

# 宇宙背景放射偏光観測による インフレーション宇宙の検証

KEK宇宙マイクロ波背景放射観測グループ

羽澄昌史

[masashi.hazumi@kek.jp](mailto:masashi.hazumi@kek.jp)

# KEK CMB実験グループの紹介

- 2007年12月正式に発足
- スタッフ5名(羽澄、田島、都丸、長谷川、樋口) + 院生



## ● 活動

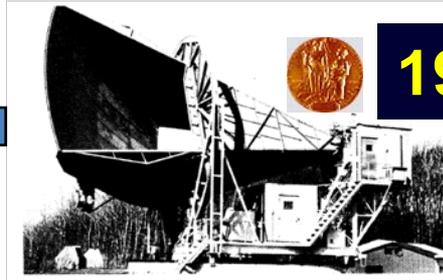
- QUIET実験(現在のメインプロジェクト)
- PolarBeaR実験
- 超伝導検出器開発(KEK測定器開発室、理研等と共同)
- 小型科学衛星LiteBIRD検討(JAXA、NAOJ等と共同)

# 浜名さんからの依頼メール

、、、CMBを軸に  
宇宙論／高エネルギー物理  
の将来を熱く議論する  
セッションにしたい

# インフレーションのCMBによる検証

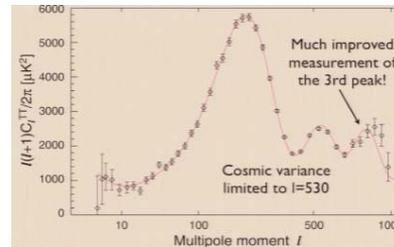
✓ 宇宙の一様性



1978年ノーベル物理学賞

初期CMB観測

✓ 宇宙の平坦性



BOOMERanG,  
WMAP

✓ 宇宙構造の起源



COBE, WMAP,  
銀河宇宙地図

● 原始重力波 **未発見**

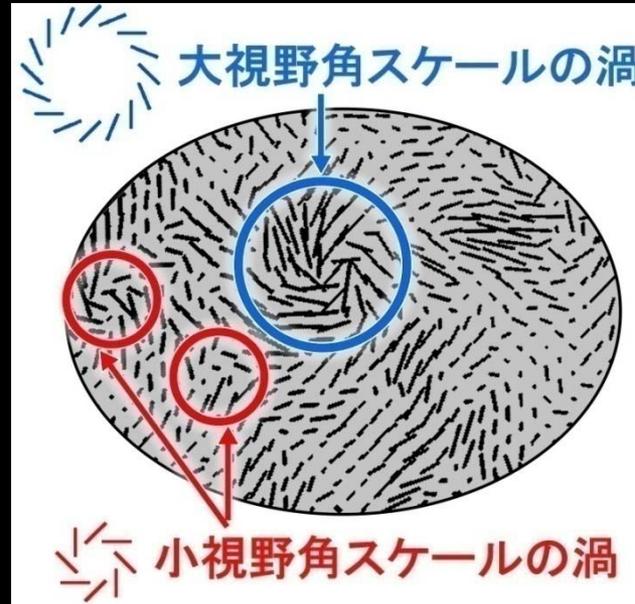
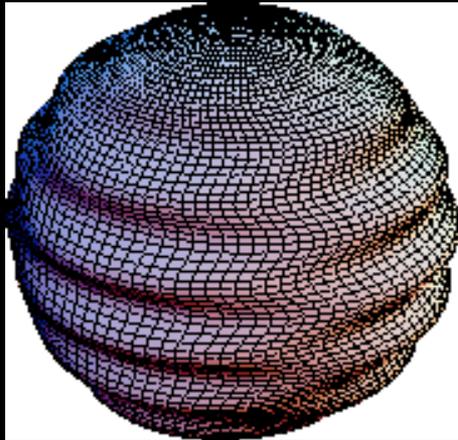
2006年ノーベル物理学賞

原始重力波は、単に4つの予言の1つではなく、  
これだけでインフレーションを直接証明できる。

# 原始重力波の発見法：CMB温度から偏光度へ

## CMB偏光度マップ

### 原始重力波



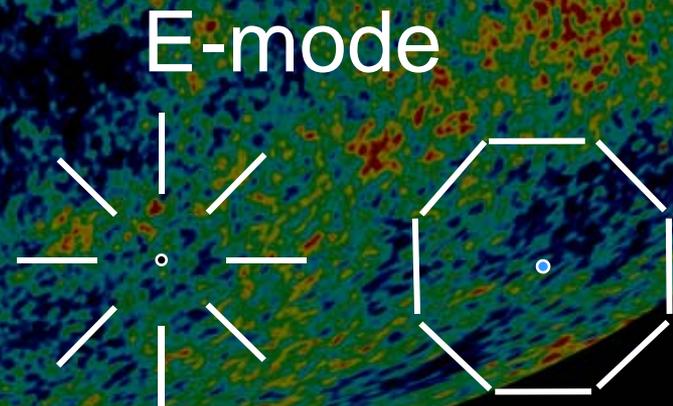
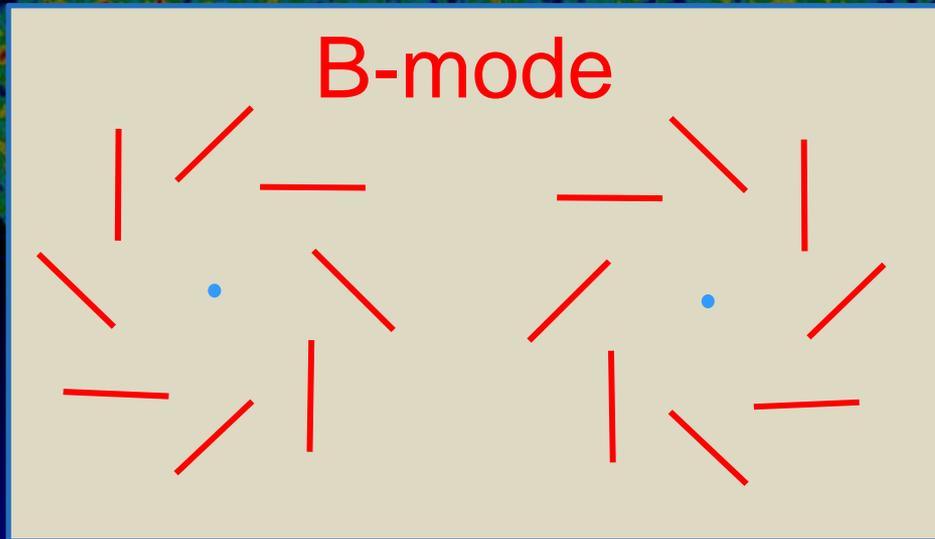
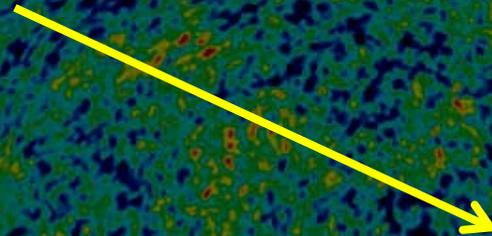
**CMB偏光Bモード**  
磁場 (B) のように  
カールした成分

- CMB偏光Bモードは原始重力波が“刻印”されたもの
- CMB偏光Bモード検出が原始重力波のベストな発見法
- 今まさに人類が挑むべきテーマ

# CMB B-mode polarization

Tensor perturbation

Scalar perturbation



B-mode: Smoking gun signal of  
Primordial gravitational wave

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

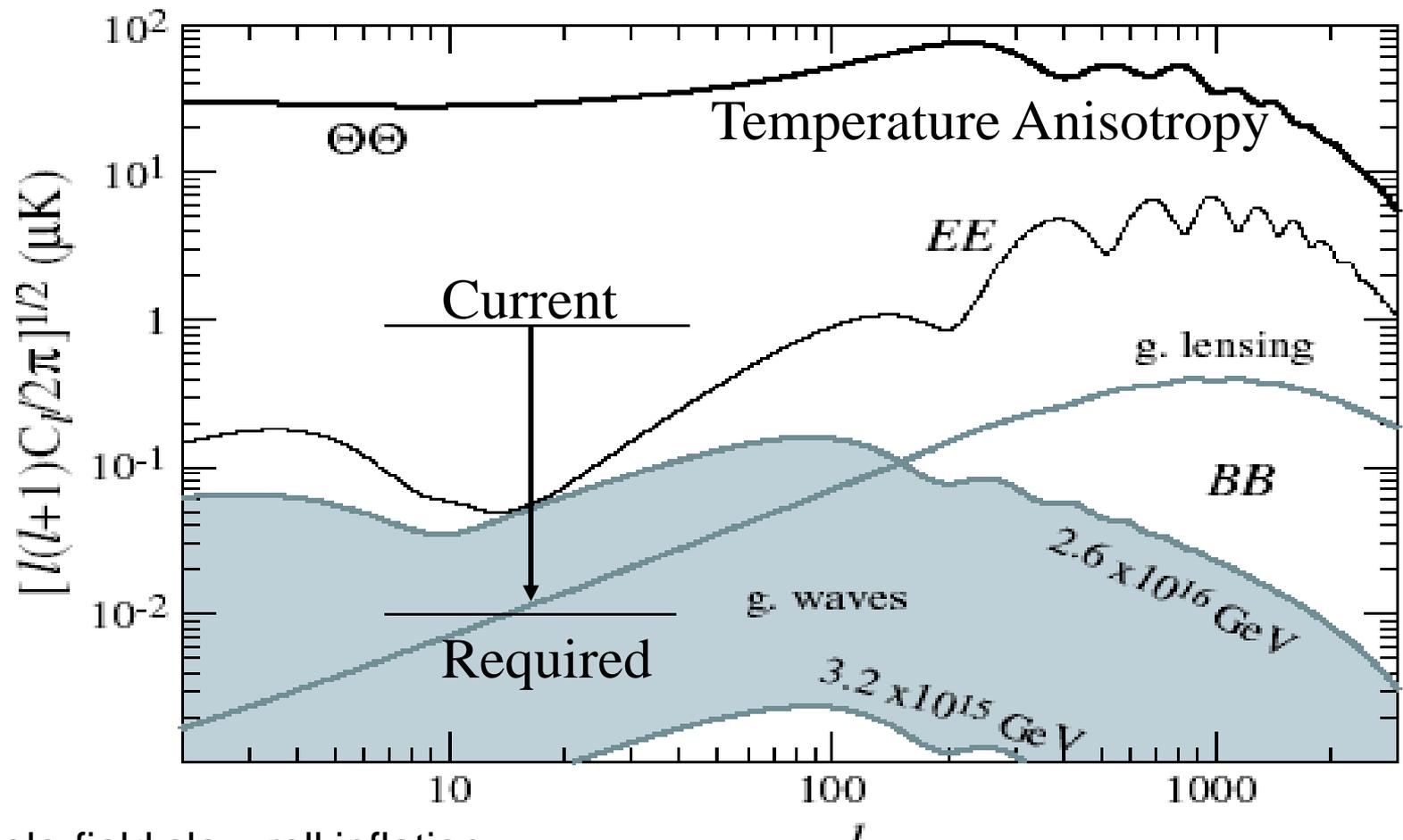
- The accurate measurement of CMB polarization is the next critical step in extending our knowledge of both the early Universe and fundamental physics at the highest energies.
- Detecting primordial gravitational waves would be one of the most significant scientific discoveries of all time.
- We recommend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

「初期宇宙」と「最高エネルギーの根本的物理法則」を探究する王道

原始重力波の発見は科学史上最大の発見

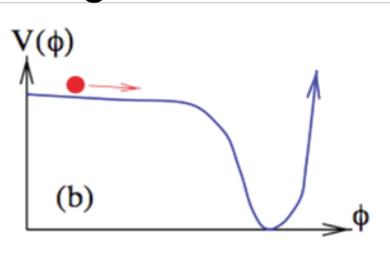
1000画素以上の偏光ミリ波カメラを作れ

# CMB Polarization Spectra



W. Hu et al. astro-ph/0210096

Single-field slow-roll inflation



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

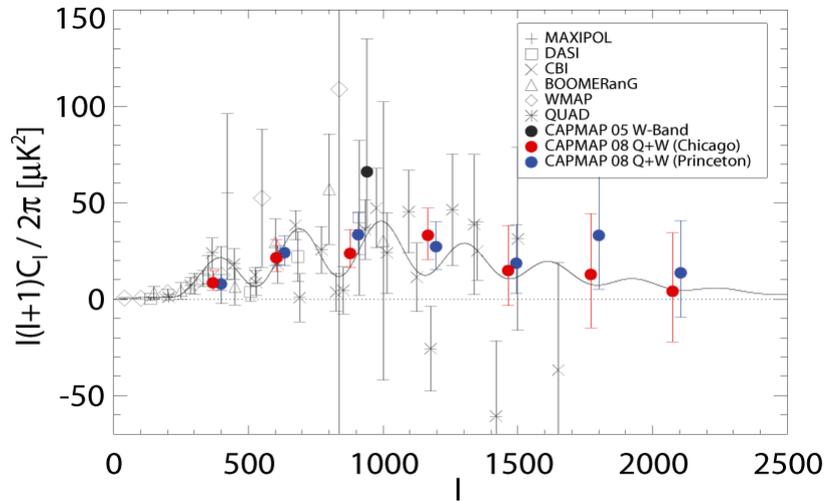
$r = T/S$  (tensor to scalar ratio、重力波の相対的な大きさ)

# E mode measurements: status

CAPMAP



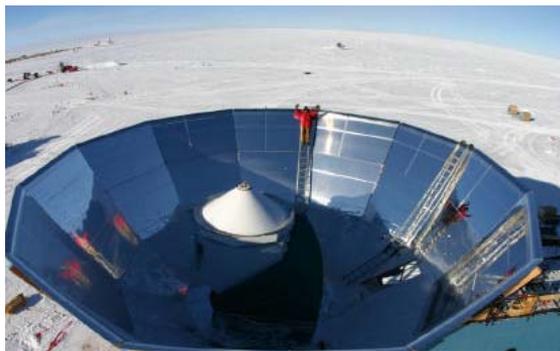
20K HEMTアンプ



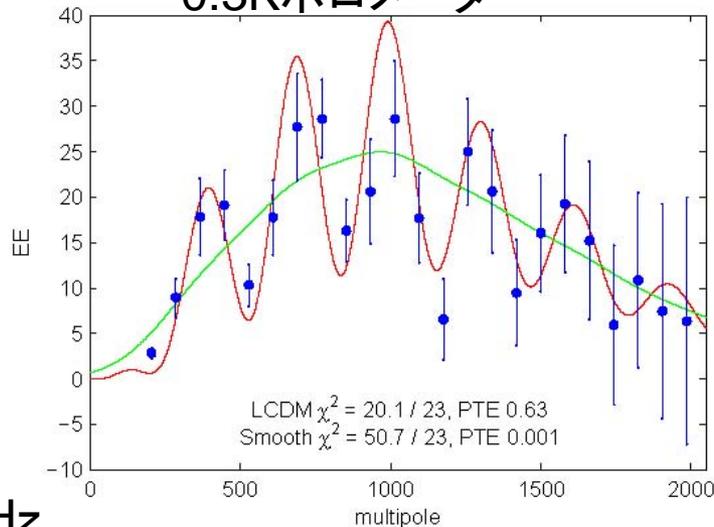
CAPMAPが  
11シグマで観測  
(2008年2月)

Cf. QUIET実験では  
これより数十倍高い  
感度が期待される

QUaD



0.3Kボロメータ

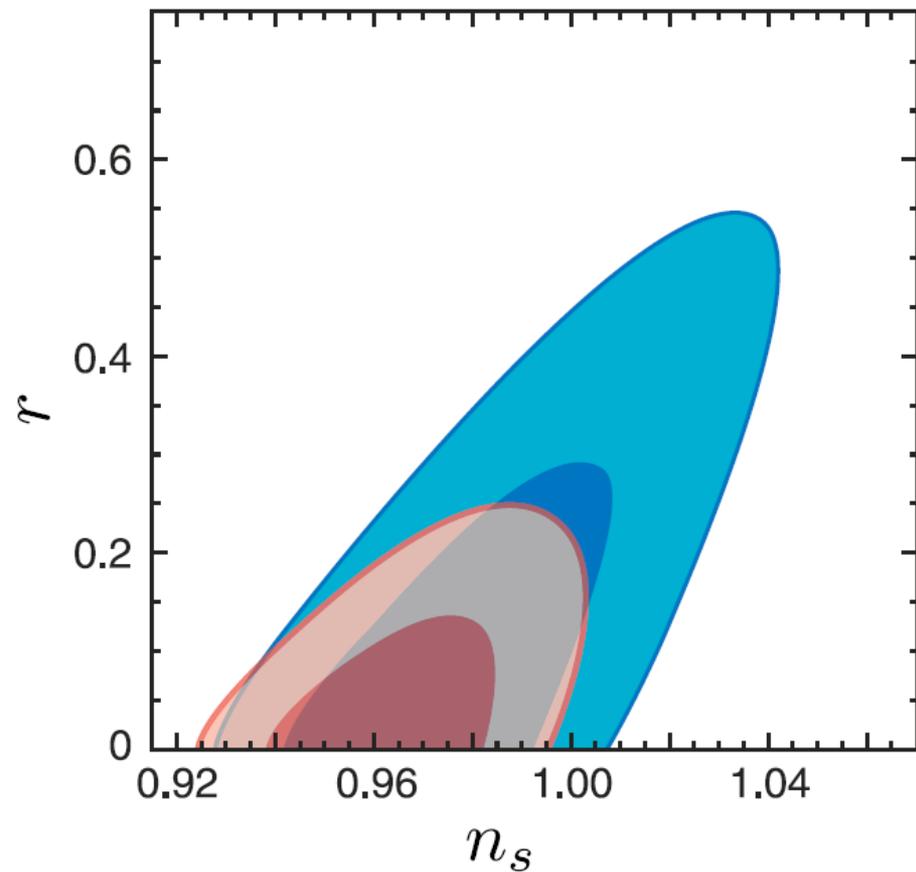
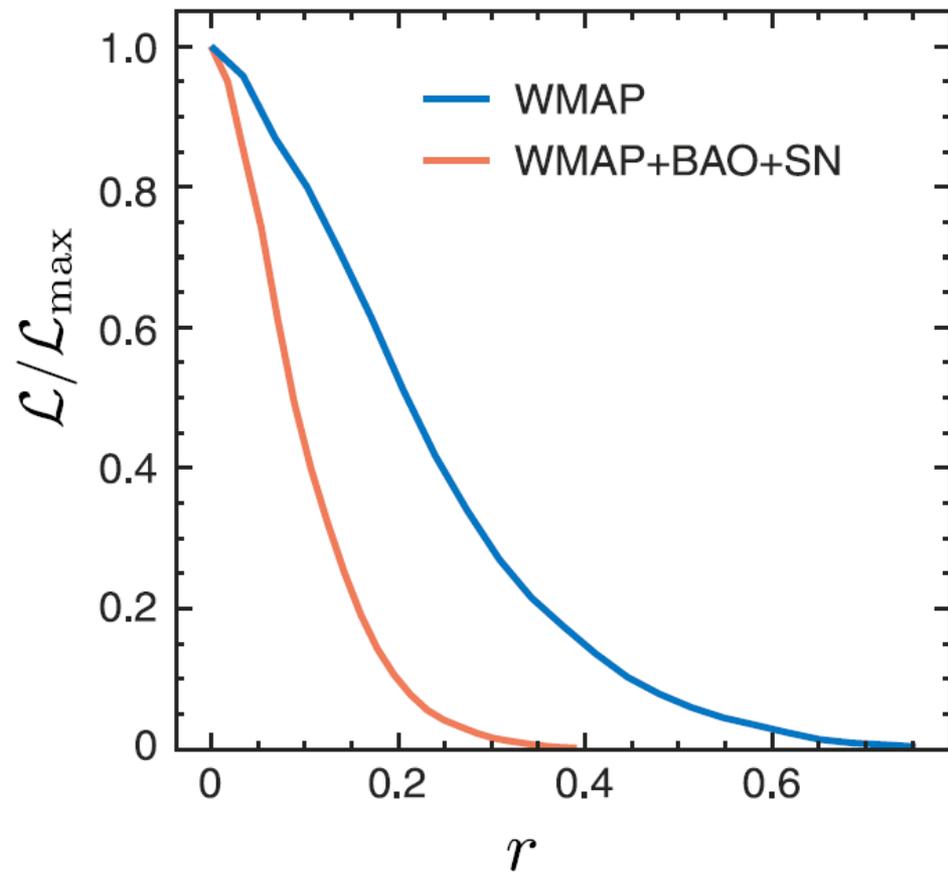


QUaDのより鮮明な  
観測結果(2008年5月)

100GHz、150GHz



# WMAP 5years



# Funded CMB Polarization Experiments

((near) completed: Bicep1, Boomerang, CBI, DASI, Maxipol, QUaD, WMAP, VSA)  
(Proposed: ACT-POL, SPUD)

Name	Type/ location	Institutions	Ell range	Frequencies	#Detectors	Resolution
Planck	Bolo- HEMT/Space	ESA, IAS-Orsay, Bologna + many	2-2000	25-1000	22H+52B	8'
Spider	Bolo/Balloon	CIT/JPL,CITA, CWRU,Stanford	2-250	40,90,150, 220	~2000	40'
BICEP2	Bolo/South Pole	CIT/JPL,CITA,Stanford	10-250	150	512	40'
Clover	Bolo/Chile	Cardiff, Oxford, Cambridge, Manchester	20-1000	90,150,225	200-400	10'
QUIET	HEMT/Chile	Chicago, CIT, JPL, <a href="#">KEK</a> , Manchester, Miami, MPI, Oxford, Princeton, Stanford	20-1000	40,90	119x2 1000x2(P2)	10'
EBEX	Bolo/Balloon	Minn, <b>Berkeley</b> , Brown, Cardiff, Columbia, McGill +8	20-1200	150,250,420	1406	8'
PolarBearR	Bolo/Chile	<b>Berkeley</b> ,APC, Cardiff,Colorado, Imperial, <a href="#">KEK</a> , McGill,UCSD	20-3000	90,150,220	1274	3.5'
SPTPOL	Bolo/South Pole	Chicago, <b>Berkeley</b> , Colorado, CWRU, Davis, JPL, McGill,SAO	20-10000	90,150,220	1000-2000	1.1'

compiled by Adrian Lee

# Scientific Shopping List

- Bモード (low  $l$ ) による原始重力波の探索
- 重力レンズによるBモード (high  $l$ ) の発見
  - ダークエネルギー
  - ニュートリノ質量
- Beyond the Standard Model
  - 重力パリティの破れ (non-zero  $C_{EB}$  etc.)
- 宇宙再電離 (low  $l$ )
- 前景放射のサイエンス
  
- 最終目標: インフレーションパラメータの決定とモデルの選別

(実験屋の本音: 予期せぬ発見で理論家をギャフンと言わせたい)



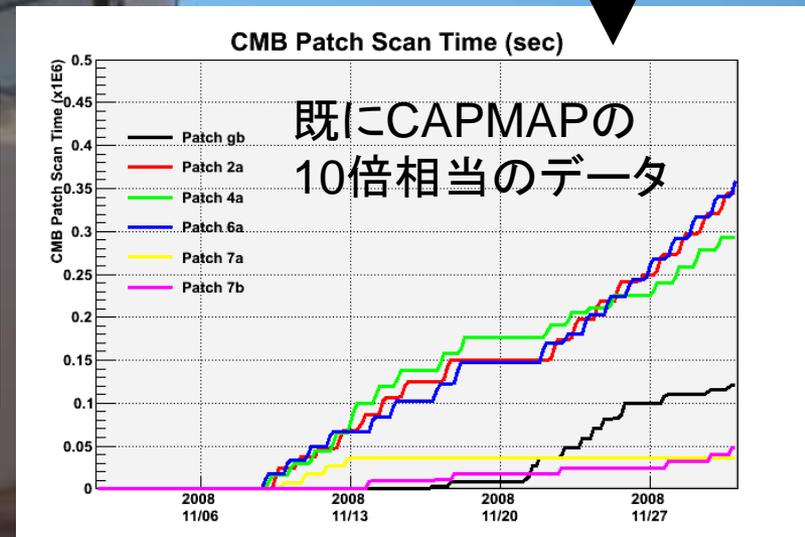
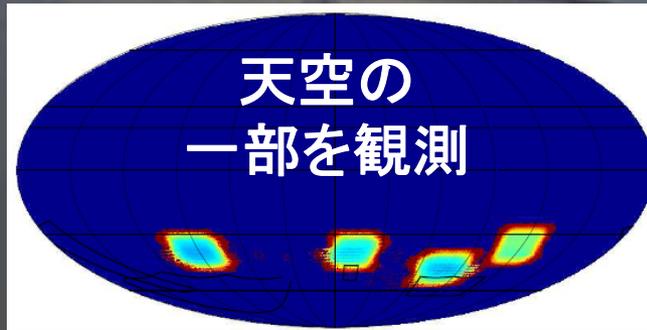
- **Bonn**
- **Caltech**
- **Columbia**
- **JPL**
- **KEK**
- **Chicago**
- **Stanford**
- **Manchester**
- **Miami**
- **Oslo**
- **Oxford**
- **Princeton**





- **Bonn**
- **Caltech**
- **Columbia**
- **JPL**
- **KEK**
- **Chicago**
- **Stanford**
- **Manchester**
- **Miami**
- **Oslo**
- **Oxford**
- **Princeton**

- チリ・アタカマ (標高5080m)
- HEMT内蔵ポーラリメータオンチップ (JPL)
- フェーズ I (2008年9月~2009年12月)
  - 40 GHz “Q-band”: 19モジュール
  - 90 GHz “W-band”: 91モジュール
- フェーズ II (2010年~ )
  - 合計~1000モジュール



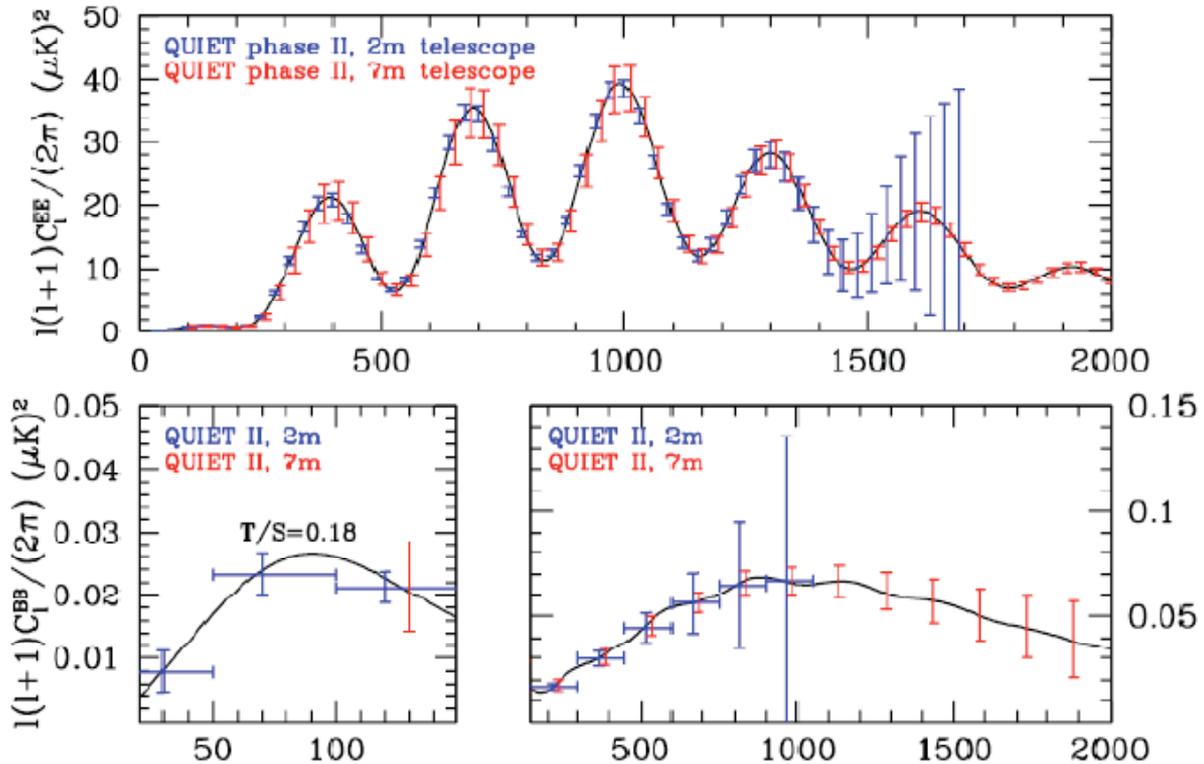


# QUIETの実験感度予想

QUIET: phase II forecasts (90 GHz alone)



シカゴ大解析の中心はBelleの解析で学位をとった日下さん



B-mode Physics

Phase	Lensing Power	Lensing Significance	$\nu$ Mass	Min. Detectable T/S
I	4.5 $\sigma$	7.2 $\sigma$	0.5 eV	(0.10)0.16
II	$\sim 25 \sigma$	$\sim 30 \sigma$	0.12 eV	(0.006)0.009

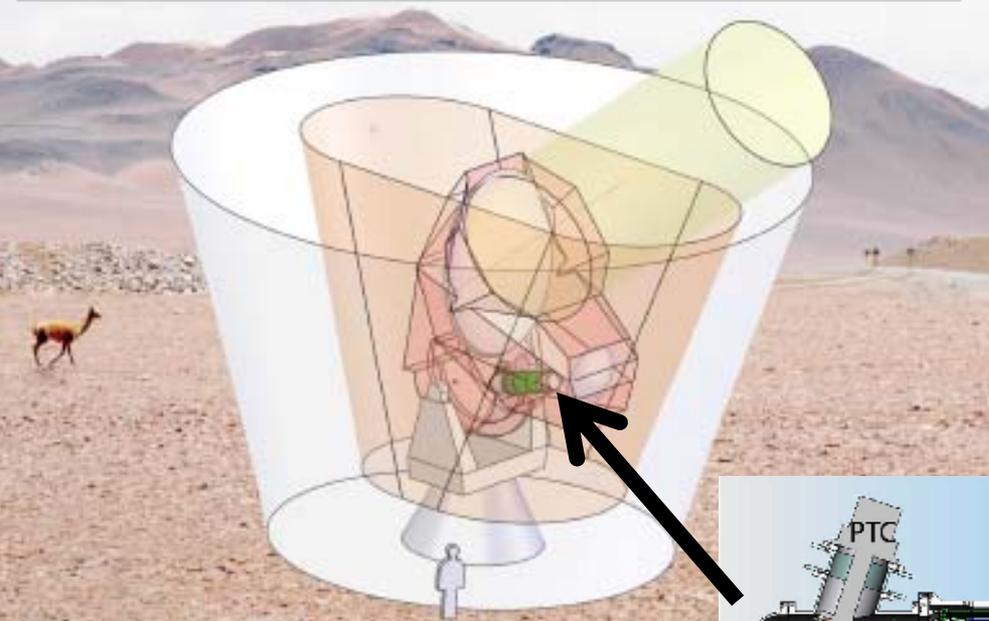
# POLARBeaR実験

UC Berkeley, LBL, UCSD, Colorado,  
KEK, McGill, IC London, LAC, Cardiff

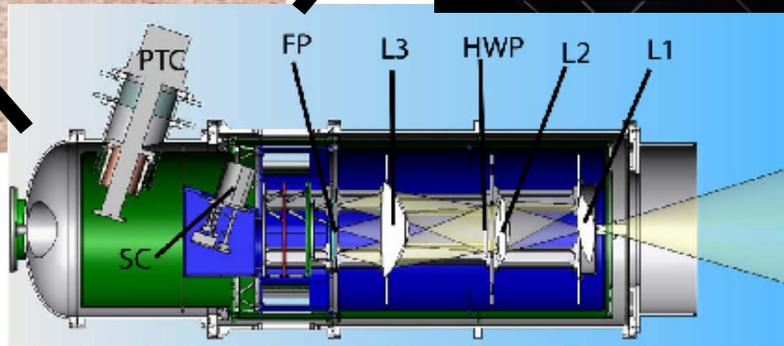
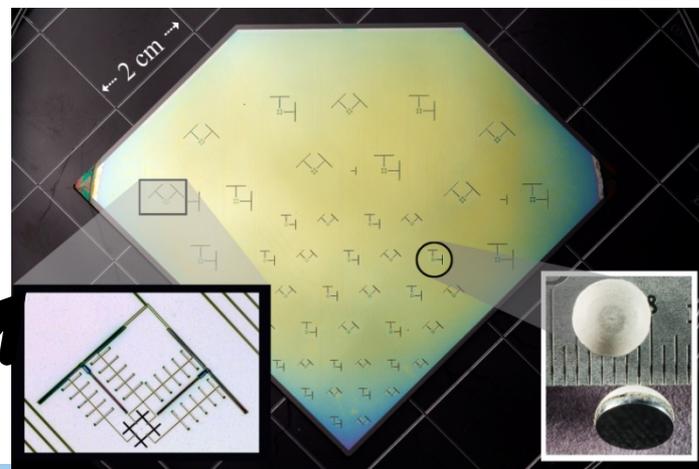
場所: チリ・アタカマ

レーザー: Antenna-coupled TES array  
(90, 150, 220GHz)

予定: 試験 (Carma、カリフォルニア) 2009 ~  
本実験 2010 ~



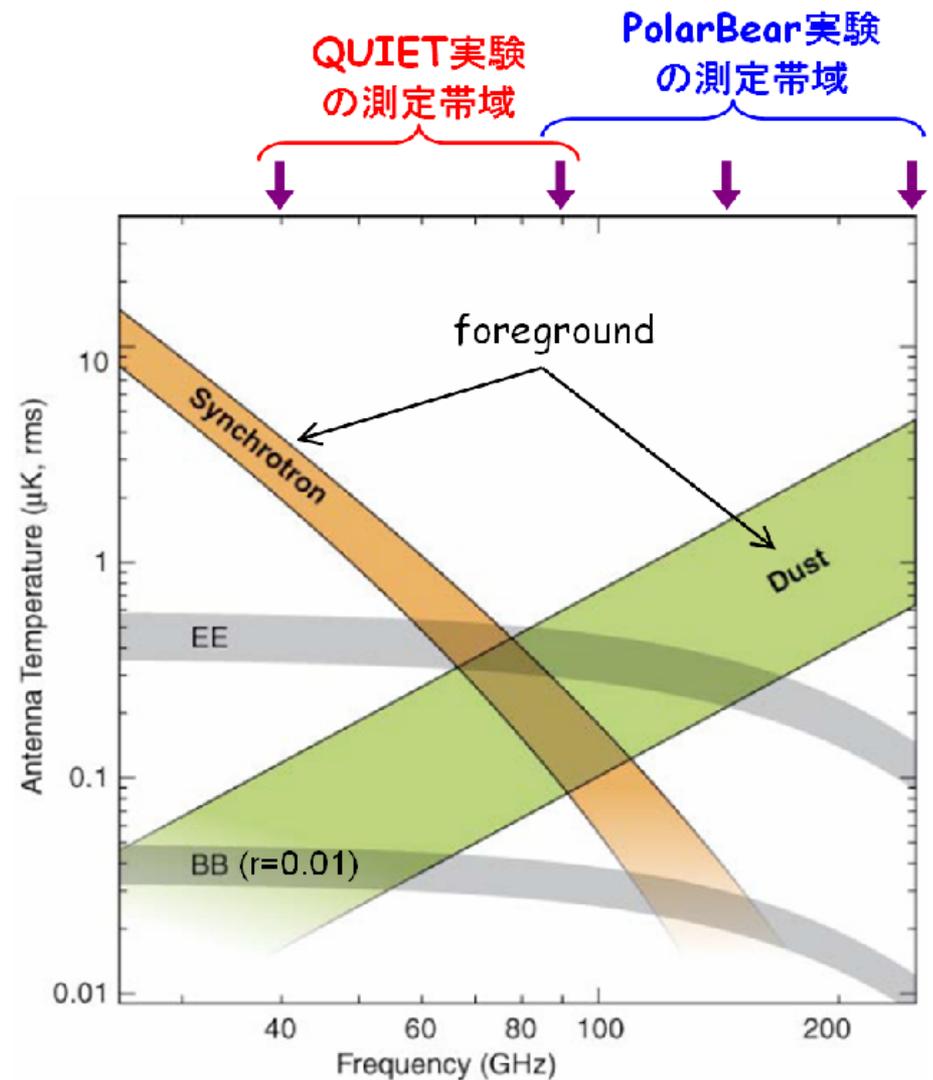
POLARBeaRレーザー



# QUIETと POLARBeaRとの 共同観測

case	$r$	$\Delta r$	$\Delta n$
QUIET	0.01	0.015	0.029
FG 1%	0.03	0.019	0.03
CR	0.1	0.035	0.03
<hr/>			
QUIETBeaR			
DASI10%,dust1%	0.01	0.003	0.054
FG1% CR DL			
<hr/>			
PolarBeaR	0.01	0.012	0.018
DASI50%,dust1%	0.03	0.015	0.018
FG1% CR	0.1	0.023	0.018

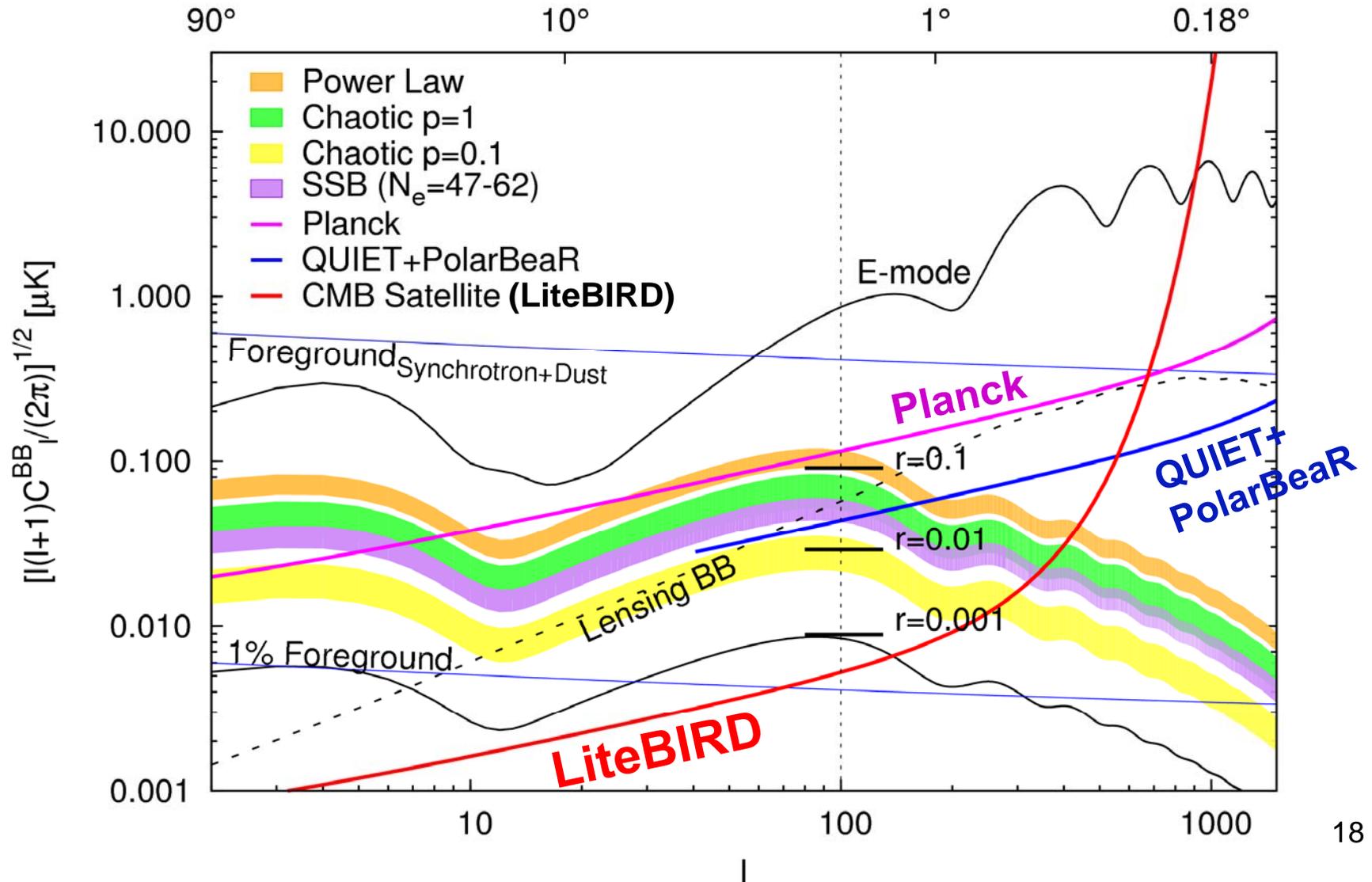
Verde-Peiris-Jimenez 2005



ポイント:

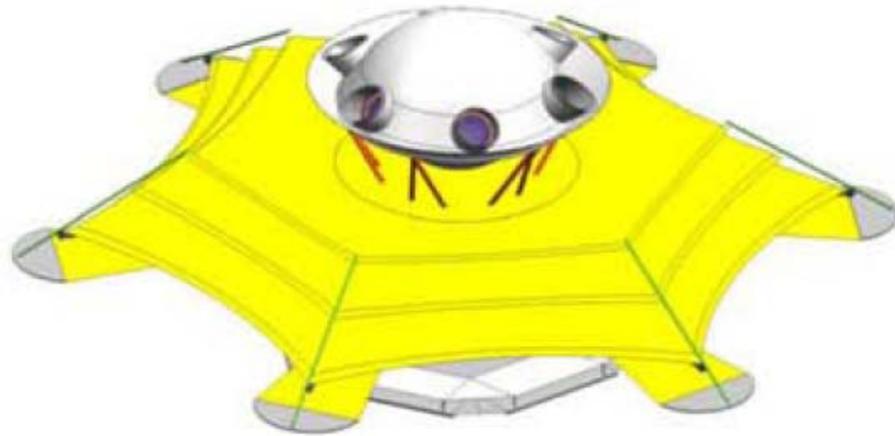
QUIET+PolarBear統合解析は  
世界一の感度をもつと期待される

# 決定的測定にはCMB偏光観測衛星が必要！ (no approved mission yet)

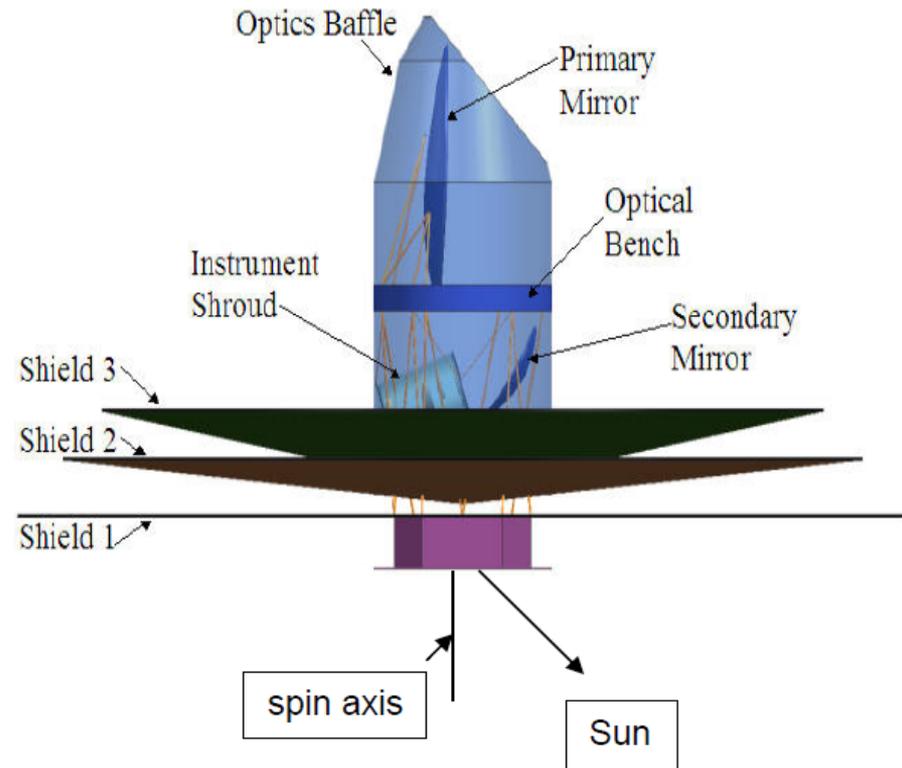
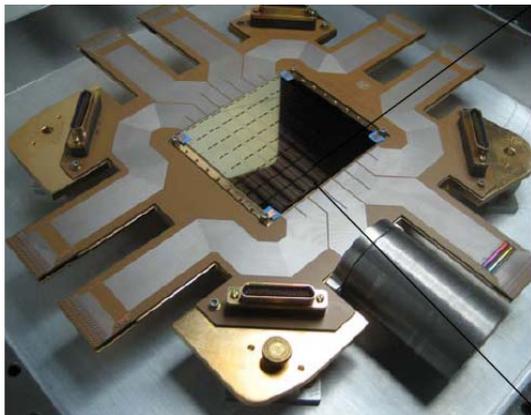


# EPIC(JPL版)

打ち上げは2020年以降



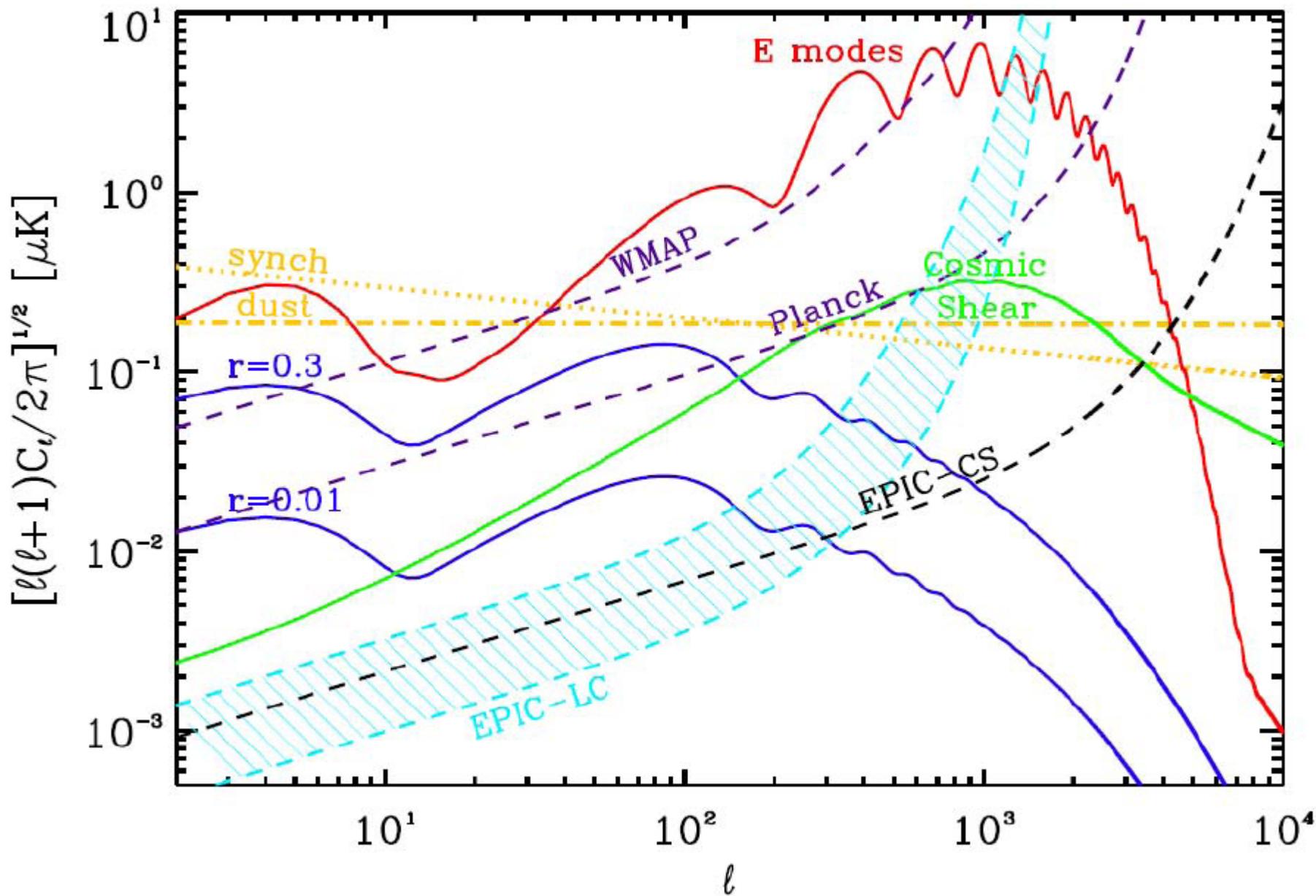
LC (Low Cost ~ 600M\$ !) option  
6 telescopes; each  
with 30cm $\phi$  optics



CS (Comprehensive Science)  
option

focal plane with  
TES bolometers

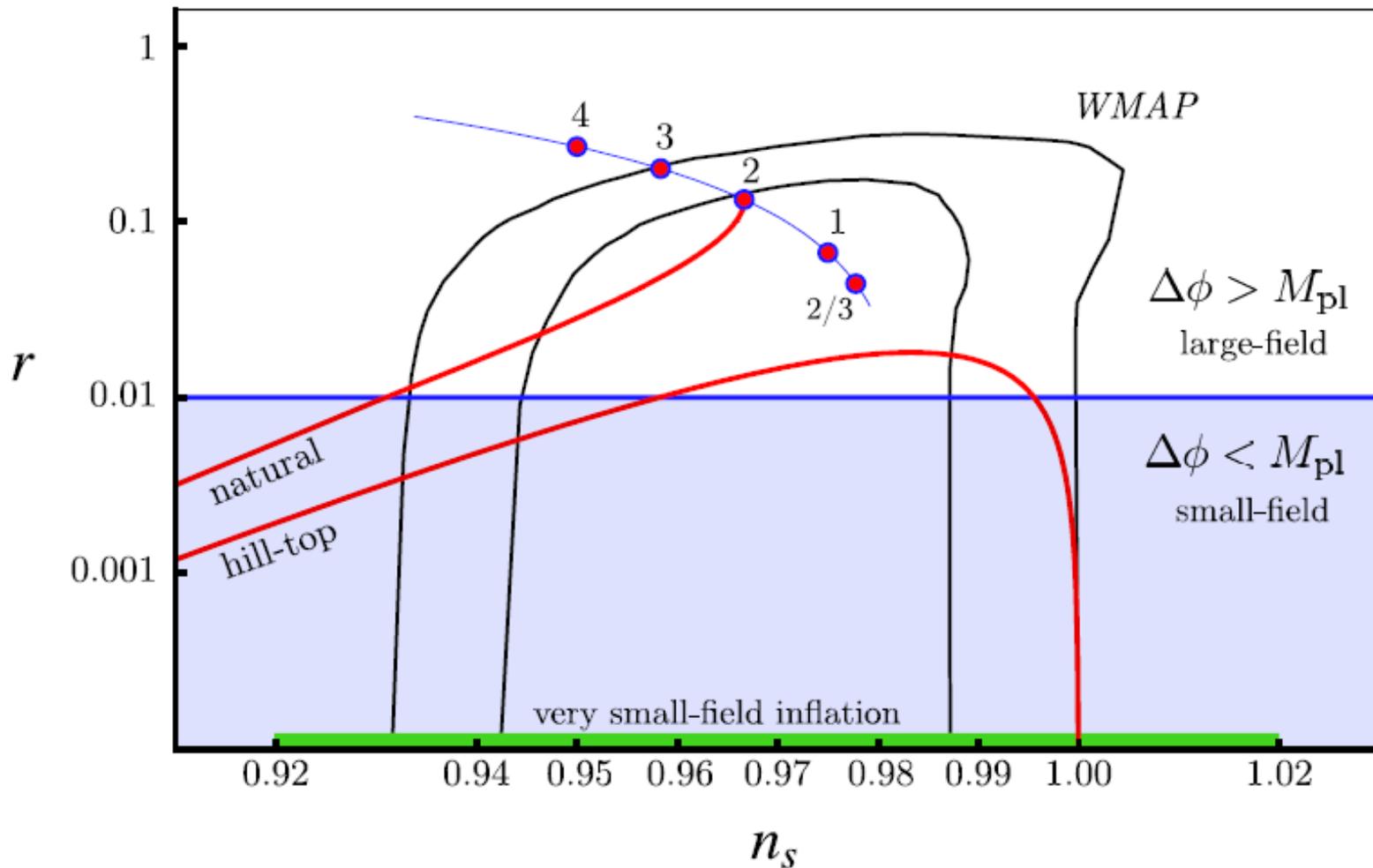
# EPIC(JPL版) sensitivities



# EPIC(JPL版)

## Inflation reach

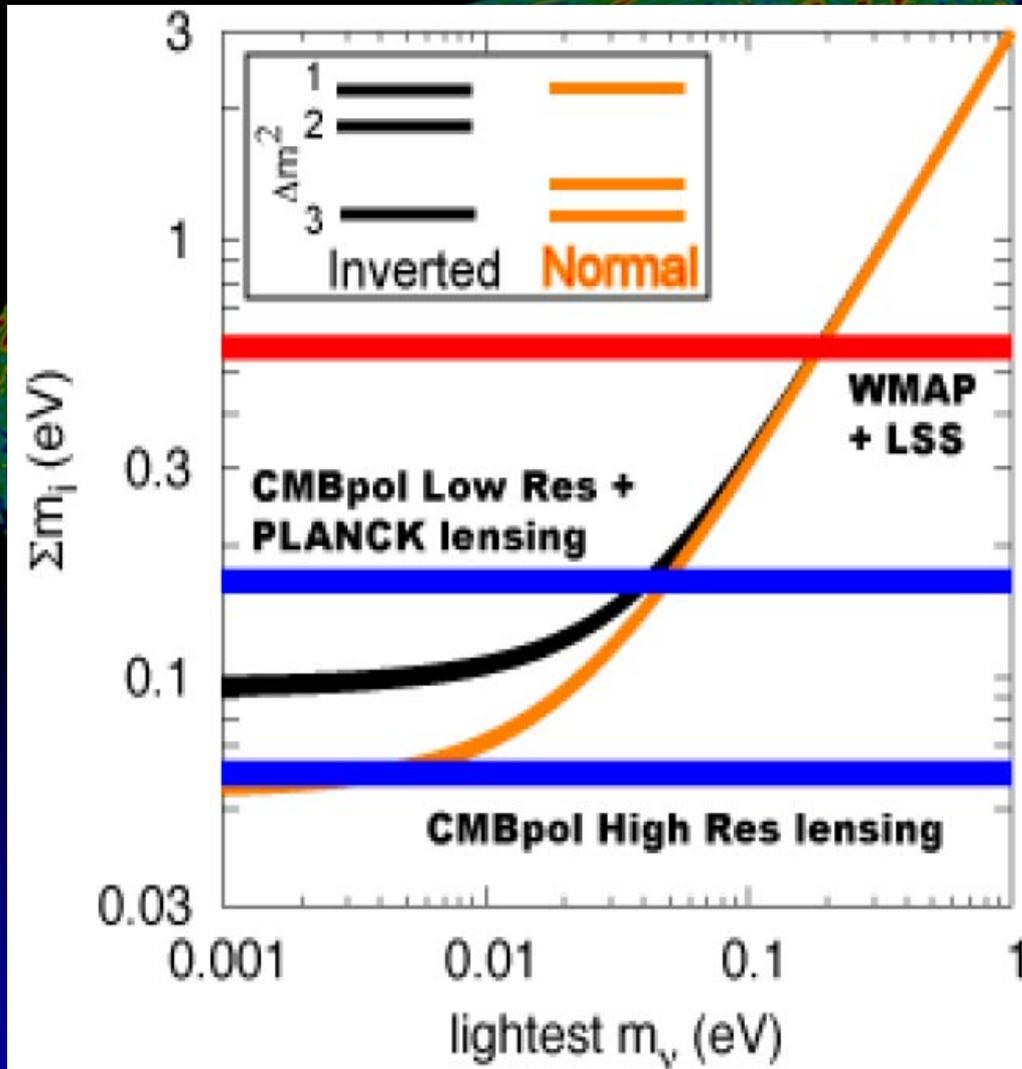
Errors	WMAP no FGs	Planck no FGs	EPIC-LC		EPIC-2m	
			no FGs	with Pess FGs	no FGs	with Opt FGs
$\Delta n_s$	0.031	0.0036	–	–	0.0016	0.0016
$\Delta \alpha_s$	0.023	0.0052	–	–	0.0036	0.0036
$\Delta r$	0.31	0.011	$5.4 \times 10^{-4}$	$9.2 \times 10^{-4}$	$4.8 \times 10^{-4}$	$5.4 \times 10^{-4}$
$\Delta r$	–	0.10	0.0017	–	0.0015	0.0025
$\Delta n_t$	–	0.20	0.076	–	0.072	0.13
$\Delta f_{\text{NL}}^{\text{local}}$	–	4	–	–	2	–
$\Delta f_{\text{NL}}^{\text{equil.}}$	–	26	–	–	13	–
$\Delta \alpha_{(c)}$	–	$1.2 \times 10^{-4}$	$3.5 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-5}$	$3.5 \times 10^{-5}$	$3.5 \times 10^{-5}$
$\Delta \alpha_{(a)}$	–	0.025	0.0065	0.0068	0.0065	0.0066
$\Delta \Omega_k$	–	–	–	–	$6 \times 10^{-4}$	$6 \times 10^{-4}$



$r < 0.01$ という制限が得られたらlarge-fieldを棄却

宇宙の初期温度が力の大統一エネルギーより低い  
 ということがわかるかもしれない

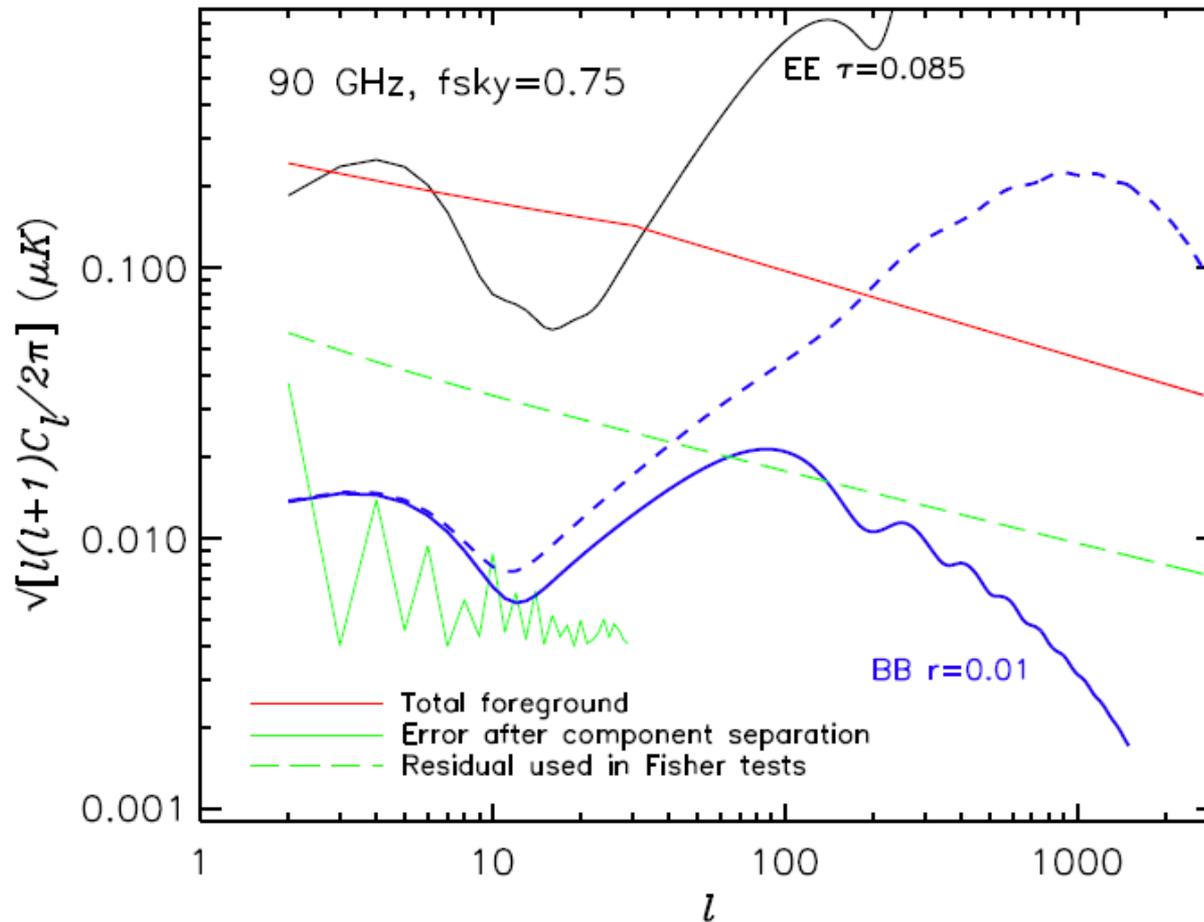
# ニュートリノ質量とhierarchy



ニュートリノレス  
二重ベータ崩壊にも  
大きなインパクト

特にinvertedなら  
発見のチャンス大  
発見に成功すれば  
ニュートリノは  
マヨラナ粒子！

# Foreground removal

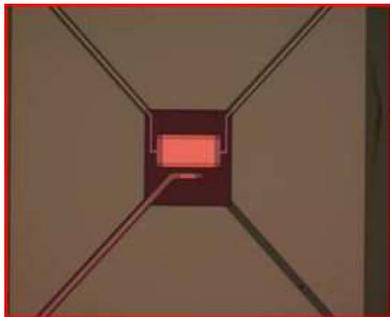
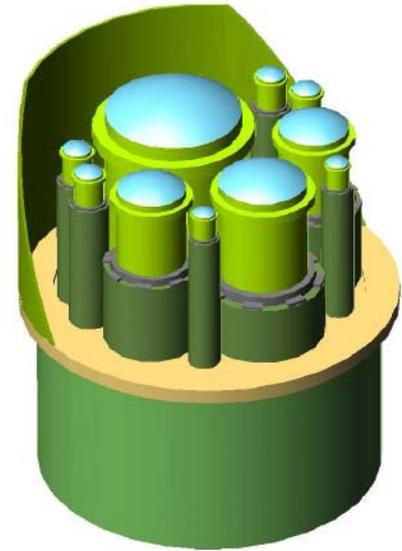
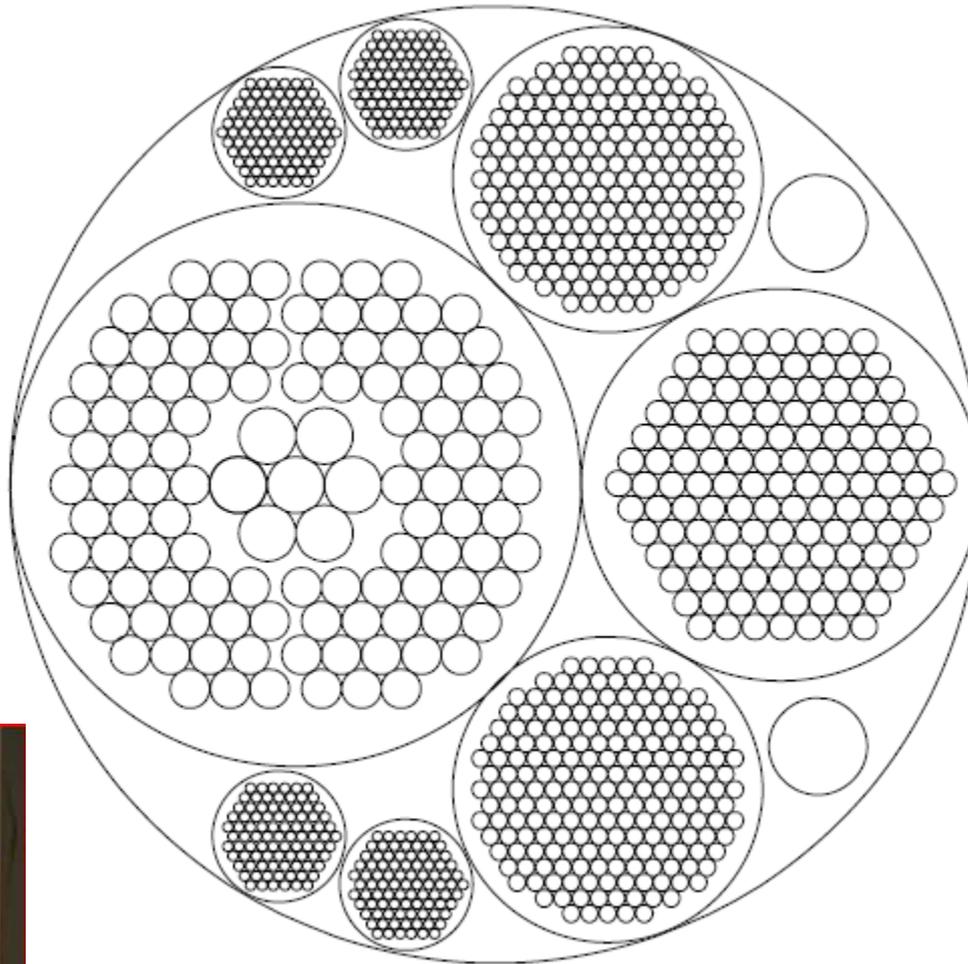


Delensingも含めて  $r=T/S=0.01$ なら対処できる。 $r=0.001$ を狙うためのスタディーが進行中(まずはPlanckの結果が重要)  
日本では服部さん(東北大)の「あかり」などを使う戦略があり

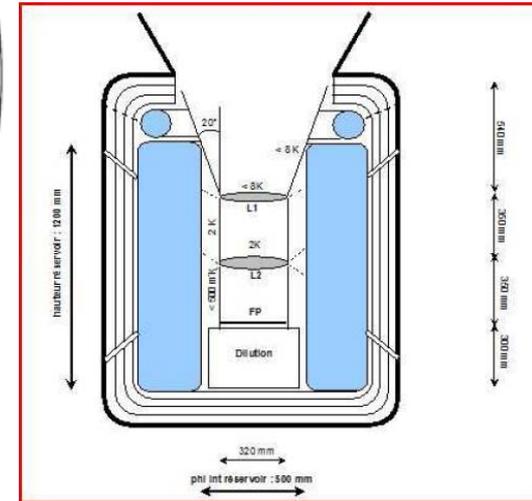
# B-Pol (Europe)

Cosmic visionへ提案したが、Planckの成功が先

- 45 GHz 45mm
- 70 GHz 26.5mm
- 100 GHz 18.5mm
- 150 GHz 12.3mm
- 220 GHz 8.4mm
- 350 GHz 5.3mm



MoCu TES(100GHz)



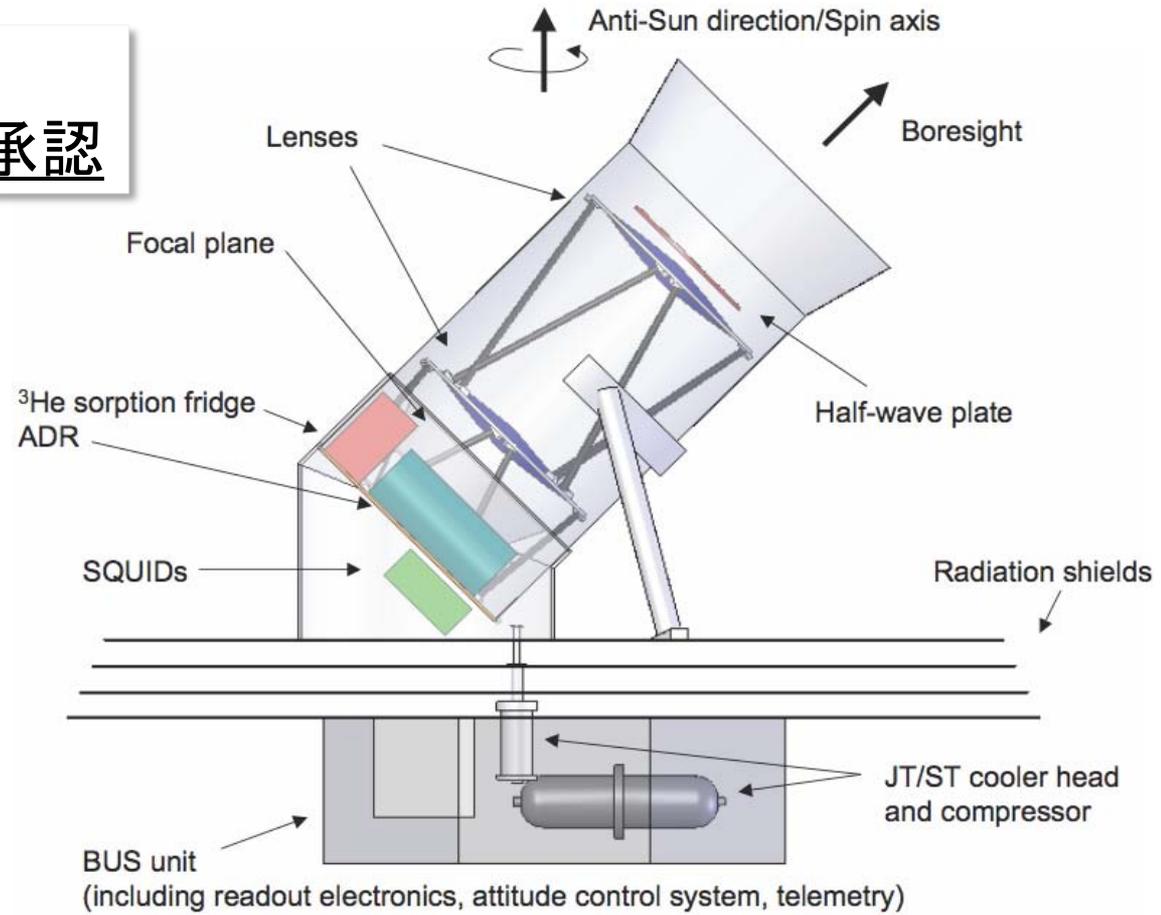
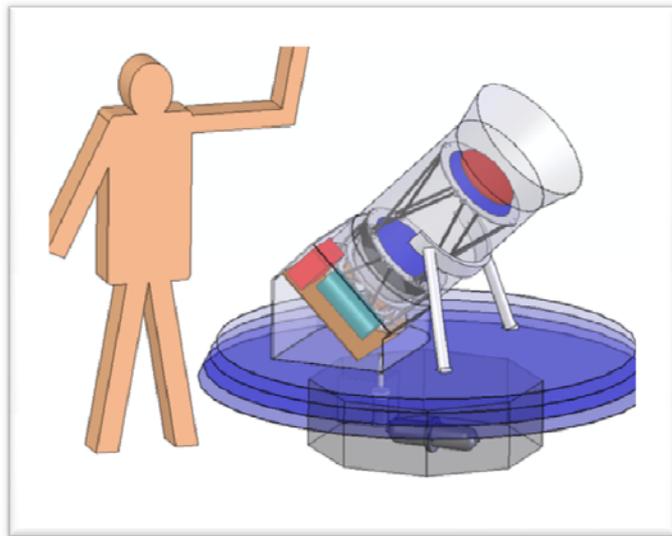
Focal plane with TES bolometers

# LiteBIRD (日本+米国)

**Lite** (light) Satellite for the studies of **B**-mode polarization and Inflation from cosmic background **R**adiation **D**etection

2008年9月

小型科学衛星WGとして承認



**Small is beautiful !**

JAXA独自の冷却技術でCryostatなし。軽量化(EPICの約1/3)を目指す

The entire satellite will be in a big cryochamber for testing.

# Group members

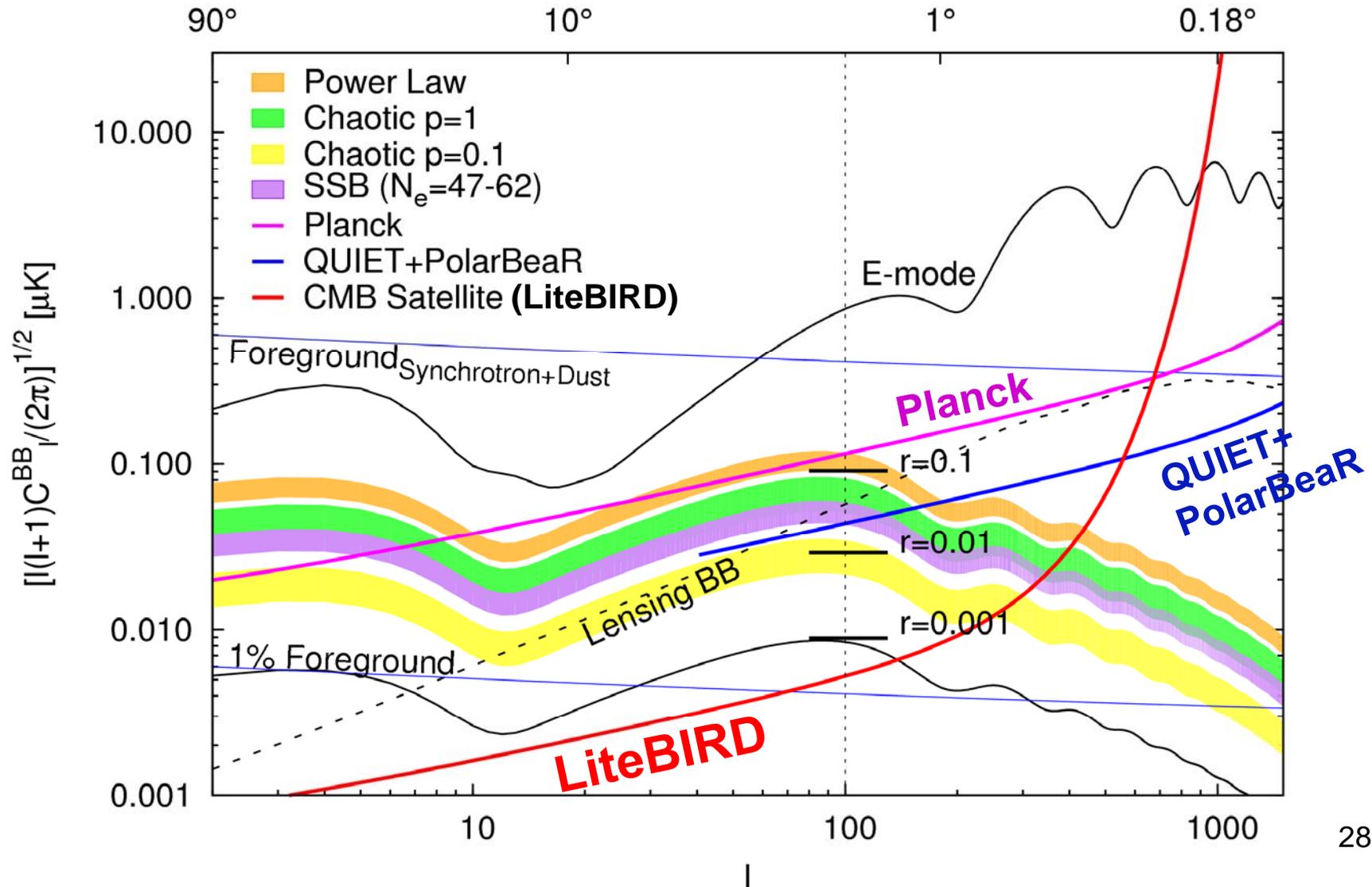
Name	Institution	Role*
Hideo Matsuhara	JAXA	JAXA PI, orbit, scan
Kazuhisa Mitsuda	JAXA	PSD
Tetsuya Yoshida	JAXA	Tests with Baloons
Yoichi Sato	JAXA	Thermal engineering
Hiroyuki Sugita	JAXA	Thermal engineering
Hirokazu Ishino	Okayama Univ.	DAQ, PSD
Atsuko Kibayashi	Okayama Univ.	Simulation
Tomotake Matsumura	Caltech	Orbit, scan, optics
Adrian Lee	UC Berkeley	PI for foreign institutions, PSD, modulation scheme
Izumi Ota	Kinki Univ.	Evaluation of optics
Mitsuhiro Yoshida	KEK	Optics
Nobuaki Sato	KEK	Simulation
Kazutaka Sumisawa	KEK	PSD
Osamu Tajima	KEK	systematic errors
Masashi Hazumi	KEK	PI
Toshikazu Suzuki	KEK	Thermal engineering
Takayuki Tomaru	KEK	Thermal engineering, modulation scheme
Masaya Hasegawa	KEK	Tests with balloons
Takeo Higuchi	KEK	DAQ
Eichiro Komatsu	UT Austin	Science
Yoshinori Uzawa	NAOJ	PSD
Yutaro Sekimoto	NAOJ	PSD
Takashi Noguchi	NAOJ	PSD
Makoto Hattori	Tohoku Univ.	Foregrounds, systematic errors
Chiko Otani	RIKEN	PSD

\*Roles should not be restricted to those listed here.

## Consultants (no duty on real work)

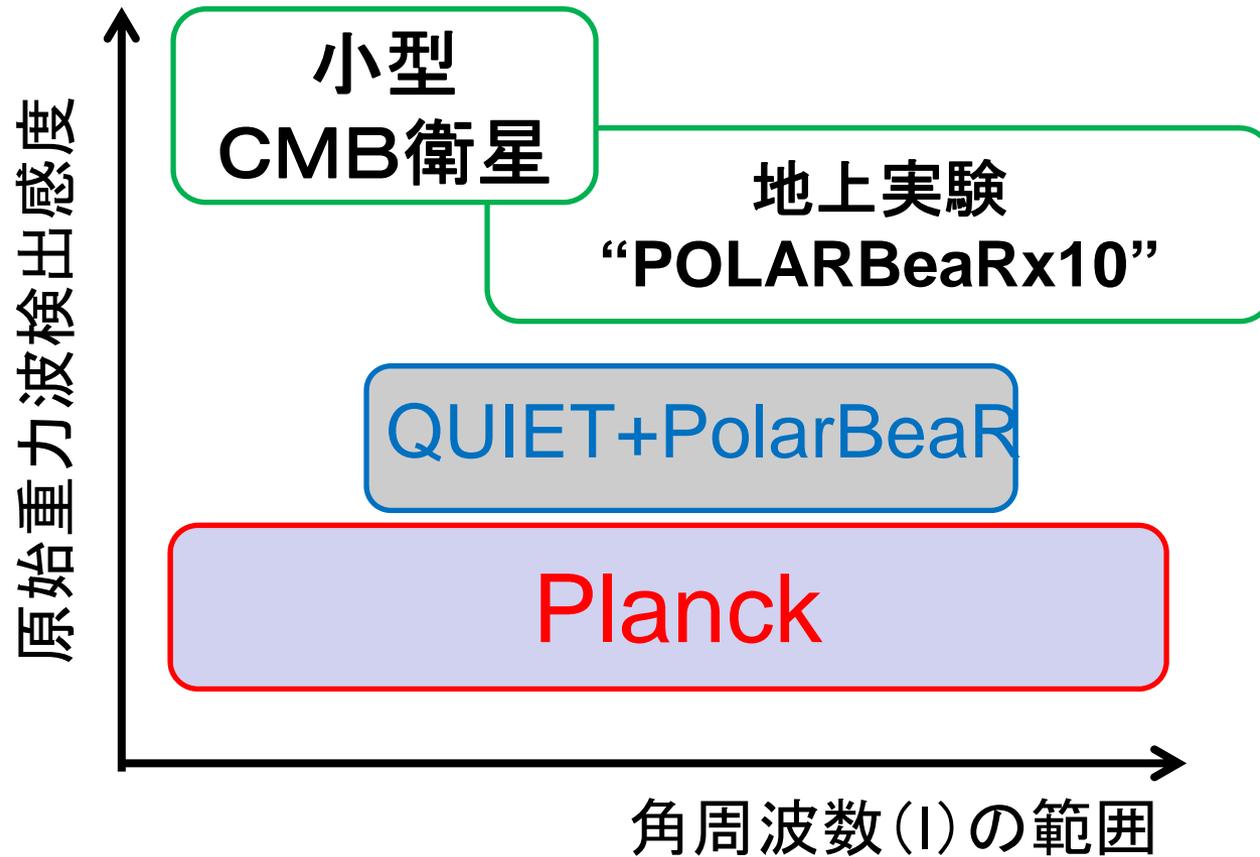
Name	Institution	Role	Cf.
Takao Nakagawa	JAXA	Satellite	SPICA PI
Shuji Matsuura	JAXA	Satellite	
Hideo Kodama	KEK	Science	theorist
Ryohei Kawabe	NAOJ	optics, PSD	ASTE member

# 様々なインフレーションモデルのBモードパワースペクトルと LiteBIRD、QUIET+PolarBear、Planckの予想感度



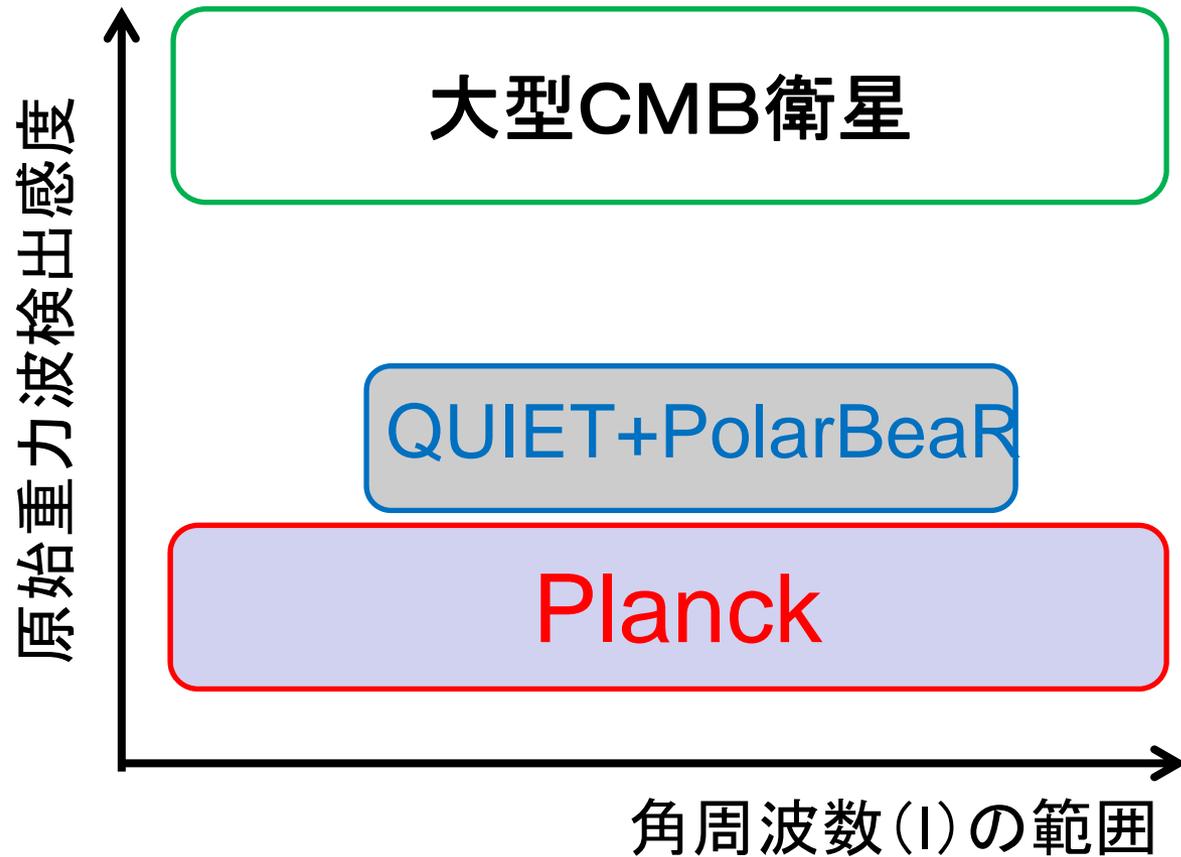


# Option 1



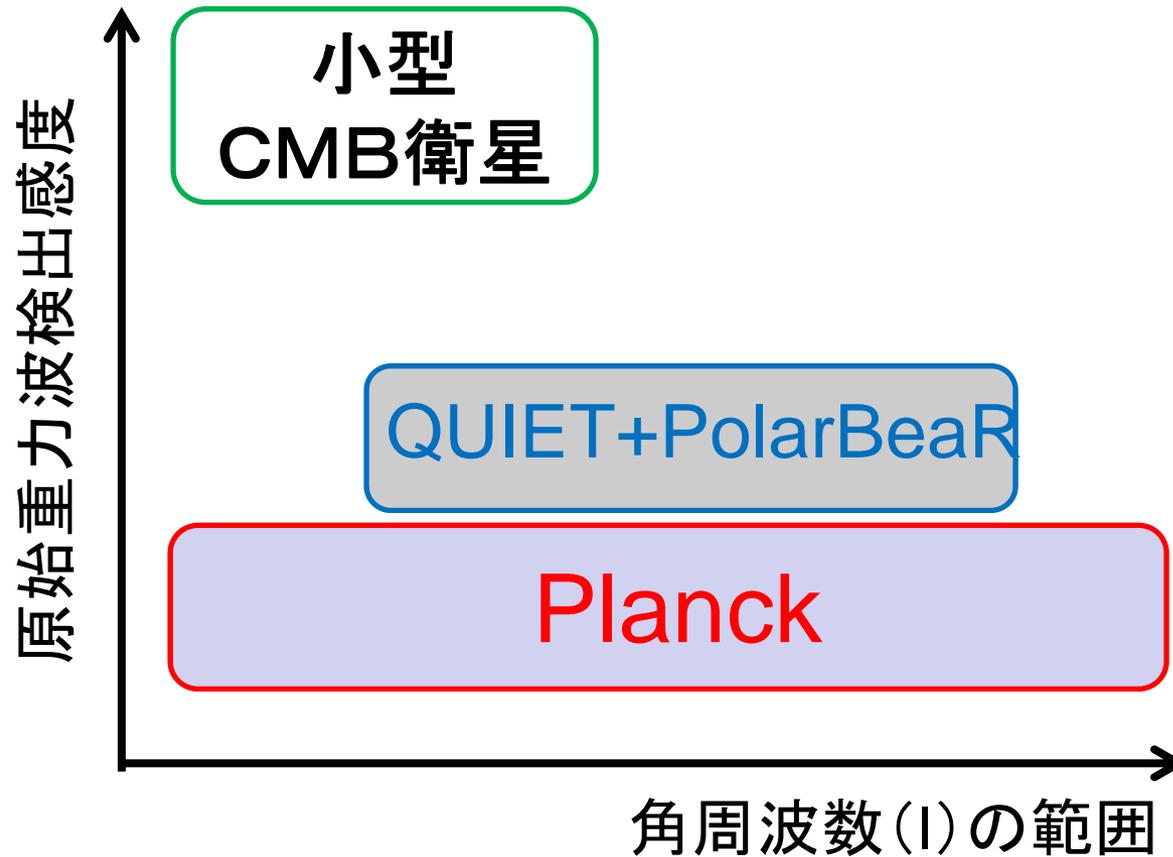
CMB観測プロジェクトの特色

# Option 2



CMB観測プロジェクトの特色

# Option 3



CMB観測プロジェクトの特色

# CMB偏光衛星の戦略

1. 小型衛星(全天サーベイ+高角度分解能地上実験)
2. 大型衛星(全天サーベイ+高角度分解能)
3. 小型衛星(全天サーベイ)

## 羽澄の私見ではオプション1

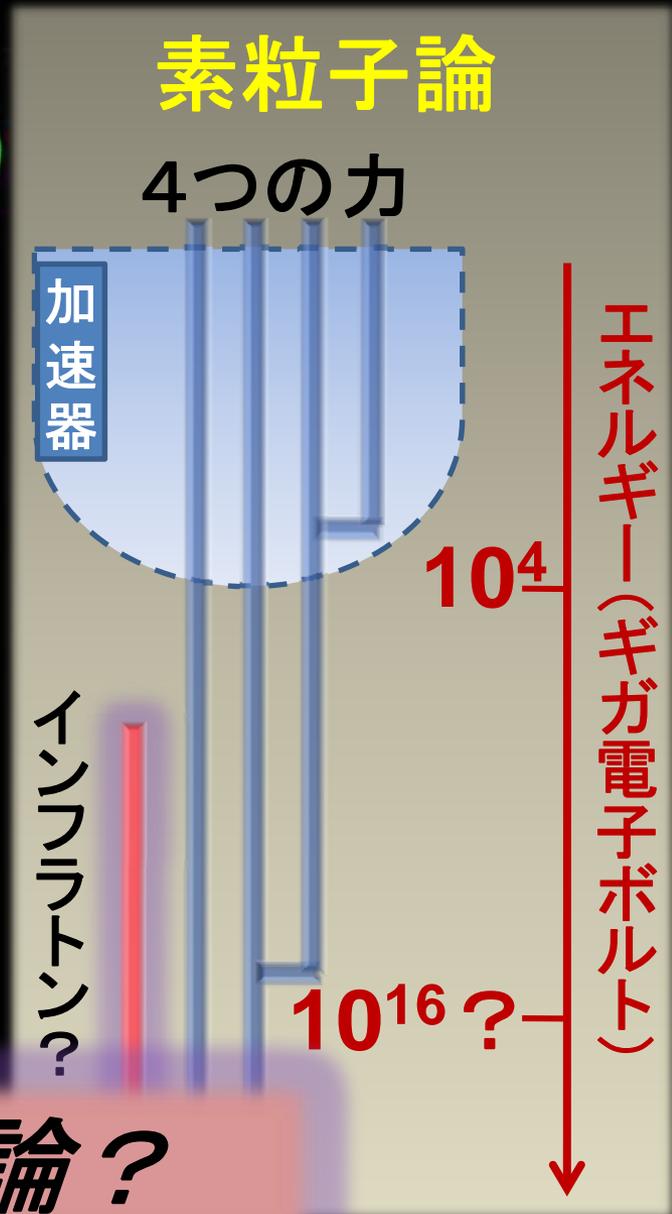
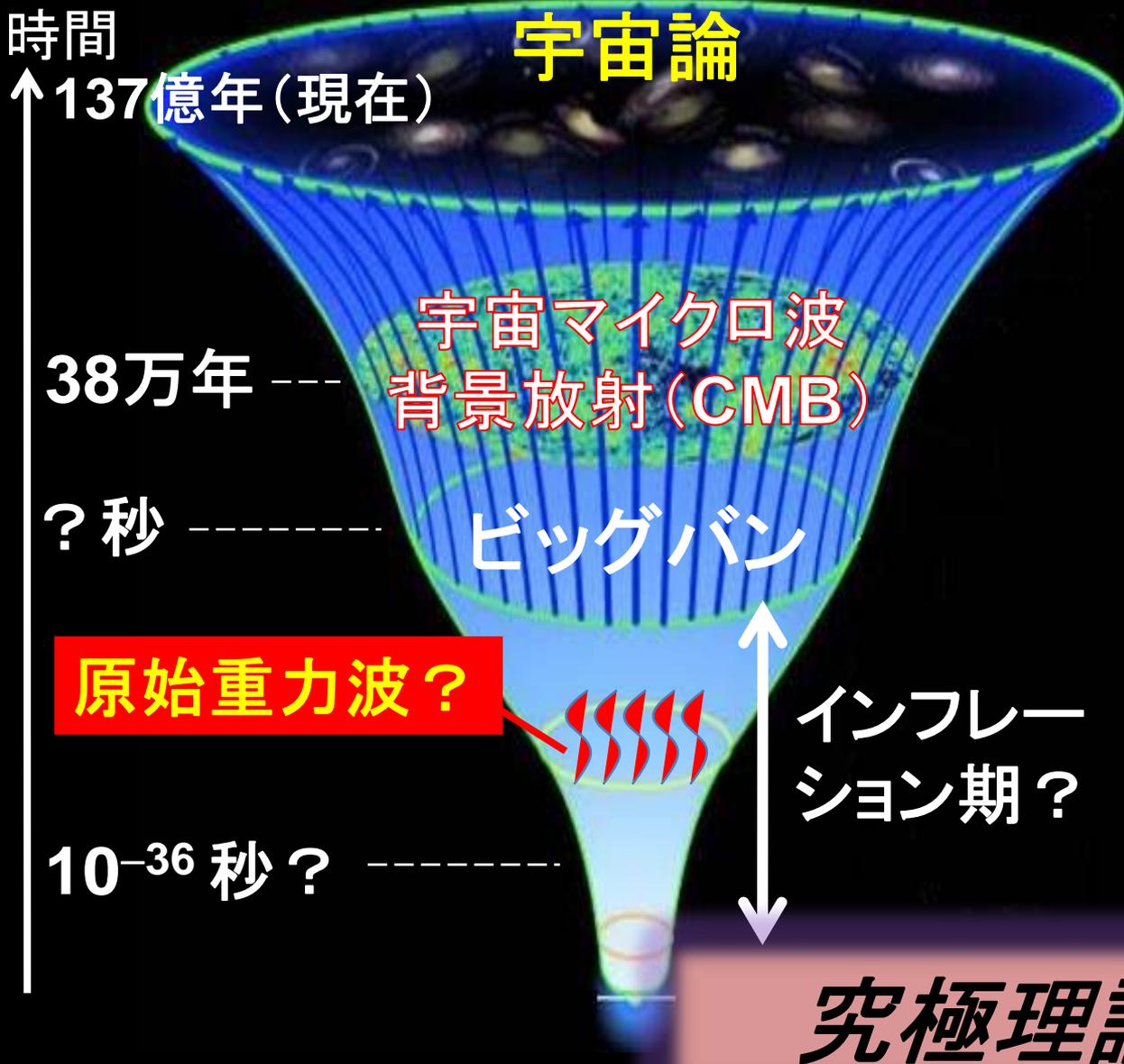
- オプション2と比べてコストが格段に小さい(5分の1?)
- 衛星より高い角度分解能を実現できる
- 地上実験ではより先進的な技術を試すことができる  
(将来への投資)
  - 例: 1万チャンネルの超伝導ミリ波カメラ

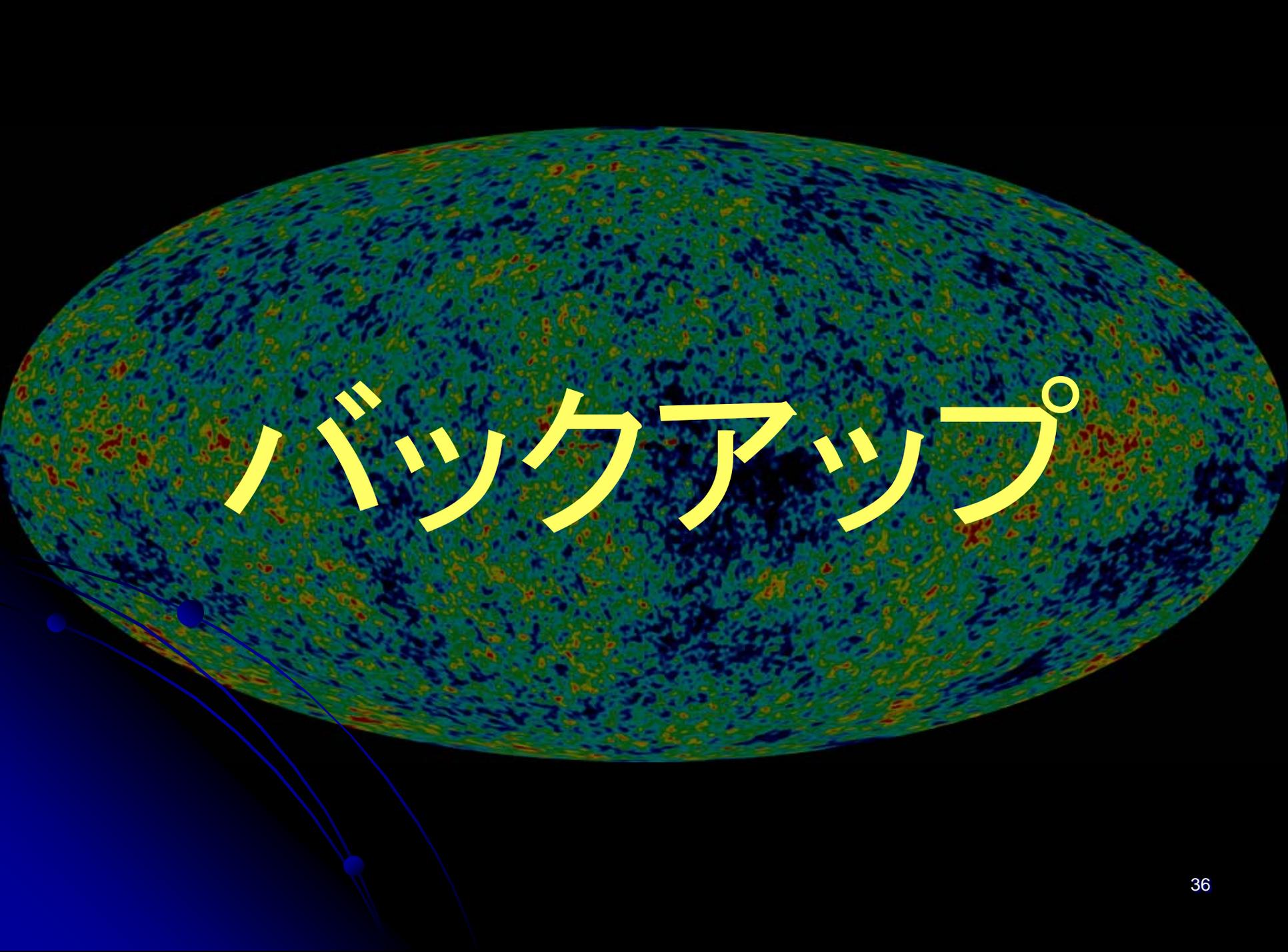
# 理論天文学(含む宇宙論)と素粒子論に期待すること(例)

- 新しい観測量の提案
  - 例)円偏光の精密測定による宇宙論
- 新しいCombined analysisの提案(と実行)
  - 例)すばるHSCとCMB偏光によるダークエネルギーの解析
- CMB偏光解析への積極的な参入
  - 例)PolarBeaRの解析にどっぷりつかってみる

今後の進展・知的興奮を共有できれば幸いです

# 今後10年は宇宙論と素粒子論の黄金時代！



A large, oval-shaped map of the Cosmic Microwave Background (CMB) showing temperature fluctuations. The map is color-coded, with blue representing cooler regions and red/yellow representing warmer regions. The text 'バックアツプ' is overlaid in the center in a yellow, stylized font. In the bottom-left corner, there are several blue dots connected by thin blue lines, suggesting a network or data flow.

# バックアツプ

# B-Pol (Europe)

## Expected B-mode sensitivities

