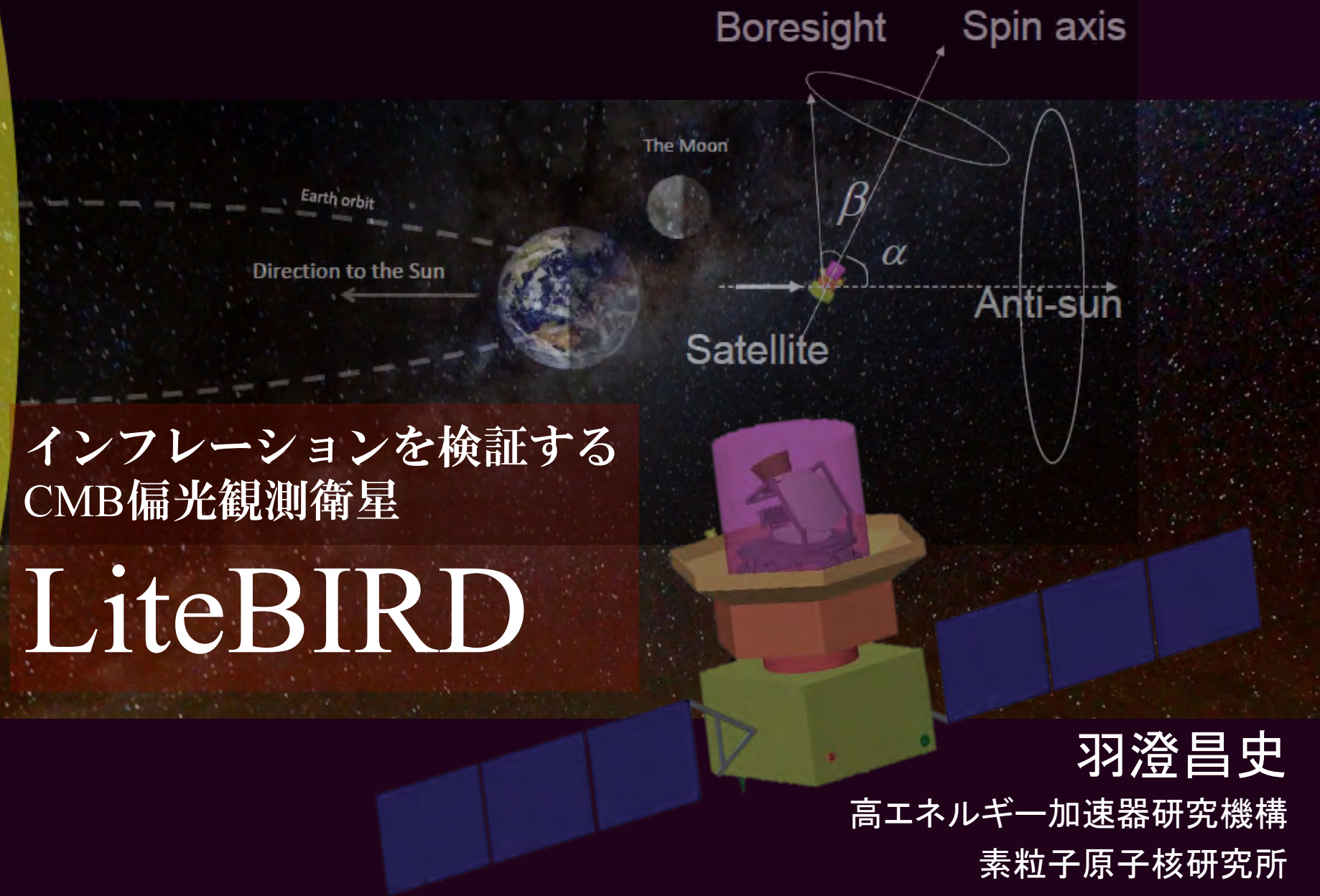


インフレーションを検証する
CMB偏光観測衛星

LiteBIRD



羽澄昌史

高エネルギー加速器研究機構

素粒子原子核研究所

CMB実験グループ

LiteBIRDワーキンググループ

❖ 68名のメンバー

❖ 国際的かつ学際的

KEK

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 (PI)
長谷川 雅也
服部 香里
堀 泰人
松村 知岳
森井 秀樹
山口 博史
吉田 光宏

総研大

秋葉 祥希
石塚 光
井上 優貴
渡辺 広記

大阪大

高倉 理

JAXA

河野 功
坂井 真一郎
佐藤 洋一
篠崎 慶亮
杉田 寛之
竹井 洋
西堀 俊幸
野田 篤司
福家 英之
松原 英雄
満田 和久
山崎 典子
吉田 哲也
四元 和彦
和田 武彦

岡山大

石野 宏和
樹林 敦子
岐部 佳朗

核融合研

高田 卓

UC Berkeley

William Holzapfel
Adrian Lee (US PI)
Paul Richards
Aritoki Suzuki

McGill U.

Matt Dobbs

LBNL

Julian Borrill

筑波大

永井 誠

Kavli IPMU

片山 伸彦
西野 玄記

横浜国大

中村 正吾
夏目 浩太
水上 邦義

大阪府大

小川 英夫
木村 公洋
高津 湊

MPA

小松 英一郎

東北大

石徹白 晃治
服部 誠
森嶋 隆裕

甲南大

大田 泉

埼玉大

成瀬 雅人

国立天文台

鵜澤 佳徳
唐津 謙一
関本 裕太郎
野口 卓

理研

大谷 知行
古賀 健祐
美馬 覚

X線天文学
(JAXA)

赤外線天文学
(JAXA)

JAXA工学、技術者、SE室、
Mission Design Support Group

CMB実験 (Berkeley,
KEK, McGill, Eiichiro)

超伝導検出器開発
(Berkeley, 岡山, KEK,
国立天文台, 理研 etc.)

2013年11月21日現在

LiteBIRDワーキンググループによるポスター発表

- ① P2-66 LiteBIRDのサイエンスと衛星概要 石野宏和
- ② P2-67 広域周波数帯ミリ波背景放射偏光観測に向けたSinuousアンテナ結合型TESボロメータ検出器の開発 鈴木有春
- ③ P2-68 LiteBIRD衛星に搭載するアンテナ光学系の設計検討 高津 湊
- ④ P2-69 LiteBIRDのためのミリ波偏光変調器開発 松村知岳
- ⑤ P2-70 CMB偏光観測用衛星計画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
- ⑥ P2-71 宇宙マイクロ波背景放射偏光観測用検出器MKIDにおける周波数領域での信号多重化を用いた読み出し系の開発 岐部佳朗
- ⑦ P2-72 LiteBIRD搭載に向けた軽量化ADRシステムの検討 高田卓
- ⑧ P2-73 LiteBIRDに向けた宇宙前景輻射除去法の検討 夏目浩太
- ⑨ P2-74 CMB偏光観測衛星LiteBIRDの系統誤差研究 樹林敦子・永田竜
- ⑩ P2-75 LiteBIRDに向けたデータプロセッシングの検討 水上邦義

いつみるか？ 今でしょ！

おもてなし担当

Inspired by 橋本さん

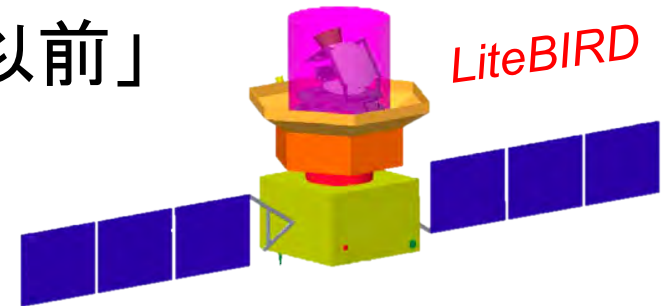
LiteBIRDが人類にもたらす センス・オブ・ワンダー

人類にとって根源的な問い

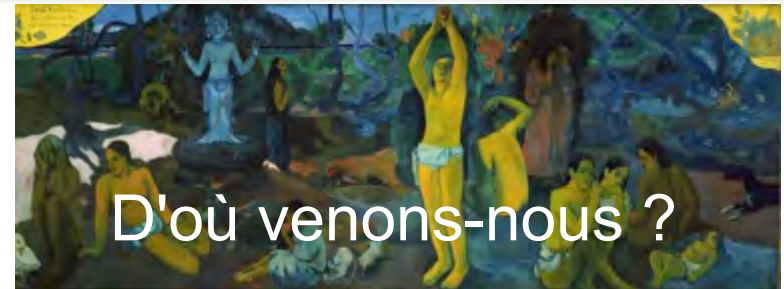
- 宇宙誕生の瞬間とは？
- 宇宙・時空を創るルールブック(究極理論)とは？

LiteBIRD衛星は、「熱いビッグバン以前」
を探索できる唯一・特別な装置

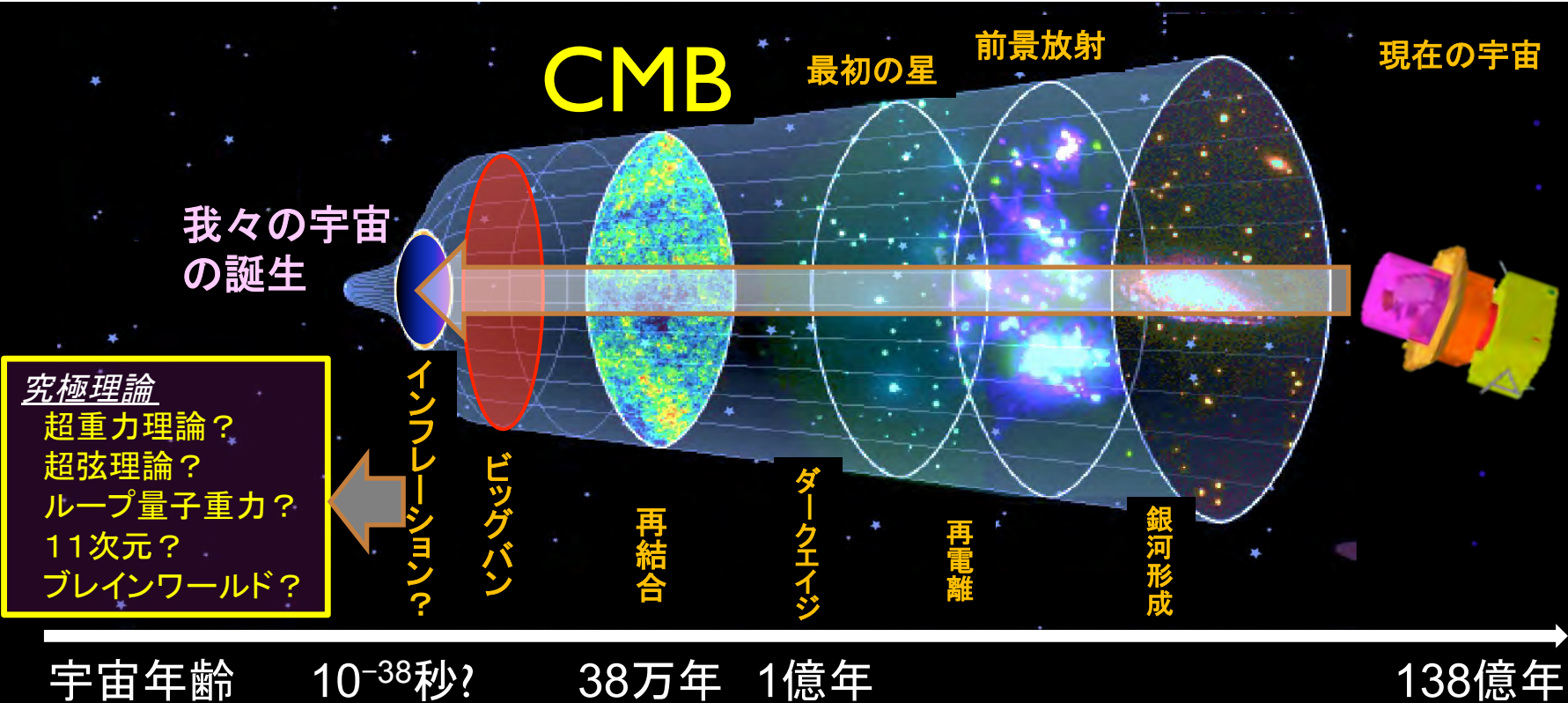
- Planck衛星の100倍の感度
- 地上実験の限界よりも桁違いの感度
- 将来の重力波干渉計衛星(DECIGO等)よりも桁違いの感度



- 科学のグランドチャレンジ
- 科学を超えたセンス・オブ・ワンダー



熱いビッグバン以前の宇宙は、謎の世界



インフレーション宇宙仮説とは

- 熱いビッグバン以前の宇宙に関する最も有力な仮説。
ビッグバン以前に宇宙は急激な加速膨張（一瞬でアメーバのサイズが銀河に！）を起こしたとする。
- 佐藤勝彦（現・自然科学研究機構長）等が1980年代初頭に提案。究極理論研究の進展、CMB観測の進展とともに、宇宙論の中心仮説となるに至った
- 最も重要な予言「原始重力波の生成」が未確認 → LiteBIRDは原始重力波を検出できる

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) とは

宇宙最古の光、ビッグバンの証拠、二度のノーベル賞、観測宇宙論の最強ツール

栄光の歴史

1978: ノーベル物理学賞 (ペンジャース、ウィルソン) 「CMBの発見」



1981: 佐藤等によるインフレーション宇宙論提唱

2003: WMAP衛星による観測結果 「宇宙は暗黒物質、暗黒エネルギーに支配されている」

2006: ノーベル物理学賞 (マザー、スムート) 「CMBの揺らぎの発見」



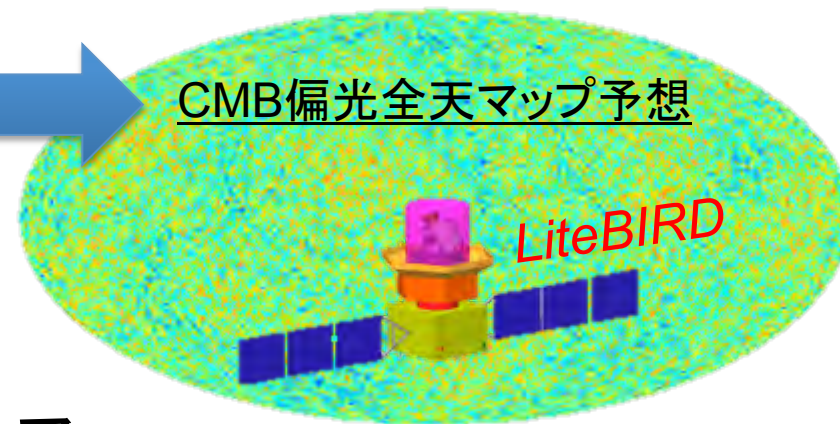
2013: Planck衛星による観測結果 「宇宙年齢は138億年」

CMBの三要素(強度、周波数、偏光度)のうち、偏光度だけがまだ精密に測定されていない

インフレーション宇宙理論が正しければ
原始重力波の痕跡がCMB偏光マップ
に、「指紋のように」刻印されるはず
＝インフレーションの直接の証拠

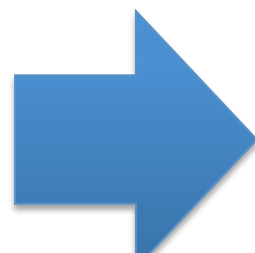
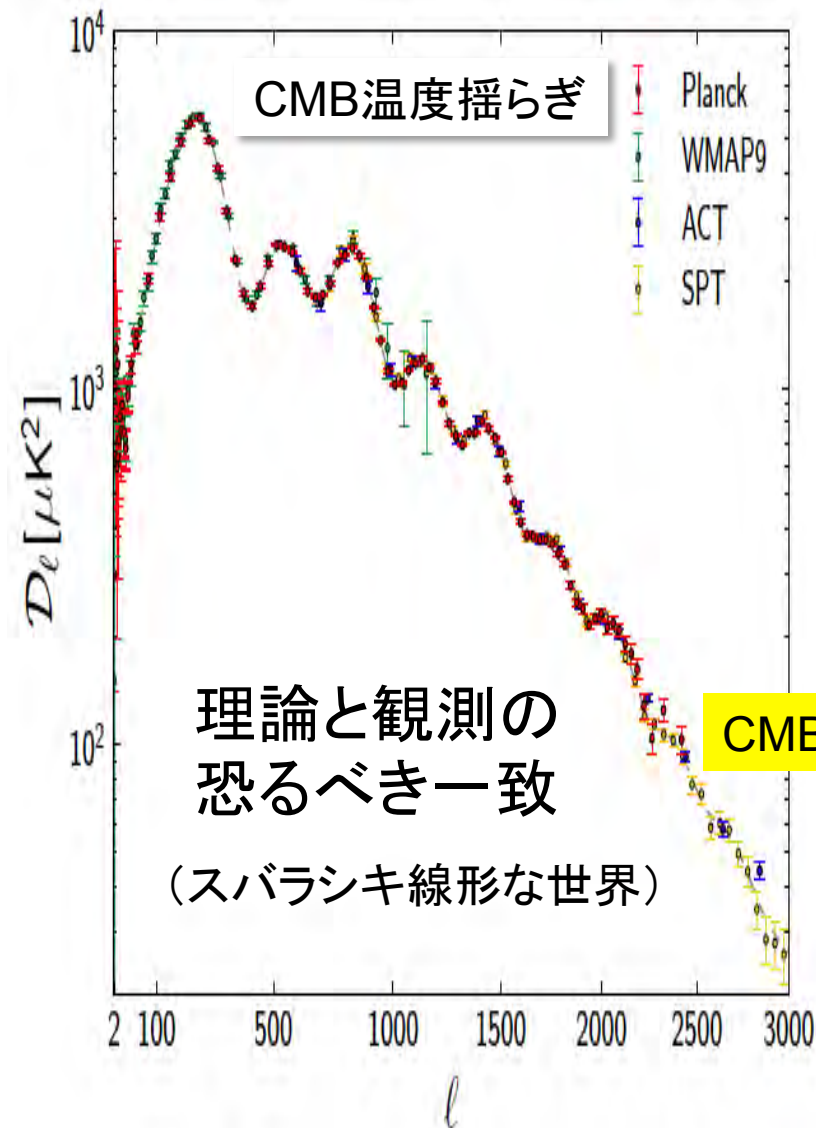
世界的なコンセンサス

「CMB偏光観測がこれからのフロンティア」

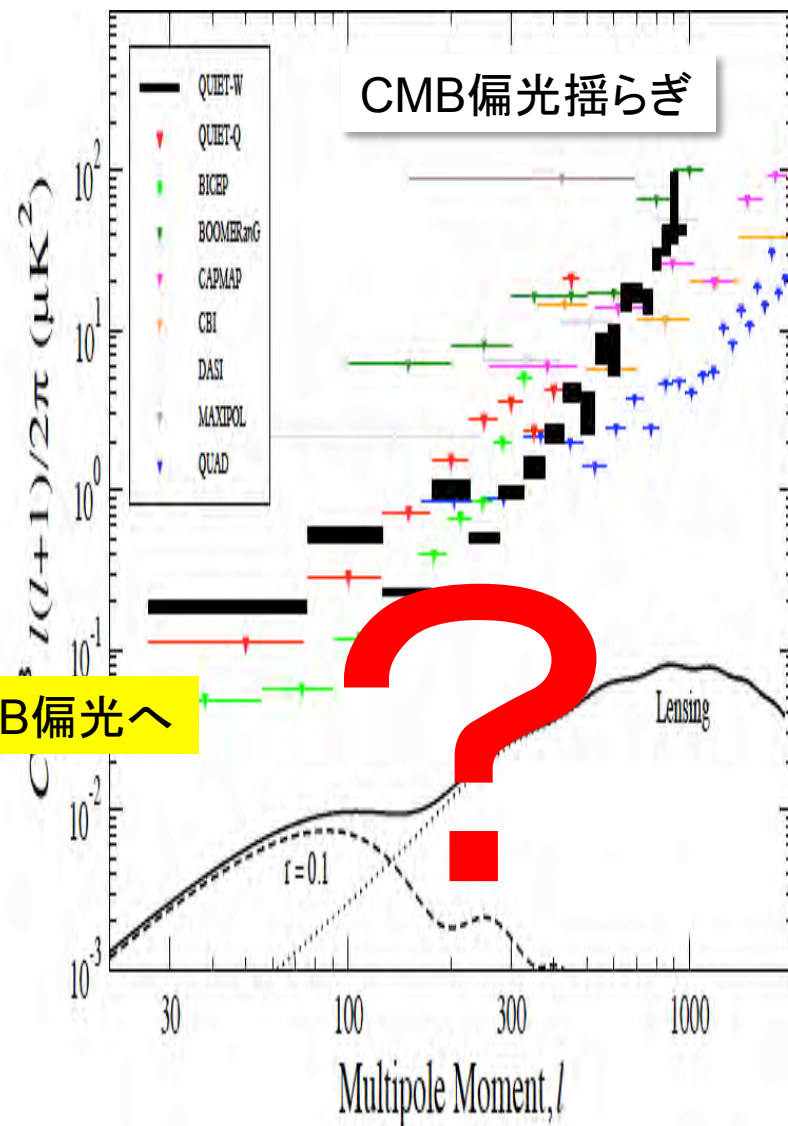


CMB偏光全天マップ予想

偏光Bモードマップ ($r=0.01$)



CMB温度からCMB偏光へ



CMB観測により、宇宙のはじまりを司る法則は、高い精度で検証できる！

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



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 (ただしLEOと比較検討中)
- 重量: 約1t
- 電力: 約2kW

技術的成立性検討

ミッション定義審査に向けた準備

- JAXAミッションデザイン支援グループ、ISASプログラムSE室の支援
- 科学目的の明確化とミッション要求・システム要求へのフローダウン
- 衛星機メーカーとのシステム検討、個別技術検討

2013年の進展

大きな進展により、最適解へ向けた理解が進んだ

- メーカーとLEOの技術的成立性検討(～2013年3月)
 - 高度～500kmでの成立解提示
 - サイジング・熱設計・軌道・姿勢・データ伝送・バス系構成等
 - 重量・電力はイプシロンの現性能範囲を超える
 - 現イプシロンの制約条件をはずして最適解を検討中
 - 軽量化の可能性は引き続き検討
 - ASTRO-Hタイプと異なる新しい冷凍機系
 - 工学的挑戦も(例: 画期的に軽い太陽電池パネル)
- メーカーとL2の技術的成立性検討(進行中)
 - L2では月の影響を避けられる

system block diagram



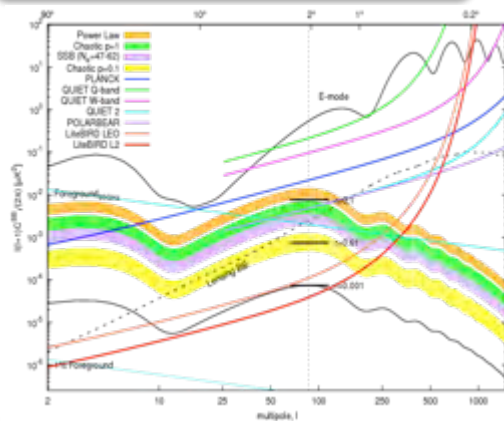
ミッション部検討

2013年に大きく進展。ミッション定義審査までに
系統誤差に関するEnd-to-end simulationを行う予定

統計誤差

NET~
 $2 \times 10^{-18} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$
素子数~2000

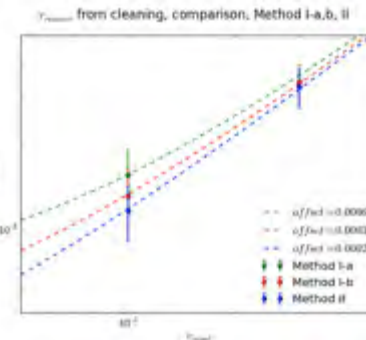
CMB偏光Bモード
パワースペクトル



前景放射

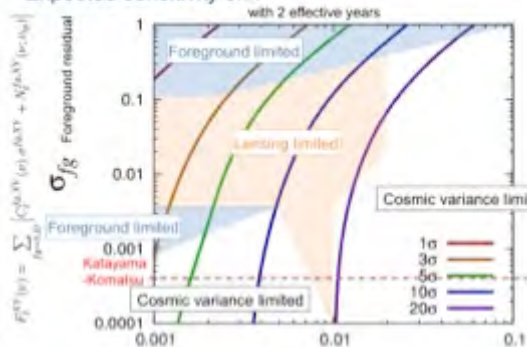
$\delta r \sim 0.4 \times 10^{-3}$

→ ポスター
(P2-73)



$\delta r < 0.001$

Expected sensitivity on r



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

重力レンズ

各要素についての要求値の明確化

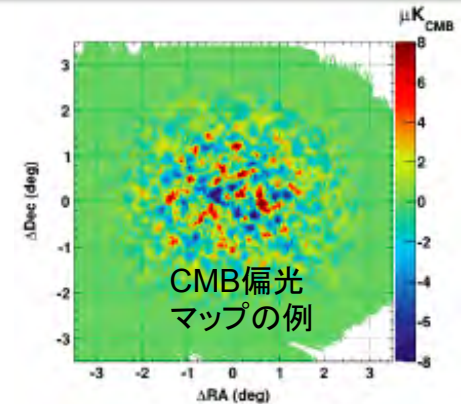
Effects	Types	Requirement in bias case	Requirement in random case	Notes
Diff. gain calibration	False polarization	0.01 %	0.3 %	
Diff. beam width		0.7 %	2 %	
Diff. beam pointing		3.5 arcsec.	16 arcsec.	
Diff. beam ellipticity		7 % @ ell=2 0.94 % @ ell=300	2.7 %	
Pointing knowledge	Pattern modulation	6 arcmin.	25 arcmin.	20deg. x 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:
< 0.57×10^{-3} 以下

系統誤差

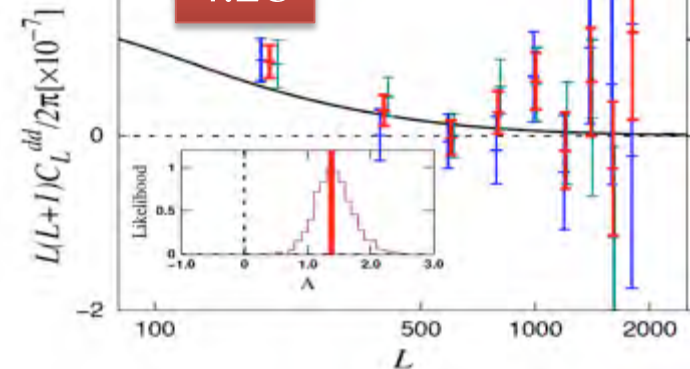
地上実証実験

- POLARBEARの初期観測成果発表！(2013年12月24日)
 - Herschelとの相関 (<http://arxiv.org/abs/1312.6645>)
 - 世界で初めてCMB偏光のみを用いて重力レンズ効果観測 (<http://arxiv.org/abs/1312.6646>)
 - O(1000)素子のTESボロメータの長期運用に成功！
 - 精密測定実証(統計誤差・系統誤差・前景放射)
 - 若手育成にも大きく貢献
- 超伝導検出器アレイ開発の着実な進展→ ポスター

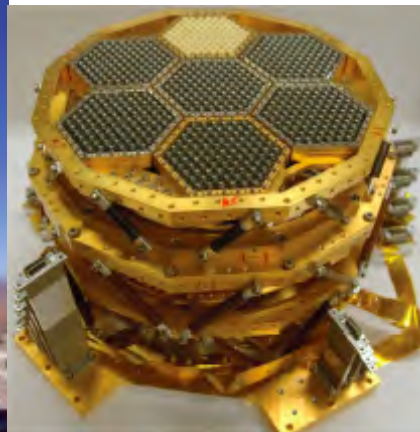


重力レンズ
の信号

4.2σ



超伝導検出器アレイ



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

- 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
- 学術会議物理学委員会、天文学・宇宙物理学分科会による推薦
→ 学術会議マスタープランへ提案
- 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

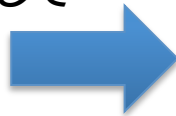
2014年の予定

- 3月下旬: メーカーとのL2の技術的成立性検討結果
- 4月(頃): 学術会議マスタープラン発表
- 5月(頃): LiteBIRD White Paper(英語)投稿
 - Progress of Theoretical and Experimental Physics (PTEP)のInvited Paper
- 8月(頃): ミッション定義審査文書完成

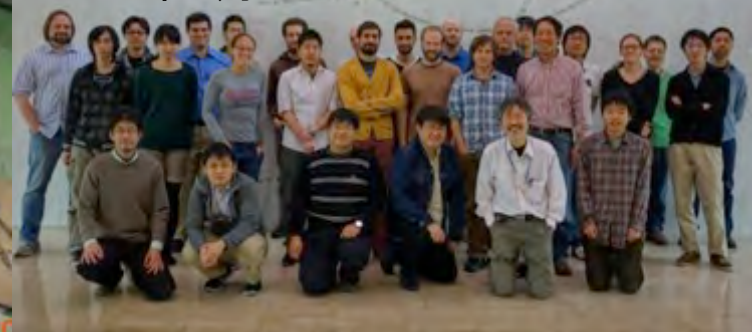
上記と並行して、
地上実証実験を推進

- POLARBEAR(TES)
- GroundBIRD(MKID)

KEKが主導して開発しているPOLARBEAR-2
受信機システム



POLARBEAR
全体ミーティング@KEK
2013年3月



地上からスペースへ至る LiteBIRDロードマップ

LiteBIRD



$r=0.001$

$r=0.01$

$r=0.1$

$r=1$

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

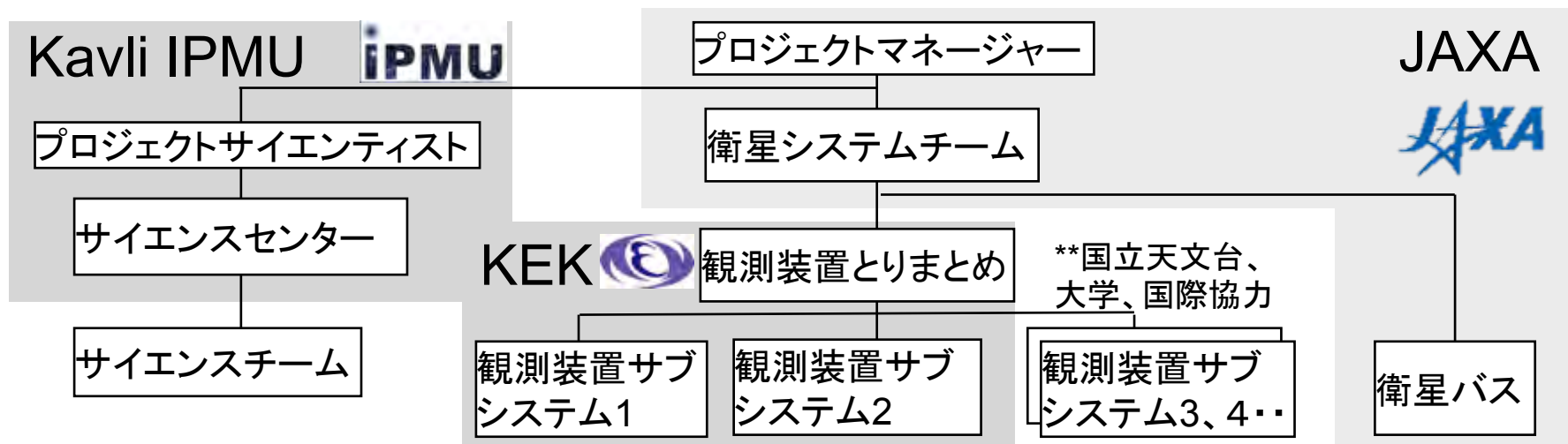
2015

2020

実行組織図

以下はワーキンググループが提案する
実行組織の「モデル」(決定事項ではないことに注意)

- 実行にあたり、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になると思われる
 - プロマネ、衛星システムチームはJAXAに設置
- 例えば、一定の人事交流を行った上で、下記のような体制を構築
 - 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
 - 観測装置のインテグレーションの一部は、CMB観測のノウハウを持つKEKとJAXA宇宙科学研究所でMoUを締結し、KEKにて実施する
 - KEKがとりまとめ、国立天文台、国内大学、国外機関が観測装置に貢献



国際情勢

- 米国:PIXIE(地球周回)
 - 2015年頃提案の可能性あり
- ヨーロッパ:PRISM(ラグランジュ点L2)
 - 2013年:L class missionへ提案し、最終的には不採択
 - 2014年:M classに転換して再提案の予定
- 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
 - 競合しつつ協力する関係を構築中

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