

CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD概念設計

インフレーション起源の原始重力波の探索

関本裕太郎 (JAXA)・堂谷忠靖(JAXA)・羽澄昌史(KEK)・小松英一郎 (MPA)・石野
宏和(岡山大)・今田大皓(JAXA)・魚住聖 (岡山大)・宇都宮真(IPMU)・鹿島伸悟
(NAOJ)・片山伸彦 (IPMU)・桜井雄基 (IPMU)・篠崎慶亮(JAXA)・菅井肇(IPMU)・
辻本匡弘(JAXA)・富田洋(JAXA)・永田竜 (KEK)・長谷部孝(JAXA)・松村 知岳
(IPMU)・満田和久(JAXA)・南雄人(KEK) 他 LiteBIRD phase A1チーム

ポスター

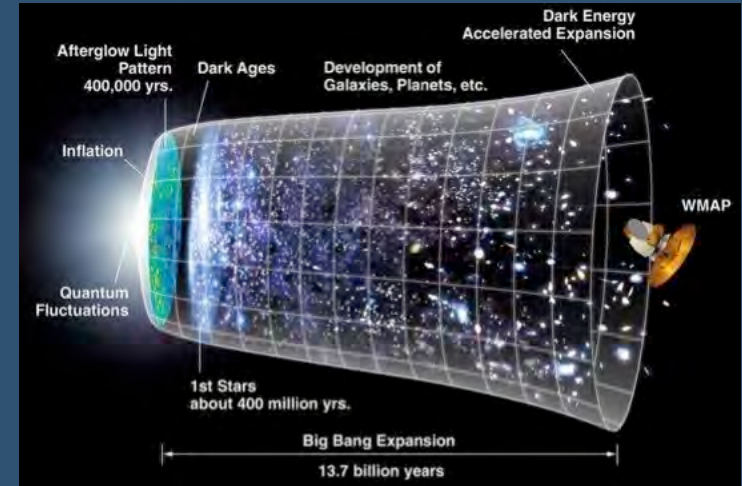
- P-104 : 羽澄 : LiteBIRD衛星のサイエンス、ミッション、プロジェクト概要
- P-105 : 石野 : LiteBIRD衛星のシステム概要
- P-106 : 桜井・松村 : LiteBIRD科学衛星のための偏光変調器の開発状況
- P-107 : 金井・市来・片山 : LiteBIRDのための前景放射除去アルゴリズムの検証
- P-108 : 今田・長谷部 : LiteBIRD望遠鏡光学系の物理光学および熱構造の検討



LiteBIRDの概要

Lite (light) satellite for the studies of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection

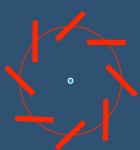
- 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)の偏光を全天で観測
- 観測周波数 : 34 - 448 GHz (15 bands)
- ISAS戦略的中型
- 2020年代 2号機



E-mode



B-mode

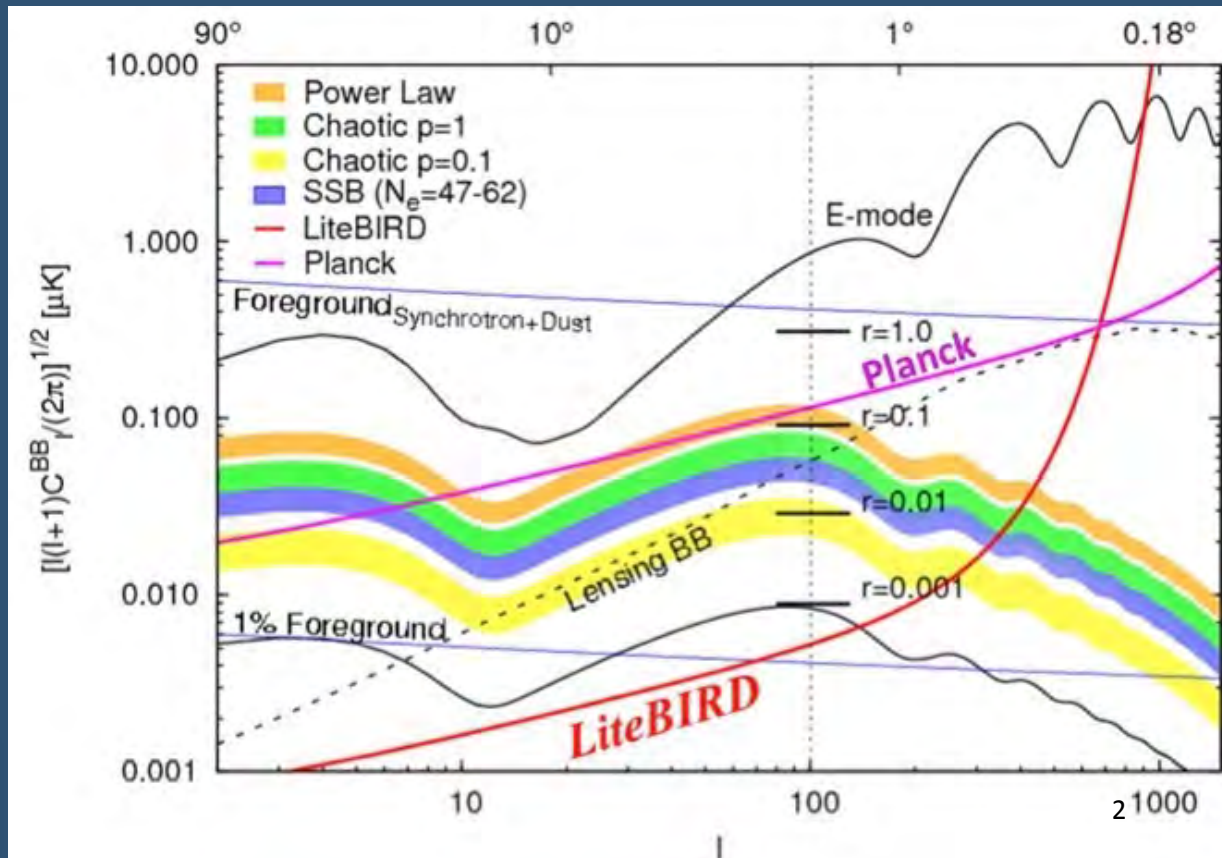


r : tensor to scalar ratio

$$r \equiv \frac{\Delta_{grav}^2(k_*)}{\Delta_R^2(k_*)}$$

Inflation potential energy

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



原始重力波 Bモード偏光

- インフレーション宇宙

- Alan Guth 1981 Physical Review D
- Katsuhiko Sato 1981 MNRAS 195, 467

- 地平線問題
- 平坦問題

- インフラトンポテンシャル
$$V^{1/4} = 1.06 \times 10^{16} \times \left(\frac{r}{0.01} \right)^{1/4} [\text{GeV}]$$

$$r \equiv \frac{\Delta_{grav}^2(k_*)}{\Delta_R^2(k_*)}$$

- 量子重力理論への制限

- 代表的なsingle large field slow-roll modelでは $r > 0.002$

- 時空の量子ゆらぎの発見

Fundamental Physicsにおける大きな意義

LiteBIRDの進展と現状

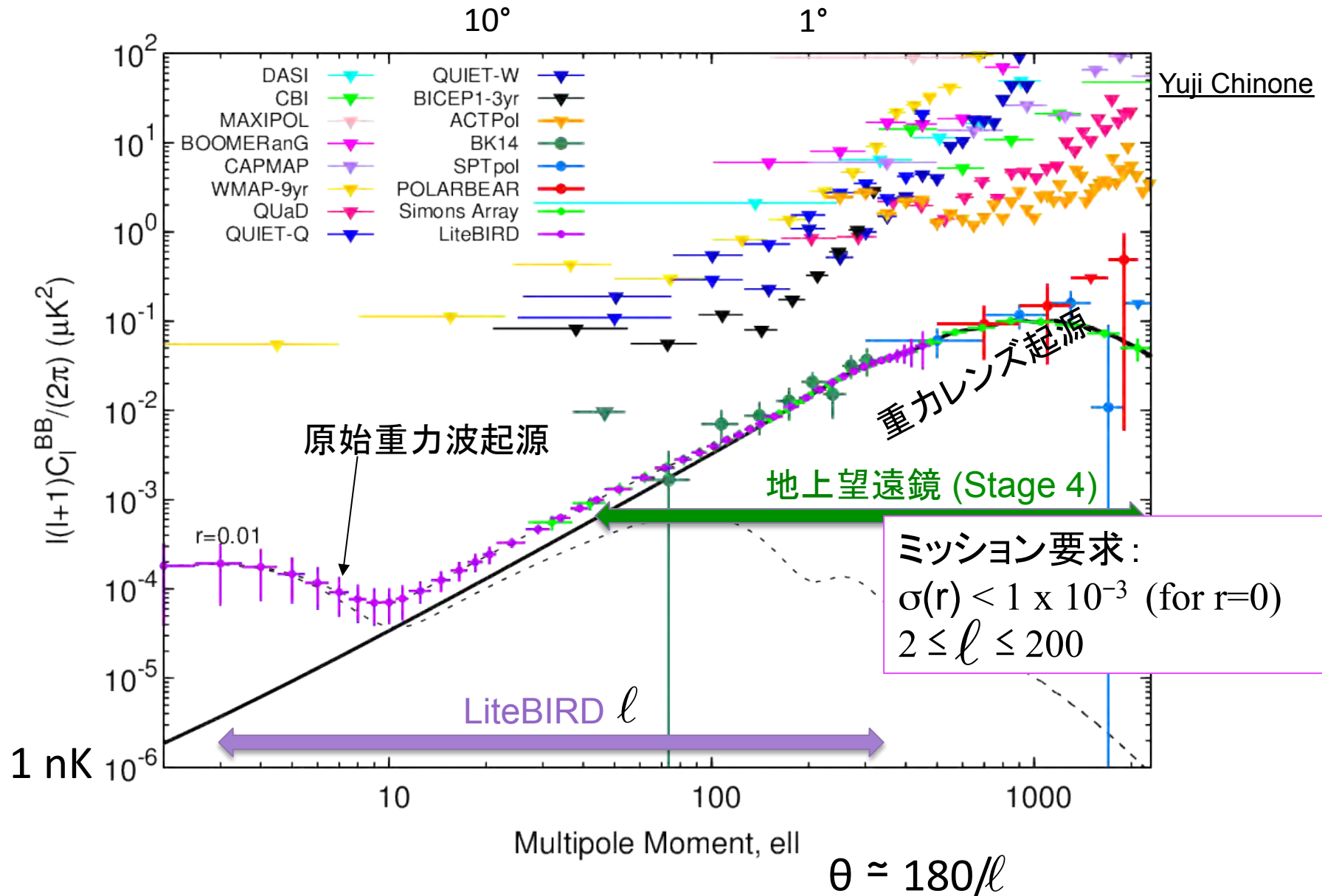
- プロジェクト
 - 2015年2月に宇宙研中型に提案、ミッション定義審査(MDR)を通過
 - 2016年5月に国際科学審査、8月に計画審査2016年9月よりフェーズA1を開始
 - PI 羽澄昌史 (KEK), チーム長 堂谷忠靖 (ISAS), プロジェクトサイエンティスト 小松英一郎 (MPA)
 - ISAS、Kavli IPMU、KEKにおいて実行体制を増強中
- 学術会議
 - 日本学術会議の指定する重点大型研究計画の一つ(マスタープラン2017)
 - 文科省の指定する大型研究計画(7計画)の一つ(ロードマップ2017)
 - 宇宙電波懇談会(2013) 高エネルギー物理学研究者会議の将来計画検討小委員会答申(2012,2017)
- 国際協力 米国
 - 米国LiteBIRDチームが焦点面検出器を供給することをNASAに提案
 - 概念検討 Concept Study Report (CSR)を終えて、2017年12月よりNASA Technology Developmentが始まる。
- 国際協力 ヨーロッパ
 - 2017年ヨーロッパコンソーシアムが結成。High Frequency Telescopeとsub-Kelvin coolerを検討
 - 2017年11月 ESA Science Program Committee (SPC)にて、MOの事前検討の承認
 - 4つのJoint Study Group (Foreground, Systematics, High Frequency Telescope, Calibration)が結成されて、国際的に検討

国際的な競合

	LiteBIRD	CORE	PIXIE
主体	JAXA	ESA M5 (AC	ESA (AO2017)
特徴	大角度Bモード偏光	CMB全般	フーリエ分光計によるCMBスペクトル測定
ビームサイズ	0.3-1度	0.1 - 0.2度	2度
打ち上げ予定年	<div>不採択</div> <p>LiteBIRDは世界で唯一の原始重力波の検出を2020年代に行う可能性のある衛星計画 世界に先駆けて打ち上げるまたとない機会である。</p>		



LiteBIRD衛星の感度



<https://sites.google.com/berkeley.edu/bmodefromspace02/home>

NASA

ESA

JAXA主導
LiteBIRD

B-MODE FROM SPACE WORKSHOP
SECOND MEETING AT THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA, BERKELEY
2017 DECEMBER 4TH – 6TH

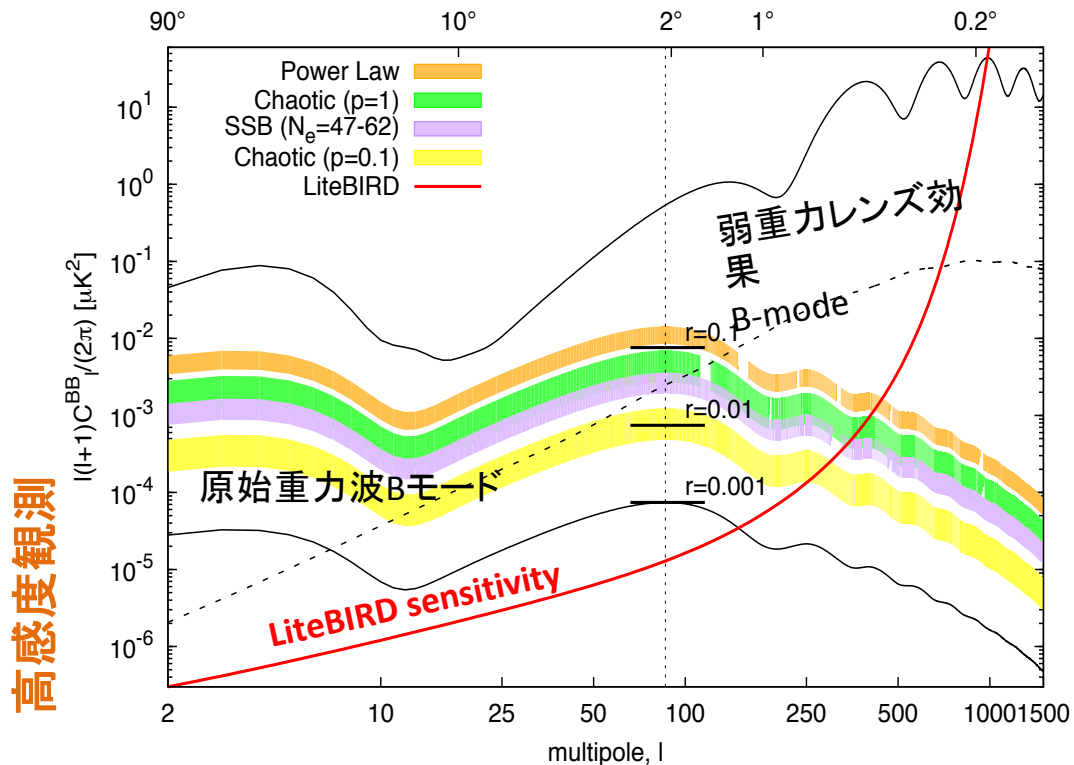
ミッション要求

$$r \equiv \frac{\Delta_{grav}^2(k_*)}{\Delta_R^2(k_*)}$$

$$\delta r = 1.0E-3$$

角度分解能

- 大角度相関観測
 - 角度分解能
 - スキャン方式
- 前景放射を同時観測
 - 広帯域多周波観測
- 高感度・高精度観測
 - ミリ波広視野観測
 - 観測検出器感度
 - 系統誤差の低減



高感度観測

全天観測

角度スケール

M. Hazumi et al. 2012

衛星のメリット

- 大気揺らぎによる影響がなくなる
- 広帯域観測が可能となる

LiteBIRD主な仕様

	仕様
観測周波数	低周波望遠鏡 (LFT) 34 ~ 270 GHz (バンド数 12)
	高周波望遠鏡 (HFT) 238 ~ 448 GHz (バンド数 3)
感度	3 μ K·arcmin 以下
全誤差	$\delta r < 1 \times 10^{-3}$
観測期間	3年間
軌道	L2リサージュ軌道、歳差角 45度、スピン角 50度 (0.1 rpm)
角度分解能	100 GHz の半値全幅で 30 分角以下
視野	LFT (> 20度×10度), HFT (> 10度×10度)
低温開口絞り	温度 < 2 K
回転半波長板	回転速度 LFT 88 rpm, 温度 < 10 K
超伝導焦点面検出器	NETParray = 1.7 μ K \sqrt{s} @ 100 mK
	素子数 ~ 3000
	f_{knee} 20 mHz 以下
データ転送レート	4 GByte/day
重量	2.2 ton
電力	2.5 kW

Phase A1における課題

1. 前景放射の除去
2. 系統誤差の低減
3. 回転半波長板の開発
4. 冷却系熱設計
5. 物理光学の検討
6. 検証方法の検討
7. 国際協力の確立

前景放射

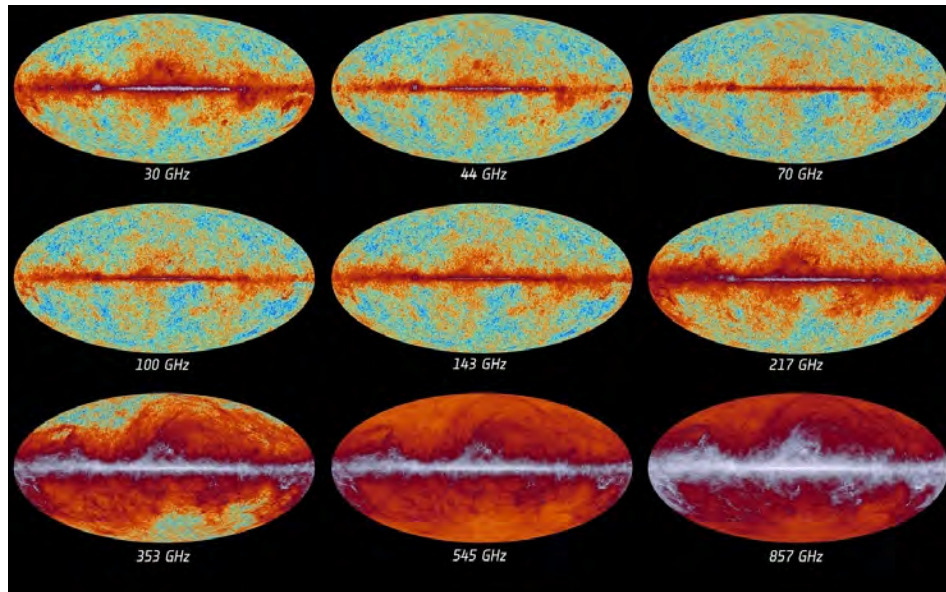
Poster-107 金井(横国大)、市来(名古屋大)、片山(IPMU)他

LiteBIRDのための前景放射除去アルゴリズム

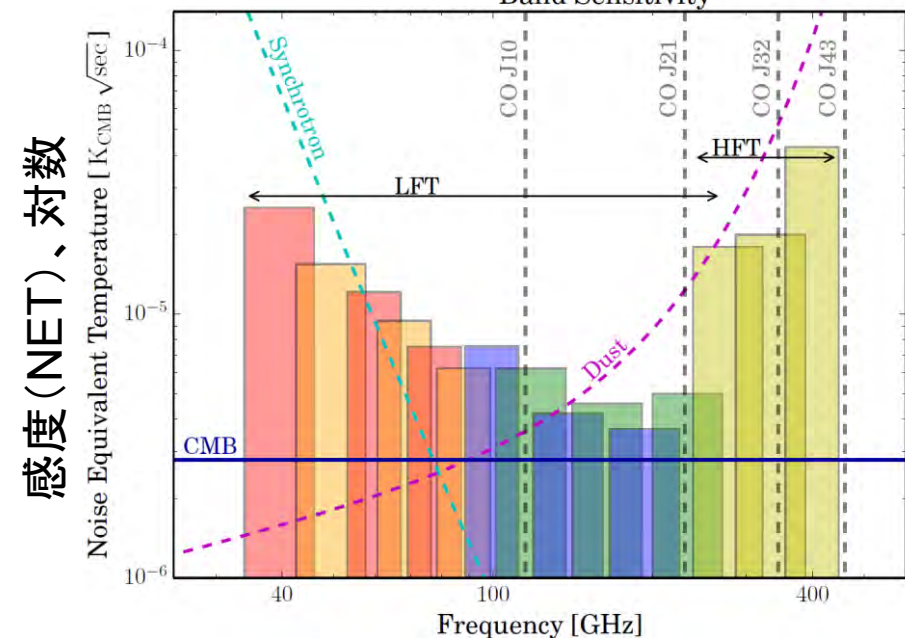
シンクロトロン放射

IPA)

ダスト



ESA : Planck



観測周波数 (GHz)

1. 前景放射 : Thermal dust & Synchrotron
2. 34 – 448 GHzの多数バンドでの観測

2014年3月 Bicep2 が150GHzにて $r=0.2$ の報告 Phys. Rev. Lett. 112(24), 241101

“Detection of B-Mode Polarization at Degree Angular Scales by BICEP2”

これによりダストの観測の重要性が明らかになった。

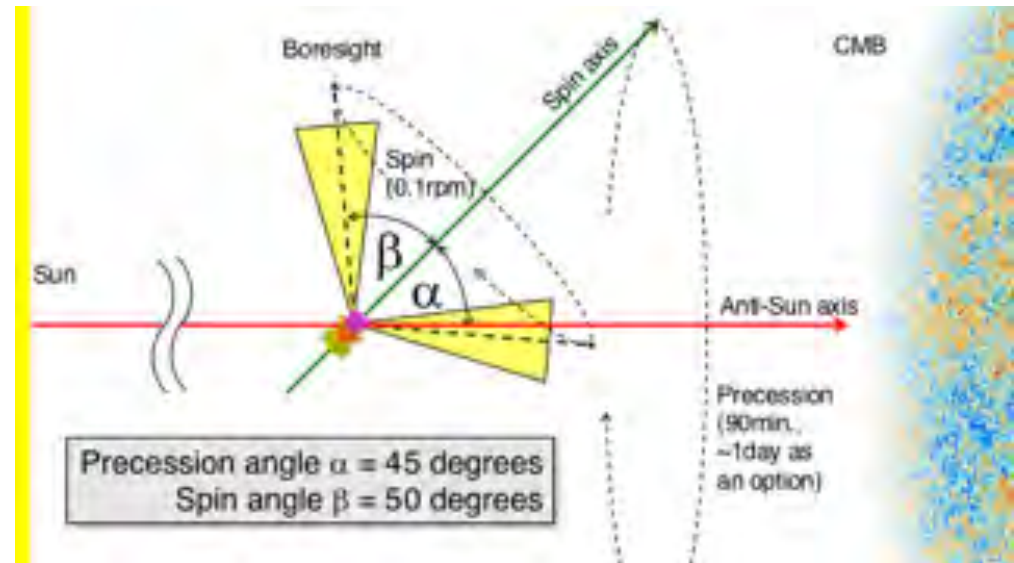
<https://sites.google.com/berkeley.edu/bmodefromspace02/home>

LiteBIRD系統誤差の低減

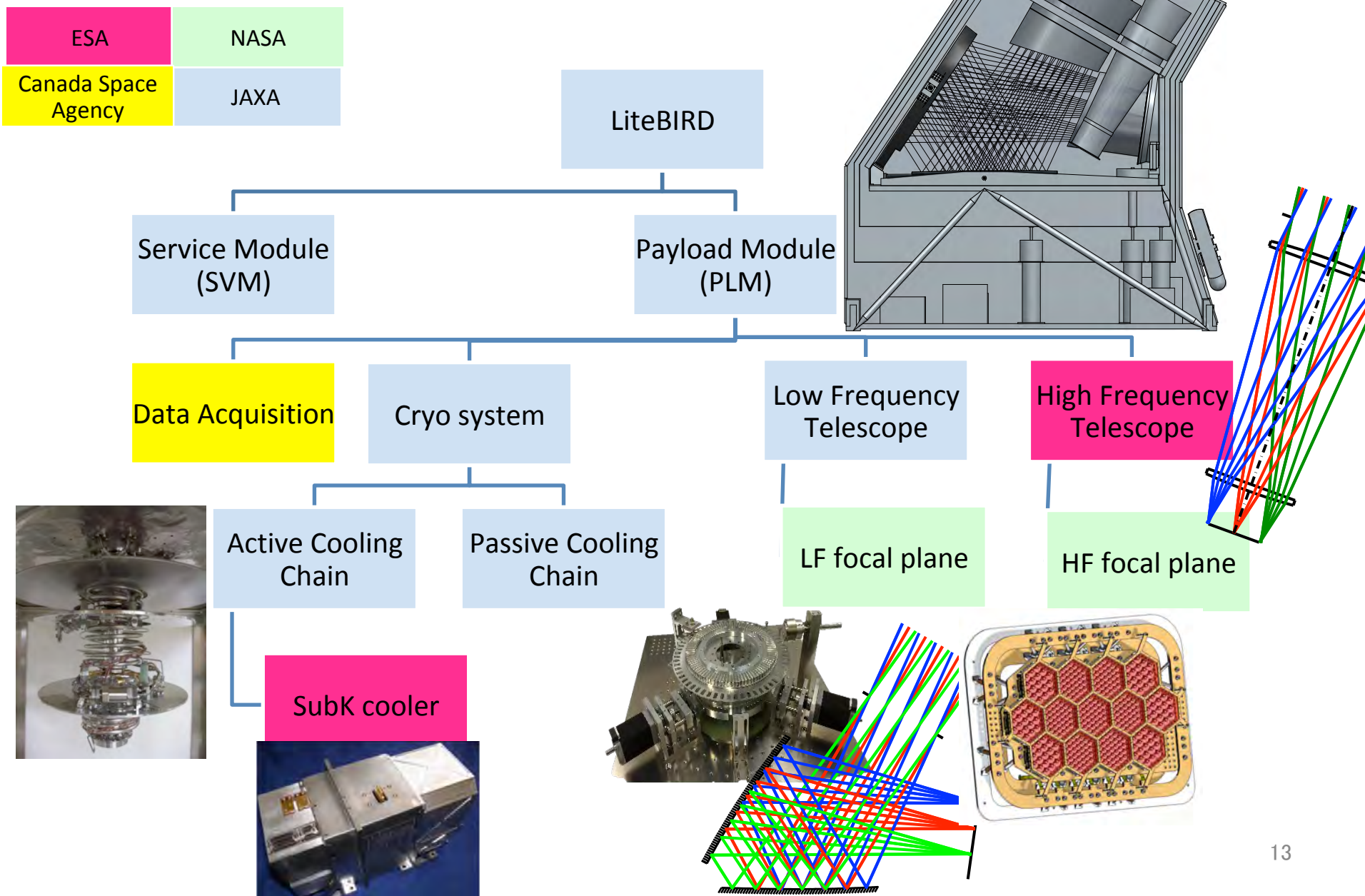
テンソルスカラー比 $dr = 1e-3$

- 偏波特性・ビーム特性
 - 冷却望遠鏡
 - HWP & 焦点面検出器
 - 上空較正
 - 地上較正試験
 - 温度安定性
- $1/f$ ノイズ
 - 偏光変調
- 宇宙線
- スキャン戦略
 - re-visit
 - cross link

石野宏和 (岡山大)
永田竜 (KEK) Poster -105



LiteBIRD Product Tree



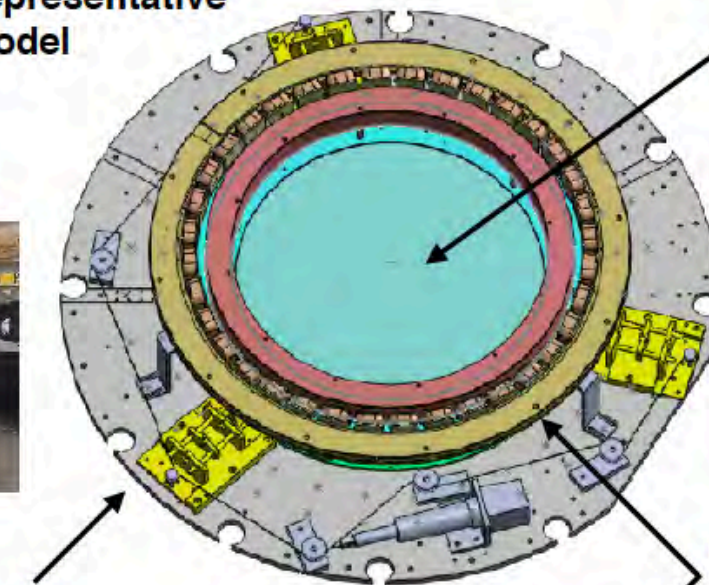
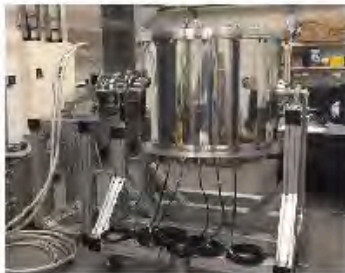
偏光変調器

Poster 106 桜井雄基 (IPMU) 他

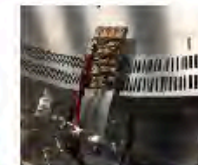
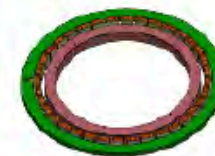
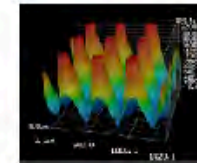
直径	偏光効率	温度	排熱	回転速度	寿命
Φ 450 mm	> 98% 34 – 270 GHz	< 10 K	< 2 mW (観測時) < 5 mW (再冷却時)	88 rpm	> 3年

φ 400mm flight representative demonstration model

φ~1m 4K cryostat

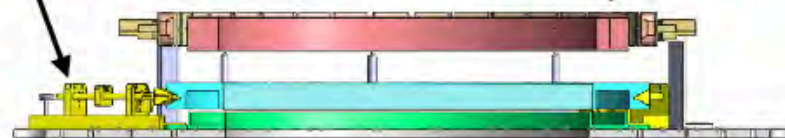


Anti-Reflection (AR)
Achromatic HWP (AHWP)

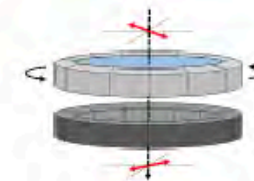


Cryogenic Synchronous Motor
Encoding System

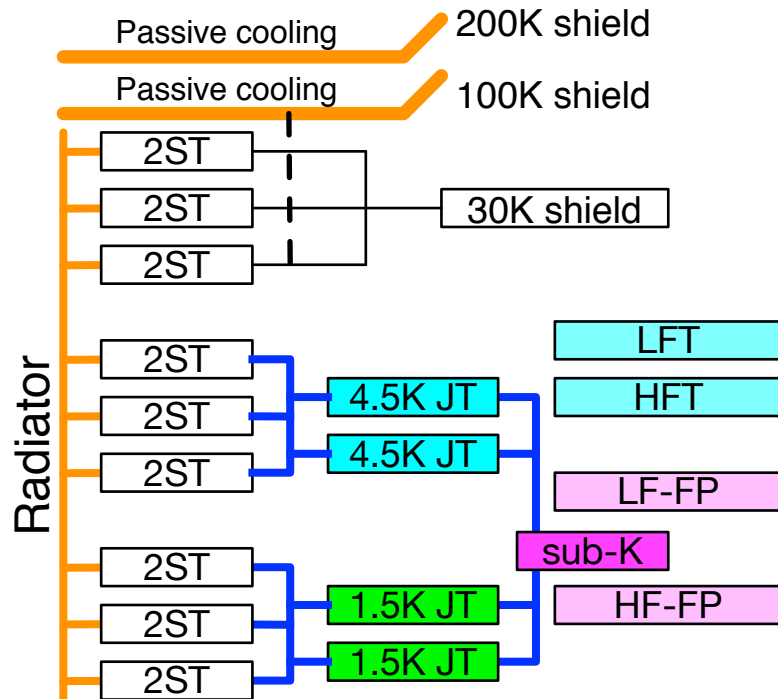
Gripper Mechanism



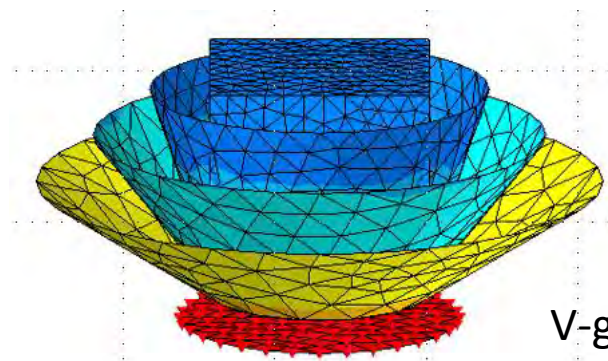
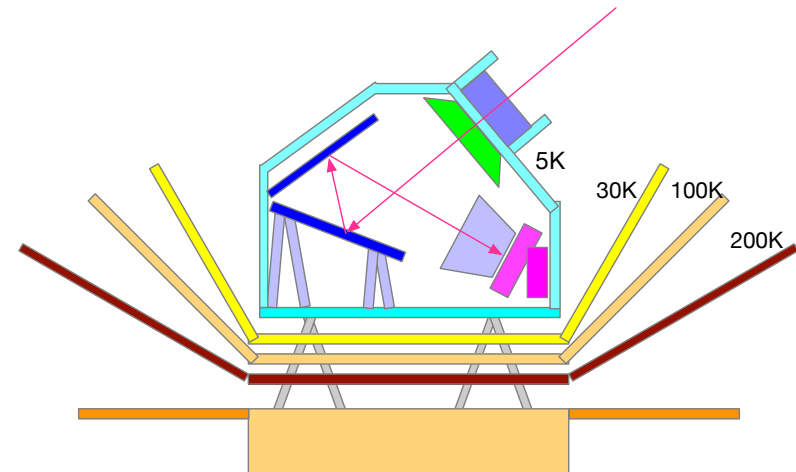
Superconducting Magnetic Bearing



冷却系熱設計

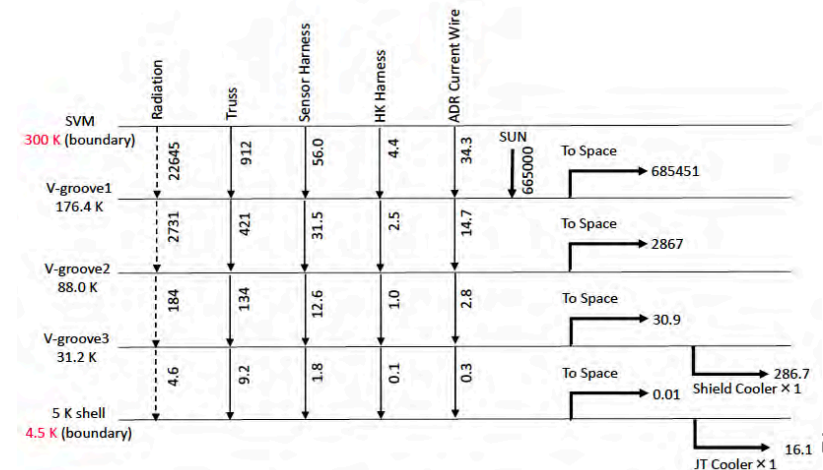


Cooling Chain Core Technology Program
(CC-CTP) 山崎典子他

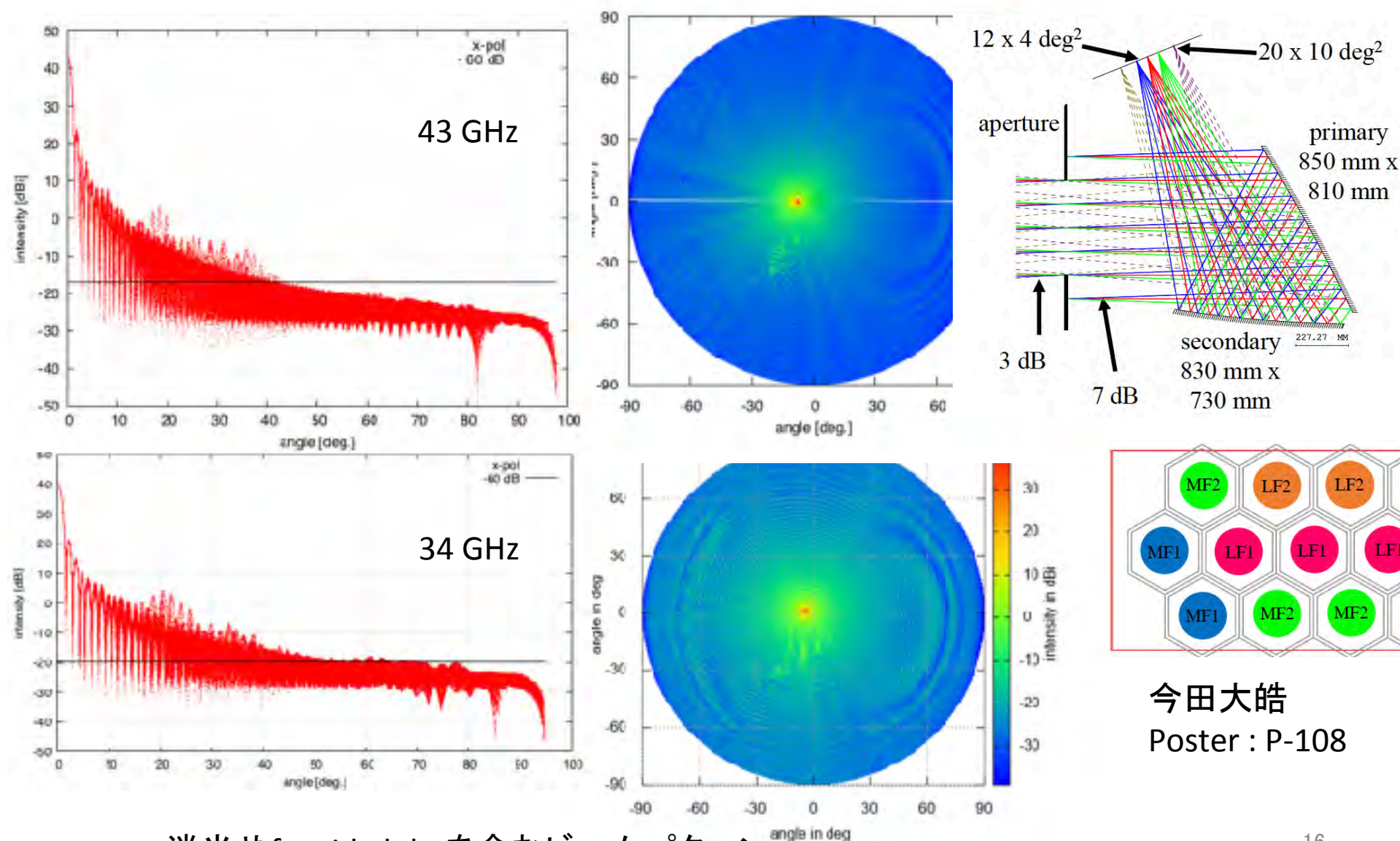


V-groove 設計

長谷部孝 (ISAS/JAXA)
Poster P-108



低周波望遠鏡 (LFT)物理光学計算

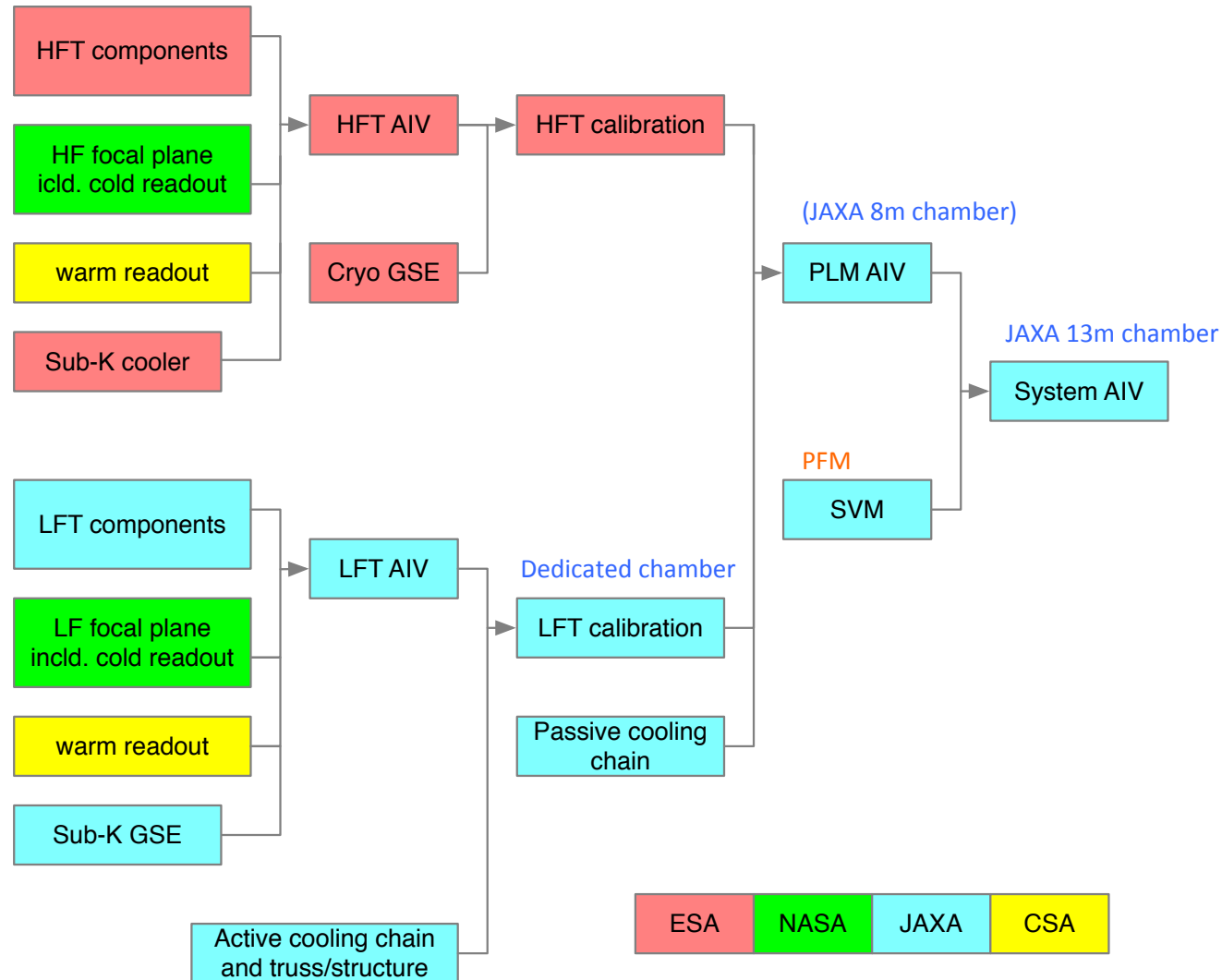


迷光やfar side lobeを含むビームパターン

今田大皓
Poster : P-108

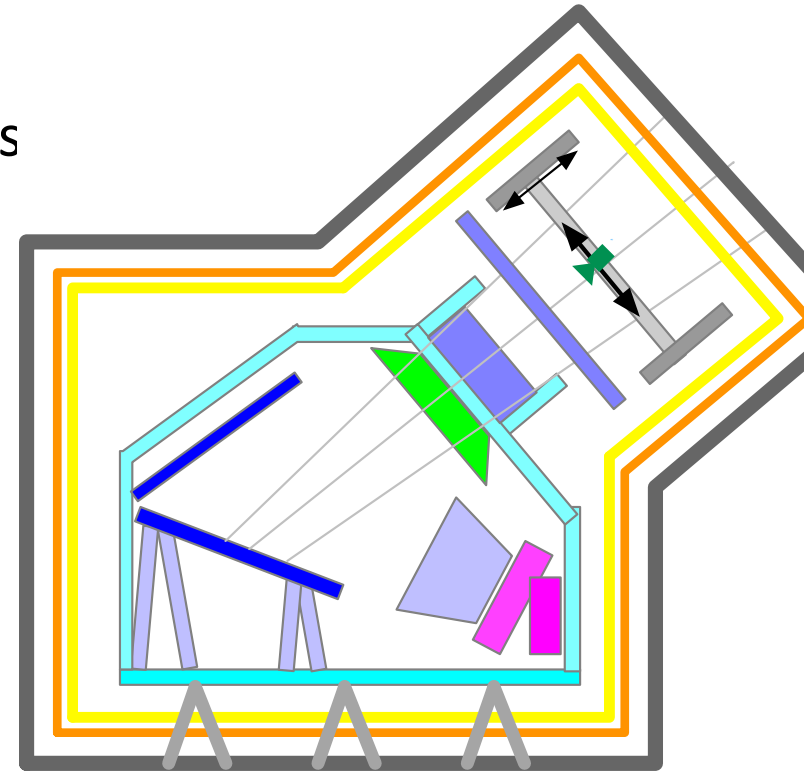
Integration Scheme

Provisional



LFT calibration

- Scope
 - Beam measurements
 - Polarization angle measurements
 - Spectral responses
- Configuration
 - LFT
 - 5K enclosure
 - GSE sub-K cooler
- Test Environment
 - Dedicated chamber (T ~ 5K)
 - dia. 4m x h 5m
 - 77 K Liquid N2 + 4K GM cooler



Phase A1における課題

	現状	
1. 前景放射の除去	✓	Poster107 金井・片山
2. 系統誤差の低減	進行中	Poster105 石野
3. 回転半波長板の開発	進行中	Poster106 桜井・松村
4. 冷却系熱設計	✓	Poster108 今田・長谷部
5. 物理光学の検討	進行中	Poster108 今田・長谷部
6. 検証方法の検討	進行中	コストを含めて検討中
7. 国際協力の確立	✓	Poster104 羽澄

まとめ

- LiteBIRDは原始重力波からのCMB Bモード偏光を大角度スケールで精密観測し、インフレーション物理を探求
- JAXA主導でNASA, ESAが参加
 - NASA、ESAを含めて、唯一の衛星ミッションの候補
- $\delta r < 0.001$ 達成のため、

$$r \equiv \frac{\Delta_{grav}^2(k_*)}{\Delta_R^2(k_*)}$$

 - 前景放射分離（観測バンド、検出器感度）
 - 系統誤差低減（ビーム性能、偏光変調機構、スキャン姿勢 etc)
 - 較正精度向上（上空、地上）

を最適化した観測システムを構築
- 2020年代戦略的中型2号機を目指して概念検討