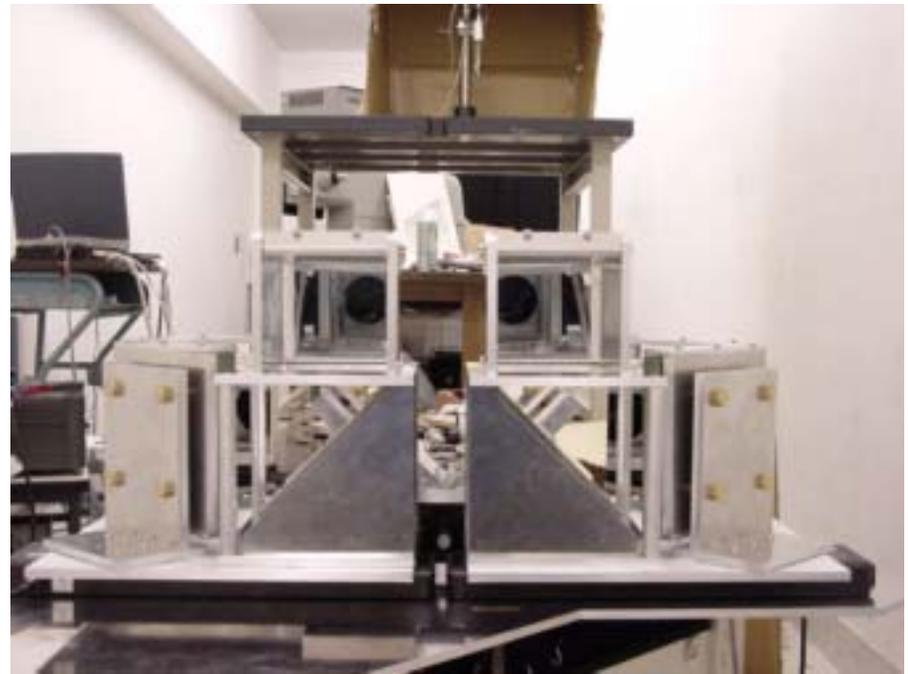
Hattori, Ohta, Matsuo, Shibata(2000)



各周波数毎の
 I, Q, U, V の
空間分布が
測定可能。

コンパクトな実用機
設計、試作。

誰でも考え付くような簡単な装置だが、これらの成果は
全て我々が世界初。

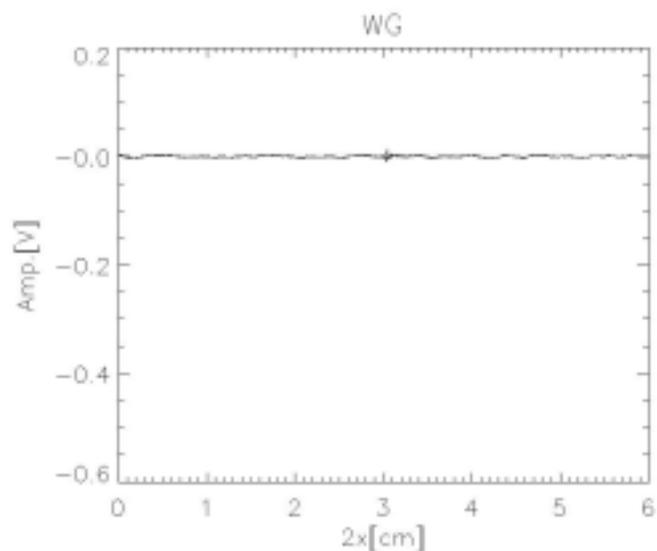
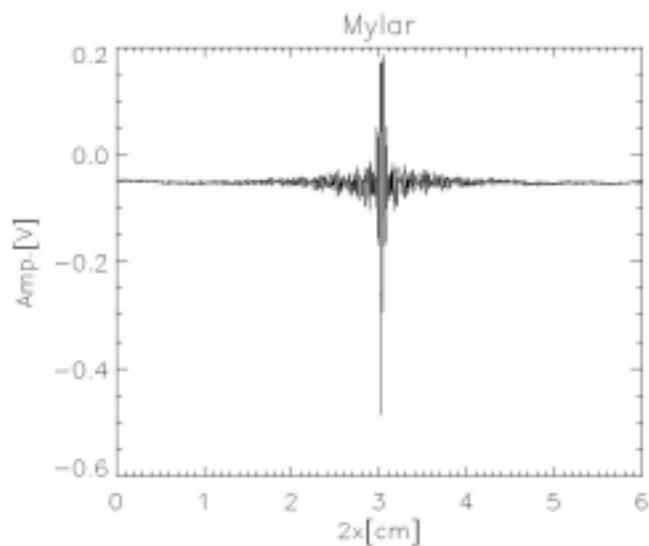


実験室実験の成果

ミリ波サブミリ波帯域での広帯域 (150 - 1000GHz)
分光、撮像 (一次元) 観測に成功

I, Q, U, V が測定可能であることを示す。

バックグラウンドが低い

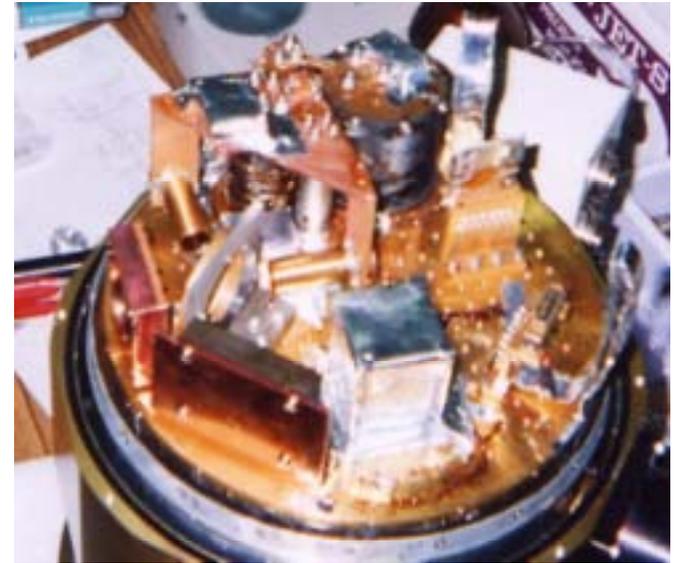
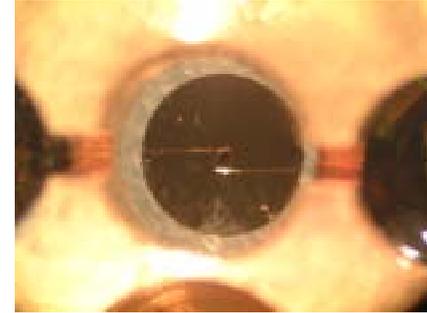


誘電体膜使用

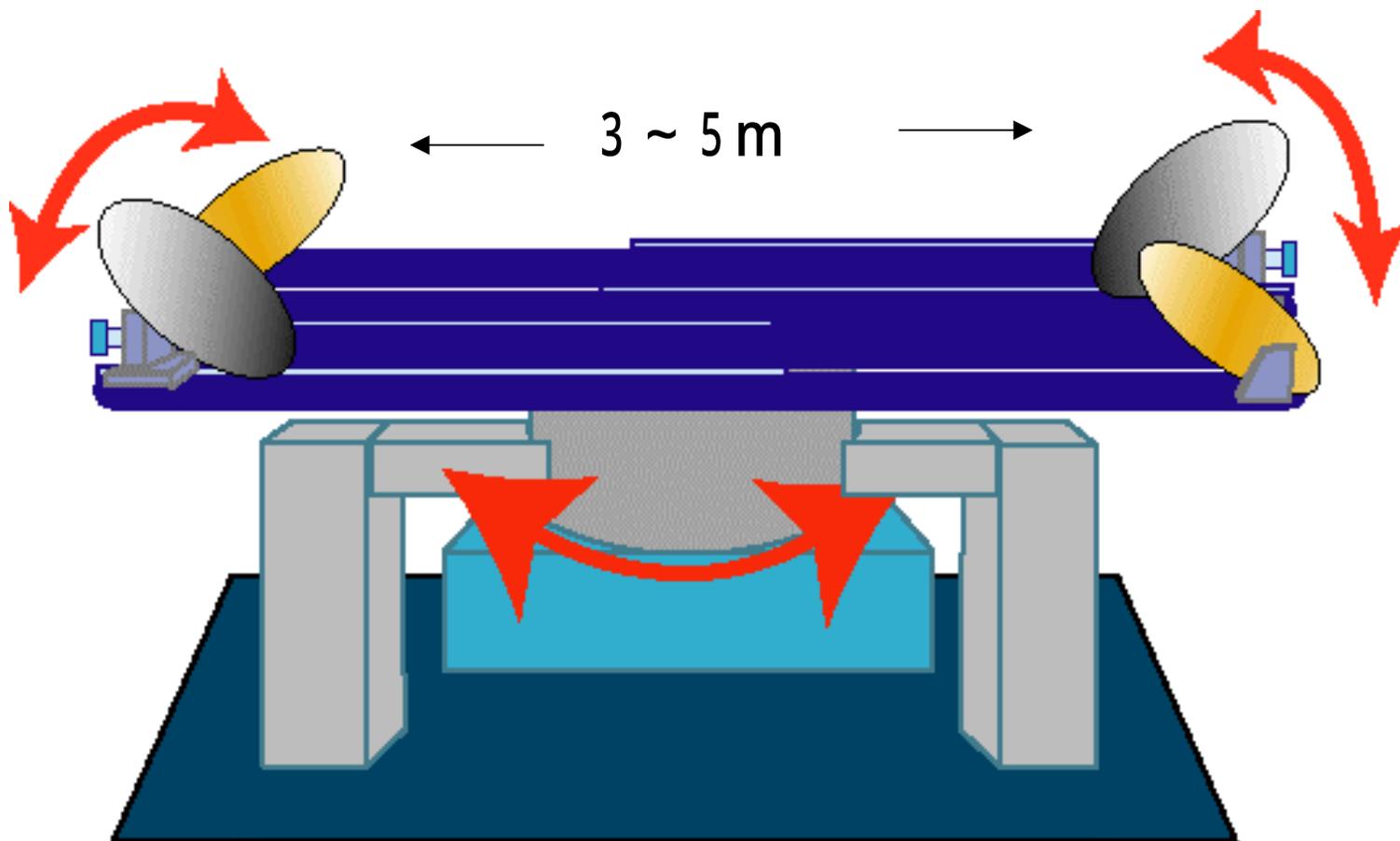
ワイヤーグリッド使用

干渉計内部で発生したノイズの殆どが宇宙へ逃げていく。

屋外試験観測用ヘリオスタットと0.3Kボロメータ



例：



計画: 単素子ボロメータ使用の場合

@150GHzバンドで2'.4分解能 rms=2 μ K

NEP = 10^{-17} ボロメータで 120sec/1sky pixel 積分時間

Cosmic Variance < Tの為12,000sky pixel以上必要

総観測時間約400時間(17日)

3分、4分、6分、7分、12分、18分、24分、50分での Tを

測定: 総観測時間約300時間

= > 温度揺らぎマップを作る。

200 300GHz SZ探査:

NEP = 10^{-16} ボロメータで約500時間

視野を徐々に広げて3 30分でCosmic Variance < T
になるようにする。

ボロメータのアレイ化が出来れば、アレイの数に反比例して
掛かる時間が短縮される。

今後

- 実用化に向けた実験室での実験の継続
- 屋外天体観測の実現
- チリを目指したCMB専用装置の開発
- 偏光Bモード検出を目指した検出器の開発
(ミリ波SISカメラ等)

謝辞: 小松英一郎氏(プリンストン)、
諸井氏(東北大学理 素粒子)には大変お世話になりました。