

松村知岳 (JAXA/ISAS) @ 物理学会、2014-9-19

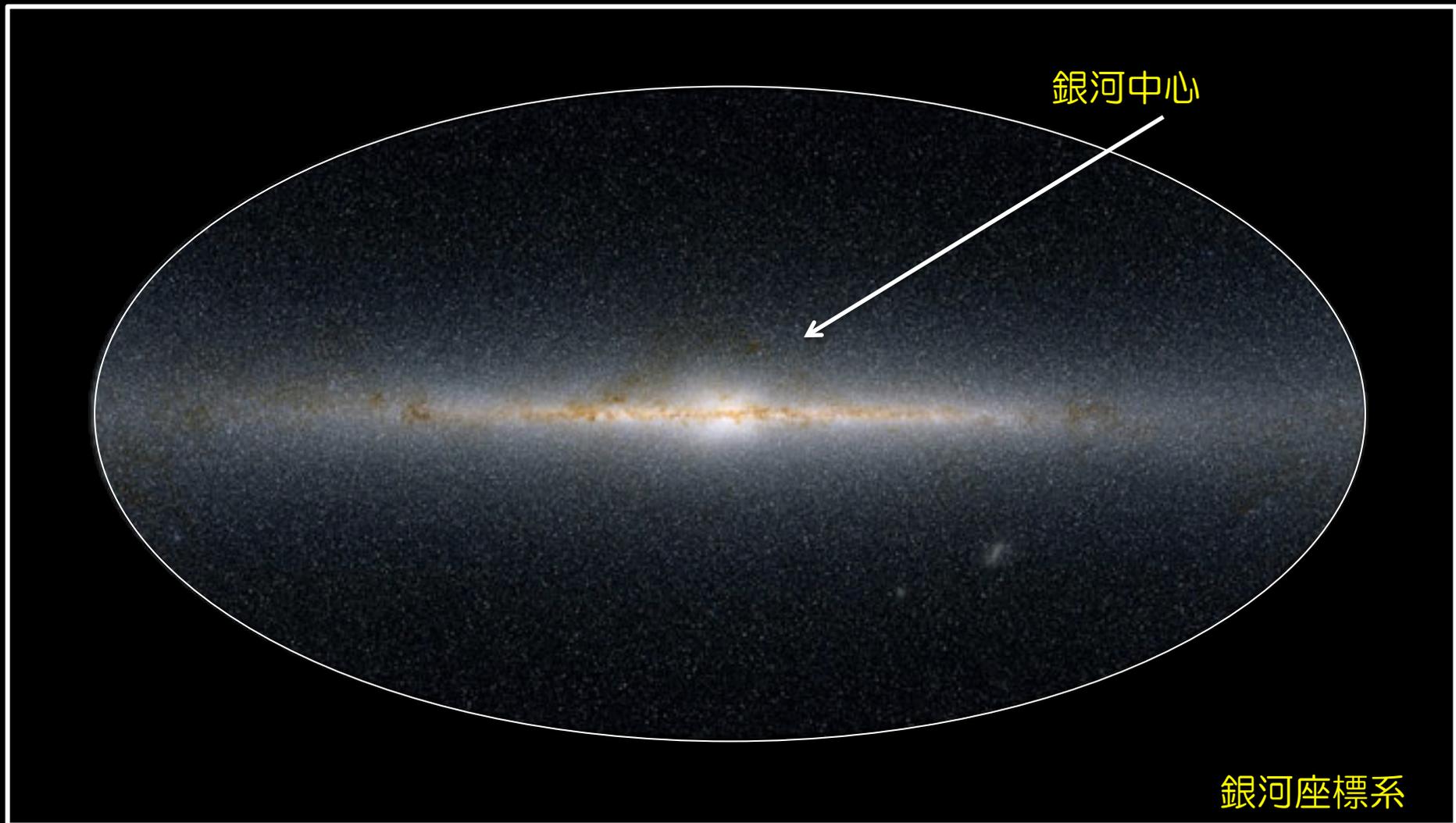
衛星によるCMB観測を用いた初期宇宙論探索

COBE、WMAP、Planck、そして・・・

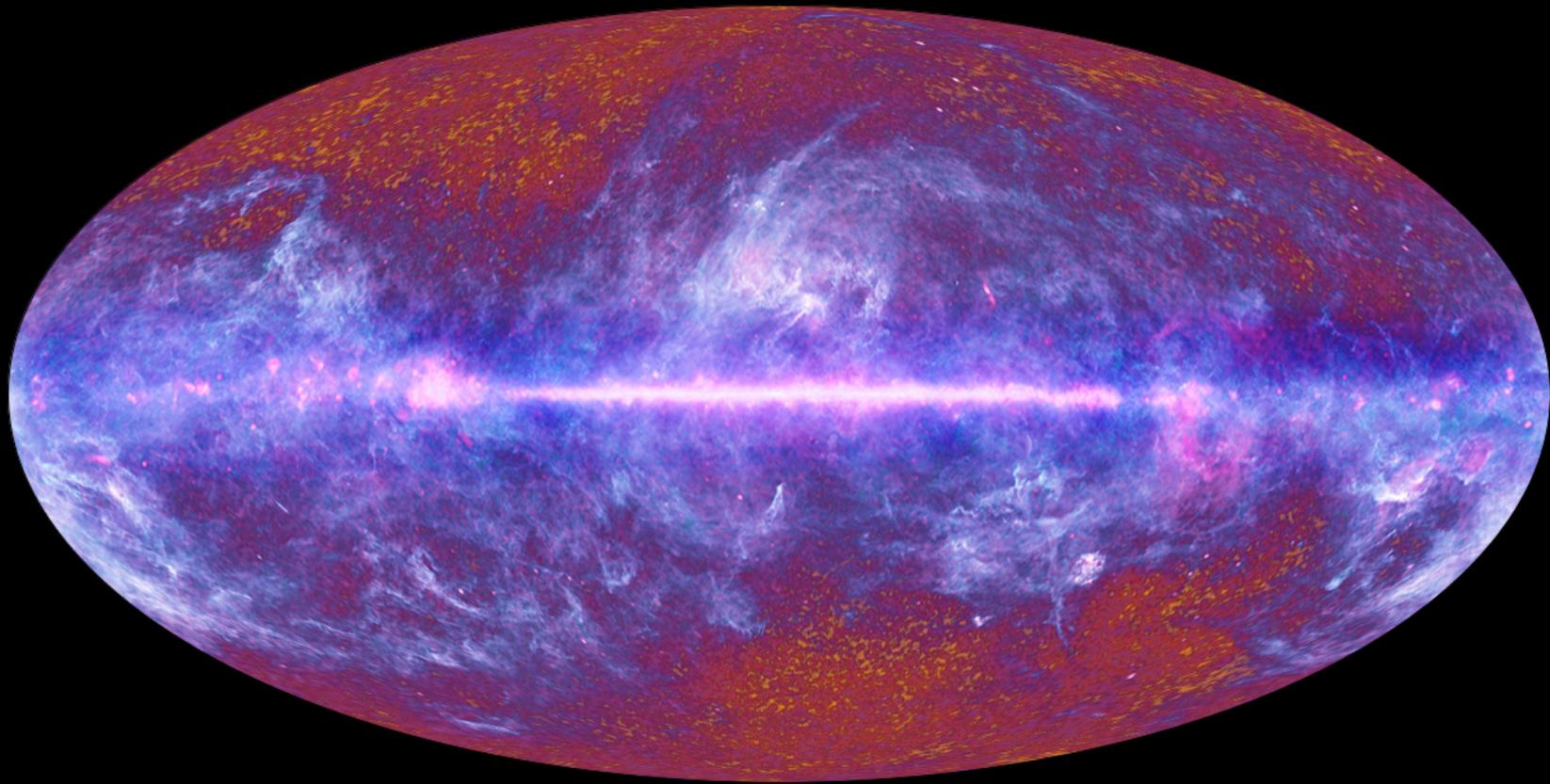
アウトライン

- 原始重力波探索のためのCMB実験のルールブック
- これまでの衛星による原始重力波探索
- 今後の衛星での探索

可視光で見見た全天



Planck衛星によるミリ波全天マップ



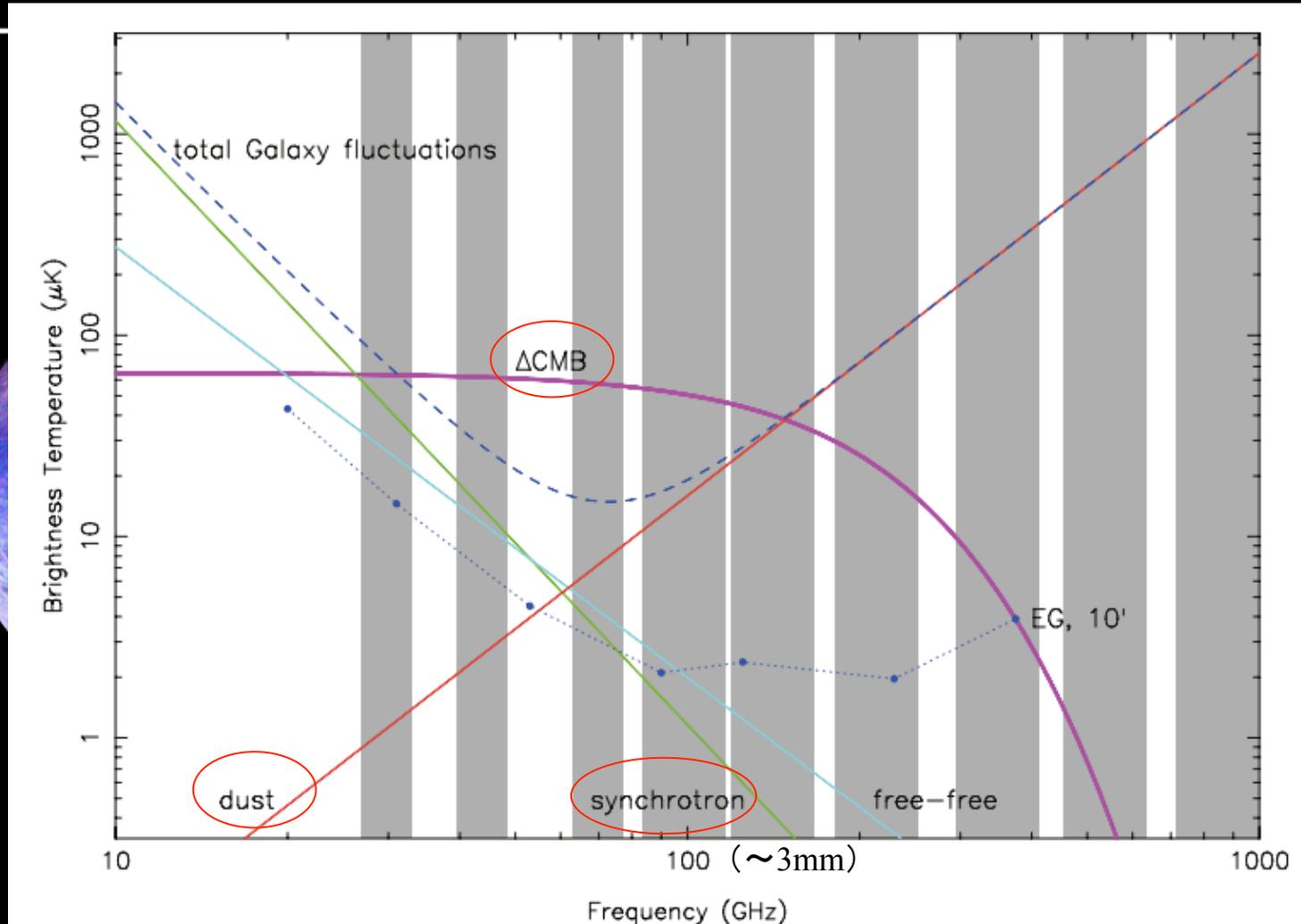
Planck衛星 2010年7月

The Planck one-year all-sky survey



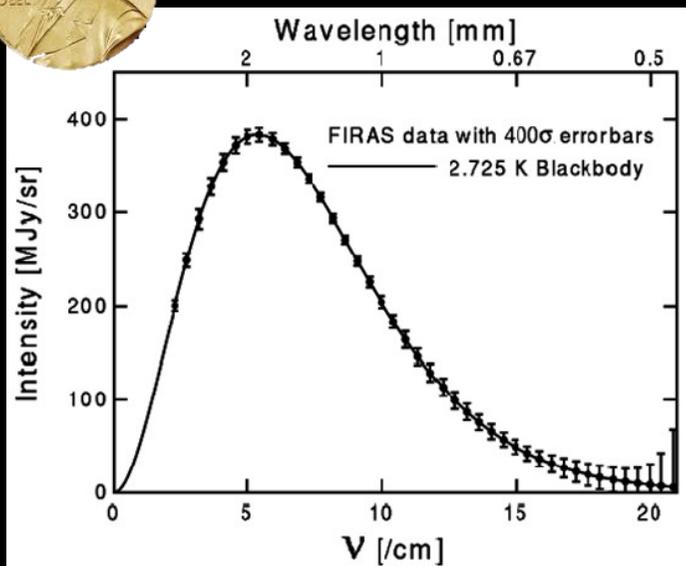
[c] ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

Planck衛星によるミリ波全天マップ

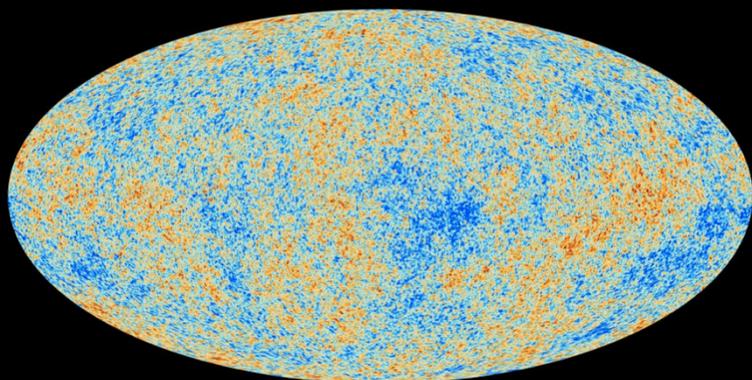
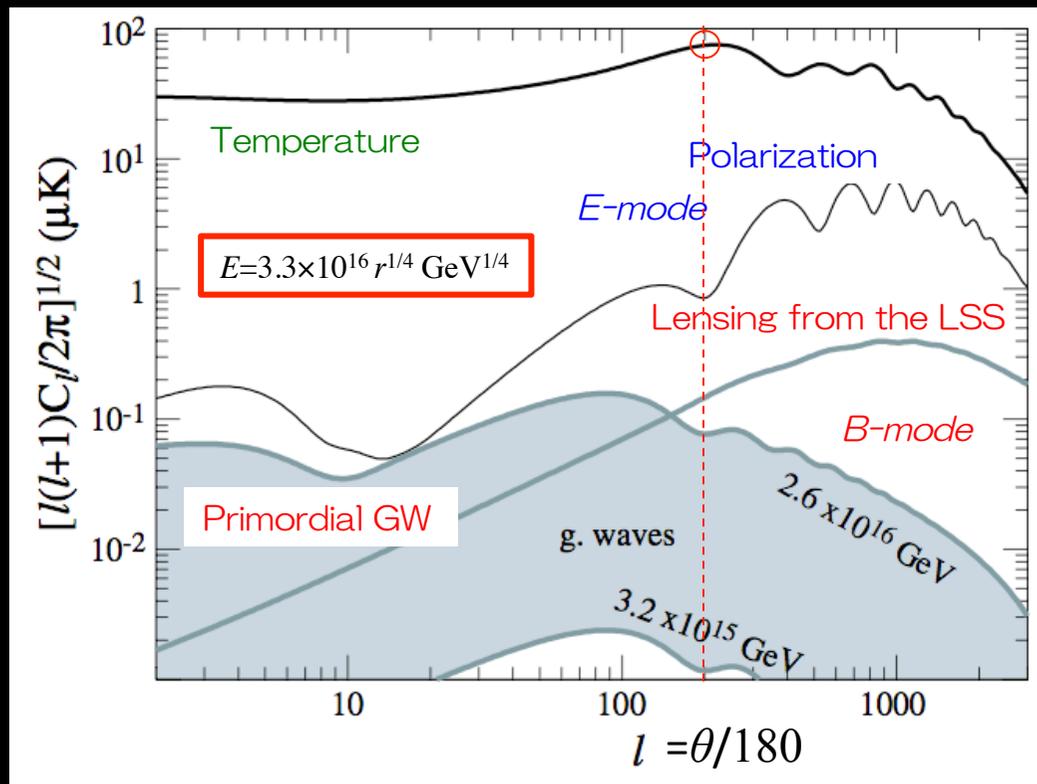


Planck衛星 2010年7月

CMB実験のルールブック

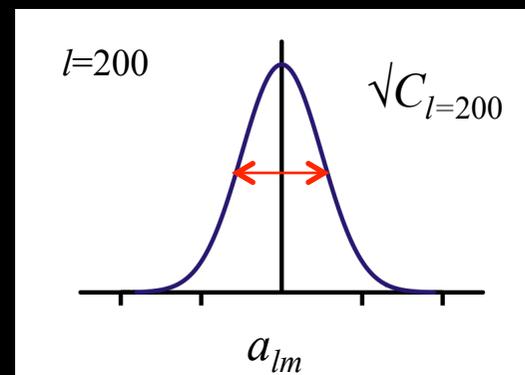


完全な黒体放射 $T=2.725\text{K}$

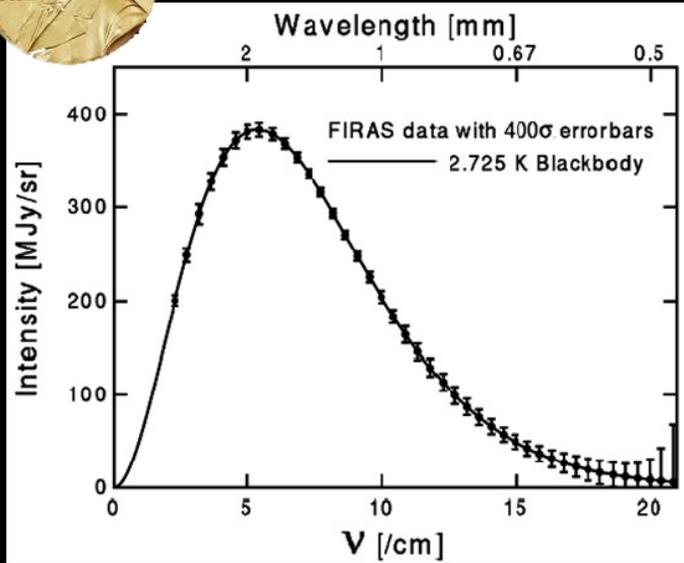


球面でフーリエ変換

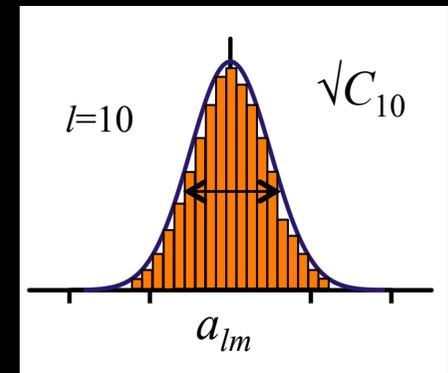
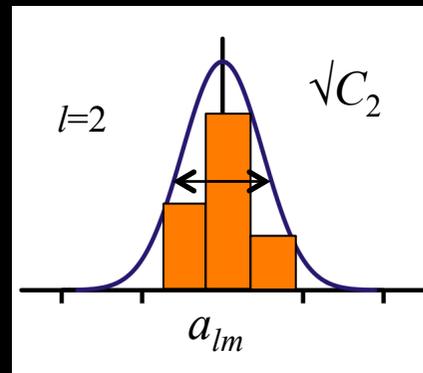
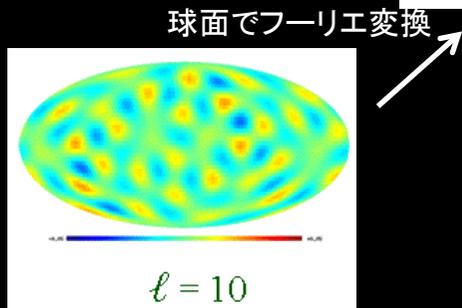
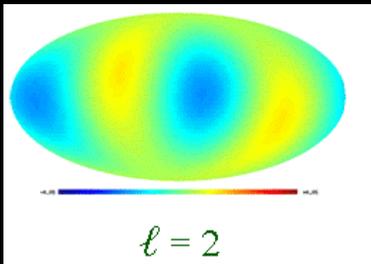
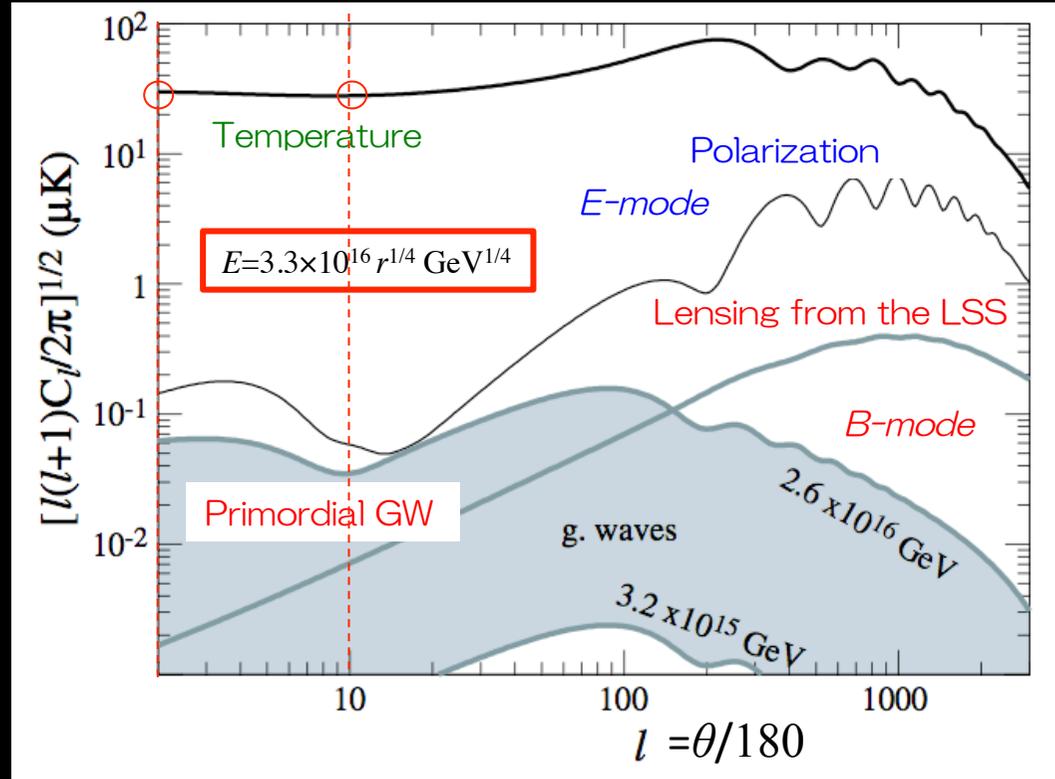
前景放射と背景放射をスペクトルの違いから分離



CMB実験のルールブック



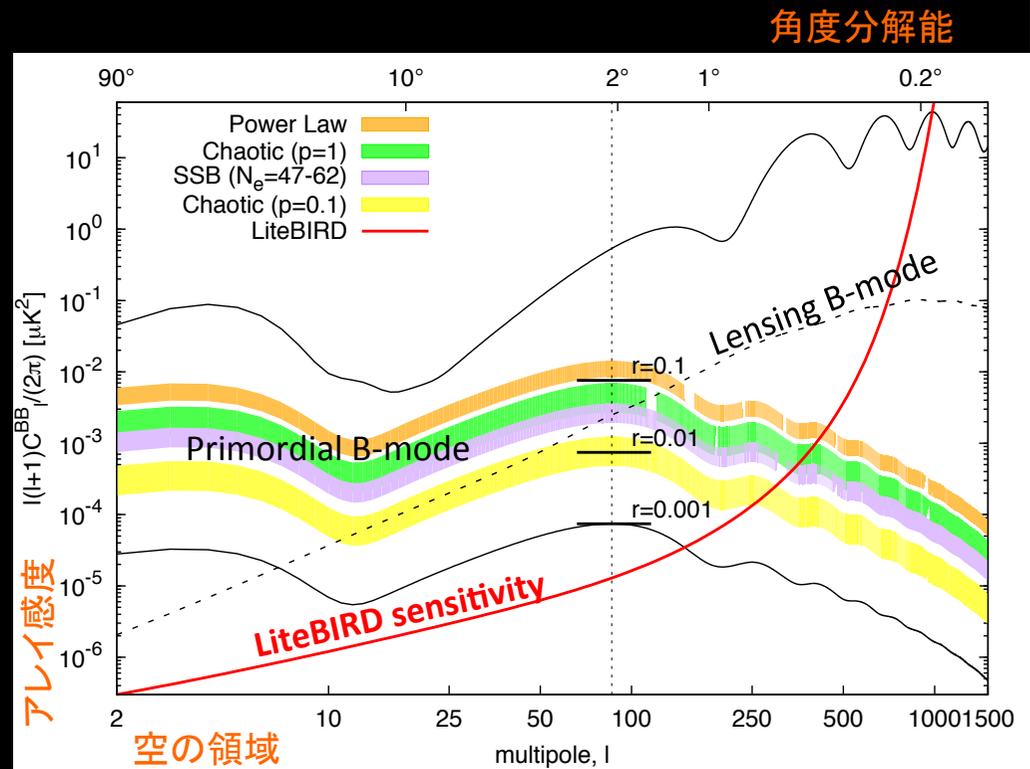
完全な黒体放射 T=2.725K



ノイズがなくても、モードの数が少ないと推定により不定性。

CMB実験のルールブック

$$\delta C_l = \sqrt{\frac{2}{(2l+1)f_{sky}}} C_l$$



CMB実験のルールブック

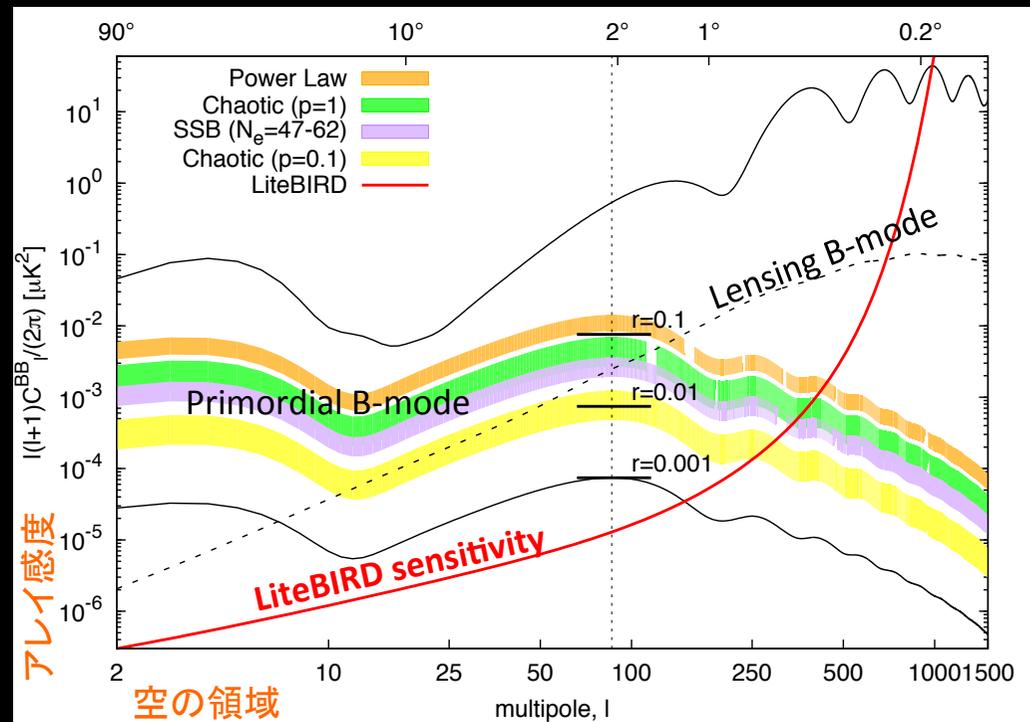
角度分解能

$$\delta C_l = \sqrt{\frac{2}{(2l+1)f_{sky}}} \left(C_l + \sqrt{\frac{4\pi f_{sky} \cdot 2NET^2}{t_{obs} N_{det}}} e^{l(l+1)\sigma_b^2} \right)$$

$$N_l = \sqrt{\frac{4\pi f_{sky} \cdot 2NET^2}{t_{obs} N_{det}}} e^{l(l+1)\sigma_b^2}$$

観測領域 検出器1個の感度 角度分解

観測時間 検出器数



実験感度をあげるには

- 検出器の感度を上げたい → 大気を避ける
- 観測時間を延ばす → 高い観測効率にて長期間観測
- 多素子化 → アレイ検出器
- Cosmic variance limited → f_{sky} を大きく
- 前景放射に対するガードを固める → 多色化



気球（南極周回）
高度～35km（大気はなし）
観測時間は数週間から一ヶ月
空の一部



衛星（太陽同期、L2）
大気なし
数年間の観測（高効率）
全天観測



地上（チリや南極点など）
大気有り
観測時間～数年十
空の一部



どこで観測するのか



気球（南極周回）

高度～35km（大気はなし）
観測時間は数週間から一ヶ月
空の一部



衛星（太陽同期、L2）

大気なし
数年間の観測（高効率）
全天観測

地上（チリや南極点など）

大気有り
観測時間～数年十
空の一部



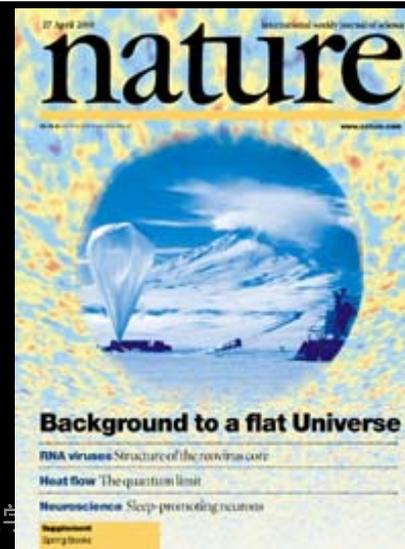
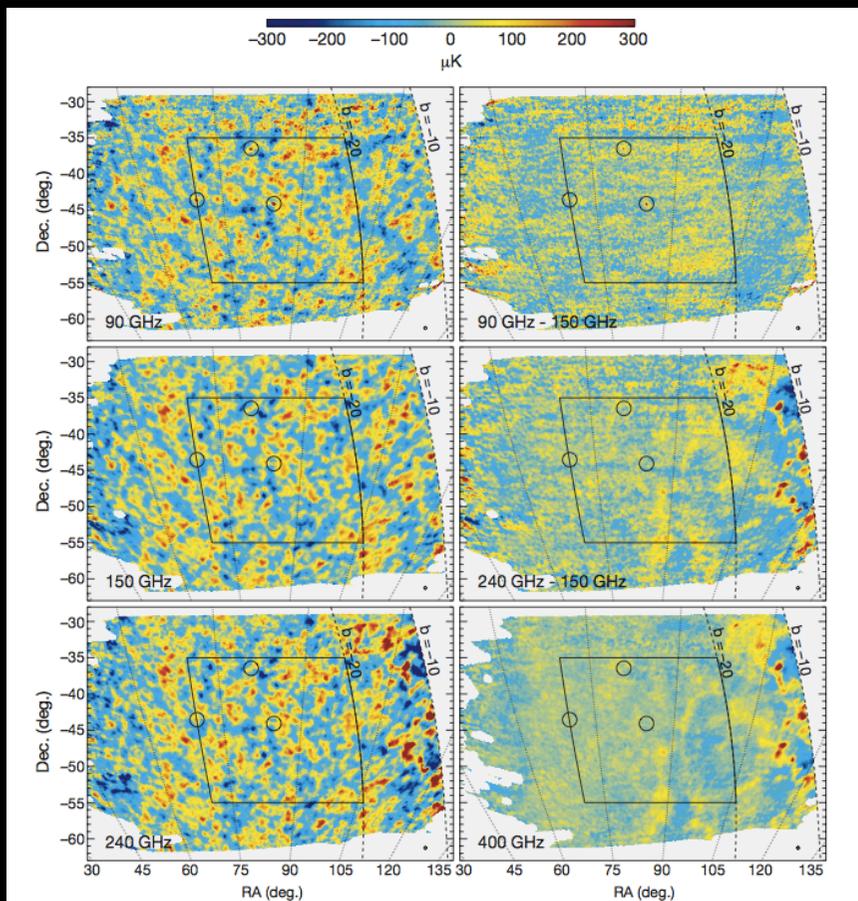
大気の影響

- 検出器自身のノイズよりも、光子のポアソンによるノイズ。
- 大気の揺らぎとCMBの揺らぎが縮退。

どこで観測するのか

これまでの気球によるCMB観測

BOOMERANG T map
10 days w/ * (of 6 at 150 GHz) bolometers @
FP300mK



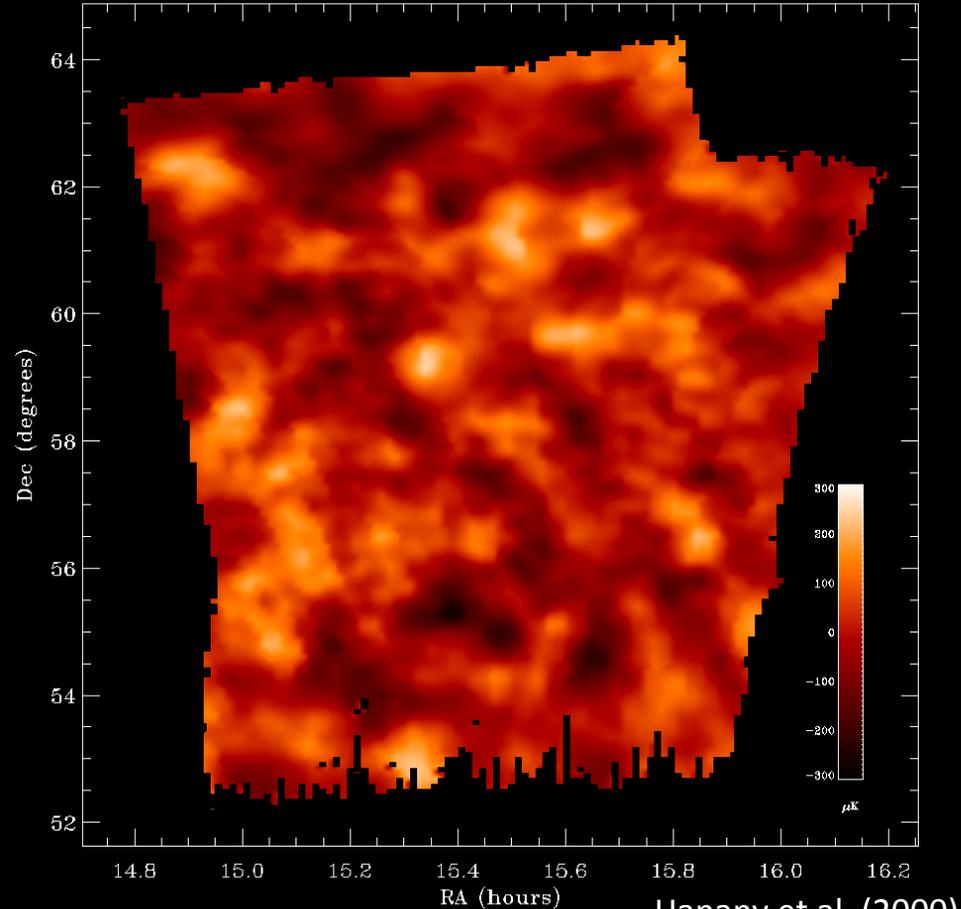
P. de Bernardis et al.
(2000)

これまでの気球によるCMB観測



MAXIMA@北米

MAXIMA-1 map of the Cosmic Microwave Background Anisotropy

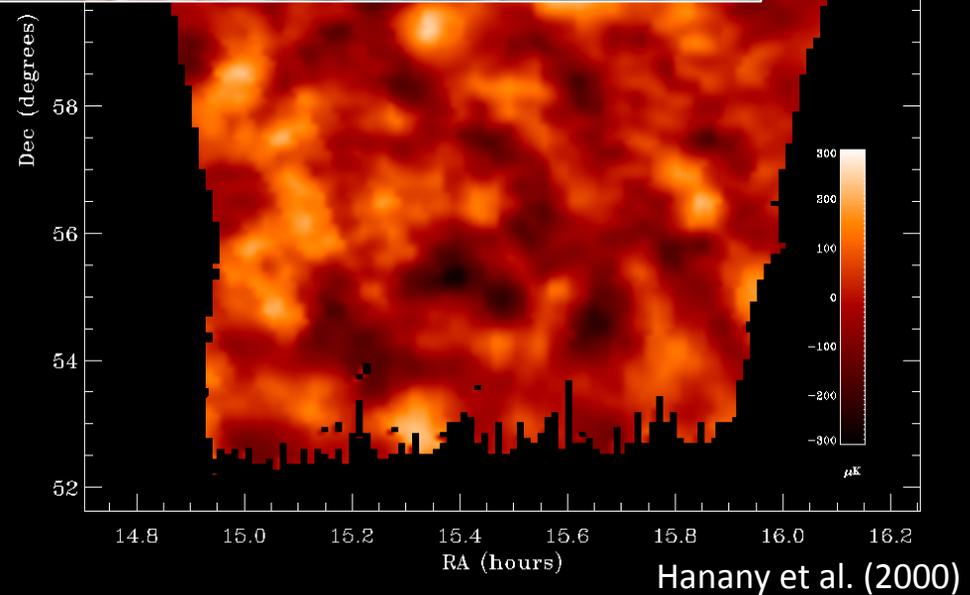


Hanany et al. (2000)

MAXIMA T map

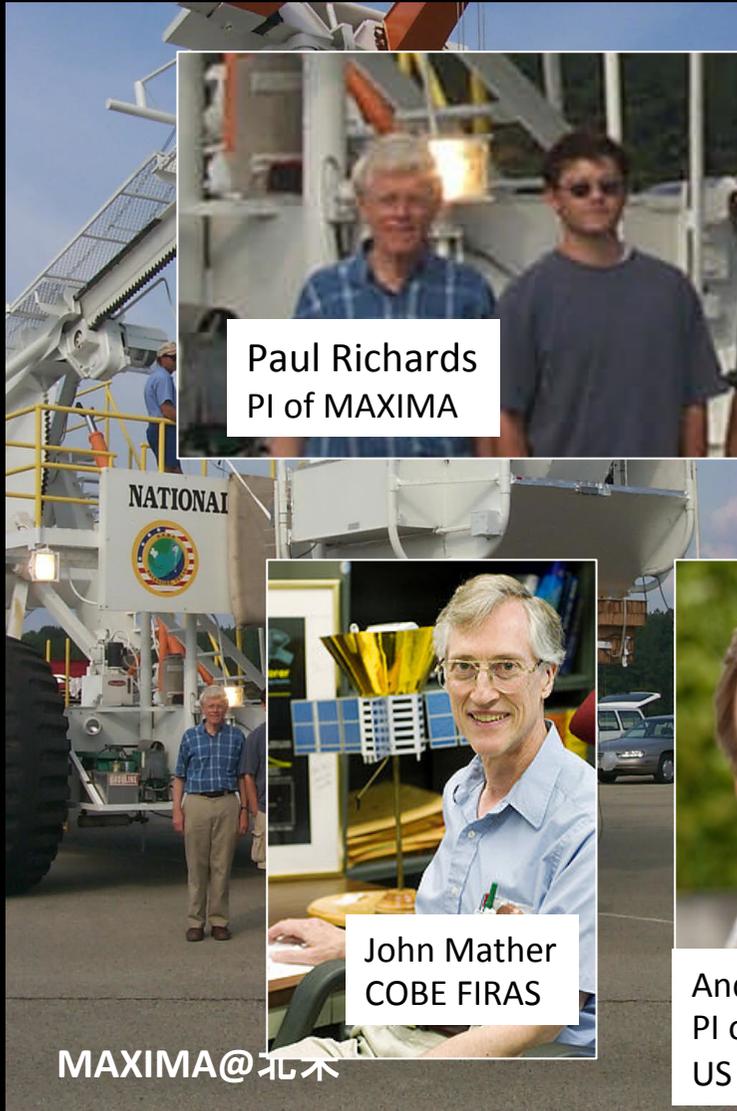
1 day w/ 3 (of 8 at 150GHz) bolometers @ FP100mK

これまでの気球によるCMB観測



MAXIMA T map
1 day w/ 3 (of 8 at 150GHz) bolometers @ FP100mK

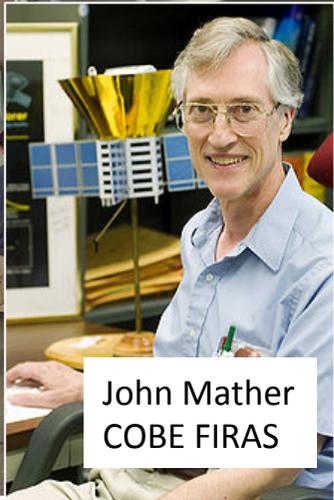
これまでの気球によるCMB観測



Paul Richards
PI of MAXIMA

Adrian Lee
PI of POLARBEAR

Shaul Hanany
PI of EBEX



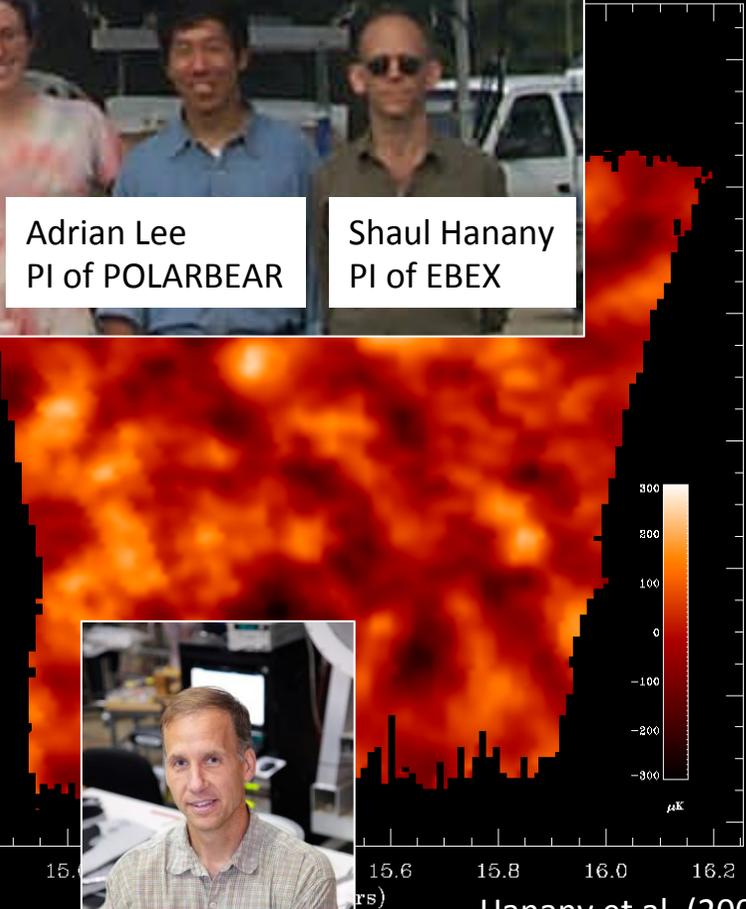
John Mather
COBE FIRAS



Andrew Lange
PI of BOOMERANG
US PI of Planck



Jamie Bock
PI of BICEP
(US PI of Planck)



Hanany et al. (2000)

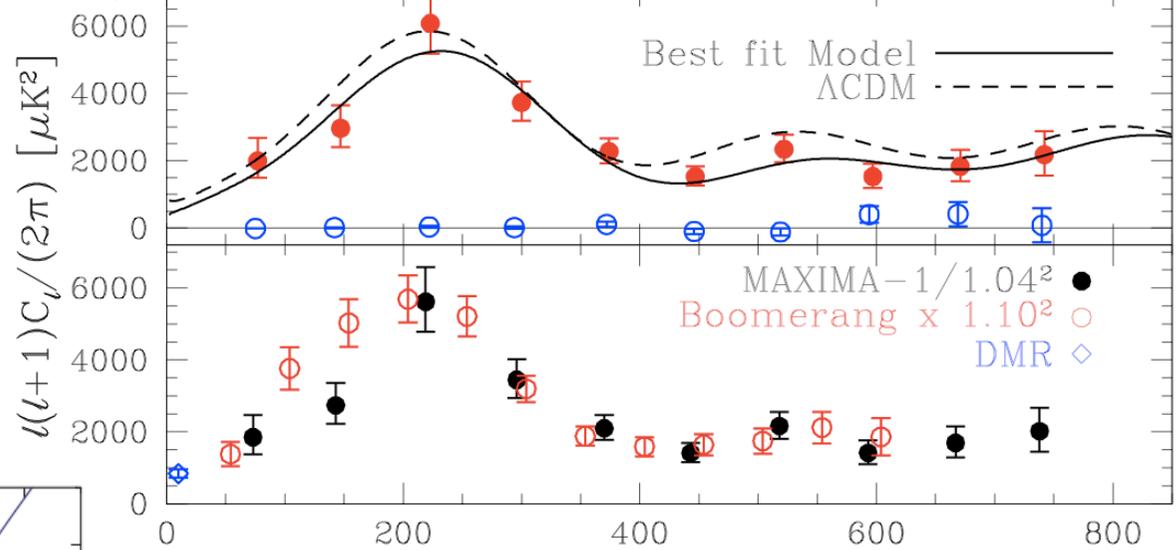
MAXIMA@北木

MAXIMA T map
1 day w/ 3 (of ...)
ometers @ FP100mK

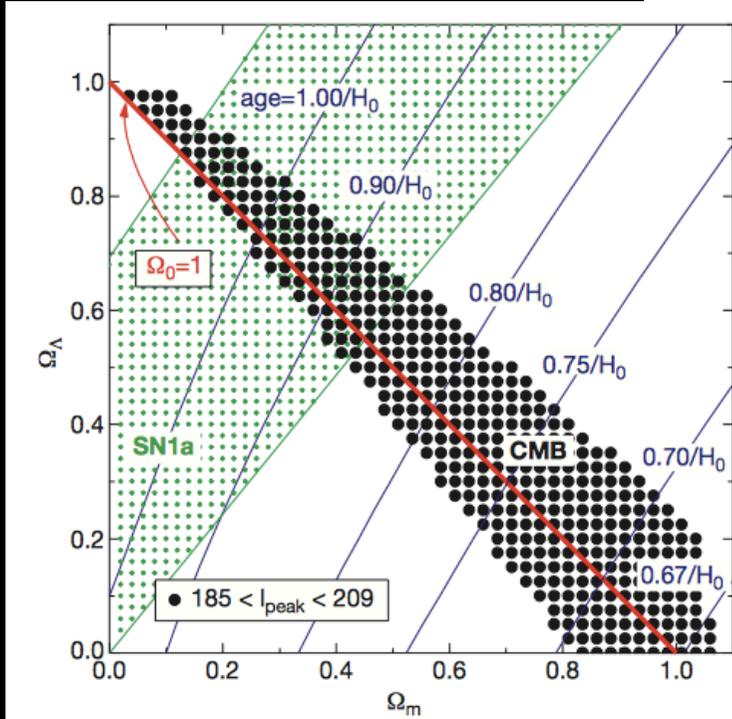
これまでの気球によるCMB観測

気球実験BOOMERANGとMAXIMAは、ほぼ同時期にCMBの温度パワースペクトルを観測。First peakの存在を確立。

Hanany et al. (2000)



P. de Bernardis et al. (2000)



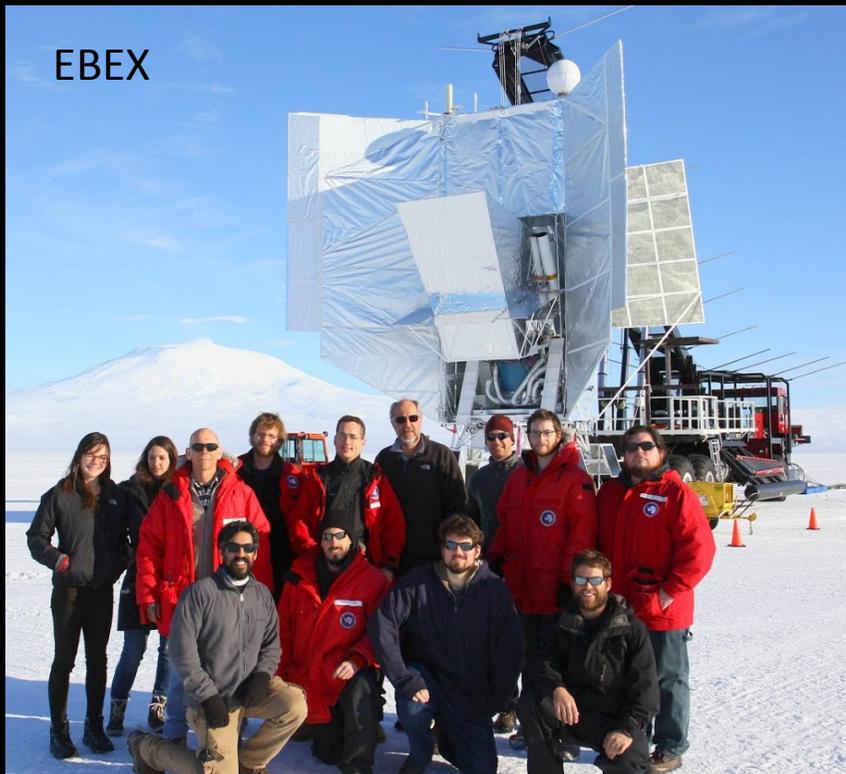
A peak at $l \approx 200$ implies a flat Universe

The location of the first peak in the angular power spectrum of the CMB is well measured by the Boomerang data set. From a parabolic fit to the data at $l = 50$ to 300 in the angular power spectrum, we find $l_{\text{peak}} = (197 \pm 6)$ (1σ error). The parabolic fit does not bias the determination of the peak multipole: applying this method to Monte Carlo realizations of theoretical power spectra we recover the correct peak location for a variety of cosmological models. Finally, the peak location is independent of the details of the data calibration, which obviously affect only the height of the peak and not its location. The height of the peak is $\Delta T_{200} = (69 \pm 4) \pm 7 \mu\text{K}$ (1σ statistical and calibration errors, respectively).

The data are inconsistent with current models based on topological defects (see, for example, ref. 35) but are consistent with a subset of cold dark matter models. We generated a database of cold dark matter models^{36,37}, varying six cosmological parameters (the range of variation is given in parentheses): the non-relativistic matter density, Ω_m (0.05–2); the cosmological constant, Ω_Λ (0–1); the Hubble constant, h (0.5–0.8); the baryon density, $h^2\Omega_b$ (0.013–0.025), the primordial scalar spectral index, n_s (0.8–1.3); and the overall normalization A (free parameter) of the primordial density fluctuation power spectrum. We compared these models with the power spectrum we report here to place constraints on

インフレーション仮説をサポートする状況証拠の1つ。

現在の気球による原始重力波探索



EBEX

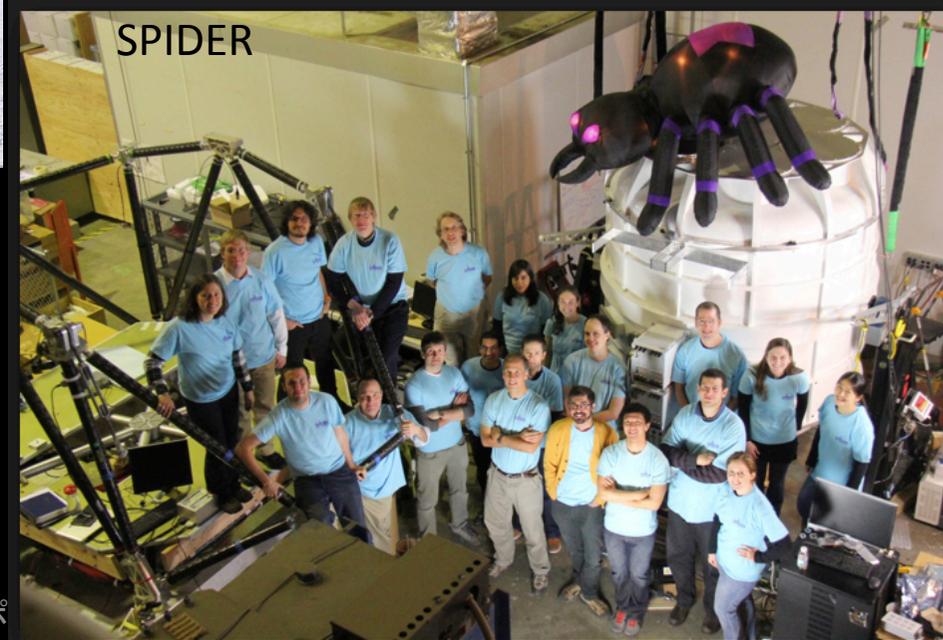
- 目標感度 $r \sim 0.03$
- >1000 TES bolometers
- 観測帯域 150 (8分角), 250, 410GHz
- 南極周回軌道による12日間のデータ取得
- 現在データ解析中

EBEX6K

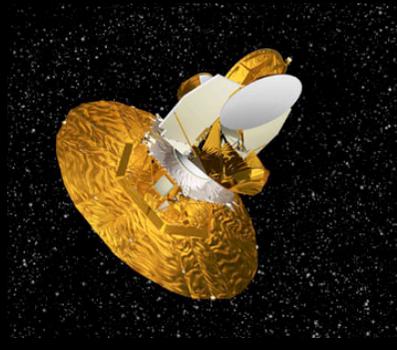
- 目標感度 $r < 0.01$
- 打ち上げ時期2016

SPIDER

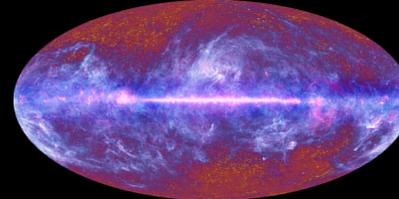
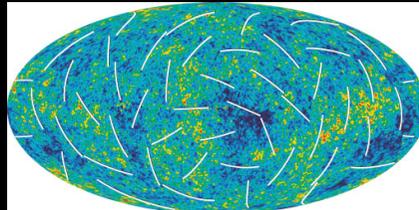
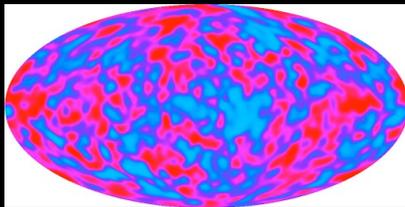
- 目標感度 $r \sim 0.01$
- この(北半球の)冬に南極より打ち上げ予定。



これまでのCMB衛星観測



次世代CMB衛星



COBE (1989)

Band

32-90GHz

Detectors

6 radiometers

Operation temperature

300/140 K

Angular Resolutino

~7°

Orbit

Sun Sych

WMAP (2001)

23-94GHz

20 radiometers

90 K

~0.22°

L2

Planck (2009)

30-857GHz (353GHz)

11 radiometers + 52 bolometers

100 mK

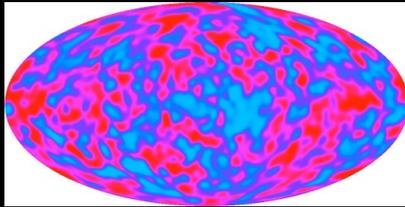
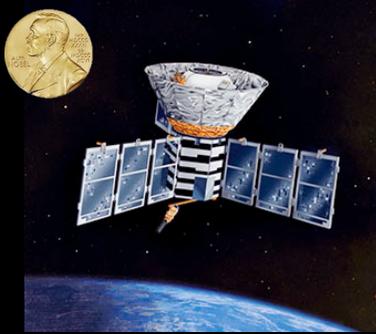
~0.1°

L2

衛星観測のご利益として

- 大気がない故に感度アップ
- 全天観測

これまでのCMB衛星観測



COBE (1989)

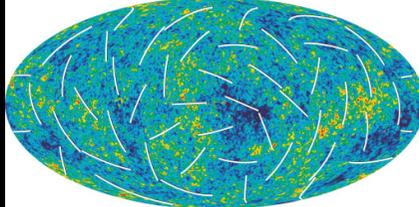
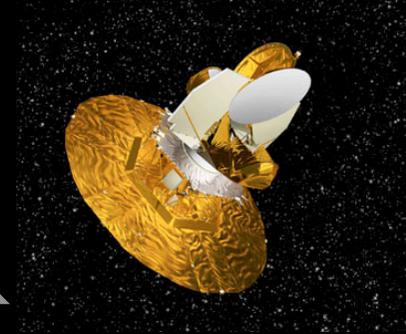
Band
32-9

Dete
6 rad

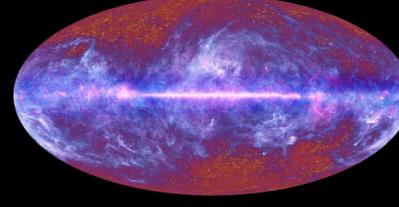
Oper
300/

Angu
~7°

Orbit
Sun



WMAP (2001)



Planck (2009)

30-857GHz (353GHz)

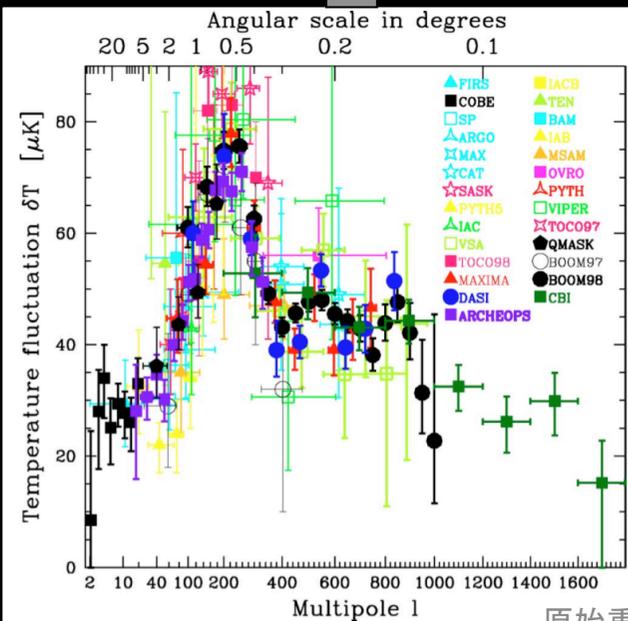
11 radiometers + 52 bolometers

100 mK

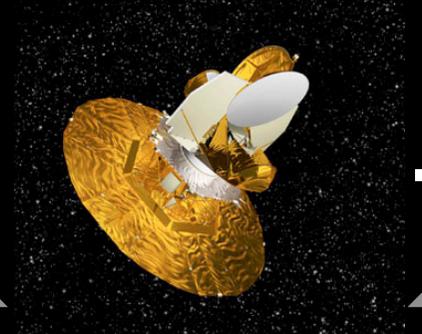
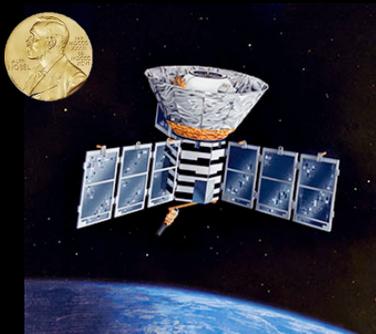
~0.1°

L2

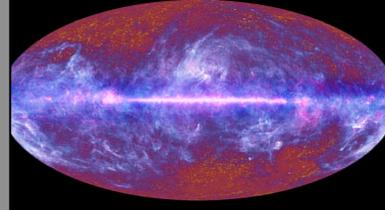
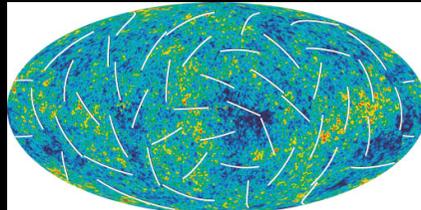
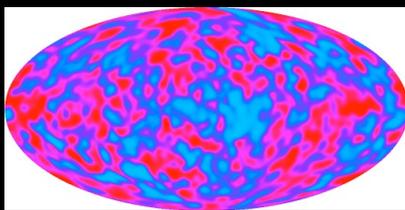
→ 次世代CMB衛星



これまでのCMB衛星観測



次世代CMB衛星



COBE (1989)

WMAP (2001)

Planck (2009)

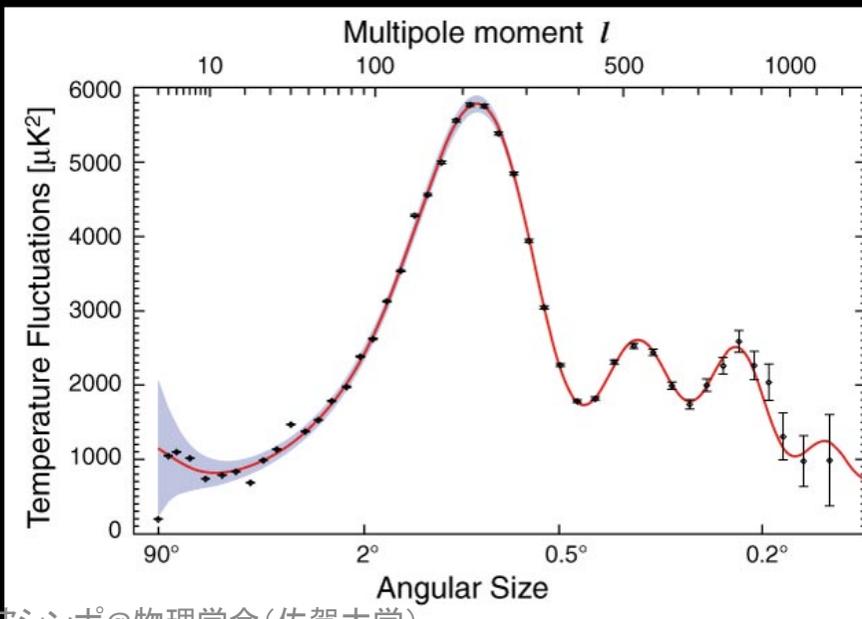
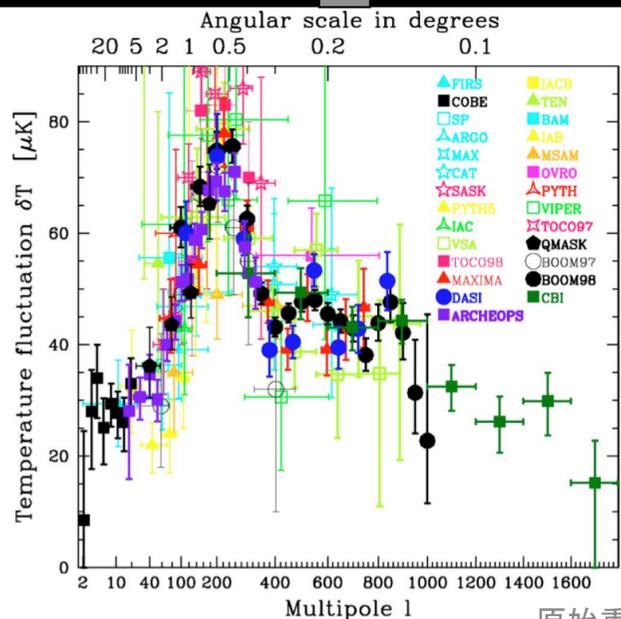
Band
32-9

Dete
6 rad

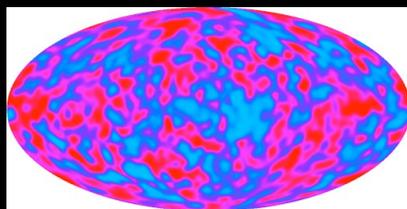
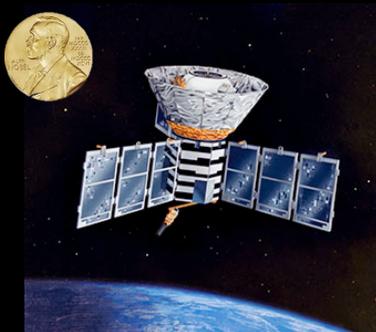
Oper
300/

Angu
~7°

Orbit
Sun



これまでのCMB衛星観測



COBE (1989)

Band

32-90GHz

Detectors

6 radiometers

Operation temperature

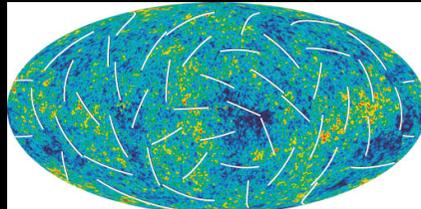
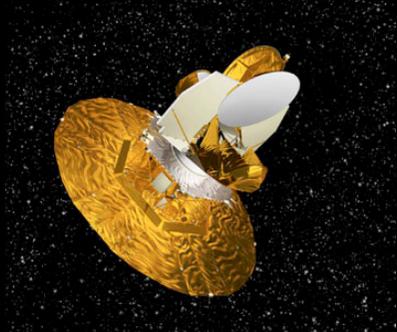
300/140 K

Angular Resolutino

~7°

Orbit

Sun Synch



WMAP (2001)

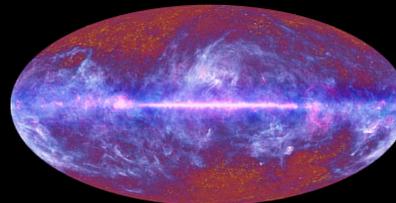
23-94GHz

20 radiometers

90 K

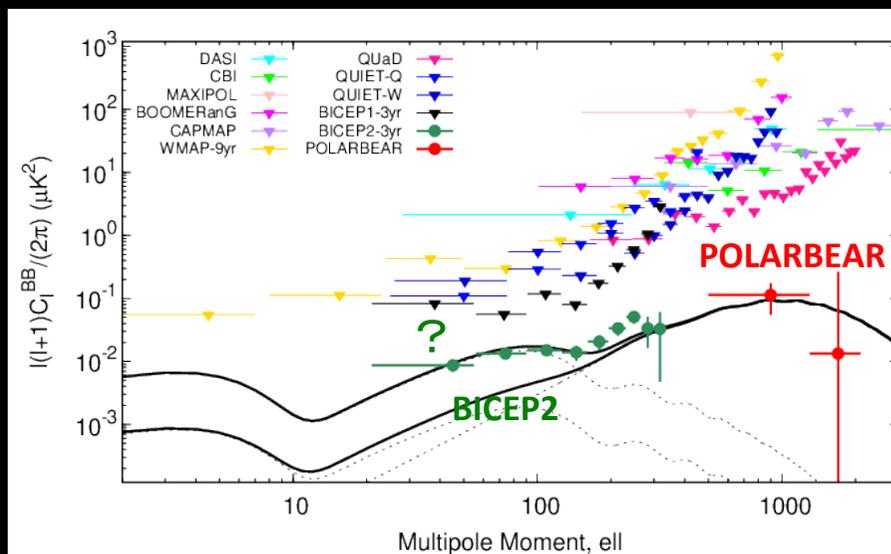
~0.22°

L2

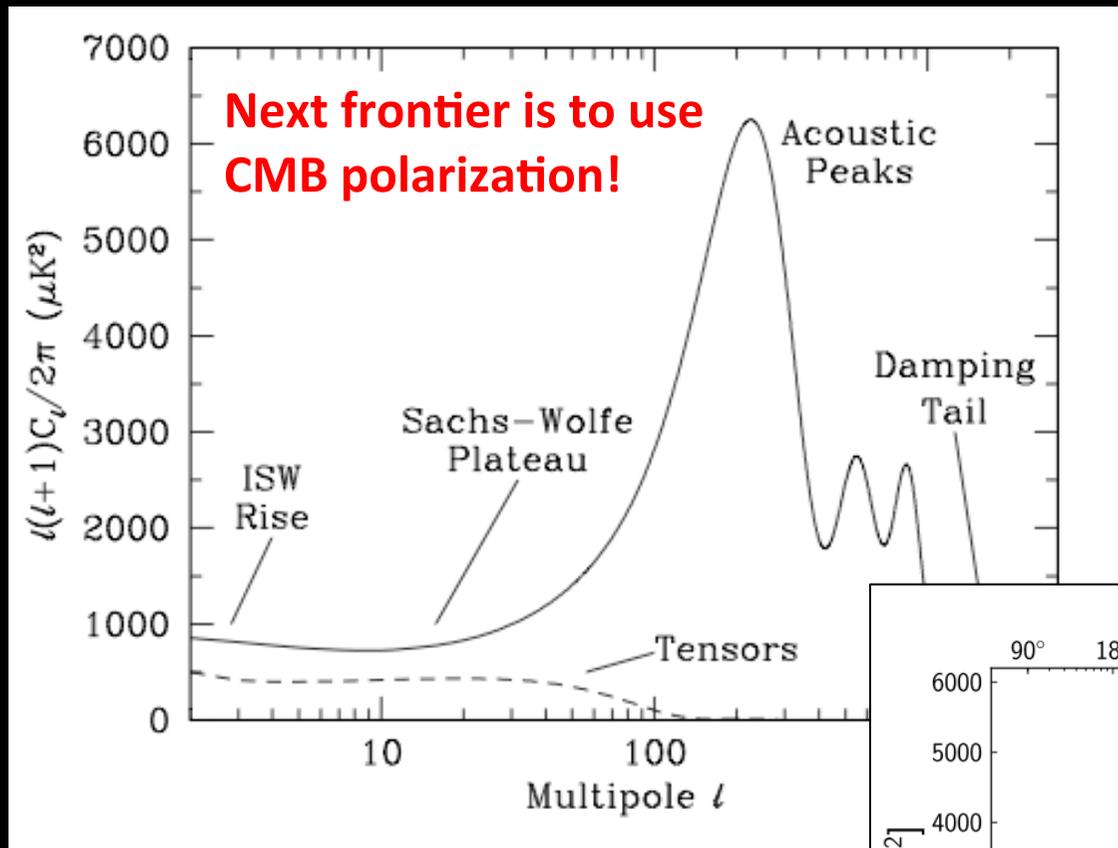


Planck (2009)

→ 次世代CMB衛星



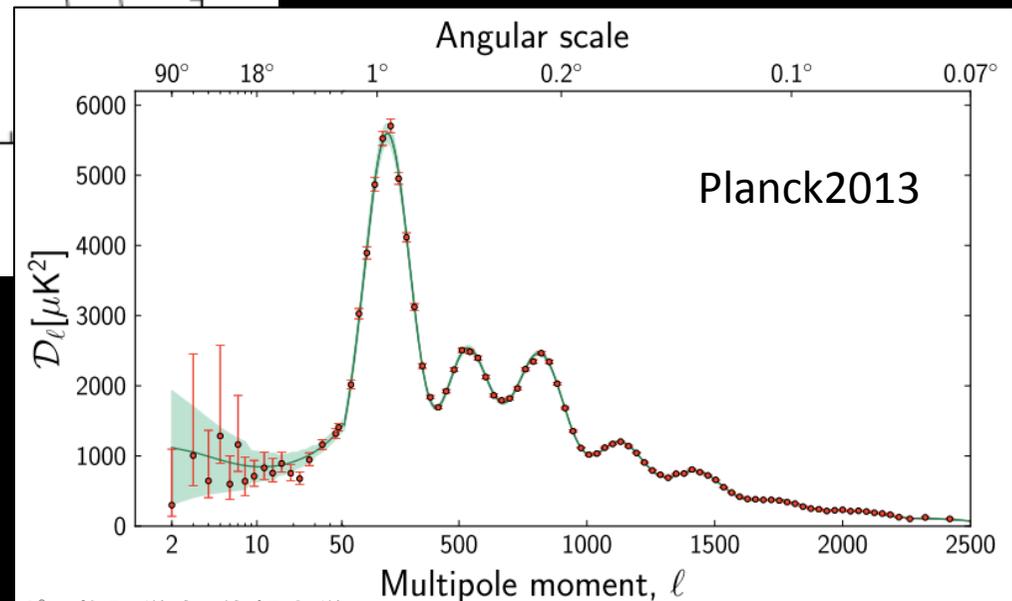
現在の原始重力波探索の制限



CMBの温度揺らぎは原始重力波に対して感度があり。



ただし、先述の限られたサンプル数により、つけられる制限は $r < 0.1$ 程度。



Planck

観測帯域 30GHz~857GHz

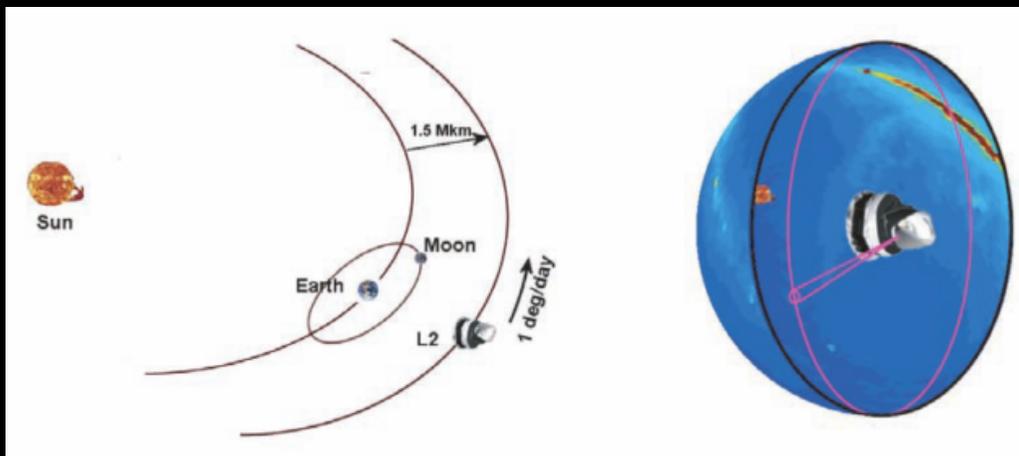
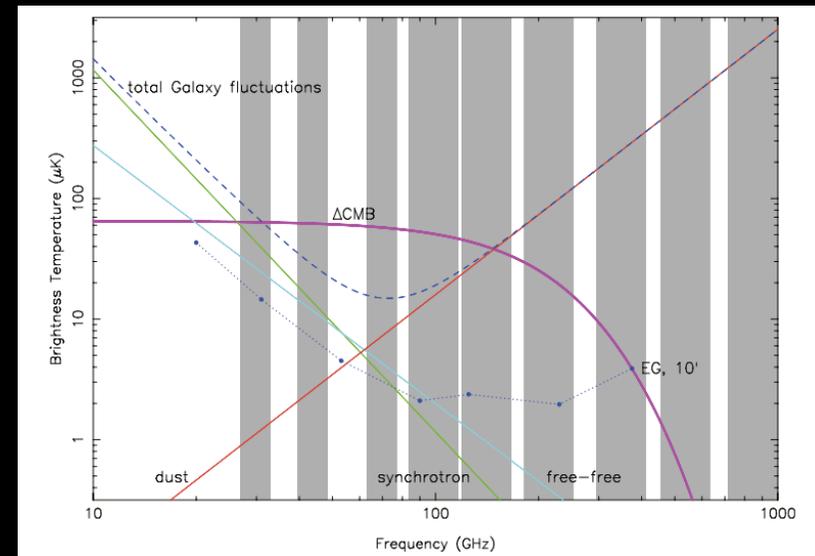
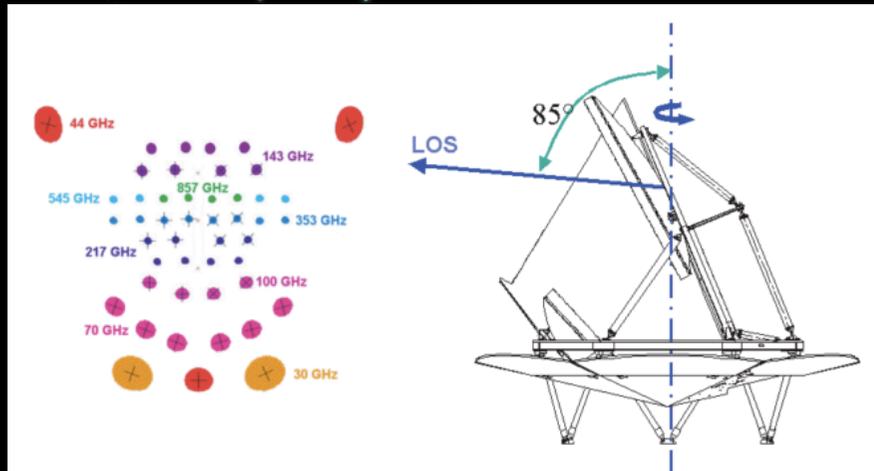
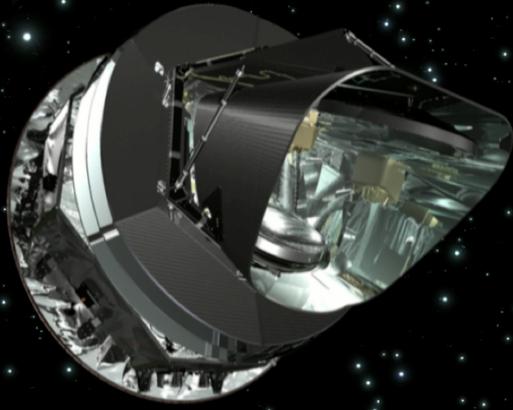
検出器

LFI HEMT(11個)

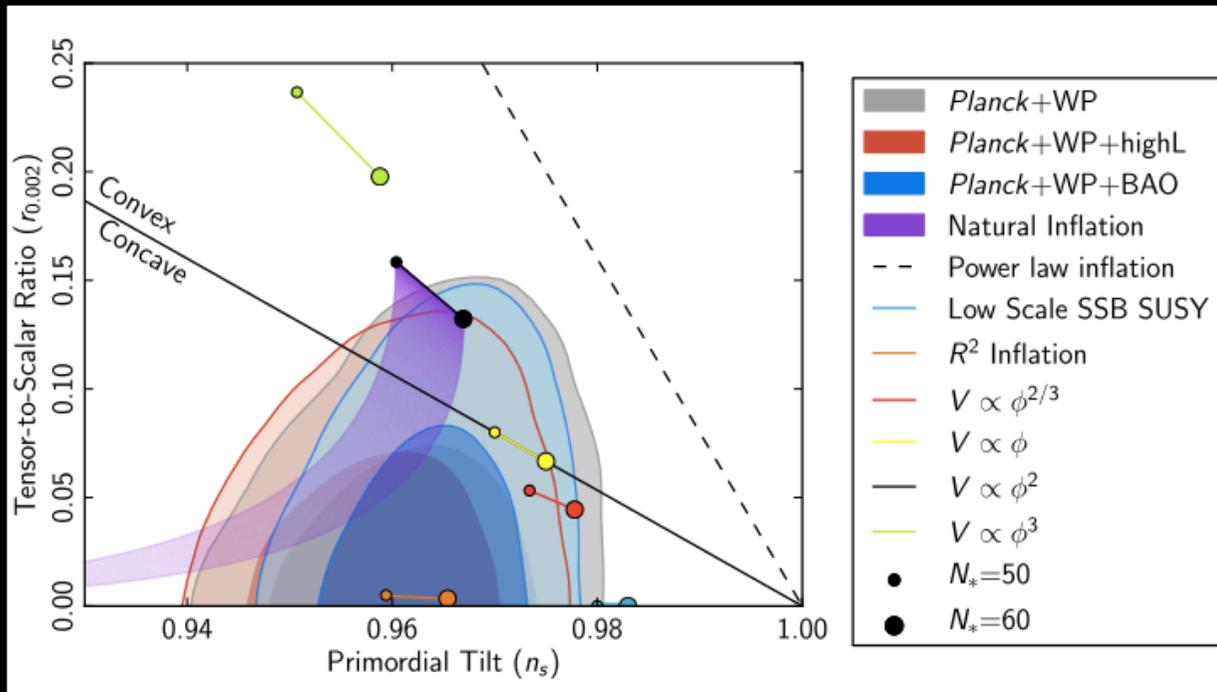
HFI Bolometer(52個、そのうち偏光感度があるものは32個)

角度分解能 7分角 (@143GHz)

観測場所 L2 (WMAPと同じ)



Planckによる初期条件への制限



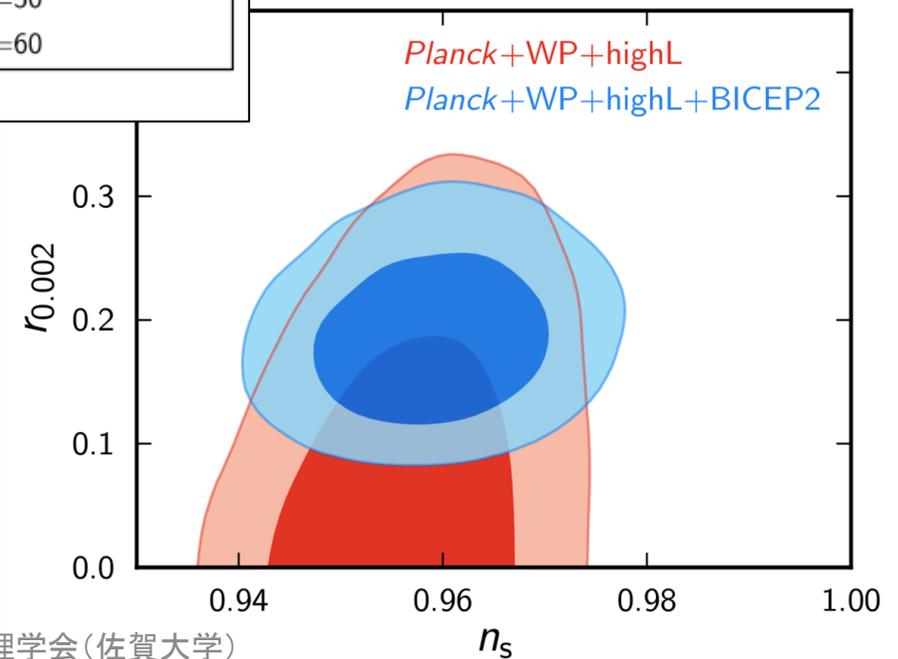
温度揺らぎを用いたインフレーション探索の上限
Planck+WMAP+highL
 $r < 0.11$ (95% C.L.)

From Planck2013 results I

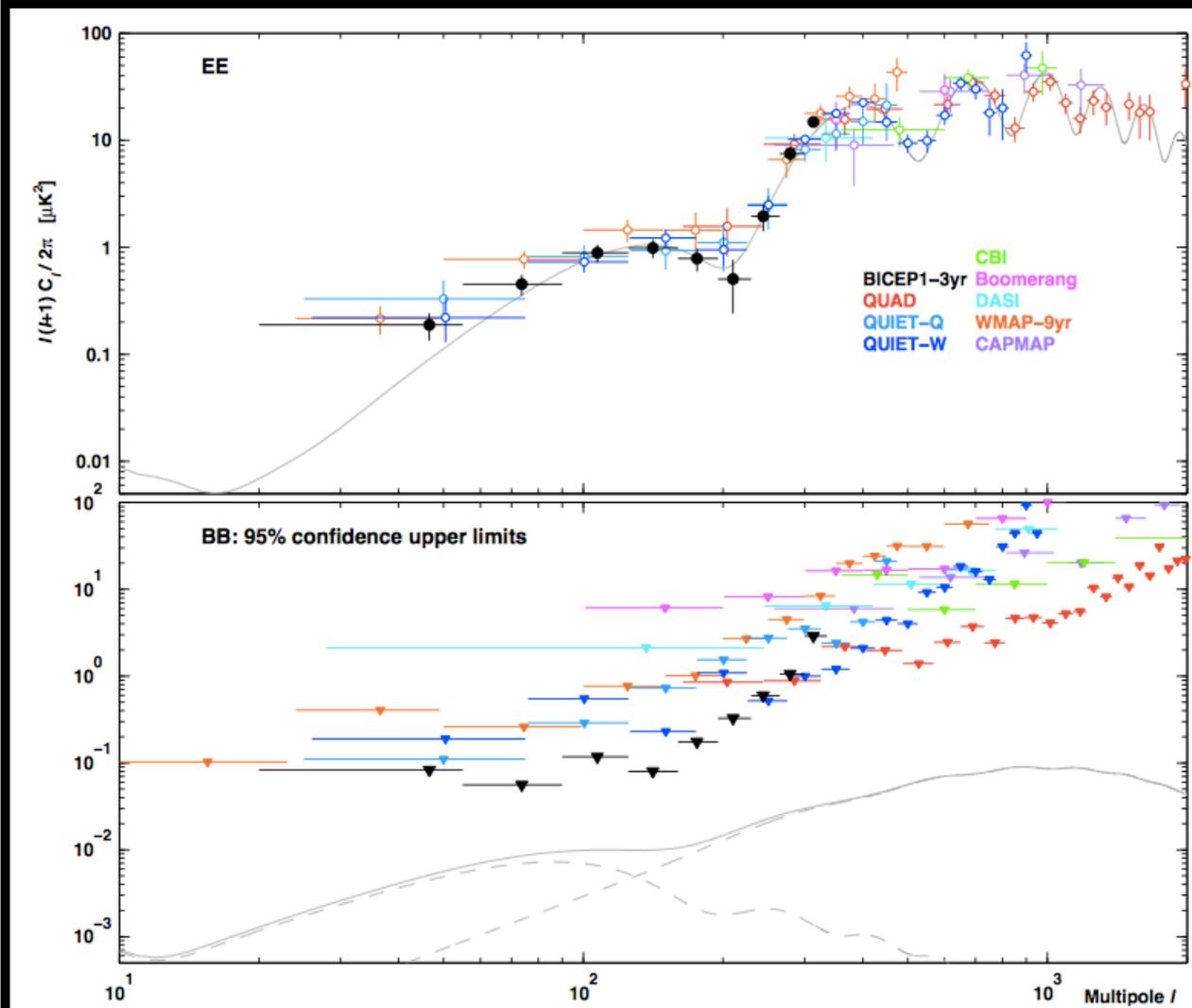
$$\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k) = A_s \left(\frac{k}{k_*} \right)^{n_s - 1 + \frac{1}{2} \frac{dn_s}{d \ln k} \ln(k/k_*) + \frac{1}{6} \frac{d^2 n_s}{d \ln^2 k} (\ln(k/k_*))^2 + \dots}$$

$$\mathcal{P}_{\mathcal{T}}(k) = A_t \left(\frac{k}{k_*} \right)^{n_t + \frac{1}{2} \frac{dn_t}{d \ln k} \ln(k/k_*) + \dots},$$

From Planck2013 results XXII

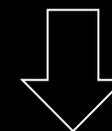


2013年までのB-mode観測状況 2



温度揺らぎを用いたインフレーション探索の上限
Planck+WMAP+high/
 $r < 0.11$ (95% C.L.)

偏光観測による制限
BICEP-I three year data,
 $r < 0.70$. Barkats et al. (2013)



偏光を用いた探索が世界的にガチンコで競争中。

BICEP-I three year data Barkats et al. (2013)
原始重力波シンポ@物理学会(佐賀大学)

2013年末から大きな進展

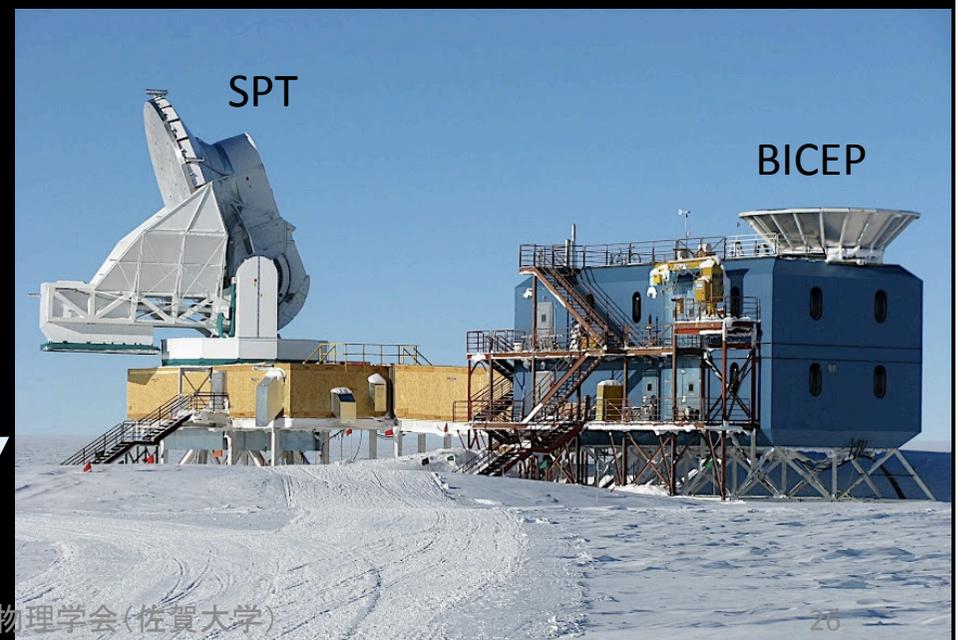
POLARBEAR @ Chile



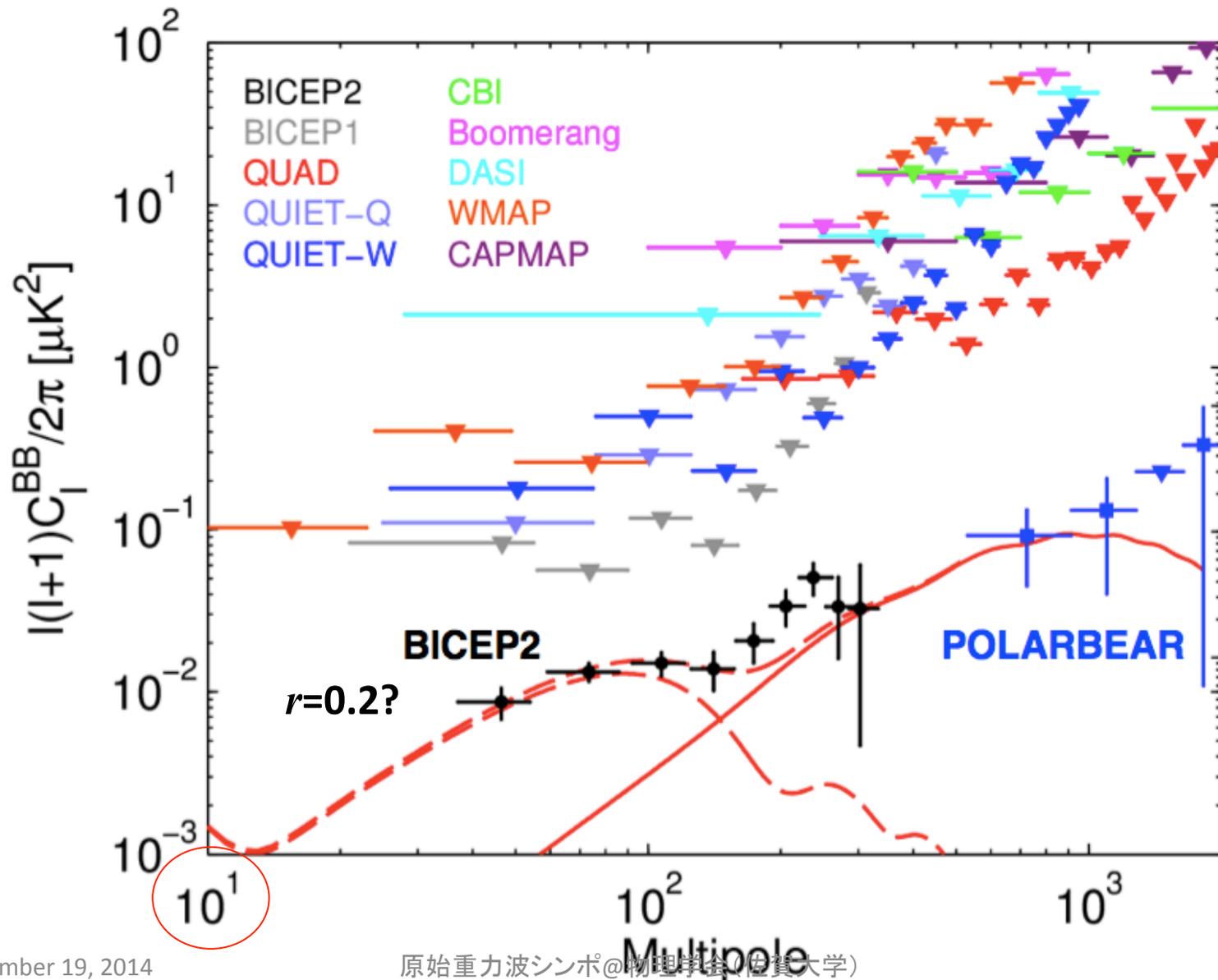
- 角度分解能: 3.5 arcmin.
- 観測帯域: 150GHz ($\lambda \sim 2\text{mm}$)
- 検出器: 1274 Transition Edge sensor bolometers
- 変調: Sky + HWP
- アタカマ砂漠チリ (5200m)
- 2年間分の観測

- 角度分解能: 30 arcmin.
- 観測帯域: 150GHz ($\lambda \sim 2\text{mm}$)
- 検出器: 512 TES
- 変調: "Sky" + telescope
- 南極点 ($\sim 3000\text{m}$)
- 3年間分の観測

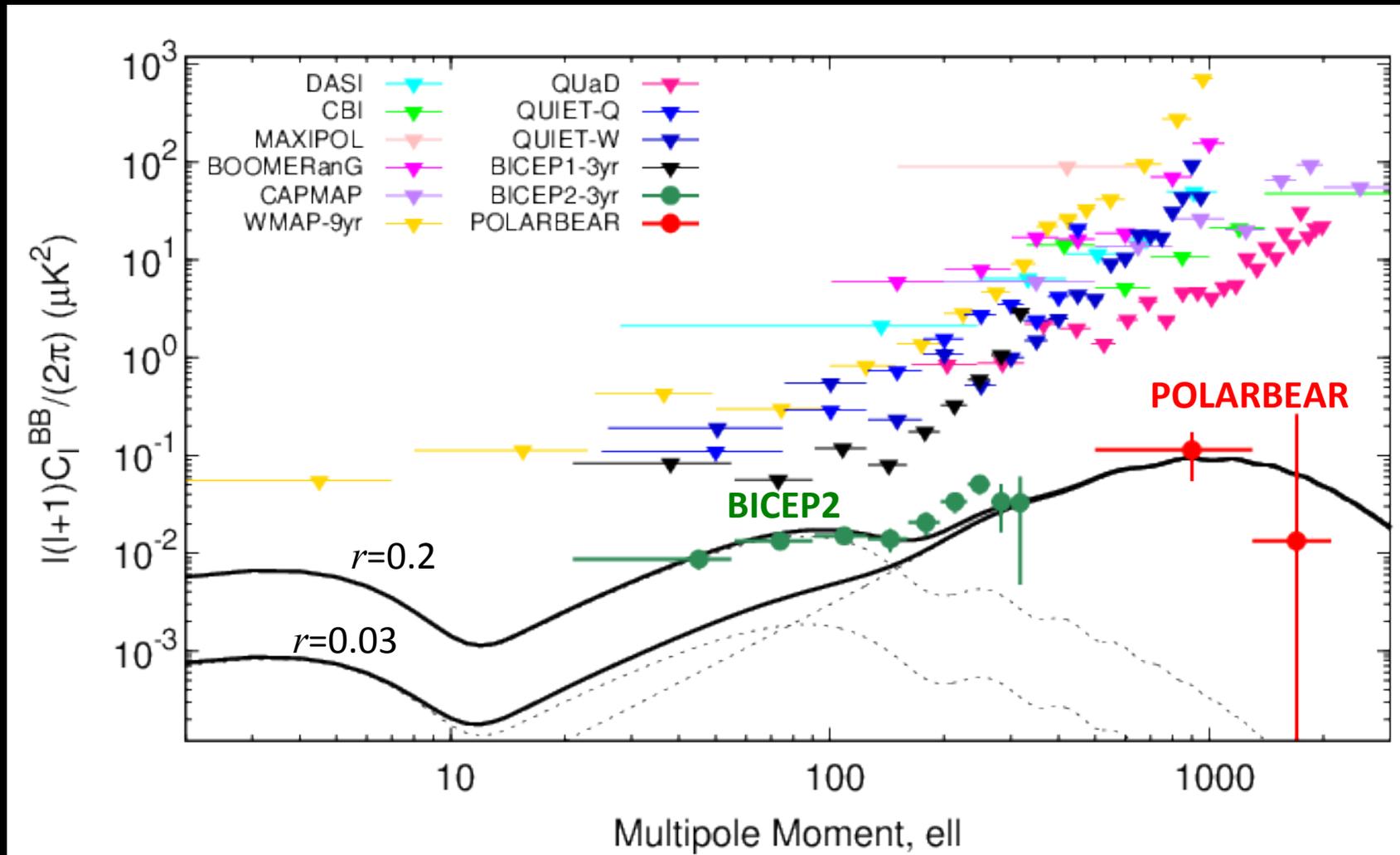
BICEP2 @ South pole



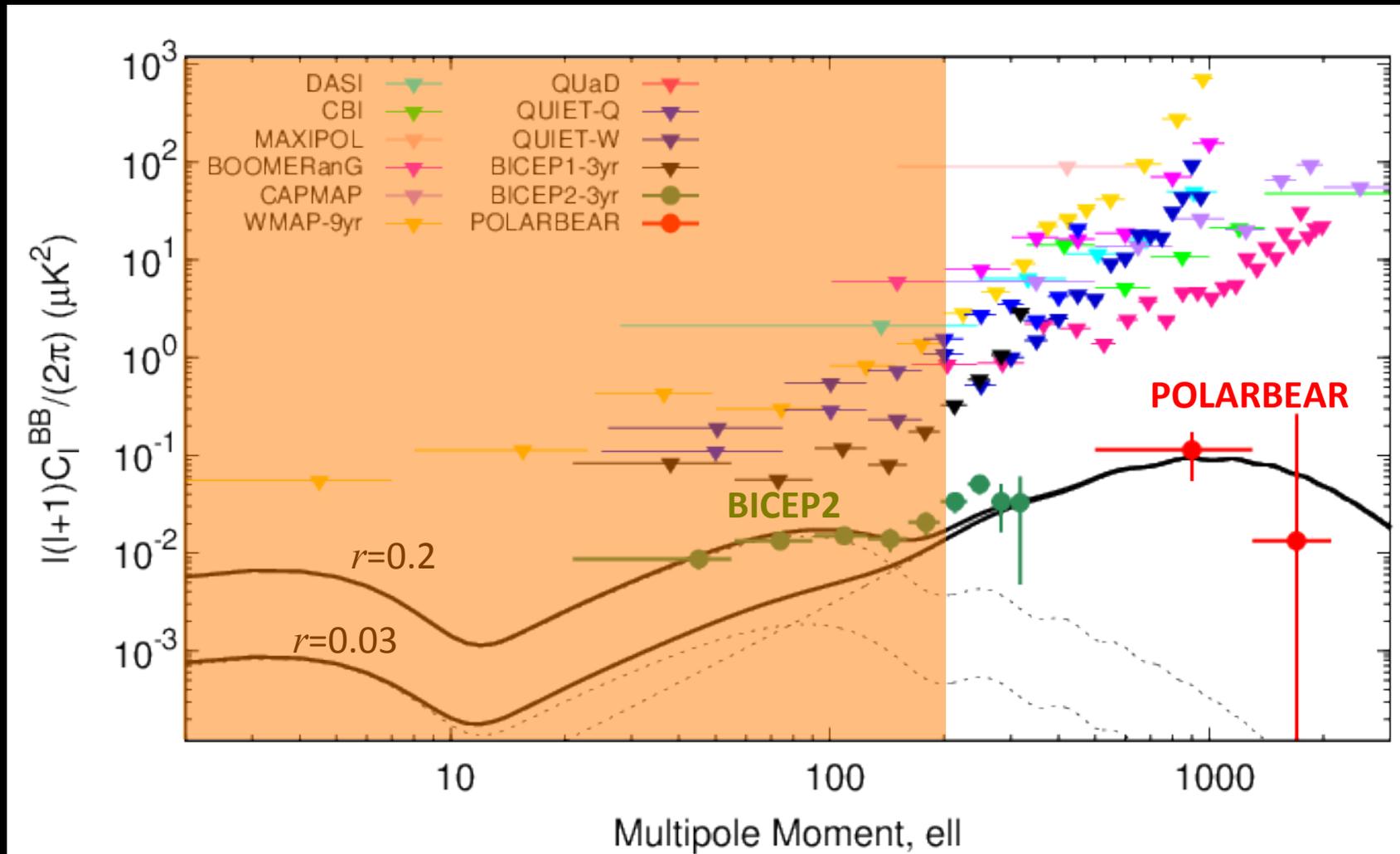
POLARBEAR、BICEP2の結果後



POLARBEAR、BICEP2の結果後



POLARBEAR、BICEP2以降の期待



海外の情勢

Planck後の衛星によるCMB偏光を用いた原始重力波探索

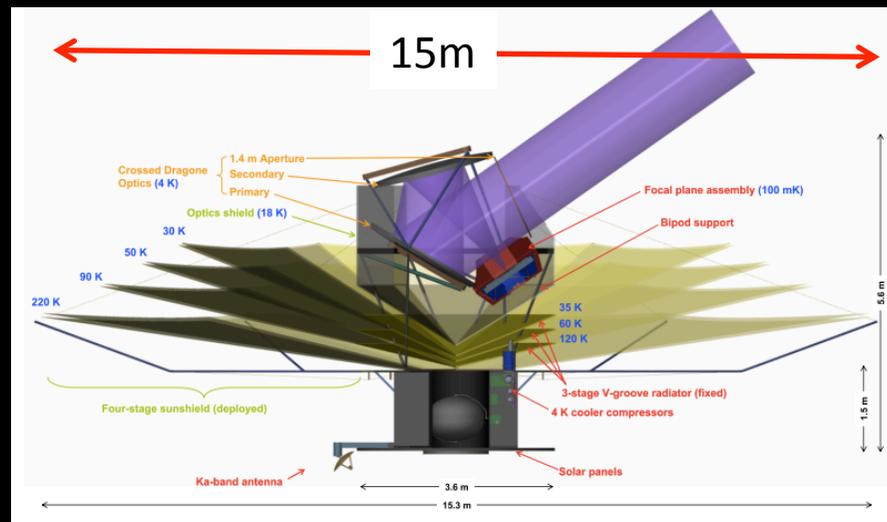
- アメリカ(NASA)
 - EPIC
 - PIXIE
- ヨーロッパ(ESA)
 - SAMPAN、B-pol、COreE、PRISM、COreE+
- 日本
 - LiteBIRD

アメリカ EPIC-IM

JPLを中心とした計画。
Bock et al. 2009

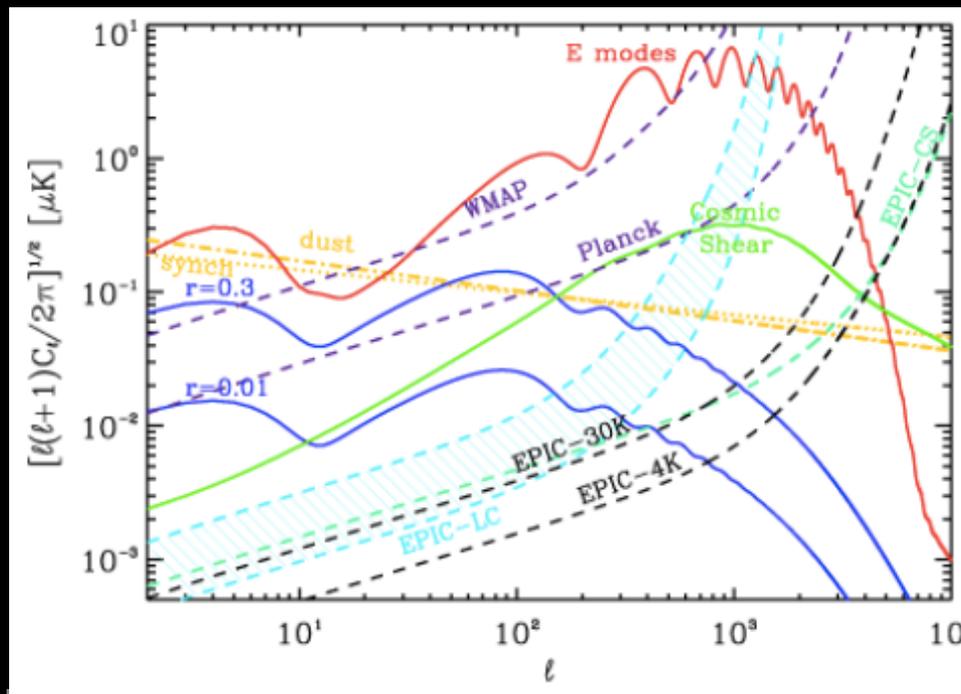


打ち上げ後
シールドを展開



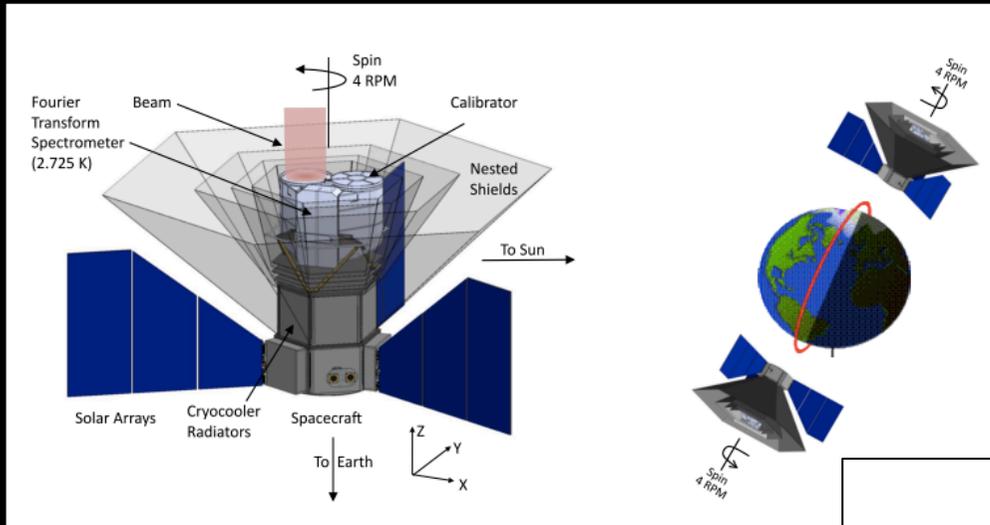
感度 $r \sim 0.001$ を探索
 角度分解能 5.6分角@150GHz
 観測帯域 30-850GHz 9バンド
 検出器 11094個 (bolometer or MKID)
 冷却光学系 4K

原始重力波探索だけではなくて、
天文学も幅広く。



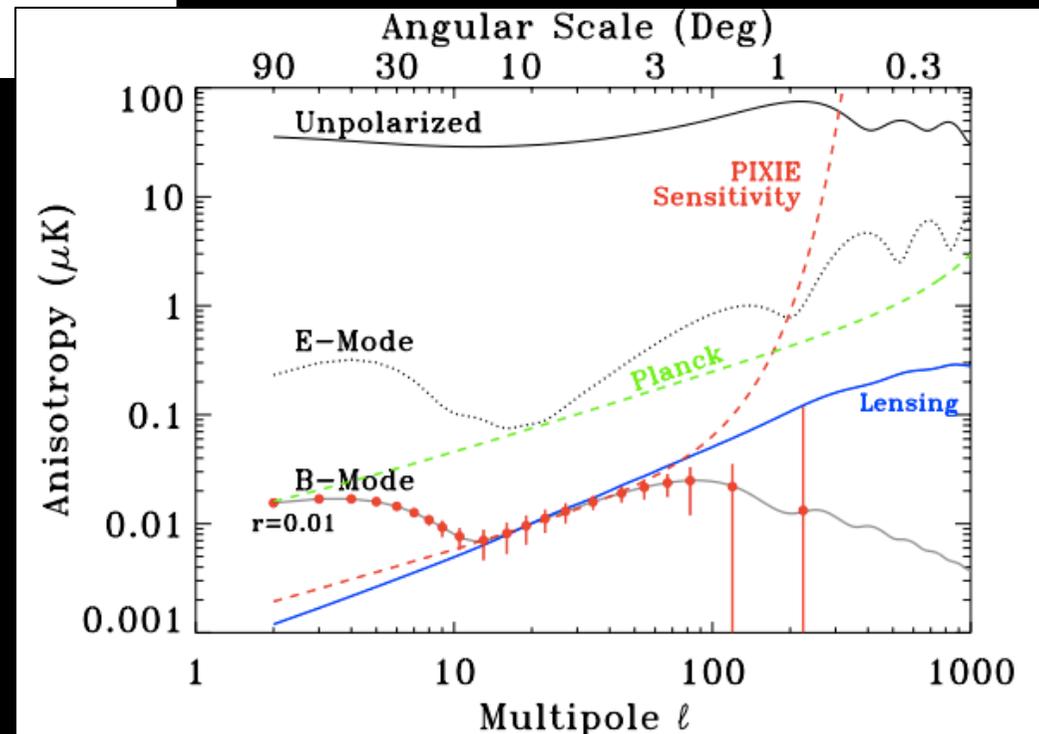
アメリカ PIXIE

NASA Goddardを中心とした計画。



感度 $r \sim 0.001$ を探索
角度分解能 2.6° top-hat
観測帯域 30GHz-6THzを分光
検出器 4個
冷却光学系 2.725K

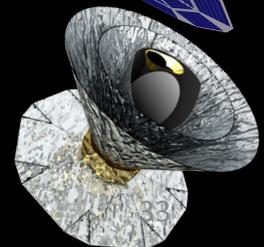
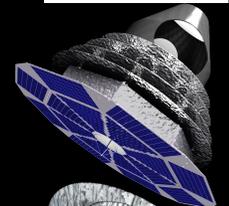
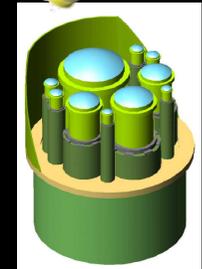
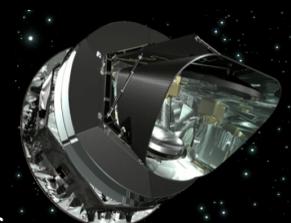
原始重力波探索だけではなくて、スペクトル測定から宇宙再電離等についても探索。



Kogut et al. (2011)

CMB observations from space in Europe

- **PRESENT: Planck:** a great success (top and 5 out of the 10 most cited papers of 2013).
 - near-ultimate CMB temperature anisotropies mission from space
 - much science beyond the primary anisotropy Cl spectrum and parameters
 - CMB science: lensing; anomalies; primordial non-gaussianity
 - Non CMB cosmology: galaxy clusters; Cosmic Infrared Background...
 - Astrophysics: interstellar medium
 - Non-CMB science: 3/4 of the science papers, 1/2 of the citations
- **FUTURE:** Several proposals for CMB polarisation between 2005 and now
 - Initially focussed mostly on primary B modes (SAMPAN, BPol)
 - **Concept evolving:** the case for polarisation from space is very strong for astrophysics, cosmology, and fundamental physics (COrE, PRISM)
 - Now: **COrE+**, the near-ultimate CMB polarisation mission from space.
 - Primary objective: primordial B-modes, N_{eff} , Σm_ν , Y_{He} , plus all extensions to the standard model of cosmology impacting CMB maps and spectra.



CMB observations from space in Europe

- ESA M4 call for a medium mission. Proposal due Jan. 15th. Budget 450 M€ (ESA) + National contributions for the science payload. Launch 2025.
- Strong interest and support in European countries for such a future CMB mission, e.g. top in France prospective plan for space science.
- **COrE+** minimal concept
 - CMB B-modes + lensing science for cosmology and fundamental physics.
 - $\approx 6'$ resolution, $\approx 3 \mu\text{K}$. arcmin CMB polarisation sensitivity after foreground subtraction. $\approx 1.3\text{m}$ aperture telescope
 - Many bands (more than 15) for component separation covering 60-600 GHz; ISM physics.
 - budget: $\approx 550 \text{ M€}$ (450 M€ ESA + 100 M€ European countries)
- **COrE+** preferred concept
 - Near-ultimate CMB polarisation space mission
 - Extensive astrophysical cosmology (clusters) and extragalactic astrophysics; superior ISM science (with full sky resolution bridging with Herschel in small fields, at highest frequencies)
 - ≈ 3 to $4'$ resolution, $\approx 1.5 \mu\text{K}$. arcmin CMB polarisation sensitivity. $\approx 2\text{m}$ aperture telescope.
 - budget: ≈ 700 to 750 M€ with external partners.

どの感度を目指すか

- 多くのインフレーションモデルが $r > 0.01$ を予言 $\rightarrow > 10\sigma$ で発見
- シンプルなインフレーションモデル (single-large-field slow-roll models) は Lyth の関係式より $r > 0.002$ 。
$$r = \frac{1}{N^2} \left(\frac{\Delta\phi}{m_{\text{pl}}} \right)^2 \approx 2 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\Delta\phi}{m_{\text{pl}}} \right)^2$$
- $\delta r < 0.001$ の感度で探索し、何も検出しない場合はシンプルなモデルを全て棄却。
- もし地上/気球で r の発見、また兆候が見えたら、衛星ではそのパワースペクトルを詳細に測定。



代表的なインフレーションモデルを探索する

- r に対する要求は

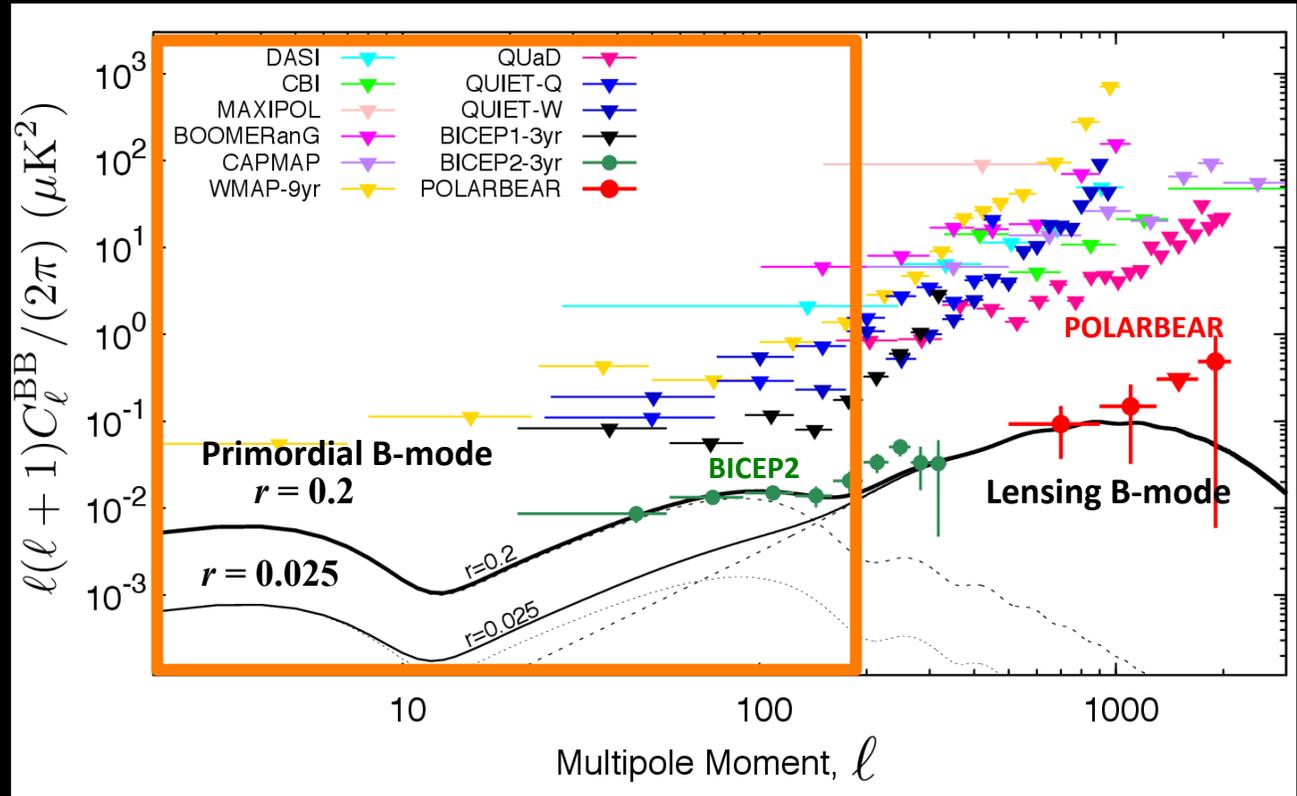
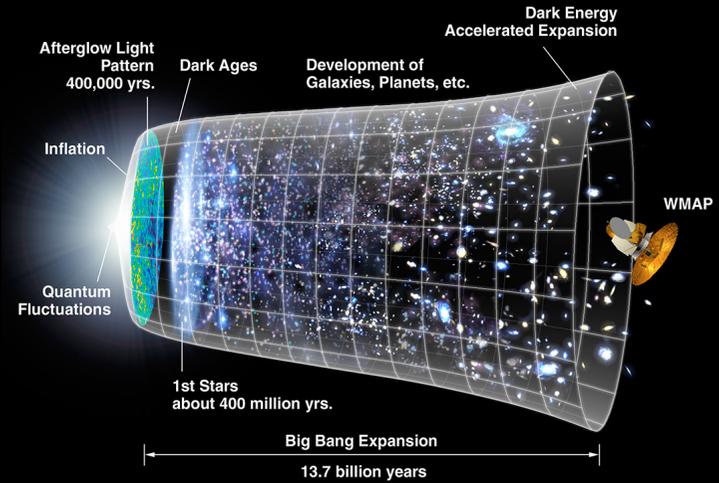
(統計 ⊕ 系統誤差 ⊕ 前景放射 ⊕ 重力レンズ)

$$\delta r < 0.001$$

LiteBIRD

次世代CMB偏光観測衛星LiteBIRDはインフレーション由来のB-mode偏光の探索に特化した衛星である。テンソル・スカラー比にて0.002の感度を 2σ で実現する衛星設計を現在検討中である。

$r=0.002$ を 2σ の感度で測定。
 $r\sim 0.1$ の場合、 $l < 200$ まで高いSNでパワースペクトルを測定。



Plot made by Y. Chinone

LiteBIRD ワーキンググループ

>70 members, 国際的/学際的

高エネ研

Y. Chinone
K. Hattori
M. Hazumi (PI)
M. Hasegawa
Y. Hori
N. Kimura
H. Morii
R. Nagata
S. Oguri
N. Sato
T. Suzuki
O. Tajima
T. Tomaru
H. Yamaguchi
M. Yoshida

総合研究大学

Y. Akiba
Y. Inoue
H. Ishitsuka
Y. Segawa
H. Watanabe

大阪大学

S. Takakura

JAXA

H. Fuke
I. Kawano
H. Matsuhara
T. Matsumura
K. Mitsuda
T. Nishibori
K. Nishijo
A. Noda
S. Sakai
Y. Sato
K. Shinozaki
H. Sugita
Y. Takei
T. Wada
N. Yamasaki
T. Yoshida
K. Yotsumoto

岡山大学

K. Ishino
A. Kibayashi
Y. Kibe
Y. Yamada

NIFS

S. Takada

UC Berkeley

W. Holzapfel
A. Lee (US PI)
P. Richards
A. Suzuki

McGill U.

M. Dobbs

LBNL

J. Borrill

筑波大学

M. Nagai

Kavli IPMU

N. Katayama
H. Nishino

横浜国立大学

K. Mizukami
S. Nakamura
K. Natsume

大阪府立大学

H. Ogawa
K. Kimura
M. Kozu
N. Okada
M. Inoue

MPA

E. Komatsu

東北大学

K. Ishidoshiro
M. Hattori
T. Morishima

甲南大学

I. Ohta

埼玉大学

M. Naruse

国立天文台

K. Karatsu
T. Noguchi
Y. Sekimoto

NICT

Y. Uzawa

理研

K. Koga
S. Mima
C. Otani

X-ray astrophysics
(JAXA)

IR astronomy
(JAXA)

JAXA engineering、SE
Mission Design Support Group

CMB exp. (Berkeley,
KEK, McGill, Eiichiro)

Superconductivity detector
(Berkeley, Okayama, KEK,
NAOJ, Riken etc.)

ミッションデザインパラメータ

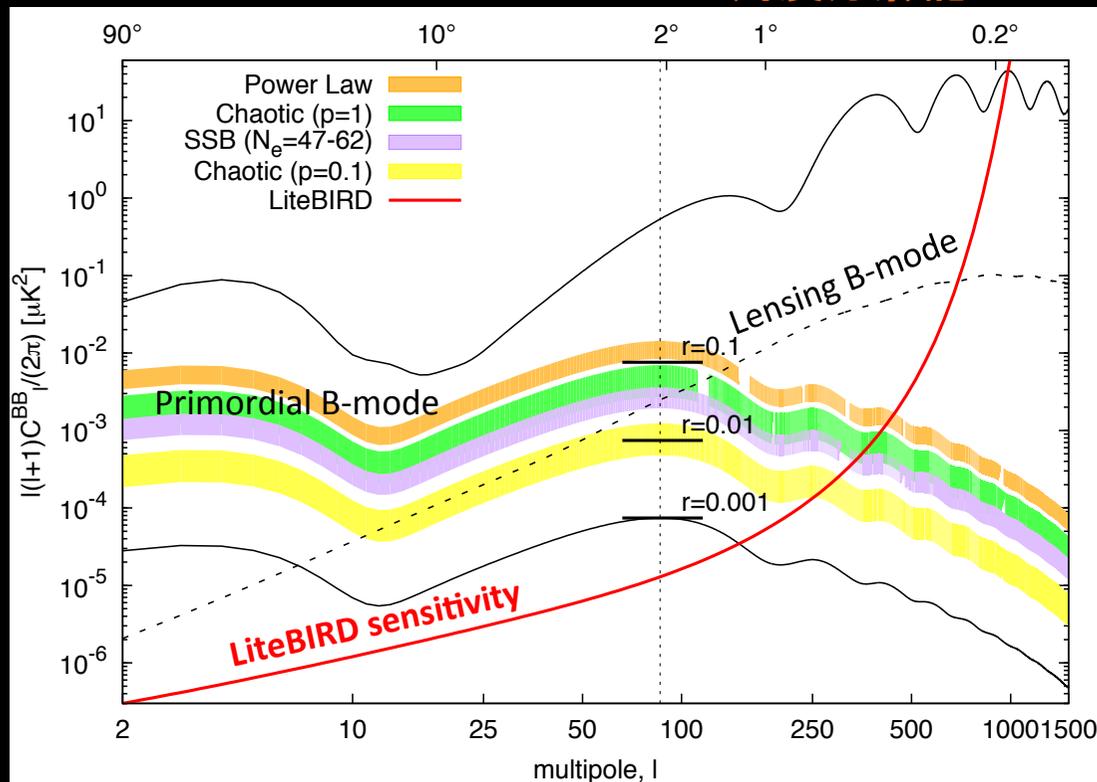
The mission sensitivity relies on a few key parameters.

科学目的

LiteBIRDは代表的なインフレーションモデル (large single-field slow-roll model) を $\delta r < 0.001$ の感度で探索。

角度分解能

アレイ感度



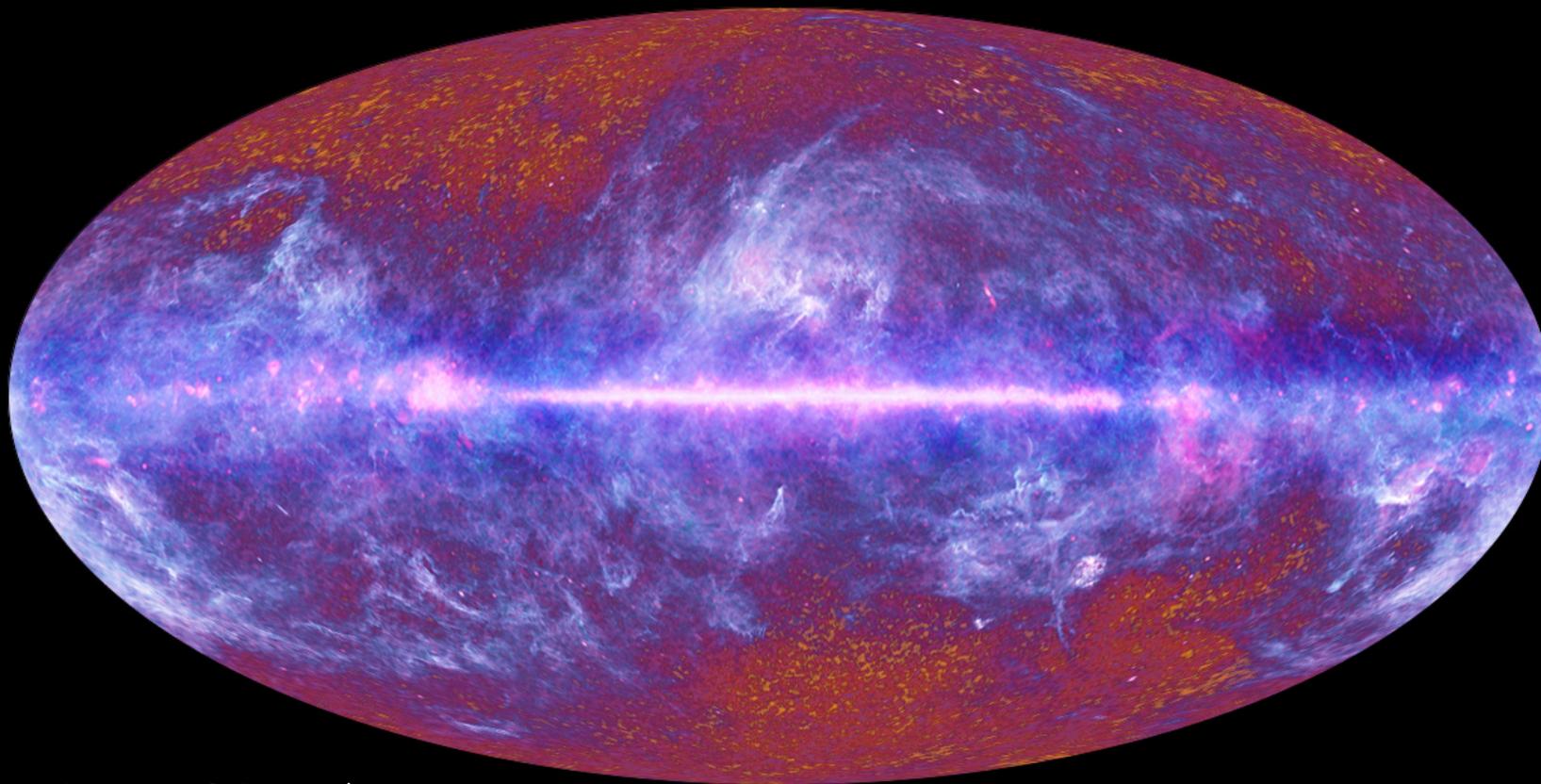
空の領域

M. Hazumi et al. 2012

要求される装置概要

- 周波数帯域 (60-270 GHz) → 広帯域 / 多帯域観測
- 角度分解能: 全観測帯域で1°以下。 → < 1 m 望遠鏡
- 感度: 2 $\mu\text{K} \cdot \text{arcmin}$ → kilo pixel 超伝導検出器アレイ
- 全天観測 → スピン観測

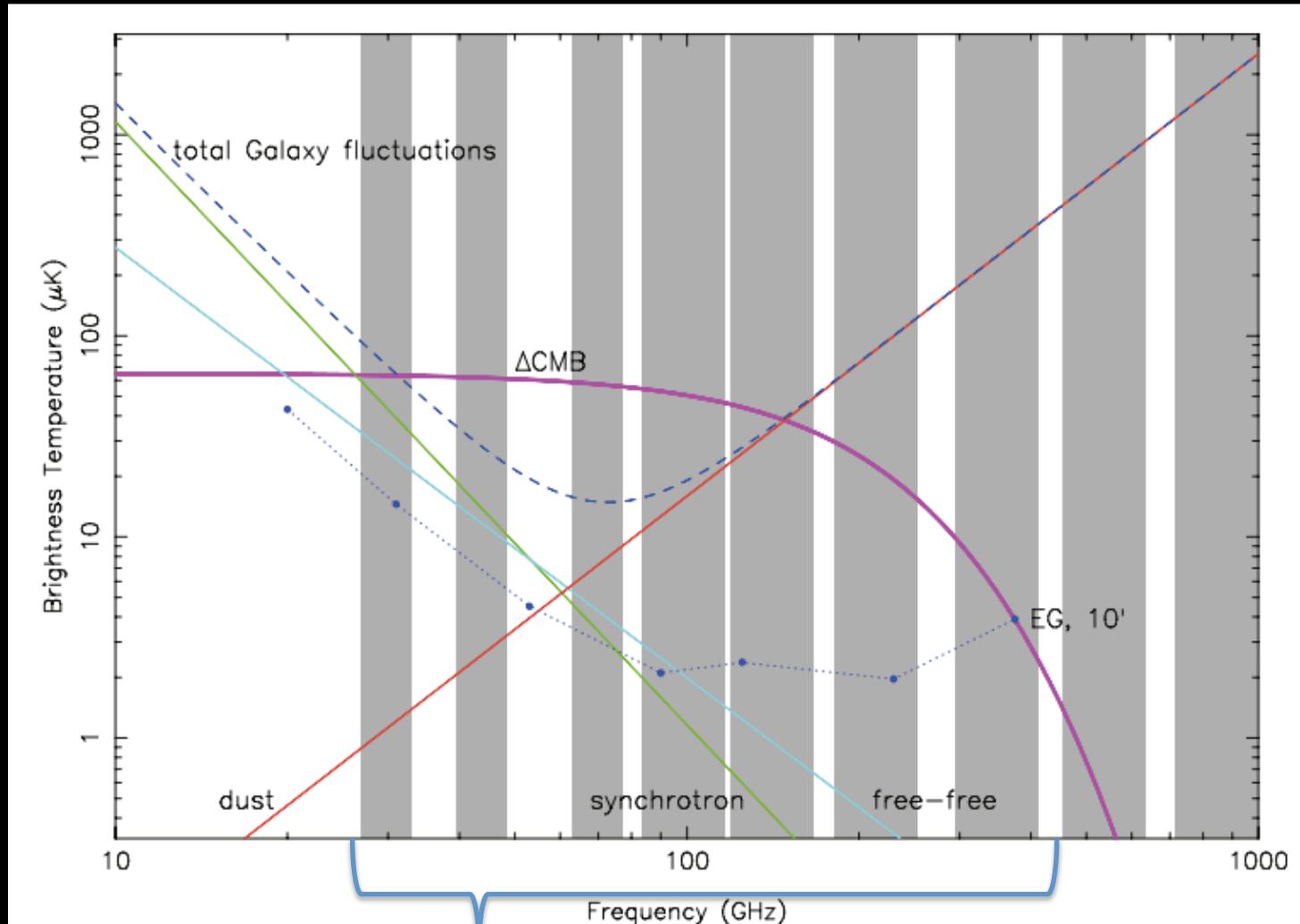
Planck衛星によるミリ波全天マップ



これは温度揺らぎ
偏光の結果はまだ。今年中との話し。

Planck衛星 2010年7月

Planckの観測帯域

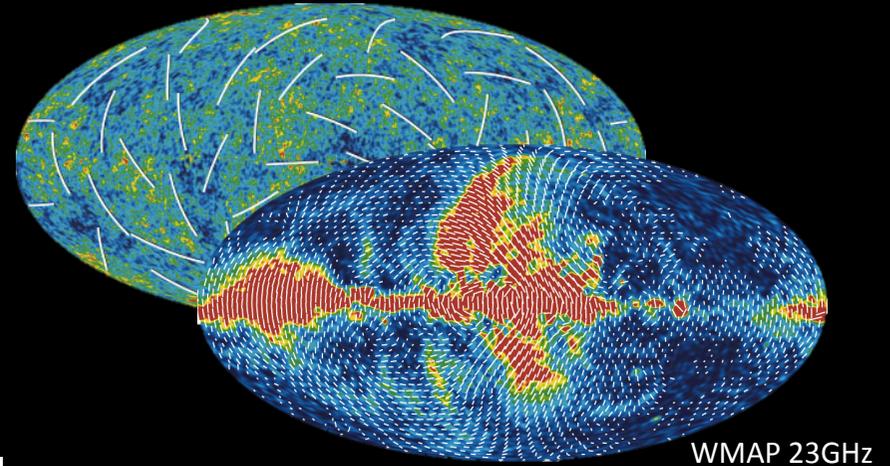


偏光感度有り

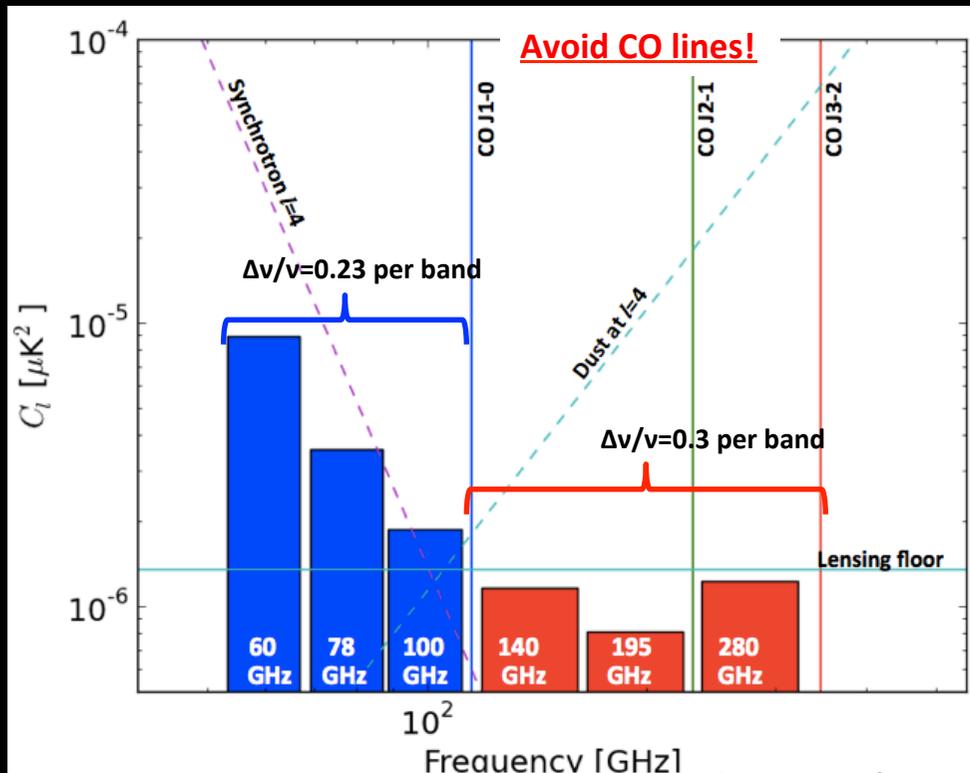
観測帯域

N. Katayama and E. Komatsu (ApJ 737, 78 (2011), arXiv:1101.5210) はピクセルベースにてテンプレート法を用いた前景放射除去を発表。この研究に基づき、指標として以下の観測帯域と設定。

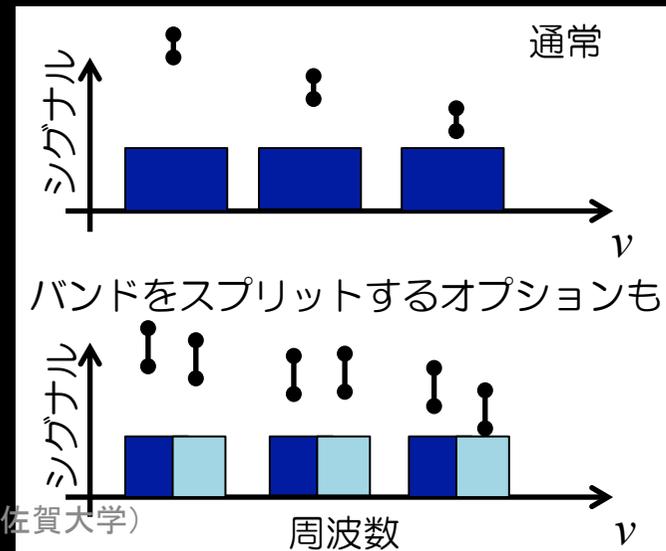
→ ≥ 5 bands in 50-270GHz



WMAP 23GHz



- 結果として以下の6バンドを想定。
60, 78, 100, 140, 195, 280 GHz.
- CO輝線はコンタミの原因なので避ける。



テンプレート法による前景放射除去

テンプレート法による前景放射除去とは。

1、各帯域にて以下のデータが取れる。

$$\text{Data} = \text{CMB} + \text{Dust} + \text{Synch} \quad @ \text{観測帯域 } \nu \text{ GHz}$$

2、6つの観測帯域がある場合は

$$\text{Data}(\nu_i) \quad i=1,2,3,4,5,6$$

3、例としてシンプルに2つのバンド、2つの前景放射だけを考える場合

$$\text{Data} = \text{CMB} + \text{Dust}$$

$$\Delta \text{data} = \text{Data}(\nu_1) - \alpha \text{Data}(\nu_2)$$

4、CMBは黒体放射(@T=2.725K)で非常に周波数特性がよくわかっている。

一方で、ダストは大体冪の関数だがその情報は使わない。

5、ダストが最小になるように α を選んでやると

$$\Delta \text{data} = \text{Data}(\nu_1) - \alpha \text{Data}(\nu_2) \sim (1-\alpha) \text{CMB}$$

推定したCMBは

$$\text{CMB} \sim \Delta \text{data} / (1-\alpha)$$

N. Katayama and E. Komatsu
(ApJ 737, 78 (2011), arXiv:1101.5210)

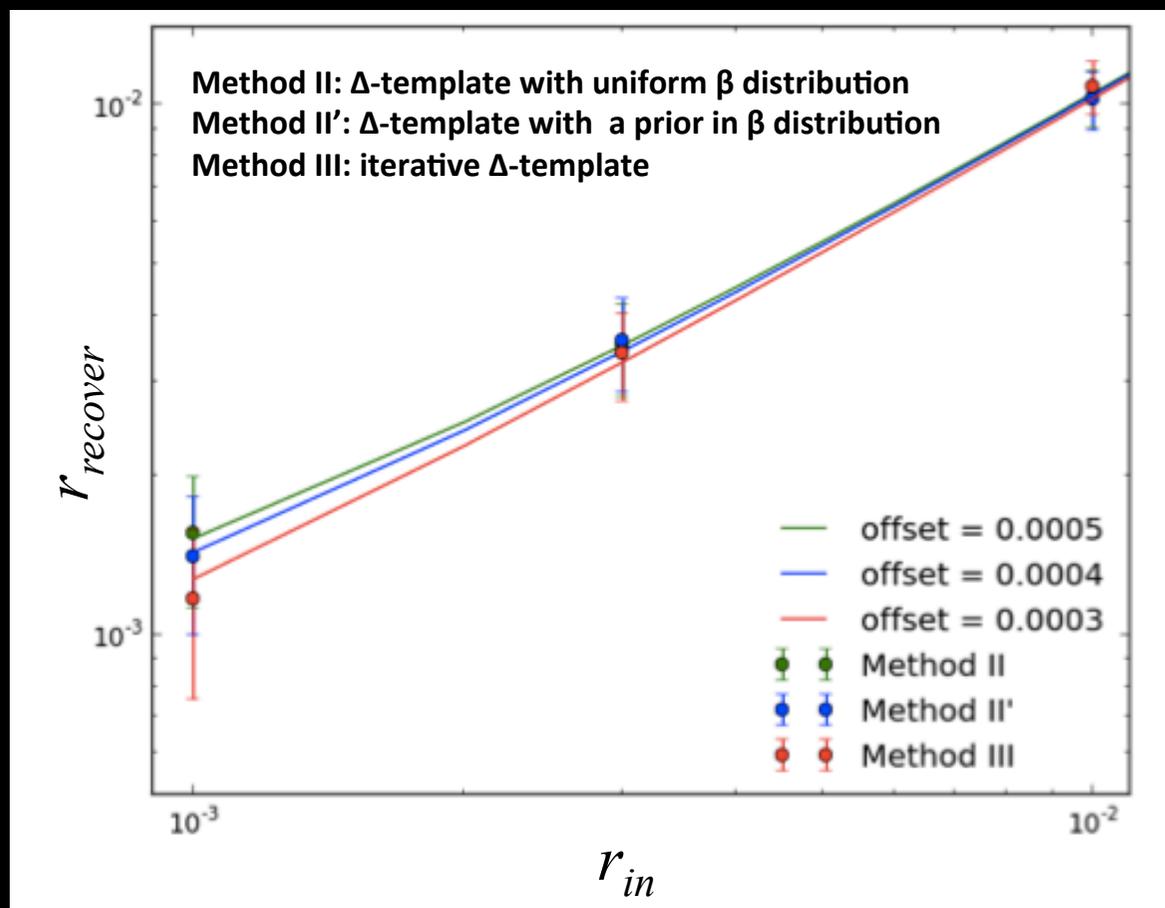
原始重力波シンポ@物理学会(佐賀大学)

テンプレート法による前景放射除去

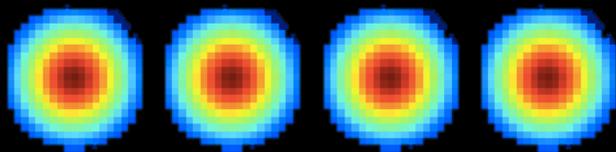
LiteBIRDで想定している観測帯域及び感度を用い、テンプレート法による前景放射除去をPlanck sky modelに対して行い、テンソル・スカラー比に対する精度をテスト。(Dust polarization fraction is set to be $\times 3$ 、Use $l < 47$ and f_{sky} of 50%.)

Band (GHz)	Sensitivity (μK arcmin)
60	10.3
78	6.5
100	4.7
140	3.7
195	3.1
280	3.8
Total	1.8 (2.9 ^b)

この冬にPlanckの偏光全天マップ（最終結果）が出てくるとのこと。より現実の空を含むPlanck sky modeを用いて、再テストする予定。



ミリ波光学系



Single modeの望遠鏡は、波長で決まる回折限界の広がりを持つ範囲内で単一方向を見る。

$$D\theta \sim \lambda$$

- 観測帯域 60GHz~280GHz ($\lambda=5\text{mm}\sim 1.1\text{mm}$)
- θ : 角度分解能 $<1^\circ$

D(光学系の開口径) $\sim 30\text{cm}$ 程度で十分。



要求する感度を $1 < 200$ とすることで大幅に実験装置(光学系)が小さくて済む。これにより、衛星プロジェクトとして小回りが利きやすくなる。

LiteBIRDで求められる光学系の仕様

要求仕様

- 広帯域性 (50-320GHz)
- 角度分解能、全ての観測帯域にて <math>< 1 \text{ deg}</math>
- 広視野 $\pm 15 \text{ degs}$
- 全体サイズ ($\sim \phi 2\text{m} \times 2\text{m}$ 、H2を想定。)
- テレセントリック焦点面
- サイドローブを下げる
- ビーム校正
- 冷却望遠鏡 4K

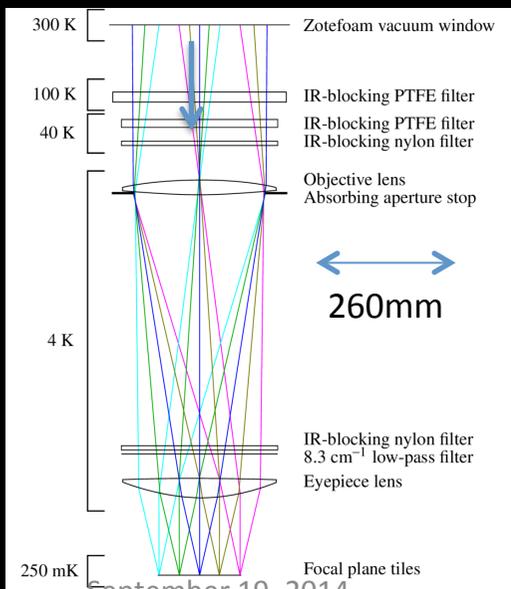
よく使われるCMB光学系

- フィードのみ
- 屈折光学系
- 反射光学系
 - オフセット-グレゴリアン
 - クロスドラゴン

反射望遠鏡

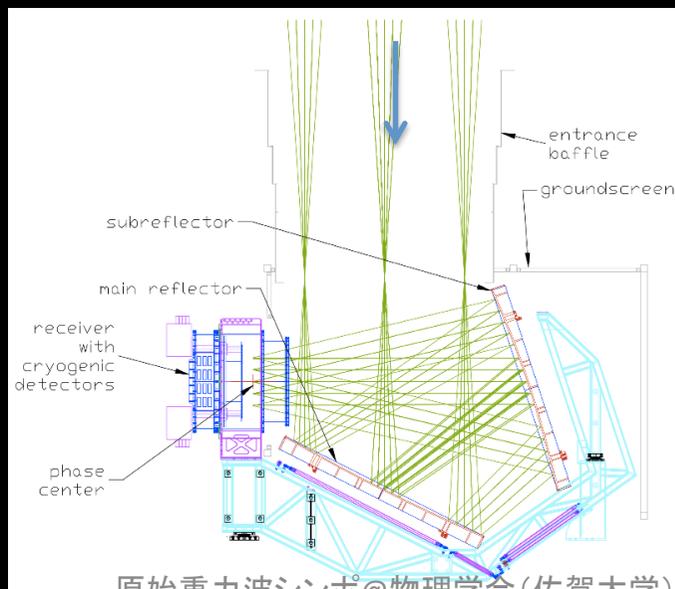
POLARBEAR (Offset Gregorian)

BICEP2
屈折望遠鏡

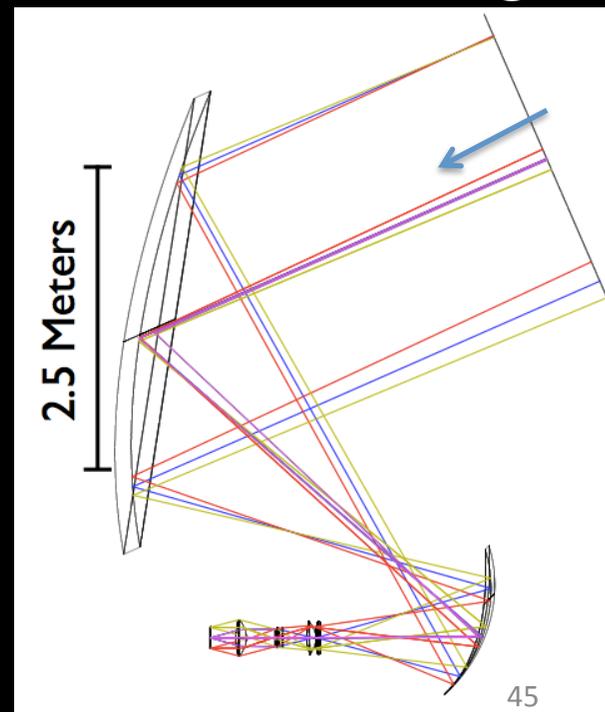


September 19, 2014

反射望遠鏡
QUIET (Crossed-Dragone)



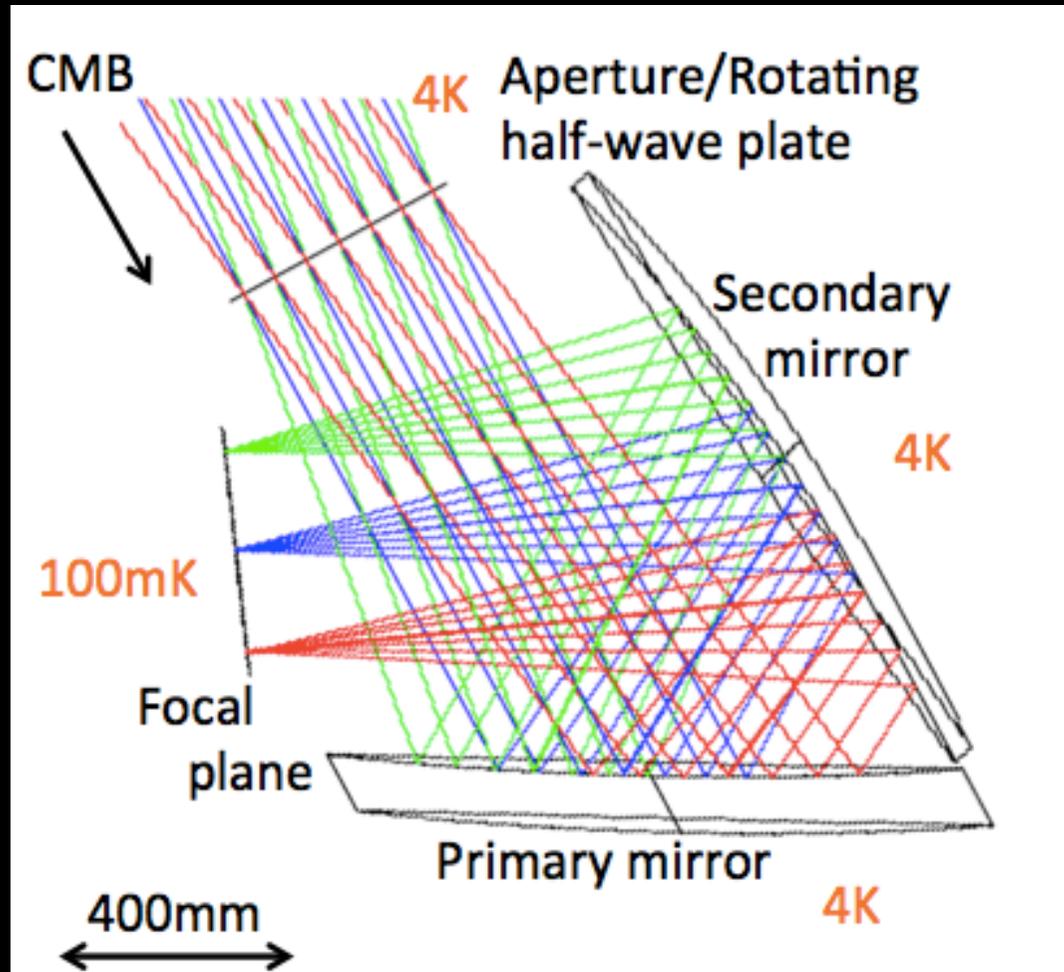
原始重力波シンポ@物理学会(佐賀大学)



45

LiteBIRDで求められる光学系の仕様

クロス・ドラゴン光学系



2枚の鏡のみ！

LiteBIRDの成功には高精度偏光観測の成功が鍵。

- Low S/Nに対してはlock-in測定が常套手段。
- 偏光測定では半波長板を用いたlock-in法が使われてきている。(赤外での偏光観測、可視光での太陽観測、生物物理など)
 - 検出器の1/fノイズを避ける
 - 光学系の疑似偏光とシグナルを区別

検出器と読み出しエレクトロニクス

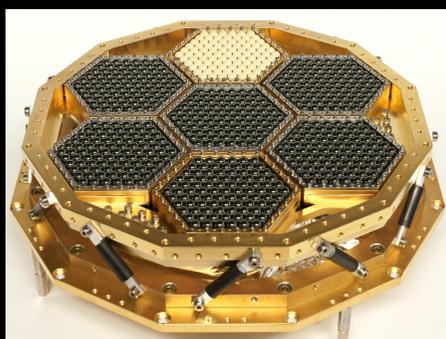
要求

- 感度: Optical NEP = 2×10^{-18} W/√Hz
- 広帯域: 50 – 300 GHz
- 多ピクセルアレイ: ~2000
- High yield
- 低消費電力 (< 100W total)
- きれいなフィードパターン
- High TRL

Band (GHz)	Sensitivity (μK arcmin)
60	10.3
78	6.5
100	4.7
140	3.7
195	3.1
280	3.8
Total	1.8 (2.9 ^b)

Transition edge sensor (TES) bolometer

POLARBEAR焦点面からの例



Z. Kermish Ph.D. thesis
UC Berkeley

PB-1

1274 TESs with 80% yield.
NET per array: 23 μK s

PB-2

2 bands/pixel (95,150GHz)
7588 TESs (1897×2pol×2band)
Readout is DfMUX with
MUX=32(+) by McGill Univ.

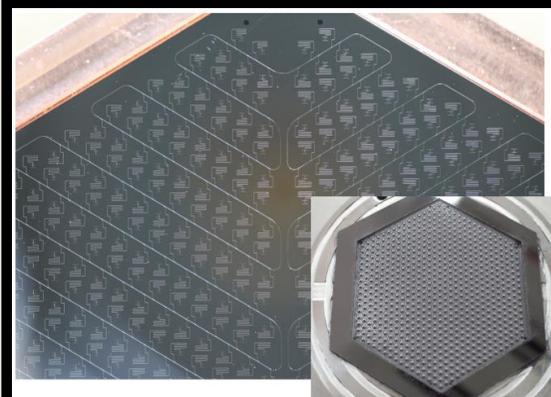
High TRL by the use in various CMB experiments.
Need space qualified low loading TES and low power consumption readout.

September 19, 2014

原始重力波シンポ@物理学会(佐賀大学)

Microwave kinetic inductance detector (MKID)

Example of MKID from NAOJ.



K. Karatsu et al. 2013

NEP $\sim 6 \times 10^{-18}$ W/√Hz
Single band at 200GHz
MUX=600

More examples from
JPL, SRON and others.

Attractive features and rapid progress in the MKID development. Potential candidate for a future mission in next a few years.

47

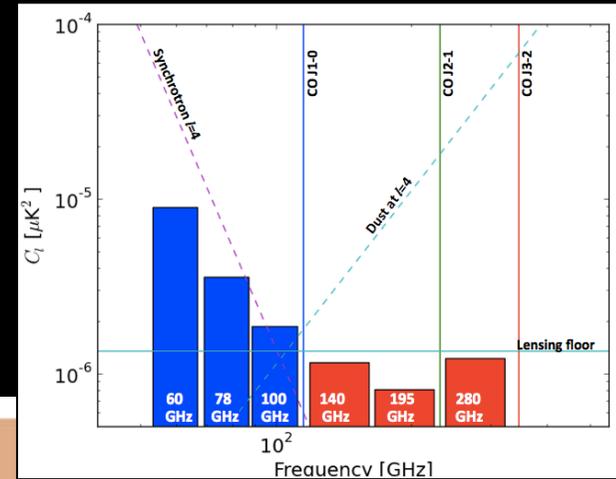
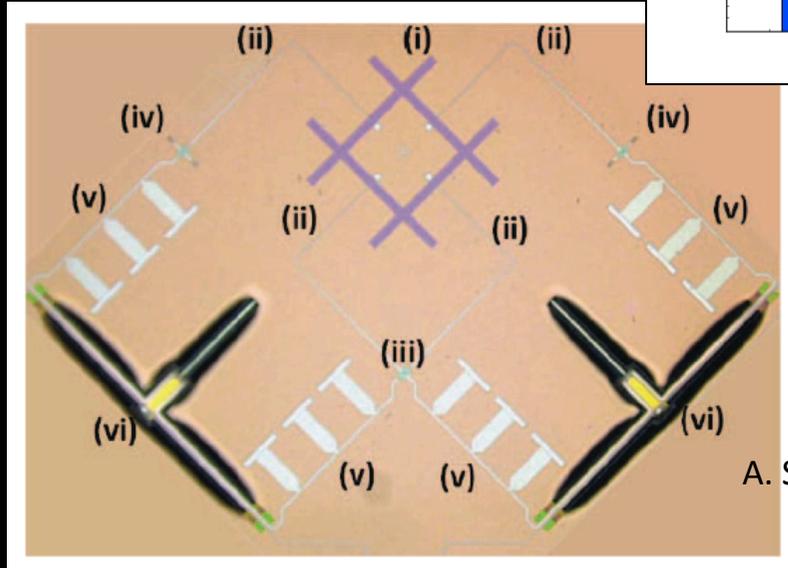
Multi-chroic pixel

衛星では省スペースが重要！

これまでの検出器は
1焦点面ピクセル=1観測帯域



POLARBEARで用いられている
TES焦点面では1つのピクセル
は150GHzのみ



POLARBEAR-2のために開発されている検出器は、1つのピクセルで2観測帯域(95, 150GHz)をカバー。

LiteBIRDでは1ピクセルで3観測帯域を想定。
これにより要求される100mK焦点面の面積を1/3減らすことが出来る。

MKIDでも同様の技術を開発中。

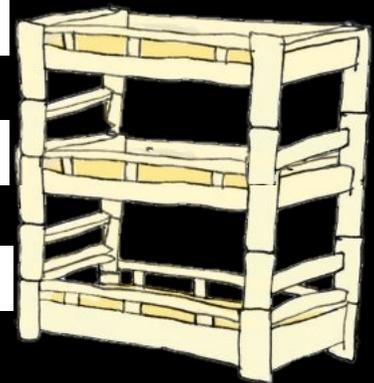
September 19, 2014

原始重力波シンポ@物理学会(佐賀大学)

60GHz(⊥、∥)

78GHz(⊥、∥)

100GHz(⊥、∥)



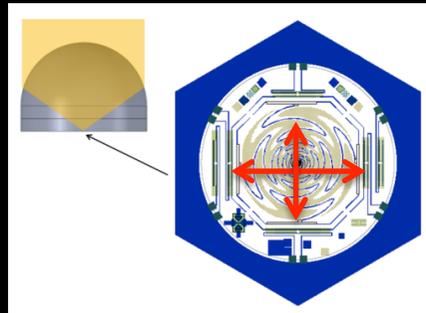
Multi-chroic pixel

衛星では省スペースが重要！

これまでの検出器は
1焦点面ピクセル=1観測帯域



POLARBEARで用いられている
TES焦点面では1つのピクセル
は150GHzのみ



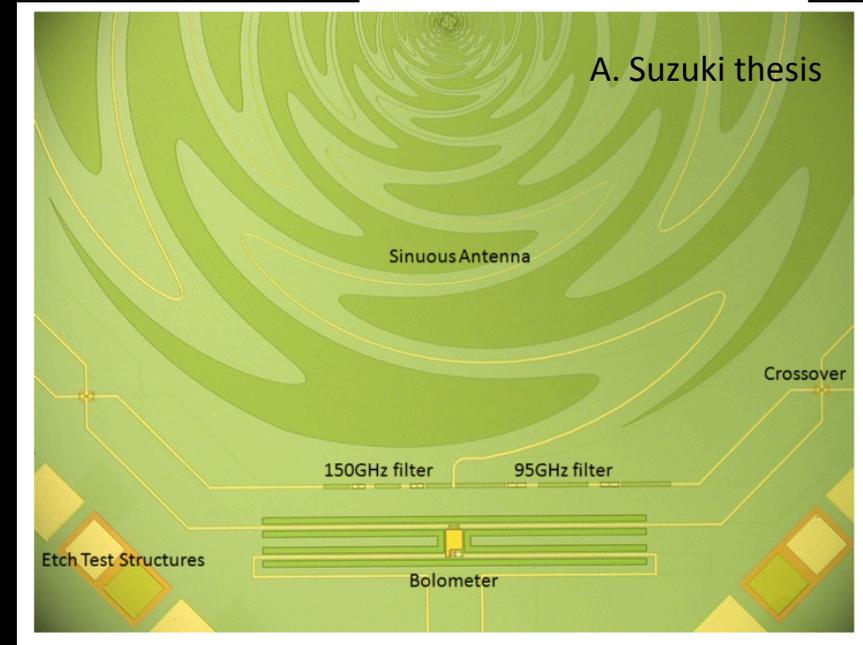
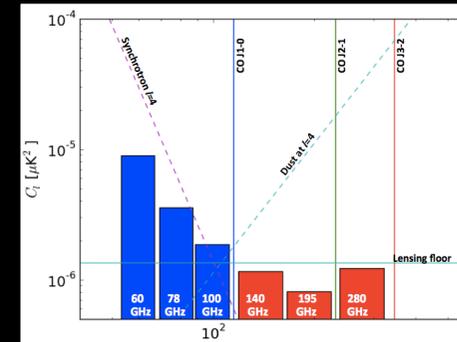
POLARBEAR-2のために開発されている検出器は、1つのピクセルで2観測帯域(95, 150GHz)をカバー。

LiteBIRDでは1ピクセルで3観測帯域(6個の検出器)を想定。
これにより要求される100mK焦点面の面積を1/3減らすことが出来る。

MKIDでも同様の技術を開発中。

September 19, 2014

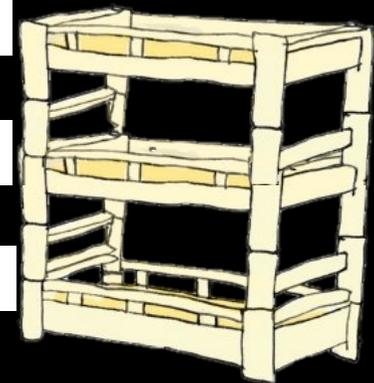
原始重力波シンポ@物理学会(佐賀大学)



60GHz(⊥、∥)

78GHz(⊥、∥)

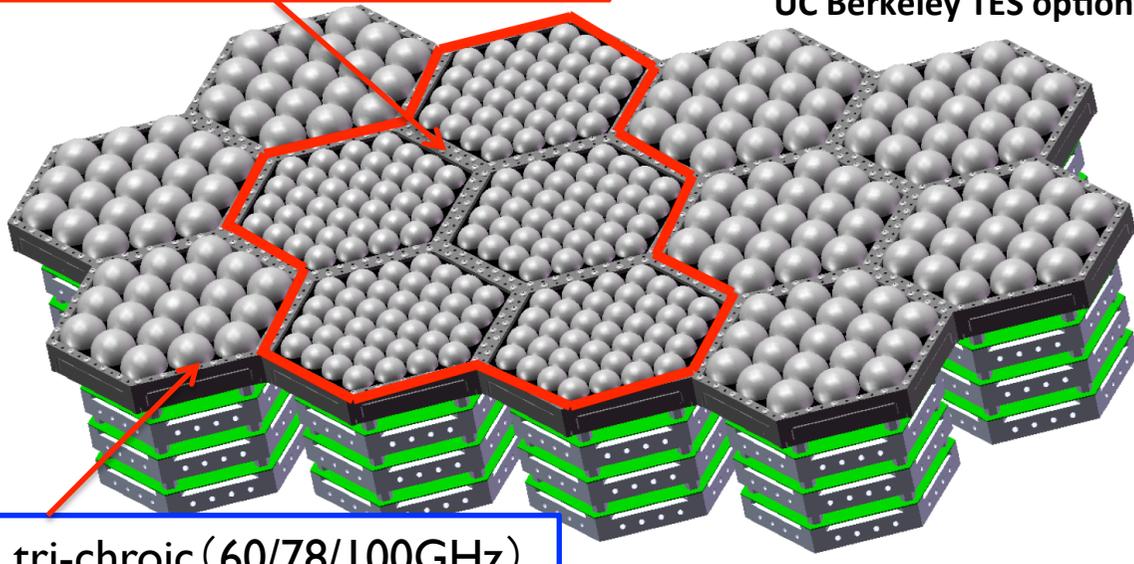
100GHz(⊥、∥)



TESを仮定した焦点面デザイン

tri-chroic (140/195/280GHz)

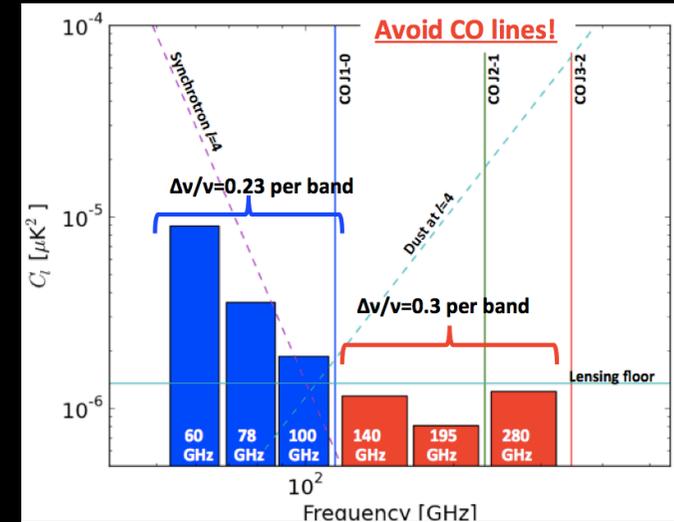
UC Berkeley TES option



tri-chroic (60/78/100GHz)

焦点面は100mK

光学系が提供する回折限界範囲内の焦点面面積にて最適化した設計。



- 読み出し回路は地上/気球実験でも用いられているDigital frequency MUX (64 mux) を想定。
- 全消費電力は100W以下。

Band (GHz)	Beam ^a (arcmin)	NET ($\mu K \sqrt{s}$)	Pixel # per wafer	Wafer #	Bolometer #	NETarr ($\mu K \sqrt{s}$)	Sensitivity (μK arcmin)
60	75	99	19	8	304	5.7	10.3
78	58	62	19	8	304	3.6	6.5
100	45	45	19	8	304	2.6	4.7
140	32	40	37	5	370	2.1	3.7
195	24	33	37	5	370	1.7	3.1
280	16	40	37	5	370	2.1	3.8
Total			168	13	2,022	1.0 (1.6^a)	1.8 (2.9^b)

September 19, 2014

原始重力波シンポ@物理学会(佐賀大学)

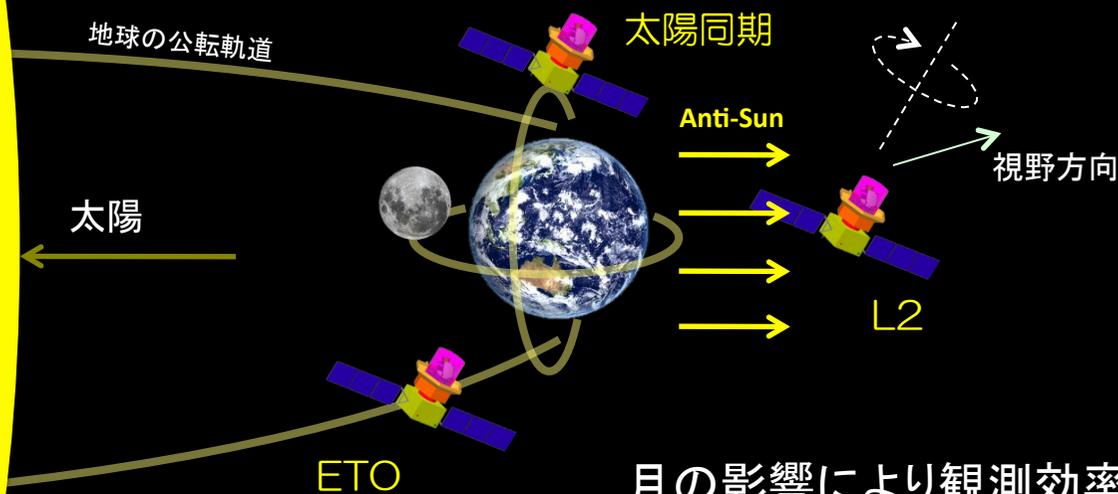
T. Matsumura et al. 2013

軌道

	L2	太陽同期(SSO)	Earth trailing orbit (ETO)
利点	<ul style="list-style-type: none"> 熱の安定性 	<ul style="list-style-type: none"> 打ち上げ機会 	<ul style="list-style-type: none"> 地球と月の影響軽減 (~1AU/year)
懸念	<ul style="list-style-type: none"> 放射線 データ転送 	<ul style="list-style-type: none"> 地球の影響 月の影響 	<ul style="list-style-type: none"> データ転送

*データ転送レート

L2 (w/HWP):3.6GB/day (2h/day w/ 4Mbps)



月の影響

・ アルベド

→ 月が視野に入ると数時間の観測不能期間が生じる

・ シグナルへのコンタミ

→ 月が視野の~60°内にはいるとミリ波の回折や多重反射によりデータは使えない(かも。)

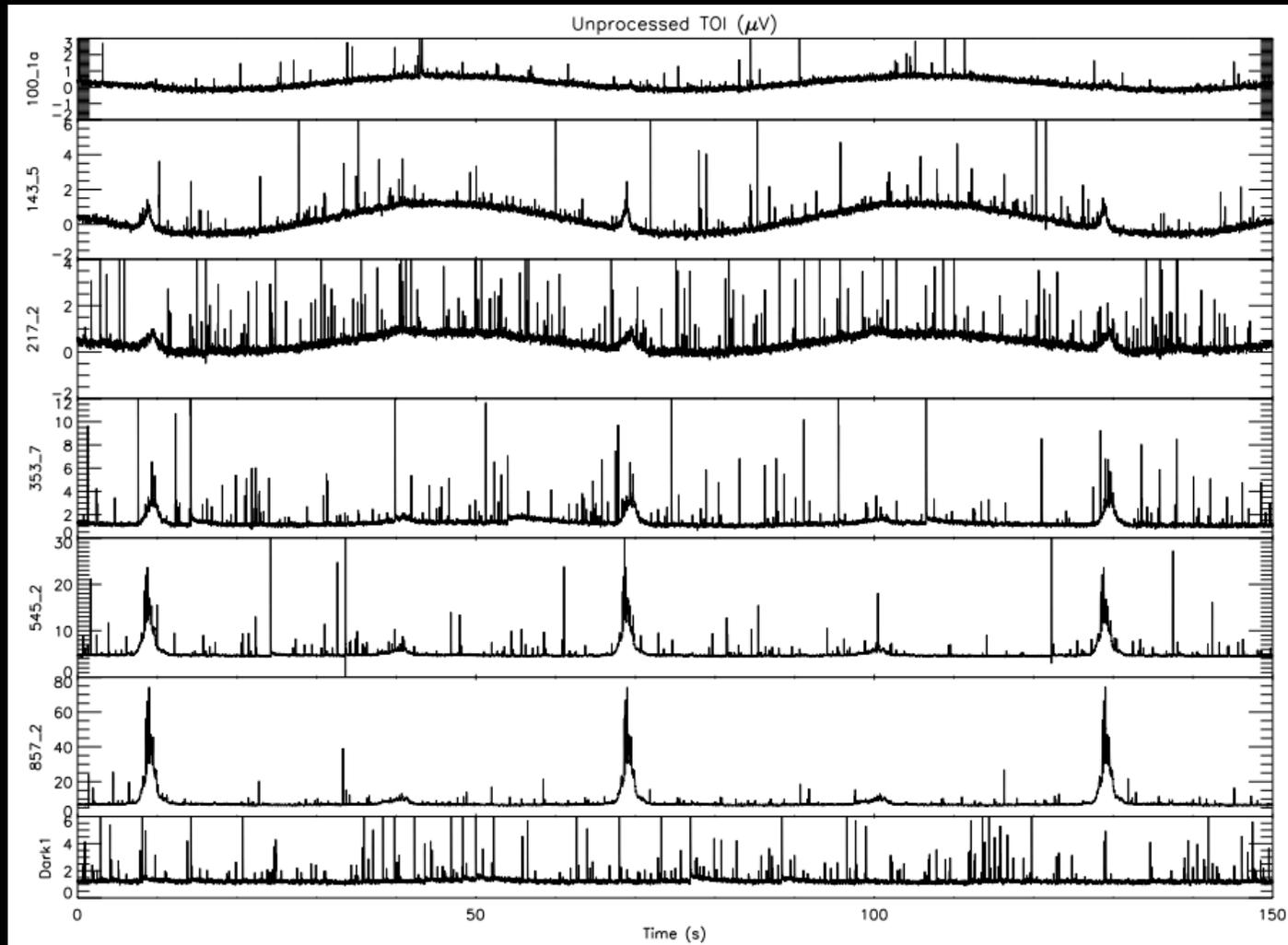
月の影響により観測効率が落ちる懸念。

3年の観測に対して、5年以上の観測が必要となる見積もり。

冷却システムの寿命等に影響。

系統誤差源 宇宙線

多くの理由でL2は魅力的。一方で、宇宙線による影響は懸念の1つ。



検出器、また時期にもよるが
8~20%のデータを
フラッグ。

世界的に、宇宙線
の影響を軽減する
検出器開発が進行
中。

また、LiteBIRDでも
検出器にプロトン
等を当てる試験を
予定。

系統誤差

- JAXA H2 rocket compatible
- 3 years of observations
- Systematic effects (require each effect is below 1/100 of lensing C_l^{BB})

Type	Effect	Requirement in bias case	Requirement in random case	Note
Differential effect (False polarization)	Diff. gain	0.01%	0.3 %	Instantaneous
	Diff. Beam width	0.7%	2 %	FP average ease them by (up to) an order of magnitude.
	Diff. beam pointing	3.5 arcsec.	16 arcsec.	
	Diff. beam ellipticity	7% @ ell=2 0.04% @ ell=300	2.7 %	
Non. Differential effect (Pattern modulation)	Pointing knowledge	6 arcmin.	25 arcmin.	20 degs.x30 degs FOV
	Abs. gain	Parity preserved	3%	Calibration in every 10 min.
	Beam size stability	Parity preserved	O(10%)	
	Angle calibration	1 arcmin.	12 degs.	

Tensor tilt: Quick Studies in LiteBIRD working group

by Ryo Nagata

- Gain from $ell < 50$ is modest due to cosmic variance
- Best is to measure $50 < ell < 300$ as precise as possible and perform delensing.
- You need to choose the right pivot scale to minimize dr , while dn_t is insensitive to the pivot scale.

LiteBIRD (LB):

2uKarcmin for fsky=75%

foreground removal a la Katayama-Komatsu

SuperPOLARBEAR (SPB):

6uKarcmin for fsky=75% for delensing

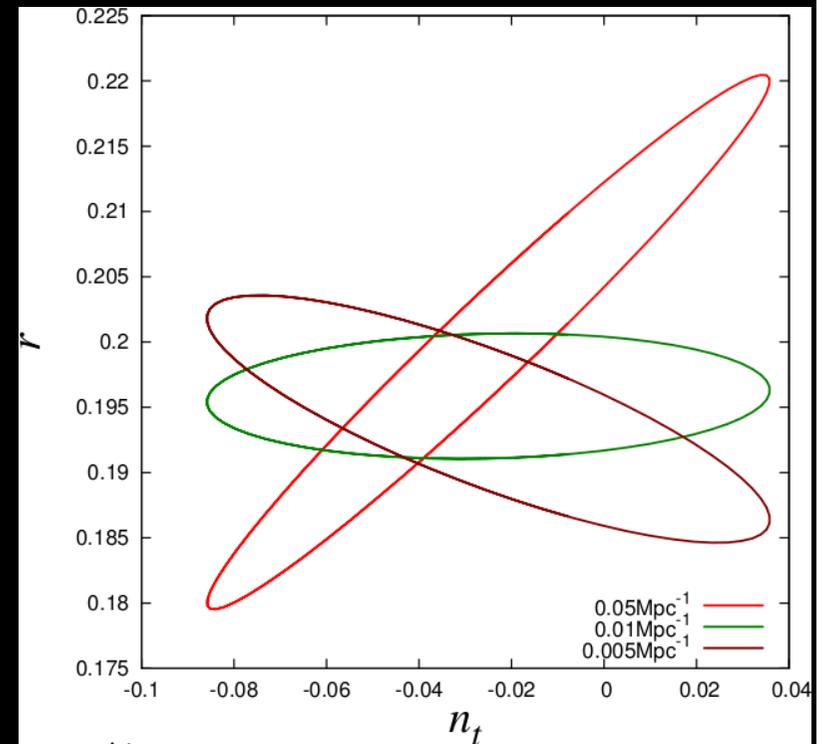
beam 4arcmin FWHM, no sensitivity below $ell=50$

$\sigma(r)_{LB} = 3.2 \times 10^{-3}$ for $r=0.2$
(1.6%, cosmic-variance limited)

	LB	SPB	LB+SPB
$\sigma(nt)$	0.04	0.06	0.03

Delensing based on K. Smith et al.

<http://arxiv.org/pdf/1010.0048v2.pdf>





Cosmology: First light

The left-over radiation from the Big Bang has given up what may be its last great secret about the early Universe, but astronomers are determined to mine more from this primordial prize.

Joanne Baker

14 May 2014

Top Story



But such complicated proposals are expensive and difficult to realize, Efstathiou says. 'Keep it simple' is now his mantra. He would like to see a small mission dedicated to observing B modes on large angular scales, thus targeting the gravitational-wave signature alone. In effect, it would be a BICEP2 experiment in space, says Peter Ade at Cardiff University, UK, who has built detectors for ground-based experiments and Planck. The technology is mature and he thinks such a mission could be ready in five years.

A Japanese-led satellite proposal called LiteBIRD could be just such a mission. Proposed by physicists in Japan, in collaboration with experimenters in the United States, Germany and Canada, the project could be launched in the early 2020s if it received some US\$100 million in funding. In the meantime, the researchers are developing a ground-based experimental version, called GroundBIRD.

原始重力波シンポ@物理学会(佐賀大学)

将来CMB衛星計画案

アメリカ

EPIC、PIXIE

ヨーロッパ

COrE、PRISM

日本

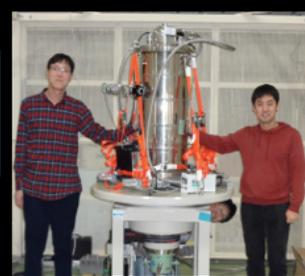
LiteBIRD

LiteBIRDの実現へのロードマップ

- Detector and readout: TES bolometer
- Mitigation of the 1/f and systematics using HWP

POLARBEAR-2

POLARBEAR



GroundBIRD

- Detector and readout: MKID
- LiteBIRD optics

LiteBIRD

Launch target 2020s

地上実験にて技術実証を行い、また科学成果を出す。

- 宇宙電波懇談会において高い優先度を持つ計画であることが合意されている。
- 高エネルギー物理学研究者会議の「将来計画検討小委員会答申」(平成24年出版)において、LiteBIRDが目指すサイエンスは、「将来重要な研究分野に発展するポテンシャルを持っており、(加速器大型計画と)並行して推進していくことが必要」と位置づけられている。
- LiteBIRDは学術会議マスタープラン2014の重点大型研究計画に選定された。
- LiteBIRDは文科省ロードマップ2014の新計画の一つとして掲載される(評価ダブルa)。

LiteBIRDは今年度にmission definition reviewに向けて準備中。

まとめ

- 地上実験BICEP-2は原始重力波由来のB-modeを発見とクレーム。
- 今年発表されると言われているPlanckの偏光結果、またそれと相補的にBICEP2の検証が注目！
- 今後、地上、気球、そして衛星による検証が期待される。特に、次世代CMB偏光衛星により原始重力波の探索のため、アメリカ、ヨーロッパ、日本、それぞれ計画準備中。
- 将来衛星LiteBIRDはインフレーションモデルをピンポイントで決定する感度を持つ。2020年代初頭の打ち上げを目指して推進中。