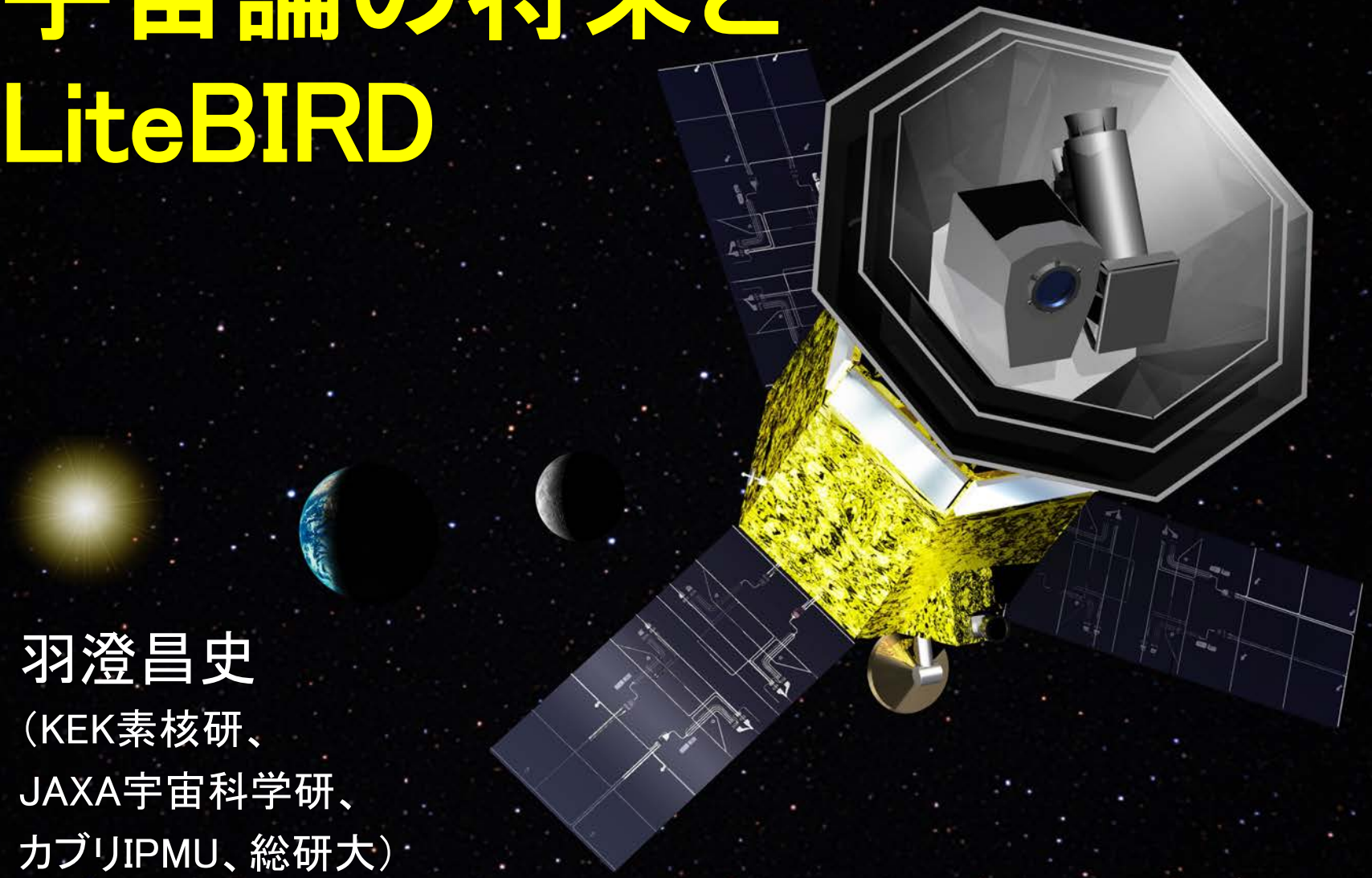
宇宙論の将来と LiteBIRD



羽澄昌史
（KEK素核研、
JAXA宇宙科学研、
カブリIPMU、総研大）

宇宙論の将来について

- 現代宇宙論とCMB温度揺らぎが果たした役割についてはここまでのトークを参照してください

- 5つの謎（素粒子物理的視点）
  - インフレーション加速膨張の有無と背後の物理
  - バリオンだけの宇宙がいかにして出来たか
  - ダークマターとは何か
  - ダークエネルギーとは何か
  - ニュートリノの本性と宇宙進化での役割

宇宙の誕生と進化を解明することが、背後の新しい物理の解明に！

Extensions to 6-parameter ΛCDM

- No evidence for need to introduce an additional parameter
- May change w/ more precise measurements in the future
- Following are in particular interesting
  - Tensor-to-scalar ratio (from inflation): r
  - Dark energy equation of state parameters: w_0, w_a

実験・観測屋としては、もちろん、
「良い装置・良い観測で予想外の発見」
が真の動機

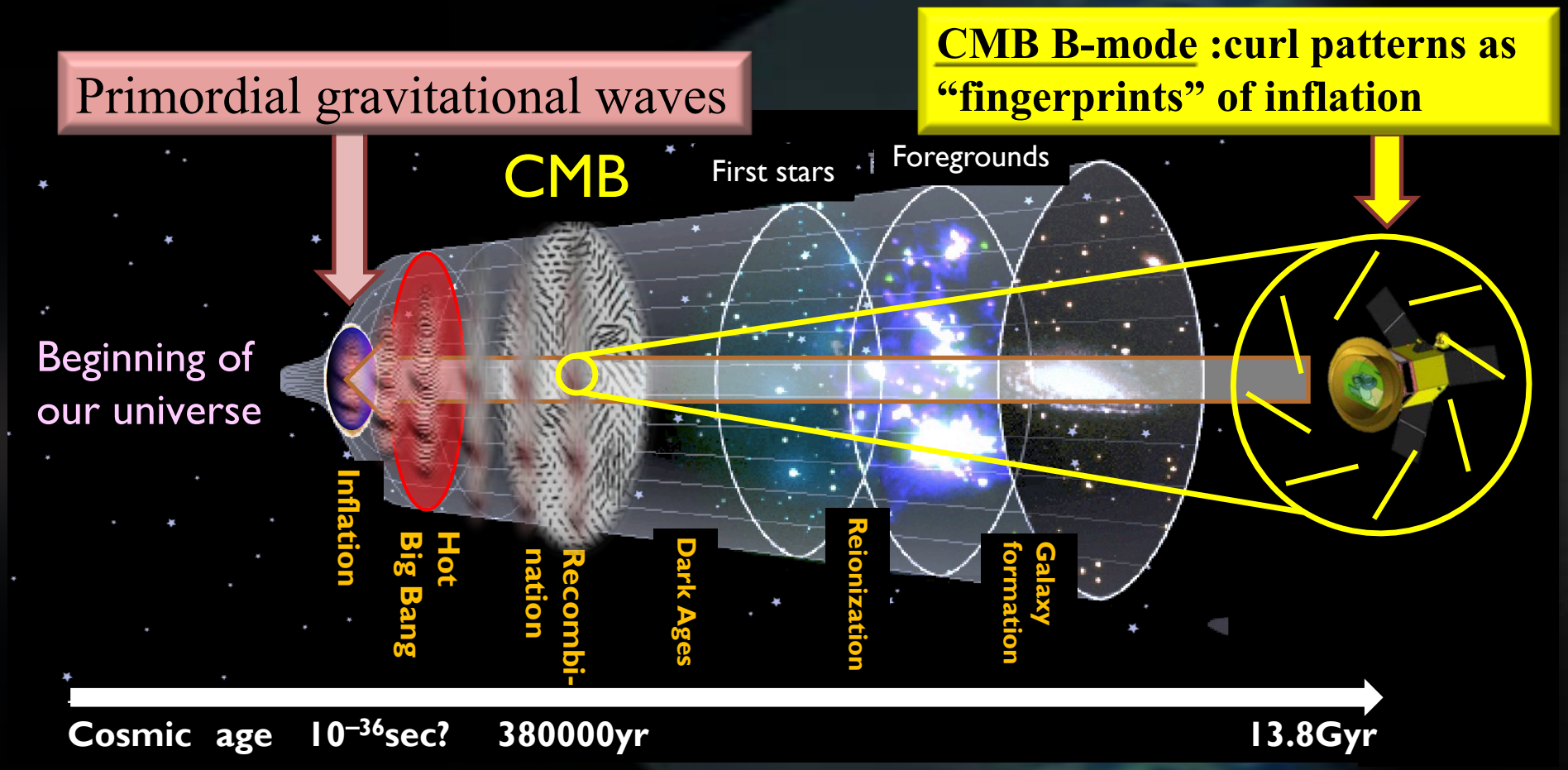
Physics of Cosmic Inflation

- Inflation: primordial accelerating expansion
  - successfully solve problems of naïve big-bang model
- Underlying physics is unknown
  - Leading hypothesis: new scalar field ϕ "Inflaton" with potential $V(\phi)$ → source of acceleration!
- In case of single-field slow-roll inflation (simplicity as guideline)

$$V^{1/4} = 1.04 \times 10^{16} \times \left(\frac{r}{0.01}\right)^{1/4} [GeV]$$

- r (tensor-to-scalar ratio) is a key parameter

CMB B-mode as signal of inflation



CMB B-mode is the best probe for primordial gravitational waves.
"Direct detection" of primordial GW w/ CMB as an experimental apparatus !

How I got excited about CMB B-mode

- a particle physicist's experience in 2005-2007

1. Quantum fluctuation of the metric

$$\langle \hat{\bar{h}}^{\dagger}(\vec{k},\eta)\hat{\bar{h}}(\vec{k}',\eta)\rangle = |v(\vec{k},\eta)|^2(2\pi)^3\delta^3(\vec{k}-\vec{k}').$$

e.g. Dodelson "Modern Cosmology" Eq.(6.52)

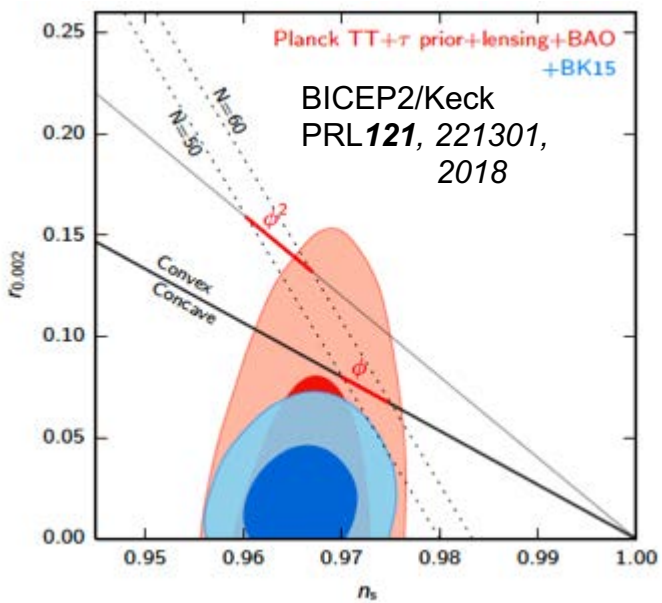
2. Physics at GUT scale

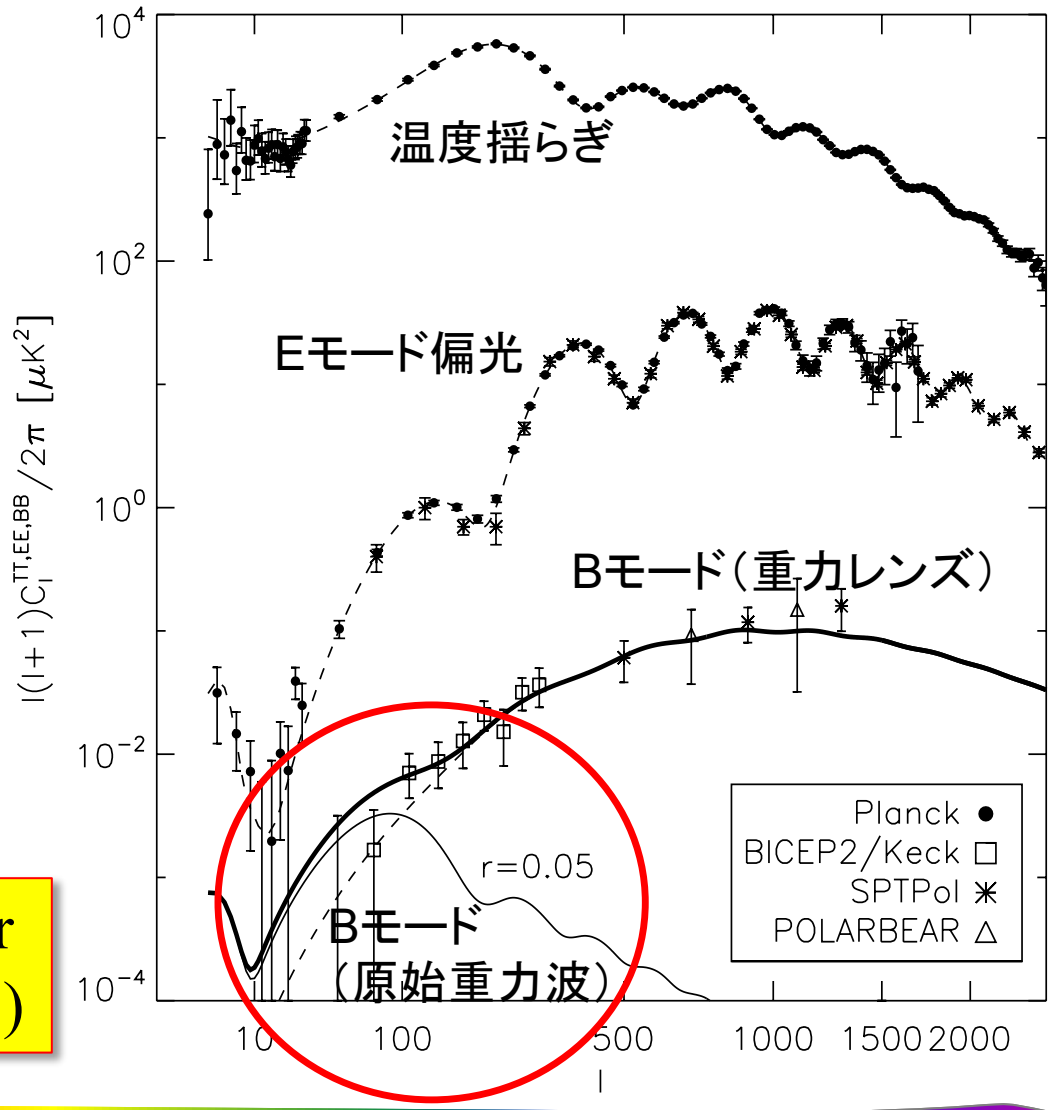
$$V^{1/4} = 1.06 \times 10^{16} \times \left(\frac{r}{0.01}\right)^{1/4} [\mathrm{GeV}]$$

3. Amazing technology matching w/ HEP

CMBパワースペクトル

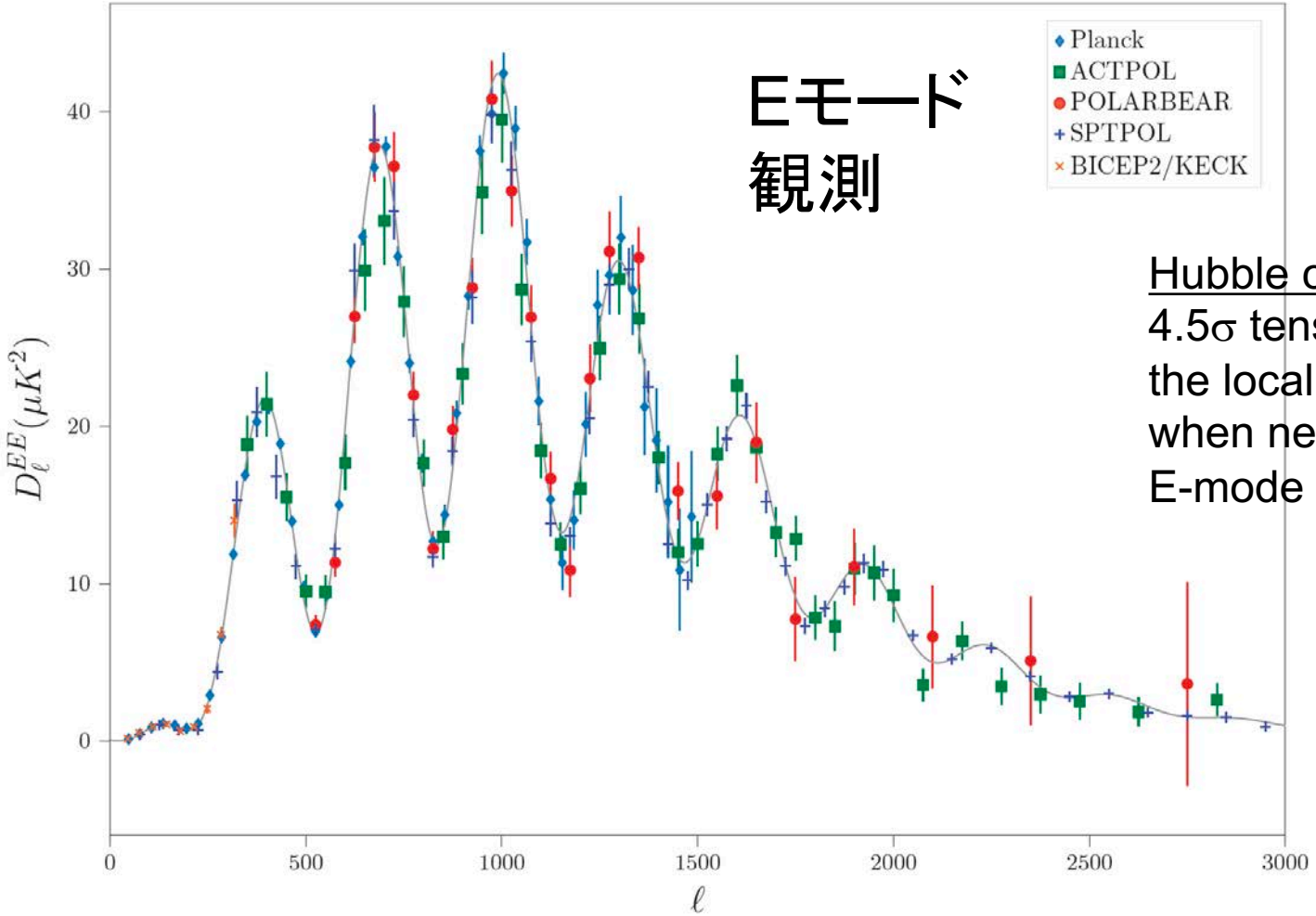
原始重力波による
Bモード($C_l^{BB}{}_{pgw}$)
は未発見





$C_l^{BB}{}_{pgw}$ ∝ テンソル・スカラー比, r
現在の制限: r < 0.06 (95% C.L.)

ちょっと寄り道

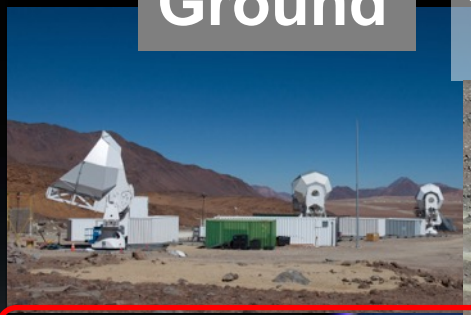


POLARBEAR collab.
arXiv:2005.06168

<u>Hubble constant</u>
4.5σ tension with
the local determination
when new POLARBEAR
E-mode results included

On-going & future multi-frequency B-mode projects

Ground



ACTPol
→ Advanced ACTPol

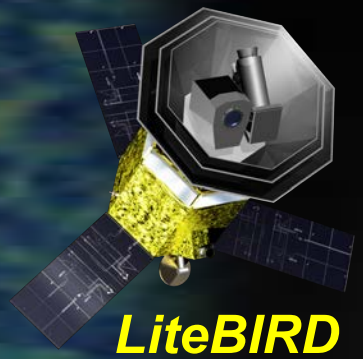
POLARBEAR → Simons Array

In addition, ABS, CLASS

Atacama, Chile

Simons Observatory

Space



LiteBIRD

SPTPol
→ SPT3G

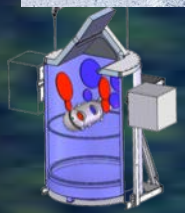
South Pole

CMB-S4

Balloon

SPIDER

EBEX
→ IDS



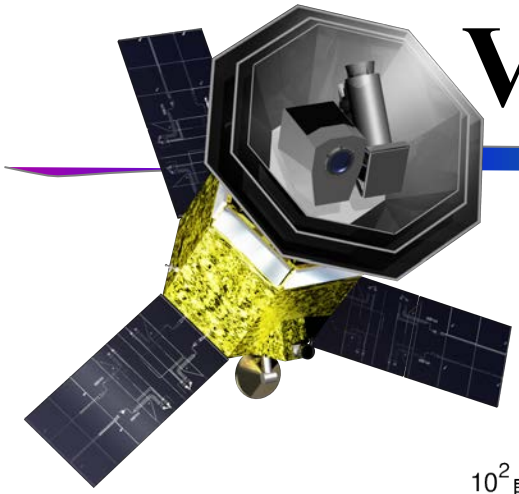
PIPER

LSPE

In addition,
AliCPT in Tibet,
QUIJOTE in Canary island,
GroundBIRD in Canary island,
QUBIC in Alto Chorillo (Argentina)

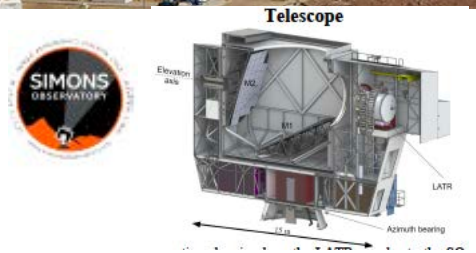
日本の機関の貢献

Vision for next 15 years



X

Powerful Duo



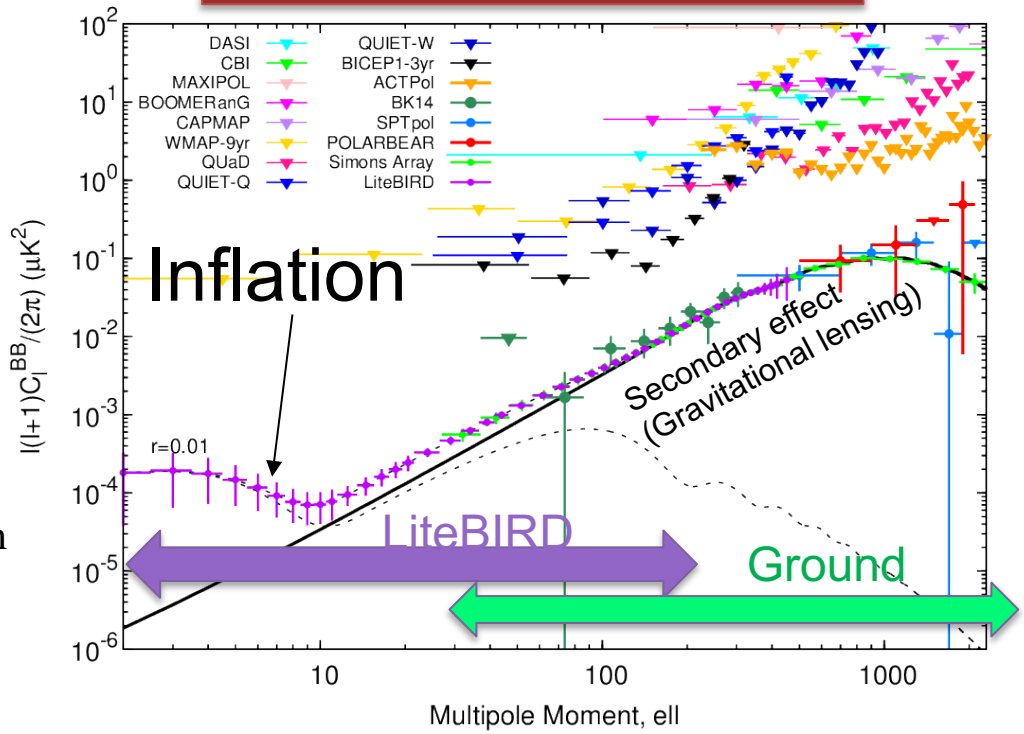
LiteBIRD

JAXA-led focused mission

$\sigma(r)<0.001$

$2 \leq \ell \leq 200$

focused but still with many byproducts



Ground

US-led telescopes on ground

$30 \leq \ell \leq \sim 8000$

e.g. Simons Observatory and CMB-S4

- This powerful duo is the best cost-effective way with great synergy
- MoU between LiteBIRD and CMB-S4 for science and technology under discussion

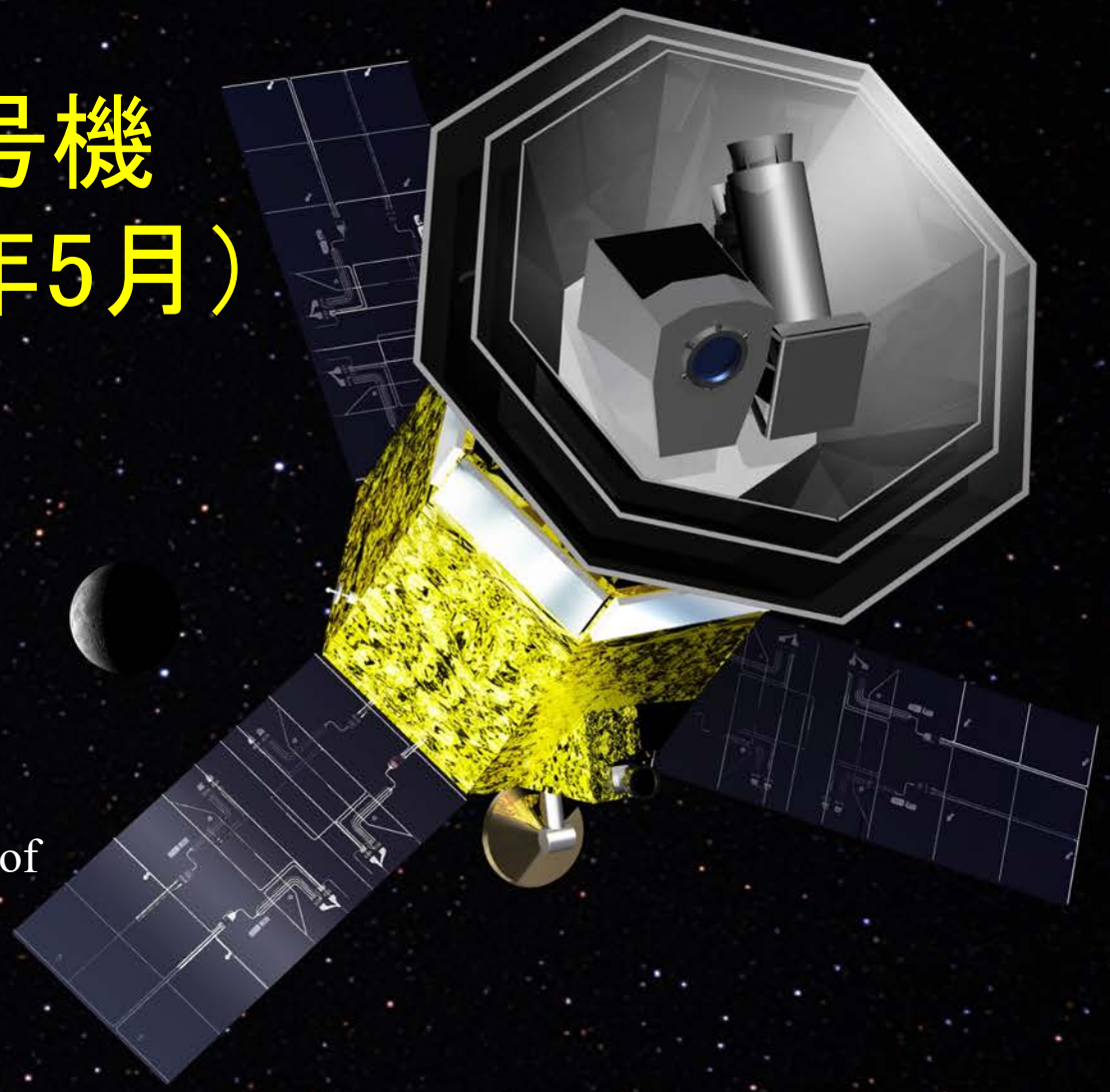
Why Measure from Space?

- Superb environment !
  - No statistical/systematic uncertainty due to atmosphere (cf. polarization due to icy clouds in POLARBEAR obs., S. Takakura et al. 2018)
  - No limitation on the choice of observing bands (except CO lines); important for foreground separation
  - No ground pickup

Rule of thumb: 1,000 detectors in space ~ 100,000 detectors on ground

- Only way to access lowest multipoles w/ $\delta r \sim O(0.001)$
  - Both B-mode bumps need to be observed for the firm confirmation of Cosmic Inflation → We need measurements from space.
- Complementarity with ground-based CMB projects
  - Foreground information from space will help foreground cleaning for ground CMB data
  - High multipole information from ground will help "delense" space CMB data

LiteBIRD:
戦略的中型2号機に選出（2019年5月）



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

JAXA戦略的中型宇宙科学ミッション

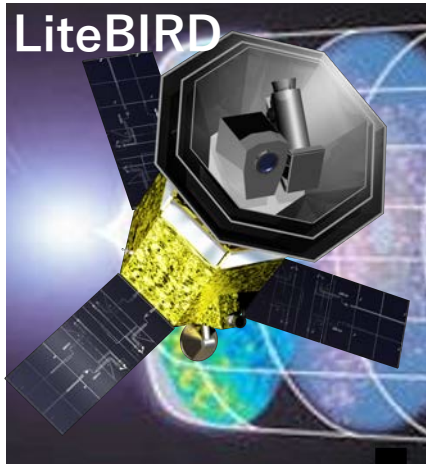
To be planned

目標とする打上時期

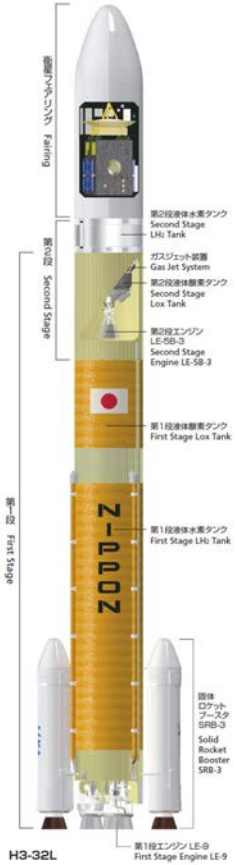
年度	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32

XRISM

戦略的中型
１号機
Martian
Moons
eXploration
(MMX)



戦略的中型
２号機
LiteBIRD 選定
(2019年５月)



CMBの松明がPlanckからLiteBIRDへ

LiteBIRD
キックオフ
シンポジウム
July 1-2, 2019
ISAS/JAXA

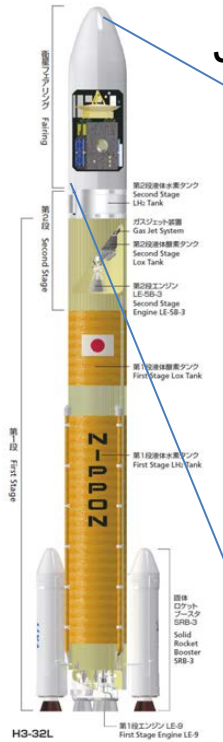
Prof. Jean-Loup Puget
(Planck HFI PI)

LiteBIRD概要

装置について
9月14日企画講演（松村知岳）
および一般講演

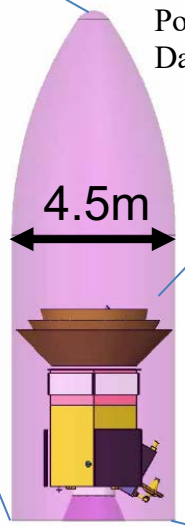
- H3ロケットにより打上げ、太陽・地球ラグランジュ点L2近傍の軌道で3年間の観測
- ミリ波(34−448 GHz, 15 バンド)を角度分解能70−20分角で観測
- ミッション：宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の偏光度を全天に渡り精査し、代表的インフレーション宇宙理論を徹底検証
- これまでの観測と比べ、およそ100倍の感度を達成できる

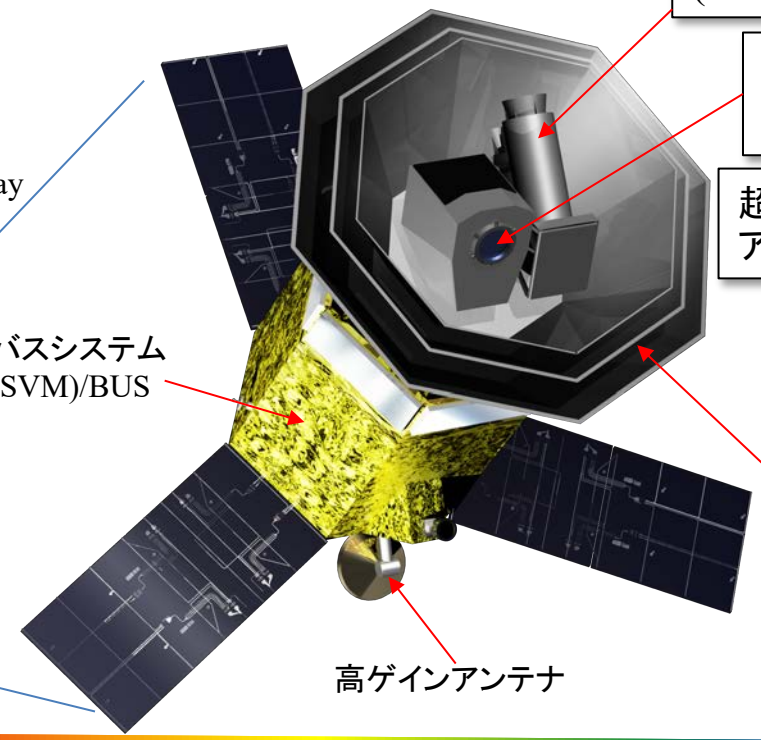
- 2020学術会議マスタープラン重点大型計画
- 2020文科省ロードマップ（案）掲載計画



JAXA H3

Mass: 2.6t
Power: 3.0kW
Data: 10GB/day





中・高周波望遠鏡偏光変調器付
(MHFT) (5K)

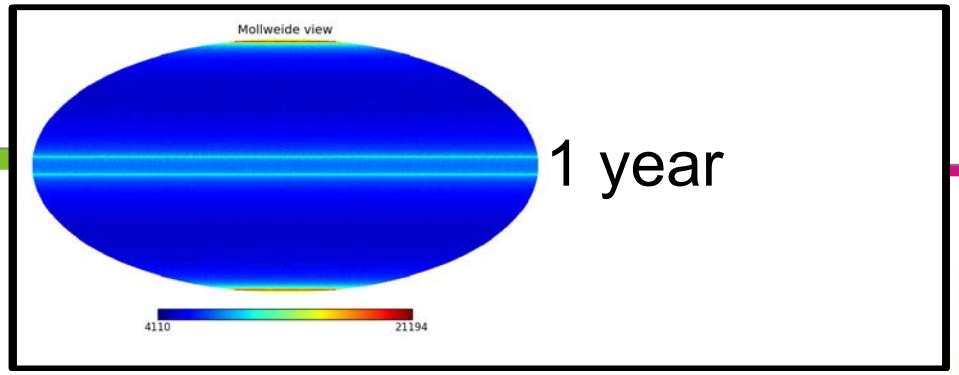
低周波望遠鏡偏光変調器付
(LFT) (5K)

超伝導転移端（TES）焦点面検出器アレイ（ベース温度100mK）

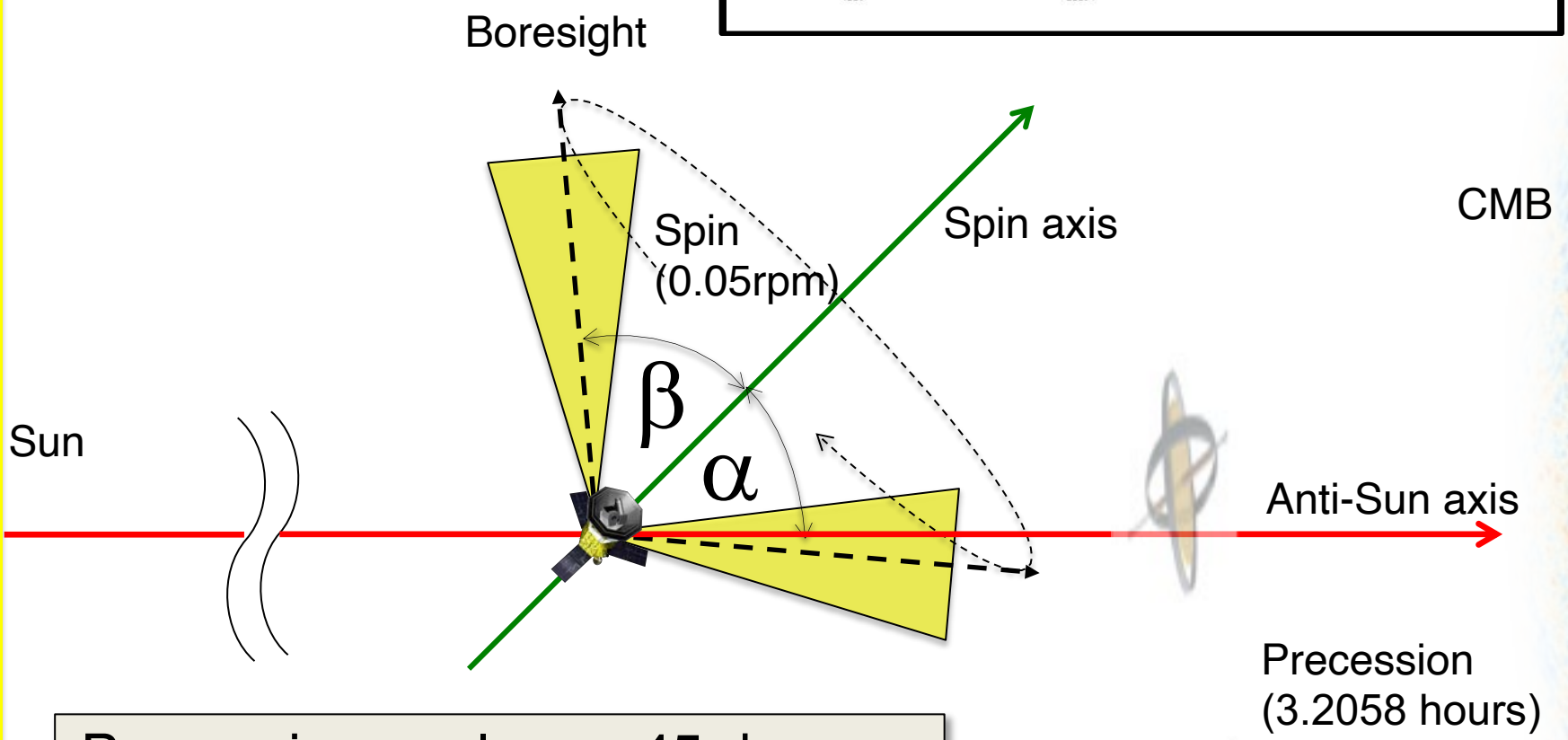
冷凍機チェーン
PT/ST/JT/ADR (not seen)

V-Groovesによる放射冷却
(30K/100K/200K)

L2での運用



L2リサジュー軌道

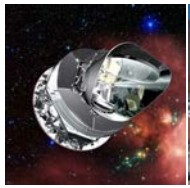


Precession angle α = 45 degrees
Spin angle β = 50 degrees

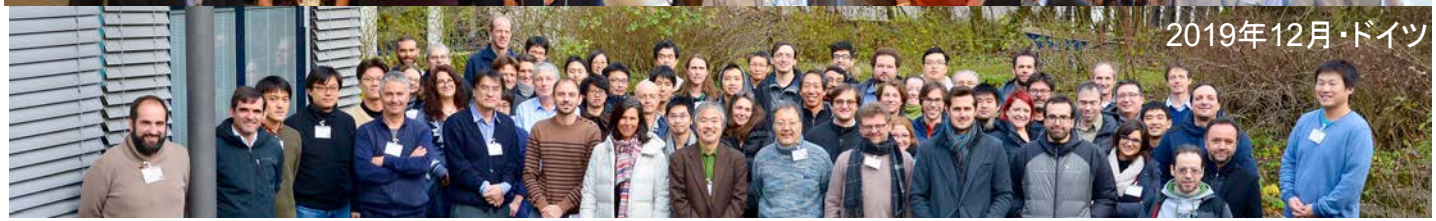
LiteBIRD Joint Study Group

日本、ヨーロッパ、北米から、約250名のメンバー

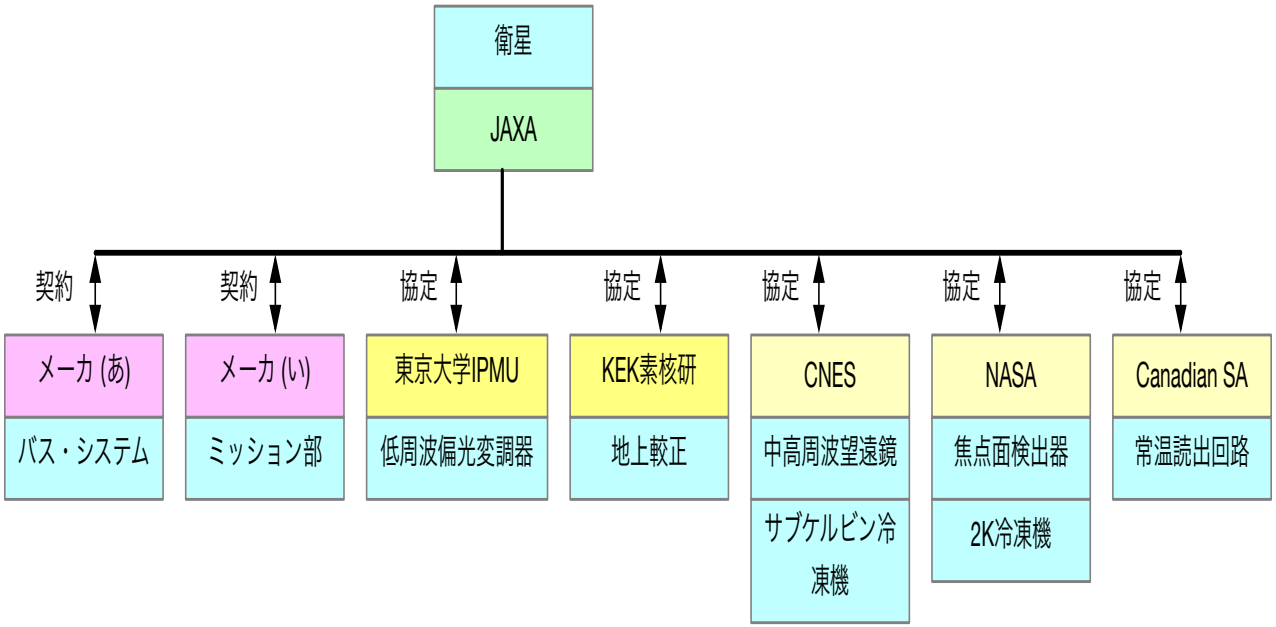
メンバーの経験: CMB実験、X線衛星、他大型プロジェクト（ALMA, 加速器実験など）



2019年に
3回の
全体会議



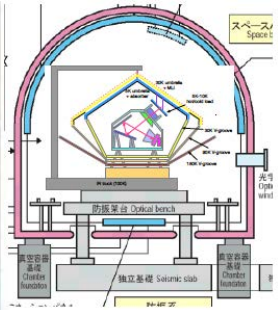
国際分担

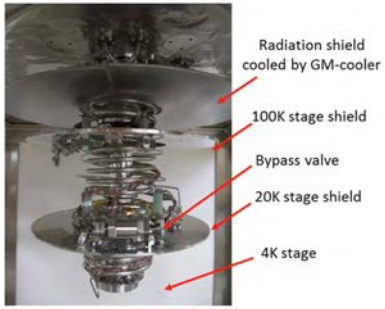


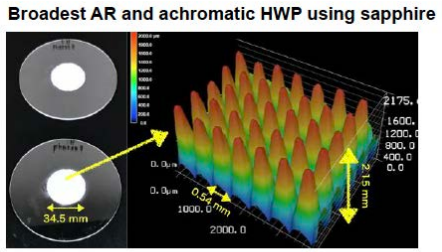
実施機関	役割
JAXA	プロジェクト管理、衛星ミッション部（特に望遠鏡、冷却系）及び衛星バス部の設計・製作・試験，打ち上げ、運用
東京大学・Kavli IPMU	データ解析パイプラインの構築、低周波望遠鏡用偏光変調器の開発
KEK・素粒子原子核研究所	地上観測での技術実証、ミッション部の地上検証、ミッション部開発への参加
岡山大学	系統誤差の推定、観測装置部品の光学性能試験および放射線耐性試験
欧州：フランス国立宇宙研究センター（CNES）、欧州宇宙機関（ESA）、イタリア宇宙機関（ASI）	ミッション部（特に高周波望遠鏡、冷却系）設計・開発・試験への参加
米国：NASA，カルフォルニア大学バークレー校、サンディエゴ校、コロラド大学、米国国立標準技術研究所	焦点面検出器の開発、冷却読み出しエレクトロニクスの開発
カナダ宇宙庁（CSA）、マギル大学	常温読み出しエレクトロニクスの開発

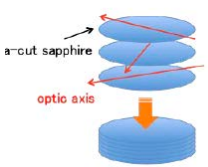
- 米国NASAが技術開発の資金を提供中、フランス、イタリア、スペイン、カナダの宇宙庁が既に初期フェーズに資金・人員をコミットするなど、国際協力の準備が進んでいる
- 海外から200名超の参加者。プランク衛星を現場で主導した中堅研究者が大勢参画しており、強力なグローバル・チームを結成。

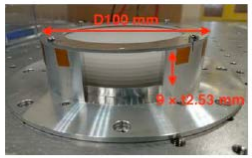
日本チームの開発



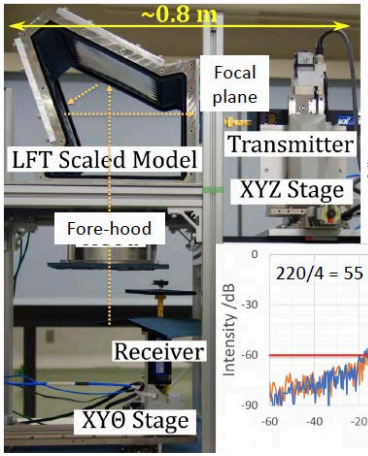


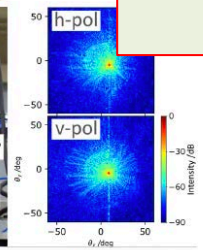


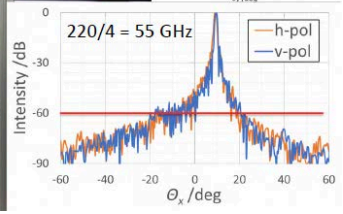




JAXA

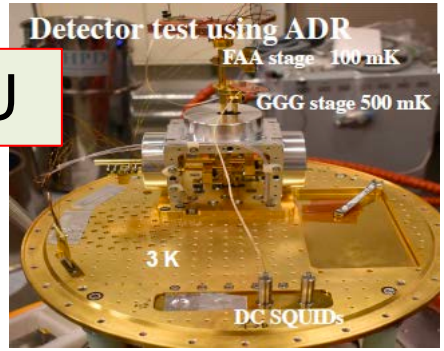




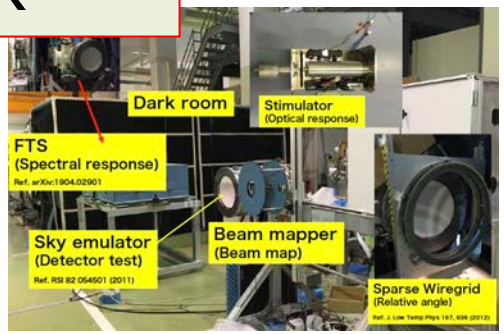


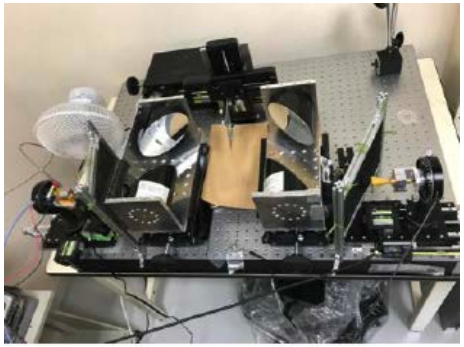
Collaboration of 3 major laboratories

Kavli IPMU



KEK





LiteBIRDは明確なゴールとその達成の確かな見通しを持つ

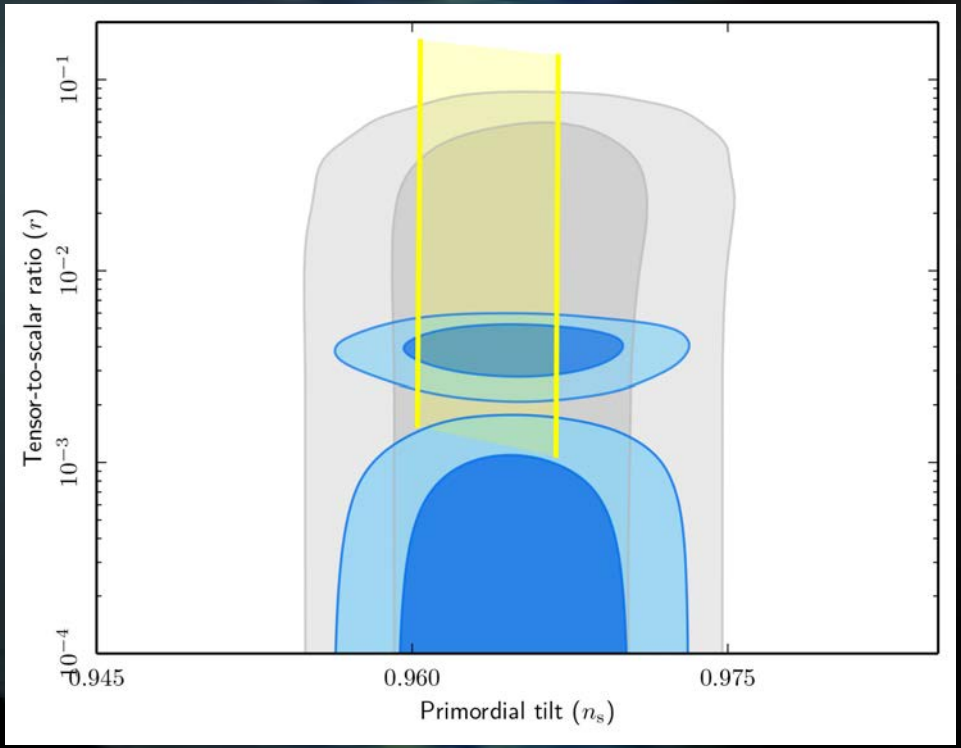
フルサクセス:

- $\delta r < 1 \times 10^{-3}$ (for r=0)
- $r \geq 0.01$の場合は再電離、再結合の信号のそれぞれを5シグマ以上の有意度で検出

精度設定の理論的根拠

- $0.005 < r < 0.05$に大きな発見のチャンス
- 最もシンプルで観測と合う$R+R^2$ モデル（ストラビンスキーモデル）をテストできる
- 一群の有力モデル（単一インフラトン場ポテンシャルがプランクスケールを超える特徴的変動値を持つモデル群）を全て検証できる
  (A. Linde, JCAP 1702 (2017) no.02, 006

- ◆ 詳細な前景放射除去検討により、$\sigma(r=0) = 0.6 \times 10^{-3}$の統計誤差を得た
- ◆ 詳細な系統誤差の検討により、全誤差が$\delta r < 1.0 \times 10^{-3}$ となることを示した



Huge discovery impacts

- Direct evidence for Inflation, and knowledge on how it happened
- First evidence for quantum fluctuation of space-time
- Knowledge on the Inflation energy scale

"Detecting primordial gravitational waves would be one of the most significant scientific discoveries of all time."

Final report of the task force on cosmic microwave background research "Weiss committee report" July 11, 2005, arXiv/0604101

超弦理論への観測による制限

最近の進展の例「スワンプランド仮説」(Obied-大栗-Spodyneiko-Vafa 2018)

超弦理論では許されないパラメータ範囲を考察し、インフレーションモデルを制限

前景放射の除去

方法

シンクロトロン: $[Q_s, U_s](\hat{n}, \nu) = [Q_s, U_s](\hat{n}, \nu_*)\left(\frac{\nu}{\nu_*}\right)^{\beta_s(\hat{n})+C_s(\hat{n})\ln(\nu/\nu_*^C)}$

- 異常マイクロ波放射(AME)も上式で効果的に吸収

ダスト: $[Q_d, U_d](\hat{n}, \nu) = [Q_d, U_d](\hat{n}, \nu_*)\left(\frac{\nu}{\nu_*}\right)^{\beta_d(\hat{n})-2}\frac{B[\nu, T_d(\hat{n})]}{B[\nu_*, T_d(\hat{n})]}$

(空の各領域に8パラメータ) x (12 x $N_{\rm side}^2$)

= 6144 パラメータ w/ $N_{\rm side} = 8$

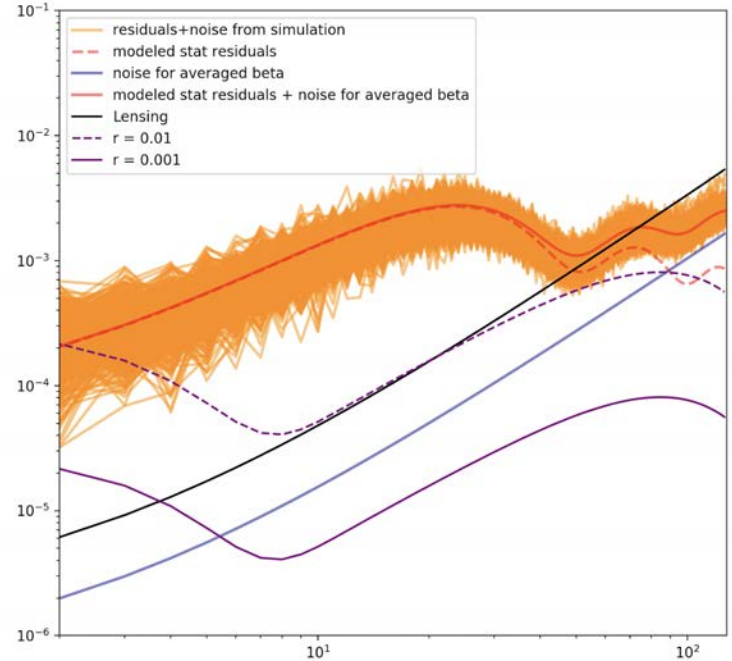
空間分布を考慮

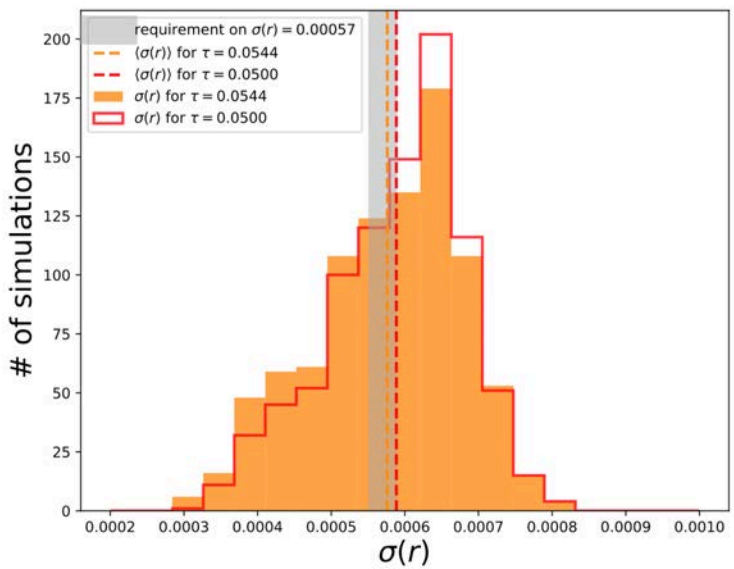
結果

新しい手法:マルチパッチ法(従来の方法を改善)*

- $\sigma(r=0) = 0.0006$
- 無視できるほど小さいバイアス

プランク衛星の手法の改良版でクロスチェック





* Errard and Stompor, Phys.Rev. D99 (2019) no.4, 043529

系統誤差

- **LiteBIRD Joint Study Group**の中で最大の活動
- 系統誤差に対する系統的アプローチ（素粒子物理実験的）

項目リスト
14 カテゴリ
70 項目

→ 各項目に全系統誤差の1%を配分
$\sigma(r)_{sys} < 5.7 \times 10^{-6}$

→ 見積方法の決定（較正方法含む）
estimate of $\sigma(r)_{sys}$

→ 誤差配分見直し
allocate special budget for outstanding items

→ マップ上で誤差を足し上げ
total $\sigma(r)_{sys}$

繰り返し

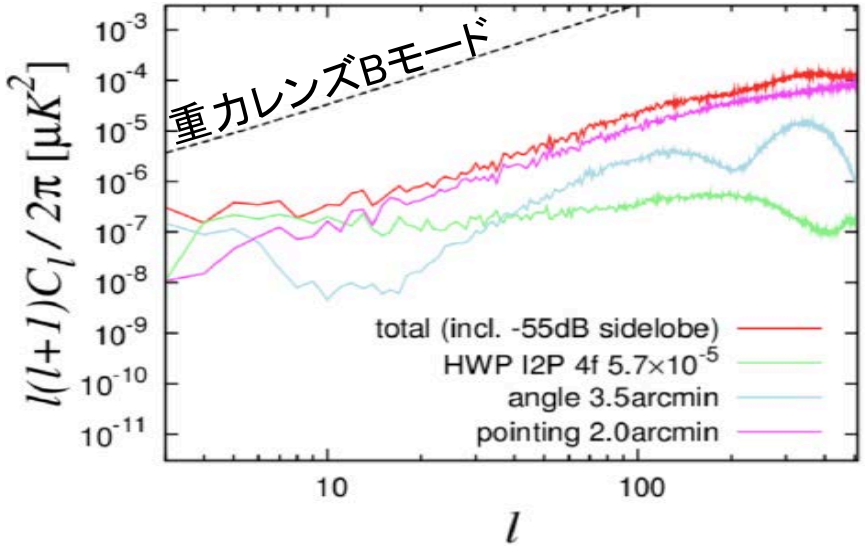
- 例）回転半波長板（HWP）の不完全性によるもの

HWPのモデル
- 周波数依存性
- 入射角依存性

→ RCWAシミュレーションから得たミュラー行列M
$1M_{IQ}$, $M_{IU} \sim 10^{-4}$
(worst case)

→ マップ上の誤差と誤差Bモードパワースペクトルの評
$\sigma(r)_{sys}$

世界のCMBコミュニティが知っている系統誤差項目は網羅し、制御下にある。

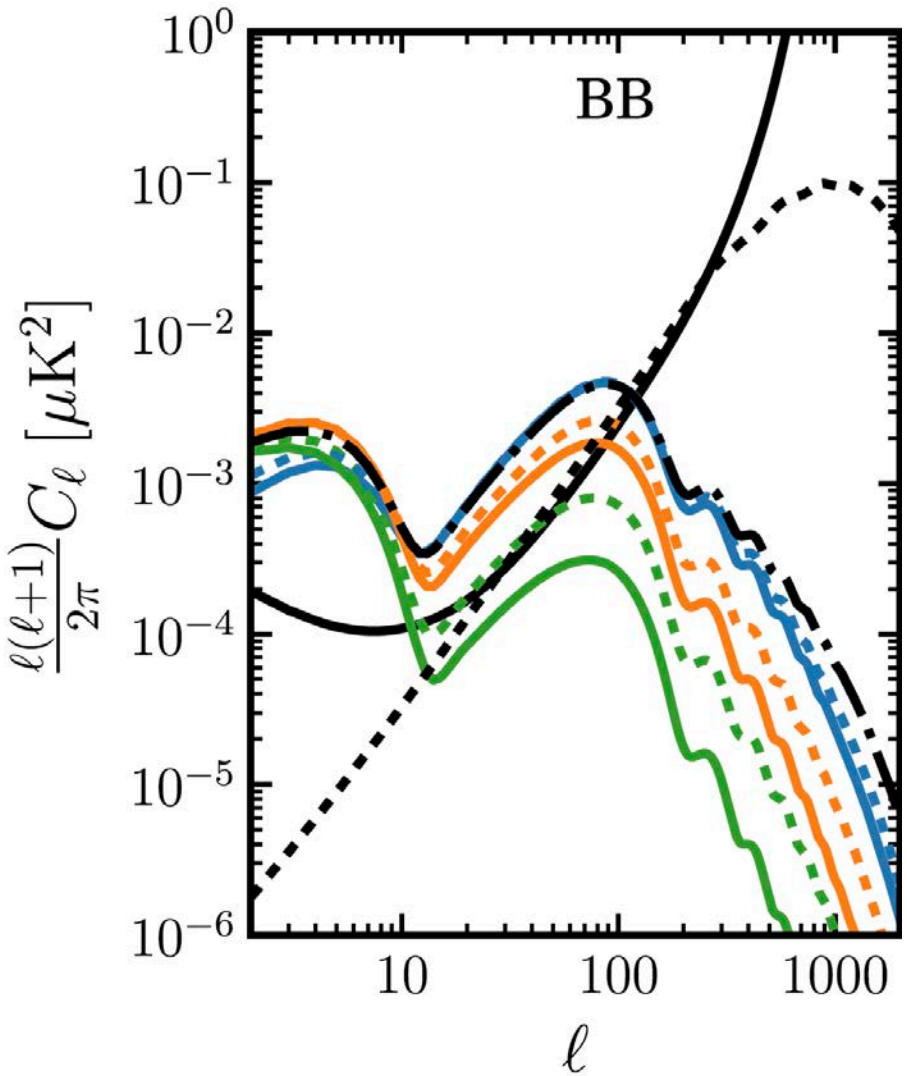


LiteBIRD サイエンスアウトカム

1. フルサクセス：→システム要求は、これより導かれる
2. エクストラサクセス：外部データと合わせ、テンソル・スカラー比の決定精度をさらに改善
3. Bモードの特性評価（新しい素粒子の寄与、非ガウス性、スケール依存性、パリティの破れなどの、新しい基礎物理）
4. 大角度Eモードの限界精度測定：
   ー ニュートリノ質量和の精密決定、宇宙再電離史
5. 宇宙論的複屈折の探索
6. スニャエフ・ゼルドビッチ効果の精査による天文学
7. 周波数スペクトル歪みの異方性
8. Planck等で見えているアノーマリーの精査
9. 銀河磁場、星間ダストのサイエンス

3. – 9. は、システム要求を満たせば自ずと得られる成果

3. B-mode from new source particle

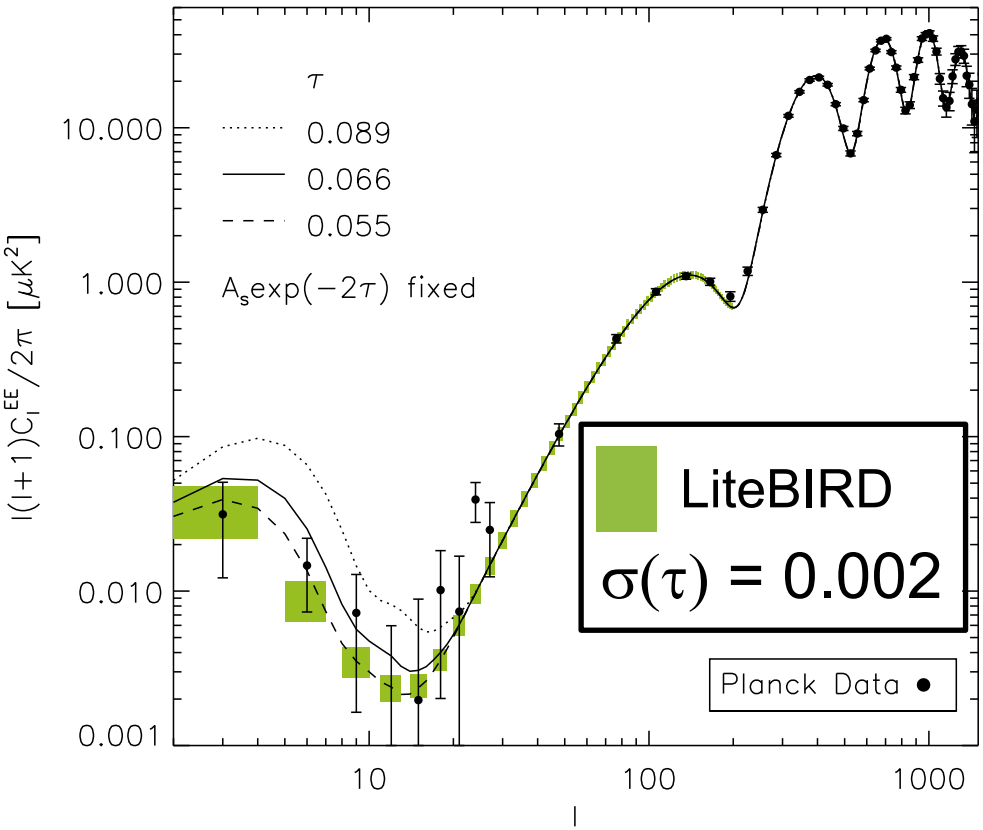


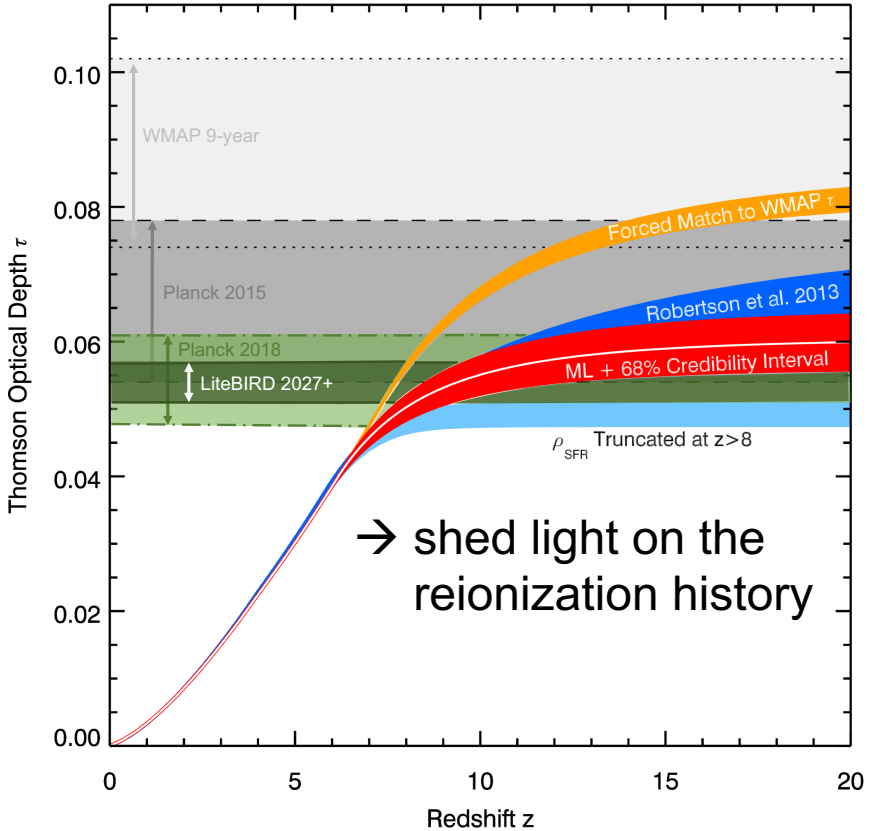
The axion-SU(2) spectra (e.g. green solid curve) contain a contribution from source fields and have an order-of-magnitude enhancement for the reionization bump compared with the case of standard vacuum fluctuations (dot-dashed black curve).

Figure from
B. Thorne et al.,
Phys. Rev. D97, 043506 (2018).

4. Large-scale E-mode

A cosmic variance limited measurement of EE on large angular scales will be an important, and guaranteed, legacy for LiteBIRD!

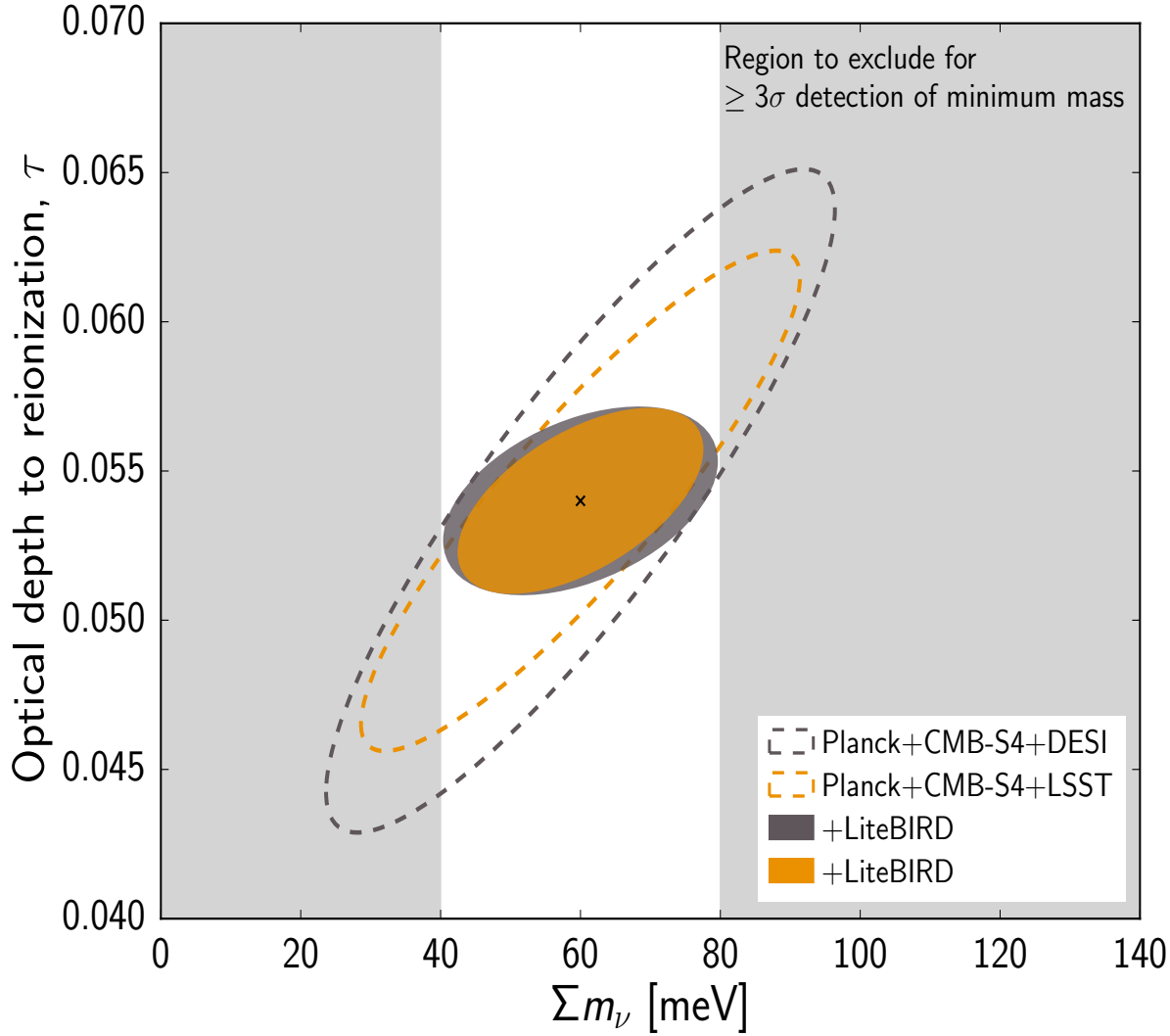




Σm_ν with improved τ

- $\sigma(\Sigma m_\nu) = 15$ meV
- $\geq 3\sigma$ detection of minimum mass for normal hierarchy
- $\geq 5\sigma$ detection of minimum mass for inverted hierarchy

Caveat:
No systematic error included yet.



LiteBIRDまとめ

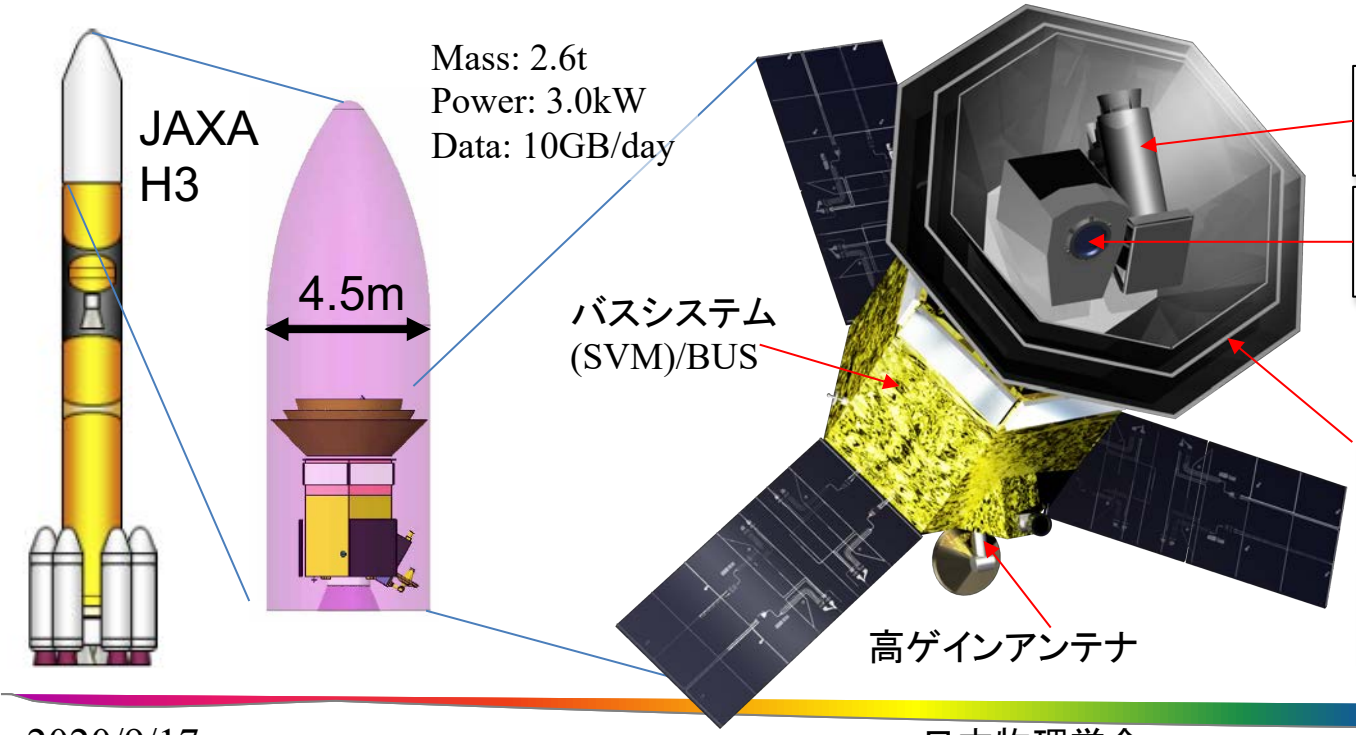
- 2020学術会議マスタープラン重点大型計画
- 2020文科省ロードマップ（案）掲載計画

- 戦略的中型2号機
- H3による2020年代後半の打ち上げを目指す
- 太陽ー地球ラグランジュ点L2近傍の軌道で3年間の観測
- ミッション：ミリ波(34–448 GHz, 15 バンド)での全天サーベイ
- 角度分解能70–20分角。
- 国際協力の大きな進展 → 宇宙科学への重要な国際貢献
- キー技術開発に関する進展（偏光変調器、スケールモデル）

フルサクセス：
- $\delta r < 1 \times 10^{-3}$ (for r=0)
- r≥0.01の場合は再電離、再結合の信号のそれぞれを5シグマ以上の有意度で検出

◆ 詳細な前景放射除去検討により、$\sigma(r=0) = 0.6 \times 10^{-3}$の統計誤差を得た

◆ 詳細な系統誤差の検討により、全誤差が$\delta r < 1.0 \times 10^{-3}$となることを示した



中・高周波望遠鏡偏光変調器付
(MHFT) (5K)

低周波望遠鏡偏光変調器付
(LFT) (5K)

TES焦点面検出器
ベース温度100mK

V-Groovesによる放射冷却
(30K/100K/200K)

冷凍機チェーン
PT/ST/JT/ADR (not seen)

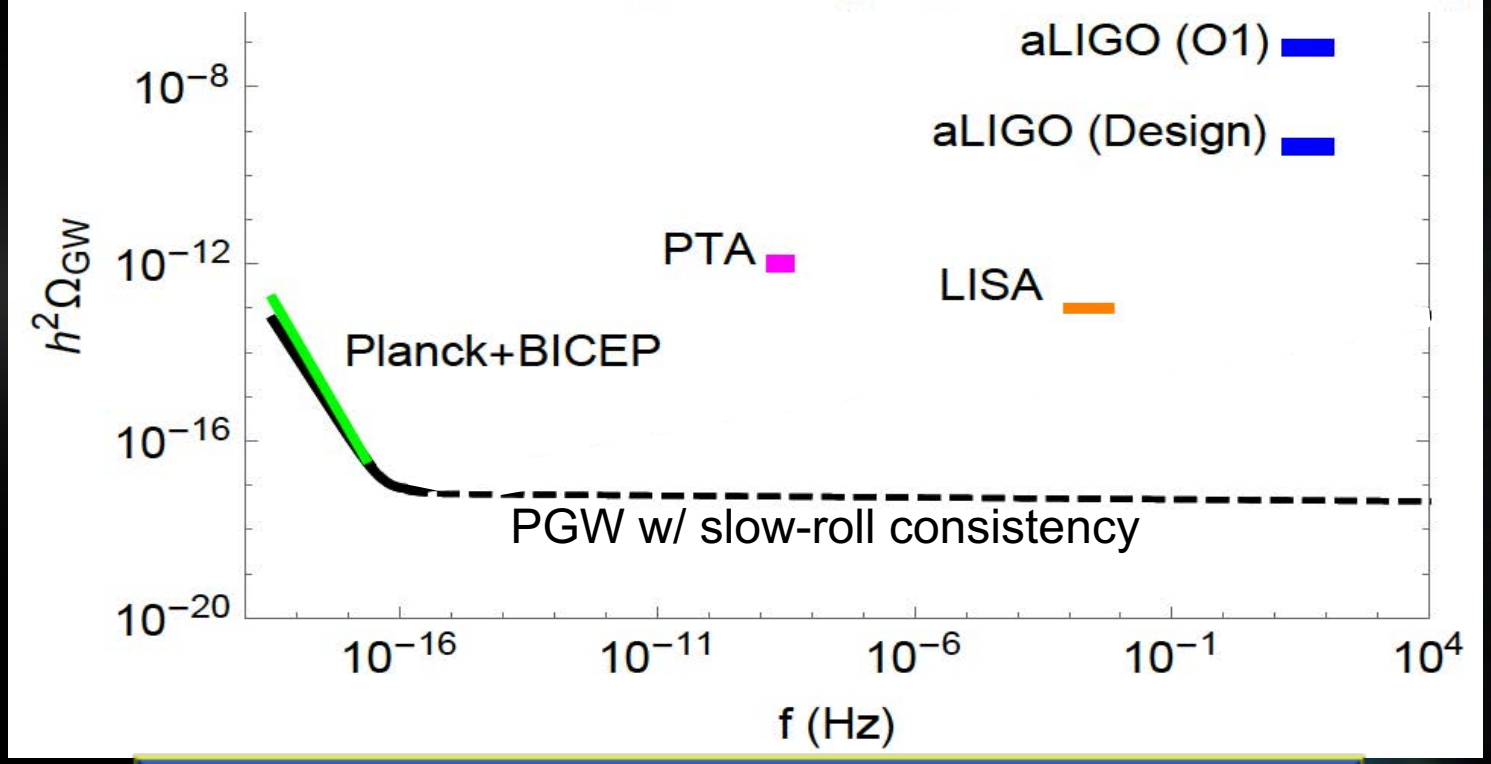
最後に

- CMB偏光は、宇宙論と素粒子物理にまたがるフロンティア
- 地上、気球、衛星のCMB偏光プロジェクト
  →少なくとも今後15年程度は、
  次々と新しい観測結果が期待される
- Bモードの精密観測は、宇宙論の将来の方向を決める
  - LiteBIRDは大角度Bモード揺らぎの精密観測により、鍵を握るプロジェクトとなっている

CMB B-mode vs. interferometer

Caprini, Figueroa, arXiv1801.04268 (line w/ nt = 0.2 removed as it is irrelevant)

$$\Omega_{gw}(f) = \frac{3}{128}\Omega_{\rm rad}\, r\, A_s \left(\frac{f}{f_*}\right)^{n_t}\left[\frac{1}{2}\left(\frac{f_{\rm eq}}{f}\right)^2 + \frac{4}{9}(\sqrt{2}-1)\right]$$



Discovery with CMB B-mode will provide a clear target for a future space interferometer.

計画の学術的意義

熱いビッグバン以前の観測により期待される成果

原始Bモードの発見 → No → 新しい学問分野の誕生 （量子時空の宇宙物理学実験）

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

Yes ↓

理論予想と一致 → No → 人類の世界観に革命 （例：誕生と終焉を繰り返す宇宙）

Yes ↓

インフレーション宇宙の確実な証拠
→ 佐藤勝彦先生ノーベル賞

天文観測による多彩な成果（例）

- Bモードによる新しい物理探索（非ガウス性など）
- Eモードによるニュートリノ質量和測定精度の改善
- Eモードによる宇宙の光学的厚みの精密測定と宇宙再電離の歴史検証
- 宇宙論的複屈折の探索
- SZ効果による天文学
- 周波数スペクトル歪みの異方性の測定
- Planckアノーマリーの検証
- 銀河のサイエンス