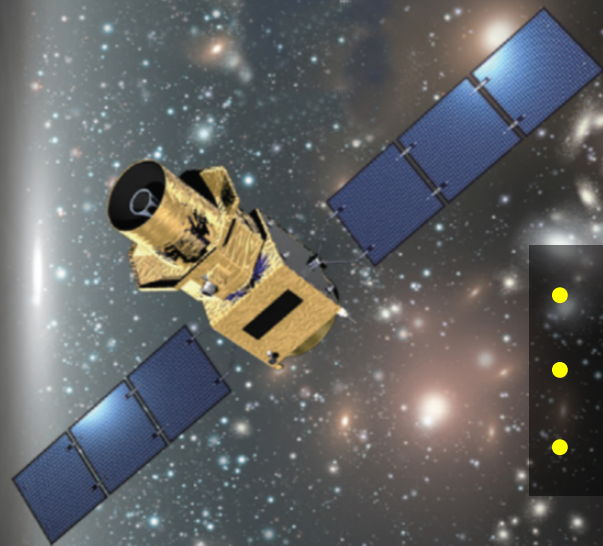


*LiteBIRD*進捗状況



- プロジェクト関連
- 技術関連
- Science Outcome

羽澄 昌史 for LiteBIRD Joint Study Group

高エネルギー加速器研究機構/
東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構/
総合研究大学院大学/
JAXA宇宙科学研究所

このスライドは、
実際にシンポジウムで見せた
ものから、宇宙電波懇談会の
外に向けた公開情報として
扱えるものを抜粋したものです。



プロジェクト関連

1. 学術会議関連



- 学術会議マスタープラン2014、2017に LiteBIRDが重点大型計画として掲載
- 文科省ロードマップ2014、2017に LiteBIRDが掲載

宇宙電波懇談会のサポートの賜物です。
とても感謝しています！

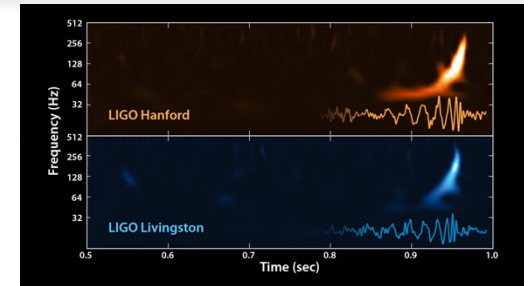


人類にとって根源的な問い

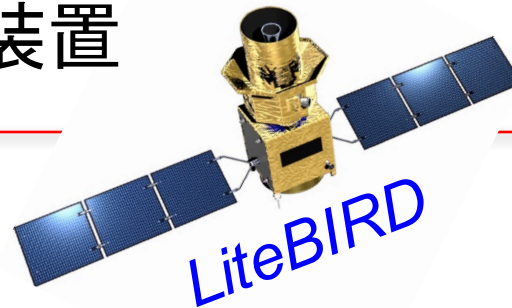
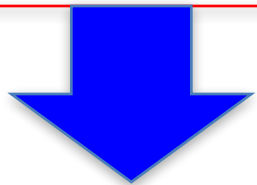
- 宇宙誕生の瞬間とは？
- 宇宙・時空を創るルールブック(究極理論)とは？

ロードマップヒアリング
プレゼン資料より

LiteBIRD衛星は、「量子揺らぎ起源の重力波」を使ってビッグバン以前を探索できる唯一・特別な装置



2016.2に発見された
重力波の波形



- 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



D'où venons-nous ?

熱いビッグバン以前の宇宙は、謎の世界



ロードマップヒアリング
プレゼン資料より

我々の宇宙
の誕生

究極理論

超重力理論？
超弦理論？
ループ量子重力？
11次元？
ブレインワールド？

インフレーション？

ビッグバン

再結合

ダークエイジ

再電離

銀河形成

CMB

最初の星

前景放射

現在の宇宙

宇宙年齢

10^{-38} 秒？

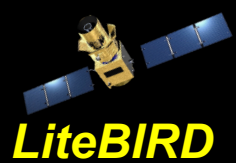
38万年 1億年

138億年

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。
- 佐藤勝彦先生等が1980年代初頭に提案。その後、究極理論の研究と密接に関連して、様々な理論モデルが提唱される。
- 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・検証

期待される科学成果



ロードマップヒアリング
プレゼン資料より

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

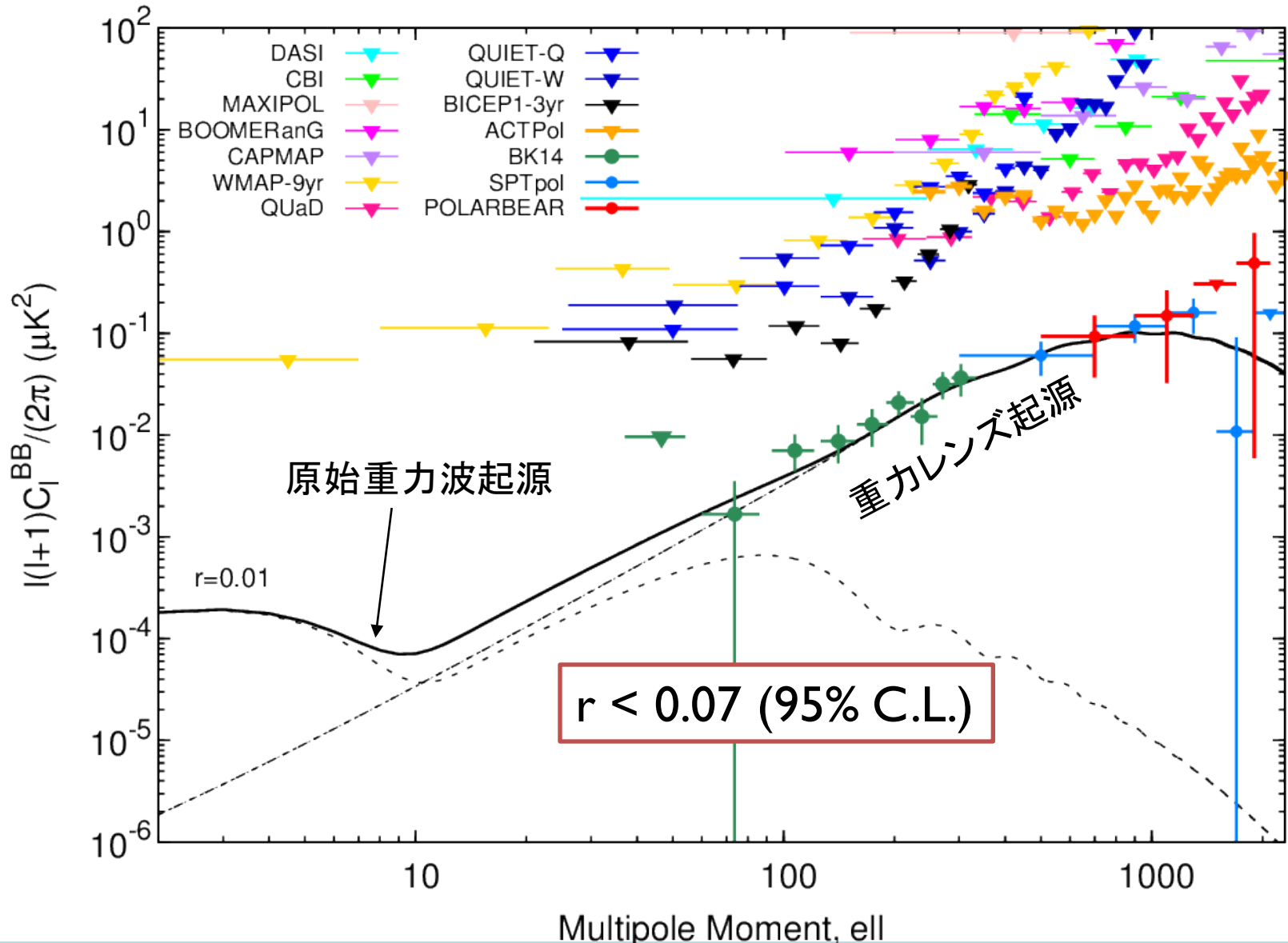
インフレーション宇宙の証明 → 佐藤勝彦先生ノーベル賞

天文観測による多彩な成果

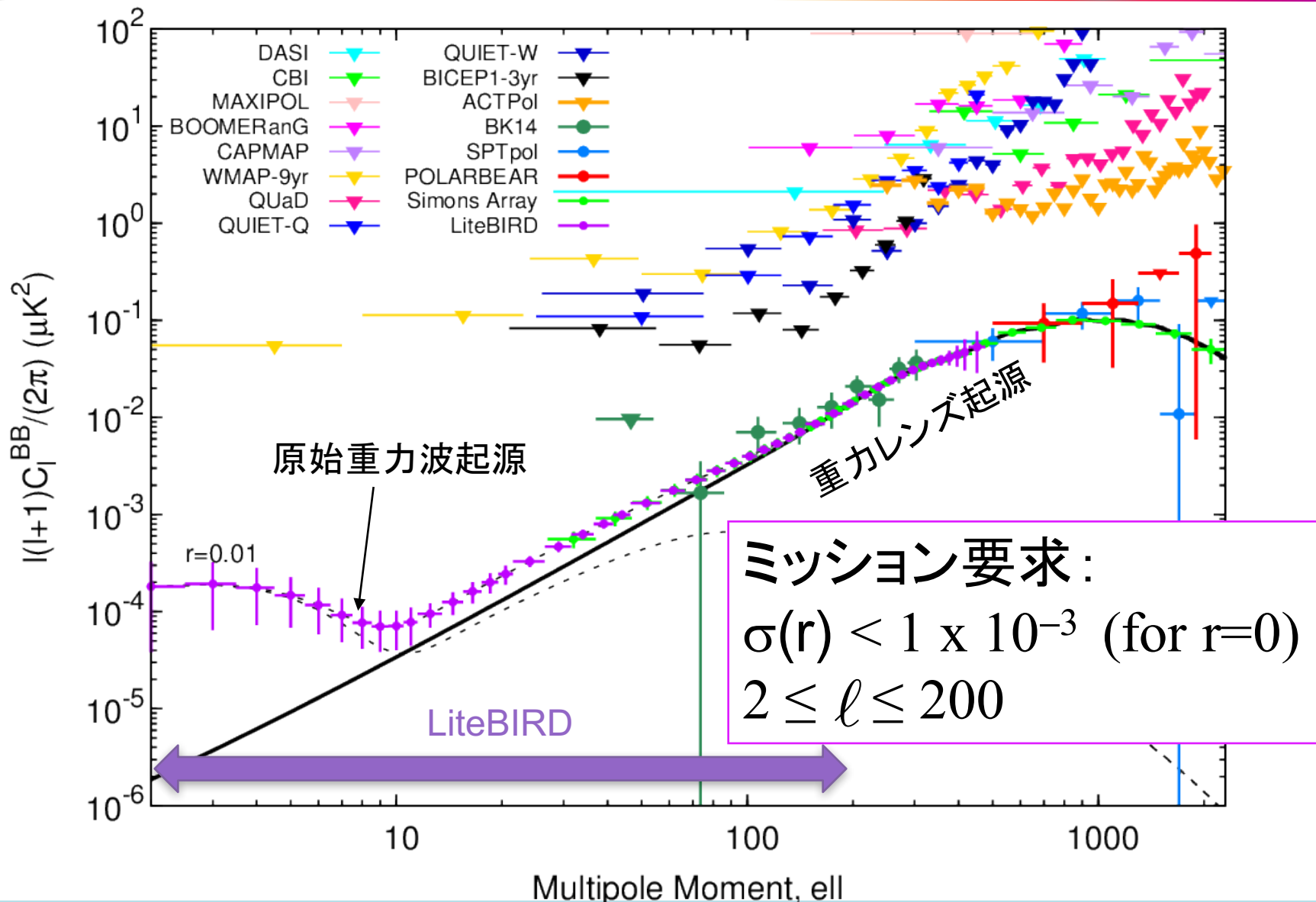
- 銀河系・銀河系ハロー・局所銀河群磁場の構造及び起源の解明
- 星間ダスト組成分布及び整列機構の解明
- 宇宙再電離史の詳細決定と再電離機構の解明
- Galactic Haze emissionの起源の解明
- 超高精度ミリ波サブミリ波偏光全天探査によるセレンディピタスな発見

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

Bモード観測の現状



LiteBIRD衛星の感度予想



2. JAXA評価関連



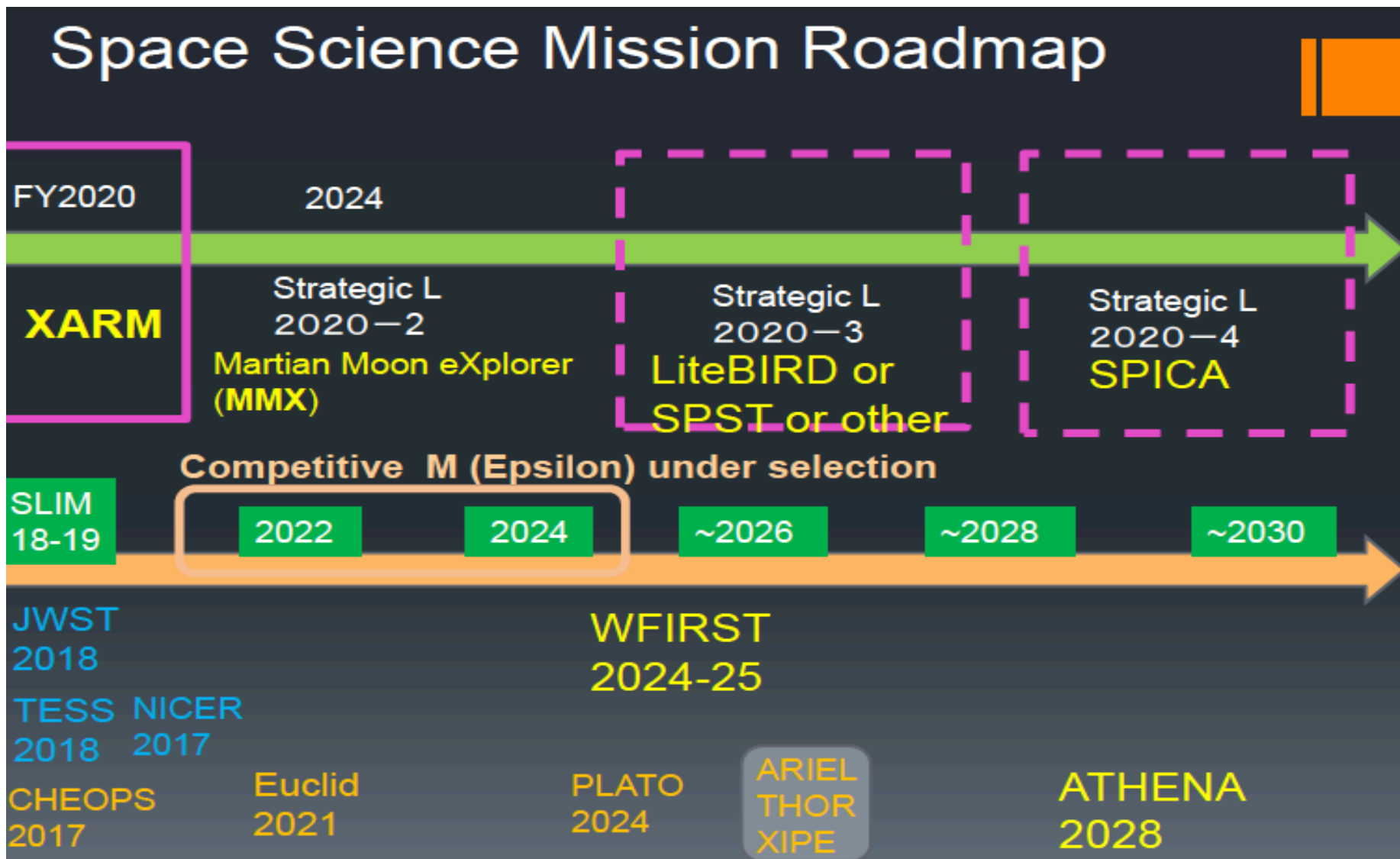
Basic facts

- JAXA roadmap
 - Probing inflation from B-mode listed as one of top scientific objectives
- JAXA prefers focused missions for strategic large mission program. LiteBIRD is exactly a focused mission.

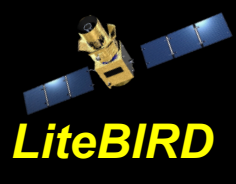
Current Status

- A serious candidate for the Strategic L-class slot in middle 2020's.
 - Proposal submitted to ISAS in response to a call for a strategic large mission in 2015.
 - **One of the two missions selected for Phase-A1 study** (The other is Solar-Power-Sail Trojan mission) .
 - Phase-A1 studies started in September 2016 and will continue to August 2018 (24 months). **Down-selection for the slot is then expected after that.**
 - **Progress in key technology development was shown in the LB phase A1 Interim review in April, 2017**

“Current Status of LiteBIRD in JAXA” by Toru Yamada (Former ISAS Director of International Strategy and Coordination)



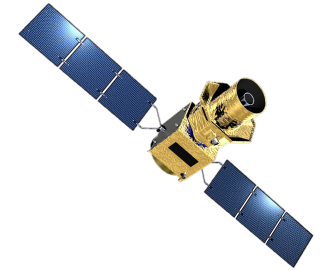
3. 国際情勢と国際協力



衛星計画に関する1年前の国際情勢

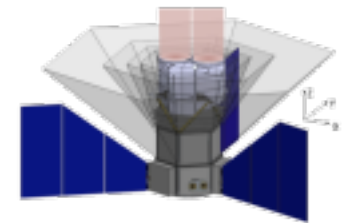
• LiteBIRD

- JAXA-led strategic large mission (戦略的中型) candidate
- Strong US and European participation
- **The only project in Phase-A (ISAS/JAXA)**
- Target launch in 2026-2027



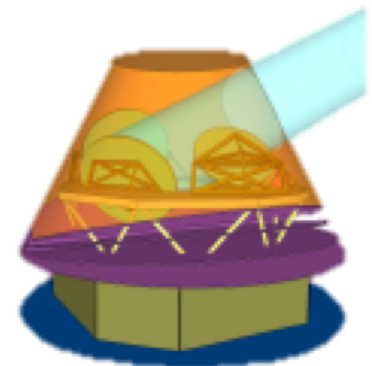
• PIXIE

- NASA small PI-led mission proposal Feb 2011, not selected
- Re-proposed MIDEX AO (2016 Dec)

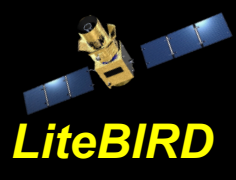


• COrE

- Mission for ESA M5
- Proposal submitted in Oct 2016
- Planned launch date of 2029-2030



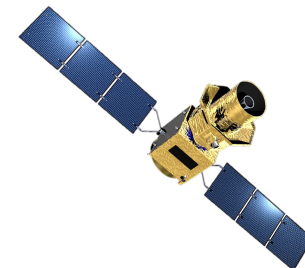
3. 国際情勢と国際協力



衛星計画に関する現在の国際情勢

• LiteBIRD

- JAXA-led strategic large mission (戦略的中型) candidate
- Strong US and European participation
- **The only project in Phase-A (ISAS/JAXA)**
- Target launch in 2026-2027



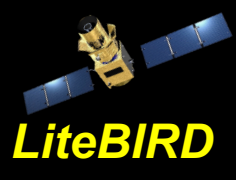
COreEとPIXIEは、
サイエンスは高く評価されたが
コスト(COrE)、他ミッションとの競合(PIXIE)により不採択

LiteBIRDが2020年代のスペース観測の唯一解。
またとない大きなチャンス！

国際協力の著しい進展！



- **米国:** NASAのコミットメントでDetector Technology Development (2017年11月より)。ちなみに、本気が伝わってくる金額
- **カナダ:** CSAのコミットメントでカナダの読み出しエレクトロニクスへの貢献を定義する検討 (2018年1月より)
- **イタリア:** ASIのコミットメントでHFTのデザイン (2018年1月より開始)
- **ヨーロッパ(イタリア含む):** LiteBIRDコンソーシアムを結成。HFT及びSub-K冷凍機のデザイン (2017年8月より)
- **ESA:** JAXA及びヨーロッパコンソーシアムと共同でConcurrent Design Facilityを用いたHFTとSub-K冷凍機の検討 (2018年3月より)
- **External Collaborators:** Space AgencyのコミットメントがなくてもLiteBIRDの検討にエキスパート (Planck経験者など) が参加できる仕組み



LiteBIRD Joint Study Group Member List

as of Dec. 2017

M. Hazumi^{19,22,30,50}. P.A.R. Ade⁴⁸. Y. Akiba^{19,50}. D. Alonso⁴². K. Arnold¹⁶. J. Aumont²⁰. C. Baccigalupi²⁵. D. Barron⁴⁹. S. Basak^{11,25}. S. Beckman¹⁵. J. Borrill^{6,49}. F. Boulanger²⁰. M. Bucher³. E. Calabrese⁴⁸. Y. Chinone^{15,30}. S. Cho¹³. A. Cukierman¹⁵. D.W. Curtis⁴⁹. T. de Haan⁴⁴. M. Dobbs⁴³. A. Dominjon³⁵. T. Dotani²². L. Dubandd¹⁸. A. Ducout³⁰. J. Dunkley^{10,42}. J.M. Duval¹⁸. T. Elleflot¹⁶. H.K. Eriksen²⁴. J. Errard³. J. Fischer⁴⁹. T. Fujino⁵⁴. T. Funaki¹². U. Fuskelandd²⁴. K. Ganga³. N. Goeckner-Wald¹⁵. J. Grain²⁰. N.W. Halverson^{4,9,17}. T. Hamada^{2,19}. T. Hasebe²². M. Hasegawa^{19,50}. K. Hattori³⁷. M. Hattori². L. Hayes⁴⁹. N. Hidehira¹². C.A. Hill^{15,44}. G. Hilton³⁹. J. Hubmayr³⁹. K. Ichiki³². T. Iida³⁰. H. Imada²². M. Inoue⁴⁰. Y. Inoue^{19,21}. K.D. Irwin^{13,29}. H. Ishino¹². O. Jeong¹⁵. H. Kanai⁵⁴. D. Kaneko³⁰. S. Kashima³⁵. N. Katayama³⁰. T. Kawasaki³¹. S.A. Kernasovskiy¹³. R. Kesitalo^{6,49}. A. Kibayashi¹². Y. Kida¹². K. Kimura⁴⁰. T. Kisner^{6,49}. K. Kohri¹⁹. E. Komatsu³⁴. K. Komatsu¹². C.L. Kuo^{13,29}. N.A. Kurinsky^{13,29}. A. Kusaka^{14,44}. A. Lazarian⁵³. A.T. Lee^{15,44,45}. D. Li¹³. E. Linder^{44,49}. B. Maffei²⁰. A. Mangilli²⁰. M. Maki¹⁹. T. Matsumura³⁰. S. Matsuura²⁷. D. Meilhan⁴⁹. S. Mima⁴⁶. Y. Minami¹⁹. K. Mitsuda²². L. Montier⁵. M. Nagai³⁵. T. Nagasaki¹⁹. R. Nagata¹⁹. M. Nakajima⁴⁰. S. Nakamura⁵⁴. T. Namikawa¹³. M. Naruse⁴⁷. H. Nishino¹⁹. T. Nitta⁵². T. Noguchi³⁵. H. Ogawa⁴⁰. S. Oguri⁴⁶. N. Okada²³. A. Okamoto²³. T. Okamura¹⁹. C. Otani⁴⁶. G. Patanchon³. G. Pisano⁴⁸. G. Rebeiz¹⁶. M. Remazeilles⁵¹. P.L. Richards¹⁵. S. Sakai²². Y. Sakurai³⁰. Y. Sato²³. N. Sato¹⁹. M. Sawada¹. Y. Segawa^{19,50}. Y. Sekimoto^{8,22,50}. U. Seljak¹⁵. B.D. Sherwin^{7,28,44}. T. Shimizu⁸. K. Shinozaki²³. R. Stompor³. H. Sugai³⁰. H. Sugita²³. A. Suzuki^{15,45}. J. Suzuki¹⁹. O. Tajima^{19,50}. S. Takada³⁶. R. Takaku⁵⁴. S. Takakura^{19,41}. S. Takatori^{19,50}. D. Tanabe^{19,50}. E. Taylor⁴⁹. K.L. Thompson^{13,29}. B. Thorne^{30,42}. T. Tomaru¹⁹. T. Tomida²². N. Tomita¹. M. Tristram³³. C. Tucker¹⁶. P. Turin⁴⁹. M. Tsujimoto²². S. Uozumi¹². S. Utsunomiya³⁰. Y. Uzawa³⁸. F. Vansyngel²⁰. I.K. Wehus²⁴. B. Westbrook¹⁵. M. Willer⁴⁹. N. Whitehorn¹⁵. Y. Yamada¹². R. Yamamoto²². N. Yamasaki²². T. Yamashita⁵⁴. M. Yoshida¹⁹

¹Aoyama Gakuin University, Japan; ²Tohoku University, Japan; ³APC, France; ⁴University of Colorado, Boulder, USA; ⁵CNRS, IRAP, Toulouse, France; ⁶Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA; ⁷DAMTP, University of Cambridge, UK; ⁸The University of Tokyo, Japan; ⁹University of Colorado, Boulder, USA; ¹⁰Princeton University, USA; ¹¹Amrita University, Kerala, India; ¹²Okayama University, Japan; ¹³Stanford University, USA; ¹⁴University of Tokyo, Japan; ¹⁵University of California, Berkeley, USA; ¹⁶University of California, San Diego, USA; ¹⁷University of Colorado, Boulder, SA; ¹⁸CEA, Grenoble, France; ¹⁹KEK, Tsukuba, Japan; ²⁰IAS, Orsay, France; ²¹Academia Sinica, Taiwan; ²²ISAS, JAXA, Japan; ²³JAXA, Tsukuba, Japan; ²⁴University of Oslo, Norway; ²⁵SISSA, Trieste, Italy; ²⁷Kansei Gakuin University, Japan; ²⁸Kavli Institute for Cosmology Cambridge, UK; ²⁹KIPAC, SLAC, USA; ³⁰Kavli IPMU, Japan; ³¹Kitazato University, Japan; ³²Nagoya University, Japan; ³³LAL, Univ. Paris-Sud, France; ³⁴Max-Planck-Institut for Astrophysics, Garching, Germany; ³⁵NAOJ, Japan; ³⁶NIFS, Japan; ³⁷AIST, Japan; ³⁸NICT, Japan; ³⁹NIST, Boulder, Colorado USA; ⁴⁰Osaka Prefecture University, Japan; ⁴¹Osaka University, Japan; ⁴²Oxford Astrophysics, United Kingdom; ⁴³McGill University, Montreal, Canada; ⁴⁴Lawrence Berkeley National Laboratory, USA; ⁴⁵Radio Astronomy Laboratory, Berkeley, USA; ⁴⁶RIKEN, Japan; ⁴⁷Saitama University, Japan; ⁴⁸Cardiff University, United Kingdom; ⁴⁹Space Sciences Laboratory, Berkeley, USA; ⁵⁰SOKENDAI, Japan; ⁵¹University of Manchester, United Kingdom; ⁵²University of Tsukuba, Japan; ⁵³University of Wisconsin-Madison, USA; ⁵⁴Yokohama National University, Japan

European LiteBIRD Consortium



1st Meeting in Cardiff (Aug 2-3, 2017)



2nd Meeting in Paris (Oct 23-24, 2017)

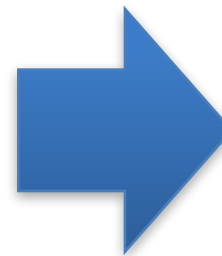


3rd Meeting in Turin (Feb 8-9, 2018)



技術関連

Launch Vehicle: H3



- First Flight in 2001
- 23 successful launches/24
- Latest one: GPM
- GTO 4-6 ton class capability

- First Flight in 2009
- 4 successful flights/4 of 16.5 ton HTV to ISS
- GTO 8 ton class capability

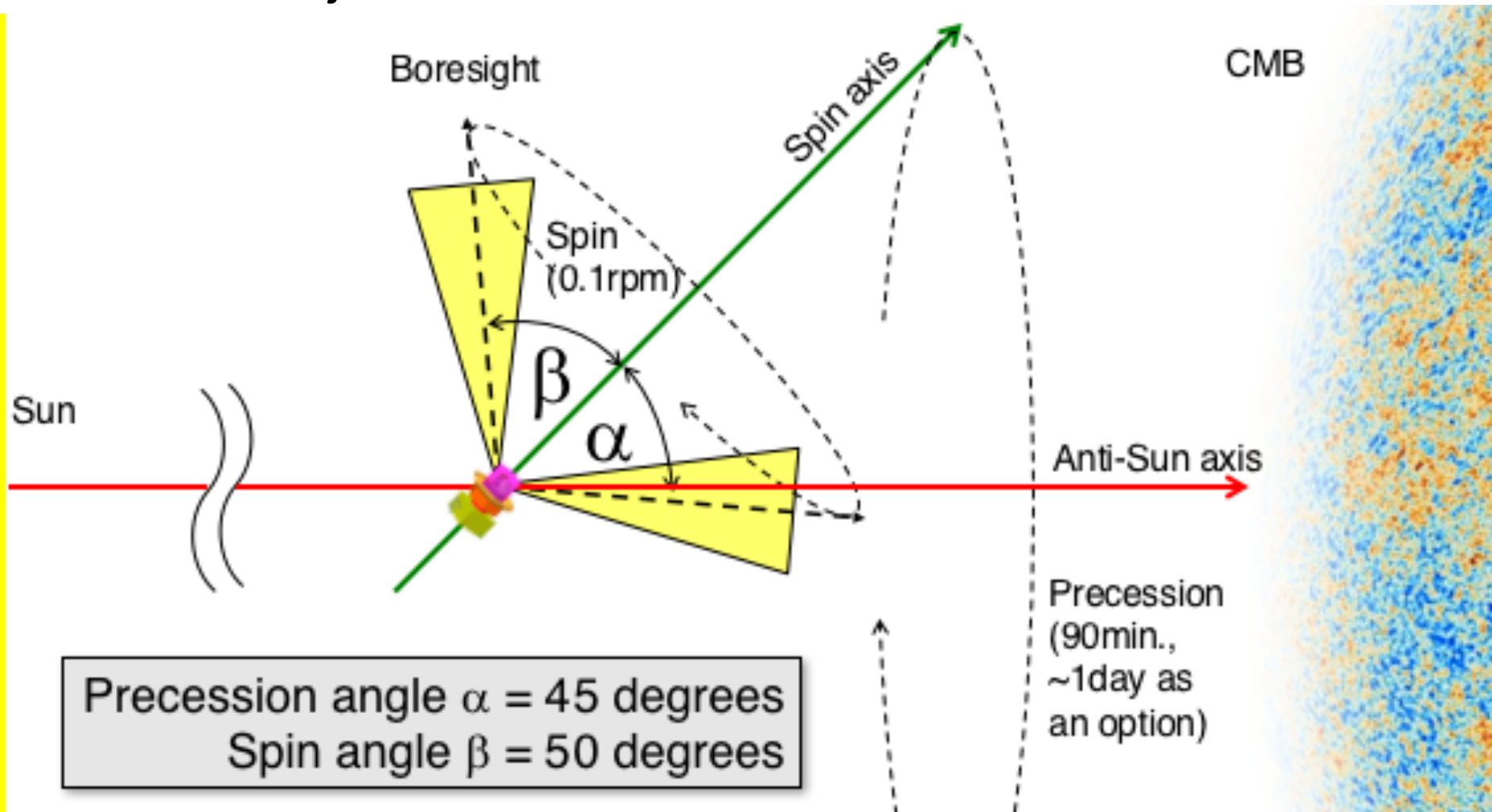
- First test launch in 2020
- 1/2 cost w/ same capability (comparison w/ H-II B)
- Larger envelope

Scan Strategy

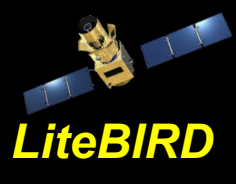
S. Uozumi



Orbit: L2 Lissajous



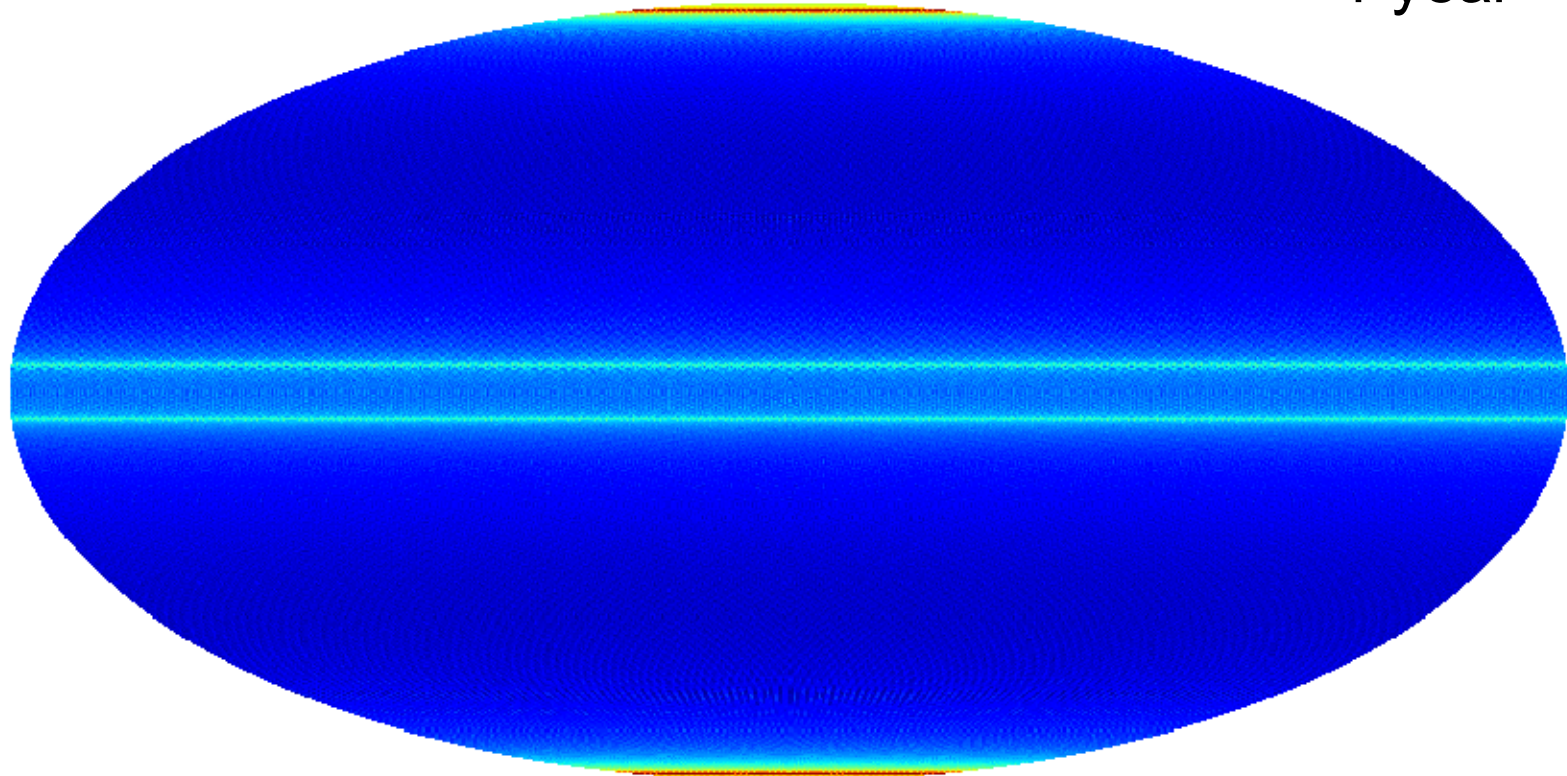
of observations for each sky pixel



w/ a single detector

Mollweide view

1 year



Ground Station (GREAT)



for Deep Space Exploration and Telecommunication



Summary of Ground Stations

station	Antenna diameter	Bands	Comments
GN (Ground Network)	10m	S up/down/range	3 stations in Japan, 4 outside Japan
USC	34m	S up/down/range X up/down Ka down	
	20m	S up/down/range X down	
KTU4	20m	S up/down/range X down	
UDSC	64m	S up/down/range X up/down/range	Will be replaced with the 54m antenna.
	54m	X up/down/range Ka down	Under construction. Operational from 2019.

Antenna available for L2 mission in 2020s.

Only the limited data transfer is possible at L2.

Larger datalink capability

LiteBIRD 主な諸元



Y. Sekimoto

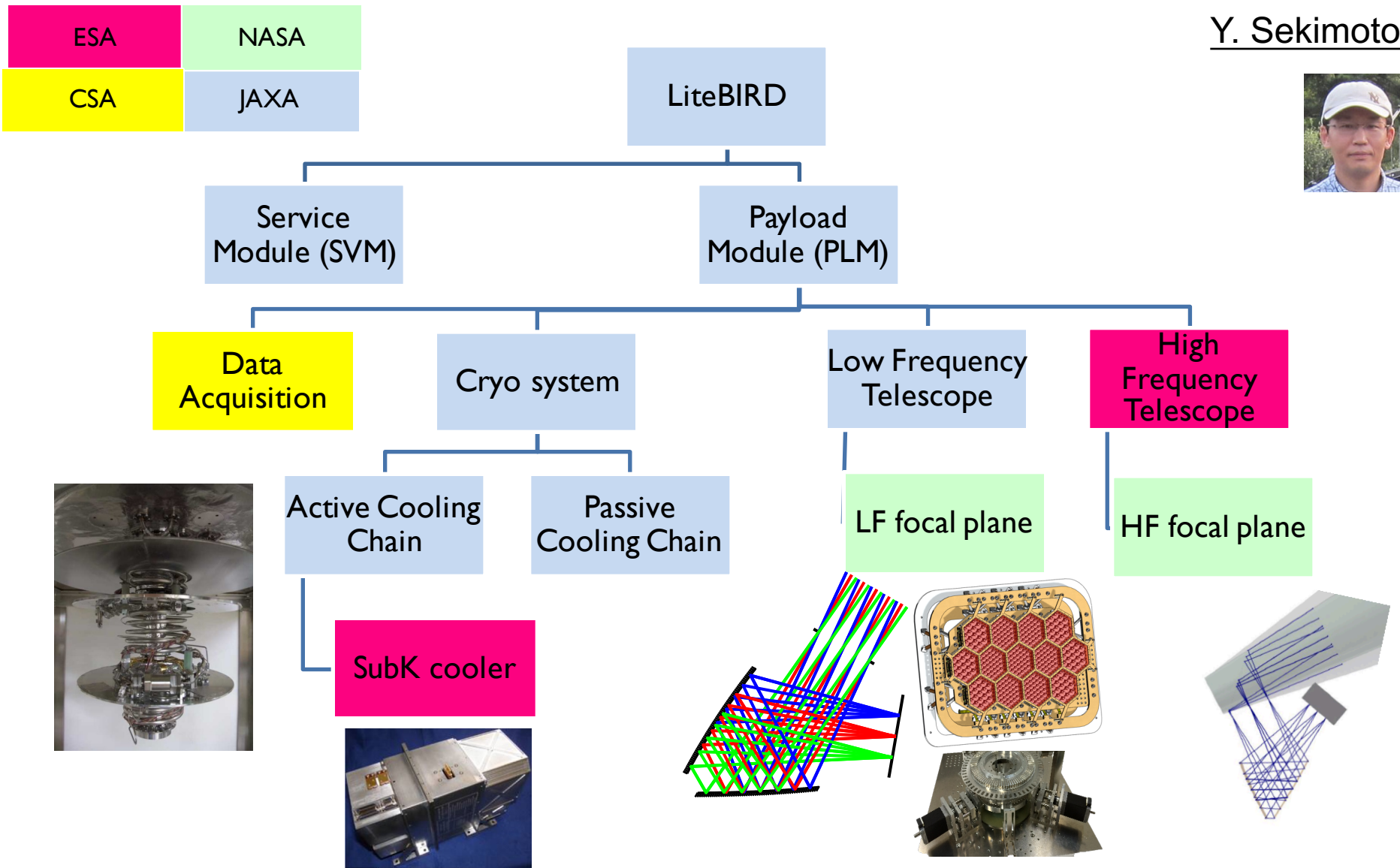
	Specification
Frequency	LFT 34 ~ 161 GHz HFT 89 ~ 448 GHz
Sensitivity	3 μ K arcmin
Uncertainty of r	$\delta r < 1 \times 10^{-3}$
Observation period	3 years
Scan	L2 Lissajous, precession angle 45 deg, spin angle 50 deg (0.1 rpm)
angular resolution	less than 70 arcmin at any frequency
field of view	LFT (> 20 deg \times 10 deg), HFT (> 20 deg \times 10 deg)
cold aperture stop	Temperature < 2 K
pointing knowledge	< 3 arcmin
beam calibration	sidelobe -60 dB
rotational HWP	LFT ~ 80 rpm, HFT ~ 170 rpm, temperature < 10 K
focal plane array	NETParray = 1.7 μ K \sqrt{s} @ 100 mK Number of detectors ~ 3100 $f_{\text{knee}} < 20$ mHz
data sampling rate	LFT ~ 22 Hz, HFT ~ 46 Hz
data transfer	7 GByte/day
mass	2.6 ton
electrical power	3 kW



LiteBIRD Product Tree



Y. Sekimoto

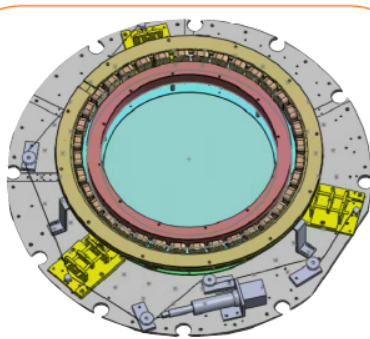
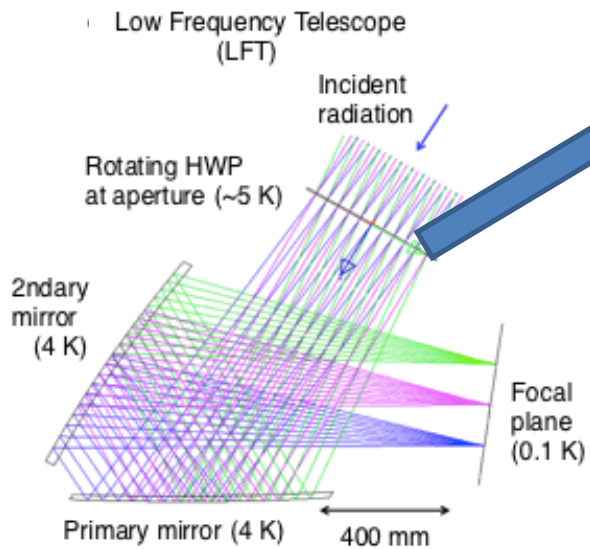
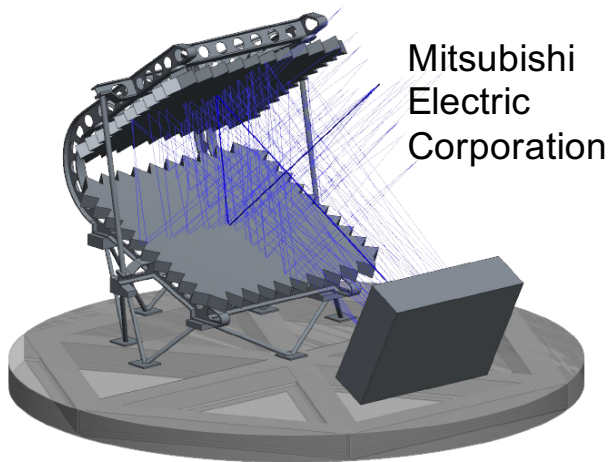


Payload Module

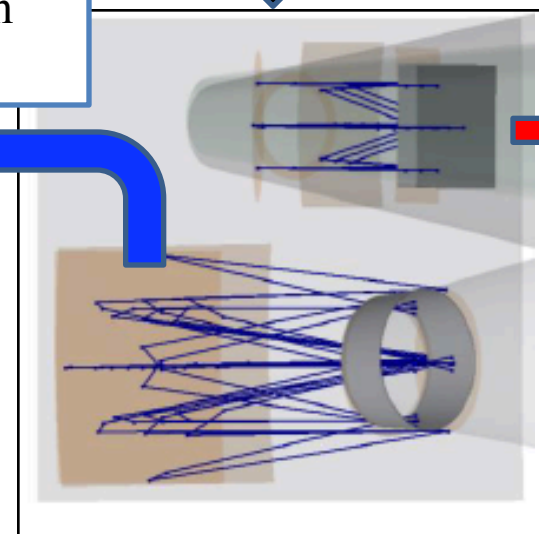
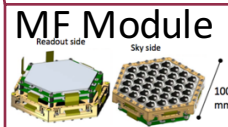
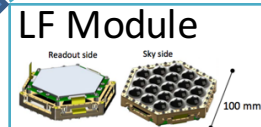
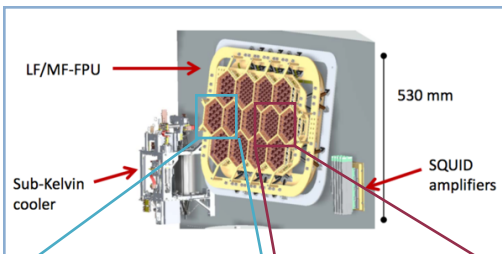
- TES arrays
- Polarization modulators
- LFT + HFT
- 0.1 K cooling system (ST/JT/ADR)



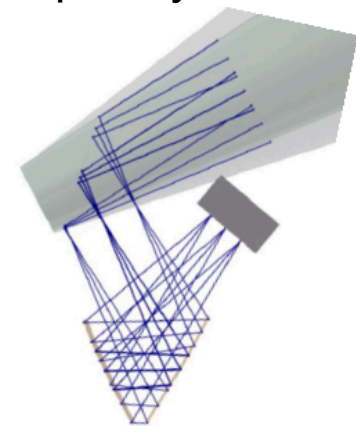
Low Frequency Telescope (LFT)



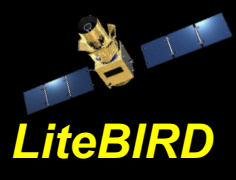
Continuous rotating half-wave plate



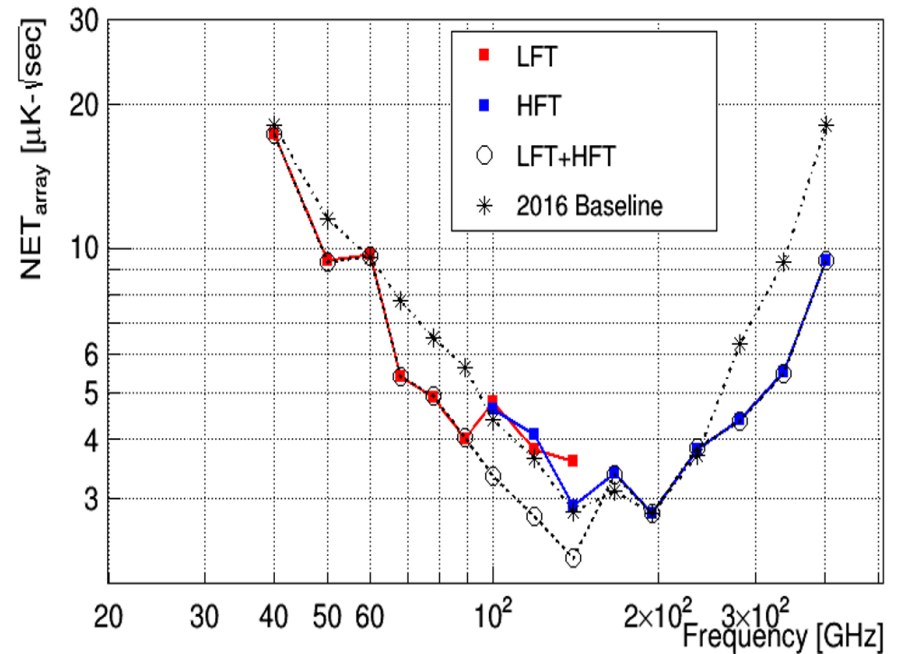
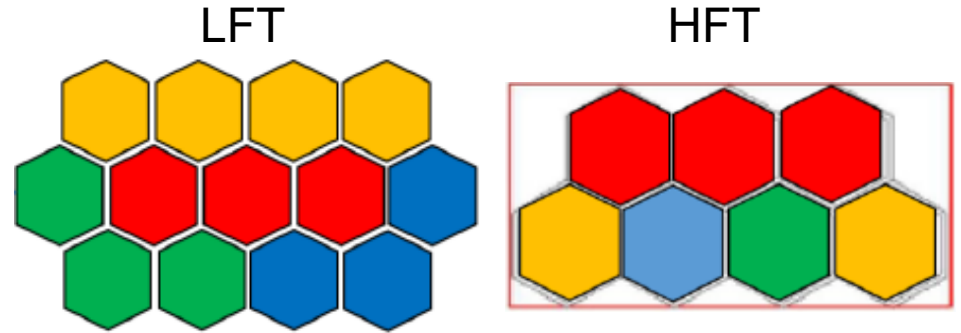
High Frequency Telescope (HFT)



Focal Plane Configuration



	Type	Center Frequencies [GHz]	BW	Low [GHz]	High [GHz]	pixel dia. [mm]	Num. of wafers	TES channels	
								Opt/wf	Total
LFT 34 - 161 GHz	1	40	0.30	34	46	30	3	14	42
		60	0.23	53	67	30	3	14	42
		78	0.23	69	87	30	3	14	42
	2	50	0.30	43	58	30	4	14	56
		68	0.23	60	76	30	4	14	56
		89	0.23	79	99	30	4	14	56
	3	68	0.23	60	76	18	3	38	114
		89	0.23	79	99	18	3	38	114
		119	0.30	101	137	18	3	38	114
	4	78	0.23	69	87	18	3	38	114
		100	0.23	89	112	18	3	38	114
		140	0.30	119	161	18	3	38	114
HFT 89 - 448 GHz	5	100	0.23	89	112	12	3	74	222
		140	0.30	119	161	12	3	74	222
		195	0.30	166	224	12	3	74	222
	6	119	0.30	101	137	12	2	74	148
		166	0.30	141	191	12	2	74	148
		235	0.30	200	270	12	2	74	148
	7	235	0.30	200	270	5.4	1		
		337	0.30	286	388	5.4	1	338	338
		280	0.30	238	322	5.4	1	338	338
	8	402	0.23	356	448	5.4	1	338	338
	Total								
LFT									978
HFT									2124

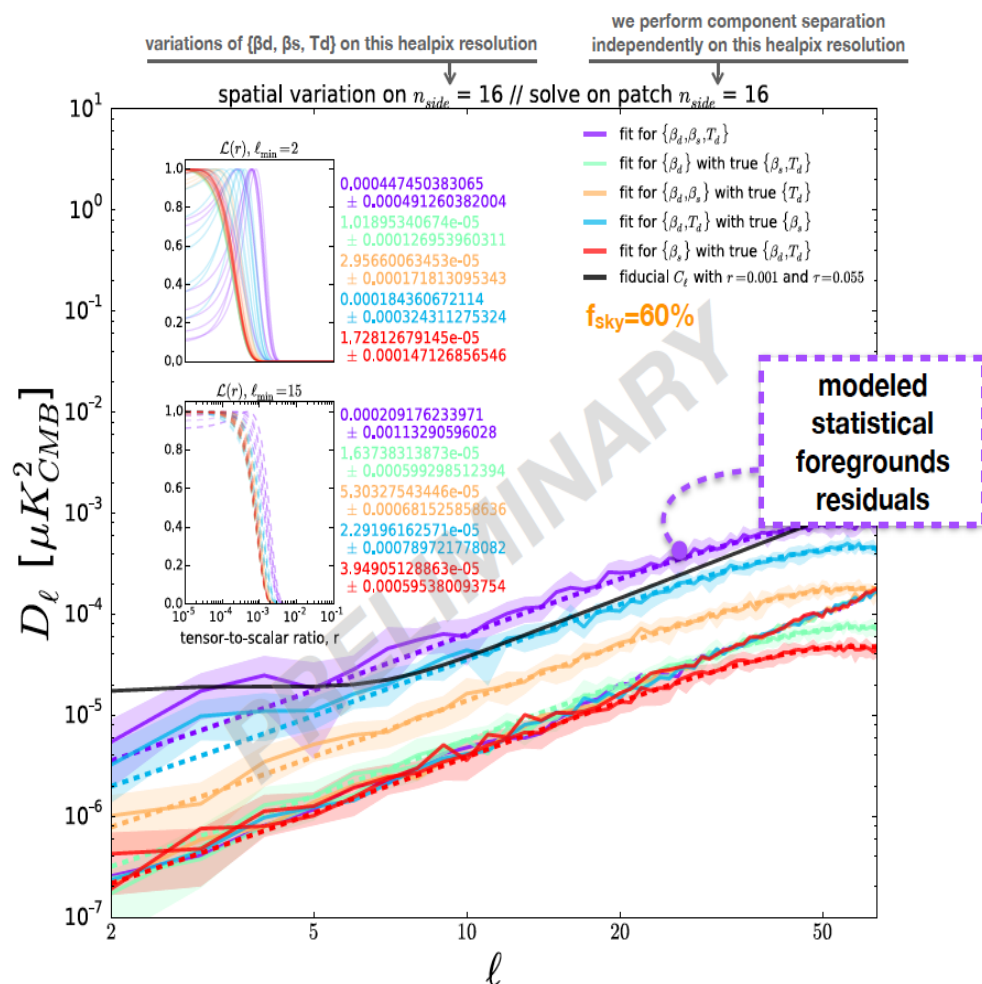


Foreground Removal

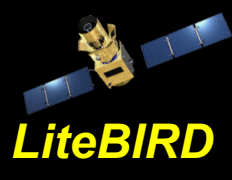


Team of world experts !

- Can reach bias on r less than 0.001, considering input sky simulations with spatial variations of spectral indices over $n_{\text{side}}=16$
 - A multipatch approach, combined with a deprojection of the statistical residuals, leads to $r \sim 0.0004 \pm 0.0005$ ($\ell \geq 2$)
- Complicating the sky (spatial variations on $n_{\text{side}}=32$ with synchrotron curvature) leads to $r = 0.0007 \pm 0.0007$ ($\ell \geq 2$)
 - Synchrotron curvature leads to a larger bias if not fitted for in the modeling



LiteBIRD Development in Japan

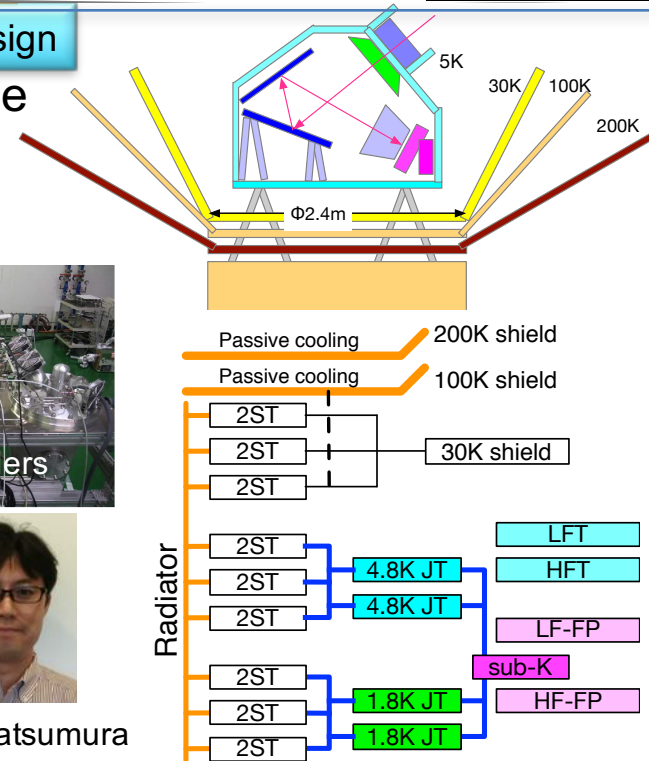
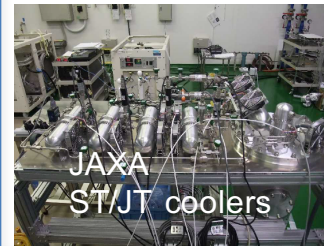


Keys to the success and Phase-A1 goals

- Successful R&D on critical payload components
 - Polarization modulator (achieving TRL5)
 - Thermal design
- Sufficient systematics and foreground mitigations
 - Thorough studies by Joint Study Group
- Sufficient calibration strategy and AIV plan
- Reliable cost estimation
- Clear international interfaces

Thermal design

T. Hasebe

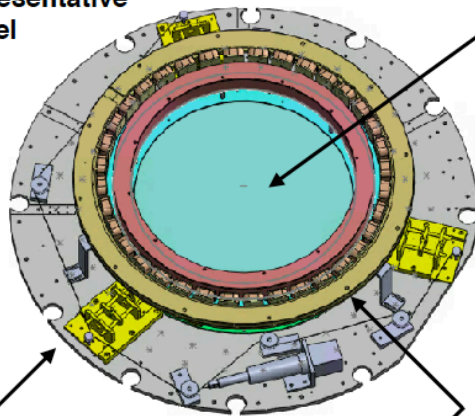
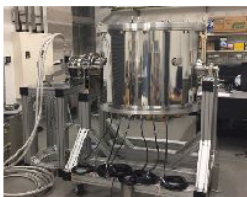


Polarization modulator

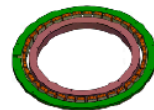
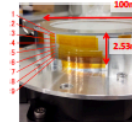
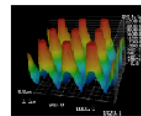
mitigation of $1/f$ noise differential systematics

ϕ 400mm flight representative demonstration model

$\phi \sim 1\text{m}$ 4K cryostat

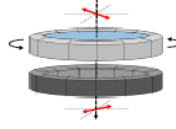
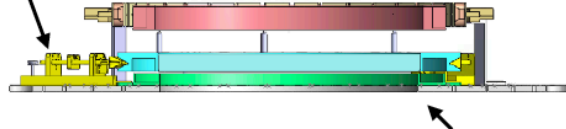
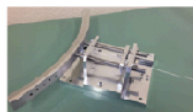


Anti-Reflection (AR)
Achromatic HWP (AHWP)

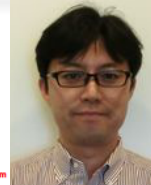


Cryogenic Synchronous Motor
Encoding System

Gripper Mechanism



Superconducting Magnetic Bearing



T. Matsumura

AIV plan

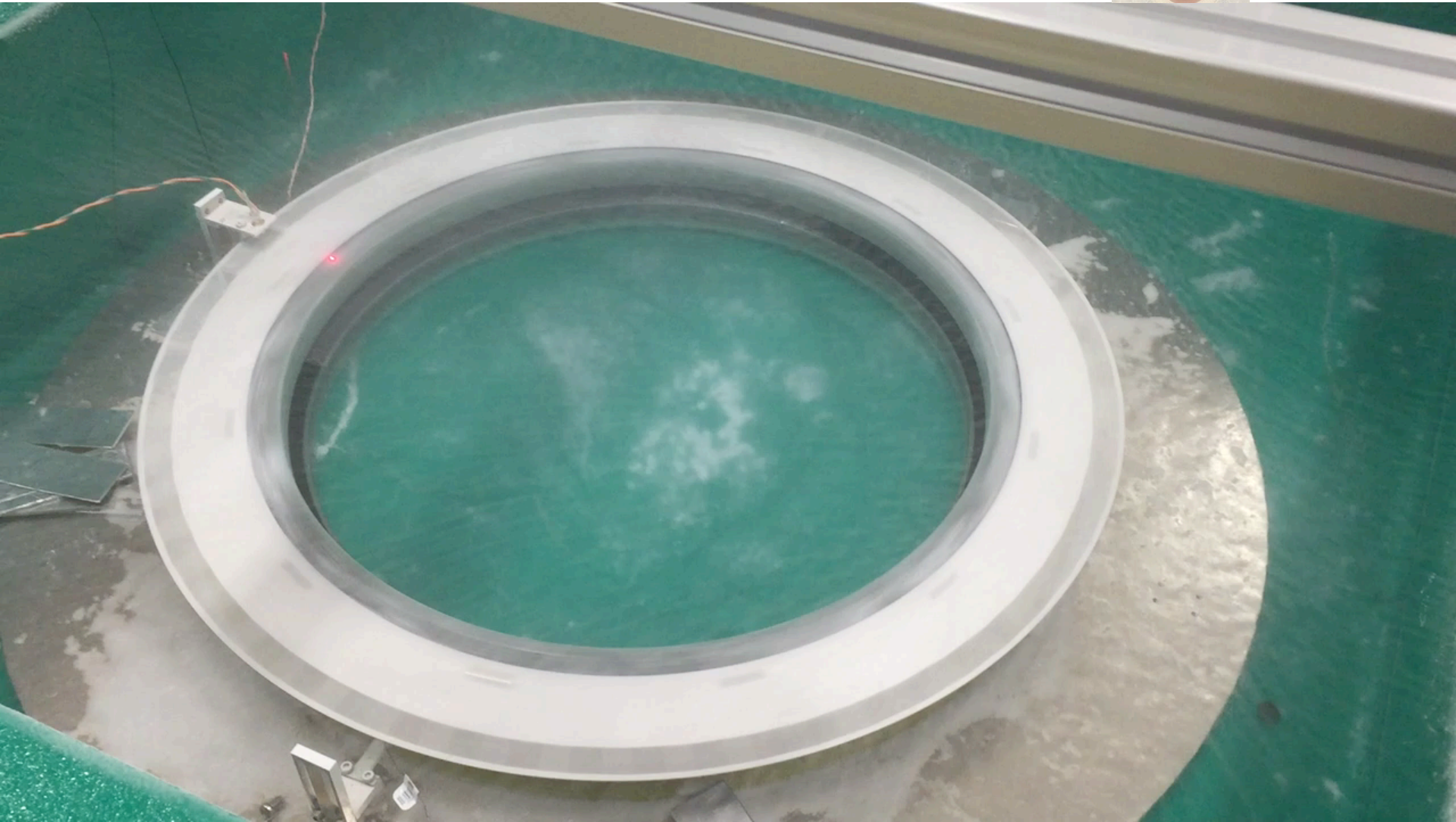


JAXA 6-m diameter space chamber

Rotation mechanism demonstration



Y. Sakurai



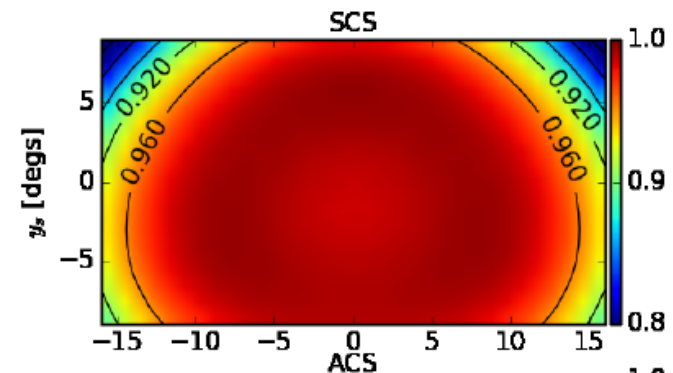
New Mirror Design for LFT



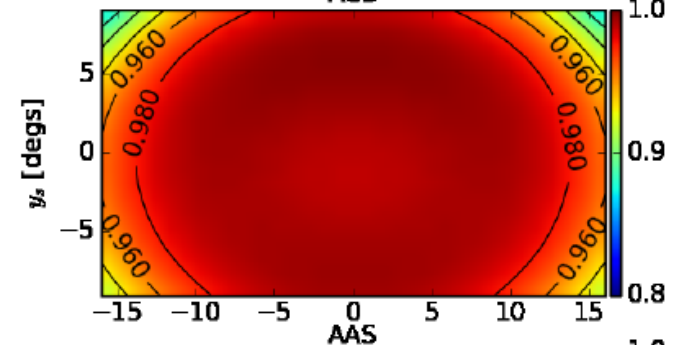
S. Kashima, H. Imada

Paper submitted [arXiv:1712.05139](https://arxiv.org/abs/1712.05139)

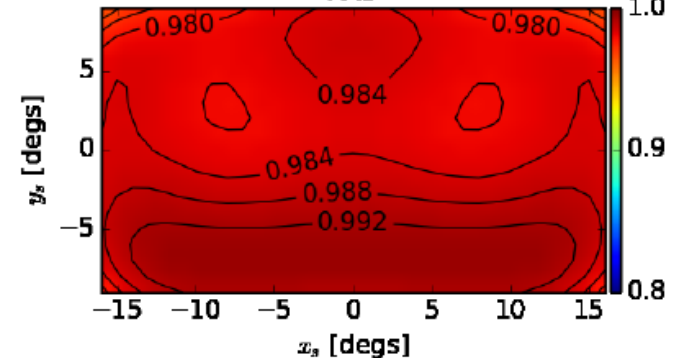
SCS: Simple off-axis conic surface



ACS: Anamorphic conic surfaces without higher-order terms



AAS: Anamorphic aspherical surfaces with terms up to the 10th order



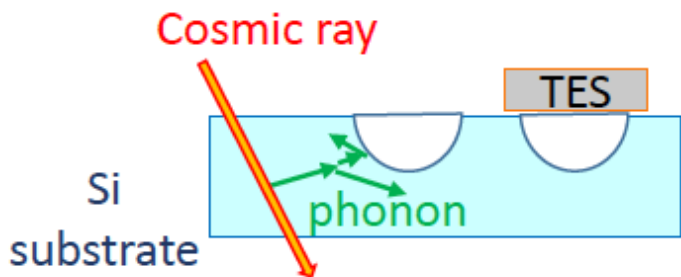
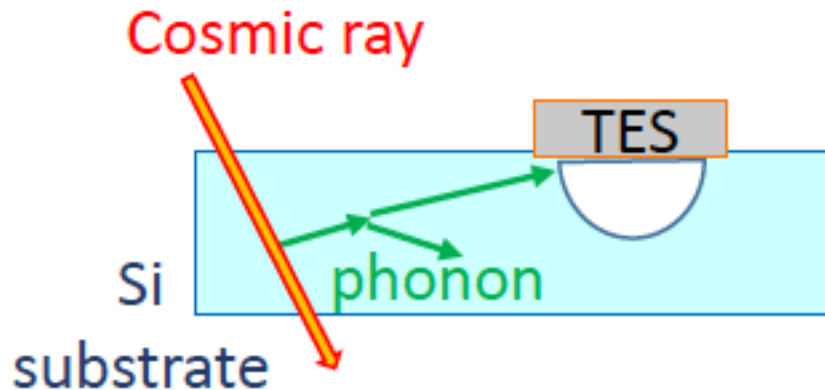
Strehl Ratio > 0.95 over 32 x 18 degrees²

宇宙線対策とTESボロメータ

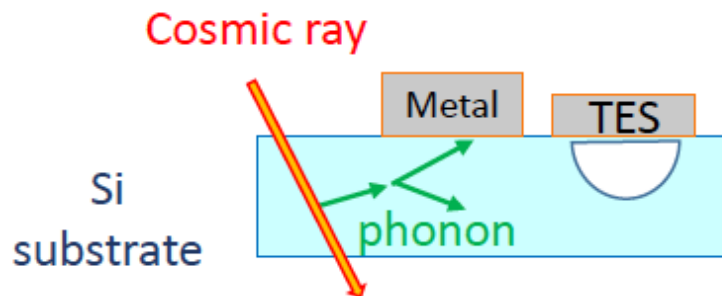


南雄人 (KEK)

- 宇宙線のエネルギー損失により最終的にフォノンが生成。地上と異なり宇宙空間では1次宇宙線のレートが高く、問題となる。



対策1: シリコンをカット



対策2: 金属で吸収

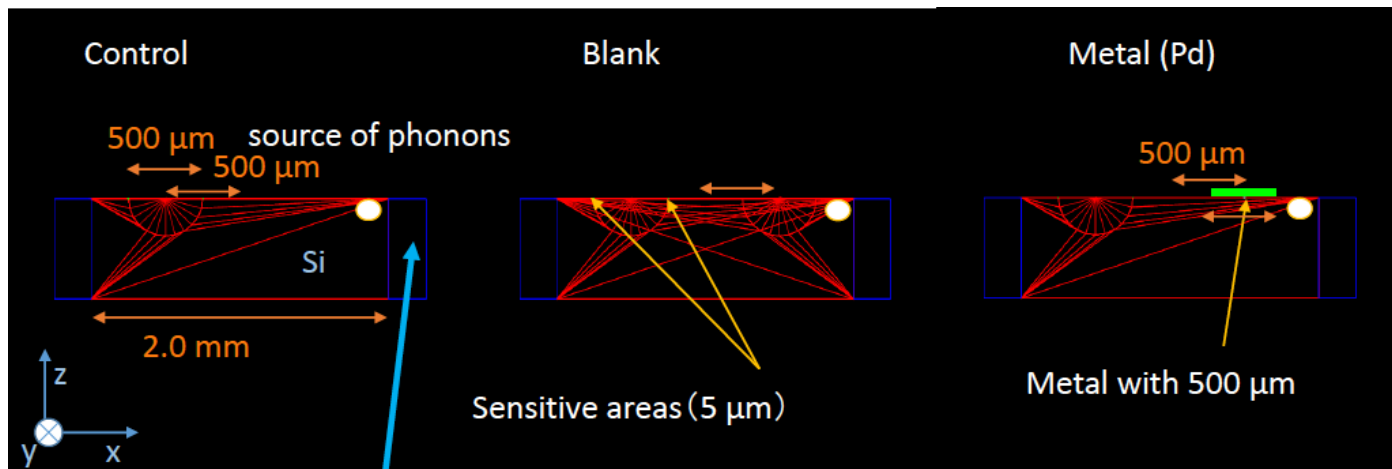
フォノンエンジニアリングの一種

宇宙線対策とTESボロメータ



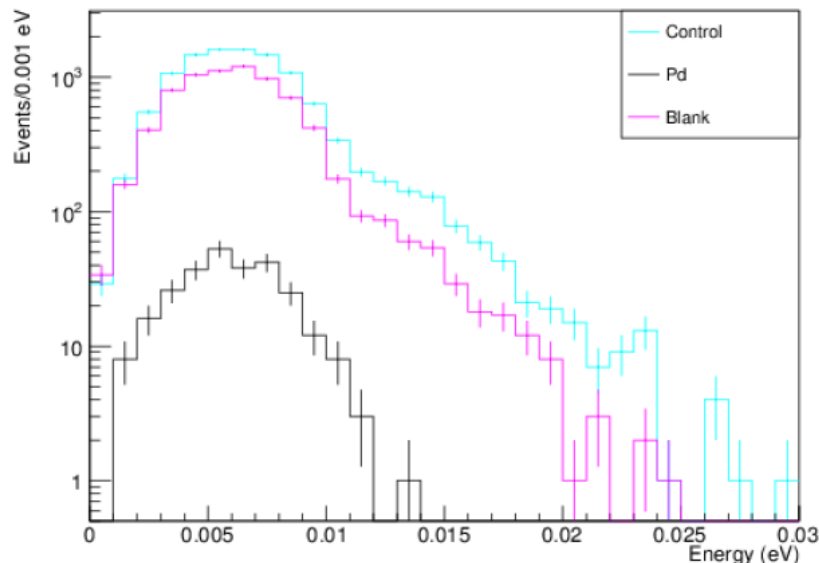
南雄人 (KEK)

フォノンシミュレータ
(G4CMP)による検証

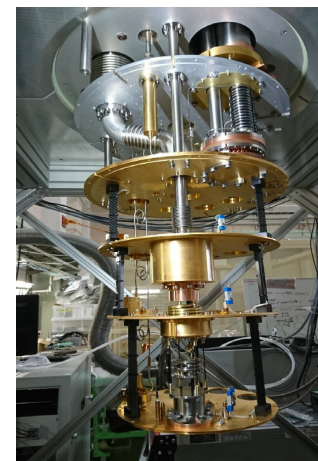


対策が
効果的

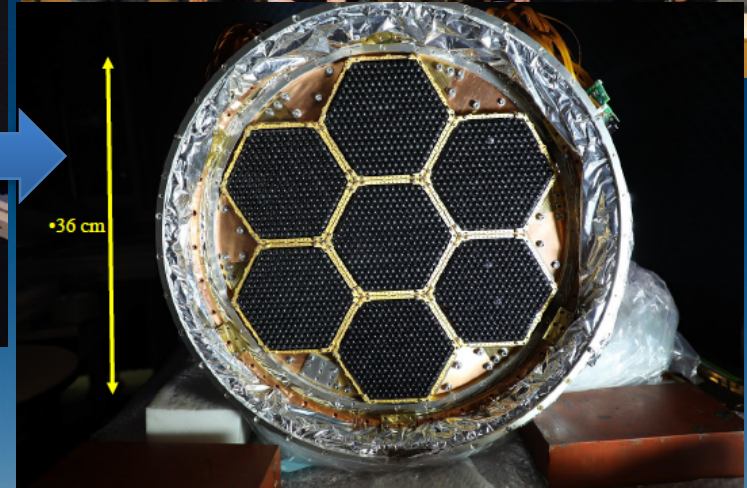
特に金属
による吸収
は効果的



検証試験システムを準備中



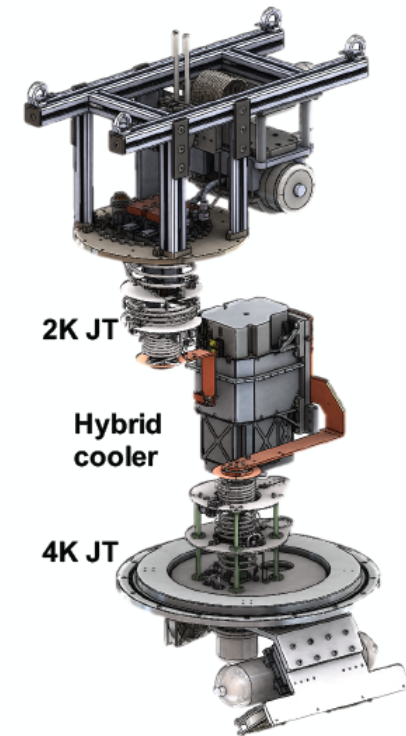
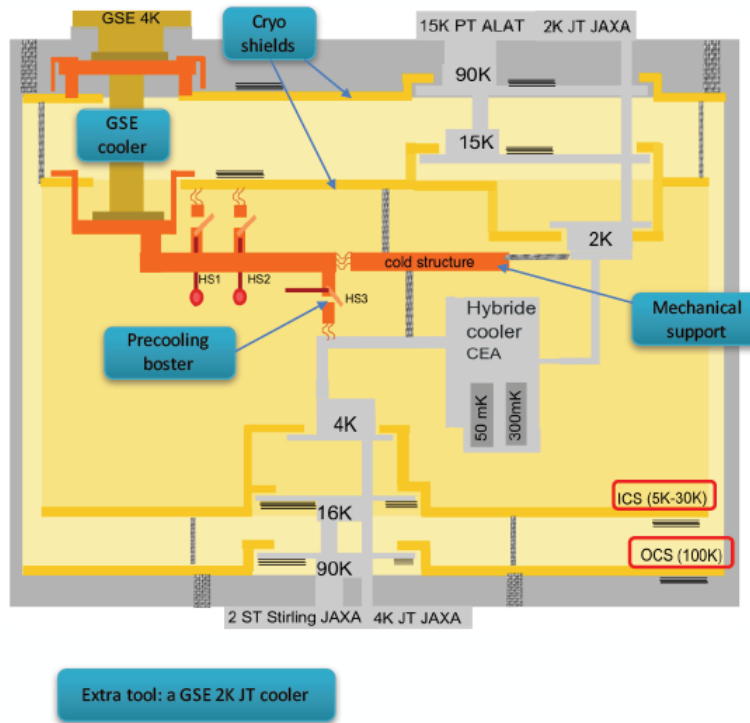
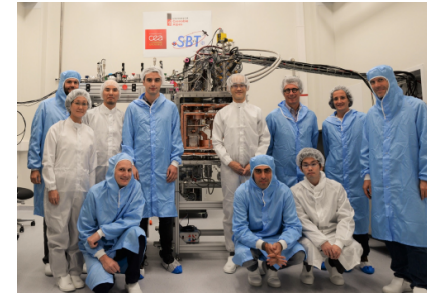
Simons Array (Ongoing)



Ground-based project carried out by CMB experimenters on LiteBIRD. 10 years of collaboration b/w Japan, US, Canada, Europe. Stepping-stone for LiteBIRD.

1.8K and 4K Cooling system

ESA-JAXA joint development of Stirling coolers and Joule-Thomson coolers





Science Outcome



Outcome of LiteBIRD



- System requirements are determined from the focused mission of LiteBIRD.
- LiteBIRD will produce lots of science results (collectively called “outcome”) thanks to its great precision.
- These science results however should have no influence on system requirements.
- In this way, LiteBIRD will keep system requirements simple, and make great outcome at the same time.

Success Criteria

- $\sigma(r) < 0.001$ (for $r=0$)
- $2 \leq \text{ell} \leq 200$



System Requirements



Outcome

- Full & Extra Success
- Lots of other science results
 - Large-scale E mode, implications for reionisation history and neutrino mass
 - Birefringence
 - Power spectrum features in polarization
 - SZ effect (thermal and relativistic correction)
 - Anomaly
 - Cross-correlation science
 - Galactic science

Science Outcomes



1. Full success
2. Extra success
3. Characterisation of B-mode
(e.g scale-invariance, non-Gaussianity, and parity violation)
4. Large-scale E mode and its implications
for reionisation history and the neutrino mass
5. Birefringence
6. Power spectrum features in polarization
7. SZ effect (thermal and relativistic correction)
8. Anomaly
9. Cross-correlation science
10. Galactic science

Summary document in preparation



宇宙論の人ばかりなので、10が弱いです。スタディに興味のある方は遠慮なく声をかけてください。どなたか宇電懇の人をスカウトしたいです。

まとめ

- 2020年代のスペースCMB観測の唯一解。大きなチャンスが到来している。
- 国際協力の著しい進展！
- 中間評価でも進捗について高い評価
- 2018年8月までPhase-A1。その後final selection.
- 2020年代半ばの打ち上げを予定（マスタープラン2020は「卒業」*している可能性）

宇宙論、シミュレーションから技術開発まで、面白い研究がたくさんあります。飛び込み参加大歓迎。

*2020年度に概算要求、2021年度にプロジェクト化を目指している。「区分II」に応募か？