

LiteBIRD

Lite (Light) Satellite for the Studies of **B**-mode Polarization and Inflation from Cosmic Background **R**adiation **D**etection

インフレーション宇宙を検証する LiteBIRD計画の現状

片山伸彦 (Kavli IPMU/総研大)

今回の講演では去年の羽澄氏の話の後の進展を中心に話します

LiteBIRD衛星の概要

LiteBIRD

熱いビッグバン以前の宇宙を探索する 宇宙マイクロ波背景放射偏光観測衛星

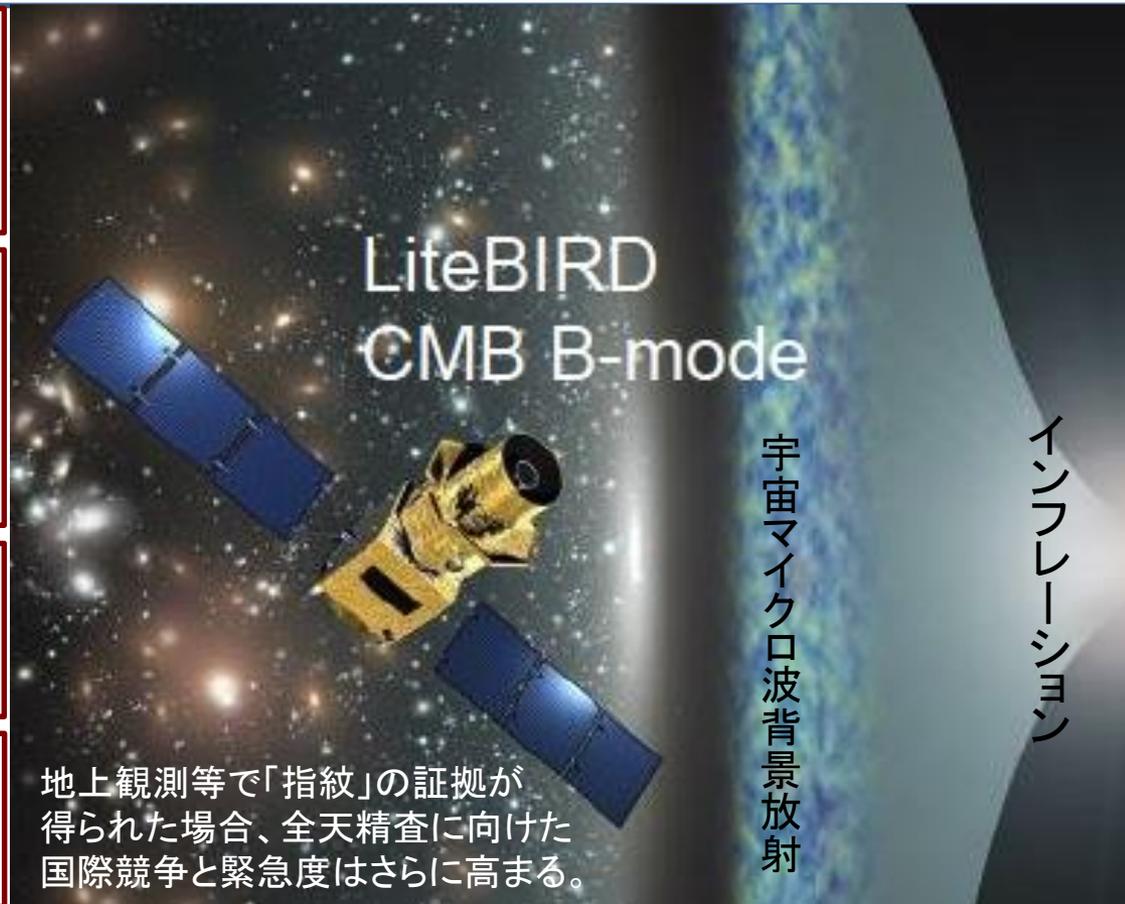
人類にとって根源的な問いに答える

- ◆ 宇宙誕生の瞬間とは？
- ◆ 宇宙・時空を創るルールブック
(究極理論)とは？

「宇宙のインフレーション仮説」
(佐藤勝彦自然科学研究機構長等が
提案)は、熱いビッグバン以前の宇宙
に関する最有力仮説。
原始重力波の存在を予言。

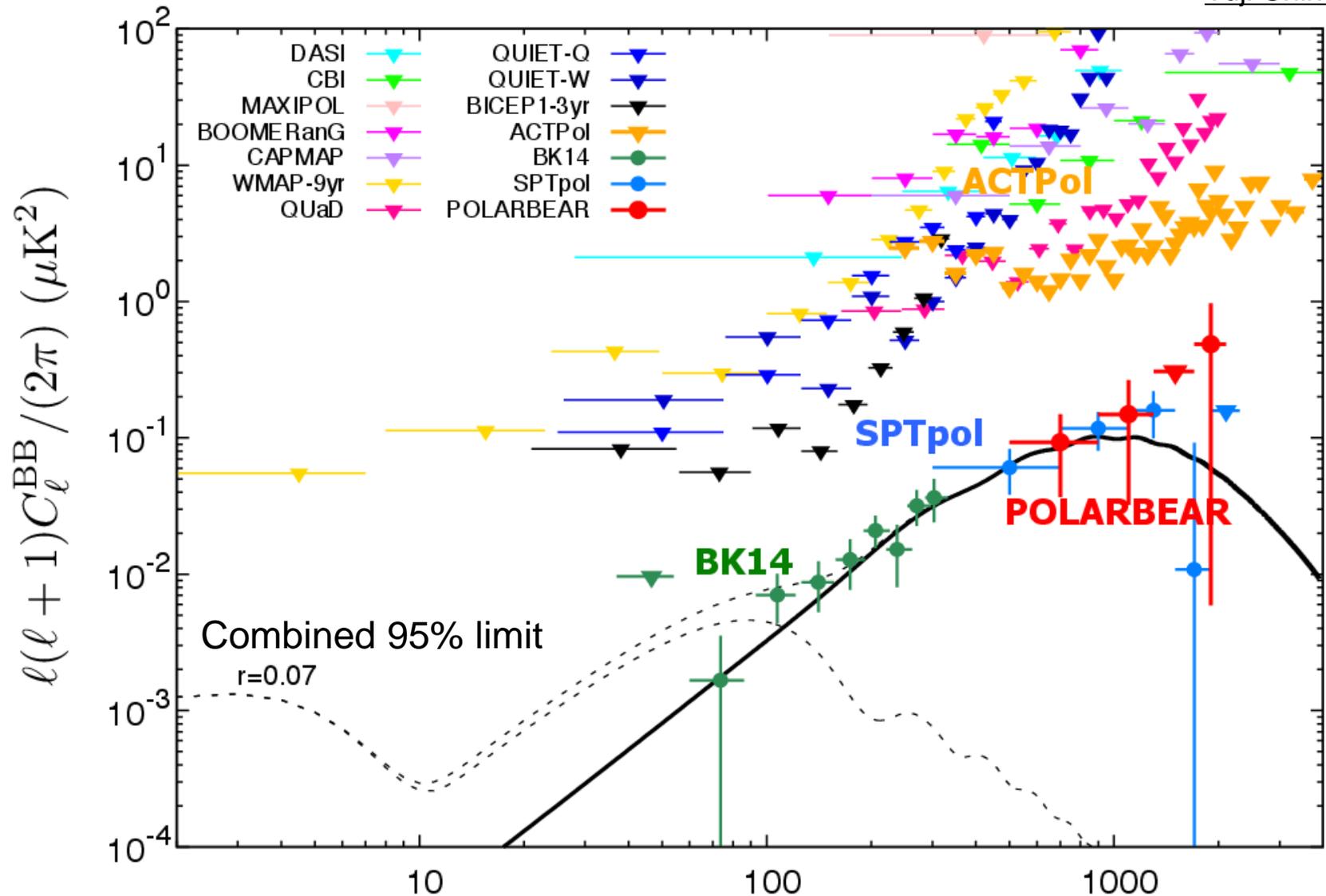
原始重力波は宇宙マイクロ波背景放射
(CMB)の偏光マップに「指紋」の様な
痕跡(Bモードと呼ばれる)を残す。

LiteBIRDはスペースからの観測でのみ
可能な「指紋」の全天精査を行い、
インフレーション仮説を徹底検証する。



Bモード測定の実況

Yuji Chinone



LiteBIRD ワーキンググループ

121 人の国際的、学際的なグループ、

JAXA

宇都宮 真
岡本 篤
河野 功
坂井 真一郎
佐藤 洋一
篠崎 慶亮
杉田 寛之
竹井 洋
西城 邦俊
西堀 俊幸
野田 篤司
福家 英之
松原 英雄
松村 知岳
満田 和久
山崎 典子
吉田 哲也
四元 和彦
和田 武彦

大阪府大

井上 将徳
岡田 望
小川 英夫
木村 公洋
高津 湊

岡山大

石野 宏和
岡本 晃範
喜田 洋介
樹林 敦子
岐部 佳朗
山田 要介

核融合研

高田 卓

Kavli IPMU

片山 伸彦
菅井 肇
服部 香里

大阪大

黒宮 章太
高倉 理
高野 恵介
中嶋 誠

KEK

岡村 崇弘
小栗 秀悟
木村 誠宏
郡 和範
佐藤 伸明
鈴木 敏一
田島 治
茅根 裕司
都丸 隆行
長崎 岳人
永田 竜
西野 玄記
羽澄 昌史(PI)
長谷川 雅也
森井 秀樹
吉田 光宏

甲南大

大田 泉

関西学院

松浦 周二

国立天文台

稲谷 順司
鹿島 伸悟
唐津 謙一
関口 繁之
関根 正和
関本 裕太郎
新田 冬夢
野口 卓
A. Dominjon
S. Shu

埼玉大

成瀬 雅人

NICT

鵜澤 佳徳

総研大

秋葉 祥希
石塚 光
井上 優貴
瀬川 優子
富田 望
渡辺 広記

筑波大

永井 誠

東工大

松岡 聡
R. Chendra

東北大

服部 誠
森嶋 隆裕

名古屋大

市來 淨與

横浜国大

入江 郁也
中村 正吾
夏目 浩太
藤野 琢郎
水上 邦義
山下 徹

理研

大谷 知行
美馬 覚

APC Paris

R. Stompor

CU Boulder

N. Halverson

McGill U.

M. Dobbs

MPA

小松 英一郎

NIST

G. Hilton
J. Hubmayr

Stanford U.

並河 俊弥
K. Irwin
C.-L. Kuo

UC Berkeley / LBNL

日下 暁人
鈴木 有春
堀 泰斗
J. Borrill
A. Cukierman
T. de Haan
J. Errard
N. Goeckner-wald
P. Harvey
C. Hill
W. Holzapfel
O. Jeong
A. Lee(US PI)
E. Linder
P. Richards
U. Seljak
B. Sherwin
P. Turin
B. Westbrook
N. Whitehorn

UC San Diego

K. Arnold
T. Elleot
B. Keating
G. Rebeiz

JAXA エンジニア

CMB 実験研究者

X線天文学者

光赤外天文学者

超伝導検出器

LiteBIRD 衛星の概要

多色焦点面 検出器

- ミッション機器はこれまでのミッション(例えば ASTRO-H)や地上実験(例えば POLARBEAR)の経験を生かして設計
- バス部(衛星本体)は実績のある機器を使用



常時回転する半波長板 (HWP)

レンズ



視線方向
視野 10 x 20 度

0.1rpm
で回転

30度

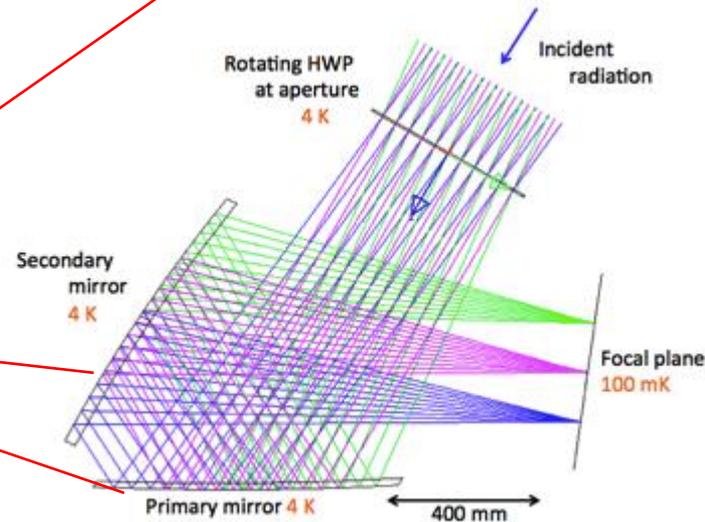
ミッション
機器

スリップリング

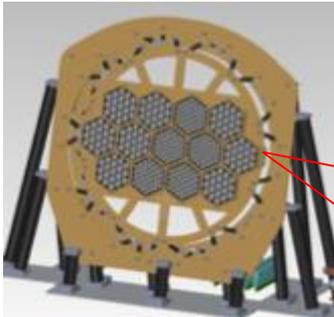
太陽電池パネル

バス部

Xバンドのハイゲインアンテナで地上にデータを転送



4Kに冷却した光学系



TES

MKID



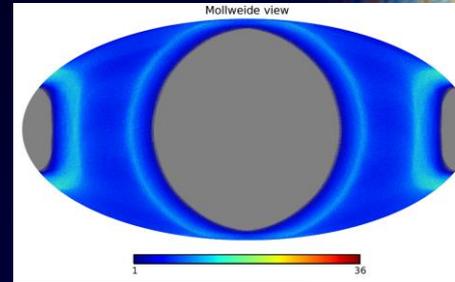
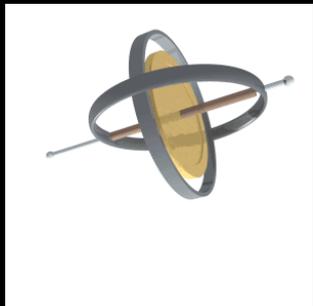
冷却システム

■ JT/ST and ADR
(ASTRO-H
heritage)



L2における全天走査法

太陽



スピン軸

歳差運動角度 $\alpha = 65^\circ$
~90 min.

スピン角 $\beta = 30^\circ$
0.1rpm

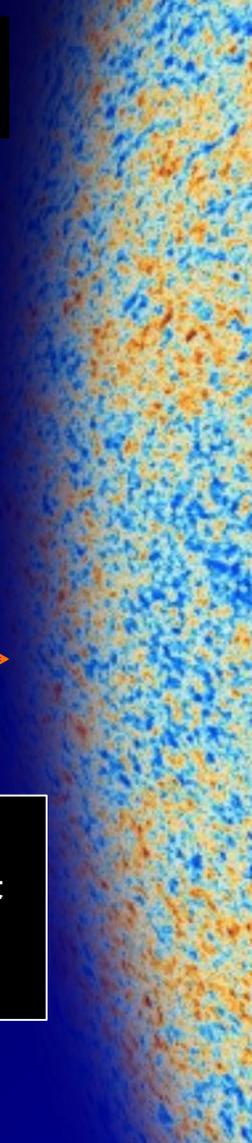
反太陽方向

主な仕様

- 重量: ~1300kg
- 電力: ~2000W
- 観測時間: ≥ 3 年
- スピンレート: ~0.1rpm (=1.6mHz)

信号変調法

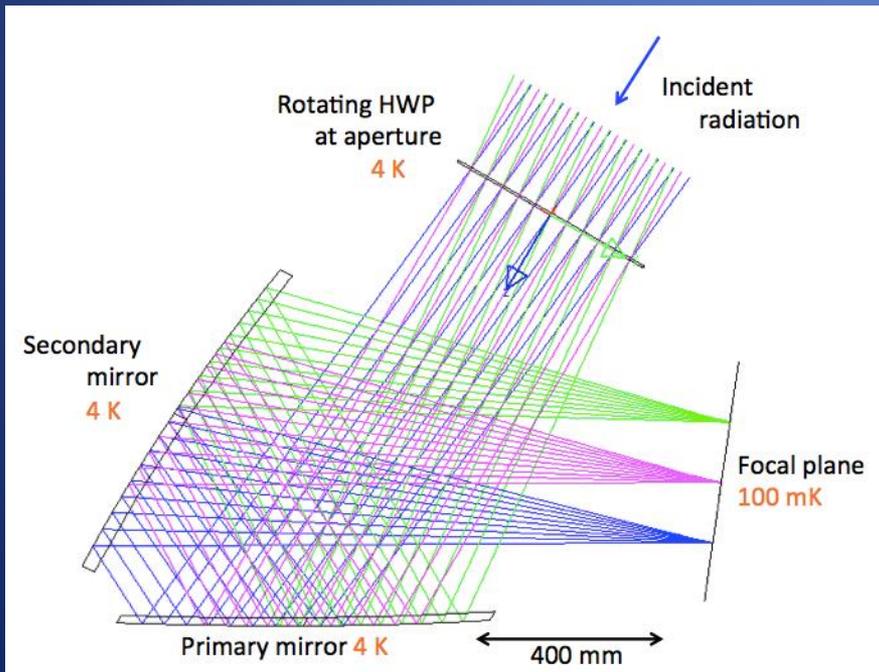
CMB信号は、スピンと回転する半波長板によって変調され、 $1/f$ ノイズの影響と系統誤差要因を取り除く



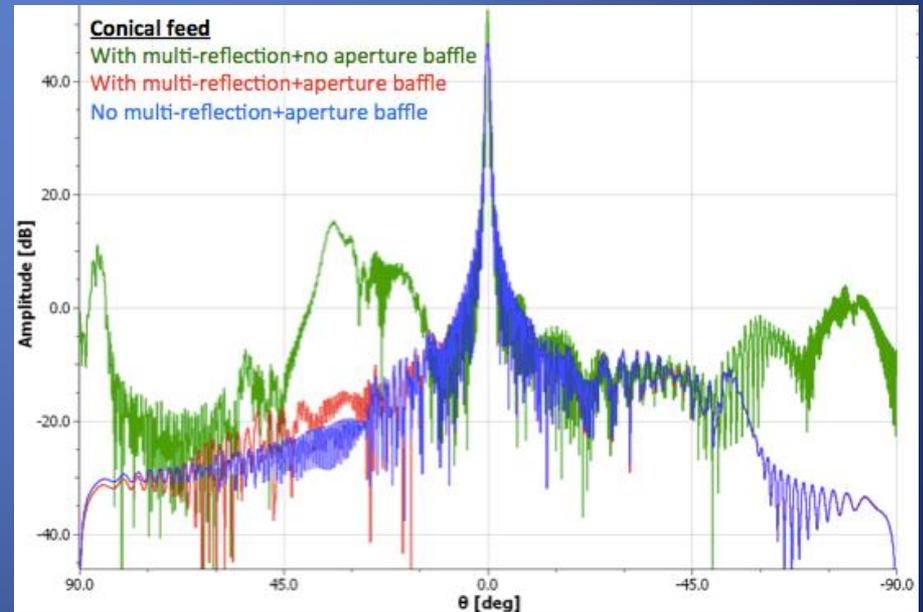
光学系

- ビームの大きさ：～1 度（全6バンド）
- 視野： 10度 × 20度
- 大きさ：直径2m × 高さ2m
- 筐体と鏡を4Kに冷却
- 半波長板による偏光の変調
- テレセントリックな光学系

クロス・ドラゴン光学系



GRASP10 シミュレーション@60GHz サイドローブの低減

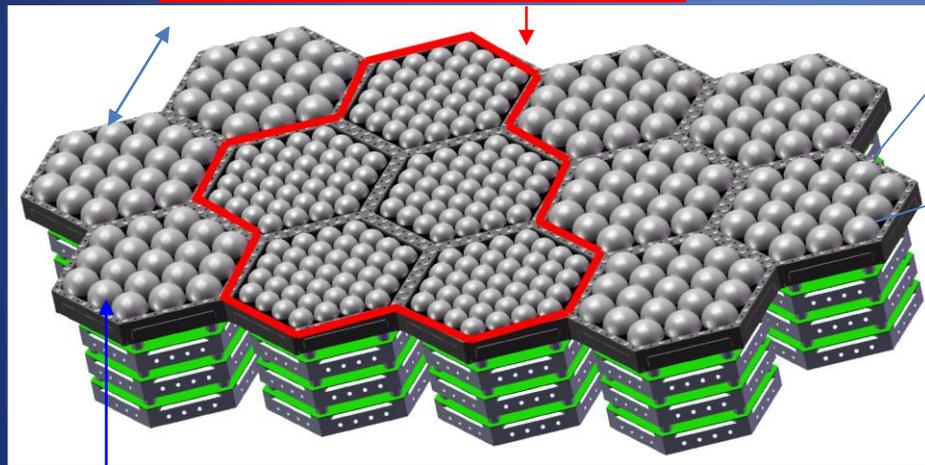


T. Matsumura, K. Kimura, N. Okada

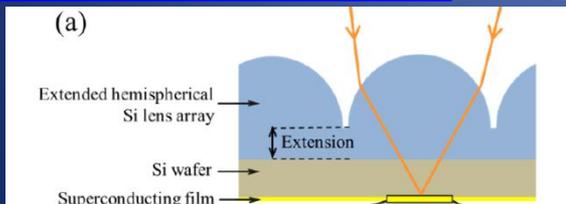
焦点面検出器(MDR)

- 感度：光学 NEP= 2×10^{-18} W/sq(Hz)
- 50-320GHz
- 多色検出器
- 2.6 μ K arcmin 2022 チャンネル (マージン込)
- 100mKに冷却
- 焦点面の大きさ：50cm x 30cm

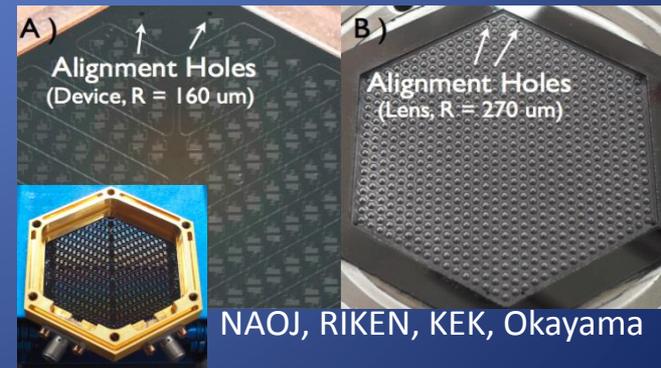
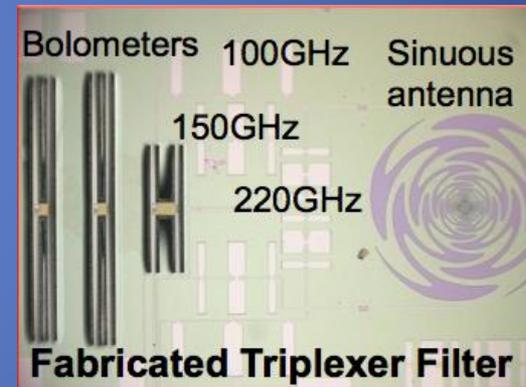
三色(140/195/280GHz)



三色(60/78/100GHz)

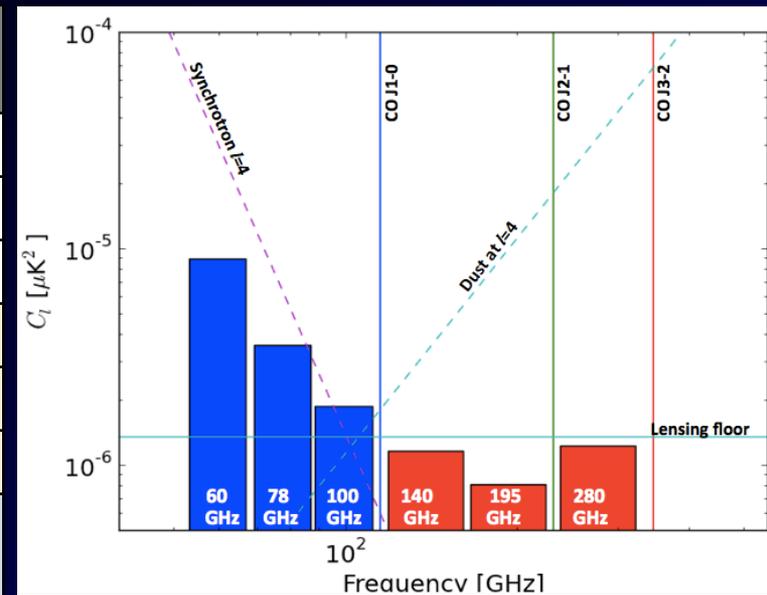


検出器：TES or MKID



観測周波数範囲

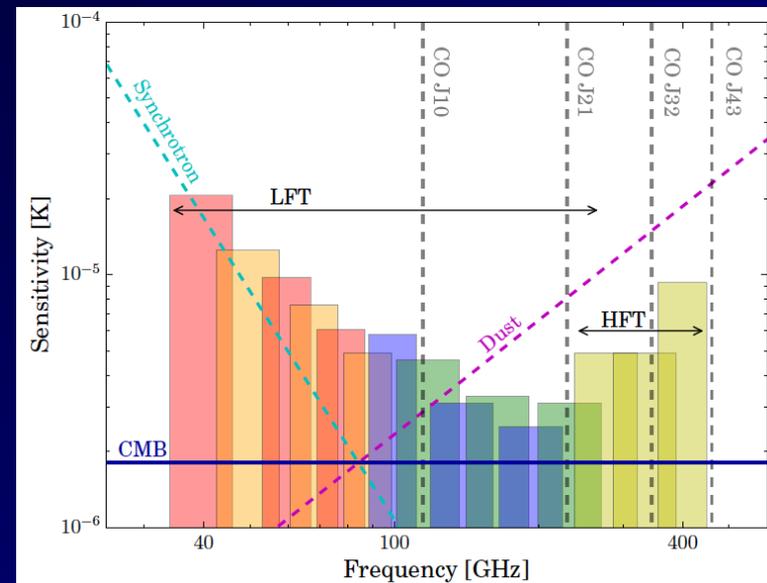
Band [GHz]	N_{det}	P_{load} [pW]	G_{ave} [pW/K]	NEP [aW/√Hz]	NET [μKVs]	w^{-1} [μK.arcmin]
60	304	0.296	6.49	8.28	94.07	15.72
78	304	0.301	6.61	8.61	58.97	9.86
100	304	0.286	6.27	8.72	42.26	7.06
140	370	0.361	7.92	10.56	36.89	5.59
195	370	0.243	5.32	9.45	31.00	4.70
280	370	0.123	2.70	7.57	37.54	5.69
Combine d	2022					2.65



注: 感度の計算には以下の仮定を使用

1. 観測期間は3年、観測効率を72%と仮定
2. 検出器の歩留まりを80%と想定
3. NET には25%のマーヅンあり.

- ミッション定義審査時は 50-320 GHz を 6 バンドで観測することを提案
- NASA-MOでは 30- 470 GHzで提案
- 現在観測周波数(帯)の最適化が進行中



ミッション成功基準

サクセスレベル	成功基準	達成判断時期
ミニマムサクセス	CMB 直線偏光の定常観測を開始し、 $10\mu\text{K}_{\text{CMB}}\sqrt{s}$ よりよい感度を達成する。	観測開始3ヶ月後
フルサクセス	CMB直線偏光の全天・大角度の観測を行い、原始重力波強度パラメータ r (テンソル・スカラー比)の全誤差 δr について $\delta r < 0.001$ を達成する。	定常観測終了3年後
エクストラサクセス	ほかの観測と連携し重力レンズBモード分離を実施し、 δr を更に小さくする。	定常観測終了3年後

LiteBIRDのフルサクセス条件

CMB直線偏光の全天・大角度の観測を行い、
原始重力波強度パラメータ r (テンソル・スカラー比)の
全誤差 δr について $\delta r < 0.001$ を達成する。

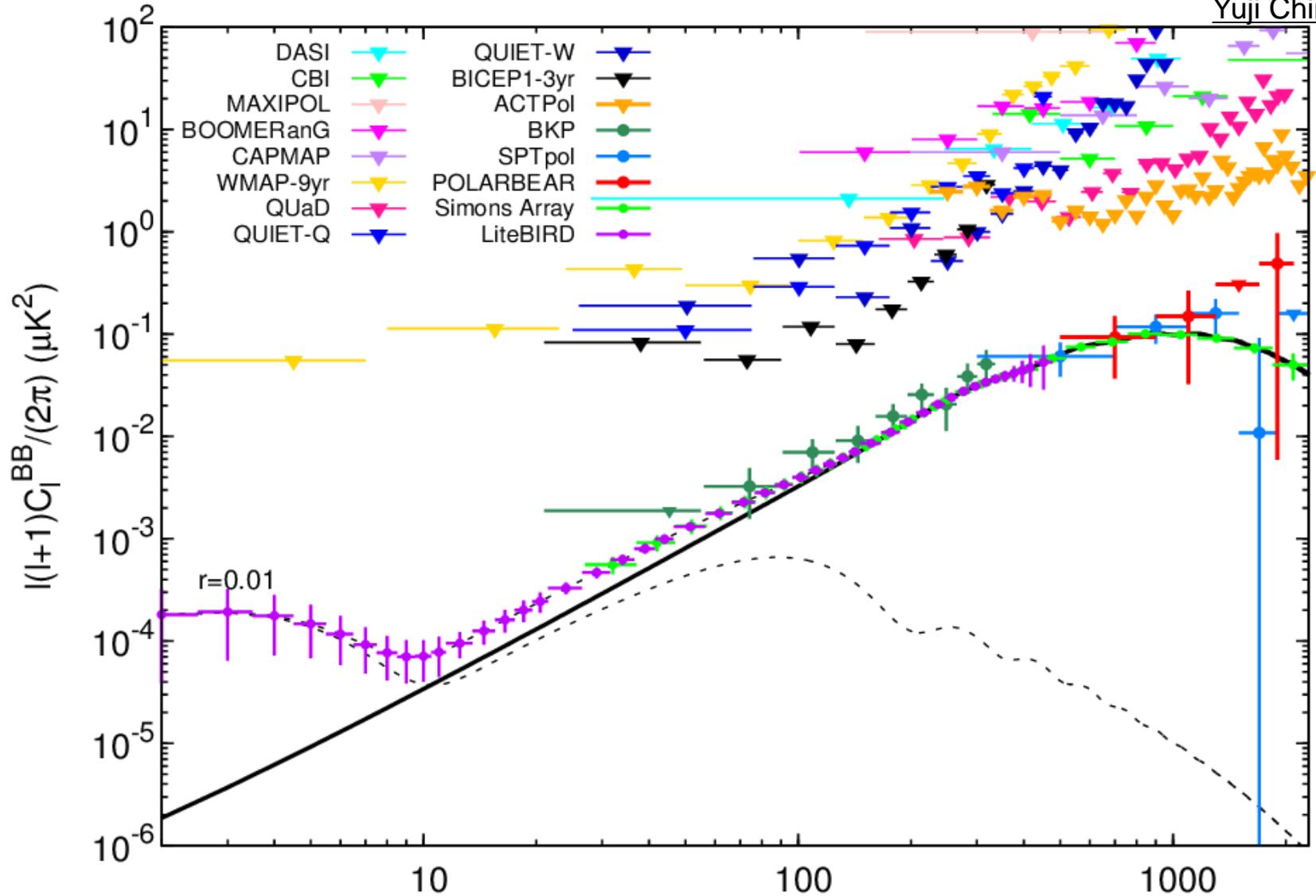


LiteBIRDのミッション定義

		項目	要求値
1	観測	全天のCMB直線偏光	観測周波数100~200 GHzで精度が $5\mu\text{K}_{\text{cmb}}\text{arcmin}$ よりよい
2	観測	ダスト熱放射	観測周波数200 GHz以上で、精度が $5\mu\text{K}_{\text{cmb}}\text{arcmin}$ よりよい
3	観測	シンクロトン放射	観測周波数100GHz以下で、精度が $10\mu\text{K}_{\text{cmb}}\text{arcmin}$ よりよい
4	解析	前景放射分離	原始重力波強度パラメータ r の全誤差が $\delta r < 0.001$
5	解析	パワースペクトル決定	$r \geq 0.01$ の場合、再電離($2 \leq l \leq 10$)と晴れ上がり($11 \leq l \leq 100$)の信号をそれぞれ 5σ シグマ以上で検出

LiteBIRDとSAによるBモード観測

Yuji Chinone



精密で正確なBモード・Eモード CMB偏光の全天マップを提供

- C_l^{BB} → インフレーションと量子重力 (r, n_t)
→ 低い l までの重力レンズ効果
- C_l^{EE} → 再電離
- Λ CDMからのパワースペクトルの乖離
→ e.g. 重力におけるパリティ非保存, ループ量子重力,
原始磁場
- 3点相関 (BBB etc.) → テンソル非ガウス性
- マップにおける標準理論を超えたパターン (e.g. バブル) → e.g.
マルチバース
- 前景放射のサイエンス
- 高銀緯における銀河磁場
- データ公開予定 → 多彩な天文学・宇宙物理学の研究へ

JAXA/ISASの 中型科学衛星ミッション

ISAS/JAXA mission categories

Space Policy Commission under cabinet office intends to guarantee predetermined **steady annual budget** for space science and exploration for ISAS/JAXA to maintain its excellent scientific activities



Strategic Large Missions
(300M\$ class) for JAXA-led
flagship science mission
with HIIA vehicle
(3 in ten years)



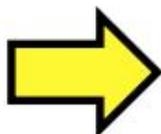
Phobos/Deimos



LiteBird
(preliminary)



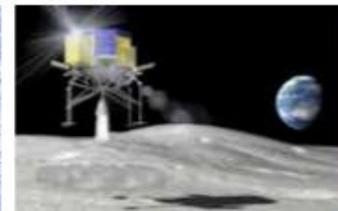
SPICA



**Competitively-chosen
medium-sized focused
missions (<150M\$ class)**
with Epsilon rocket
(every 2 year)

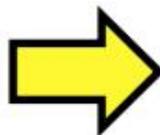


ERG



SLIM

#4, #5
AO



Missions of opportunity
(10M\$ per year) for foreign
agency-led mission,
sounding rocket, ISS



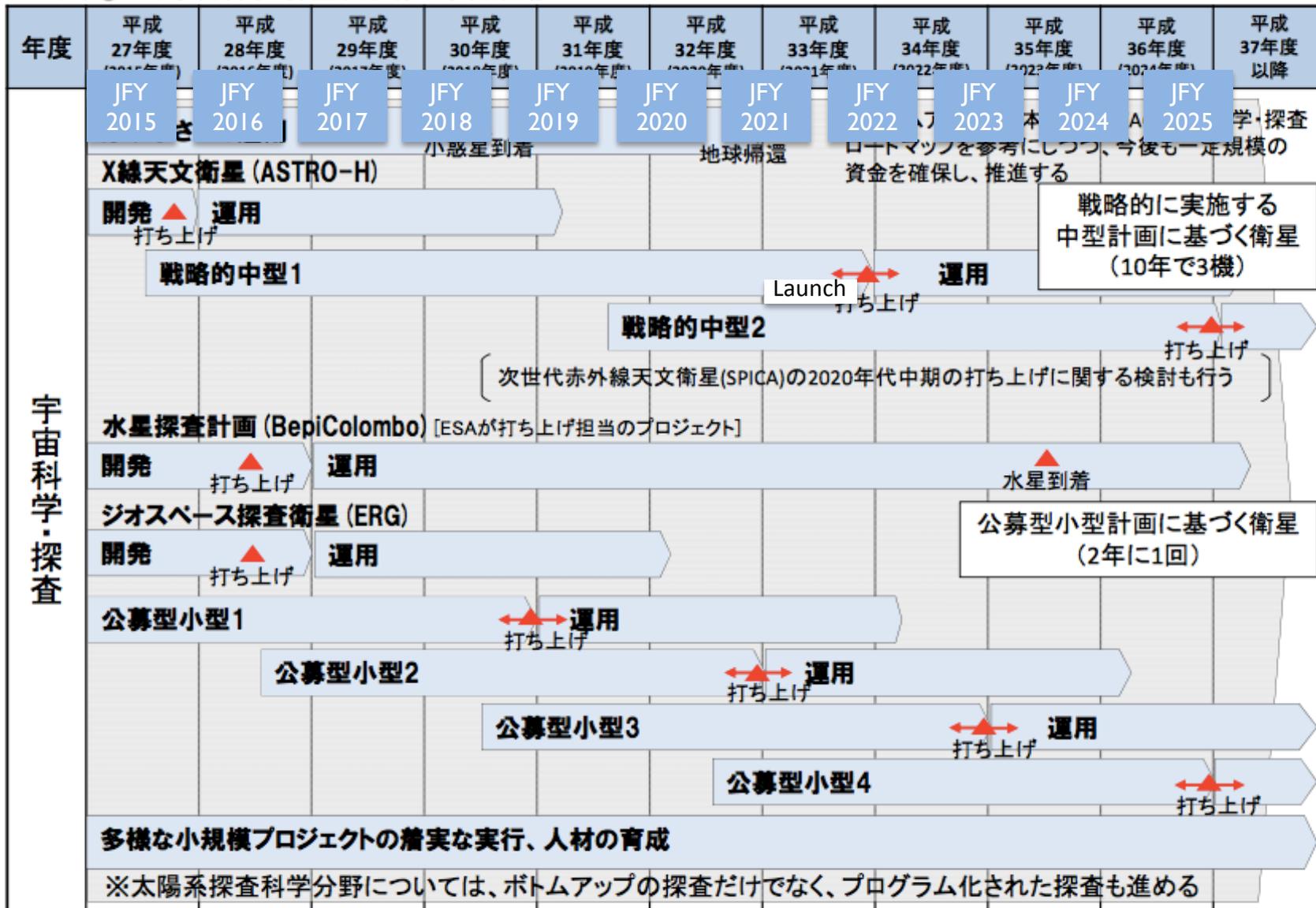
JUICE



ATHENA

内閣府による宇宙科学・探査計画

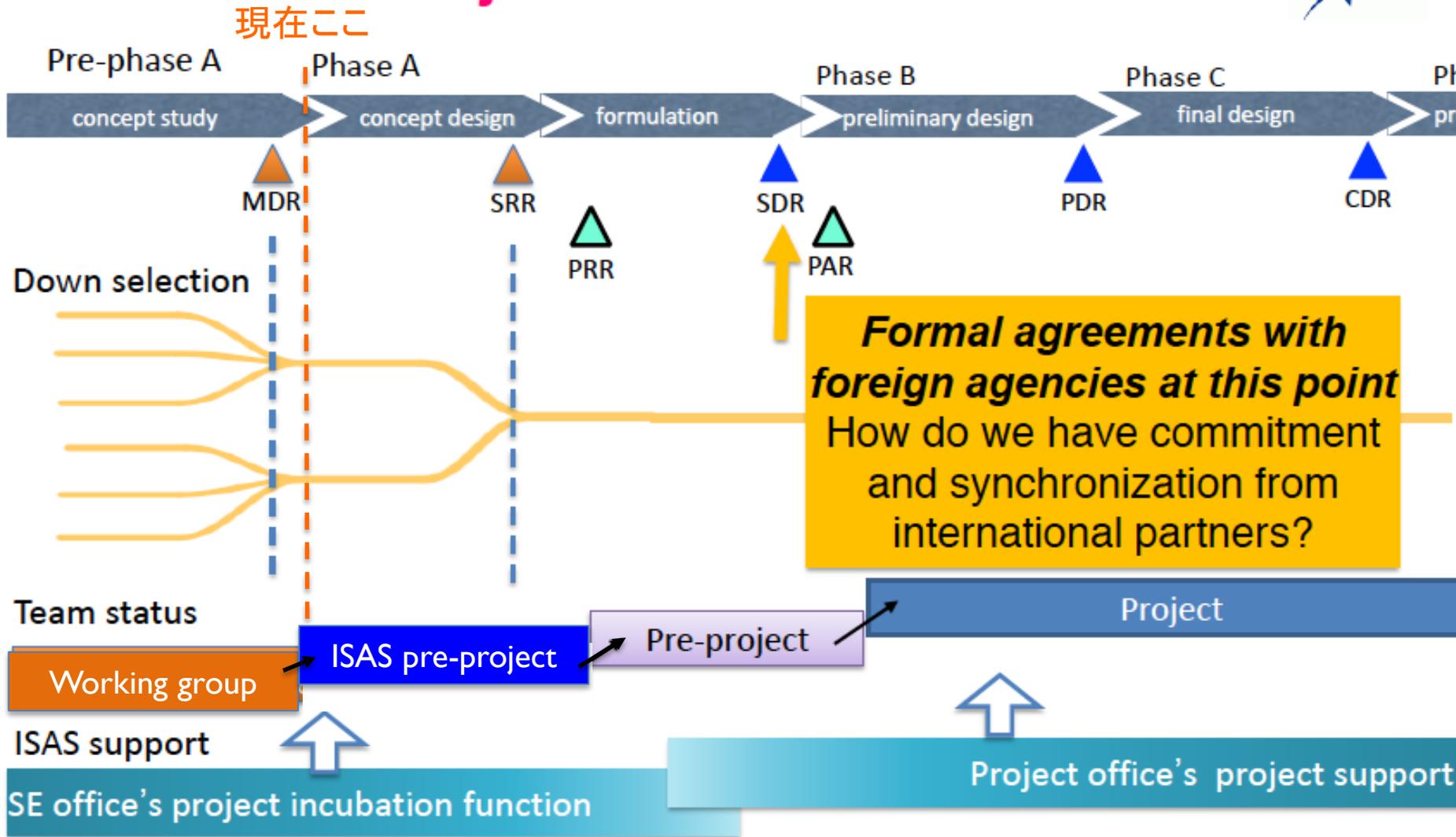
4. (2)① ix) 宇宙科学・探査及び有人宇宙活動



※以上すべて文部科学省

LiteBIRD提案の現状

- 今年2月に2022年度打ち上げを目指してJAXA戦略的中型科学衛星ミッション提案募集に応募
 - ミッション定義審査に相当する書類を提出(システム要求案も前倒しに提出)
 - 6月に行われた理学委員会による絞り込み選定に残った。
 - 現在概念設計段階への移行審査への準備中
- 米国グループは、昨年12月にNASAミッション・オブ・オポチュニティに提案
 - 今年7月に絞り込み選定を通過した(二つの提案が残った)
 - 概念設計段階を開始



- ▲ ISAS reviews with steering committees of space science/engineering
- ▲ Project life cycle review by ISAS
- ▲ JAXA key decision points
- ▲ PRR=Project Readiness Review
- ▲ PAR=Project Approval Review

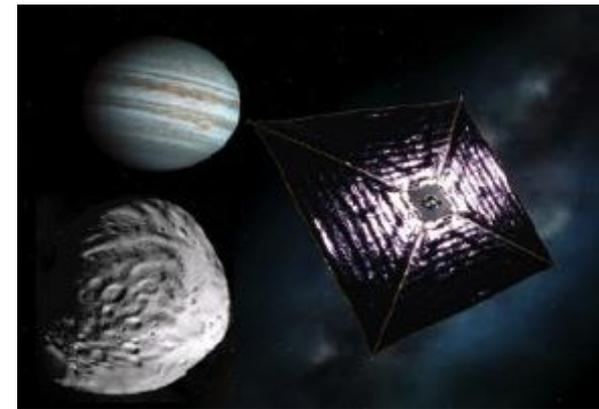
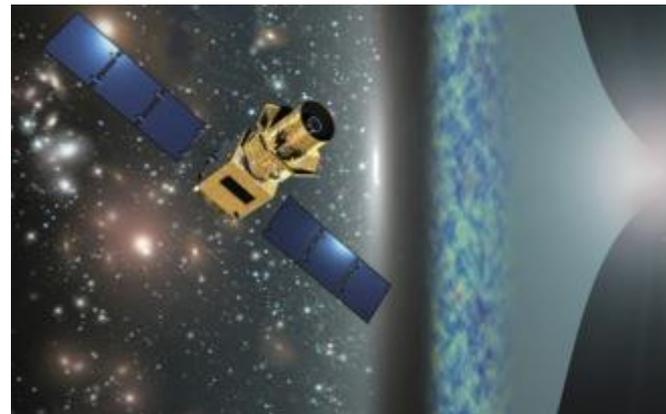
戦略的科学衛星ミッションの絞り込み

- JAXA/ISAS理学・工学委員会によって3つのミッションに絞り込まれた

SOLAR-C

LiteBIRD

Solar Sail 木星トロヤ群
小惑星サンプルリターン

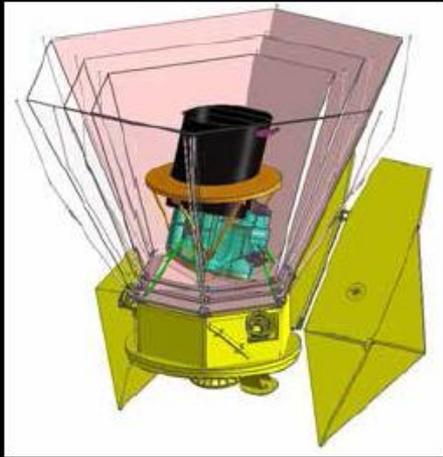


- トップダウンで火星惑星探査が追加
– フォボス (or ダイモス) サンプルリターン

この中でLiteBIRDとSolar Sailが概念設計段階へ移行中
2021-2025には二つの打ち上げ機会がある

NASAの ミッション・オブ・オポチュニティ

Astrophysics SMEX/MO Missions in Formulation



SPHEREx

PI: J. Bock, Caltech
An All-Sky Near-IR
Spectral Survey



PRAXyS

PI: K. Jahoda, GSFC
Polarimeter for Relativistic
Astrophysical X-ray
Sources



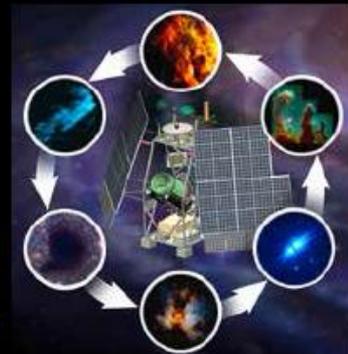
IXPE

PI: M. Weisskopf, MSFC
Imaging X-ray Polarimetry
Explorer

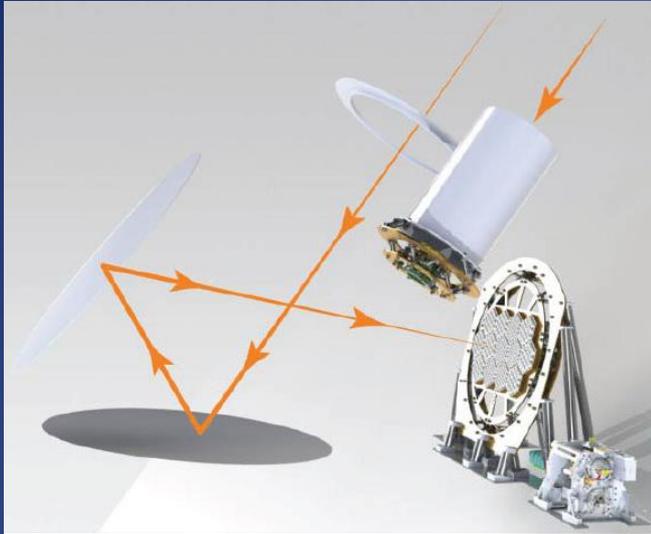


PI: A. Lee, UC Berkeley
US Participation in JAXA's
LiteBIRD CMB Polarization Survey

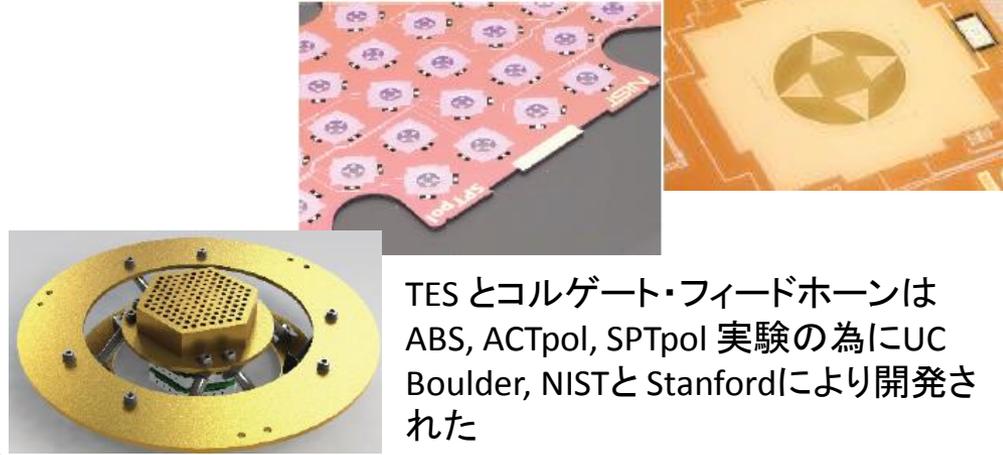
PI: C. Walker, U. Arizona
GUSTO: Gal/Xgal U/LDB Spectroscopic
- Stratospheric Terahertz Observatory



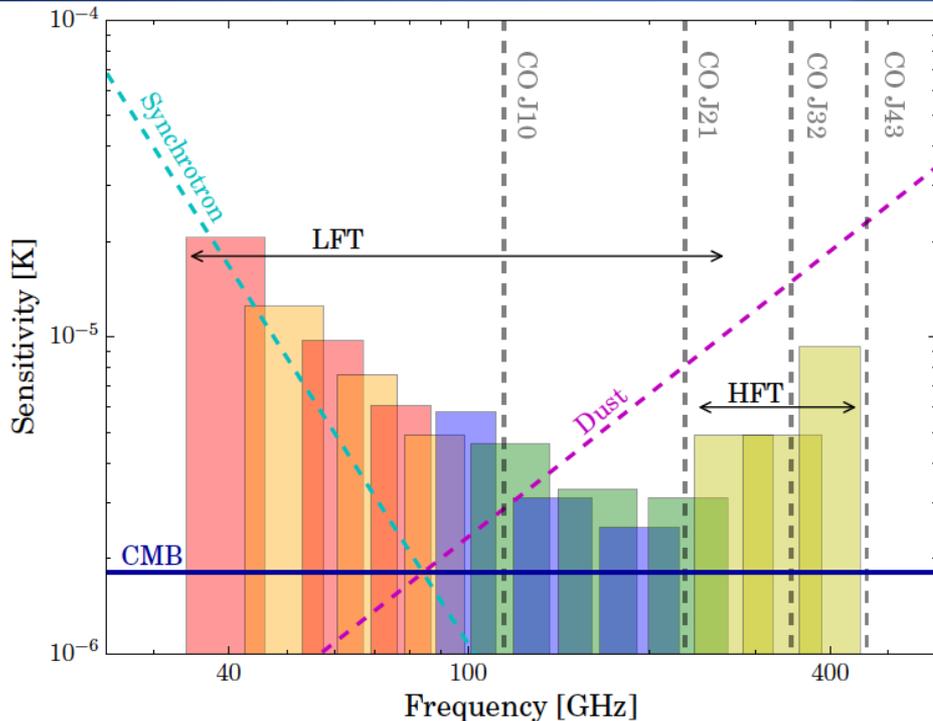
二つの焦点面検出器



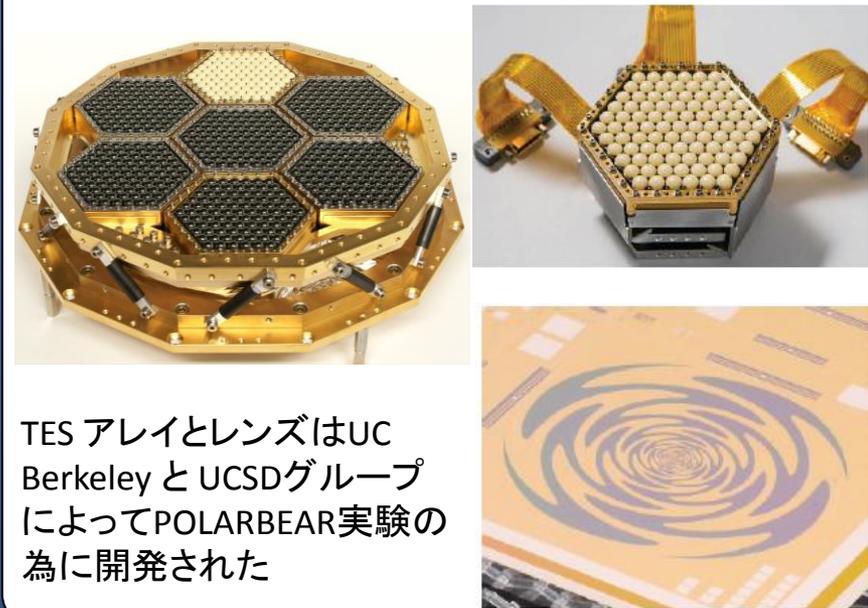
高周波用望遠鏡 (HFT)



TES とコルゲート・フィードホーンは
ABS, ACTpol, SPTpol 実験の為にUC
Boulder, NISTと Stanfordにより開発され
た

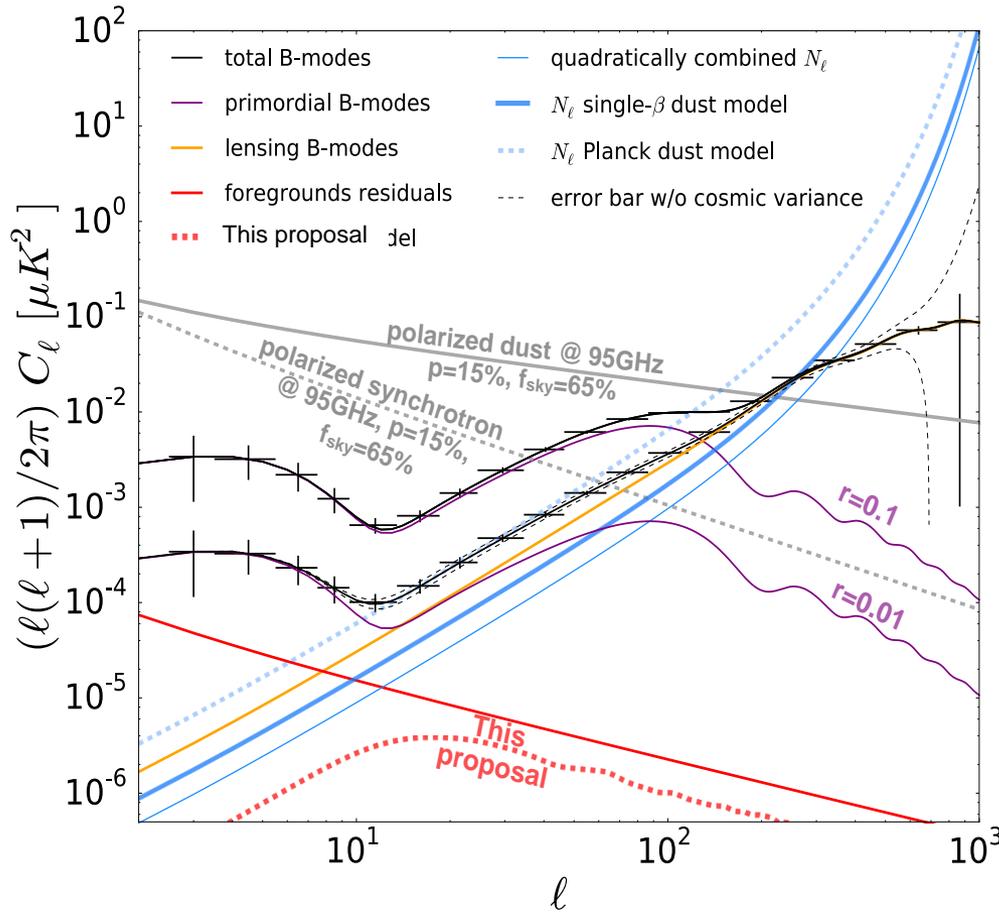


低周波用望遠鏡 (LFT)



TES アレイとレンズはUC
Berkeley と UCSDグループ
によってPOLARBEAR実験の
為に開発された

LiteBIRD 感度 (15 バンド)



$$\delta r = 0.2 \times 10^{-3}$$

前景放射除去*,
宇宙論的分散,
CIBによるディレンジング**
を含む

- 前景放射残渣はパラメトリックなベイズ最尤法を使って推定した。(Errard et al. 2011, Phys. Rev. D 84, 063005)
- 現在国際的な前景放射除去ワーキンググループを作って鋭意検討中

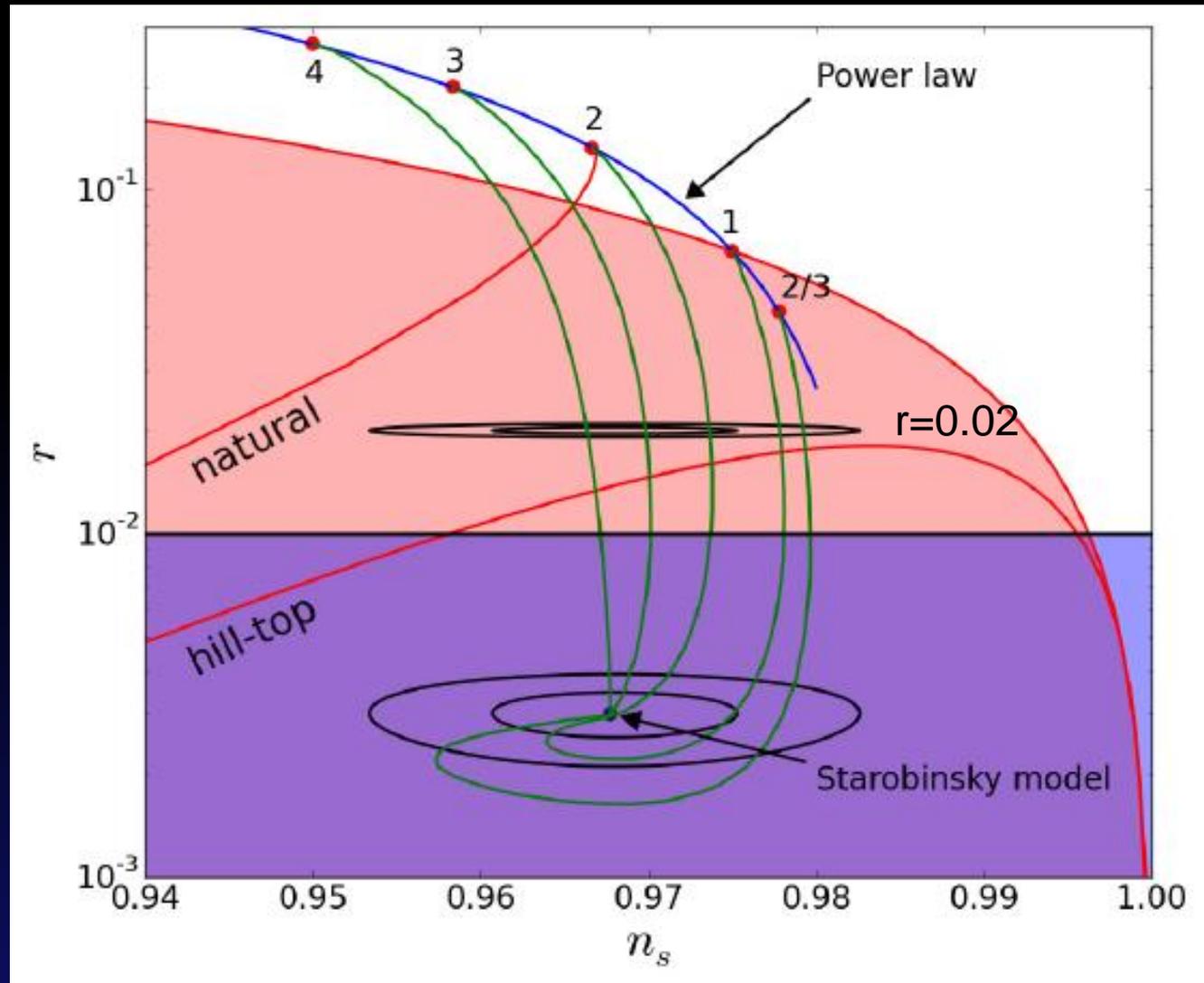
** "Delensing the CMB with the Cosmic Infrared Background", B. D. Sherwin, M. Schmittfull arXiv:1502.05356

2015-2016のタイムライン



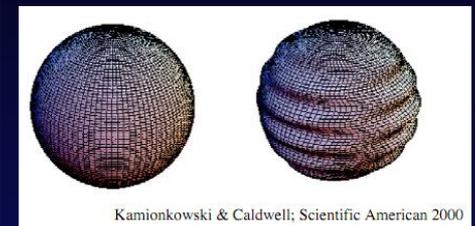
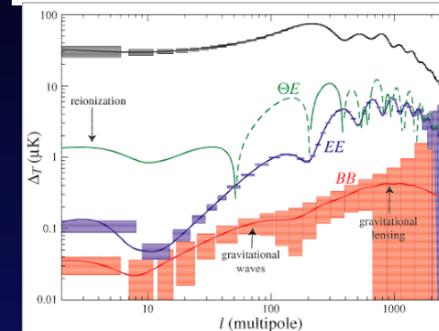
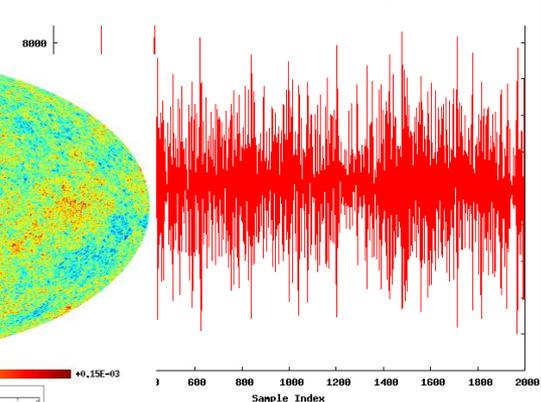
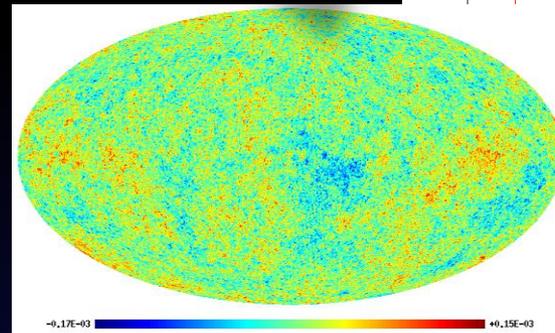
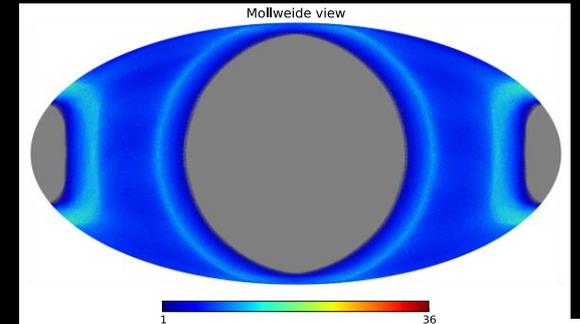
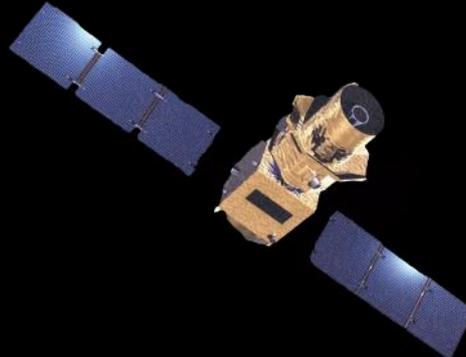
両国で同期して進行中

LiteBIRD による $r-n_s$ 平面における制限 (15 バンド)



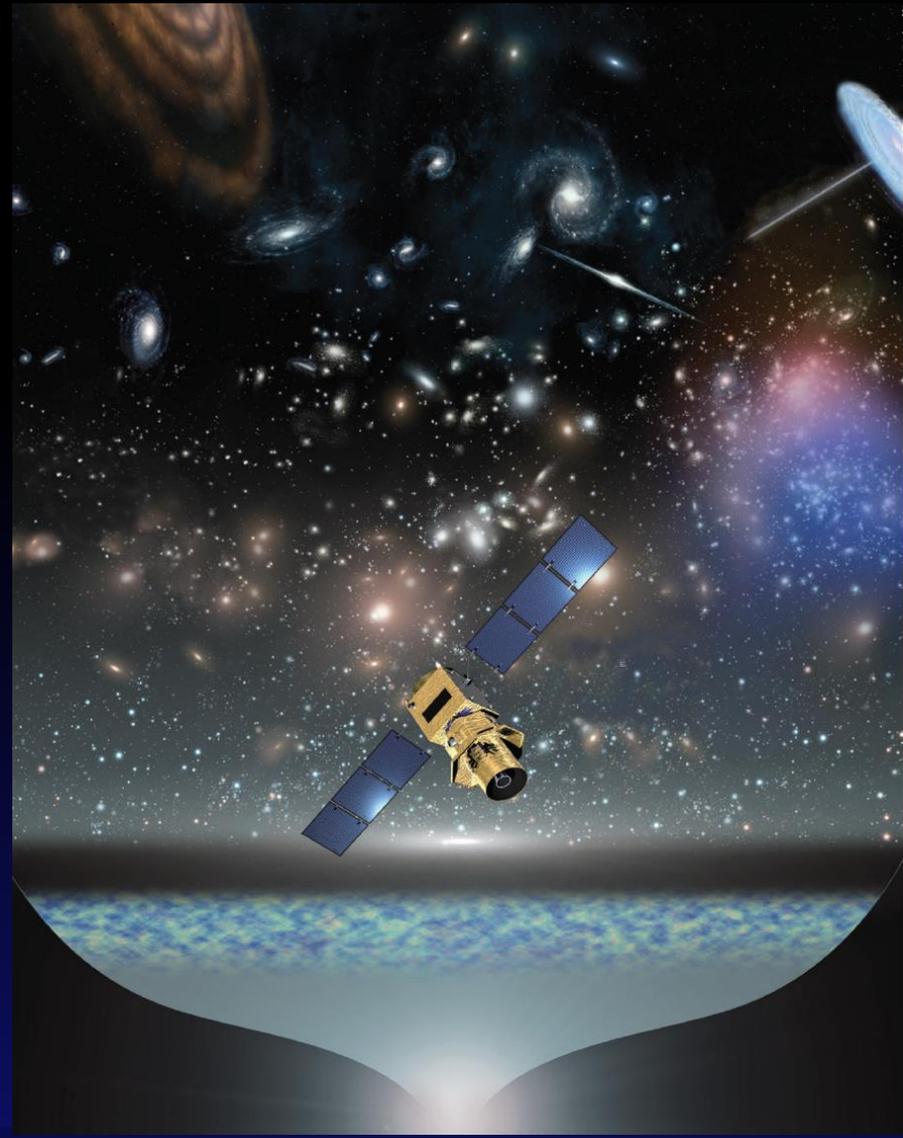
今から202X年までに出来ること！

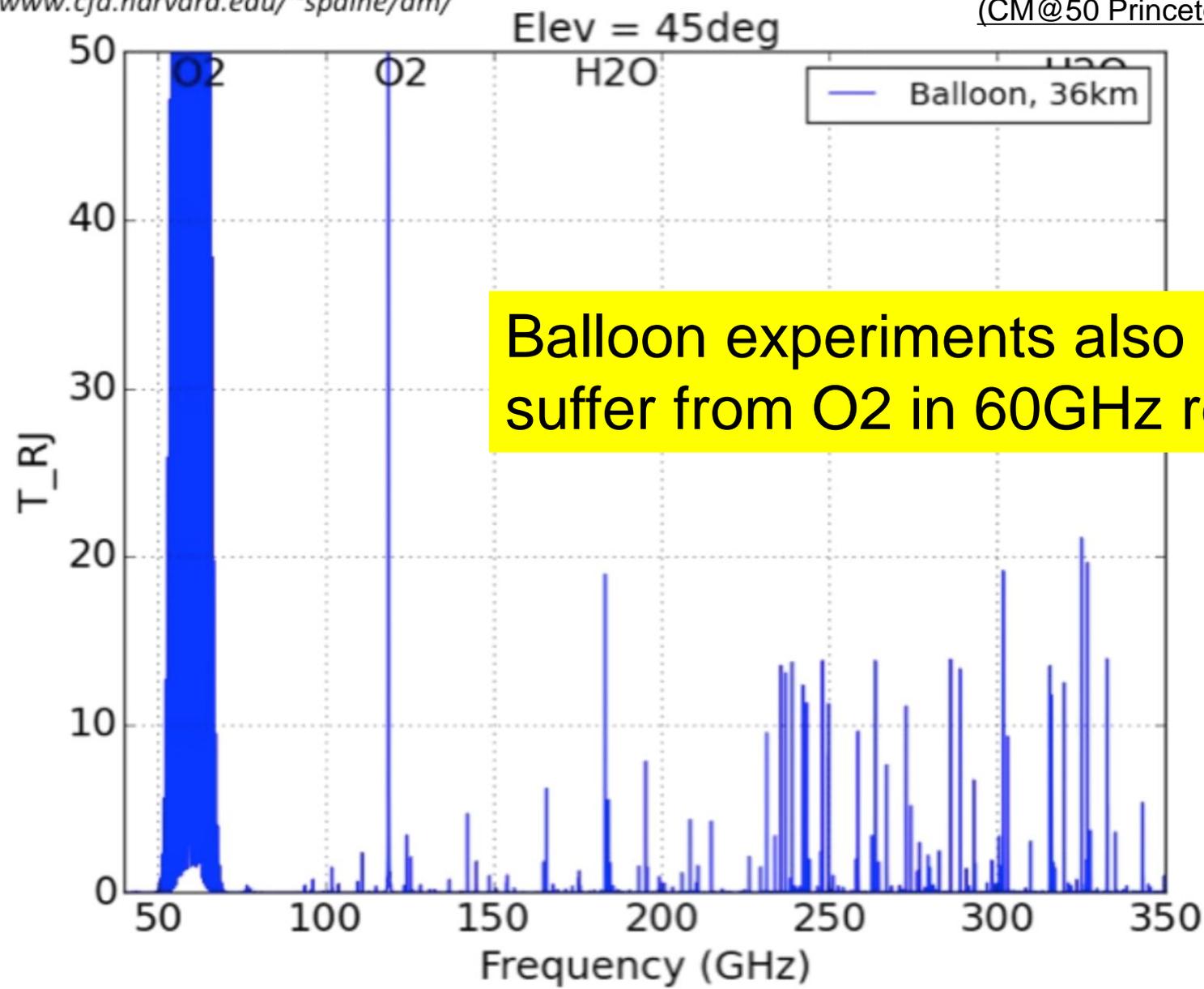
- 概念設計～詳細設計
- 観測装置の製作
- 衛星の製作
- 観測装置のモデル化
 - 焦点面検出器、視線、ビーム、バンドパス
 - ノイズ(ホワイト、ピンク)
- スカイモデル
 - 前傾放射
 - CMB
- 校正手法の確立
 - 偏光角やゲインの校正
- 解析手法の確立
- シミュレーション



まとめ

- LiteBIRDミッションはインフレーション起源のBモード偏光の観測を目指した次世代のCMB偏光観測衛星である
 - ミッション要求は、テンソル・スカラー比を全誤差0.001以下で測定することである
 - これによって、多くのラージ・シングルフィールド・スローロール・インフレーション・モデルをテスト出来る
- LiteBIRDは現在、戦略的中型科学衛星候補として、概念設計段階への移行の審査中である
 - 打ち上げ時期は2022-2025を目指している
 - 米国ではNASAで提案が絞り込み審査中であり、欧州でも参加しようという機運が盛り上がっている
 - 現在若い研究者を中心に計画が進められており、皆さんの参加を歓迎いたします





Balloon experiments also suffer from O₂ in 60GHz region