

CMB偏光観測実験 の Overview

羽澄昌史 (KEK)

2010年3月22日

日本物理学会年会 (岡山大学)

目次



1. CMB偏光観測実験の魅力

2. どんな原理で観測しているのか？

- ・ 宇宙線・宇宙物理実験、素粒子実験と何が違うの？

3. どんなプロジェクトがあるのか？

- ・ 日本の取り組みは？

4. どんな結果が期待されるのか？

- ・ 実験屋から見たプロジェクト成功のキモは何か？

1.CMB偏光観測実験の魅力

1. 宇宙創生に最も肉迫できる実験研究

- ・ 「我々が存在する」ことへのセンス・オブ・ワンダーを喚起

2. プランク・大統一スケールの超高エネルギー物理

- ・ インフレーションのエネルギースケール決定の可能性

3. 量子重力理論検証の道を拓く

- ・ 「不可能」とされてきた超弦理論のテストを可能にする

4. 原始重力波に加えて多彩なテーマがある

- ・ ニュートリノ質量、ダークエネルギー、など
 - － 例) POLARBEARでニュートリノ質量和の誤差: 0.4eV (1シグマ)

1.CMB偏光観測実験の魅力



5. CMBは大自然の造形物

- 未登峰に挑戦するような魅力。

6. 装置づくりの魅力、発明のチャンス

- 超伝導検出器など、最先端テクノロジーの活用、発明
- 異常に厳しい性能要求に応える喜び(?)

7. ロケーションの魅力

- 美しい自然
- チリにおける文化交流
- 高地における心肺機能の強化

薄い大気の中、ガンガン働く人たち

日下さん
(シカゴ大)



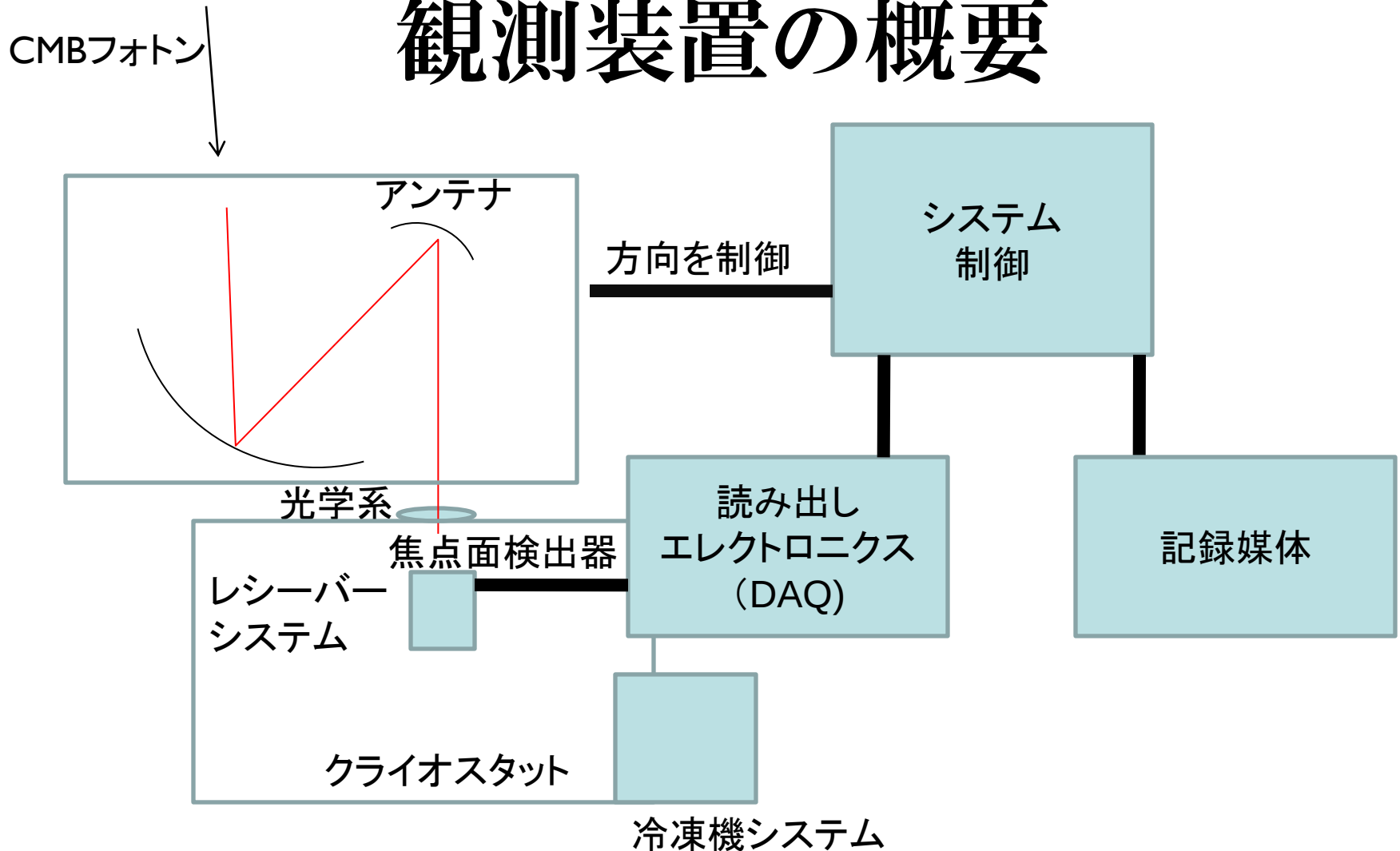
田島さん
(KEK)



2. どんな原理で観測しているのか？



観測装置の概要

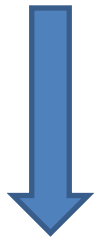


装置のエッセンス

- アンテナ・光学系：電波の方向を位置に変える
- 焦点面検出器：電波のエネルギーを電圧に変える

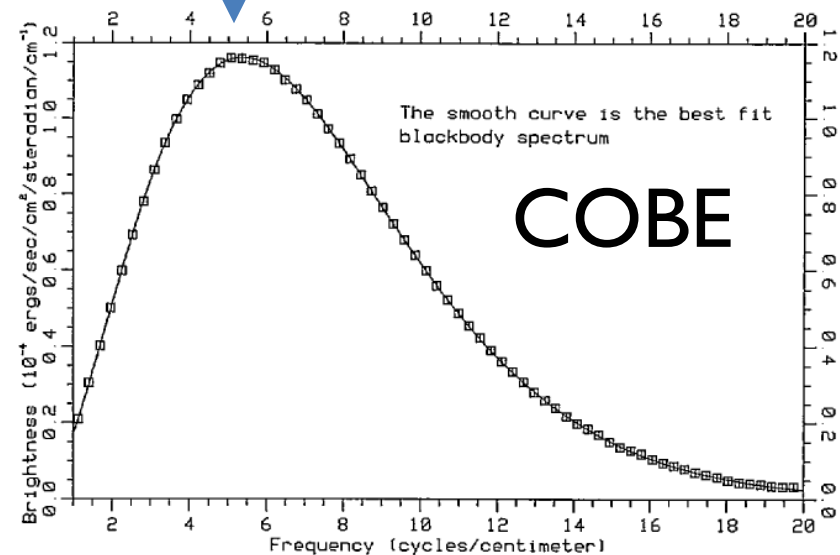
CMBフォトン

- (2.725 ± 0.002) Kの黒体放射 (160GHzでピークを持つプランク分布)
- ~ 400 個/cm³



光子数密度

$$n = \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$



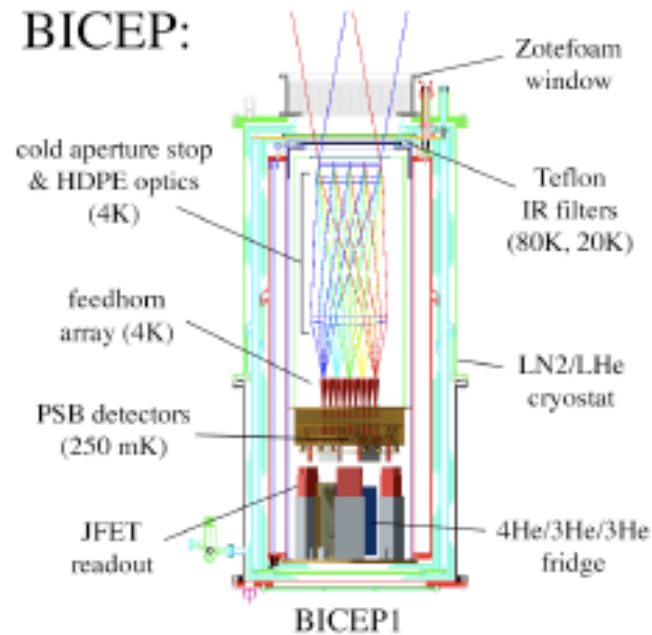
- $n \ll 1$ では波としての検出が困難
- $n \gg 1$ ではポアソン統計に従わない(フォトンバンチング)

アンテナ

$$\text{角度分解能} = \lambda/D \text{ [radian]}$$

屈折型

$D = 25\text{cm}$

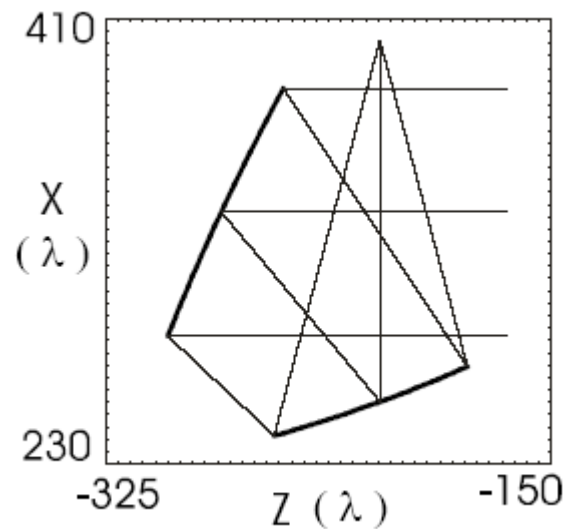


反射型

どちらも交差偏波をうち消すような設計

Crossed Dragone

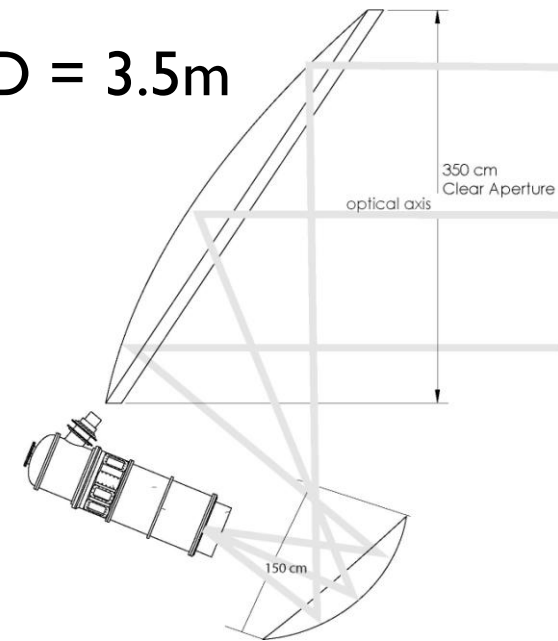
$D = 1.4\text{m}$



QUIET

Offset Gregorian

$D = 3.5\text{m}$

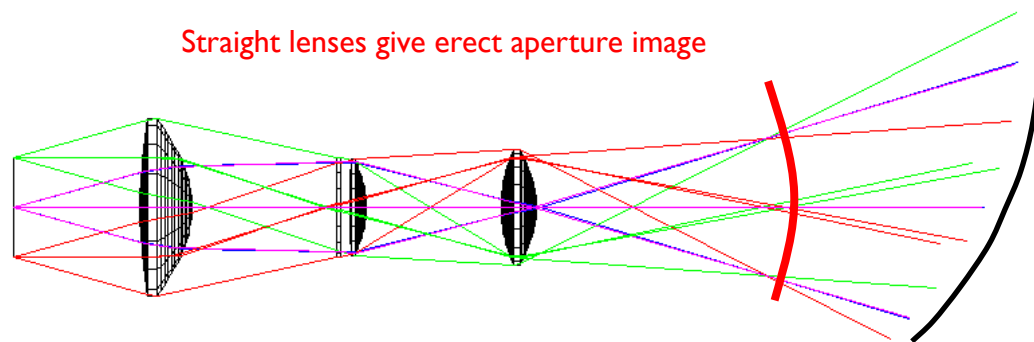
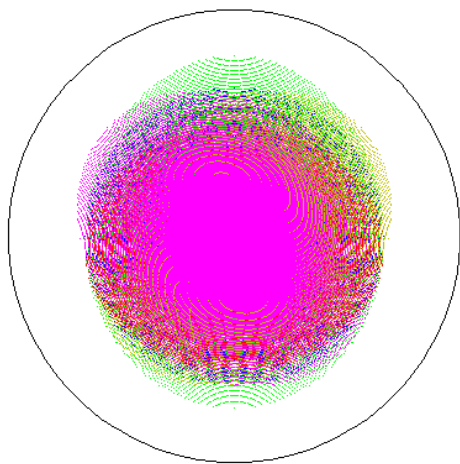


Huan Tran Telescope
for POLARBEAR

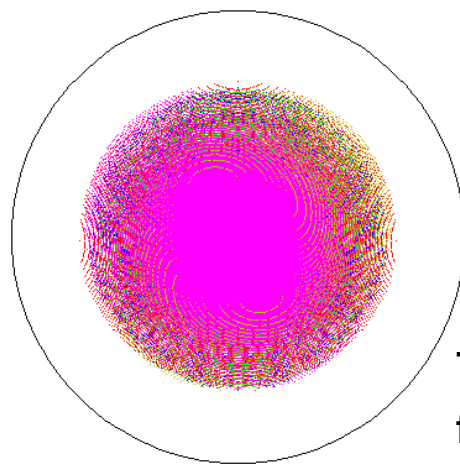
光学系

なるべく対称なビームを作ることが大事
(泥臭い最適化問題)

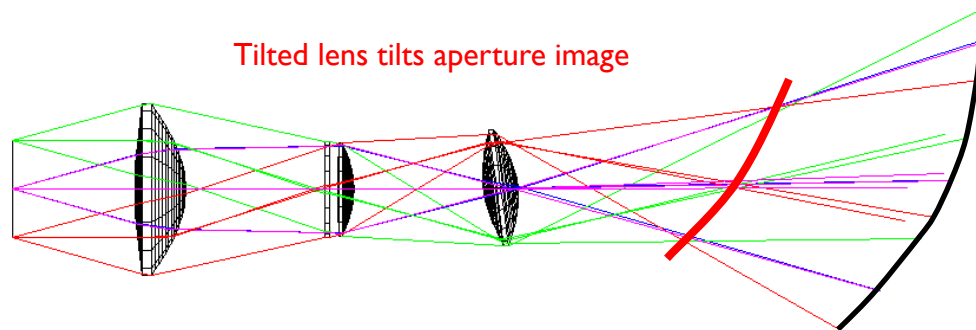
‘Footprint’ of beams on primary



Straight lenses give erect aperture image



Tilted Field lens
fixes Non-Overlapping Beams

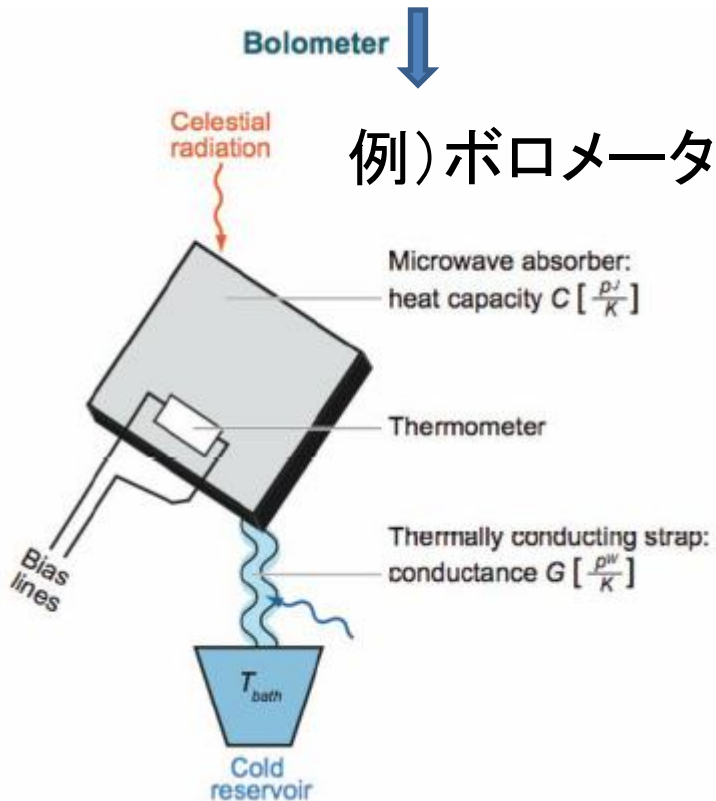


Tilted lens tilts aperture image

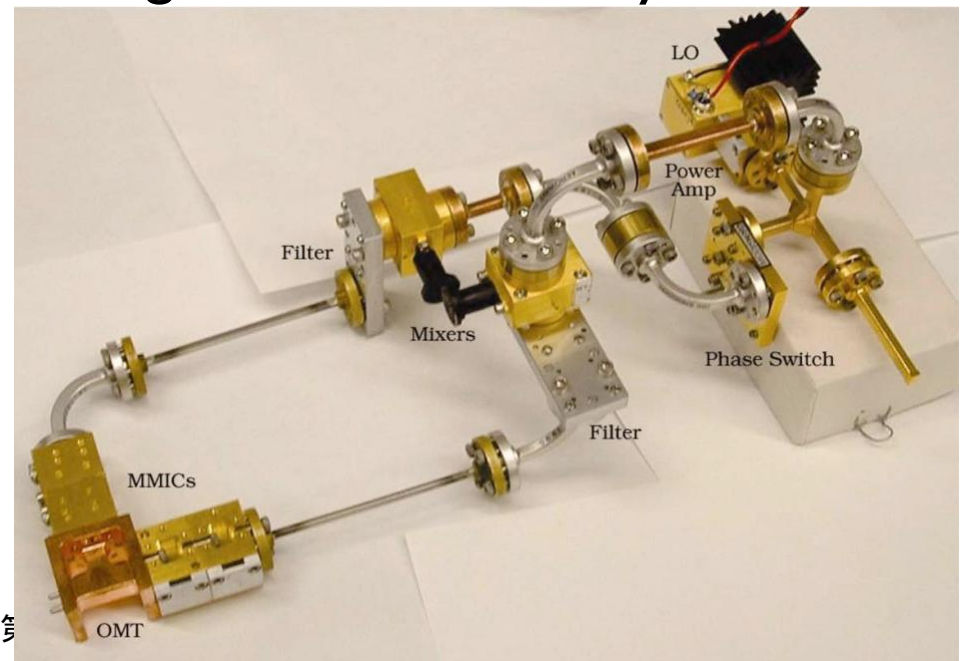
By Huan Tran
for POLARBEAR

焦点面検出器

- 偏光受信の方法
 - 差分検出、変調・復調検出、の二つに大別
- 検出器
 - 熱雑音低減の必要性 → 低温
 - 二種類に大別
 - インコヒーレント検出器(パワーメータ) vs. コヒーレント検出器(高速アンプ)



HEMT
(High Electron Mobility Transistor)



超伝導検出器

- インコヒーレント検出器の一種
- 究極の感度を実現
- アレイ化・信号多重化に適している→ 将来の衛星実験はこれ！

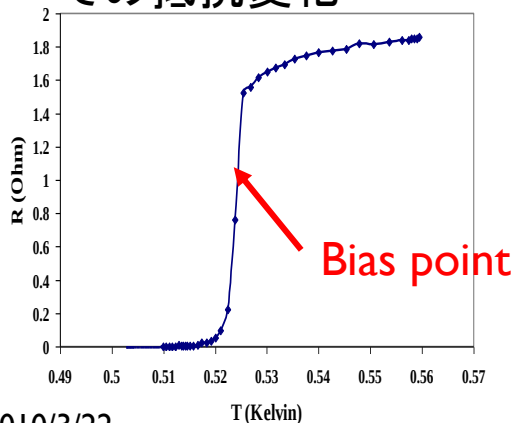
ボロメータ

TES

Transition Edge Sensor

“Variable Resistor”

転移温度付近
での抵抗変化



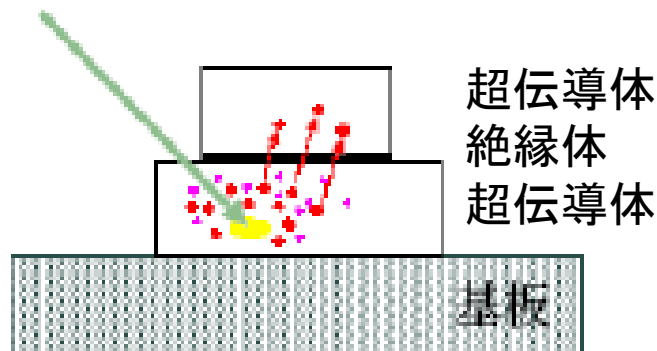
2010/3/22

クーパー対破壊型

STJ

Superconducting
Tunnel Junction Sensor

“Photoconductor”

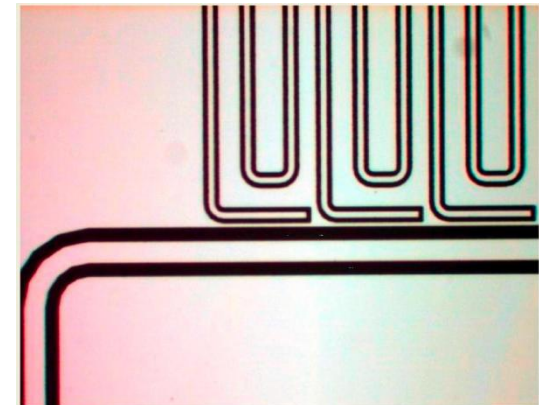


日本物理学会第65回年次大会（岡山大学）

MKID

Microwave Kinetic
Inductance Detector

“Variable Inductor”



12

今年度より岡山大・KEK・国立天文台・理化学研究所の共同研究開始 クーパー対破壊型検出器アレイの開発

KEKクリーンルーム作業風景

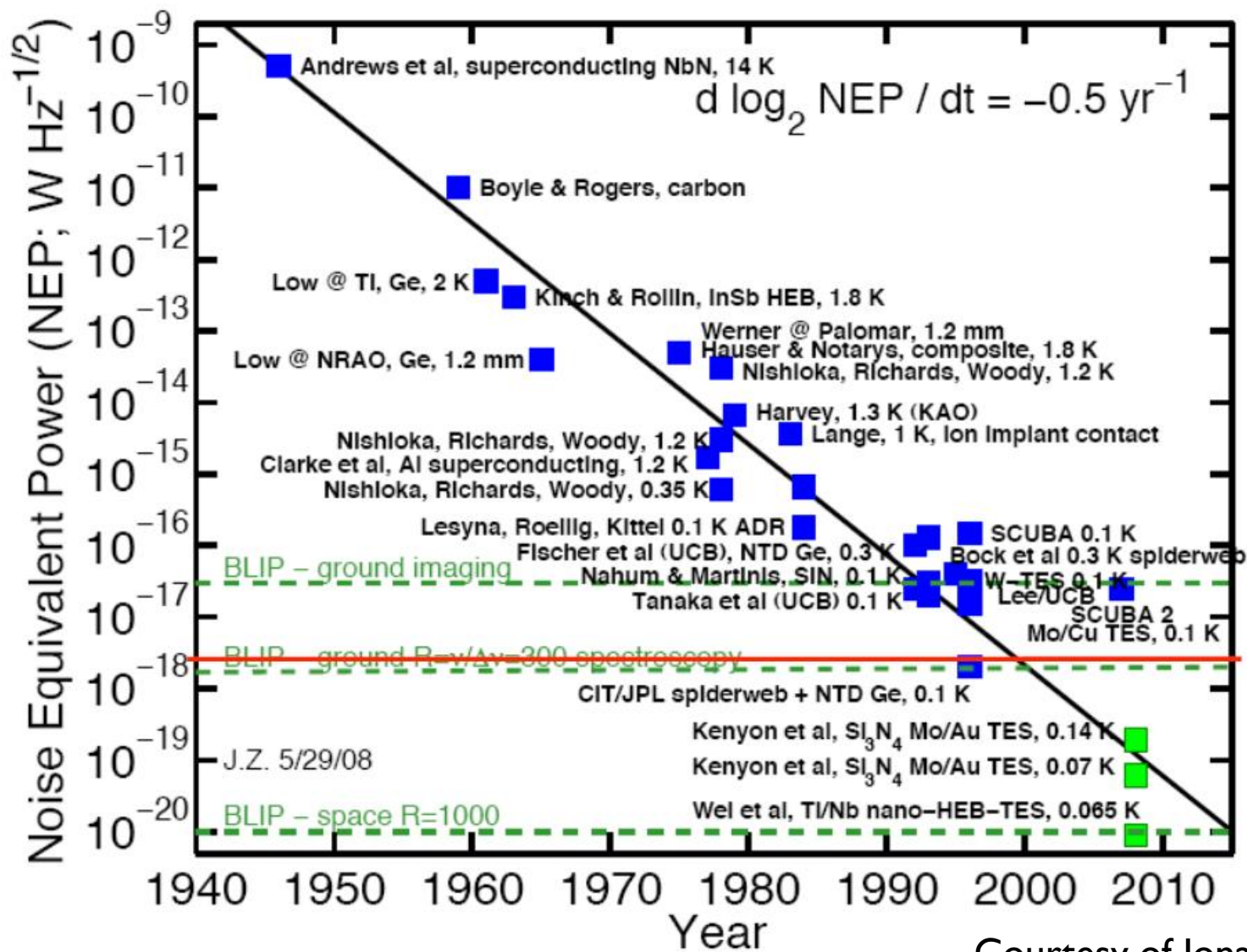
岡山大・美馬さん



岡山大・石野さん



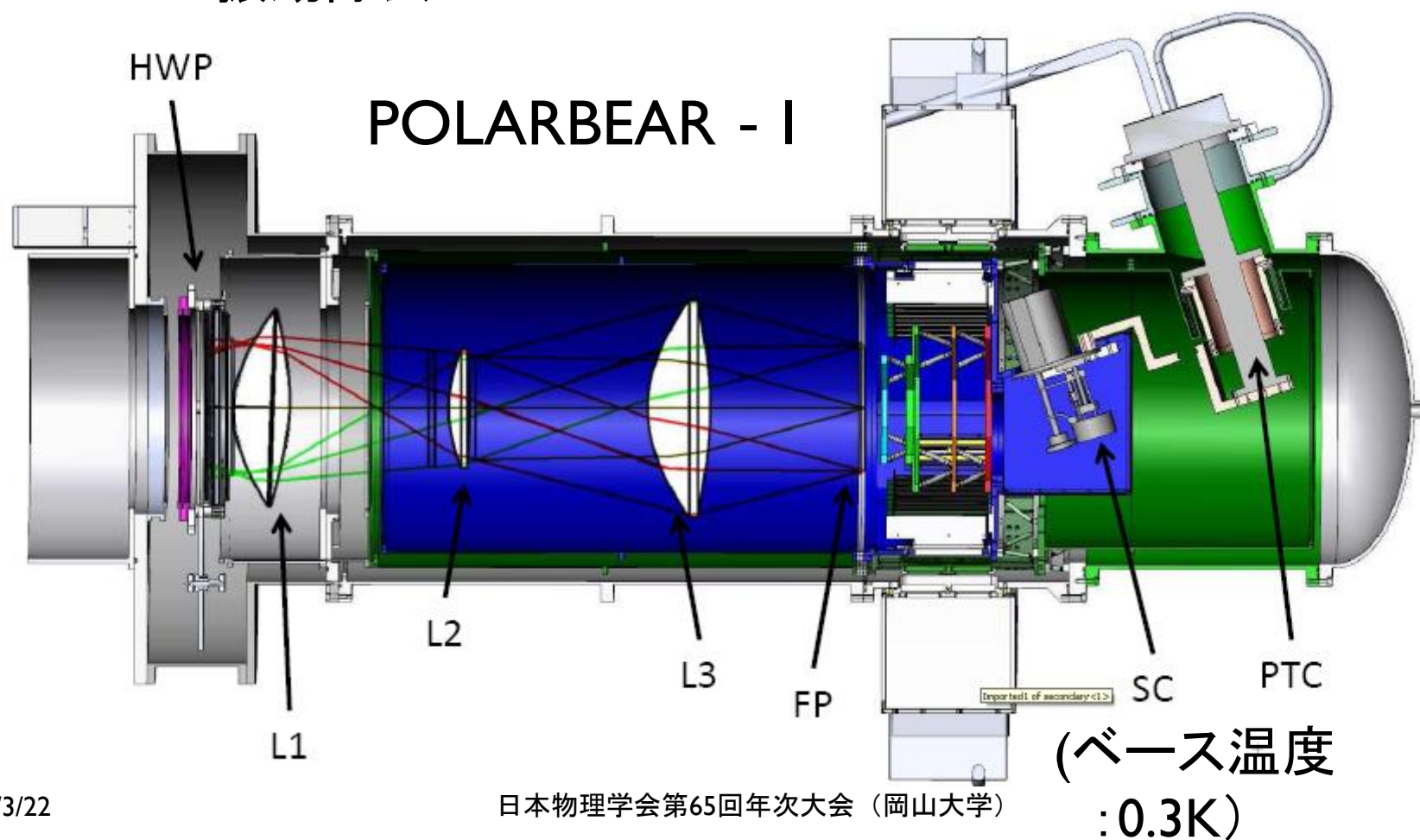
LiteBIRDのための開発を推進中



Courtesy of Jonas Zmuidzinas

レーザーシステム

- 焦点面と光学系を冷却
- 赤外線フィルターで熱侵入を防ぐ
- モジュレーション(半波長板など)
- 振動除去



統計誤差

検出器の感度、アレイ数、観測時間で決まる

$$(\Delta T_{exp})^2 \propto 1/t$$

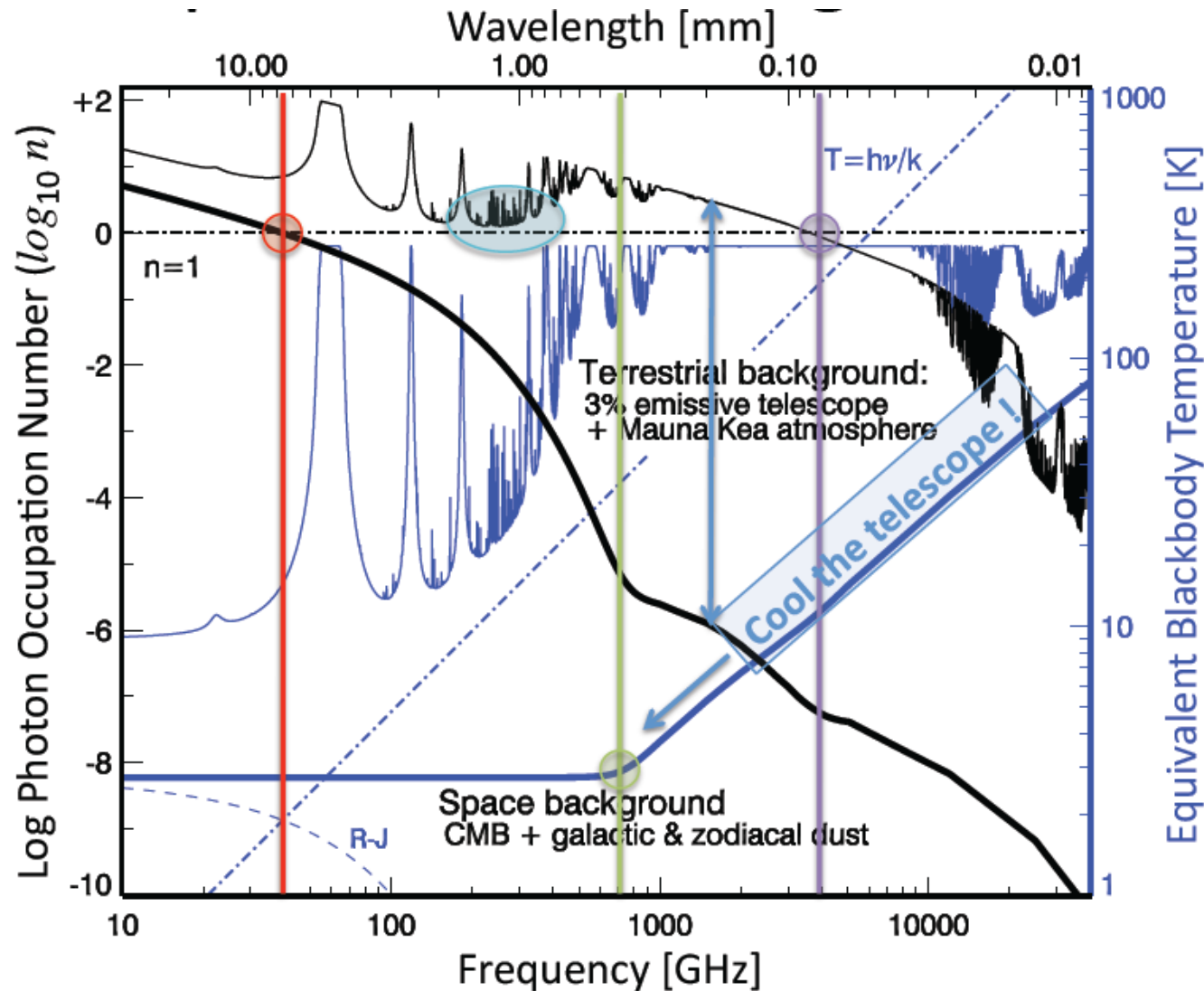
$$\frac{\Delta C_l}{C_l} = \sqrt{\frac{2}{2l+1}} \left(\frac{1}{\sqrt{f_{sky}}} + \frac{4\pi(\Delta T_{exp})^2}{C_l} \sqrt{f_{sky}} e^{l^2 \sigma_b^2} \right)$$

↑
コスミックバリエーション
一つの宇宙で
almは(2l+1)個

↑
観測した天空の割合
(小さいとサンプル
バリエーションが大きくなる)

↑
ビームサイズ

- 1/fノイズ対策: 変調・復調も重要



$n < 1$
CMB, $\nu > 40$ GHz

CMB dominates
background from
space for
 $\nu < 700$ GHz

$n < 1$
from ground for
 $\nu > 4$ THz

$n \sim 1$
from ground for
 $\nu \sim 200-300$ GHz

系統誤差

- 実験屋が最も時間を割くところ
- スキャン法とキャリブレーション法は系統誤差減少と密接に関連 → 日下さん、松村さんのトーク
- 複雑なので、一例のみ

$\Delta T \rightarrow E, B \text{ leakage}$

温度揺らぎ+ 装置の交差偏波で
人工的にE-mode, B-modeを作ってしまう

ΔT

$\sim 30000 \text{ nK}$



1%の交差偏波

$\sim 300 \text{ nK}$



スキャン・空の回転による変調・復調

$O(10) \text{ nK}$

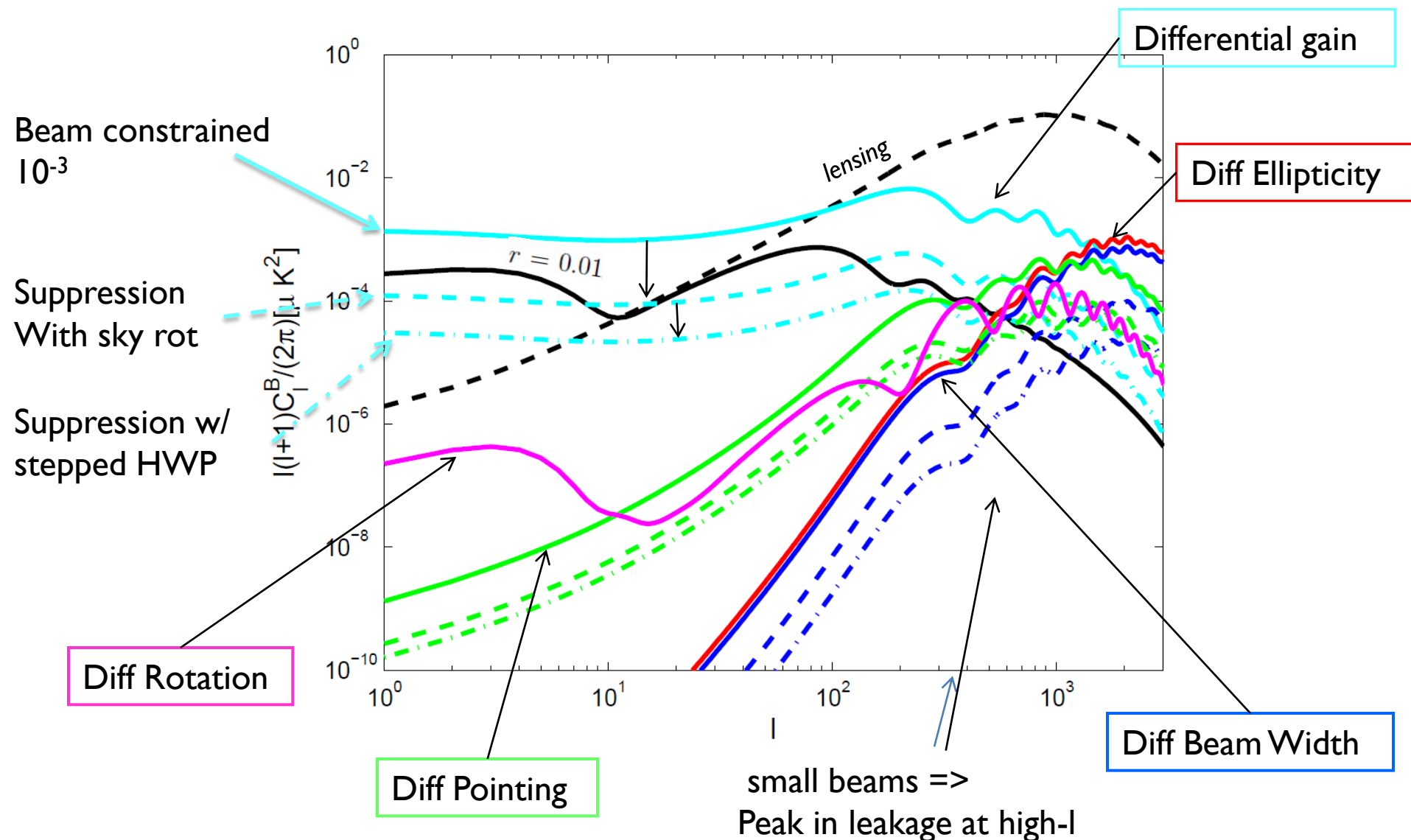


更なる変調・復調

$O(1) \text{ nK}$

Beam Effectによる系統誤差の見積もり (POLARBEAR)

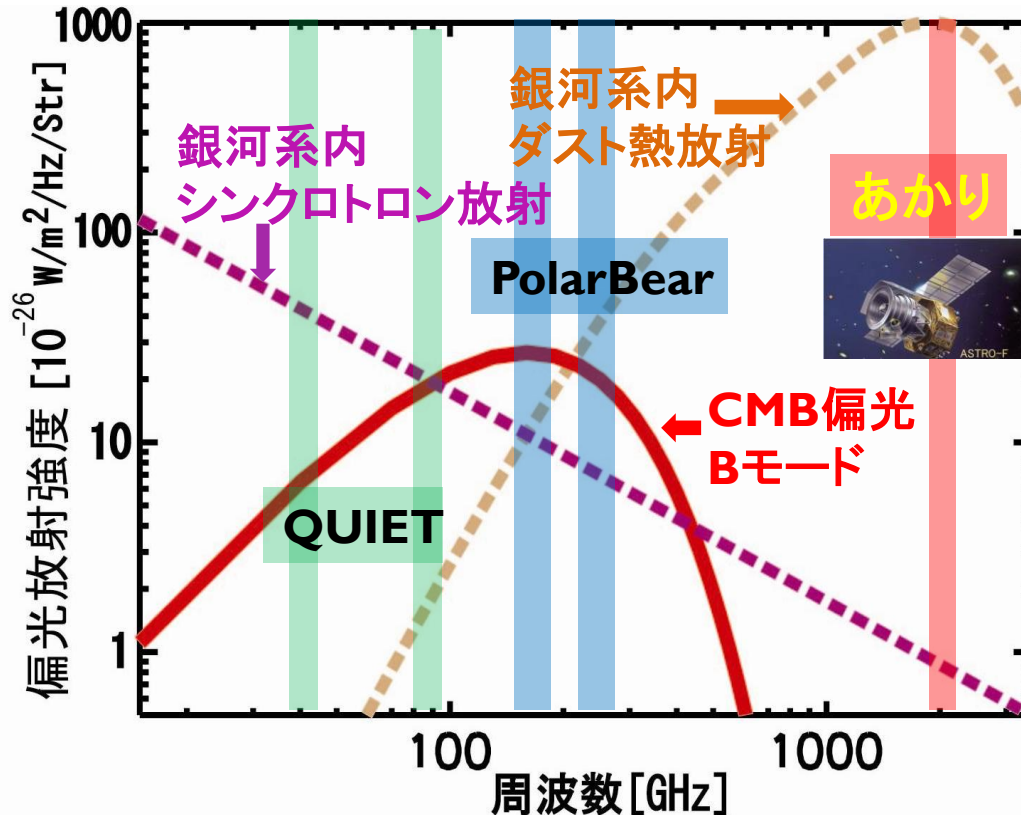
H. Tran
CMBpol workshop
June 2009



前景放射の分離

$$\text{観測データ} = \text{背景放射 (CMB)} + \text{前景放射 (銀河系からの放射等)}$$

- 新学術領域計画研究A04(代表・服部誠)
 - 宇宙マイクロ波背景放射と前景放射の高精度成分分離スキームの構築
- LiteBIRDで $r \sim \mathcal{O}(0.001)$ を達成するための研究 → 松村さんのトーク



宇宙線・宇宙物理実験、素粒子実験と何が違うの？

「違う」というより、留意点を以下に列挙します

- 光子がポアソン統計に従うとは限らない(フォトンバンディング)
- コスミックバリエーションがある(宇宙はひとつ)
- 検出器雑音大→測定量(r, C_l)の誤差は測定時間に(ほぼ)反比例
- トリガーがない

似ているところ、同じところも多々あります

例)大規模データ取得システムの必要性

→ 高エネルギー物理の技術が貢献できる



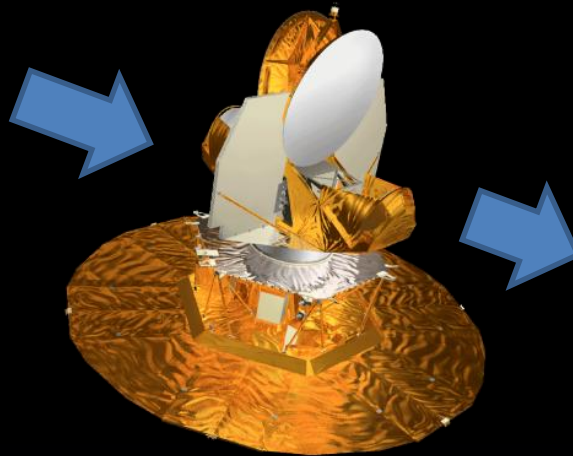
3. どんなプロジェクトがあるのか？



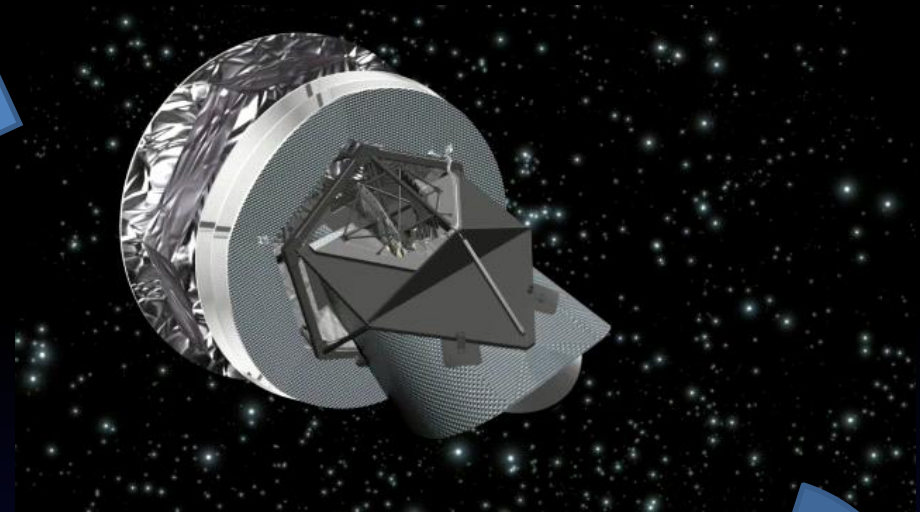
衛星観測



COBE
(1989
—1993)



WMAP
(2001—)



Planck
(2009—)

↑ 温度観測が主目標

↓ 偏光観測が主目標

松村さんのトーク

(~2020—)
LiteBIRD (日本): 小型衛星
EPIC (米国): 中・大型衛星
B-Pol (ヨーロッパ): 小型衛星

気球観測



MAXIMA
(1995、1999)



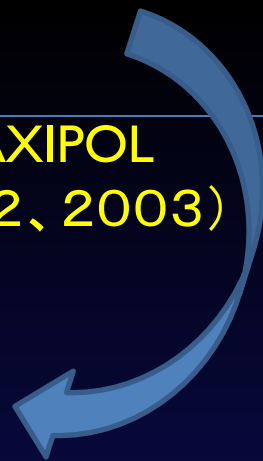
BOOMERANG
(1998、2003)



Archeops
(1999—2002)

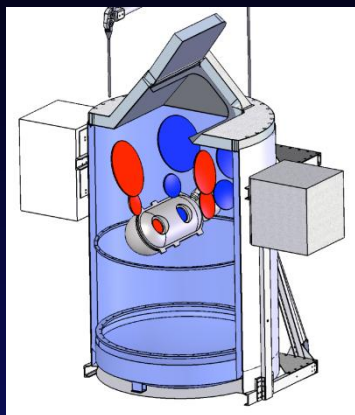


MAXIPOL
(2002、2003)

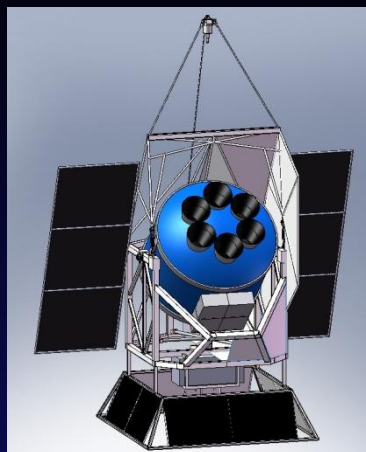


↑ 温度観測が主目標

↓ 偏光観測が主目標



PIPER(2013-)



SPIDER
(2011、2012)



EBEX
(2009-2011)

地上観測

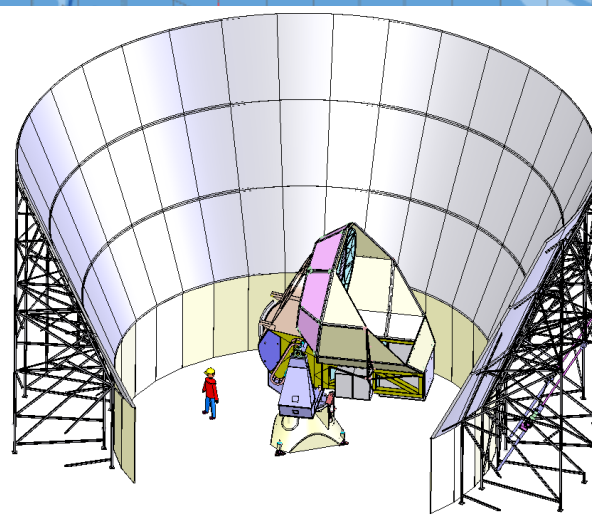
過去には沢山の小規模実験あり。
ここではBモード発見の感度を持つこれからの実験のみ紹介
→ チリ、南極の実験に絞られる

I) チリ・アタカマ高地(標高~5000m)の実験

QUIET (2008—)

POLABEAR (2010—)

日下さんのトーク



ABS (2010—)

地上観測

過去には沢山の小規模実験あり。
ここではBモード発見の感度を持つこれからの実験のみ紹介
→ チリ、南極の実験に絞られる

2) 南極の実験



地上観測

過去には沢山の小規模実験あり。
ここではBモード発見の感度を持つこれからの実験のみ紹介
→ チリ、南極の実験に絞られる

2) 南極の実験



Image: S. Richter

衛星、気球、地上の得失

	衛星	気球	地上
全天観測	○	○	×
大気・地表の(無)影響	○	△	△
長時間観測	○	×	○
装置の修理	×	×	○
予算	△	○	○
最新の偏光計アレイ	×	△	○

今後5年間:地上の感度が最も高い(予想)

プロジェクトの特徴

- 人員

- 地上: 数人～数十人 (ジャズバンド)
- 衛星: 数十人～数百人 (オーケストラ)

- 予算規模

- 地上: 数億円～30億円
- 衛星: 100億円～1000億円 (あくまで目安)

- ハイリターン、比較的ハイリスク

- 実験の難易度はかなり高い

日本の取り組みは？



- QUIET 日下さんのトーク 現在進行中
- POLARBEAR 準備中
- LiteBIRD 松村さんのトーク 計画中

3つのプロジェクトを推進

今大会での発表（10件、3月20日）

題目	講演者
POLARBEAR: 試験観測の状況	西野玄記
POLARBEAR実験シミュレーションによるニュートリノ質量と誤差の評価	清水景絵
QUIET実験における2008年－2009年のCMB偏光観測	長谷川雅也
QUIET実験におけるCMB偏光データ解析	茅根裕司
アルミ超伝導トンネル接合素子(STJ)を用いたCMB偏光カメラの開発 －ミリ波に対する感度試験－	美馬寛
アルミ超伝導トンネル接合素子(STJ)を用いたCMB偏光カメラの開発 －エネルギーギャップとアルミの厚さの相関、最適化－	渡辺広記
小型科学衛星LiteBIRDの実験概要	松村知岳
小型科学衛星LiteBIRDにおけるスキャンの最適化	羽澄昌史
宇宙マイクロ波背景放射Bモード偏光観測の為に小型科学衛星LiteBIRDの 測定感度に関するシミュレーション	片山伸彦
小型科学衛星LiteBIRD搭載望遠鏡光学系の検討	大田泉

プロジェクト関係図

QUIET

観測: 2008 ~ 2010, 2012 ~ 2014

- 成熟した技術で早い実験開始
- 唯一40GHzを持つ地上実験

POLARBEAR

観測: 2010 ~ 2014

- 衛星につながる超伝導検出器
- 大きい(3.5m)望遠鏡で重力レンズに強い

LiteBIRD

観測: 2018 ~

- 究極の原始重力波発見感度
- 日本主導(得意の小型化)
- 国際協力

共同観測

経験・実績

共同開発

LiteBIRD
観測

POLARBEAR Collaboration

Imperial College

Andrew Jaffe Daniel O'Dea

KEK

Masashi Hazumi Haruki Nishino
Akie Shimizu Takayuki Tomaru

Laboratoire Astroparticule & Cosmologie

Josquin Errard Radek Stompor

Lawrence Berkeley National Lab.

Julian Borrill Eric Linder
Christopher Cantalupo Helmuth Spieler
Theodore Kisner

McGill University

Peter Hyland Matt Dobbs

University of California, Berkeley

Kam Arnold Roger O'Brient
Daniel Flannigan Erin Quealy
William Holzapfel Christian Reichardt
Jacob Howard Paul Richards
Zigmund Kermish Chase Shimmin
Adrian Lee (P.I.) Bryan Steinbach
Marius Lungu Huan Tran
Mike Myers Oliver Zahn

University of California, San Diego

David Boettger Hans Paar
Brian Keating Ian Schanning
George Fuller Meir Shimon
Nathan Miller

University of Cardiff

Peter Ade Carole Tucker

University of Colorado

Aubra Anthony Nils Halverson

5ヶ国(米加英仏日)、9 機関, 約40名による 国際共同実験

焦点面検出器

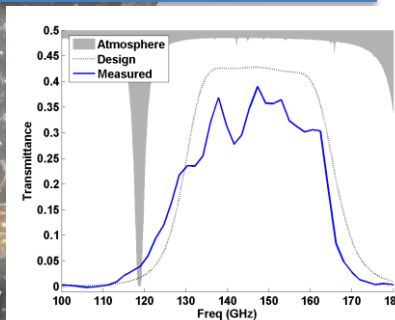
POLARBEARではアンテナ結合型TESボロメータによりCMBを観測する

2個のアンテナ・ボロメータ
の組み合わせが対になり
1個のピクセルを構成

アンテナ
(直交するアンテナが対に)

フィルター
(150GHz or 220GHz)

レンズ



1枚のウェーファーに91対

7枚のウェーファーで観測(@チリ)

TESボロメータ

合計1274個のボロメータ

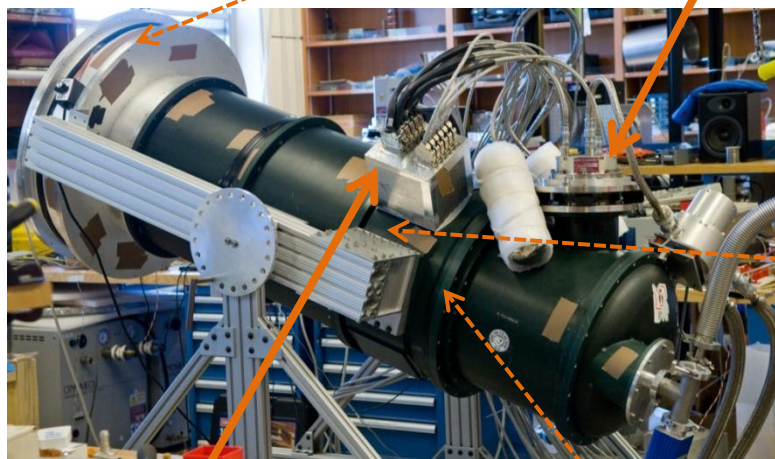
→ 1'ピクセルあたりのノイズレベル: $Wp^{-1/2} = 5\mu K$ (150GHz・2年間)

レシーバーの近況

4月より全システムの検証のためにカリフォルニア州・Cedar Flatにおいて、望遠鏡に検出器、クライオスタットなどを組み込み、試験観測を行う

偏光の向きを回転させるための
半波長板 (HWP)

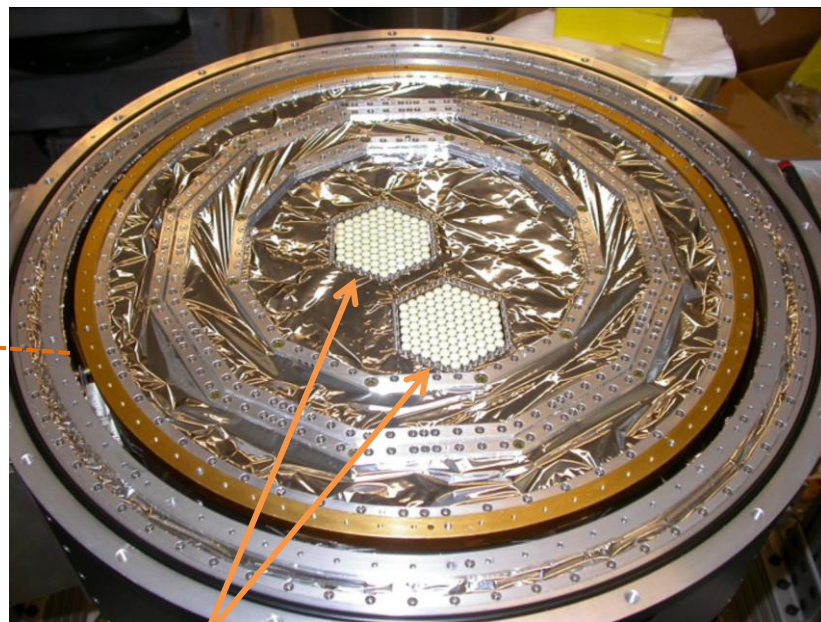
Pulse Tube Cooler
(4K)



読み出しのためのSQUID box

'He10' Sorption Cooler (0.3K)

焦点面検出器がクライオスタットに
インストールされた様子



焦点面検出器

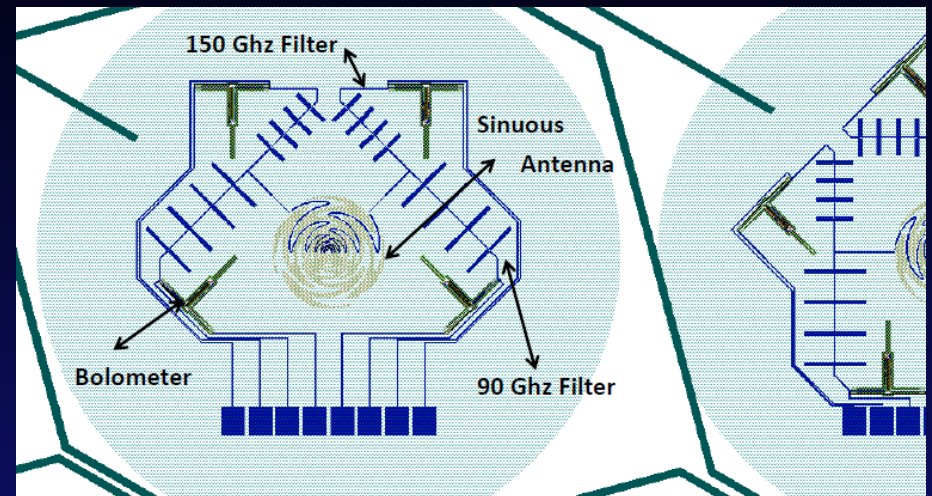
- 試験観測では、2枚のウェーハを使う
(約360チャンネル) (本観測では7枚)

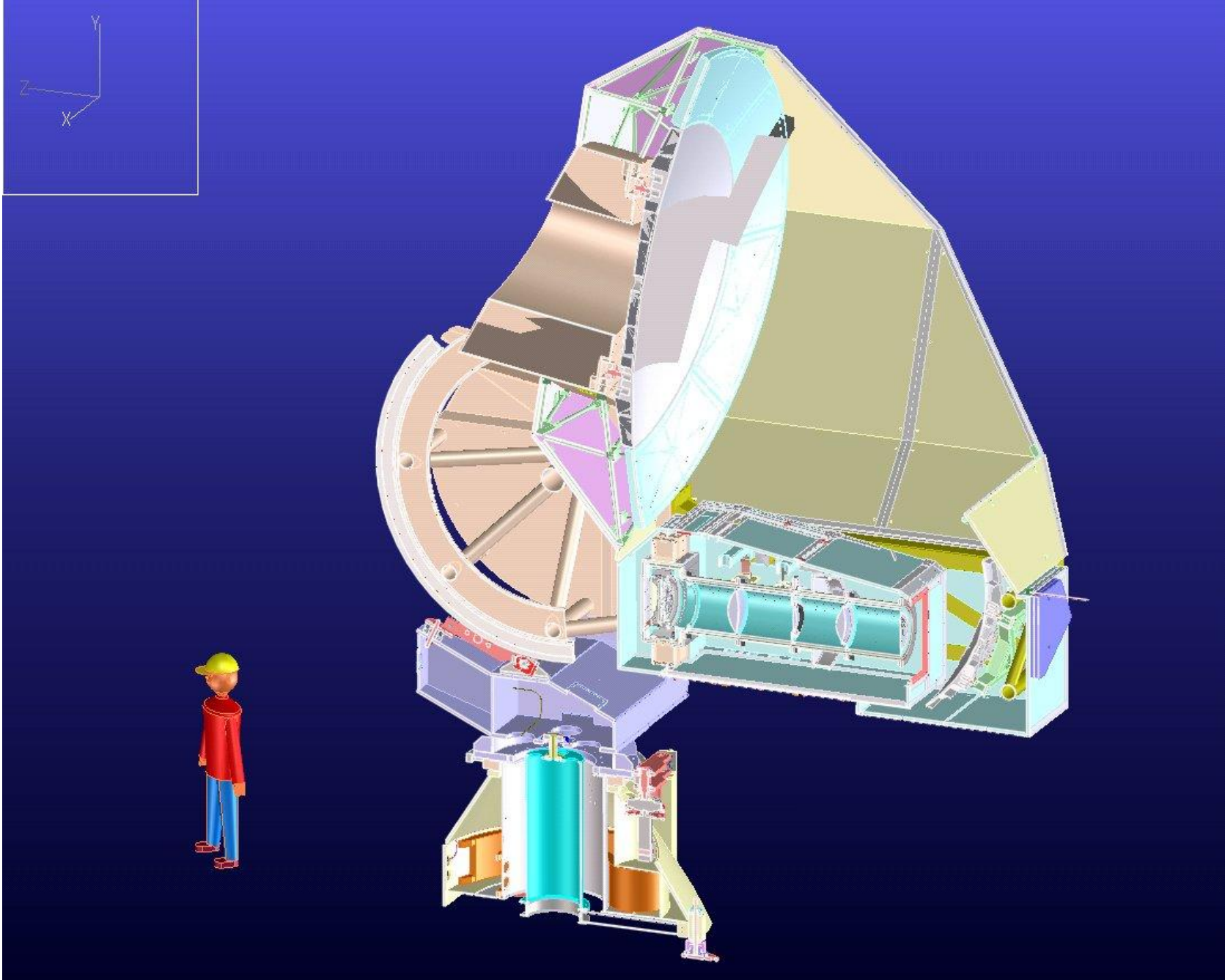
$$\text{NEP} \sim 6 \times 10^{-17} \text{ W Hz}^{-0.5}$$

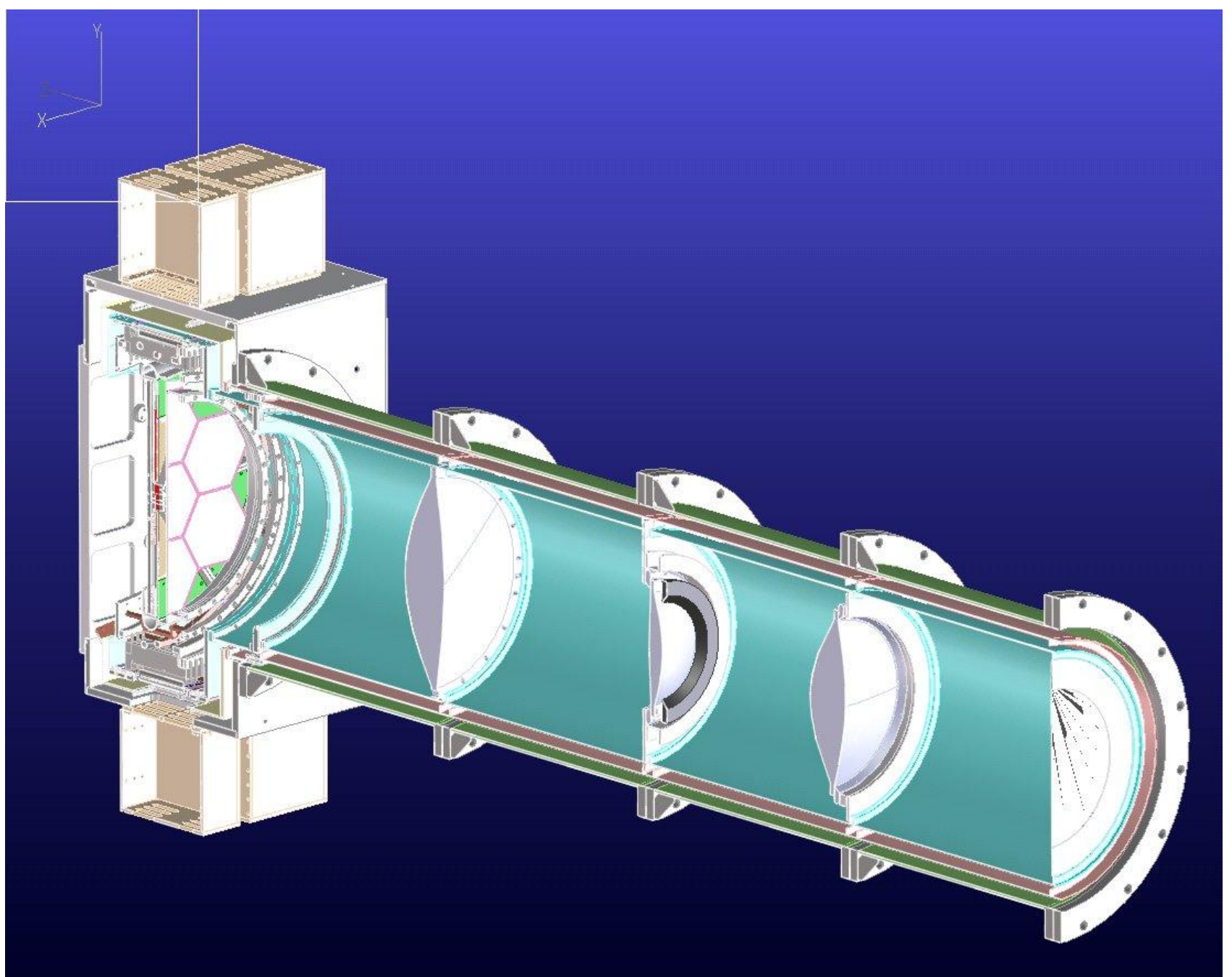
- 実験室での総合試験では既に期待通りのノイズレベルを達成

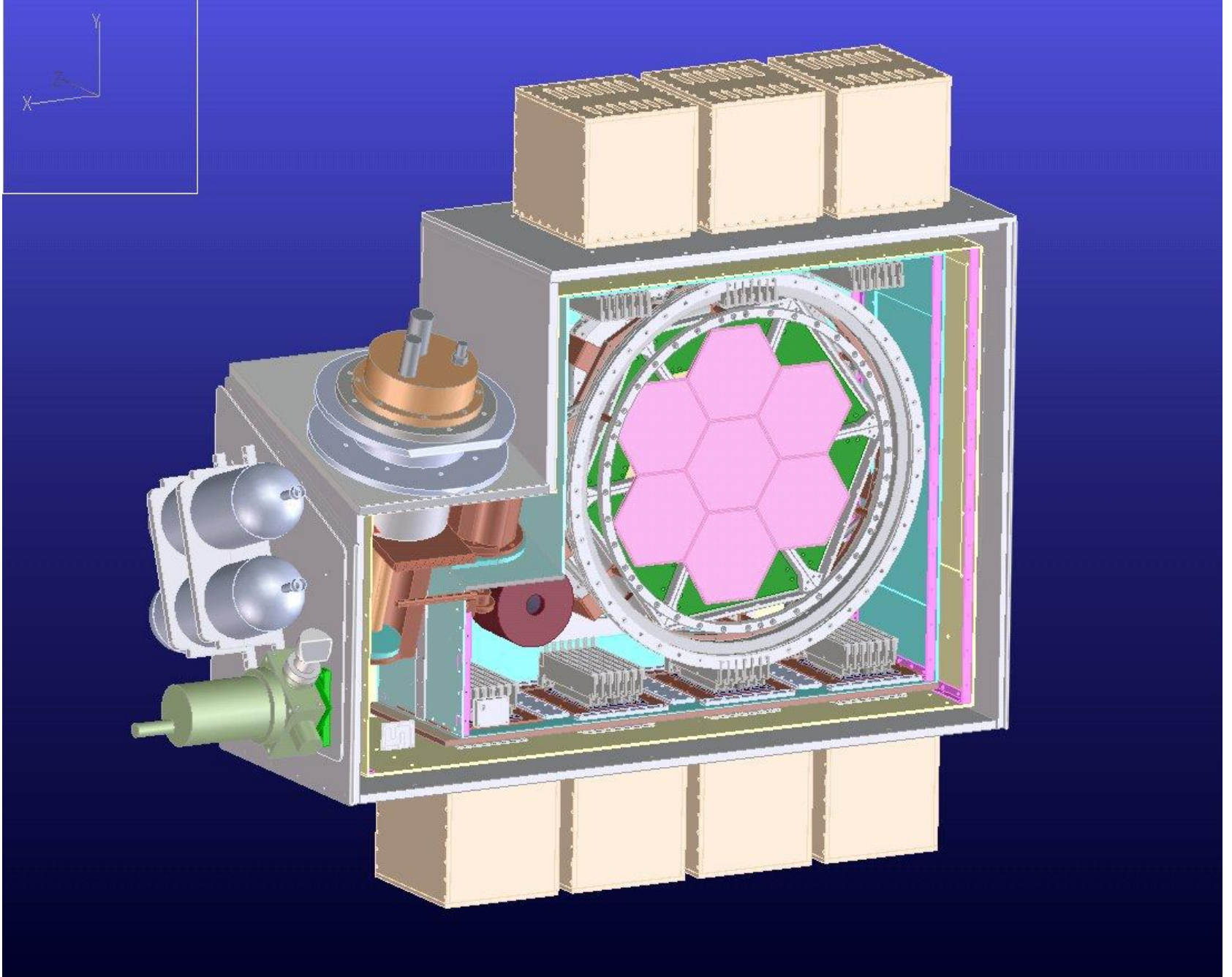
POLARBEAR-II

- KEKがレシーバーシステム製作担当
 - 低温部(100mK)はKEK低温センターと筑波大
 - JAXAのX線天文グループとの技術提携
- 検出器はバークレイの二色TES (90, 150GHz)
 - 実効ピクセル数=3038
- 2013年搭載予定





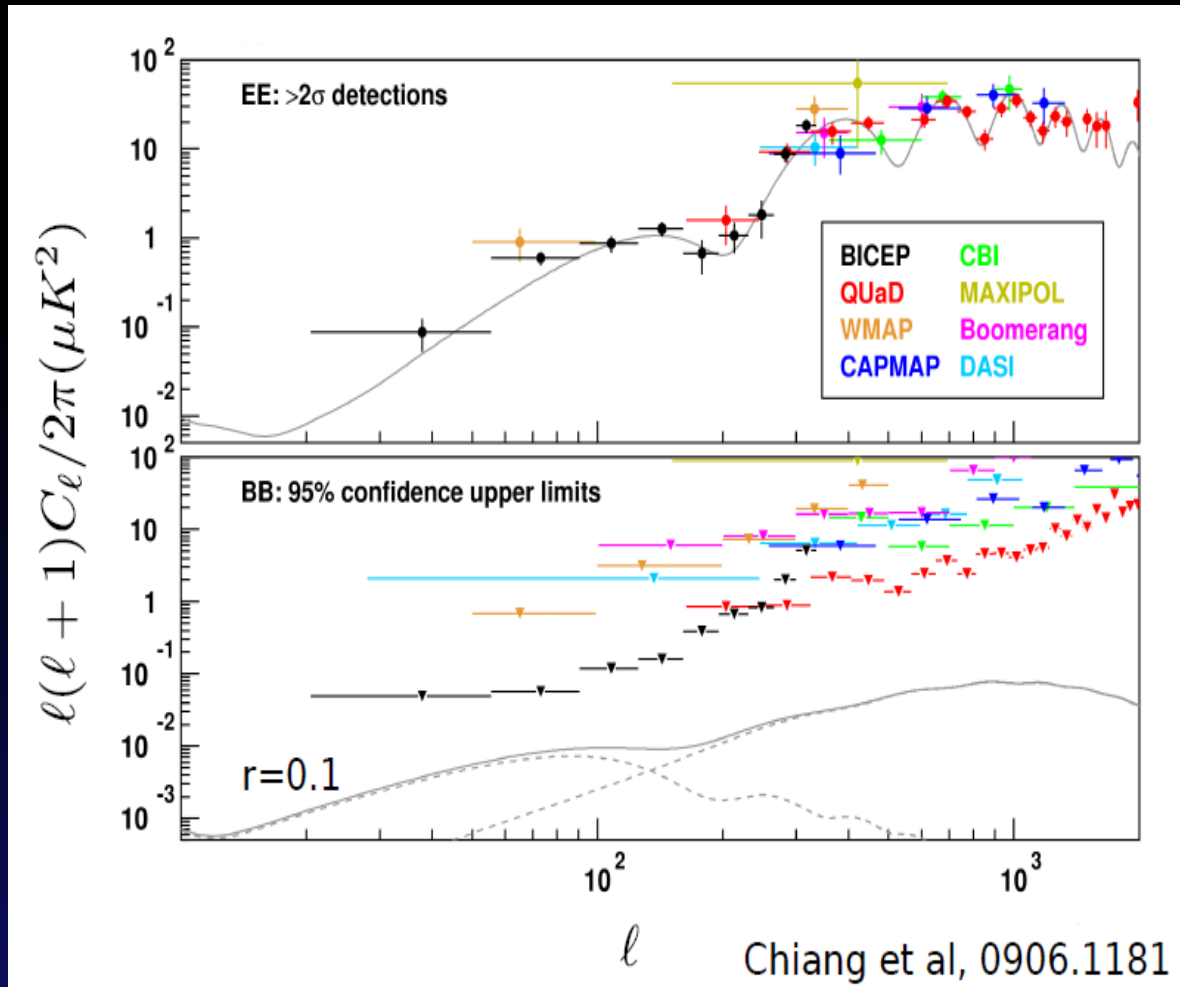






4. どんな結果が期待されるのか？

これまでの観測のまとめ



E mode

B mode上限
(95%CL)

直接観測による
現在の制限
 $r < 0.73$

Funded CMB Polarization Experiments

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

Name	Type/ location	Institutions	NEQ ($\mu\text{K}\sqrt{\text{s}}$)	Ell range	Frequencies	#Detectors	Resolution (arcmin)
Planck	Bolo- HEMT/Space	ESA, IAS-Orsay, Bologna + many	80 (@100G)	2-2000	25-1000	22H+32B (# of pol. ch)	8
Spider	Bolo/Balloon	CIT/JPL, CITA, CWRU, Stanford	4/3 (@ 96/145G)	2-250	96/145/225	288/512/512	60/40/30
BICEP2	Bolo/South Pole	CIT/JPL, CITA, Stanford		10-250	150	256	37
KECK array	Bolo/South Pole	CIT/JPL, CITA, Stanford		10-250	100/150/220	288/512/512	55/37/26
QUIET	HEMT/Chile	Chicago, CIT, JPL, KEK , Manchester, Miami, MPI, Oxford, Princeton, Stanford	12/9 (@ 40/90G)	20-1000	40,90	119x2 ~1000(P2)	10
EBEX	Bolo/Balloon	Minn, Berkeley, Brown, Cardiff, Columbia, McGill +8	5 (@150G)	20-1200	150,250,420	1406	8
PolarBeaR	Bolo/Chile	Berkeley, APC, Cardiff, Colorado, Imperial, KEK , McGill, UCSD	10 (@150G)	20-3000	90,150, 220	1274	3.5
SPTPOL	Bolo/South Pole	Chicago, Berkeley, Colorado, CWRU, Davis, JPL, McGill, SAO	14	20-10000	90,150, 220	1000-2000	1.1

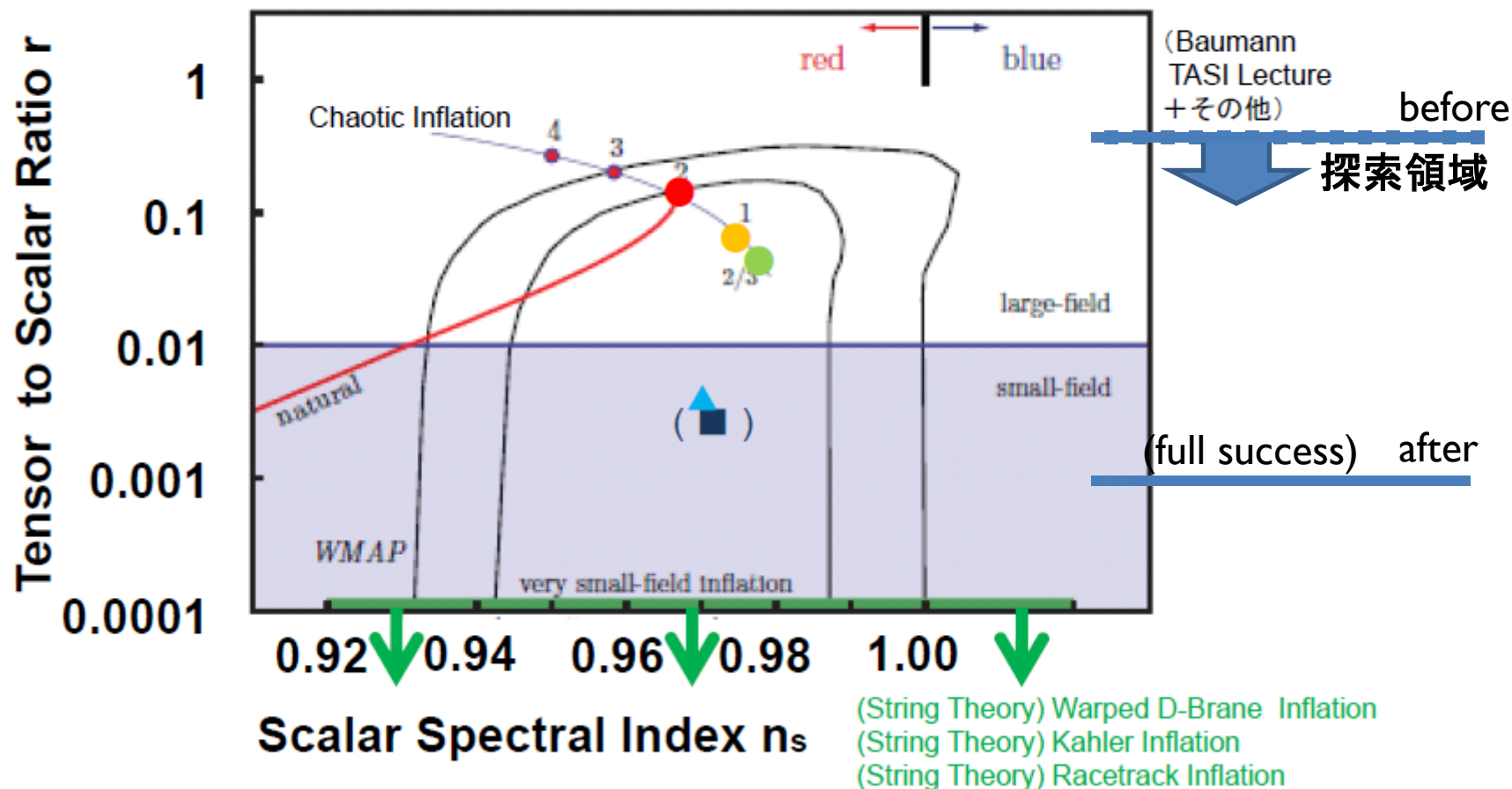
Everyone except Planck claims $r = \mathcal{O}(0.01)$ sensitivity and results in 5 yrs.

4. どんな結果が期待されるのか？

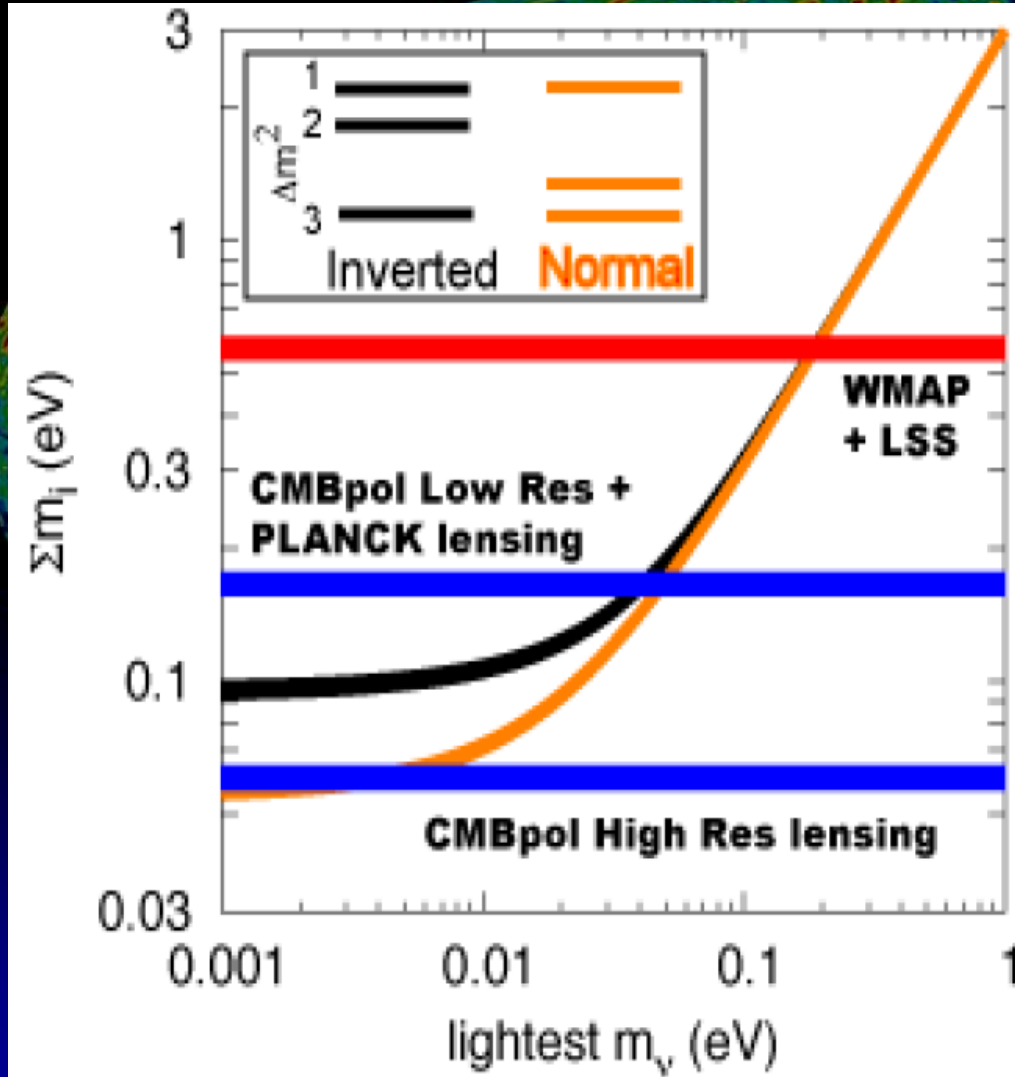
- (重力レンズ)Bモードの発見 ~3年
 - QUIET、POLARBEAR、etc.
- 原始重力波の発見 (if $r \sim 0.05$) ~5年
 - $r \sim 0.01$ までを探索
- Bモードパワースペクトル測定
とインフレーションモデル絞り込み
(if $r \sim O(0.01)$) ~15年
 - または、Large Field Inflationを棄却
 - $r \sim 0.001$ までを探索

量子重力理論の検証

- : (String Theory) N-flation, (many axion field)
- : (String Theory) Axion Monodromy ● : (String Theory) Monodromy
- : Standard Model Higgs+ Non-minimal Coupling ▲ : (String Theory) Fiber Inflation



ニュートリノ質量とhierarchy



究極の測定(CMBpol)の場合

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！

実験屋から見たプロジェクト成功のキモは何か？

- 最終的に立ち上がるのは前景放射
- ……と立証するまでが決して楽ではない：
装置に起因する系統誤差との戦い



設計段階から系統誤差を詳細に
把握することがプロジェクト成功のキモ

まとめ



1. CMB偏光観測実験は宇宙創生に最も肉迫できる実験研究
2. 観測原理は電波天文が基盤。しかし、ナノケルビンを達成するために、独自の技術が発展している。
3. 比較的小規模の実験が複数存在。日本グループは、今後5年間は国際協力でチリでの観測 (QUIET、POLARBEAR) を推進。
4. 今後5年間で重力レンズBモードは発見されるだろう。原始重力波の発見のチャンスも十分にある。
5. 10年後に向けた衛星の開発もはじまっている。今後にこうご期待