

宇宙背景放射(CMB)の偏光度測定 ービッグバンの前を探るー

裏タイトル:「入院から宇宙へ」

羽澄昌史

素核研物理第一研究系

平成20年3月7日

金茶会

WMAP 5-Year Results: Implications for Inflation

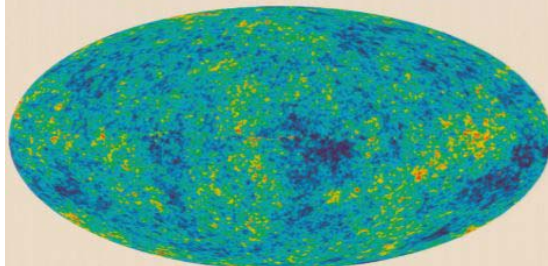
Eiichiro Komatsu
University of Texas at Austin
"Novel Theories of the Early Universe"
Perimeter Institute, March 5, 2008

WMAP 5-Year Papers

- **Hinshaw et al.**, "Data Processing, Sky Maps, and Basic Results" [0803.0732](#)
- **Hill et al.**, "Beam Maps and Window Functions" [0803.0570](#)
- **Gold et al.**, "Galactic Foreground Emission" [0803.0715](#)
- **Wright et al.**, "Source Catalogue" [0803.0577](#)
- **Nolta et al.**, "Angular Power Spectra" [0803.0593](#)
- **Dunkley et al.**, "Likelihoods and Parameters from the WMAP data" [0803.0586](#)
- **Komatsu et al.**, "Cosmological Interpretation" [0803.0547](#)

WMAP 5-Year Data

Hinshaw et al.



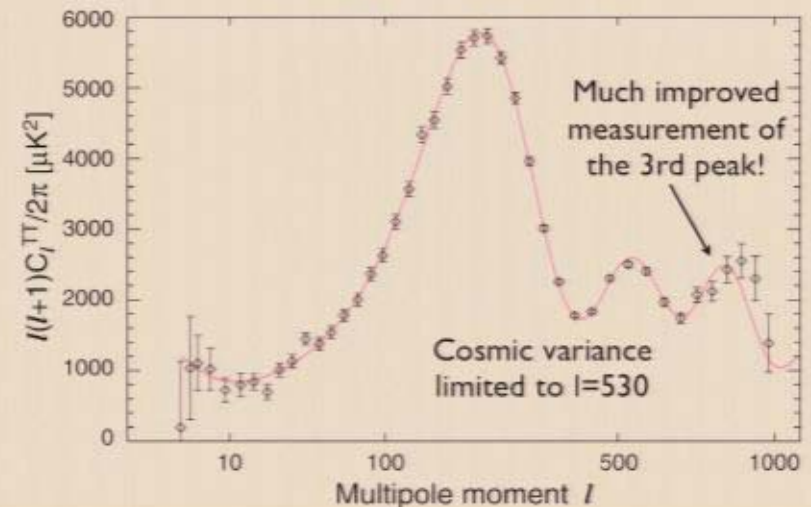
-200 0 +200 $T(\mu K)$ WMAP 5-year

Some numbers to come...

- $n_s = 0.960 (+0.014) (-0.013)$ for $r=0$
- $r < 0.20$ (95% CL); $n_s = 0.968 (+/- 0.015)$
- $-0.0181 < \Omega_k < 0.0071$ (95% CL) for $w=-1$
- $-0.0175 < \Omega_k < 0.0085$ (95% CL) for $w \neq -1$
- Entropy perturbation (axion) $< 8.6\%$ (95% CL)
- Entropy perturbation (curvaton) $< 2.0\%$ (95% CL)
- $-9 < f_{NL}(\text{local}) < 111$ (95% CL)
- $-151 < f_{NL}(\text{equilateral}) < 253$ (95% CL)

The 5-Year C_l

Nolta et al.



お話すること

- 私がなぜこのテーマに興味を持ったか
- 高エネルギー実験屋から見たCMB
- 今やっている実験準備のさわり、将来の夢

Disclaimer

- 難しい話はなし
- オーソドックスに研究の話を聞きたい人は

KEK Cosmophysics Group Inaugural Conference



Accelerators in the Universe

- Interplay between High Energy Physics and Cosmophysics -

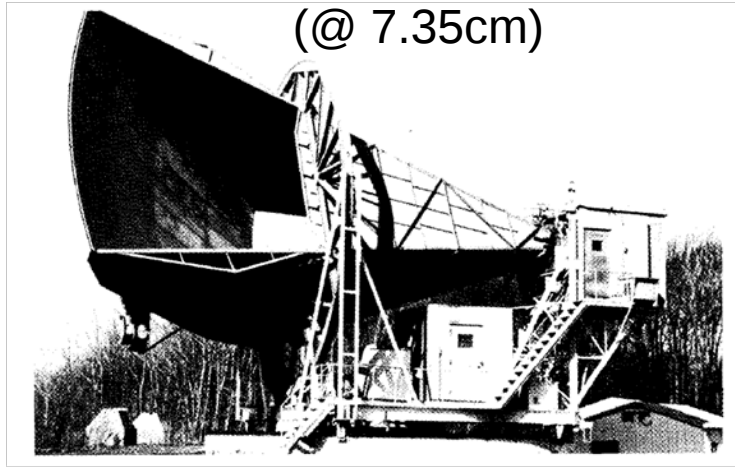
12(Wed.) – 14(Fri.) March 2008

3rd building 1F seminar hall, KEK, Tsukuba, Japan

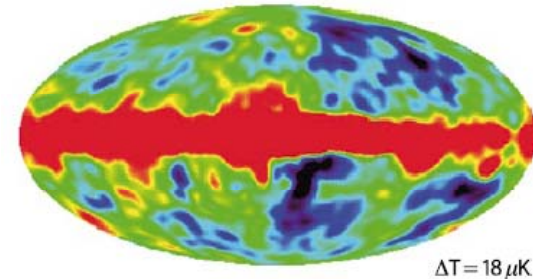
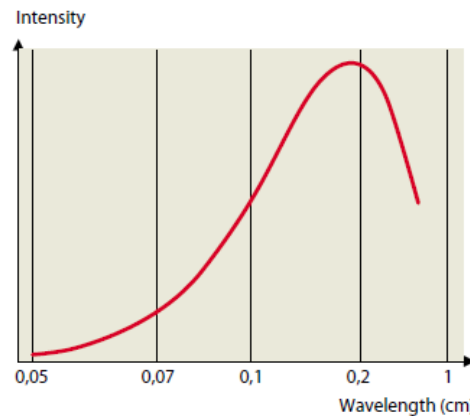
CMB観測：過去の大事件

Discovery of CMB (1965)

“excess noise” of 3.5K
(@ 7.35cm)



Discovery of the blackbody form and anisotropy of the CMB (1992)



The Nobel Prize in Physics 1978



Arno A. Penzias Robert W. Wilson

The Nobel Prize in Physics 2006

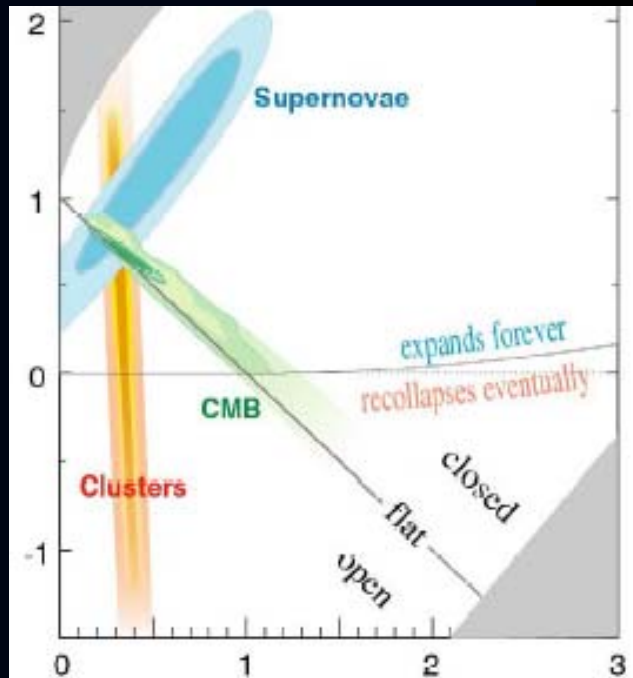
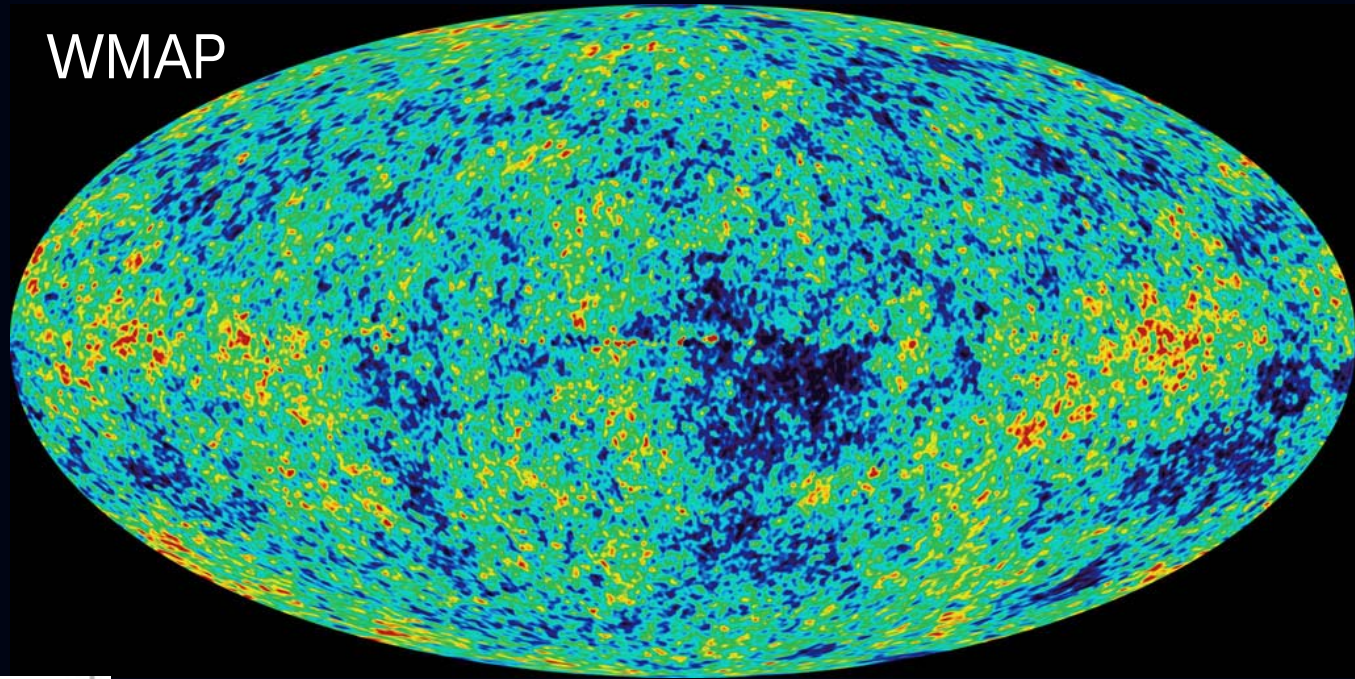


COBE satellite



John C. Mather George F. Smoot

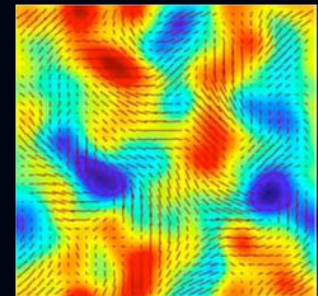
WMAP



CMB温度揺らぎの精密測定は、ビッグバンモデルの検証、非等方性の発見（インフレーションをサポート）、ダークエネルギー、ダークマターの定量的研究など、数多くの重要な成果をあげてきた。

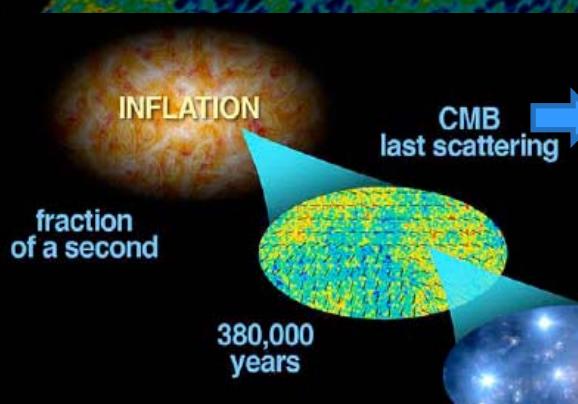
次の目標は？

偏光のマップ！

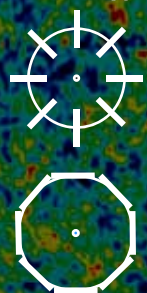


CMB偏光とインフレーション重力波

- CMBはインフレーション時に生成された重力波(時空のゆがみ)を「Bモード偏光」として記録
 - “CMB偏光はインフレーションの記録媒体”



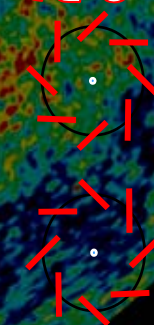
トムソン散乱
Eモード偏光



始原重力波に
よる時空の歪み



Bモード偏光
ができる！



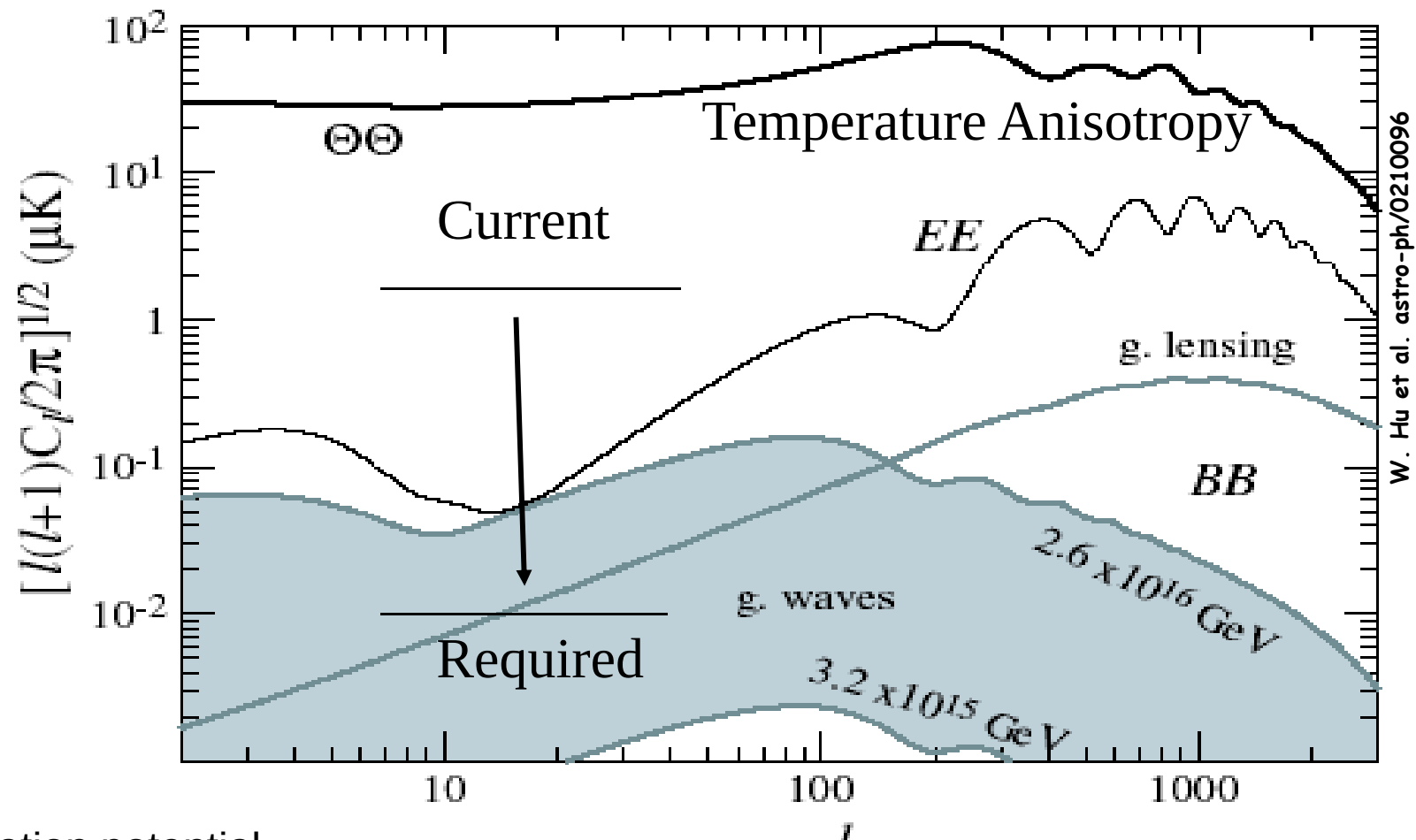
- Bモード偏光の発見の意義
 - インフレーションの定量的検証
 - 誕生後10のマイナス35乗秒後の宇宙(ビッグバンの前！)
 - 超高エネルギーの物理
 - 量子重力理論のテスト

“Task force on Cosmic Microwave Background Research”
(astro-ph/0604101, USのroadmap)からの引用

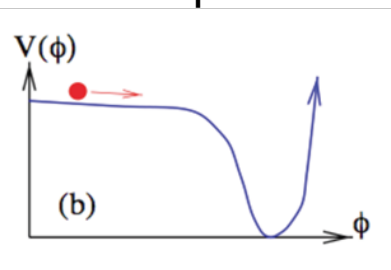
- *The accurate measurement of CMB polarization is the next critical step in extending our knowledge of both the early Universe and fundamental physics at the highest energies.*
- *Detecting primordial gravitational waves would be one of the most significant scientific discoveries of all time.*
- *We recommend technology development leading to receivers that contain a thousand or more polarization sensitive detectors, and adequate support for the facilities that produce these detectors.*



CMB Polarization Spectra



inflation potential

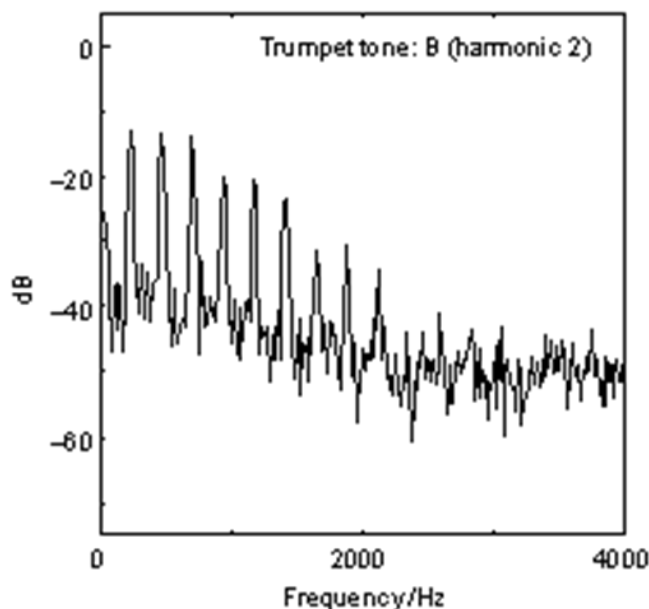


$$V^{1/4} = 3.3 \times 10^{16} \times r^{1/4} \text{ GeV}$$

$r = T/S$ (tensor to scalar ratio)

音波のアナロジー

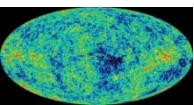
ウェブで見つけた例



、、、華やかな音が出る人は高次倍音が強く、
柔らかな音が出る人は基準振動が強く
高次倍音は5次くらいまでしか出ていない
ようです。7次倍音以上が強い人は確かに
やや音がうるさく感じられたりもします。

<http://homepage2.nifty.com/fpo/spectrum.html>

スペクトル解析(パワースペクトル)で音色(倍音)を可視化



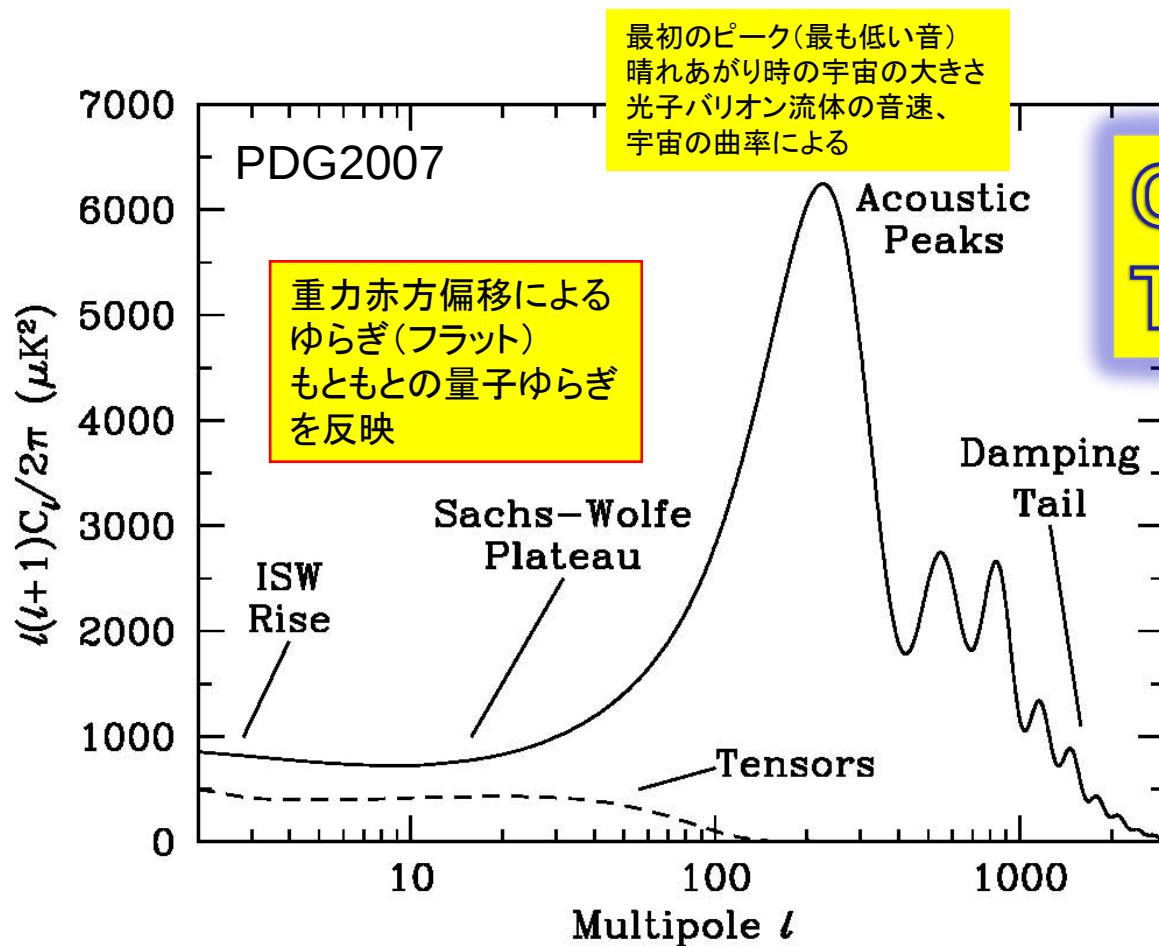
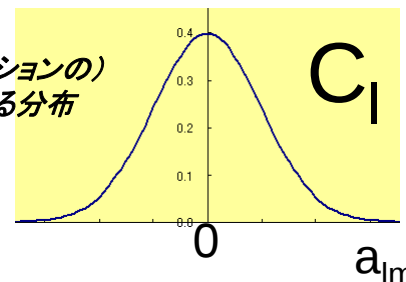
温度ゆらぎのパワースペクトル

空は2次元球面だから球面調和関数で展開

$$\Delta T(\theta, \phi) = \sum_{\ell m} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta, \phi).$$

各 ℓ に対し、 $(2\ell+1)$ 通りの $a_{\ell m}$ "realization"

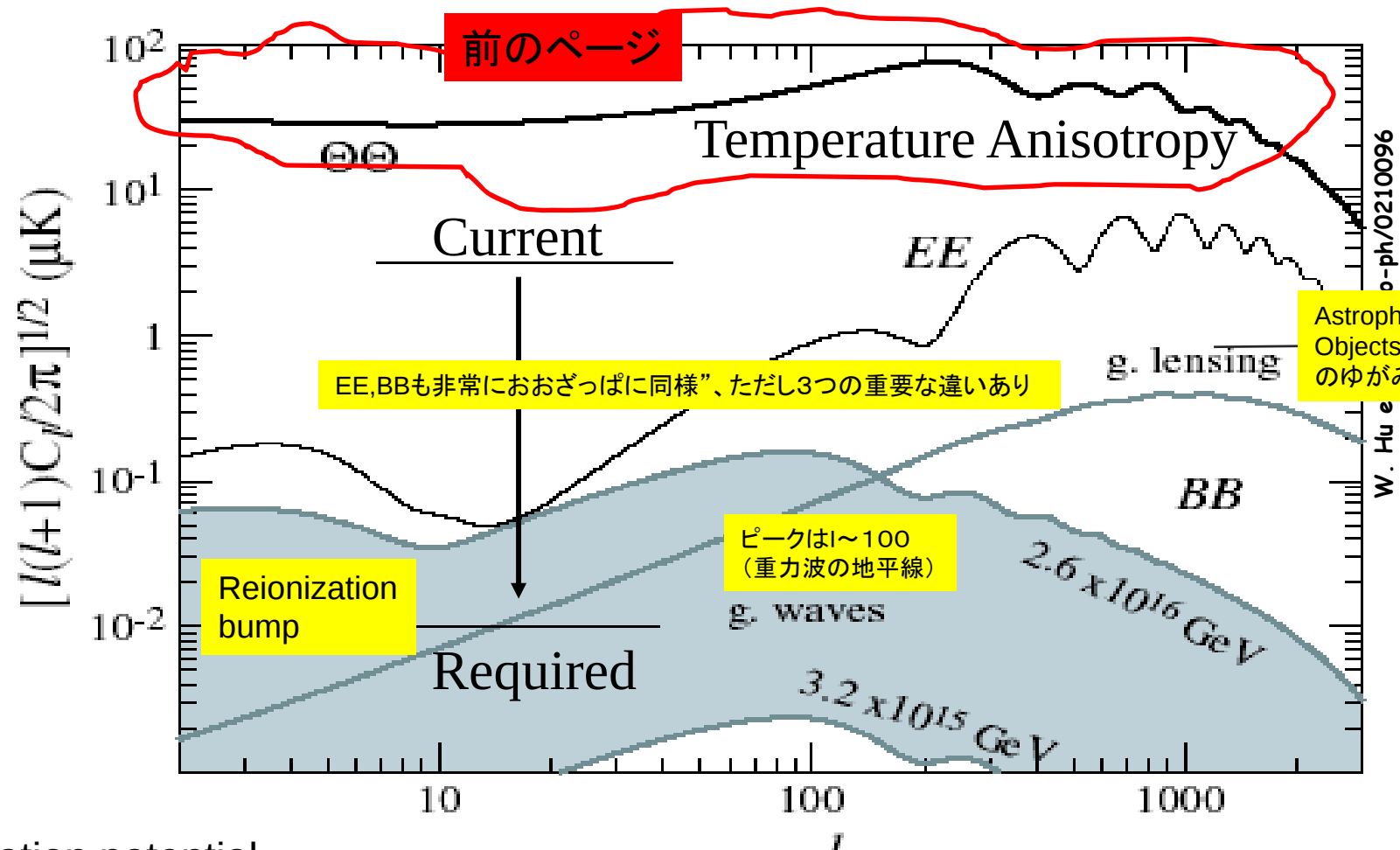
(インフレーションの)
物理で決まる分布



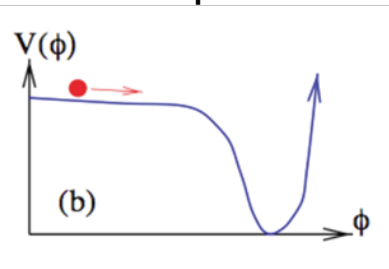
Cosmic Trumpet !



CMB Polarization Spectra



inflation potential



$$V^{1/4} = 3.3 \times 10^{16} \times r^{1/4} \text{ GeV}$$

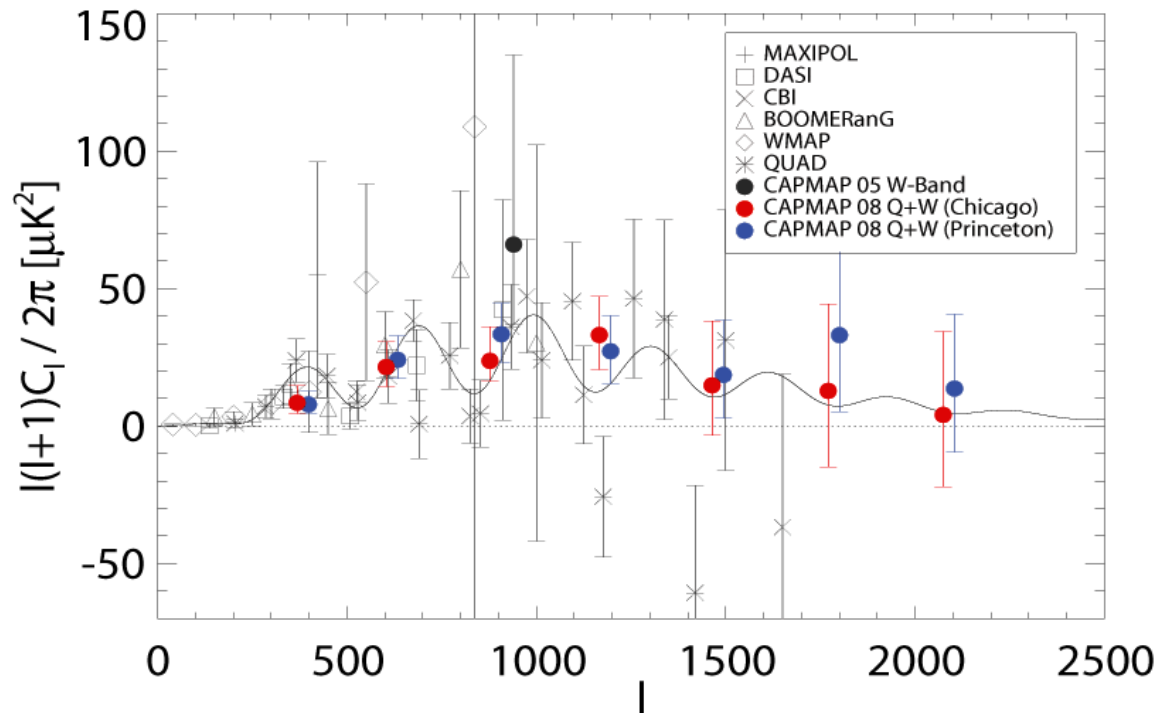
$r = T/S$ (tensor to scalar ratio)

E mode measurements: status

CAPMAP



CAPMAPが11シグマで観測(2008年2月)



後に述べるQUIET実験では
これより数十倍高い感度が期待される

大事なポイント

- 重力波(時空のゆがみ)はスピン2(テンソル)の成分を持つ
- 温度揺らぎ(スカラー)だけでは、Bモードを作れない。
- ゆえに、Bモードは重力波のきれいな記録媒体

余談:いくつかのカルチャーショック

- 宇宙膨張は、メトリック($g_{\mu\nu}$)自体の膨張だ
 - 一般相対論だから当たり前、と頭でわかっている、体がついていかない、、、
 - 晴れ上がりのあと、光子は相互作用しないといいながら、エネルギーはどんどん小さくなっていく。エネルギー保存則はどうなってる??
 - 赤方偏移はドップラー効果ではない
- エラーバー、系統誤差の扱いが、、、、
- 電子のことを、バリオンという、、、、

きっかけ: 2005年四月



Cosmic connections

- ・ WMAPの物理 (CMB)
- ・ X線天文
- ・ ブラックホール撮像
- ・ すばるアップグレードとダークエネルギー
- ・ ダークマター (→ Upsilon(3S)の提案につながった)
- ・ 重力波
- ・ EDM
- ・ 加速器実験でスファレロン効果 (バリオン生成) ?
- ・ ミューオン実験、ニュートリノ実験
- ・ 、 、 、 、 、



WMAP

ウィルキンソン・マイクロ波 非等方性探査衛星

CMBの温度分布の精密測定。

甚高周波だけでなく、低周波成分も測定できた。

→ 偏光も測定できて、重要な情報らしい。

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R - \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Cosmic connection survey (個人的見解)

私が新たにやる場合にどうか、という観点で作った表です。当然、人により答えが違って不思議ではないことに注意。

	DM (地上)	CMB 偏光	重力波	DE	μ	$\beta\beta$
地続き度	○	▲	X	▲	○	○
低リスク(技術)	▲	X	X	▲	▲	▲
低リスク(物理)	X	○	X	○	X	X
高リターン	○	○	▲	○	▲	▲
世間へのアピール	▲	○	○	○	▲	▲
KEKの拠点度	X	○	○	X	○	X

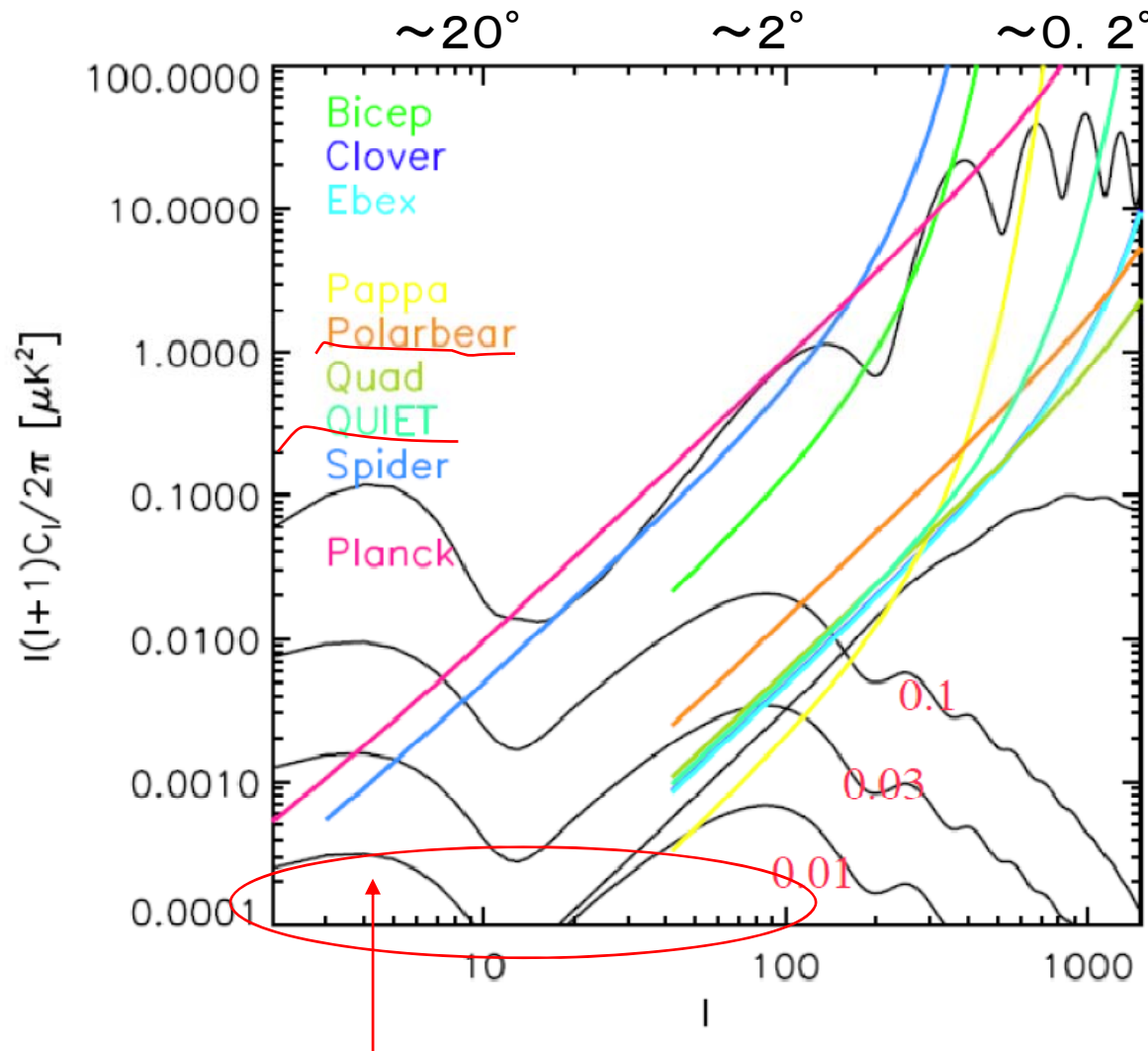
DMは本質的に原子核実験である。

DMや重力波は発見できない場合に厳しい。リミットはアピールしない。

Cosmic connectionをやるなら、直接宇宙を見る方が圧倒的にアピールする。

CMB偏光についてもっとよく調べ、挑戦する価値があると確信

Expected sensitivities of future experiments



視野角

ポイント1:
地上の実験感度が高い！

理由1: foreground(じゃまもの)の少ないマジックパッチを選んで、長時間測定できる。

理由2: 比を取る観測なので空気による系統誤差が(温度揺らぎ測定とくらべて)ずっと小さい。

ポイント2: 重力レンズの影響がないこのあたりをちゃんと測定することが長期目標
Foregroundの理解が鍵: 天文データの重要性

CMB偏光測定：研究目標

長期目標：今後10－15年程度で大角度の測定に特化した**軽量小型Bモード測定装置**を開発し**小型科学衛星**を用いて打ち上げBモード偏光の決定的な測定を日本主導で世界に先駆けて行う。

今後～5年間の目標：

1. 小型科学衛星に必要な**超伝導検出器アレイ**の開発（特に**多重化読み出し法**の確立）。
2. 将来の衛星実験の前段階として**地上で中～小角度の世界最高感度測定**を行い、原始重力波によるBモードの発見を目指すとともに衛星実験に必要な知見を得る。**QUIET+PolarBear実験**を推進。

* Bモードの世界最高感度探索（ $r=0.01$ を3シグマで測定）

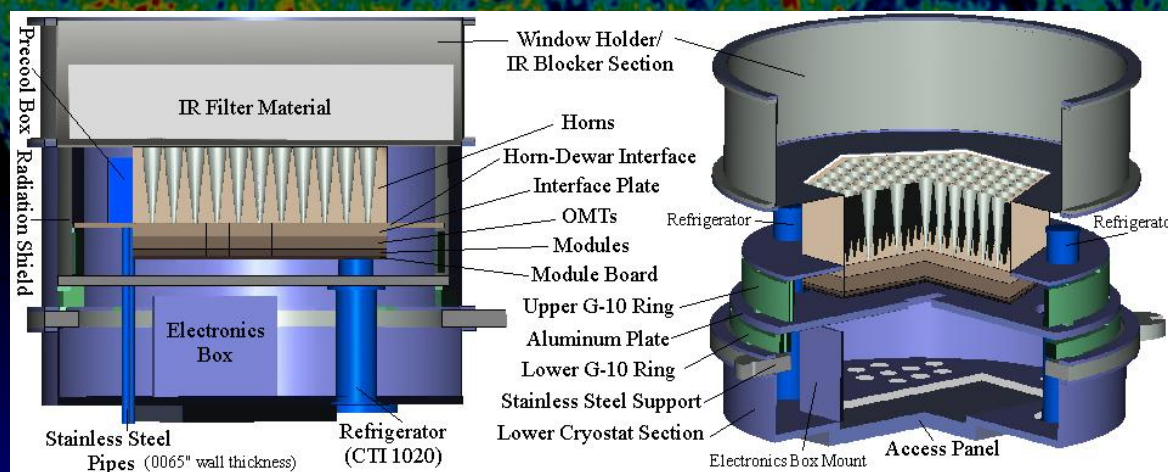
QUIET+PolarBear実験 準備状況

- 5月ごろよりQUIET PIのBruce Winsteinと協議
- 9月にBruce Winstein来所
- 10月に羽澄がCaltech, JPL, UC Berkeley、U Chicago訪問
- 11月に正式な参加希望書をQUIETグループに提出
- 12月に承認。再びU Chicago訪問。
 - 現在のKEK QUIETメンバーは羽澄、田島、樋口
- 1月に活動を開始。
 - 田島: オンライン・オフラインソフトウェア、解析
 - 樋口: DAQ、解析
 - 羽澄: ポーラリメータチップテストシステム(アップグレード用)、解析

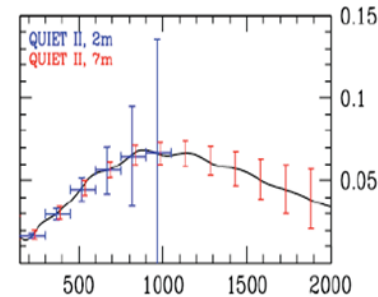
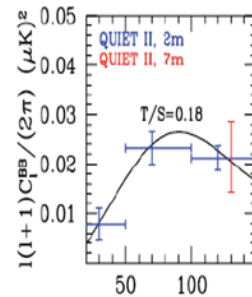
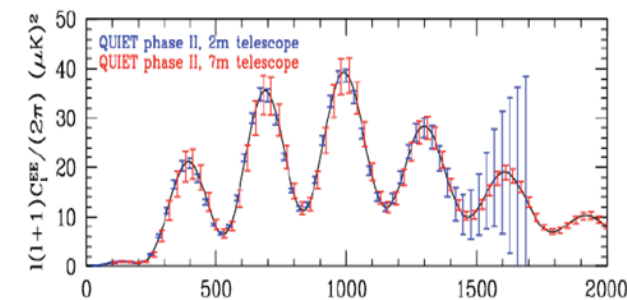


QUIET: overview

- Ground-based experiment in Atacama (Chile)
- Phase I commissioning in summer 2008 !
- Innovative “polarimeters on a chip” (JPL)

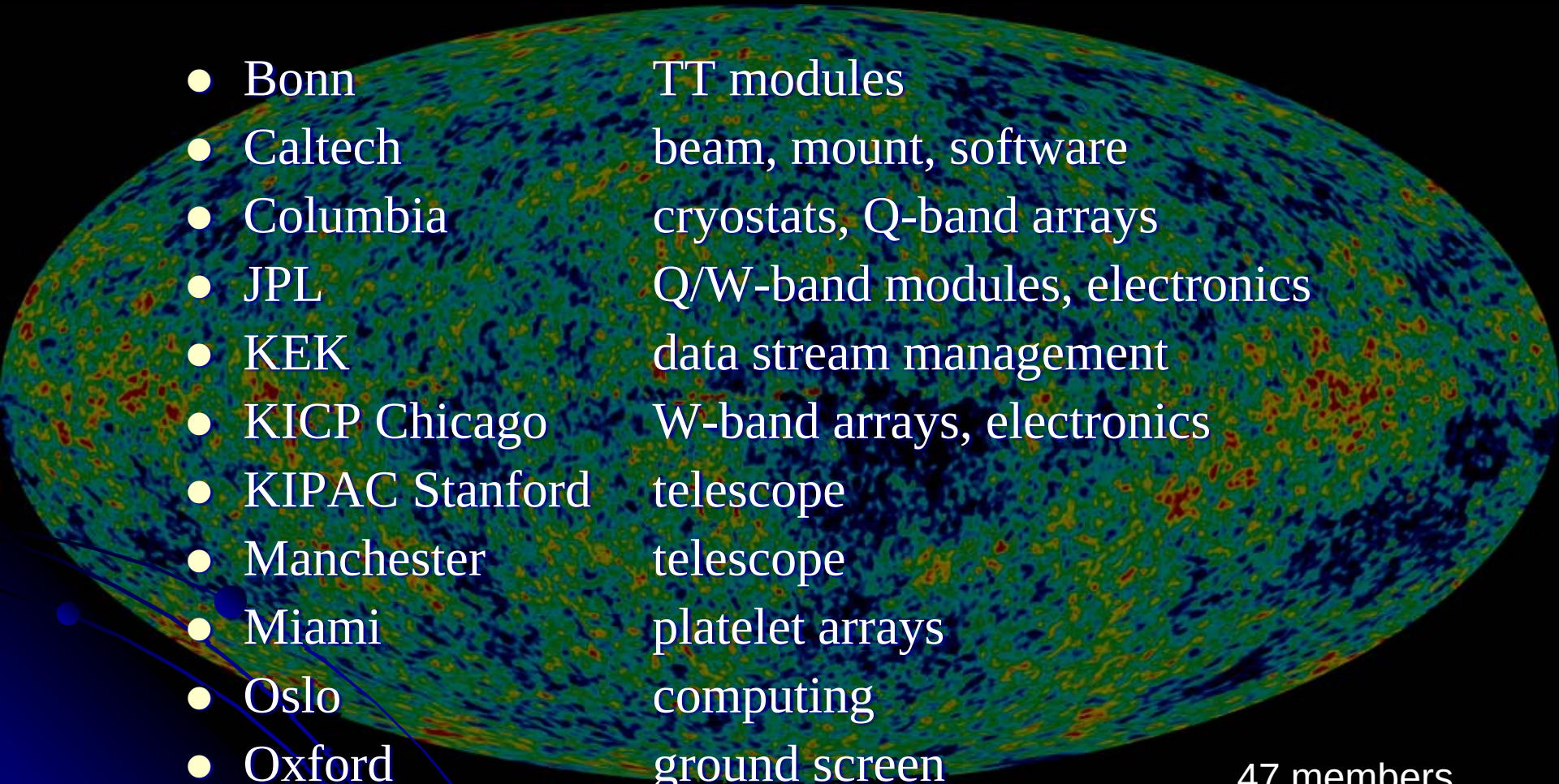


QUIET: phase II forecasts (90 GHz alone)



Expect to observe B-mode originating from plausible inflation scenarios

QUIET: Collaboration Team

- 
- Bonn TT modules
 - Caltech beam, mount, software
 - Columbia cryostats, Q-band arrays
 - JPL Q/W-band modules, electronics
 - KEK data stream management
 - KICP Chicago W-band arrays, electronics
 - KIPAC Stanford telescope
 - Manchester telescope
 - Miami platelet arrays
 - Oslo computing
 - Oxford ground screen
 - Princeton OMT, FPC

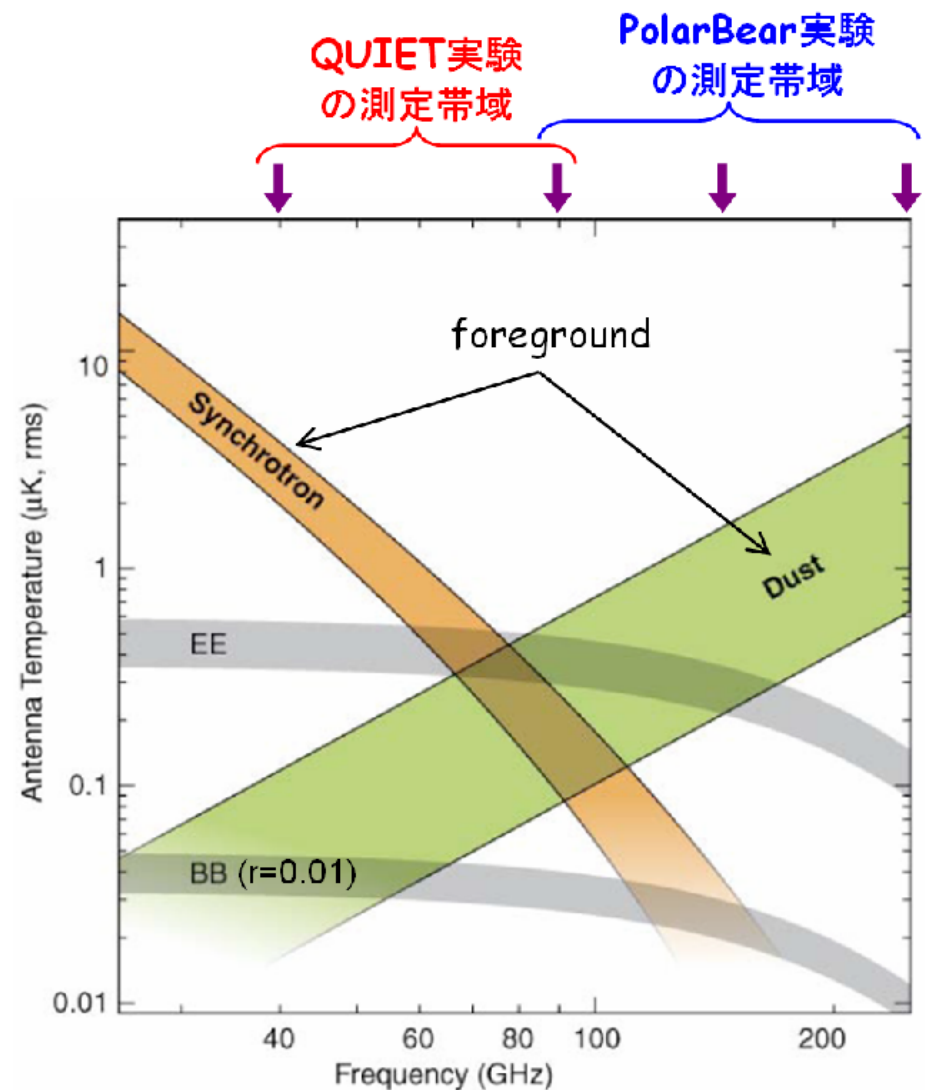
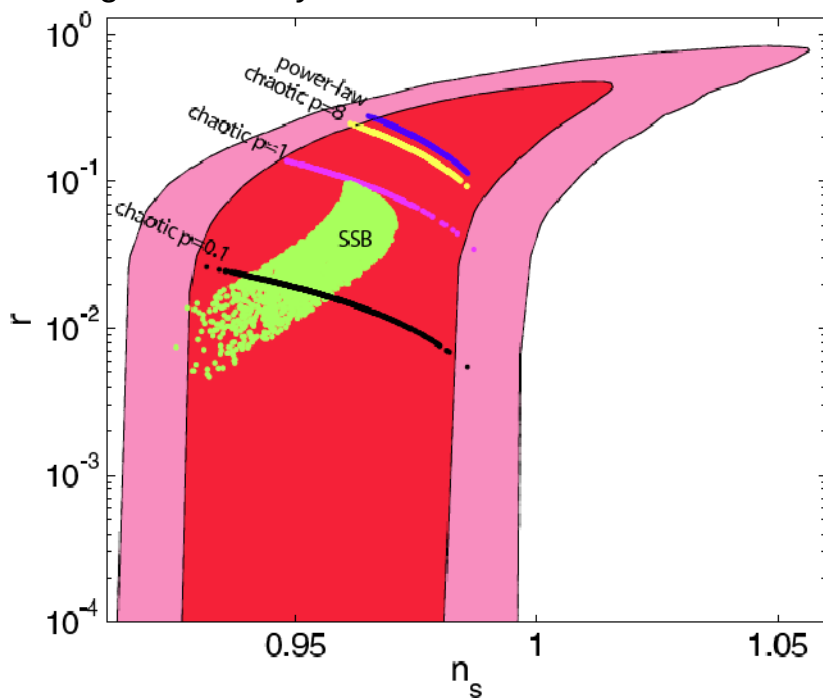
47 members
as of Feb.08

also participating: Berkeley, Goddard, Harvard

case	r	Δr	Δn
QUIET	0.01	0.015	0.029
FG 1%	0.03	0.019	0.03
CR	0.1	0.035	0.03
QUIETBeaR			
DASI10%,dust1%	0.01	0.003	0.054
FG1% CR DL			
PolarBeaR	0.01	0.012	0.018
DASI50%,dust1%	0.03	0.015	0.018
FG1% CR	0.1	0.023	0.018

Verde-Peiris-Jimenez 2005

Pagano-Cooray-Melchiorri-Kamionkowski 2007



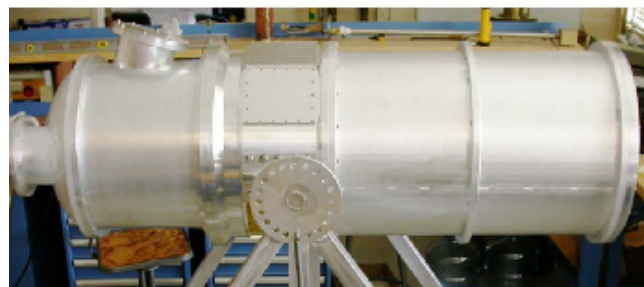
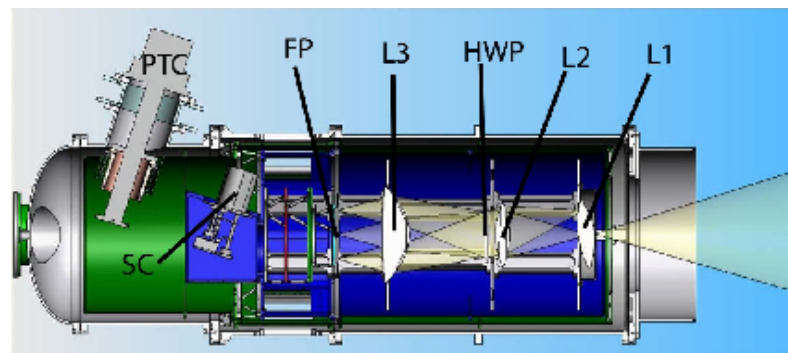
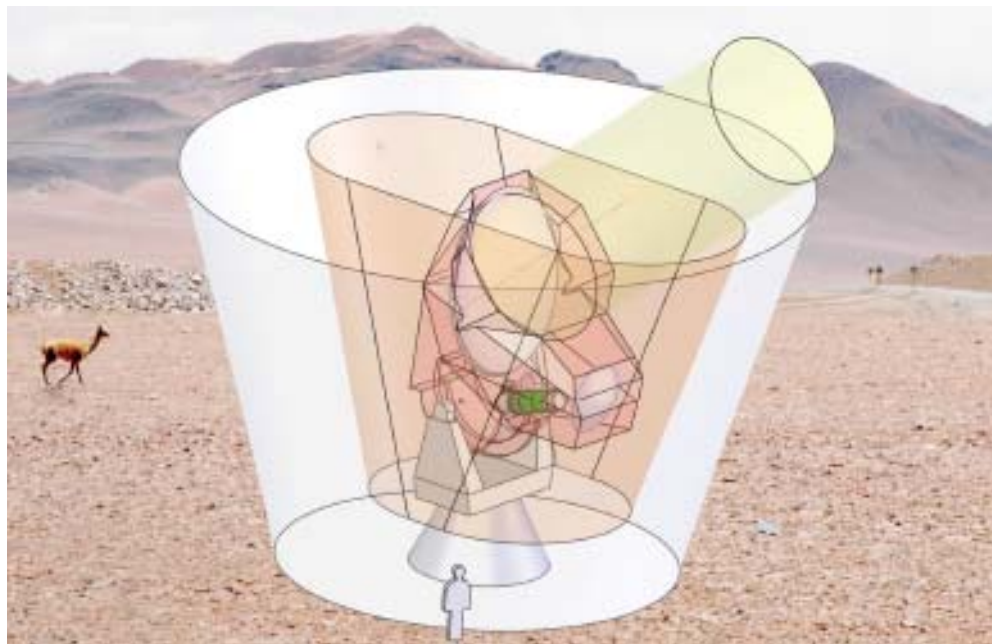
ポイント:
QUIET+PolarBear統合解析は
世界一の感度をもつと期待される

PolarBear実験

場所: チリ・アタカマ

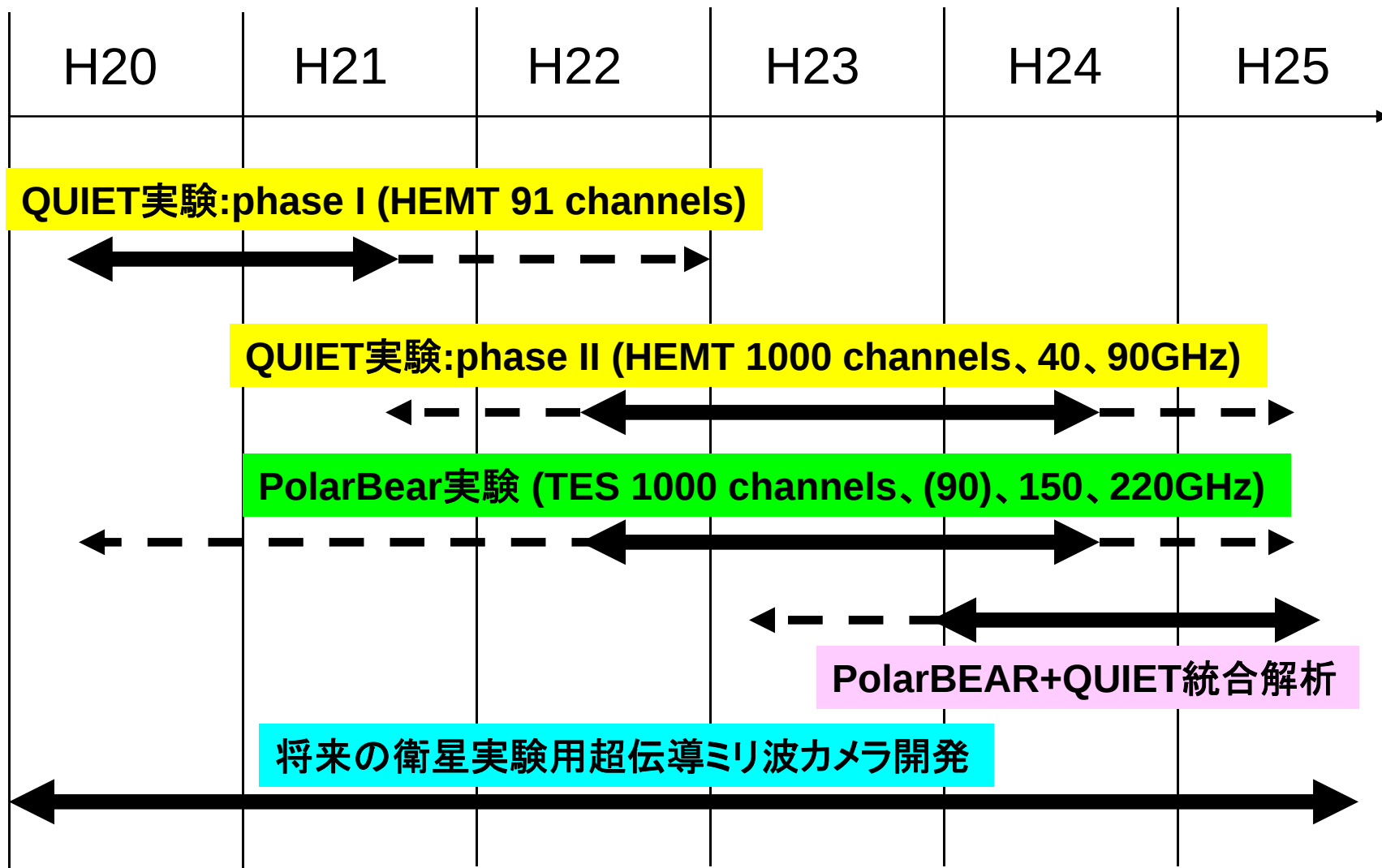
レシーバー: Antenna-coupled TES array
((90, 150, 220GHz)

予定: 試験 (Carma、カリフォルニア) 2008 ~
本実験 2010 ~



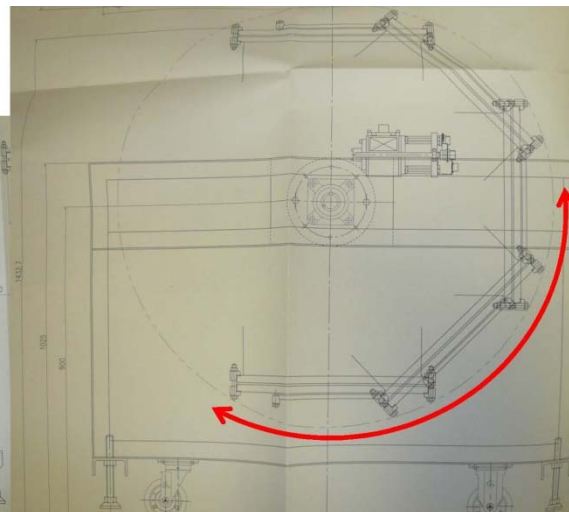
PolarBearレシーバー

計画概要

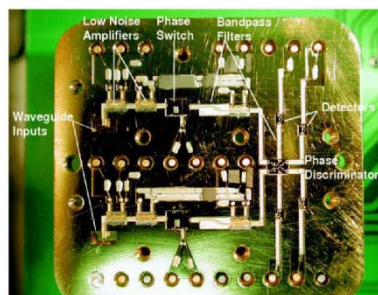


[illegible]

Technical drawing of a cryostat assembly. The drawing shows a rectangular frame with a central horizontal bar. A red curved arrow indicates the movement of the central bar. The word "cryostat" is written in blue. Dimensions are given: 113 and 532.7. A note on the right says "图例: 55400 固定式夹具".



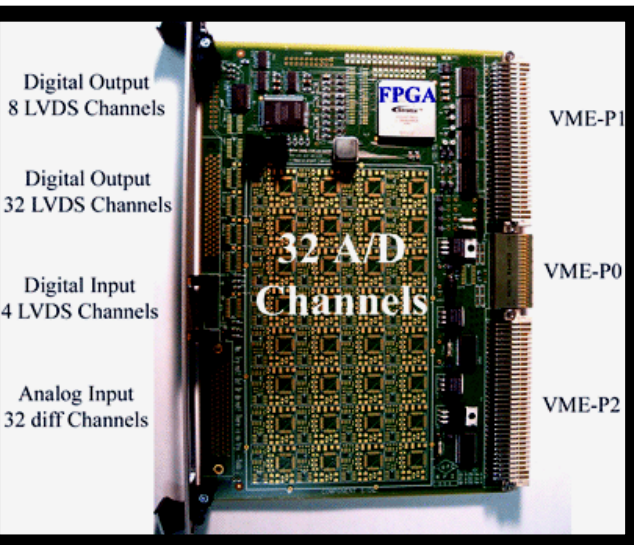
ポーラリメータチップ (～切手サイズ)



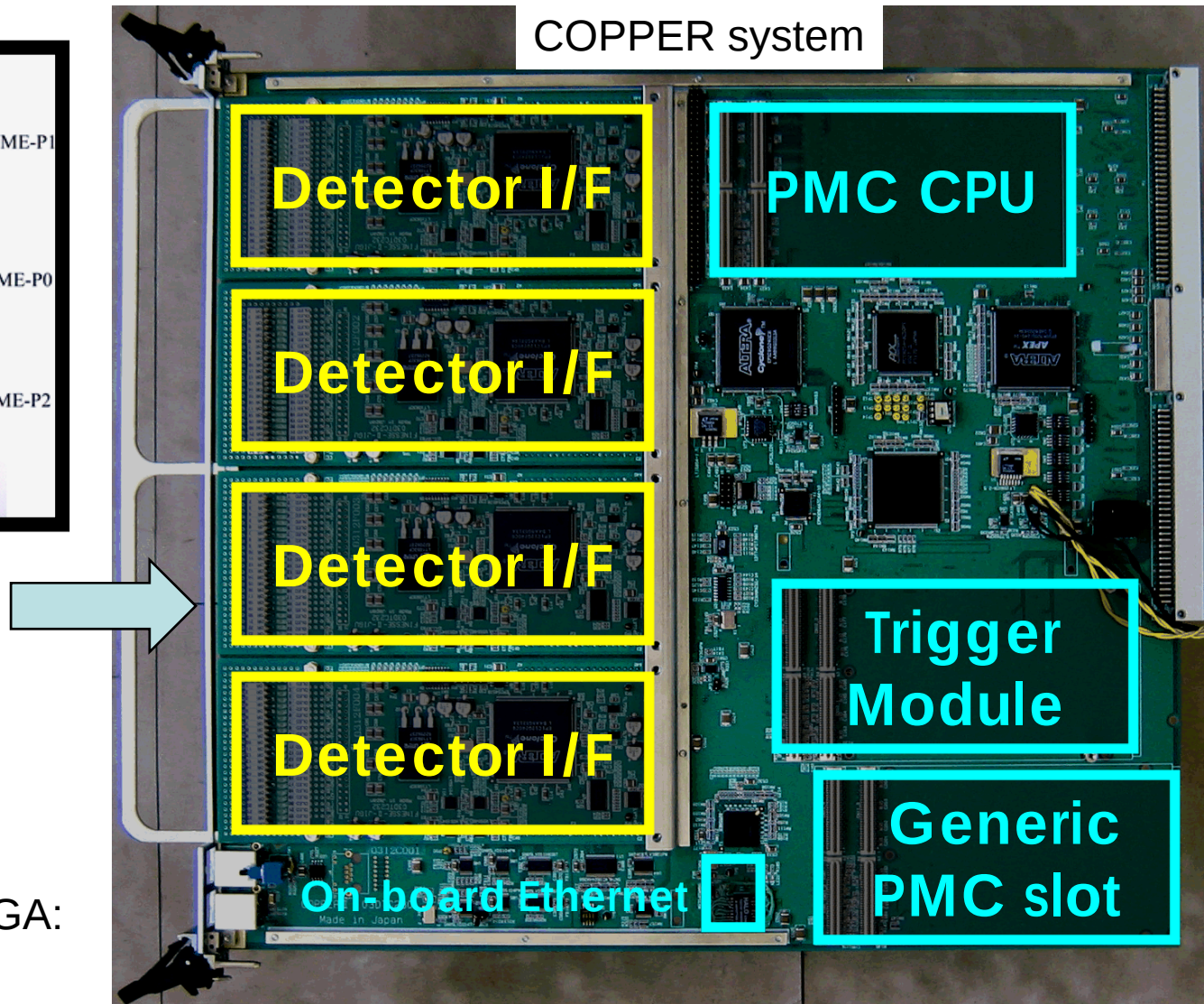
Phase II DAQ

QUIET phase II with new B factory DAQ seems possible and will be more scalable and powerful

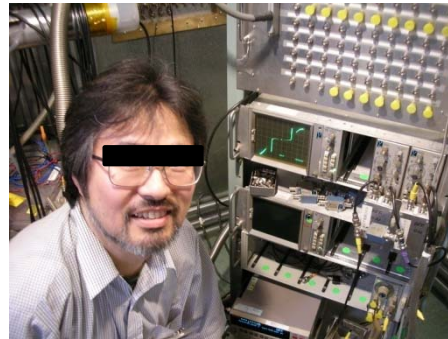
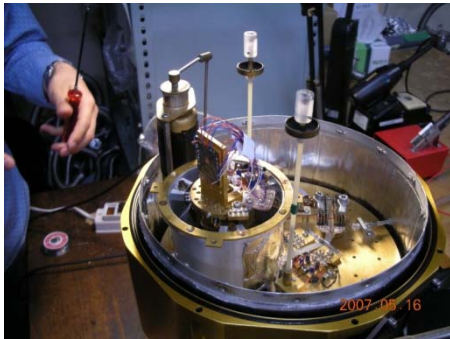
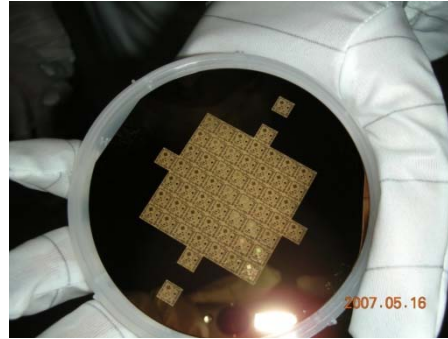
QUIET phase I



- Data collection:
 - sky signals.
 - Housekeeping information.
 - GPS time stamp.
 - Telescope encoder information.
- Signal digitization:
 - ADC at 800 kHz.
 - 18-bit resolution.
- Data processing with FPGA:
 - Down sampling.
 - Zero suppression?



超伝導ミリ波カメラ開発：準備状況



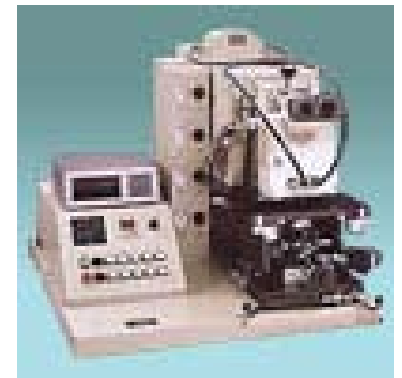
平成19年度よりKEK測定器開発室の活動としてSTJセンサーの開発が進行中――>実験装置を共用できる。

0.3K無冷媒冷凍機を手配済み(3月納入予定)。

理研の薄膜生成装置をKEKに移設(平成20年度)。

TES作成用アライナー手配済み(3月納入予定)。

夢は日本主導のCMB(小型)科学衛星



CMB偏光観測用超伝導カメラ 開発メンバー

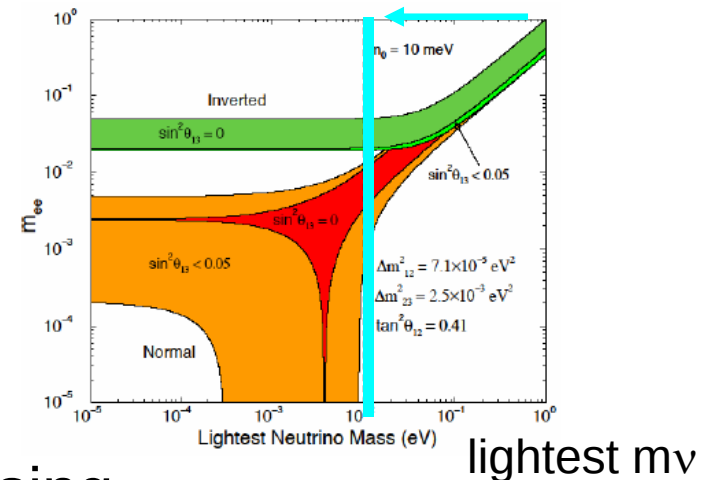
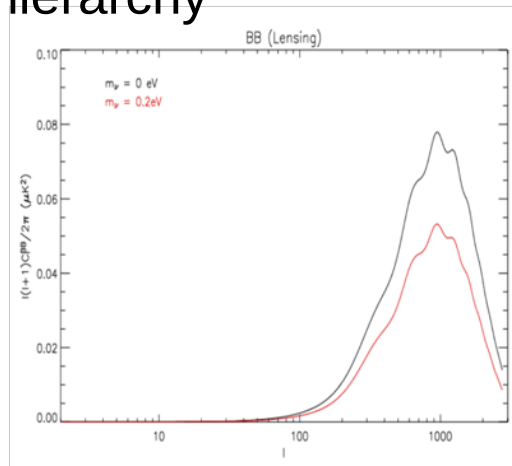
KEK 加速器研究施設	:	吉田光宏
KEK 素粒子原子核研究所	:	後田裕、住澤一高、田島治、羽澄昌史*、 樋口岳雄、石本茂
KEK 物質構造科学研究所	:	清水裕彦、森嶋隆裕
東京工業大学	:	石野宏和
東北大学	:	大田泉、服部誠
理化学研究所	:	有吉誠一郎、佐藤広海

(* – Contact person: masashi.hazumi@kek.jp)

CMB偏光と物理基礎法則

- Primordial gravitational wave (PGW) and inflation potential
- Neutrino mass from gravitational lensing
 - combination with double-beta decay exp. will shed light on neutrino mass hierarchy

C^{BB} at high l
sensitive to
sum of m_ν



- Dark energy from gravitational lensing
 - combination with other measurements (e.g. Subaru)
- Test of parity conservation in PGW (non-zero C^{TB} , C^{EB})
 - $C^{TB} = C^{EB} = 0$ in Standard Model
 - non-zero allowed in string theories

これらは全て物理学の根本にかかわる重要な測定

量子重力との関係についてコメント

- きわめておおざっぱにいうと
 - 小さいもの → 量子論
 - 重いもの → 重力(一般相対論)
 - ふつう、小さくて重いものはないから、なかよく棲み分け
- 逆に、小さくて重いものがあれば、量子重力の実験場
 - 誕生時の宇宙
 - ブラックホール

まとめ

- Bモード偏光によるインフレーション重力波探索は宇宙と素粒子にまたがる大テーマ
 - 成功すれば
 - インフレーションのエネルギースケールの決定！
 - インフレーションモデルの絞り込み
- 今後6年のうちに、地上実験で $r < 0.01$
 - 他の宇宙論パラメータから、 $r > 0.01$ が示唆されているので大発見の期待が高まっている
- KEKの新しいグループは世界最高感度実験を推進
- Lensing B modeは「発見が保証されている」物理
- 将来の衛星実験を日本主導でやるのが夢
 - 興味のある方はぜひご連絡ください。
 - <http://quiet.kek.jp/>