



インフレーションと CMB偏光観測

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

素粒子原子核研究所

羽澄昌史

高エネルギー物理学研究者会議将来計画検討小委員会タウンミーティング

2011年7月29日

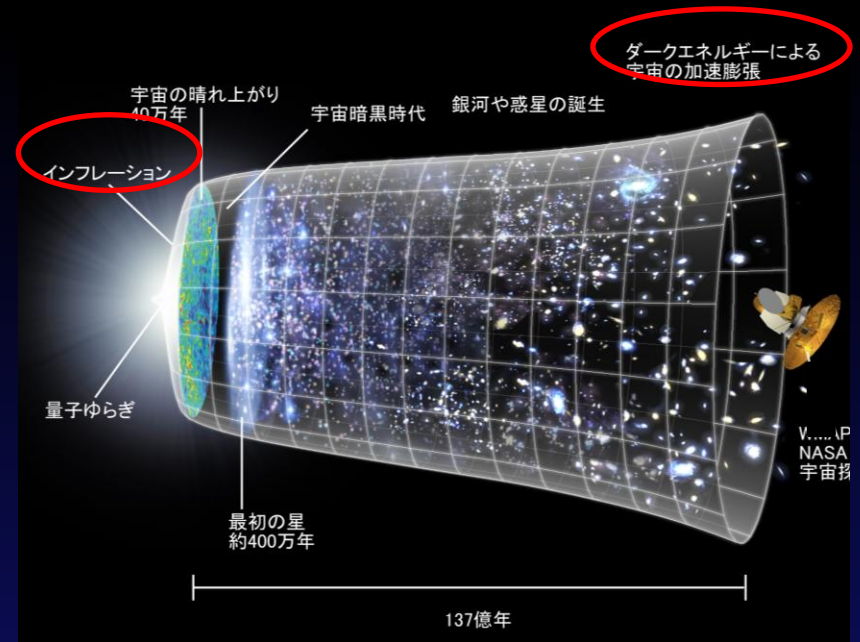
IPMU

Billion-Dollar Question: 加速膨張の本質とは？

- インフレーションとダークエネルギーは、どちらも宇宙の加速膨張
 - インフレーションは、我々の宇宙のはじまりを支配する
 - ダークエネルギーは、我々の宇宙のおわりを支配する

一般相対論＋宇宙原理という
“標準理論”と観測結果だけから、
我々は、加速膨張($d^2a/dt^2 > 0$)
という奇妙な解に
“追い込まれている”

背後にNew Physicsがあるの
は間違いないが、それが何な
のか、今のところ全くの謎



インフレーション

宇宙初期の加速膨張：「一瞬でアメーバが銀河のサイズに！」

- **動機**: ビッグバンの未解決問題(地平線問題、平坦性問題、構造形成)を解決
 - **物理モデル**: まだよくわかっていない
 - スカラー場(インフラトン)による加速膨張
- **GUTスケールの物理**

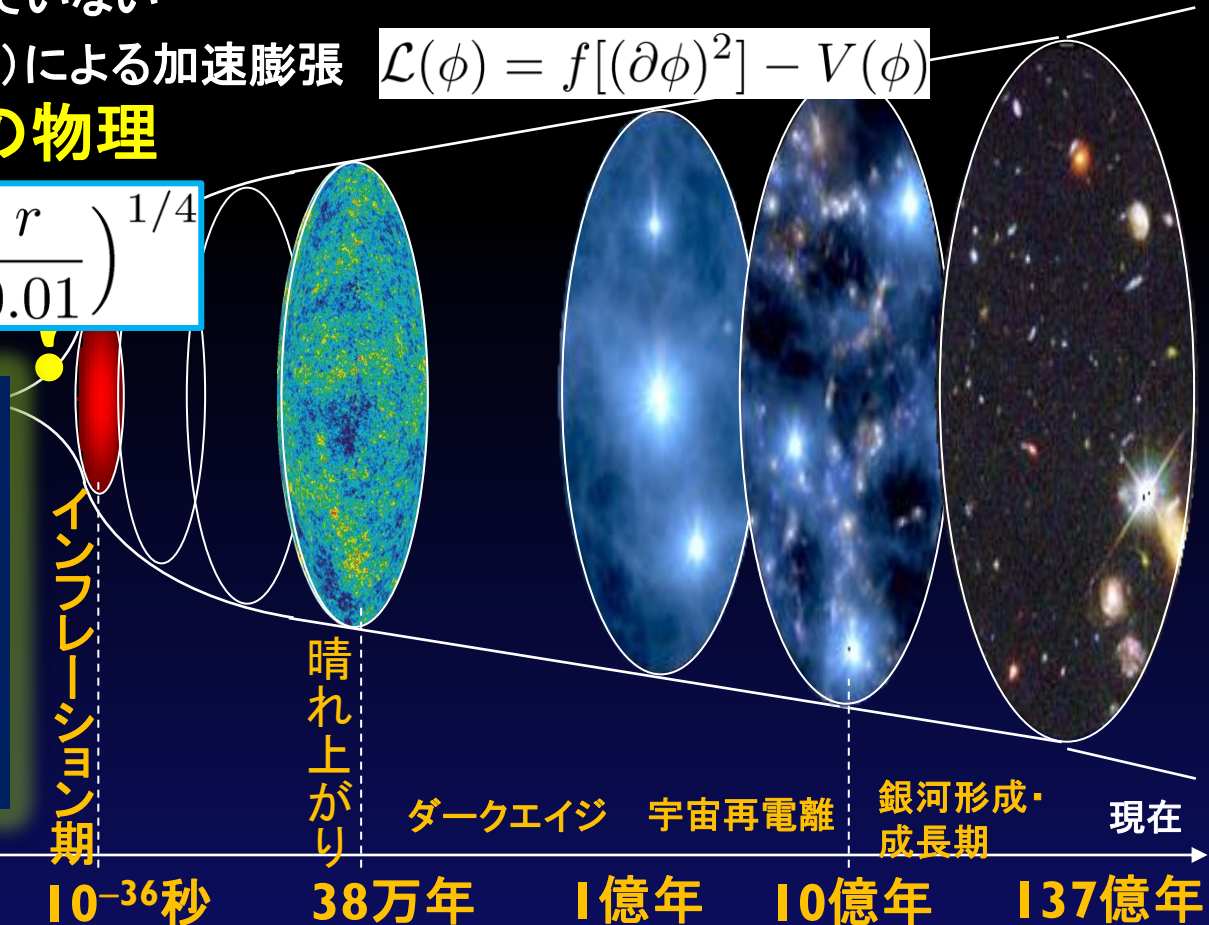
$$\mathcal{L}(\phi) = f[(\partial\phi)^2] - V(\phi)$$

$$V^{1/4} = 1.1 \times 10^{16} \text{ GeV} \left(\frac{r}{0.01} \right)^{1/4}$$

r : Tensor-to-Scalar Ratio

r を測ることが
実験・観測サイドの目標

↓
観測成功ならインフレーション
エネルギースケールの決定



宇宙年齢

10^{-36} 秒

38万年

1億年

10億年

137億年

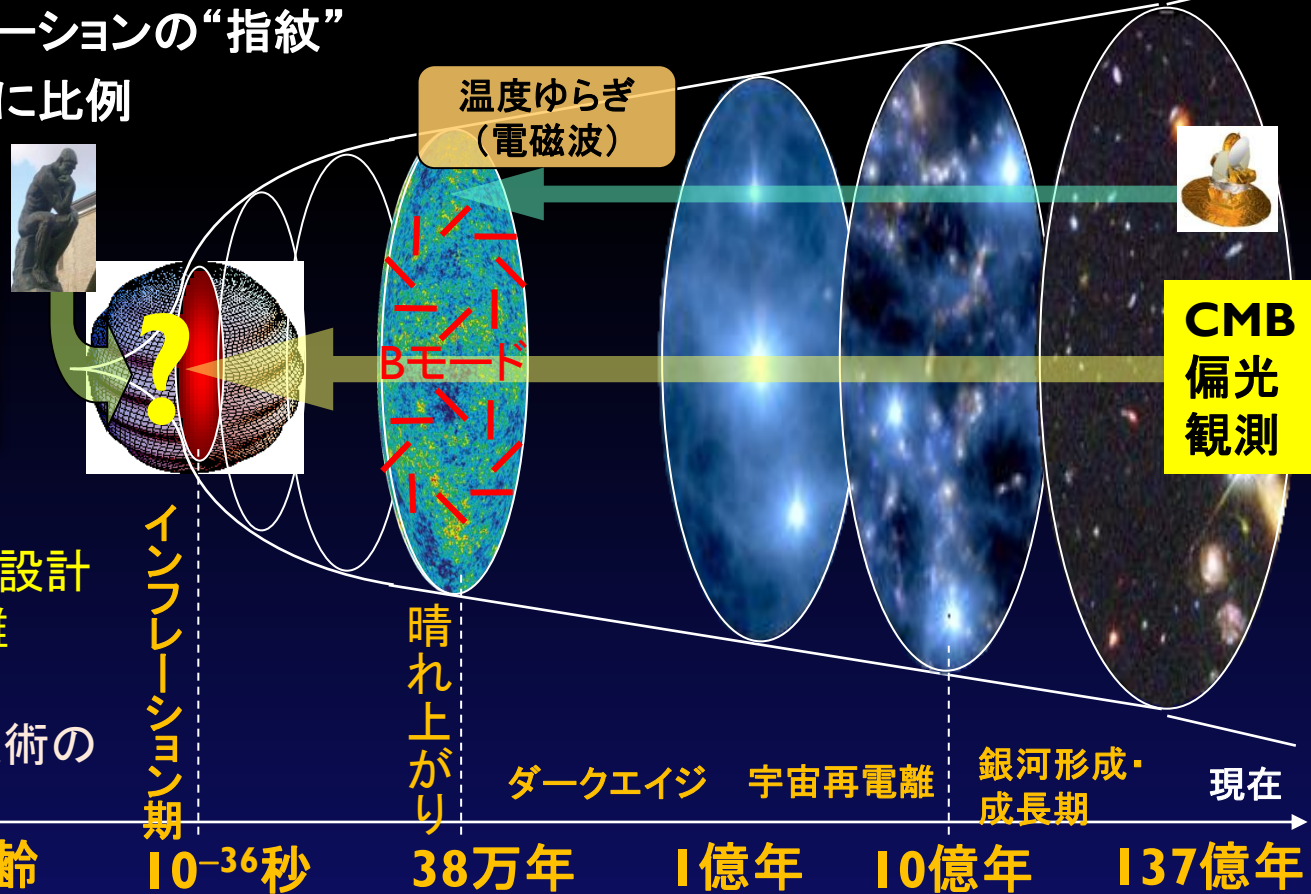
インフレーションの検証

宇宙背景放射 (Cosmic Microwave Background: CMB) 偏光観測

- **予言:** インフレーションは急激な膨張にともない時空のゆがみ(原始重力波)を生成
- **検出:** 原始重力波 + CMB散乱 → CMB偏光パターンにできる“渦”(Bモード)を検出
 - Bモードはインフレーションの“指紋”
 - Bモードパワーが r に比例

実験・観測の挑戦 ナノケルビンの ゆらぎをとらえる

- ◆ O(1000)素子の偏光計
- ◆ 系統誤差を考え抜いた設計
- ◆ 前景放射の精密な分離
- ◆ 重力レンズ効果の分離
- ◆ 高エネルギー物理の技術の活用

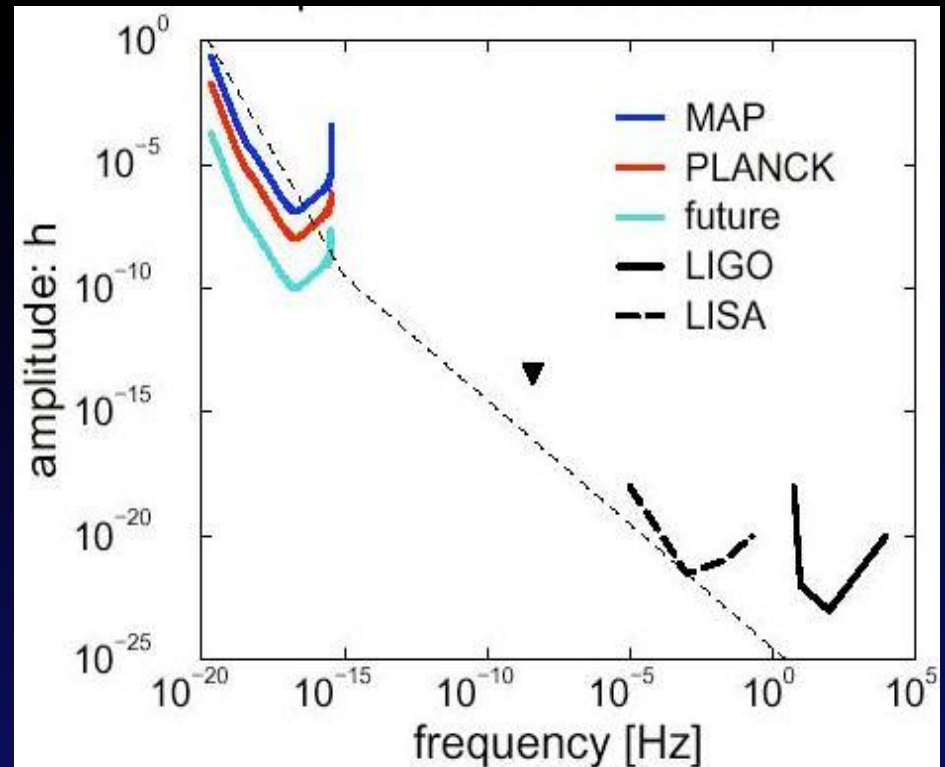


干渉計重力波探索との関係

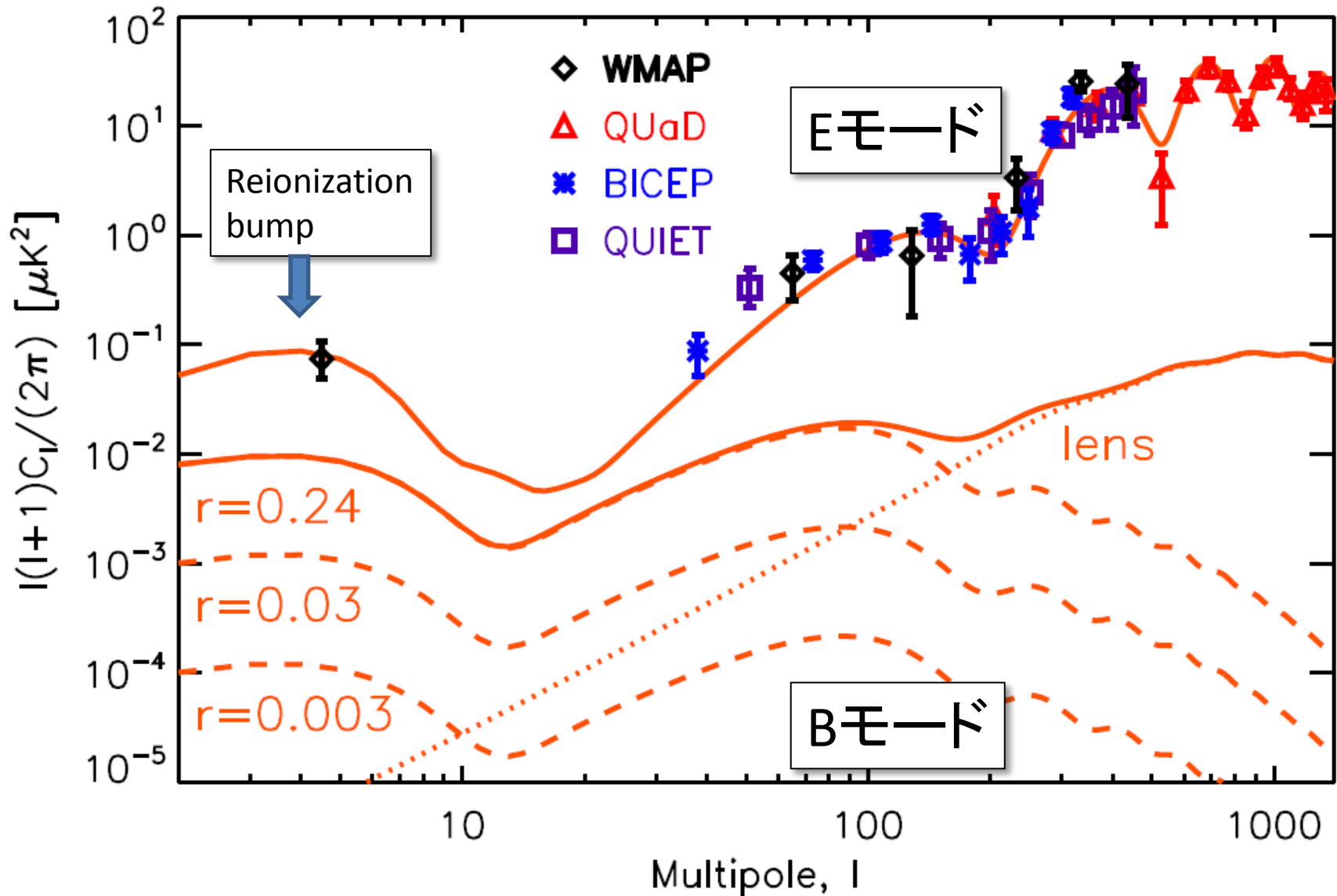
CMBのほうが感度が高いので、原始重力波の発見にはCMB偏光Bモードがベスト。

CMBによる原始重力波の発見は、将来の干渉計重力波観測による宇宙論に定量的な大目標を与える。

CMB偏光Bモード観測は従来の光学観測と将来の重力波観測との懸け橋となる！



CMB偏光パワースペクトル



CMB偏光観測プロジェクト

ナノケルビンへの挑戦

• QUIET

- チリ(5080m)、低い周波数をHEMTアレイで観測、 $D=1.4\text{m}$
- QUIET (2008-2010), QUIET2 (2014~)
- U Chicago, Caltech, Princeton等との国際協力

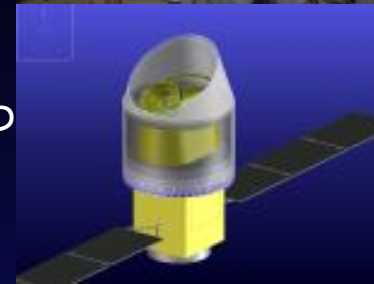
QUIET初期観測結果
[arXiv:1012.3191]

• POLARBEAR

- チリ(5100m)、高い周波数をTESボロメータアレイで観測、 $D=3.5\text{m}$
- POLARBEAR (2011-2013)、POLARBEAR2 (2014-2016)
- UC Berkeley等との国際協力: POLARBEAR2レシーバーをKEKが主導

• LiteBIRD

- 小型人工衛星、広い周波数を超伝導検出器アレイで観測、 $D=0.6\text{m}$
- 2020年頃打ち上げを目指すJAXA小型科学衛星ワーキンググループの一つ
- POLARBEARの技術を導入+地上実証実験GroundBIRD



高エネルギー
物理学

天文学

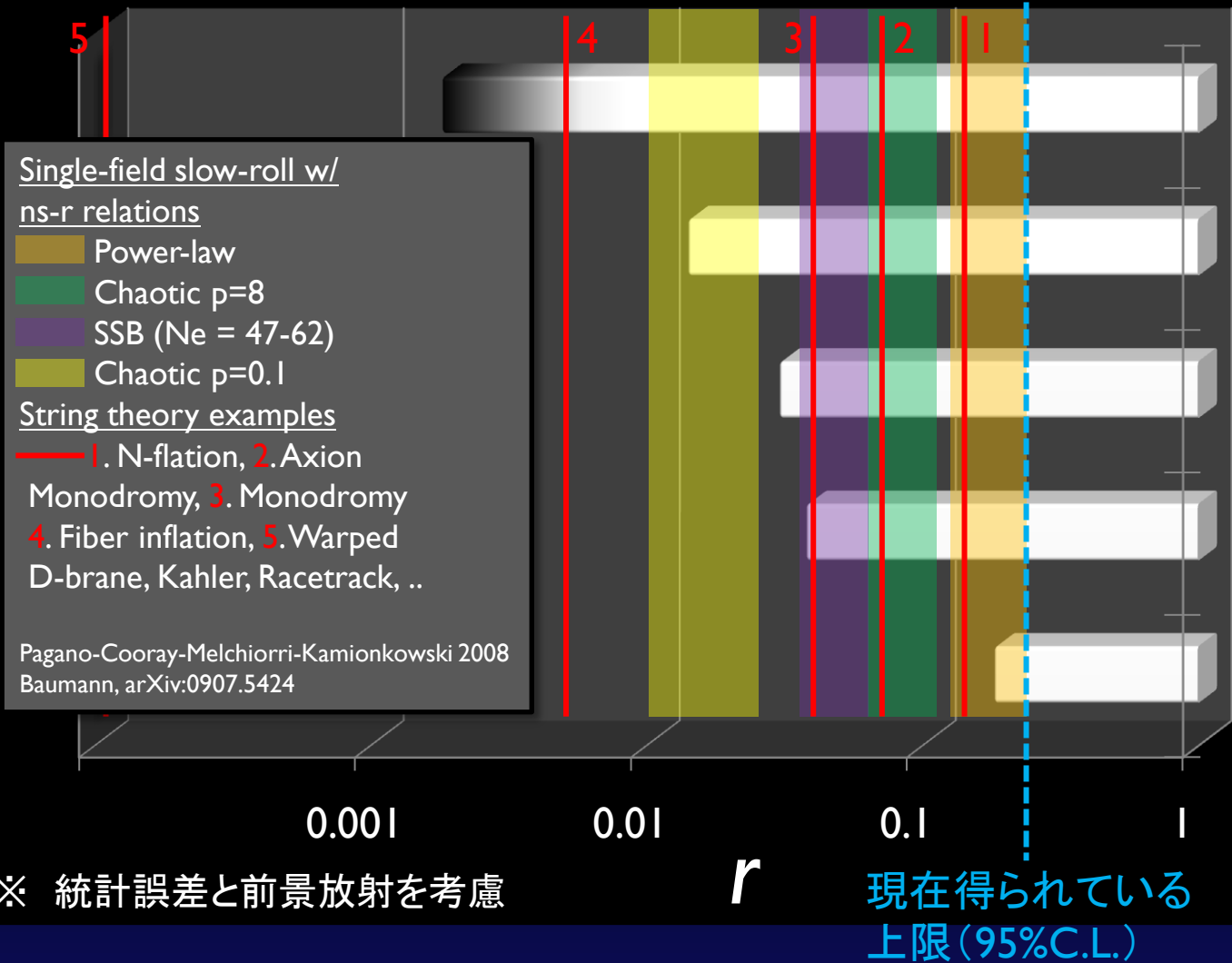
かつてない規模
の共同研究

50名を超えるメンバー: 参加者の所属機関: JAXA、岡山大、近畿大、KEK、
国立天文台、東北大、横浜国大、理研、LBNL、UT Austin、UC Berkeley

宇宙論
素粒子論

超伝導
デバイス工学

発見能力 (>3σ) とインフレーションの予言



LiteBIRD ~2020

POLARBEAR2
~2016

QUIET2 ~2015

POLARBEAR
~2014

Planck ~2014

国際競争
BICEP2, KECK(南極)
EBEX, SPIDER(気球)など
感度、スケジュールともに
POLARBEARと類似

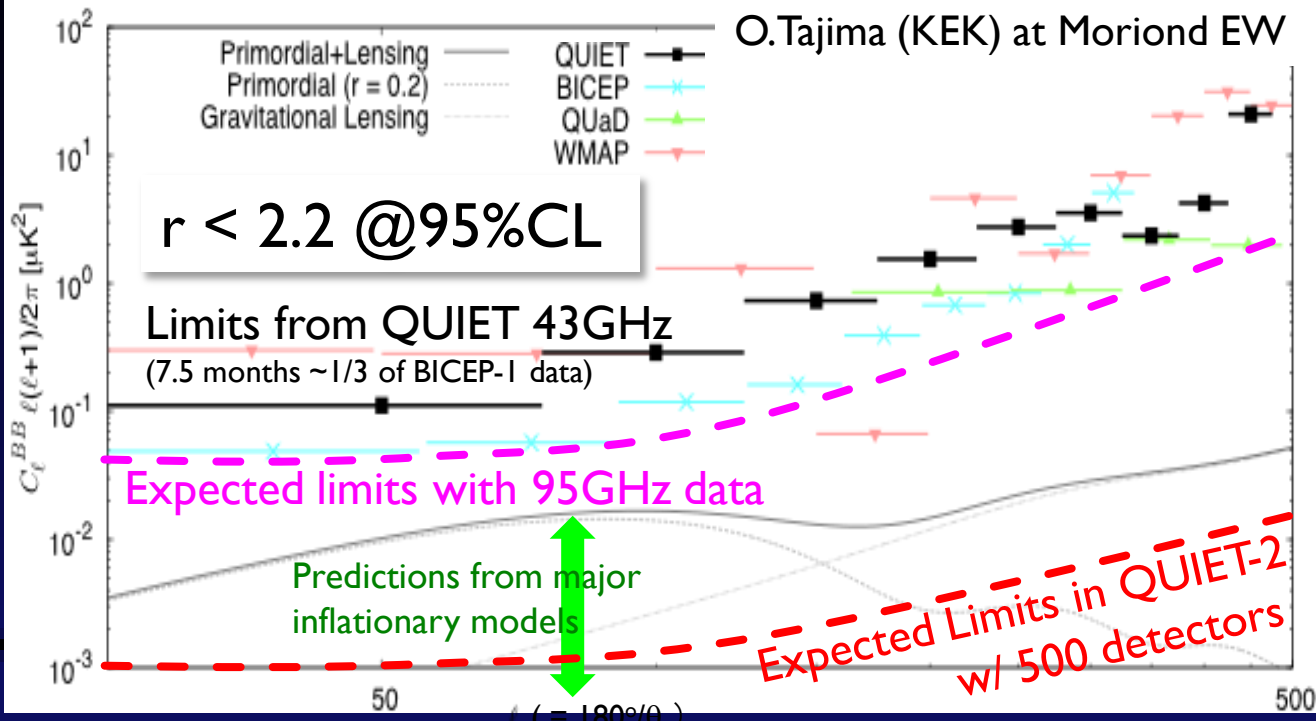
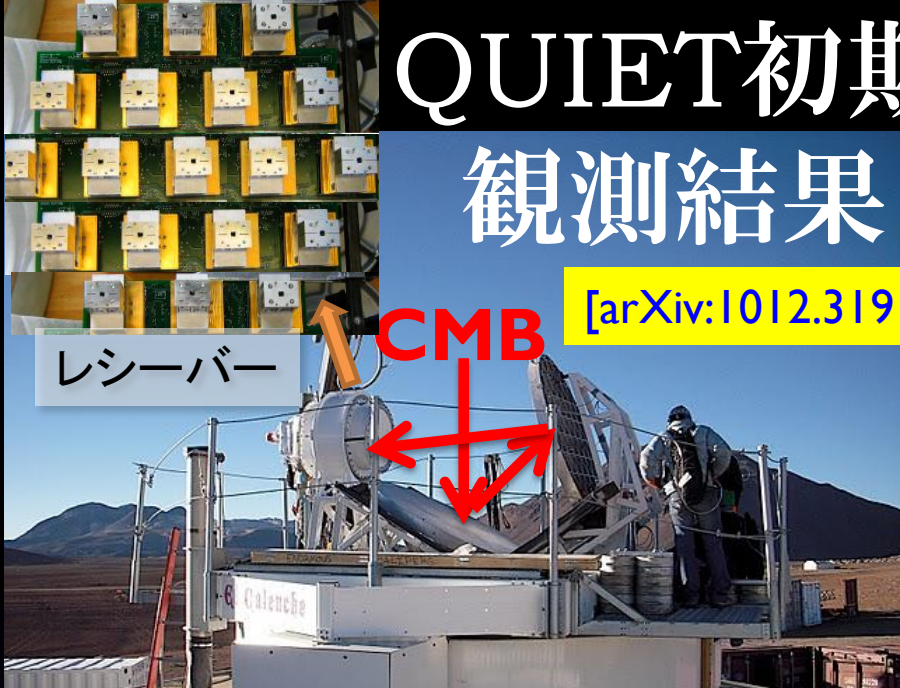
多くのインフレーションモデルで $r > 0.01$ (Large Field Inflation) ← 発見が期待される

QUIET初期 観測結果

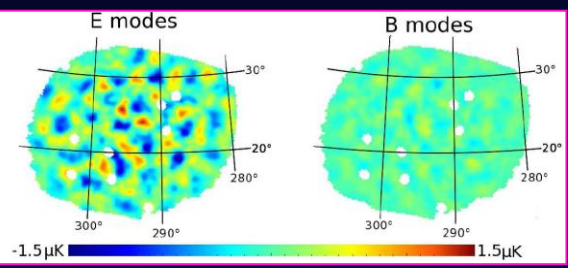
[arXiv:1012.3191]

レーザー

CMB



偏光マップ

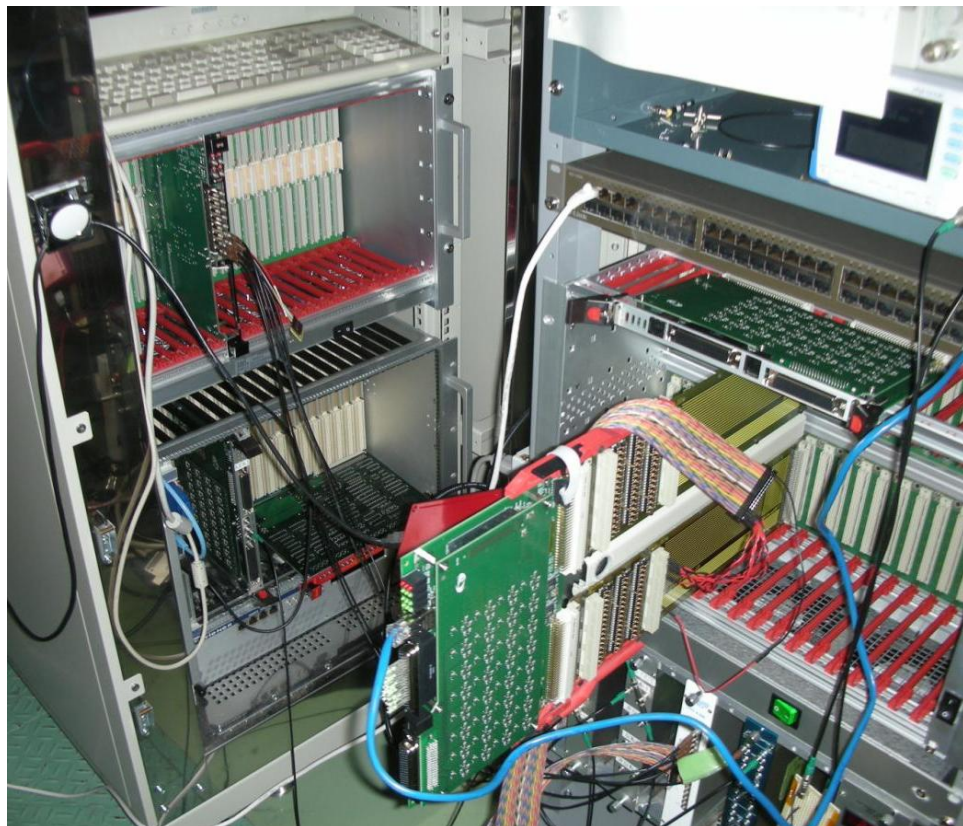


R&D at KEK for QUIET phase II

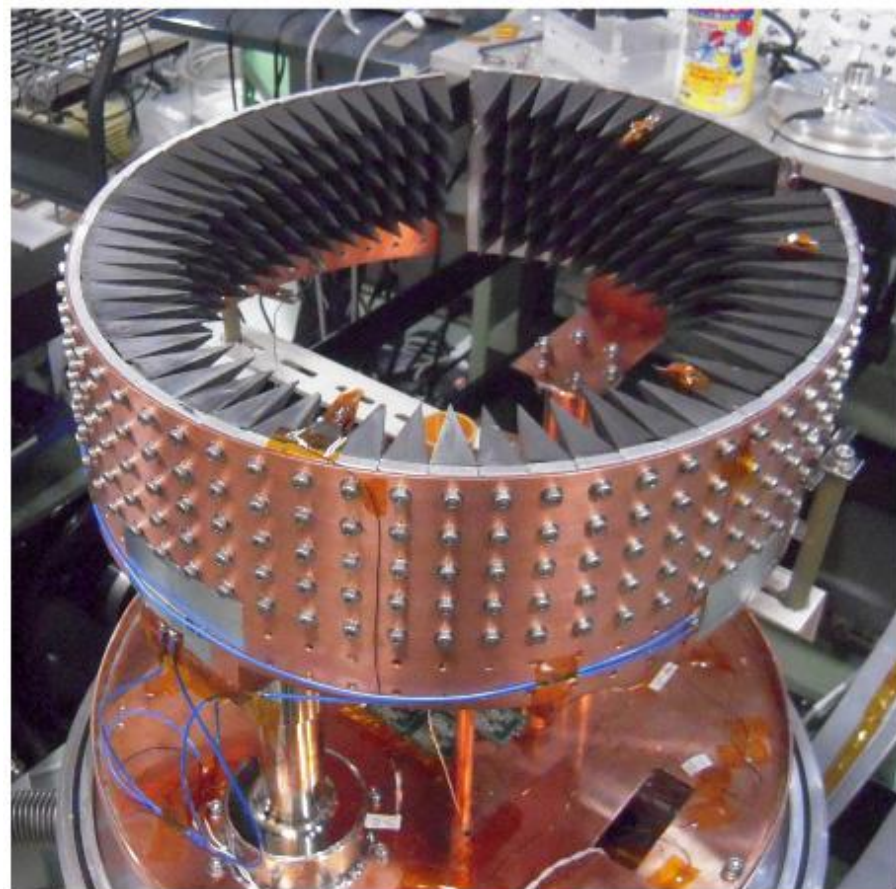
MMIC テストシステム

“Calibration System with Cryogenically-Cooled Loads for CMB Polarization Detectors”

M. Hasegawa, O. Tajima, Y. Chinone, M. Hazumi, K. Ishidoshiro, M. Nagai, Rev. Sci. Instrum. 81, 054501 [arXiv:1102.4956]

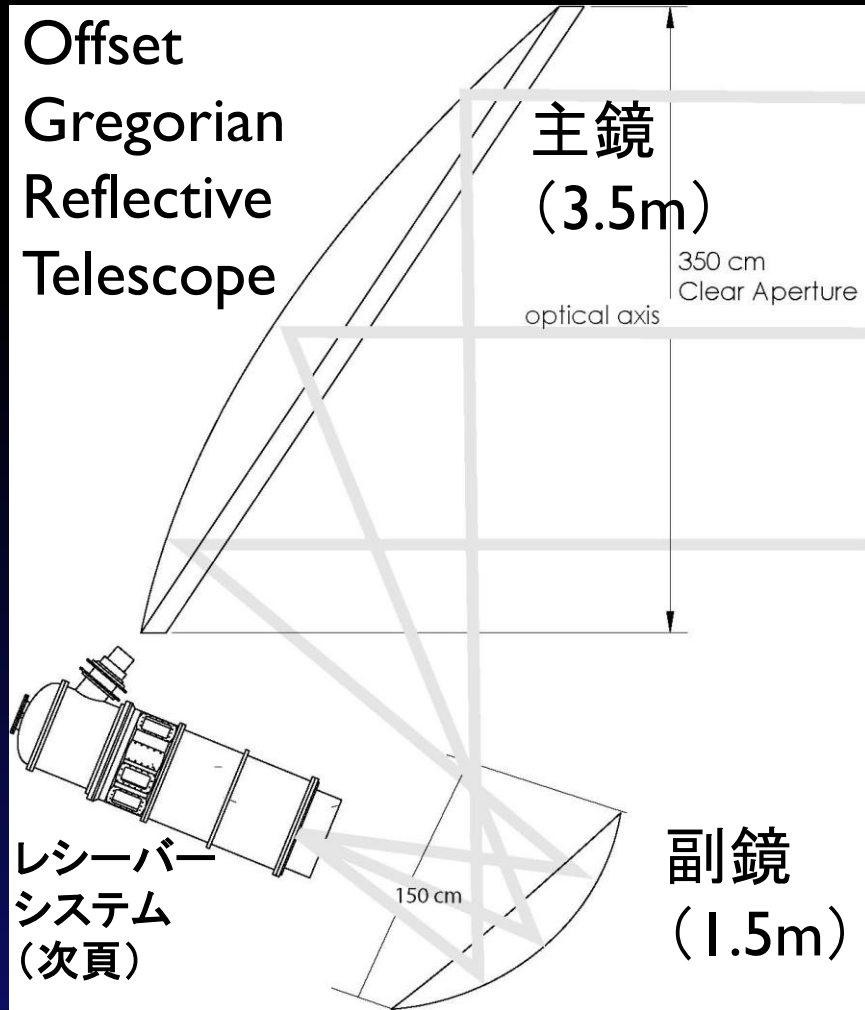
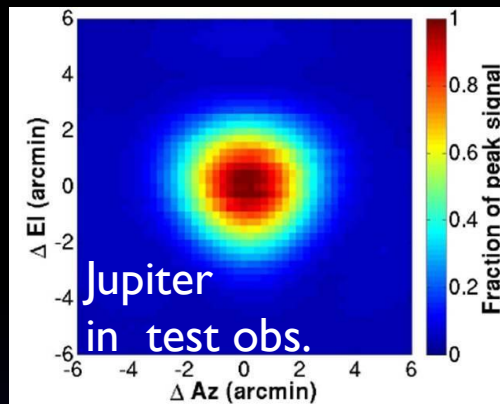


High-density(64ch) ADC system
オープンソースコンソーシアムのプロジェクト



POLARBEAR

2010年テスト観測 (Cedar Flat, CA) 成功
2011年8月より、チリ・アタカマに望遠鏡設置

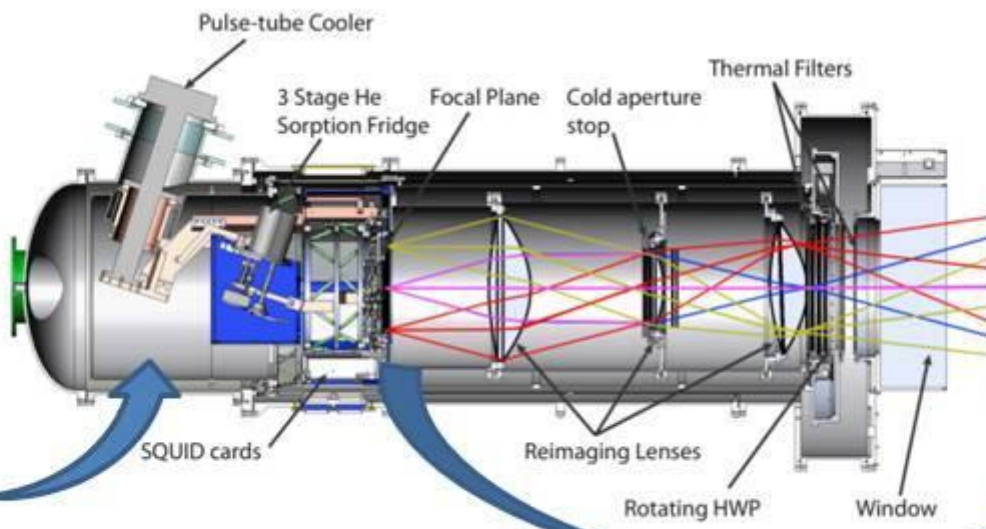


Berkeley-Cardiff-Colorado-Imperial C.
-KEK-LAC-LBNL-McGill-UCSD

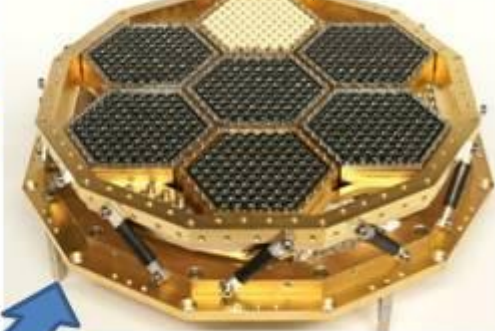


POLARBEAR specifications

Telescope size & type	3.5m (primary) Gregorian Mizuguch-Dragnone	
Frequency	150	GHz
# of pixels & technology	637	1274 TES (2/pixel)
Angular resolution	4 (FWHM)	arcmin
Scan area (= QUIET patches)	4x15x15=900	deg x deg
Location	Chajnantor (Atacama, Chile)	
NEQ	10	$\mu\text{Ks}^{0.5}$
Observation time range	2011-	



完成した
TESボロメータアレイ



POLARBEAR deployment

2011年8月より、チリ・アタカマに設置

POLARBEAR
一号機 (2011)



2号機
(2013) 3号機
(2014?)

ACT

標高約5100メートル

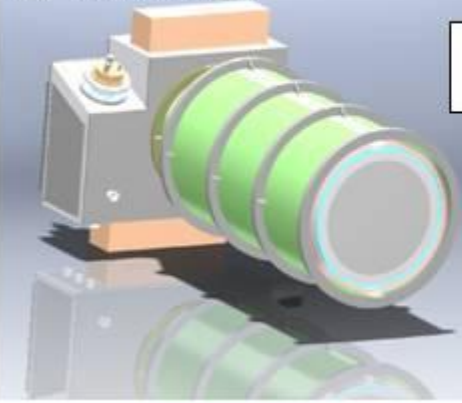
2号機・3号機テレスコープ (UCSD)
2号機レシーバーシステム (KEK (科研費)) } funded

POLARBEAR2号機レーザーシステム

lead by KEK group

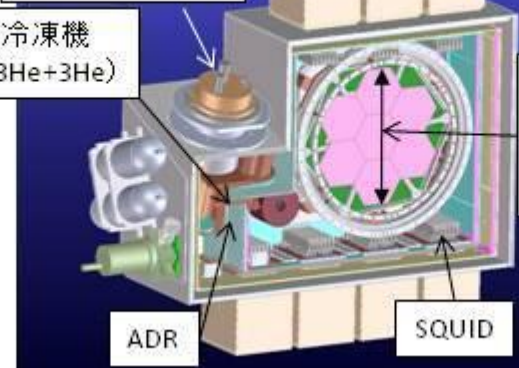
2013年度First Light
を目指す

全体像(焦点面クライオスタットと光学クライオスタット)



ソーブション冷凍機
(3段: 4He+3He+3He)

パルス管冷凍機

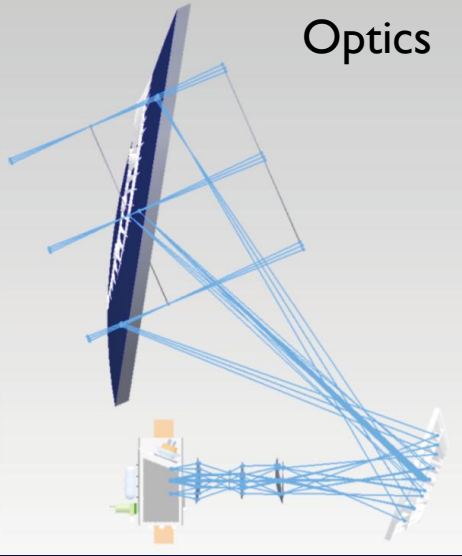


アンテナ
結合型
TESアレイ
(φ380mm)

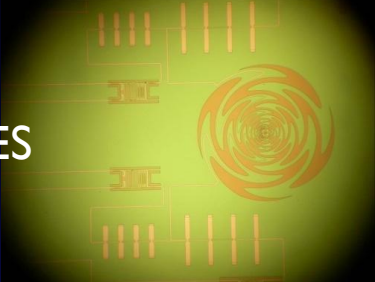
焦点面クライオスタット



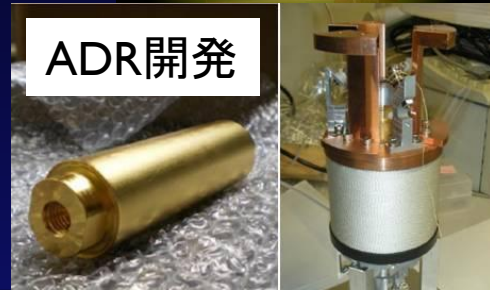
Optics



2色TES
開発

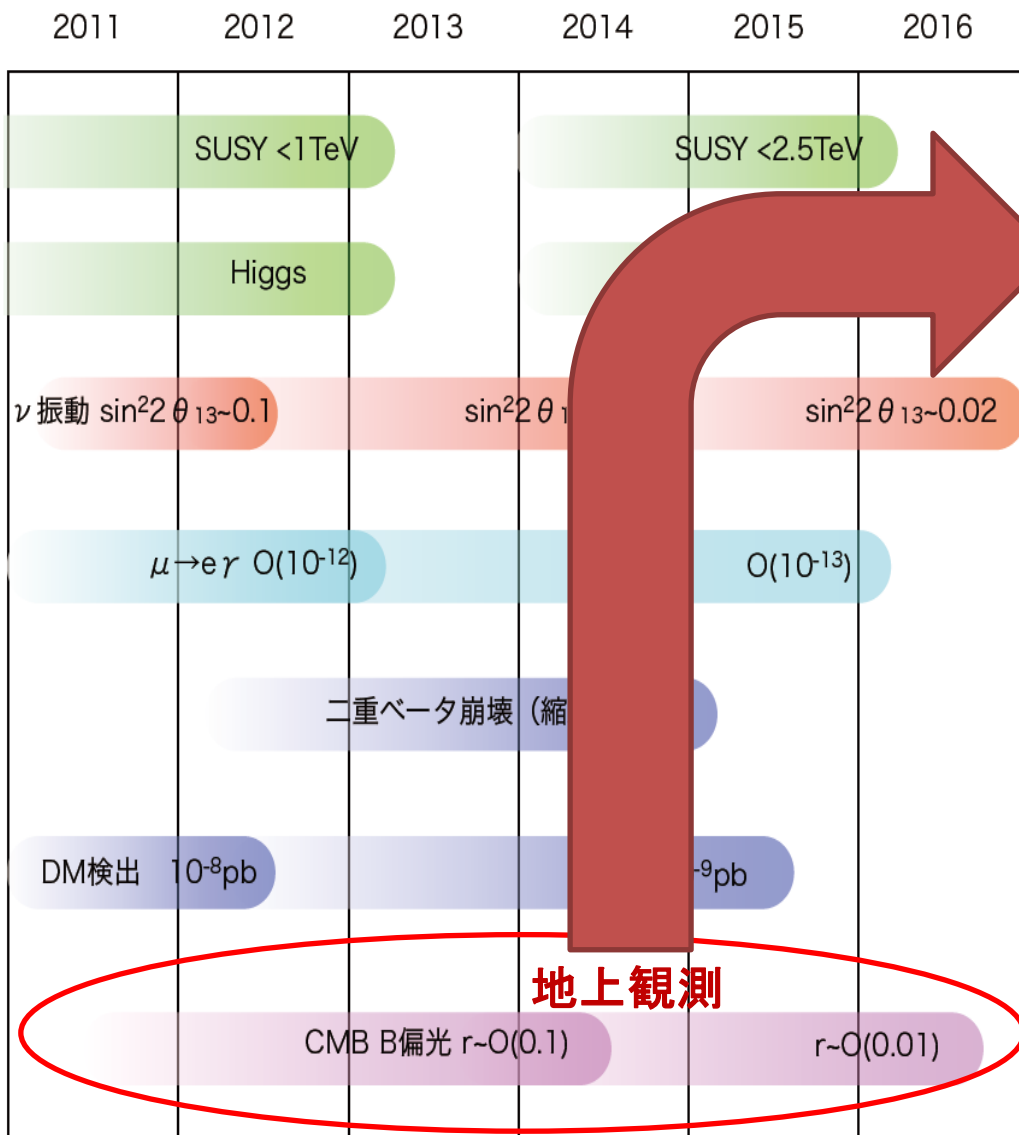


ADR開発



- ◆ CMB観測史上最大の焦点面
 - ◆ φ380mm : 6076 TES bolometers
- ◆ 90GHzと150GHzを同時に観測する二色TESボロメータの導入
- ◆ 高い信号多重化能力(16MUX)
- ◆ ADRによる100mK焦点面
 - ◆ 250mKによる運転(w/o ADR)も可能

図1 今後数年間に期待される発見 (>3σ)

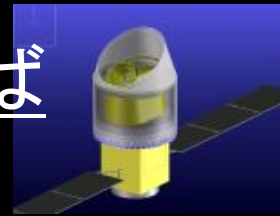


*本小委員会が関係資料より作成した私的な予測であることに注意。

地上で兆候あれば

衛星による

全天超精密測定へ



- ◆ r の精密測定
- ◆ 全天→Bモードパワースペクトルの全貌



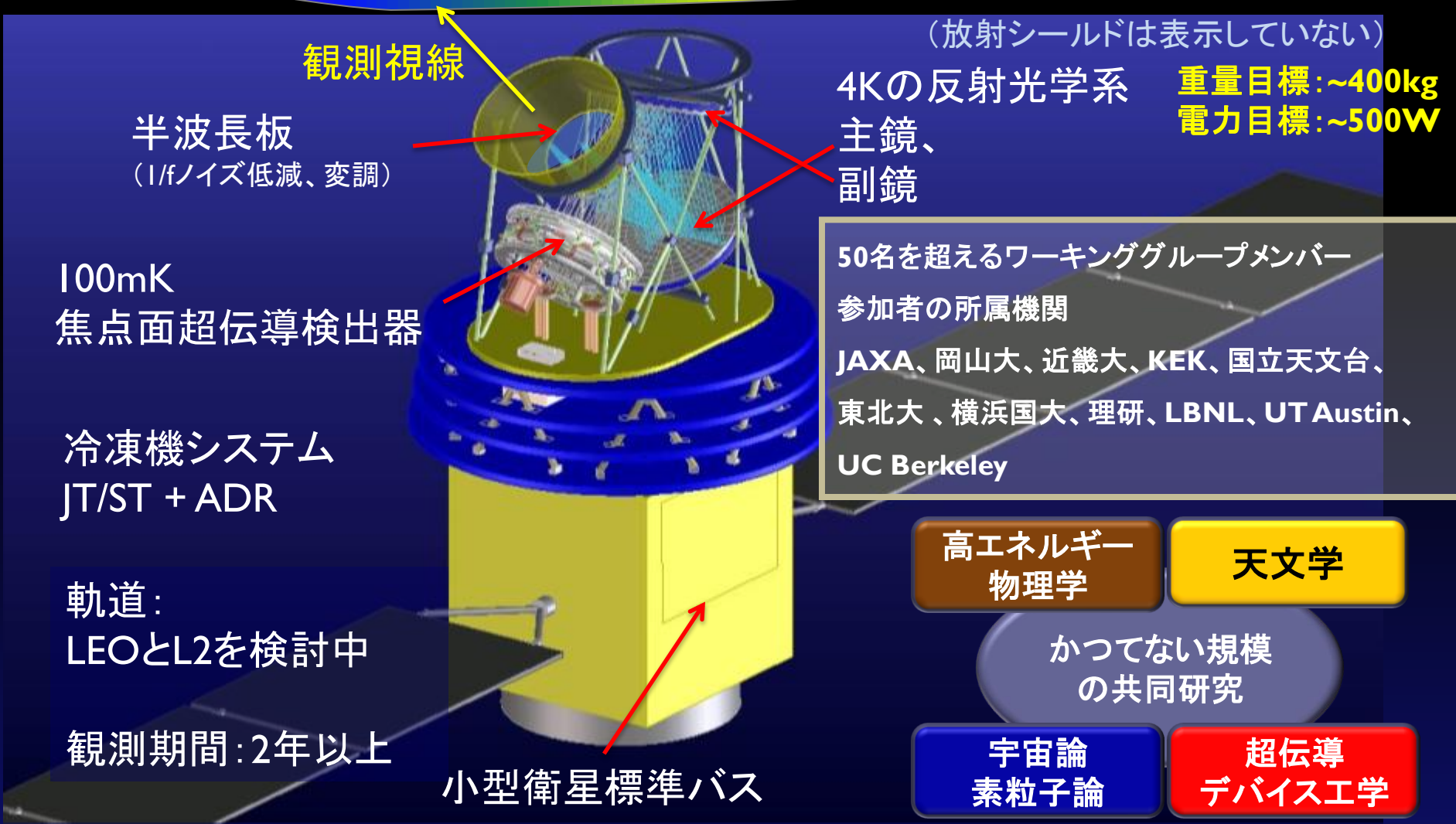
量子重力理論(超弦理論など)、時空構造の検証

更なる発展の道筋がある

地上でevidenceがなかなか得られない場合、衛星観測により、Large Field Inflationを完全にチェックすることが重要($r \sim 0.002$ まで探索)。cost effectiveな小型衛星を早期に打ち上げ、全天(大角度)での観測を行うのは、いずれにせよ最良の解。

LiteBIRD計画

JAXA小型科学衛星ワーキンググループの一つ



(放射シールドは表示していない)

4Kの反射光学系
主鏡、副鏡

重量目標: ~400kg
電力目標: ~500W

50名を超えるワーキンググループメンバー
参加者の所属機関
JAXA、岡山大、近畿大、KEK、国立天文台、
東北大、横浜国大、理研、LBNL、UT Austin、
UC Berkeley

観測視線

半波長板
(1/fノイズ低減、変調)

100mK
焦点面超伝導検出器

冷凍機システム
JT/ST + ADR

軌道:
LEOとL2を検討中

観測期間: 2年以上

小型衛星標準バス

高エネルギー
物理学

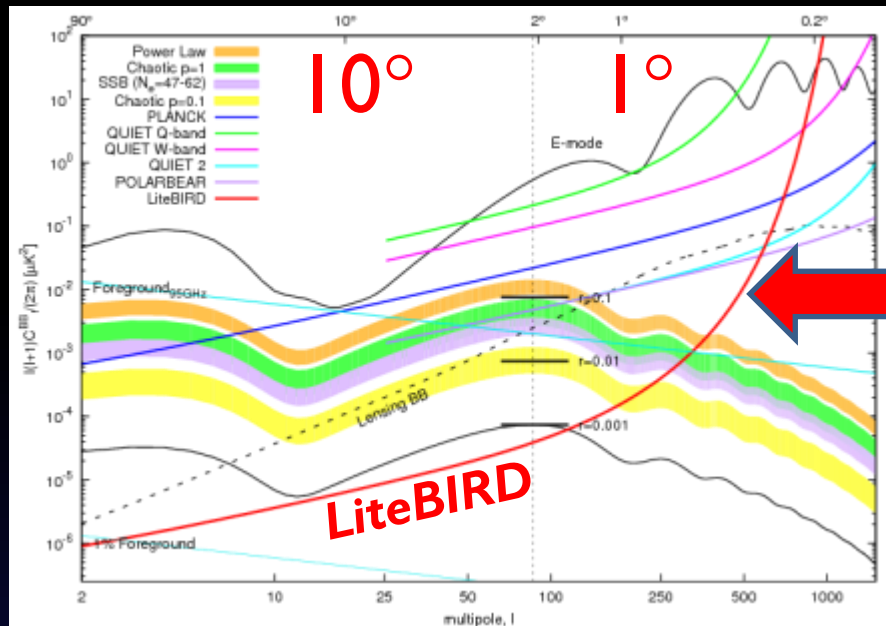
天文学

かつてない規模
の共同研究

宇宙論
素粒子論

超伝導
デバイス工学

何故、小型でやるか？



角度分解能は
0.5度 (@150GHz)
で十分

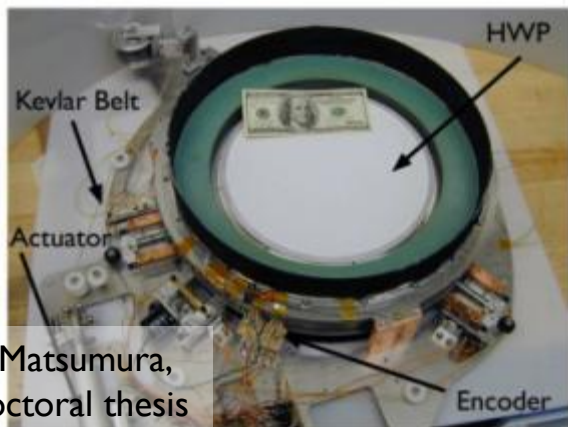
有効直径~50cmの
望遠鏡でよい

- ▶ 小型で究極の観測ができる！
- ▶ 小型なら世界に先駆けて打ち上げられる
- ▶ 「どうしても衛星でしかできないこと」をやる。地上大望遠鏡で相補的観測をおこなう。

欧米は、中一大型(~1000億円?)、多目的、2020年代中盤以降の可能性大

LiteBIRD光学系

回転半波長板



T. Matsumura,
doctoral thesis

空からの
入射光

光学系全体を
極低温に冷却する。

半波長板

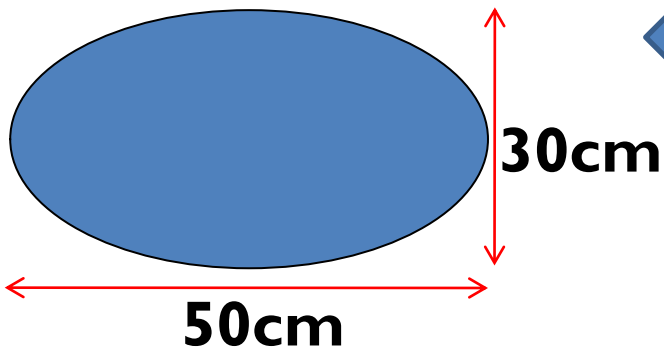
30cm

副鏡

焦点面

主鏡

利用可能な焦点面

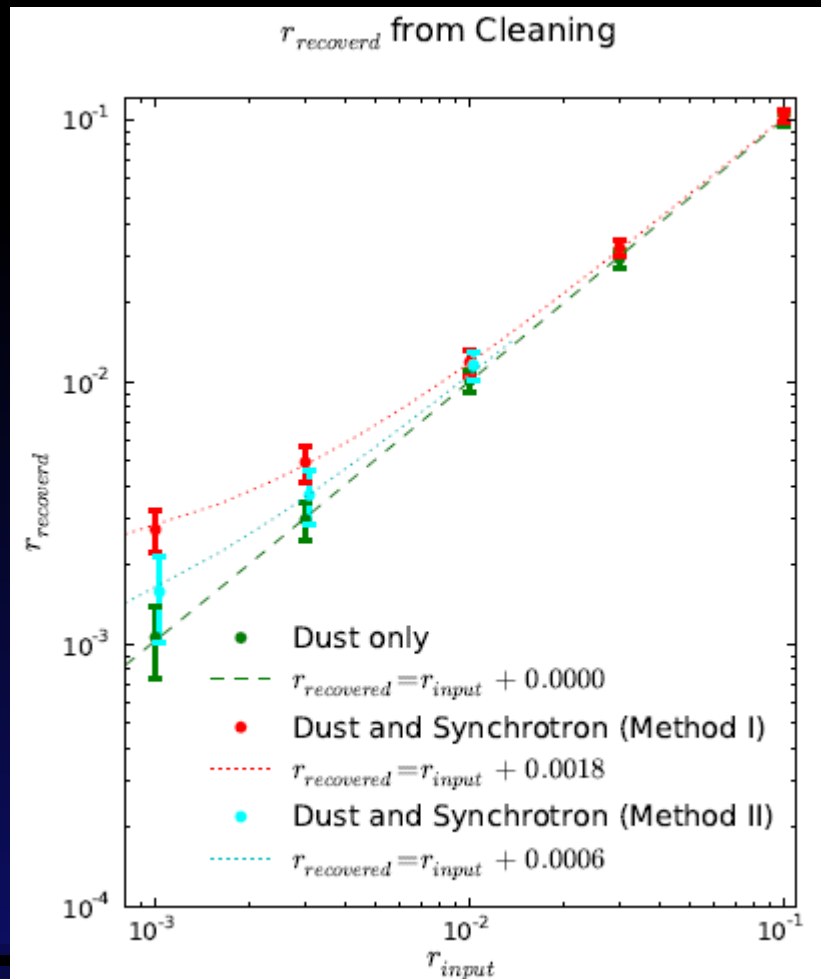


設計は完了、現在、
プロトタイプ試験中
GroundBIRD(後述)で使用



LiteBIRD 観測波長の決定

- 前景放射の除去 → 50GHz-250GHzで5バンド



最近の進展

Katayama and Komatsu,
arXiv:1101.5210

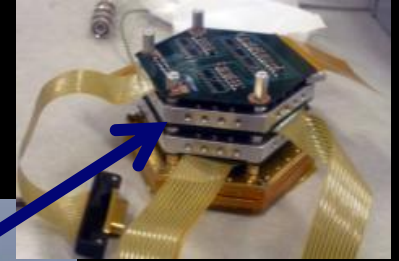
pixel-based polarized
foreground removal

(モデルによらない)

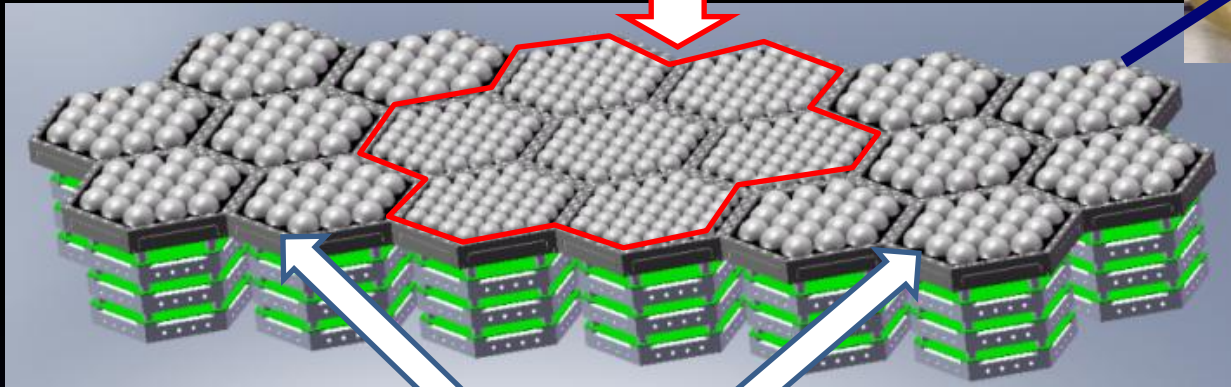
バイアスは $r \sim 0.0006$ 程度
(60, 100, 240GHzの3バンド)

LiteBIRD焦点面

3色 (100/150/220GHz)



TES
オプション



3色 (60/80/100GHz)

1926 TES bolometers
(POLARBEAR2の約1/3)
@ 100mK (Al/Mn)



$2 \mu\text{K} \cdot \text{arcmin}$
(w/ 4K mirrors)

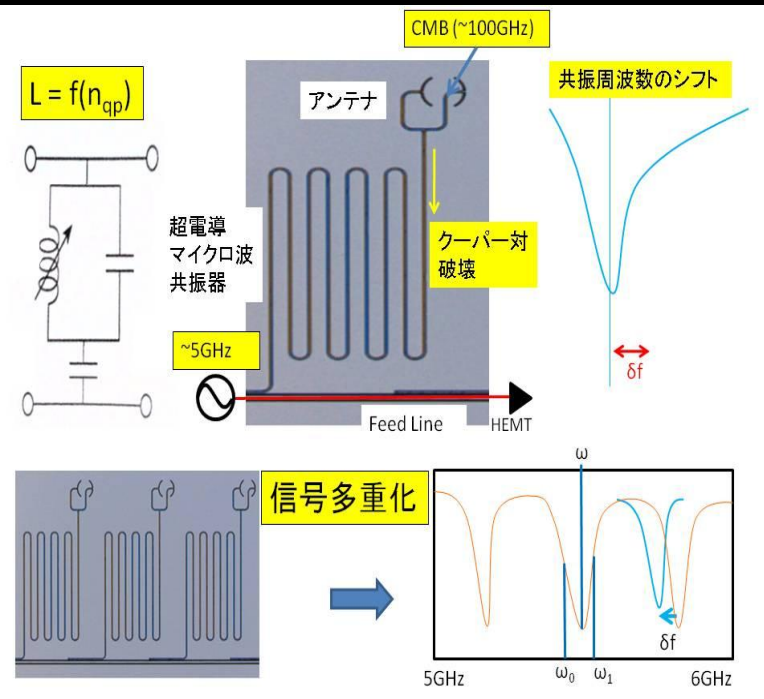
Technology challenge: low power readout w/ 48MUX
R&D by KEK/MacGill/UC Berkeley

LiteBIRD焦点面 (続き)

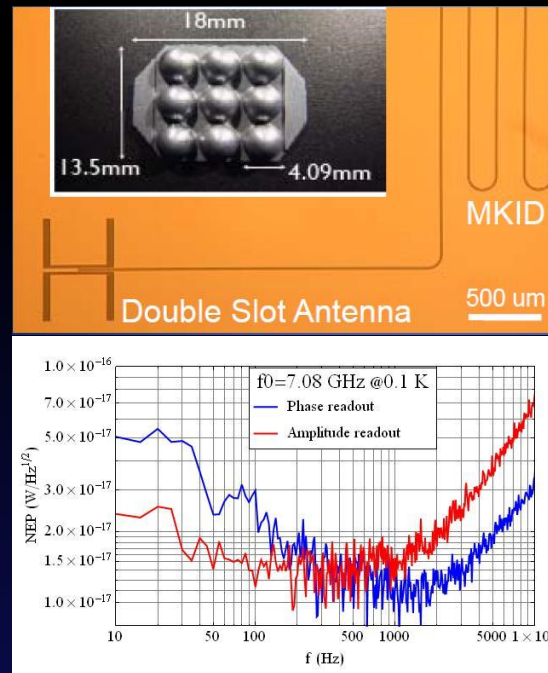
MKID オプション : **信号多重化が容易**

: 国立天文台ATC+理研+KEK+岡山大 (新学術領域「宇宙創成の物理」)

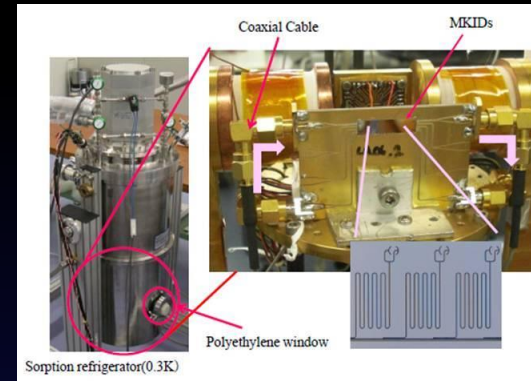
MKIDの原理



NEP $\sim 10^{-17} \text{ W/Hz}^{-1/2}$
を既に達成 (ATC)

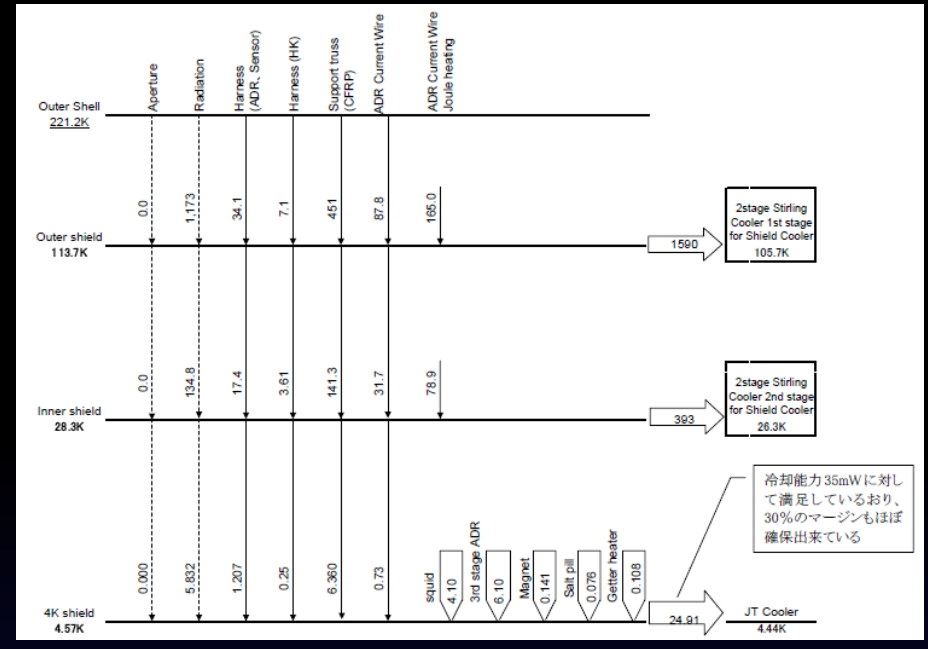
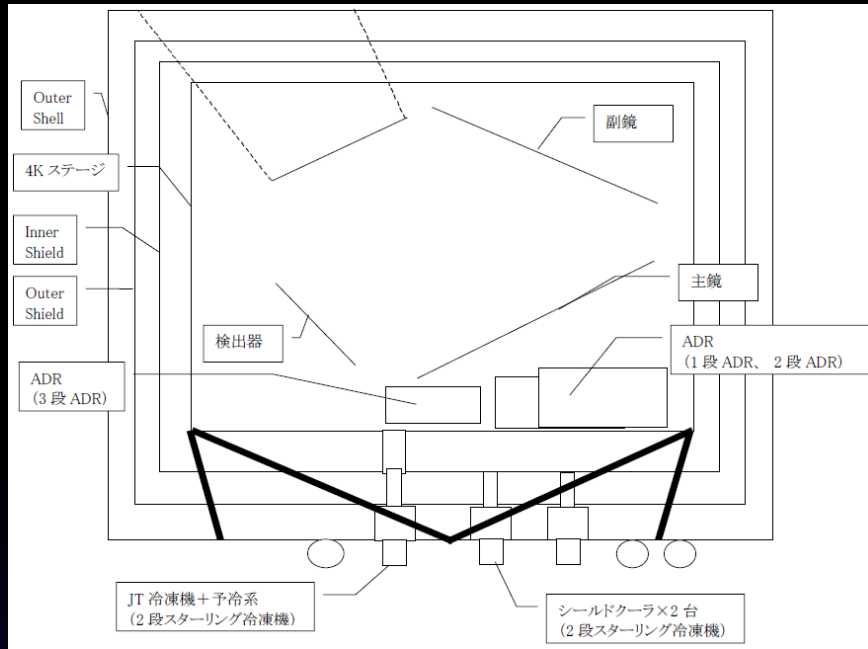


新しい読み出し方式 (tesonant tracking) を開発 (KEK/岡山)

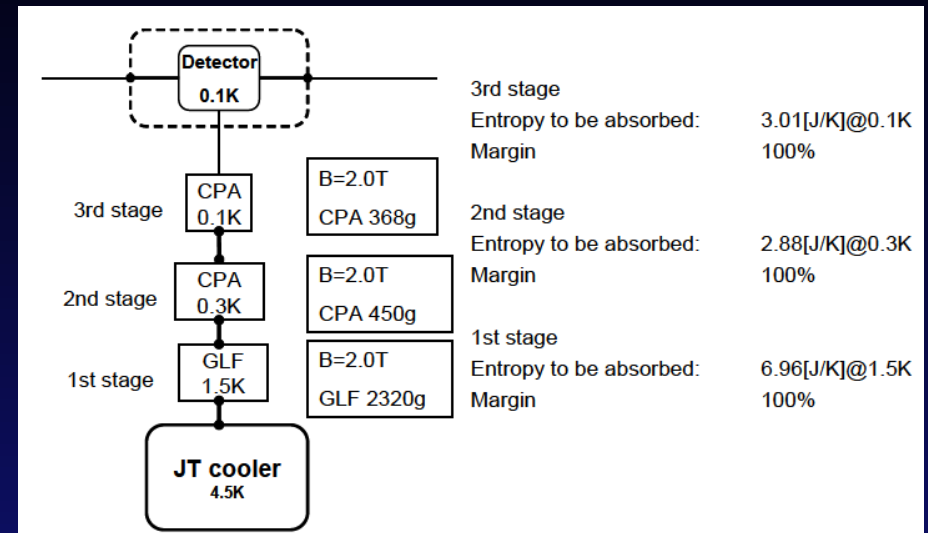


CMB(ミリ波)以外の波長にも応用可能。日本で自在に大焦点面検出器アレイが作れるようになることが、我が国の宇宙電波天文観測の将来にとって極めて重要。← **CMB観測R&Dにより貢献したい**

LiteBIRD熱設計



- 予冷系の熱解析を行った結果、冷却マージン28.8%の解が成立。構造解析も併せて行い、トラス構造の場合の剛性評価は小型衛星の要求仕様に近い値を達成。
- 3段ADRについて検討。観測中漏洩磁場はADRから100mmの距離を取れば0.5Gaussまで下げられる。重量は32kg。



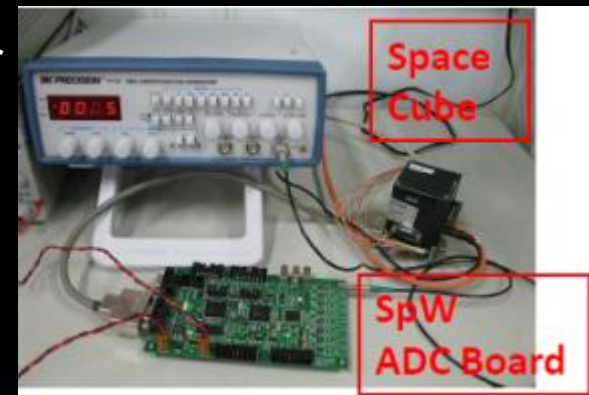
LiteBIRD DAQ・テレメトリー

技術的挑戦

➤機上データ圧縮

データ圧縮実装試験実施済み
Planckと同様の方法で
Virtex-5QV
2個相当のLUT

➤10GB/dayのデータ転送



	圧縮前 [kbps]	圧縮前 [Gbyte/day]	圧縮後[kbps] 27.4%圧縮率を仮定	圧縮後 [Gbyte/day]
LEO	2,457.4	26.5	673.3	7.26
L2	3,677.2	39.7	1007.6	10.9

一方テレメトリーで確保可能なデータ転送量は、Xバンドを仮定すると、

	転送レート[kbps]	局数	局数あたりの通信時間[hours/day]	実効可能データ転送量 [kbps]
LEO	10,000	2	0.67	558
L2	4,000	1	6	1,000

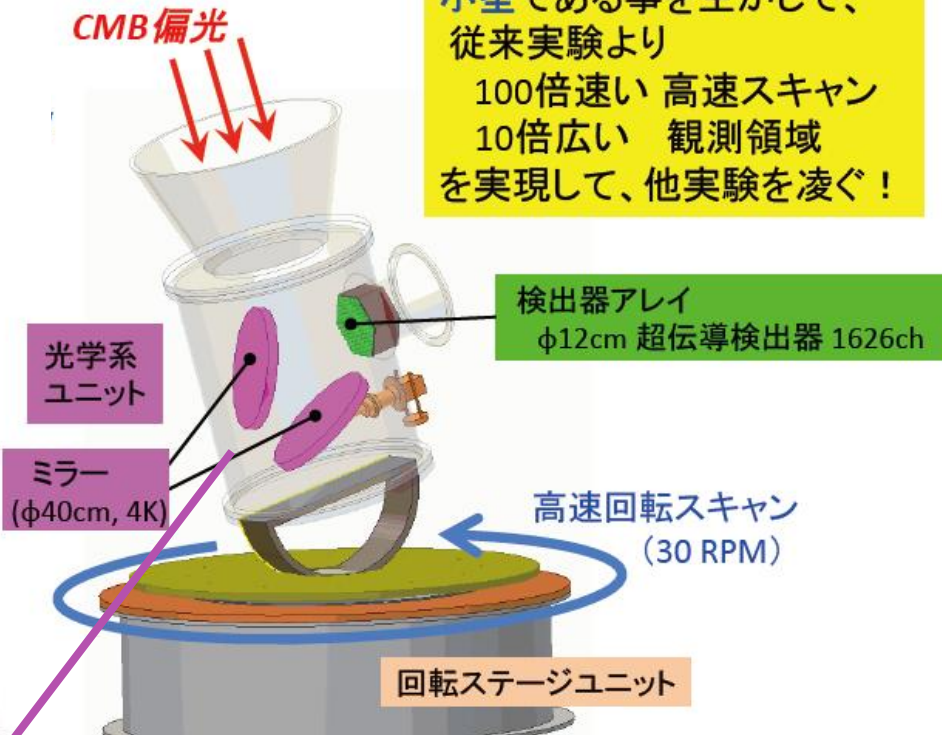
GroundBIRD

国内の参加機関を募集中！

LiteBIRDプロトタイプ、かつ
地上で大角度相関を見る
ことにより世界一をめざす
ユニークなデザイン

小型である事を生かして、
従来実験より
100倍速い 高速スキャン
10倍広い 観測領域
を実現して、他実験を凌ぐ！

2013年
に国内で試験観測
開始をめざす



ミラーの
ビームマップ
測定セットアップ



一緒にやりませんか？

「提言」の宇宙観測パート

- ダークエネルギーの観測や、宇宙マイクロ波背景放射(CMB) Bモード探索によるインフレーションの検証は、素粒子物理学としても重要な課題である。
- POLARBEARやQUIETなどのCMB Bモード地上観測がインフレーションの証拠となる原始重力波の存在を示唆した場合は、その決定的検証と背後にある量子重力理論の解明のため、人工衛星による全天超精密観測の実現を目指すべきである。
- ダークエネルギーに関しては、イメージングと分光を駆使して測定精度を高めていくことが重要である。

「将来計画の策定に向けた提言」 3. 将来計画のシナリオ 「宇宙観測」

宇宙観測と素粒子物理 その他のトピック

6月25日東大
タウンミーティング
でのスライドから

- 基本対称性のテスト(重力パリティ、CPTなど)
 - 新粒子への制限(グラビティーノ、アクシオンなど)
 - ニュートリノ質量和の制限
- 素粒子実験と相補的
- より広い宇宙観測による素粒子物理
 - 「宇宙物理学と素粒子物理学の相乗的かつ統一的な発展のために」 素粒子と宇宙連絡会 2007年8月21日
 - 「宇宙線分野の将来計画について」 宇宙線研究者会議実行委員会 2011年3月3日
 - 「天文学・宇宙物理学の展望と長期計画」 日本学術会議 記録 2010年3月
 - 推進に関して:
 - 宇宙科学、宇宙線、天文など近隣分野との相互理解を促進し、学問的、技術的、人的連携を強化し、更なる発展をめざす。

「最終答申」で関連分野の活動と連携について記載予定

バックアップ

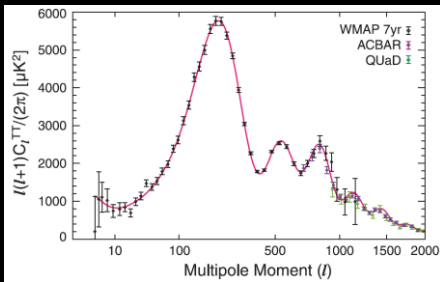
高エネルギー物理における宇宙観測の基本戦略



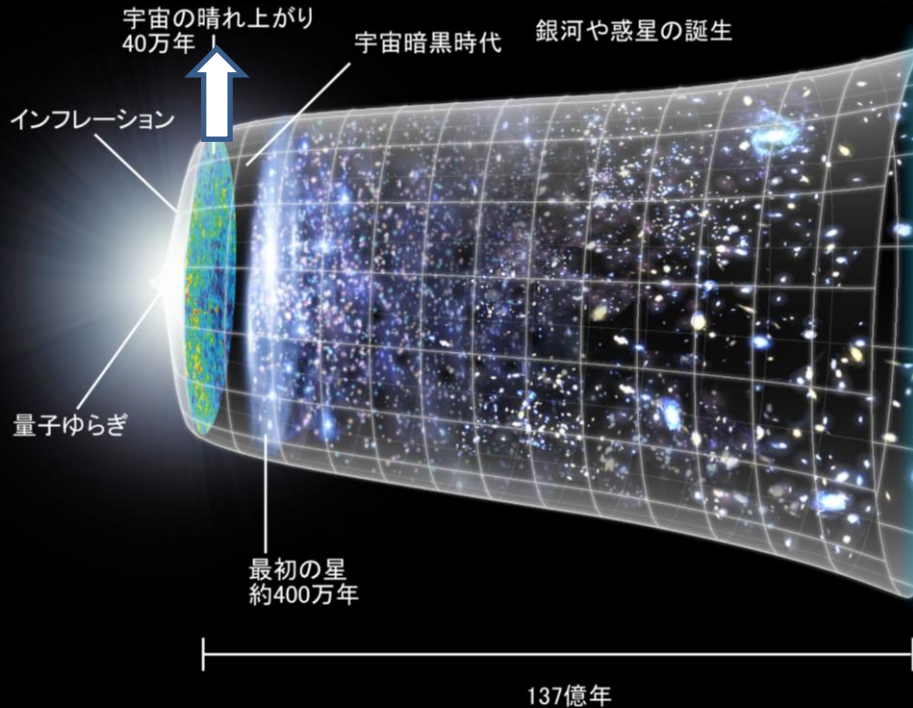
- 高エネルギー物理学
= 素粒子と時空の根本原理を探る学問

- 根本原理探求に直接関与する宇宙観測を選び、プロジェクトをたてる。

5つの謎



ダークエネルギーによる
宇宙の加速膨張



5つのBeyond the Standard Model

インフレーション、
バリオジェネシス、
ダークマター、
ニュートリノ質量
ダークエネルギー

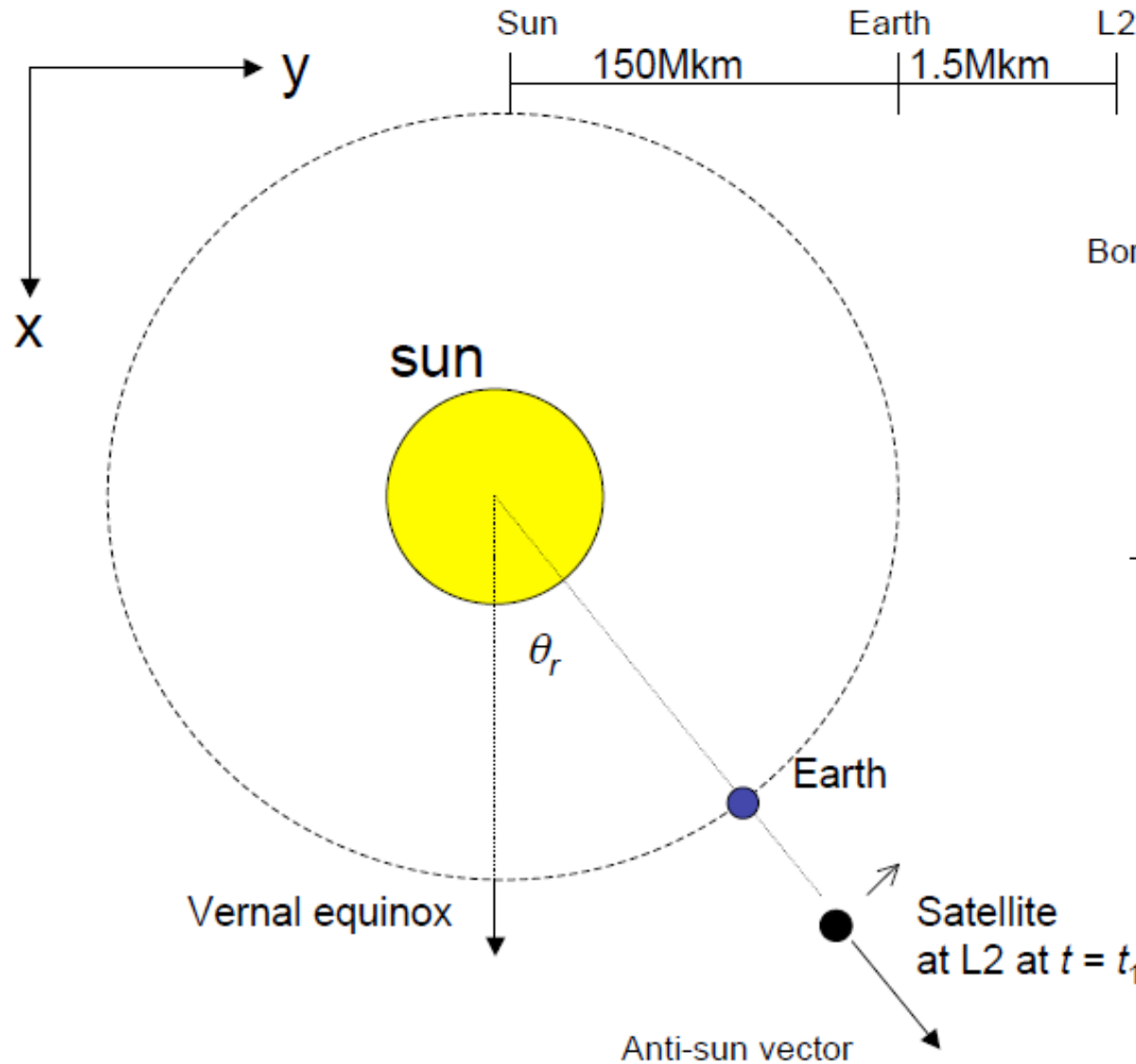
This talk

- 謎の解明をめざし、すでに一部の高エネルギー物理学者が参入し、貢献。
- 素粒子物理にとって、今後10~20年の宇宙観測は、黄金時代。
- 「宇宙を実験室」として高エネルギー物理は今後ますます活発に推進すべき。

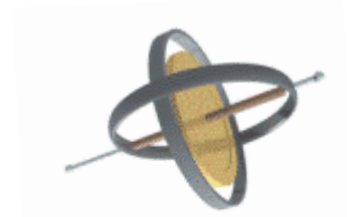
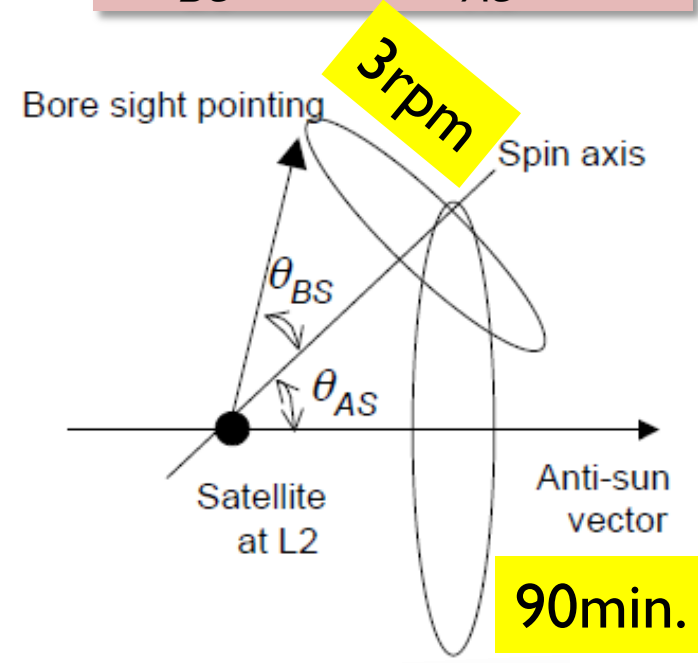


QUIET
Observing site:
Atacama, Chile
(5080m)

LiteBIRD L2軌道・スキキャン



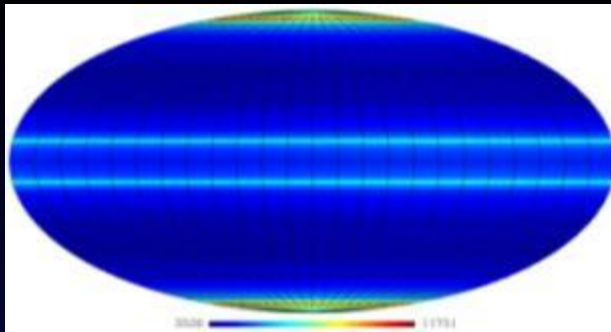
$\theta_{BS} = 55^\circ, \theta_{AS} = 45^\circ$



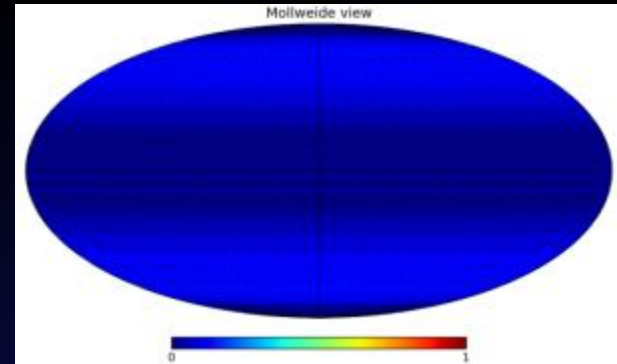
LiteBIRD L2軌道・スキャン

- Pros

- 理想的な環境 → 系統誤差最小
- 地球、月の影響がない → 常に観測可能
- 熱設計等がよりシンプル



観測時間

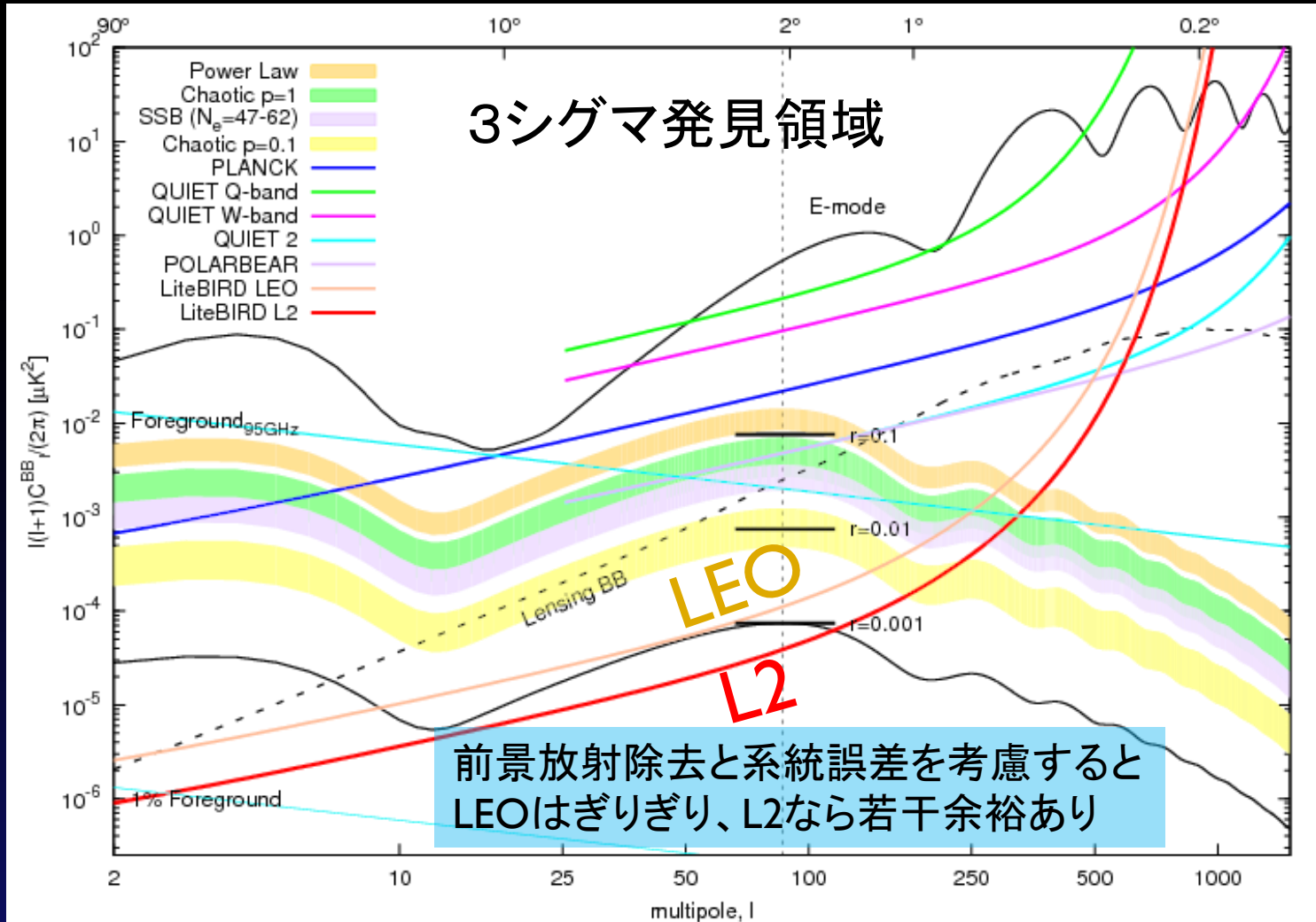


クロスリンク

- Cons

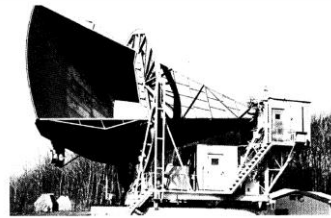
- L2へ行くこと
- 宇宙線の影響(glitches)

L2 vs. LEO



要求される観測精度

CMBの発見(ペンジャス、ウィルソン) 1978年ノーベル物理学賞
「ビッグバンの証拠」



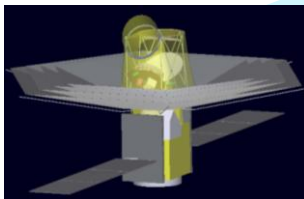
CMB非等方性の発見、プランク分布の証明(マザー、スムート)
2006年ノーベル物理学賞
「インフレーション宇宙を示唆、時空の量子揺らぎの証拠」



WMAP, PLANCK: 解像度の向上 → 宇宙年齢、ダークエネルギー



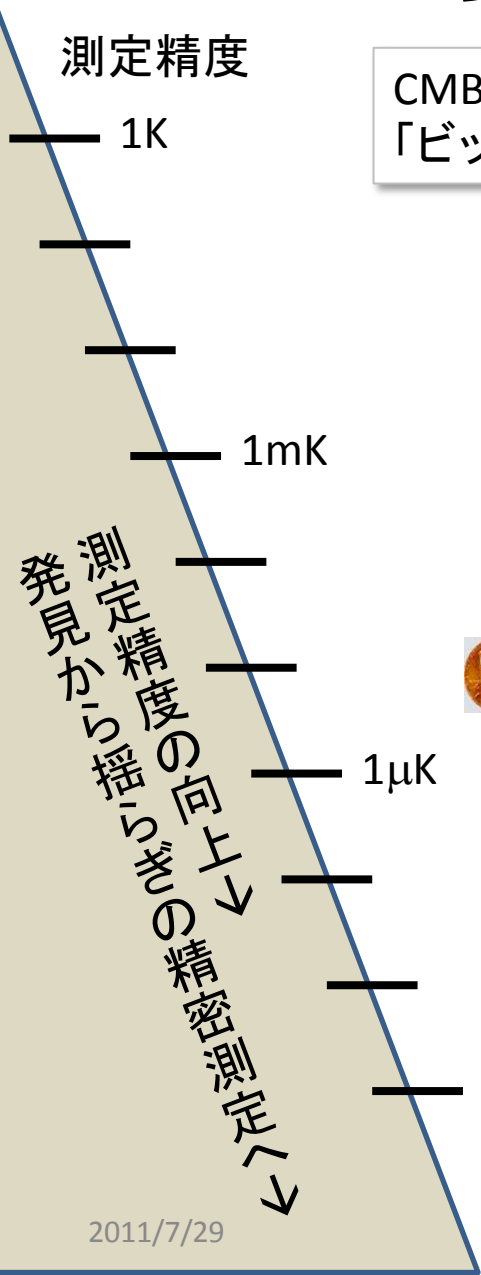
QUIET,
POLARBEAR
(チリの高山に設置)



LiteBIRD
(日本が主導)

CMB偏光揺らぎ精密測定
による原始重力波の検出
→ **ビッグバン以前**に放出
された信号の検出
→インフレーション宇宙の
直接検証

高エネルギー物理将来計画検討小委員会タウンミーティング (IPMU)
羽澄昌史 (KEK)



2個のアンテナ・ボロメータが対になり1個のピクセルを構成

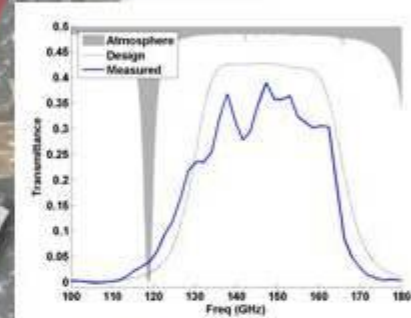
スロットアンテナ
(直交するアンテナ
が対に)

フィルター
(150GHz)

レンズ

1枚の
ウェファー
に91対

7枚のウェファーで観測(@チリ)

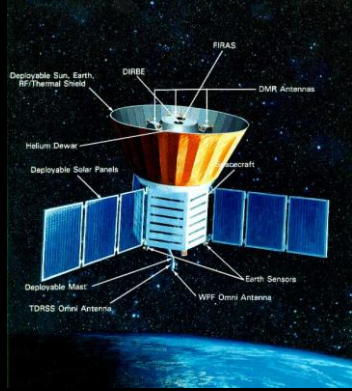


TESボロメータ
(Al/Ti bilayer, ~0.25K,
NEP ~ 4×10^{-17} W/ $\sqrt{\text{Hz}}$)

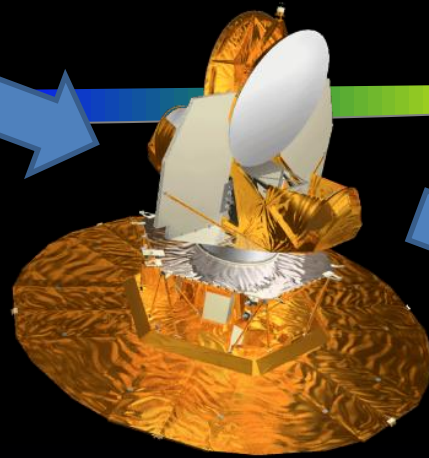
合計1274個のボロメータ

→ 1'あたりのノイズレベル: $W_p^{-1/2} = 8\mu\text{K}$ (150GHz・3年間)

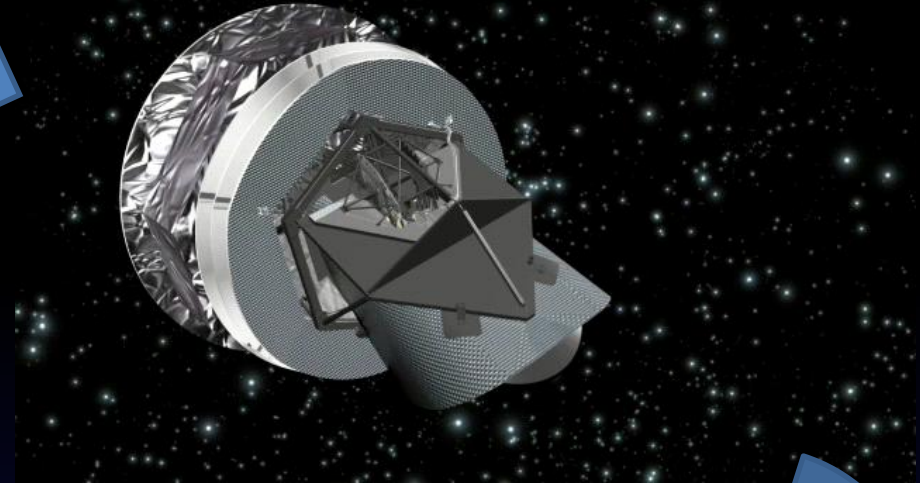
衛星観測：国際情勢



COBE
(1989
—1993)



WMAP
(2001—)



Planck
(2009—)

↑ 温度観測が主目標

↓ 偏光観測が主目標

LiteBIRD (日本)：小型衛星
(~2020—) **EPIC、PIXIE (米国)：中・大型衛星**
B-Pol、COreE (ヨーロッパ)：小・中型衛星