LiteBIRD

石野宏和(岡山大学) for LiteBIRD WG 2016年3月23日(水) 高宇連研究会@東京理科大学



• LiteBIRDとは

•科学的目標・ミッション要求

ミッション要求を達成するためのシステム・R&D

- 統計誤差
- 前景放射除去
- 系統誤差
- LiteBIRDの状況
- ・まとめ

LiteBIRD

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

http://litebird.jp/

LiteBIRDは、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光を究極の感度で測定することを目的とする次世代の科学衛星。

ミッションの要求: 全天を3年間かけて観測することにより、大角度スケール (2 $\leq \ell \leq 200$)のBモード偏光スペクトルを測定。 原始重力波の強度を表す、テンソル・スカラー比 $r \geq \sigma_r < 0.001$ の精度で測定。(重力レンズ効果の差っ引きなし)

LiteBIRD working group 129 members, international and interdisciplinary (as of Dec 31, 2015)

JAXA H. Fuke I. Kawano	Osaka Pref. U.KEKM. InoueM. Hazumi (PI)K. KimuraM. HasegawaM. KozuN. KimuraH. OgawaK. KohriN. OkadaH. Morii	NAOJ A. Dominjon J. Inatani K. Karatsu S. Kashima T. Noguchi	TIT S. Matsuoka R. Chendra	APC Paris R. Stompor	U. Wisconsin K. Arnold	
H. Matsuhara T. Matsumura K. Mitsuda			Tohoku U. M. Hattori	Cardiff U. G. Pisano	UC Berkeley / LBNL D. Barron	
T. Nishibori K. Nishijo A. Noda	<u>Okayama U.</u> H. Ishino	Dkayama U.T. NagasakiDkayama U.R. NagataI. IshinoH. NishinoI. IshinoS. OguriI. KibayashiS. OguriI. KibeT. OkamuraI. KidaN. SatoI. OkamotoT. SuzukiI. YamadaO. TajimaT. Tomaru	S. Sekiguchi Y. Sekimoto M. Sekine S. Shu Saitama U. M. Naruse NICT	T. Morishima	Paris ILP J. Errard CU Boulder N. Halverson	J. Borrill Y. Chinone A. Cukierman T. de Haan N. Goeckner-wald P. Harvey
A. Okamoto S. Sakai Y. Sato	A. Kibayashi Y. Kibe Y. Kida			K. Ichiki		
K. Shinozaki H. Sugita Y. Takei M. Utsunomiya T. Wada N. Yamasaki T. Yoshida K. Yotsumoto	A. Okamoto Y. Yamada			<u>Natl. U.</u> T. Fujino	McGill U. M. Dobbs	C. Hill W. Holzapfel Y. Hori
	NIFS S. Takada M. Yoshida SOKENDAI	Y. Uzawa Konan U	K. Mizukami S. Nakamura	MPA E. Komatsu	O. Jeong R. Keskitalo	
	<mark>Kavli IPMU</mark> K. Hattori N. Katayama	Y. Akiba Y. Inoue H. Ishitsuka Y. Segawa H. Watanabe	I. Ohta <u>U. Tsukuba</u> M. Nagai T. Nitta	K. Natsume T. Yamashita	NIST G. Hilton	A. Kusaka A. Lee(US PI) E. Linder P. Richards U. Seljak B. Sherwin
Osaka U. S. Kuromiya M. Nakajima	H. Sugai			S. Mima C. Otani	J. Hubmayr	
S. Takakura K. Takano	Gakuin U. S. Matsuura	<u>U. Tokyo</u> N. Tomita			S. Cho K. Irwin S. Kernasoyskiy	A. Suzuki P. Turin
X-ray	JAXA	engineers	CMB experimeters		CL. Kuo D. Li	N. Whitehorn
IR astronomers			Super-conducting detector developpers		W. Ogburn	UC San Diego T. Elleot B. Keating G. Rebeiz

目的:宇宙背景放射(CMB)を用いたインフレーションの検証

- インフレーション宇宙仮説は原始重力波の生成を予言
- 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「インフレーションの指紋」を残す
- LiteBIRDはCMB偏光をスペースから全天精密観測する



CMB偏光のターゲットは「真空の量子ゆらぎで生まれる重力波」







全天にわたったCMBの偏光を 2種類のパターンに分解

密度ゆらぎ **● EE - F** (支配的,発見済み) 原始重力波 **● EE - F** ● BE - F (微弱,未検出) ● BE - F 「 ● BE - F (微弱, 未検出) ● BE - F 「 ● BE - F (微弱, 未検出)

高宇連研究会

LiteBIRDの測定精度(r=0.01のとき)



2016/3/23

何故σ(r) < 0.001を目指すか?

- 多くのモデルが r>0.01を予言 →>10 σ の発見
- 原始重力波が見つからない場合について
 - パラメータの少ないモデルにフォーカス(オッカムの剃刀の原理)
 - ほとんどの単一場スローロールモデルで

$$r\simeq 0.002 igg({60\over N}igg)^2 igg({\Delta\phi\over m_{pl}}igg)^2$$
 Lyth relation

N: e-folding, m_{pl} : reduced Planck mass

- LiteBIRDが r < 0.002 (95%C.L.)を達成した場合、これら代表的なインフレーションモデルで $\Delta \phi$ > m_{pl} を満たすものが棄却される。
 - 正しいモデルの同定というゴールにおける重要なマイルストーン
 - よりモデルに依存する解析でも同様な結果が得られる

原始重力波Bモード発見の物理学的意義 ・ インフレーション宇宙の直接的証拠

大統一エネルギースケールのラグランジアンの知見

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

- 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がある

ミッション要求を達成するためには、

- 宇宙における全天観測
 - 大角度スケールでの観測
 - 大気による影響なし
- •統計誤差
 - 約2300個の超伝導検出器で全天観測を3年間行い、3.2 μK・arcmin を達成
- 前景放射除去
 - 40~400GHz内の15バンド観測
- •系統誤差
 - ・半波長板による1/fノイズ、その他系統誤差の緩和

観測装置概要 Multi-chroic focal plane Mission module benefits from heritages of detectors other missions (e.g. Hitomi) and groundbased experiments (e.g. POLARBEAR). Bus module based on high TRL components <u>Continuously-</u> rotating half wave Line of sight plate (HWP) 0.1rpm FOV 10 x 20 deg spin MKID Lenslet TES ncident rate **Rotating HWP** radiation at aperture 4 K 30 deg. Mission Secondary mirror module Cryogenics slip ring Focal plane 100 mK \Box JT/ST and ADR (ASTRO-H Primary mirror 4 K Solar array paddle 400 mm heritage) Mirrors at 4K Bus module HGA: X band data transfer to the ground 高宇連研究会

2016/3/23





13





Hanany, Niemack, Page, arXiv:1206.2402

高宇連研究会

検出器(Transition Edge Sensor, TES, option)



Low Frequency Telescope (LFT)

The TES array with a lenslet developed for POLARBEAR by UC Berkeley and UCSD.







High Frequency Telescope (HFT)

Focal plane: 0.1K provided by Adiabatic Demagnitization Refrigerator (ADR)





The TES array with corrugated feedhorn developed for ABS, ACTpol, SPTpol by UC Boulder, NIST, and St高市运动研究会 2274 TES bolometers cover 15 bands in the frequency range of 40 to 400 GHz. Total sensitivity: $3.2 \,\mu$ K • arcmin with 3 years all sky observation with a margin factor of 1.6.¹⁵

検出器(Kinetic Inductance Detectors, KID, option)



関本裕太郎,野口卓,Wenlei Shan, Dominjon Agnes (国立天文台), 関根正和,関口繁之,Shibo Shu (東京大学),成瀬雅人(埼玉大学),新 田冬夢(筑波大学),川崎繁男,三田 信,宮地晃平(ISAS/JAXA), and LiteBIRD WG







図3 Horn 及びOMT-MKIDのプロトタイプ」6

Mission components





- Beam size : < 1 deg.
- FOV: 10 x 20 degs.
- Size : $2m\phi \times 2mt$

- Baffle and Mirrors @ 4K
- Half-wave plate to modulate polarization
- Tele-centric

Crossed-Dragone Optical System





- 冷却連続回転半波長板のプロトタイプ —





試験用クライオスタット

サファイア基板の Anti-Reflection Coatings T. Matsumura et al.









向于 建 听 先 云

2016/3/23

陽子ビーム照射試験

160MeV 陽子ビーム ~ 10 krad 照射 @放医研





例:サファイアの照射前後での屈折率の測定



照射試験ずみ

T. Matsumura, K. Komatsu, H.I, et al.

高宇連研究会



Dust+Synchrotron Results

w/o Noise



T. Yamashita, K. Ichiki, N. Katayama, E. Komatsu

系統誤差の解析的な見積もり



Systematics

W/O HWP

Effects	Types	Requirement in bias case (L2)	Requirement in random case	Notes	
Diff. beam width	False polarization	0.8 % @ ell=2 0.2 % @ ell=200	2 %	Instantaneous	そ
Diff. beam pointing		2 arcsec.	20 arcsec.		かよ
Diff. beam ellipticity		7 % @ ell=2 0.04 % @ ell=300	3 %	Focal plane average eases them by (up to)	へ 1/
Diff. gain calibration		0.002 %	0.04 %	one order of magnitude.	よ
Abs. gain calibration	Pattern modulation	Parity preserved	10 %	Calibration in every 10 min.	
Beam size stability		Parity preserved	O(10%)		
Angle calibration		1 arcmin.	10 deg.		
Pointing knowledge		3 arcmin.	5 arcmin.		
Requirements $\delta r < 0.57 \times 10^{-3}$ R. Nagata					ata

高宇連研究会

それぞれの項目 がレンジングに よるBモードス ペクトルの 1/100になる ように要求

E→B

T→B

2016/3/23

Systematics

T→B

Effects	Requirements w/o HWP	Requirements w/ HWP
Diff. beam width	0.8 % @ ell=2 0.2 % @ ell=200	10 %
Diff. beam pointing	2 arcsec.	2 arcmin.
Diff. beam ellipticity	7 % @ ell=2 0.04 % @ ell=300	10 %
Diff. gain calibration	0.002 %	3%
		R. Nagata

End-to-End simulation

- End-to-End シミュレーションの開発
 - 解析的に見積もるのが難しい 系統誤差の見積もり
 - 1/fノイズ、擾乱、サイド ローブ、HWP、較正精度
 HWPなしの場合、1/fノイズ や系統誤差を抑制できるかも、 並行して研究中
- 全検出器で、全天を3年間スキャン、時系列データからマップに変換し、スペクトルを算出
 $\vec{d} = A\vec{m} + \vec{n}$

$$\overrightarrow{m} = (A^t N^{-1} A)^{-1} A^t N^{-1} \overrightarrow{a}$$

2016/3/23



- 2024-2025年の打ち上げを目指す、JAXAの次期中型衛星候補
- 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2014)
- ・ 文科省の指定する新大型研究計画(10計画)の一つ (ロードマップ2014)。最高評価を得た5つの計画の一つ
- 2015年2月に宇宙科学研へ正式提案。最初の審査を通過し、
 2016年度に概念設計フェーズを開始する予定
- 米国ライトバードチームが焦点面検出器とサブケルビン冷凍機 を供給する提案をNASAに提出。最初の審査を通過し、 概念検討(Phase A)中
- 学術会議マスタープラン2017に向けて、
 天文・宇宙分科会の推薦を受けた
 2016/3/23



Provisional Timeline

Space Policy Commission under cabinet office intends to allocate predetermined steady annual budget for space science and exploration for ISAS/ JAXA to maintain its excellent scientific activities.

This does not mean the mission time lines below are guaranteed. However, they are foreseeable.



高宇連研究会



- LiteBIRDは、CMBのBモード偏光精密観測により、原始重力 波の強度を σ(r)<0.001の精度で測定することを目指す科学衛 星計画
 - •約2300の超伝導検出器素子で3年間の全天観測により、 $2 \le l \le 200$ の範囲のBモードパワースペクトルを 3.2μ K・arcminの精度で測定
 - ・観測周波数40~400GHzで、前景放射を除去
 - テンプレート除去法により、r=0.001をバイアス無しで決定可能。
 - シミュレーションを用いた系統誤差
 較正精度の見積もりと衛星仕様の要求を評価中

バックアップスライド



100mK焦点面の熱構造成立性(1/3)

F#3.5を採用した場合、100mKに冷却した焦点面。レンズレットも100mKに冷却。



Low Frequency Wafer (×8枚) (60/78/100) GHz High Frequency Wafer (×5枚) (140/195/280) GHz



現在の焦点面周辺にさらに 検出器をおくことは光学的な制約 においては可能。

ウエハー+レンズレットは形態係 数およびミリ波の吸収率を高めた い観測要請から吸収率が高い。

100mK焦点面の熱構造成立性(2/3)

<u>深宇宙及び光学系による放射による熱流入</u>



4

5

6

0.20

0.35

0.5

0.29

0.51

0.73

0.40

0.69

1.0

passフィルター。CMB地上/気球 実験EBEX/PB-2にて焦点面真上 に搭載。プラスチック材料なた めに、放射耐性を来年度試験 予定。



100mK焦点面の熱構造成立性(3/3)



F/#の選択と100mKステージ重量のトレードオフ

	F#2.5	F#3.0	F#3.5
重量 [kg]	2.8	4.0	5.5

POLARBEAR-2の固有振動数から、LiteBIRDの焦点面の重量(F#3.5=5.5kgを仮 定)と部材強度(PB2:Vespel→LB:NbTi、Planckで搭載)をスケールした結果、期 待される固有振動数は77Hz。

→ 0次モードの固有振動数~30Hz

冷凍機の振動周波数: 15Hz (2ST), 52Hz (4K-JT).(Astro-Hと同じ仕様を想定) 打ち上げ時は形状記憶合金を用いたローンチロックを用いる。(Planckで搭載済み。)

F#3.5の光学系を想定した焦点面(5K)でも、熱流入量1.2μWで80%のマージン。



CIEBで校正した場合の精度は?

小松さんのIDLコードを使って西野さんによる計算結果は以下の通り。

fsky=0.5 # fraction of the sky used by the ana	念及		K円I〜1推	認した	こ取机の	もの	
Imax=500. # maximum multipoles included	IRD baseline with coverture effic						
nu=np.array([60., 78., 100., 140., 195., 280.]	band Sens.		Sens.	Sens. w/ margin (0.608)			
fwhm=np.array([54.1, 55.5, 56.8, 40.5, 38.4	[GHz] [uK.arcmin		[uK.arcmin]				
noise=np.array([15.72, 9.86, 7.06, 5.59, 4.70		60	9.56			15.72	
			78	5.99			9.86
fiducial tensor-to-scalar ratio= 0.05			100	4.29			7.06
residual lensing power= 1.0 x original power		140 34			5.59		
residual dust power= 1.0 x original power	←──		195	2.86			4 70
frequency= 60.0 GHz			280	3.46			5.60
angle error= 3.17122285295 arcmin		Total consiti	200	1.61			2.03
frequency= 78.0 GHz				2.0			
angle error= 2.12352475391 arcmin		100/140/19	GHZ	1.9			3.2
frequency= 100.0 GHz		Rand (CHa)	Beam wi	dth CWUM [accorial	Edge tapor	[dp]
angle error= 1.7384817242 arcmin			Dealli W		arcminj	cuge taper	[ub]
frequency= 140.0 GHz		60	54.1			-2.5	
angle error= 0.949713960266 arcmin		78	55.5			-5	
frequency= 195.0 GHz		100	56.8			-9	
angle error= 1.04324587419 arcmin		140	40.5			-9	
frequency= 280.0 GHz		195	38.4			-16	
angle error= 2.86645828572 arcmin		280	37.7			-32	