

熱いビッグバン以前を探る

# LiteBIRD

衛星計画

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

羽澄昌史

KEK / 東大カブリIPMU

# LiteBIRDワーキンググループ

## 101名の国際的・学際的チーム

小栗秀悟、木村誠宏、佐藤伸明、鈴木敏一、田島治、茅根裕司、都丸隆行、永田竜、羽澄昌史、長谷川雅也、服部香里、森井秀樹、山口博史、吉田光宏(KEK) 秋葉祥希、石塚光、井上優貴、瀬川優子、渡辺広記(総研大) 高倉理(大阪大) 宇都宮真、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(JAXA) 石野宏和、樹林敦子、岐部佳朗、山田要介(岡山大)

Adrian Lee, Peter Harvey, Paul Turin, William Holzappel, Aritoki Suzuki, Julian Borrill, Akito Kusaka, Uros Seljak, Paul Richards, Eric Linder, Nathan Whitehorn, Josquin Errard, Tijmen de Haan, Benjamin Westbrook, Blake Sherwin, Yuji Chinone, Ari Cukierman, Charles Hill, Neil Goeckner-wald (UC Berkeley),

Kam Arnold, Brian Keating, Gabriel Rebeiz, Tucker Elleflot (UCSD), Johannes Hubmayr, Gene Hilton (NIST), Nils Halverson (Colorado), 永井誠(筑波大) 片山伸彦、菅井肇、西野玄記(Kavli IPMU) 中村正吾、夏目浩太、水上邦義、入江郁也、藤野琢郎、山下徹(横浜国大) 井上将徳、岡田望、小川英夫、木村公洋、高津湊(大阪府大) 高田卓(核融合研) 小松英一郎(MPA) 石徹白晃治、服部誠、森嶋隆裕(東北大) 大田泉(甲南大) 成瀬雅人(埼玉大) Kent Irwin, Chao-Lin Kuo, 並河俊弥(Stanford U.) 鹿島伸悟、唐津謙一、関本裕太郎、野口卓(国立天文台) 鵜澤佳徳(NICT) 大谷知行、古賀健祐、美馬覚(理研)

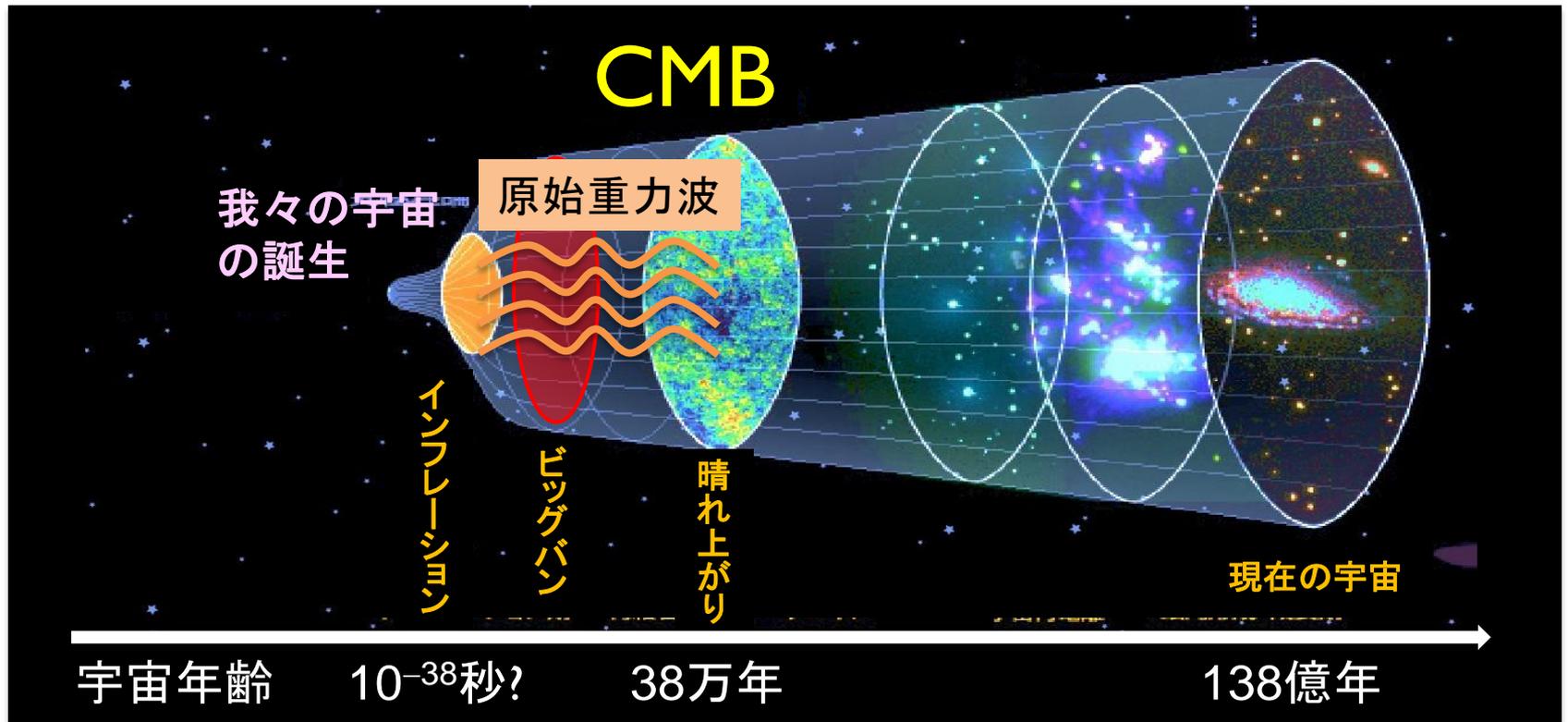
# LiteBIRDワーキンググループによるポスター発表

- ① P2-77 LiteBIRDミッション概要 [片山伸彦\(東大\)](#)
- ② P2-78 LiteBIRDシステム概要 [石野宏和\(岡山大\)](#)
- ③ P2-79 LiteBIRDに向けた広視野アンテナ光学系の検討  
[岡田望\(大阪府大\)](#)
- ④ P2-80 LiteBIRDに向けた多素子超伝導共振器  
(MKID)カメラの開発 [唐津謙一\(国立天文台\)](#)
- ⑤ P2-81 LiteBIRDのための偏光変調器開発 [松村知岳\(JAXA\)](#)
- ⑥ P2-82 LiteBIRDのための宇宙前景放射除去法の検証  
[水上邦義\(横浜国大\)](#)
- ⑦ P2-83 LiteBIRD 系統誤差評価の現状 [永田竜\(KEK\)](#)

技術的詳細はポスターをご覧ください

# 宇宙創生とインフレーション仮説

- 熱いビッグバン以前を記述する最も有力な仮説
- 佐藤勝彦等が提唱し、我が国の研究者が仮説の発展に大きく貢献
- インフレーション仮説の最も重要な予言は「原始重力波の生成」

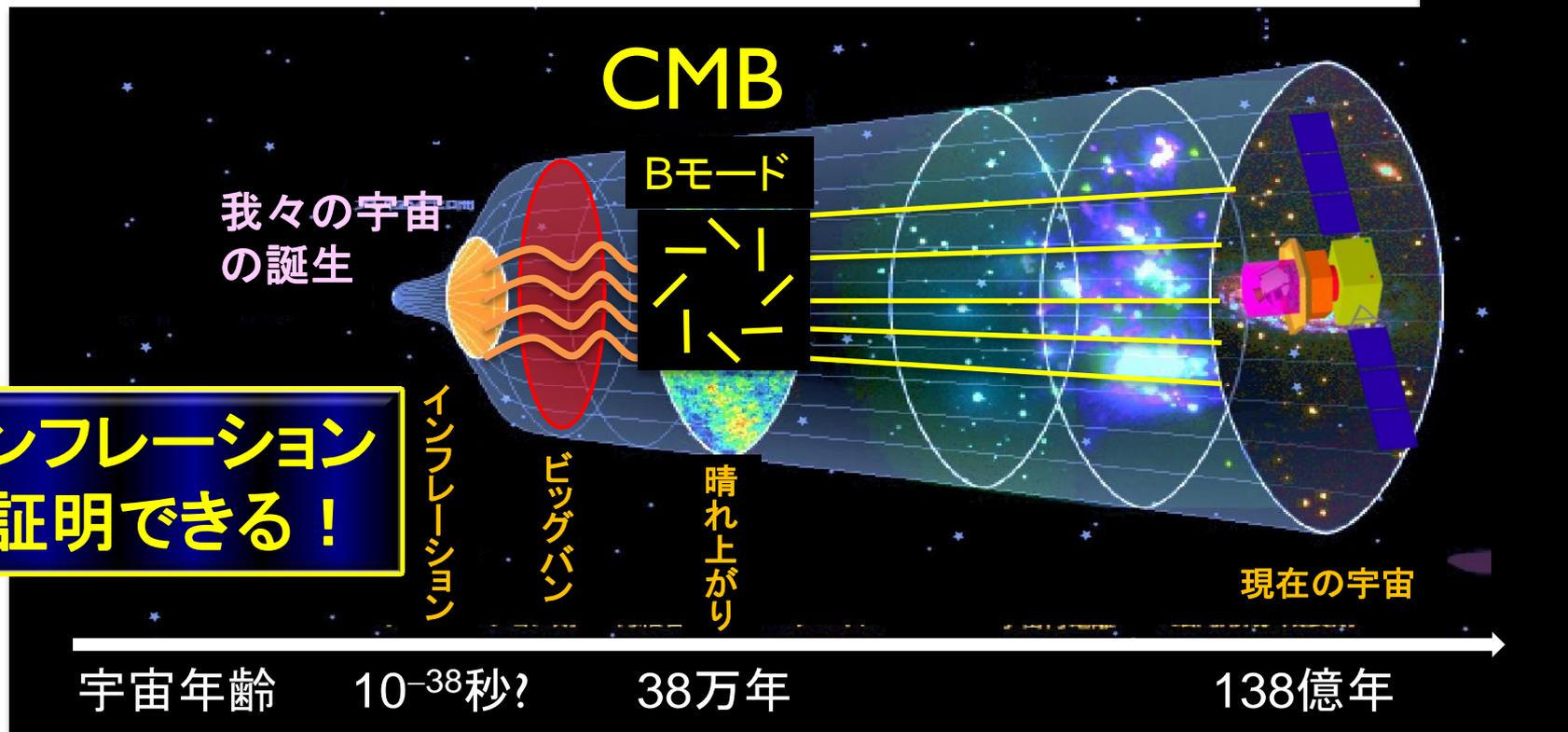
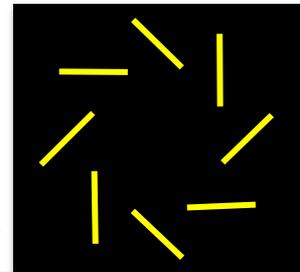


**原始重力波の観測は現代宇宙論の最重要課題**

# CMBを用いた原始重力波の検出

- 原始重力波は、CMBの偏光マップに**Bモード**と呼ばれる大きな渦模様の痕跡を残す
- Bモード専用電波望遠鏡により**原始重力波を検出できる**

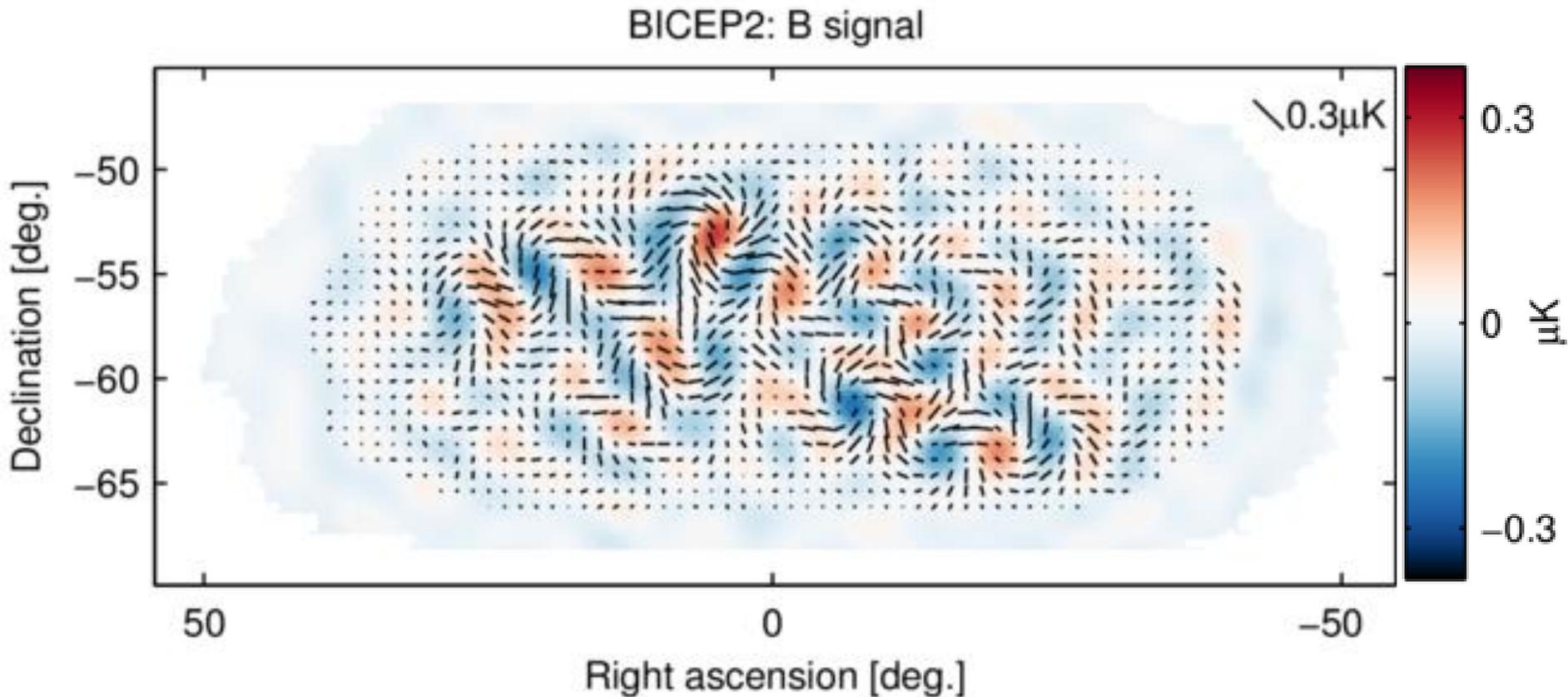
Bモード



インフレーションを証明できる!

**Bモードは原始重力波の観測を可能にする現在唯一の手段**

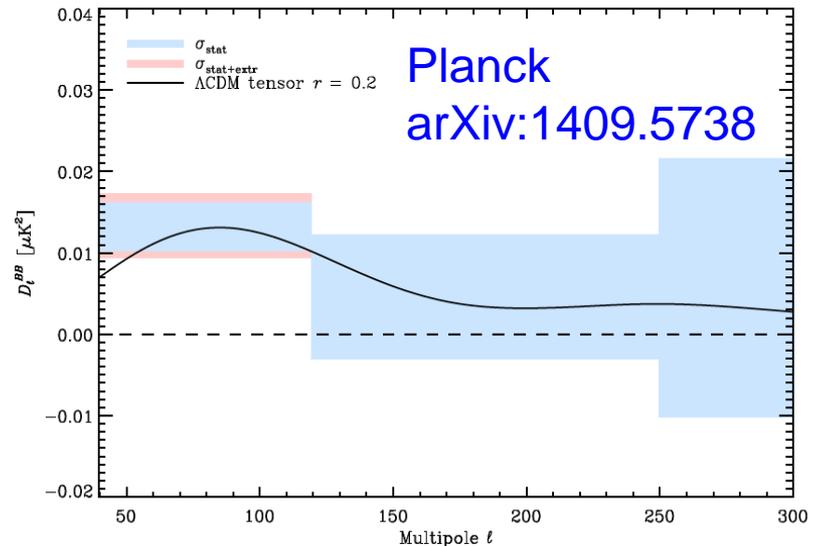
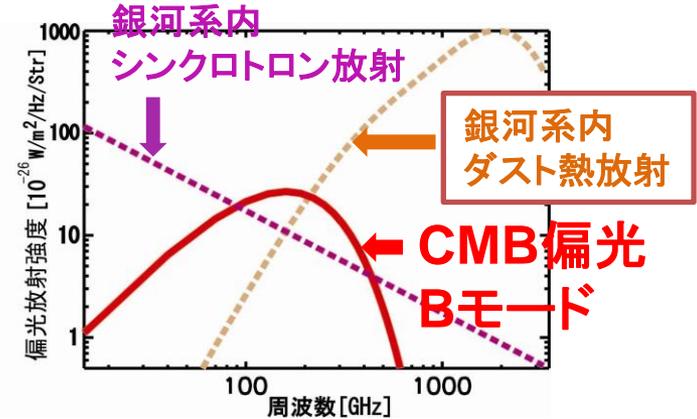
# BICEP2: Bモードマップ (2014)



青・赤はその場所での渦巻き度を示す。揺らぎ(場所によって青かたり赤かたりしていること)の観測に成功している。BICEP2グループはこれが原始重力波によるものだと主張

# Bモード探索現状

- 2014年3月のBICEP2の結果 (150GHzの観測) は、前景放射によるものである可能性が強まった
- Planckは2014年5月と9月に 353GHzの観測結果を出し、ダストの偏光度が予想より高い領域があることを発見。
- それをもとにBICEP2の領域で 150GHzにおける前景放射を見積もったところ、BICEP2の見たシグナルと同程度の大きさとなった。



原始重力波の確定には次世代観測が必要

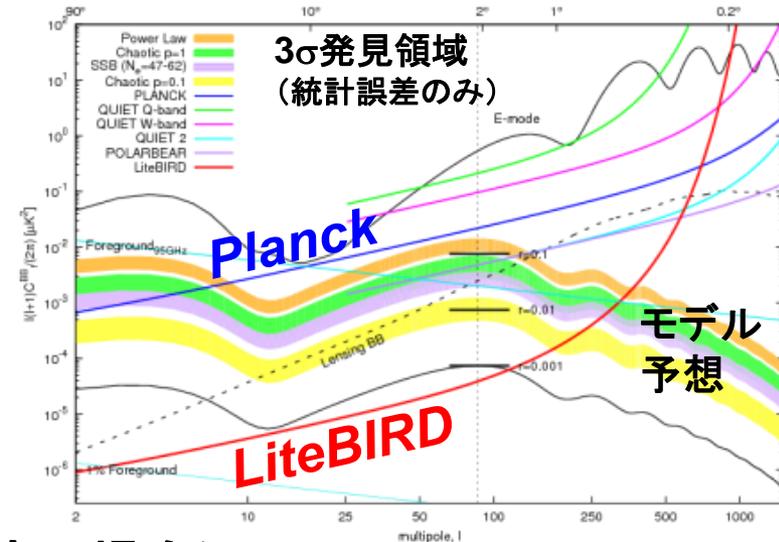
# LiteBIRDのミッション

## 代表的インフレーションモデルをすべて検証

- $r$ の誤差(統計+系統+前景放射+重力レンズ)への要求

$$\delta r < 0.001 \quad (\text{full success})$$

- $r$ は原始重力波の強度を表す宇宙論パラメータ (地上観測の目標は $\delta r \sim 0.01$ )
- 代表的インフレーションモデルの多くは $r > 0.01$ を予言
  - $10\sigma$ 以上で原始重力波発見!
  - インフレーションエネルギー決定!
- 代表的インフレーションモデルでは $r \gtrsim 0.002^*$ 
  - 原始重力波が見えない場合、代表的インフレーションモデル棄却!
- 地上で先に兆候があった場合( $r$ が比較的大きい場合)
  - スペクトルの測定! (予期せぬ発見の可能性も)



\*Single-large-field slow-roll model  
に対するLythの関係式  
に基づく下限

No lose theorem of LiteBIRD

# 計画の概要

## LiteBIRD - Lite (Light) Satellite for the Studies of B-mode Polarization and Inflation from Cosmic Background Radiation Detection

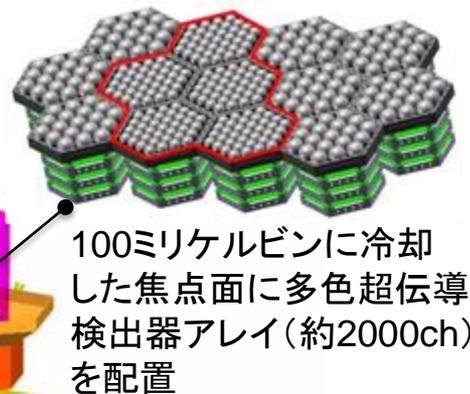
### 戦略

- 緊急度が高くスペースでしか出来ない観測に的を絞り、大きな成果を世界に先駆けて獲得
- 明確な定量的目標(原始重力波強度パラメータ $r$ を誤差0.001以下で測定)に依る設計
- 小型光学系と多色焦点面により重量・コスト減
- 準備段階では地上観測プロジェクトによりサイエンスの成果を出しつつ技術実証をおこなう

### 衛星システム

#### 光学系

- 回転半波長板による変調
- クロスドラゴン方式の主鏡、副鏡(直径約60cm)を4ケルビンに保持



100ミリケルビンに冷却した焦点面に多色超伝導検出器アレイ(約2000ch)を配置

#### バスシステム

- データ取得系
- 制御系
- 通信系

- スターリング冷凍機
- ジュールトムソン冷凍機
- 断熱消磁冷凍機(X線天文学のノウハウ活用)

### 観測

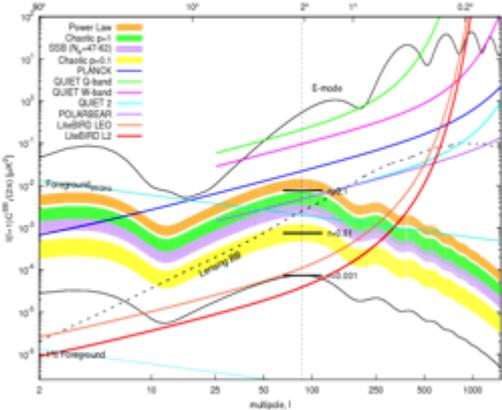
- 全天CMB偏光サーベイ
- スピンレート: 0.1rpm
- 50~320GHzの間で6バンド観測
- 角度分解能: 30分角@150GHz

### 主な仕様

- 観測期間: 3年(目標値)
- 軌道: L2
- 重量: 約1.5t
- 電力: 約1.5kW

# r < 0.001達成に向けた取り組み

## 統計誤差

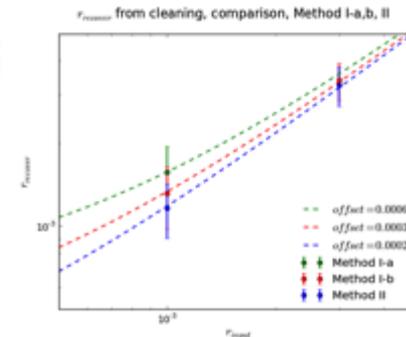


NET~  
2x10<sup>-18</sup>W/√Hz  
素子数~2000

CMB偏光Bモード  
パワースペクトル

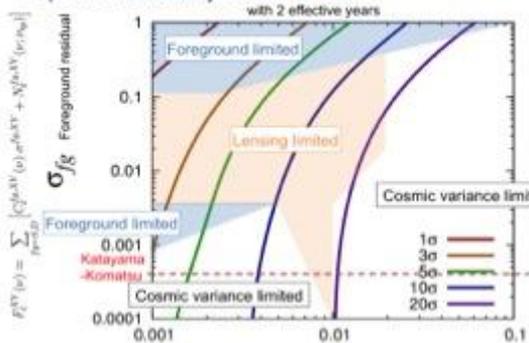
## 前景放射

$\delta r \sim 0.4 \times 10^{-3}$



$\delta r < 0.001$

Expected sensitivity on r



$\delta r \sim 0.5 \times 10^{-3}$   
(統計誤差  
+重カレンズ)

## 重カレンズ

各要素についての要求値の明確化

Effects	Types	Requirement in bias case	Requirement in random case	Notes
Diff. gain calibration	False polarization	0.01 %	0.3 %	
Diff. beam width		0.7 %	2 %	
Diff. beam pointing		3.5 arcsec.	16 arcsec.	
Diff. beam ellipticity		7 % @ ell=2 0.04 % @ ell=300	2.7 %	
Pointing knowledge	Pattern modulation	6 arcmin.	25 arcmin.	20deg. × 30deg. FOV
Abs. gain calibration		Parity preserved	3 %	Calibration in every 10 min.
Beam size stability		Parity preserved	O(10%)	
Angle calibration		1 arcmin.	24 arcmin.	

要求値:  
< 0.57x10<sup>-3</sup>以下

## 系統誤差

# 宇宙科学での位置づけとコミュニティの合意

## 宇宙科学での位置づけ

宇宙科学・探査のロードマップ (JAXA, 2013年9月6日版)より

### ■ 20年先を視野に入れた目標

- 原始重力波の痕跡である宇宙マイクロ波背景放射の偏光B-mode観測など、新たな手段により、インフレーション機構による宇宙創成シナリオを検証する。

- LiteBIRDは宇宙科学の主目的を達成するための候補の一つ。
- Fundamental Physics Mission

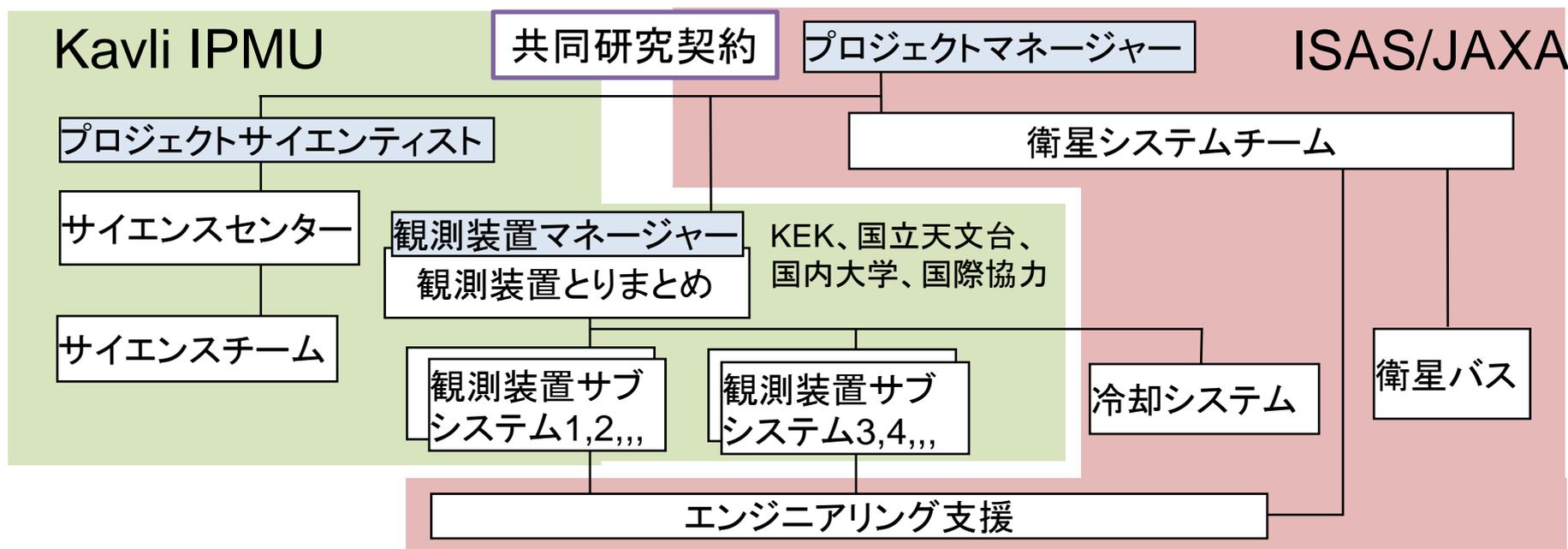
## コミュニティの合意

宇宙物理・天文分野、および素粒子物理分野ともに高く評価

- 学術会議マスタープラン2014の重点大型研究計画
- 文科省ロードマップ2014の新計画(最高評価5計画の一つ)
- 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を合意
- 高エネルギー物理学研究者会議(素粒子物理コミュニティ)「将来計画検討小委員会答申」(平成24年出版)において、重要なサイエンスの一つと位置づけられた

# 実施体制

- プロジェクト実施にあたり、国立天文台が主要な役割を担った「ひので」衛星の推進体制がよいモデル
- 一定の人事交流\*を行った上で、下記のような体制を構築
  - プロジェクトマネージャー、衛星システムチームはJAXAに設置
  - Kavli IPMUにプロジェクトサイエンティストとサイエンスセンターを置く
  - 衛星のインテグレーションは、Kavli IPMUとJAXA宇宙科学研究所 (ISAS) とが共同研究契約を締結し、ISASにて実施する
  - 観測装置はKavli IPMUがとりまとめ\*\*、KEK、国立天文台、国内大学、国外機関と連携



\* 実績:2014年4月1日付け:松村知岳(KEK→ISAS)、5月1日付け:羽澄昌史(KEK→KEK/Kavli IPMU兼任)

\*\* Kavli IPMUは、国立天文台ハワイ観測所すばる望遠鏡に搭載する二つの観測装置(HSC/PFS)の設計・制作をとりまとめており(PFSプロジェクトマネージャー・エンジニア等)、その経験・ノウハウを活かす

$r=0.001$

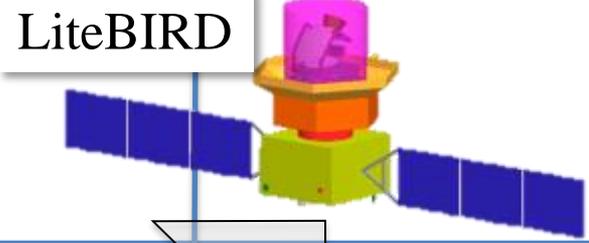
$r=0.01$

$r=0.1$

$r=1$

# 地上からスペースへ至る LiteBIRDロードマップ

代表的インフレーションモデル  
予言の値範囲



**POLARBEAR-2 on Simons Array**

Simons Array  
完成予想  
(合成写真)



GroundBIRD

新学術  
領域研究

2005

2010

2015

2020

# 国際情勢

- 米国: PIXIE (地球周回)
  - 2017年頃提案の可能性あり→最速で2023年打ち上げ
- ヨーロッパ:
  - 2013年: PRISMをL class missionとして提案し、不採択
  - 2015年1月: CORe+をM4に提案の予定



- 2020年代前半にLiteBIRDを打ち上げることが出来れば上記計画に先んじる可能性大
  - 緊急度は高く、我が国がリードするチャンス
  - 先んじられた場合には大魚を逃がす恐れ



UC BERKELEY



STANFORD



NIST



CU-Boulder



UC SAN DIEGO

# U.S. Participation in the LiteBIRD Cosmic Microwave Background Polarization Survey

A Partner Mission of Opportunity Proposal to NASA

Submitted by the University of California, Berkeley

December 18, 2014



Professor Adrian Lee (PI)



David M. Waldon



Contract and Grant Officer  
Sponsored Project Office

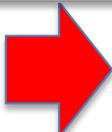


米国LiteBIRDチームが  
NASA MOへ  
LiteBIRD参加提案  
(2014年12月18日)

# 期待される成果

ビッグバン以前の観測による成果

**原始重力波の発見**



新しい学問分野(量子時空の宇宙物理学)の誕生

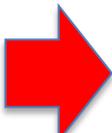
Yes



No

代表的インフレーション宇宙モデルが棄却され、観測による究極理論候補の選別が重要となる

理論予想と一致



人類の世界観に革命

(例: 誕生と終焉を繰り返す宇宙)

Yes



No

インフレーション宇宙の証明 → 佐藤勝彦先生ノーベル賞

天文観測による多彩な成果

- 銀河系・銀河系ハロー・局所銀河群磁場の構造及び起源の解明
- 星間ダスト組成分布及び整列機構の解明
- 宇宙再電離史の詳細決定と再電離機構の解明
- Galactic Haze emissionの起源の解明
- 超高精度ミリ波サブミリ波偏光全天探査によるセレンディピタスな発見

国民が興奮し、  
誇りとするような  
人類共有の  
「知の資産」を生む