CMB偏光観測による インフレーション研究

羽澄昌史(KEK) 2010年4月10日 高エネルギー物理学将来計画検討小委員会

目次

1. CMB偏光観測実験のサイエンスケース

- 2. どんな原理で観測しているのか?
 - 宇宙線・宇宙物理実験、素粒子実験と何が違うの?
 - 実験屋から見たプロジェクト成功のキモは?
- 3. どんなプロジェクトがあるのか?
 - 日本の取り組みは?

4. プロジェクトマネジメント関連

加速器実験とのバランスはどうする?

1.CMB偏光観測実験のサイエンスケース

1. 宇宙創生に最も肉迫できる実験研究

・ 「我々が存在する」ことへのセンス・オブ・ワンダーを喚起

2. プランク・大統一スケールの超高エネルギー物理

インフレーションのエネルギースケール決定の可能性

3. 量子重力理論検証の道を拓く

「不可能」とされてきた超弦理論のテストを可能にする

4. 原始重力波に加えて多彩なテーマがある

- ニュートリノ質量、ダークエネルギー、重カパリティの破れなど
- 保証された発見:「重力レンズによるBモード」

ビッグバン以前を探る



インフレーションエネルギーの決定

インフラトンは一種類として、ラグランジアン密度が以下の(素直な)形とする:

$$\mathcal{L}(\phi) = f[(\partial \phi)^2] - V(\phi)$$

Single-field Slow-roll Inflation

- ・ スカラー揺らぎの大きさAsはV/rに比例する(r:スカラー・テンソル比) $A_s = \frac{2}{3\pi^2} \cdot \frac{V}{rM_{Pl}^4} + (\text{small correction for} 1 \neq n_s)$
- ・ 温度揺らぎの測定からAsは決まっている→V/rも決まっている。

 $A_s = (2.4 \pm 0.1)^{-9}$

CMB偏光測定によりrが決まれば、Vが決まる。

$$V^{1/4} = 1.1 \times 10^{16} \text{GeV} \left(\frac{r}{0.01}\right)^{1/4}$$

CMB Polarization



PGW: Primordial Gravitational Wave

1) PGW generation

2) Last (Thomson) scattering
 →CMB photons polarized

3) Perturbation in $g_{\mu\nu}$ (PGW) modifies the polarization pattern.

"Polarization map"



CMB B-mode polarization

Tensor perturbation (PGW)

Scalar perturbation



E-mode

B-mode: Smoking gun signal of PGW



インフレーションエネルギーとBモード強度(r)が直接関係する!

rの制限

- 現在の観測による制限:
 - r < 0.20 (95% C.L.)
 - まだ間接的なリミットが勝っている。今後5年以内にB
 モード直接観測が追い抜く。



- 理論予想
 - スカラー揺らぎの傾き(n_s: scalar spectral index)とrの 間には関係がある

Slow-Roll Consistency

$$\varepsilon = \frac{m_{PL}^2}{16\pi} \left(\frac{V'(\phi)}{V(\phi)} \right)^2; \eta = \frac{m_{PL}^2}{8\pi} \left(\frac{V''(\phi)}{V(\phi)} \right)$$

$$n_S \approx 1 - 6\varepsilon + 2\eta$$

$$r \equiv T/S = 16\varepsilon$$

$$V^{1/4} = 1.1 \times 10^{16} \text{GeV} \left(\frac{r}{0.01} \right)^{1/4}$$

$$n_S \neq 1 \Longrightarrow r \neq 0$$

→ Single-field Slow-Rollだと r>0.01がfavorされる

これまでの偏光観測のまとめ



E mode

B mode上限 (95%CL)

直接観測による 現在の制限 r < 0.73

Funded CMB Polarization Experiments

((near) completed: Bicep1, Boomerang, CBI, DASI, Maxipol, QUaD, WMAP, VSA) (Proposed:ACT-POL, several others)

Name	Type/ location	Institutions	NEQ (µK√s)	Ell range	Frequencies	#Detectors	Resolution (arcmin)
Planck	Bolo- HEMT/Space	ESA, IAS-Orsay, Bologna + many	80 (@100G)	2-2000	25-1000	22H+32B (# of pol. ch)	8
Spider	Bolo/Balloon	CIT/JPL,CITA, CWRU,Stanford	4/3 (@ 96/145G)	2-250	96/145/225	288/512/512	60/40/30
BICEP2	Bolo/South Pole	CIT/JPL,CITA,Stanford		10-250	150	256	37
KECK array	Bolo/South Pole	CIT/JPL,CITA,Stanford		10-250	100/150/22 0	288/512/512	55/37/26
QUIET	HEMT/Chile	Chicago, CIT, JPL, KEK , Manchester, Miami, MPI, Oxford, Princeton, Stanford	12/9 (@ 40/90G)	20-1000	40,90	119x2 ~1000(P2)	10
EBEX	Bolo/Balloon	Minn, Berkeley, Brown, Cardiff, Columbia, McGill +8	5 (@150G)	20-1200	150,250,42 0	1406	8
PolarBeaR	Bolo/Chile	Berkeley,APC, Cardiff,Colorado, Imperial, KEK, McGill,UCSD	10 (@150G)	20-3000	90,150, 220	1274	3.5
SPTPOL	Bolo/South Pole	Chicago,Berkeley, Colorado, CWRU, Davis, JPL, McGill,SAO	14	20-10000	90,150, 220	1000-2000	1.1

Everyone except Planck claims r=O(0.01) sensitivity and results in 5 yrs.2010/4/10arxiiii = arxiiii = arxiii = a

LiteBIRDの感度



発見を超えて、スペクトル測定によるモデルの絞り込みへ

原始重力波が見つからない場合の観測の意義

Single-field Slow-rollではField variation(△φ)とrが関連する

$$\frac{\Delta \phi}{M_{Pl}} \gtrsim 1.1 \times \left(\frac{r}{0.01}\right)^{1/2}$$

- Field variation がプランクスケールより大きいか小さいかが、 背後にある量子重力理論のタイプ識別に役立つ
- r<0.01という結果はLarge field variation (Δφ > MPI)を(ほぼ) 棄却するので、正しい量子重力理論を探り当てるための貴 重な情報となる

量子重力理論の検証

- String Theory) N-flation, (many axion field)
 - : (String Theory) Axion Monodromy 🛛 💿 : (String Theory) Monodromy

■: Standard Model Higgs+ Non-minimal Coupling ▲: (String Theory) Fiber Inflation



A. Shimizu

Neutrino質量と大規模構造の関係

質量のあるニュートリノが質量をもちだすので



Neutrinoの質量に応じて、大規模構造の滑らかさが変わる。(大規模構造のポテンシャルは*M*,に依存する)

重カレンズ効果とは



重 カレンズ 効果と CMB

大規模構造のポテンシャルにより、パワースペクトルがゆがむ。



レンズ効果を受けたCMBのパワースペクトルから、 大規模構造のポテンシャルを決めることができる。 → *M_νが決まる*。

W. Hu



ニュートリノ質量とhierarchy

究極の測定(CMBpol)の場合



Scientific Shopping List

- Bモード(low l)による原始重力波の探索 インフレーションエネルギースケールの決定 ● 重力レンズによるBモード(high l)の発見 • ダークエネルギー ●ニュートリノ質量 Beyond the Standard Model 重力パリティの破れ (non-zero C_{EB} etc.) Multi-field inflationの証拠探索 ● Isocurvature (C_{TT}, C_{TE}, C_{EE}), 3点相関(non-Gaussianity) ● 宇宙再電離(low l) 前景放射のサイエンス
- 最終目標:インフレーションのテスト、パラメータの決定とモデルの選別 (実験屋の本音:予期せぬ発見で理論家をギャフンと言わせたい)

2.どんな原理で観測しているのか?



装置の
エッセンス

- アンテナ・光学系:電波の方向を位置に変える
- ・ 焦点面検出器:電波のエネルギーを電圧に変える

CMBフォトン

- (2.725±0.002) Kの黒体放射 (<u>160GHz</u>でピークを持つプランク分布)
- ~400個/cm³



- n << l では波としての検出が困難
- n >> | ではポアソン統計に従わない(フォトンバンチング)





なるべく対称なビームを作ることが大事 (泥臭い最適化問題)

Straight lenses give erect aperture image Tilted lens tilts aperture image Tilted Field lens By Huan Tran fixes Non-Overlapping Beams for POLARBEAR

'Footprint' of beams on primary

焦点面検出器

- - 差分検出、変調・復調検出、の二つに大別
- 検出器
 - 熱雑音低減の必要性 → 低温
 - 二種類に大別



超伝導検出器

- インコヒーレント検出器の一種
- 究極の感度を実現
- アレイ化・信号多重化に適している→ 将来の衛星実験はこれ!



なぜ今、地上観測?

- 高い感度を達成する原理
 - <u>極低温</u>偏光計

- :熱雑音の減少
- <u>アレイ</u>化(偏光計の数を増やす) :統計誤差の減少
- →衛星にはまだ搭載できない最新の偏光計を、 今なら、地上観測に使用することで、衛星観測を しのぐ感度を達成できる

→極低温偏光計アレイを用いた地上実験を推進 (今後5年間の方針)



レシーバーシステム

朱点面と光学系を冷却
 赤外線フィルターで熱侵入を防ぐ
 モジュレーション(半波長板など)
 振動除去



30

統計誤差



I/fノイズ対策:変調・復調も重要

(MMIC workshop @Caltech, Jul.08 Wavelength [mm] 10.00 1.00 0.10 0.01 1000 +2n < 1Log Photon Occupation Number ($log_{10} n$) $T = h\nu/$ $\mathbf{\Sigma}$ Blackbody Temperature CMB, v > 40 GHz n=1**CMB** dominates background from 100 -2 Terrestrial background: 3% emissive telescope + Mauna Kea atmosphere space for v < 700 GHz -4 n < 110 from ground for -6 Equivalent v > 4 THz-8 $n \sim 1$ Space background CMB + galactic & zodiacal dust R-J from ground for -10 v ~ 200-300 GHz 10 100 1000 10000 Frequency [GHz]

高エネルギー物理学将来計画検討小委員会

J. Zmuidzinas

系統誤差

- 実験屋が最も時間を割くところ
- スキャン法とキャリブレーション法は系統誤差減少と密接に 関連
- 複雑なので、一例のみ

温度揺らぎ+ 装置の交差偏波で $\Delta T \rightarrow E, B$ leakage 人工的にE-mode, B-modeを作ってしまう ~30000nK 1%の交差偏波 ~300nK スキャン・空の回転による変調・復調 O(10)nK 更なる変調・復調 高エネルギー物理学将来計画検討小委員会 33 2010/4/10





• 新学術領域計画研究A04(代表•服部誠)

- 宇宙マイクロ波背景放射と前景放射の高精度成分分離スキームの構築
- LiteBIRDでr ~ O(0.001)を達成するための研究 → 松村さんのトーク



2010/4/10

宇宙線・宇宙物理実験、素粒子実験と何が違うの?

「違う」というより、留意点を以下に列挙します

- 光子がポアソン統計に従うとは限らない(フォトンバンチング)
- コスミックバリアンスがある(宇宙はひとつ)
- 検出器雑音大→測定量(r, C_l)の誤差は測定時間に(ほぼ)反比例
- トリガーがない

似ているところ、同じところも多々あります 例)大規模データ取得システムの必要性 う 高エネルギー物理の技術が貢献できる

実験屋から見たプロジェクト成功のキモは何か?

- 最終的に立ちはだかるのは前景放射
- 、、と立証するまでが決して楽ではない:
 装置に起因する系統誤差との戦い



設計段階から系統誤差を詳細に 把握することがプロジェクト成功のキモ

干渉計重力波探索との関係

CMBのほうが感度が高いので、原始重力波の 発見にはCMB偏光Bモードがベスト。

CMBによる原始重力波の 発見は、将来の干渉計 重力波探索に定量的な 大目標を与える。

CMB偏光Bモード観測は 従来の光学観測と 将来の重力波観測との 懸け橋となる!



3.どんなプロジェクトがあるのか?



 衛星観測

WMAP (2001-)

温度観測が主目標

Planck (2009—)

偏光観測が主目標

(~2020-)

LiteBIRD (日本):小型衛星 EPIC(米国):中・大型衛星 B-Pol(ヨーロッパ):小型衛星



MAXIMA (1995、1999)

温度観測が主目標





BOOMERANG (1998、2003)

MAXIPOL

(2002, 2003)



偏光観測が主目標



PIPER (2013-)





SPIDER (2011, 2012)

EBEX (2009-2011)

2010/4/10

地上観測

過去には沢山の小規模実験あり。 ここではBモード発見の感度を持つこれからの実験のみ紹介 → チリ、南極の実験に絞られる

I) チリ・アタカマ高地(標高~5000m)の実験

QUIET (2008-)

田島さんのトー

POLABEAR (2010-)

T

ABS (2010-)

地上観測



地上観測

過去には沢山の小規模実験あり。 ここではBモード発見の感度を持つこれからの実験のみ紹介 → チリ、南極の実験に絞られる

2) 南極の実験

DASI QUAD BICEP2 KECK (2010-) (2011-)

南



	衛星	気球	地上
全天観測	0	0	×
大気・地表の(無)影響	0	Δ	Δ
長時間観測	0	×	0
装置の修理	×	×	0
予算	Δ	0	0
最新の偏光計アレイ	×	Δ	0

今後5年間:地上の感度が最も高い(予想)

日本の取り組み



3つのプロジェクトを推進

プロジェクト関係図



高エネルギー物理屋に出来るの?

- 欧米では既に多くの高エネルギー物理屋が参入し、実績を上 げている
- 高エネルギー物理屋の方が得意なパートもあり、即戦力になる
 例)大規模データ取得システム、大規模データマネジメント
- 高エネルギー物理のプロジェクトの進め方は汎用性が高いの でCMBにも適用できる

→ 十分やっていける (勿論修行は必要)

POLARBEAR Collaboration

Imperial College

Andrew Jaffe Daniel O'Dea

KEK

Masashi Hazumi Akie Shimizu

Haruki Nishino Takayuki Tomaru

Laboratoire Astroparticule & Cosmologie

Josquin Errard Radek Stompor

Lawrence Berkeley National Lab.

Julian BorrillEric LinderChristopher CantalupoHelmuth SpielerTheodore Kisner

McGill University

Peter Hyland

Matt Dobbs

5ヶ国(米加英仏日)、9 機関

University of California, Berkeley

Kam Arnold Daniel Flannigan William Holzapfel Jacob Howard Zigmund Kermish Adrian Lee (P.I.) Marius Lungu Mike Myers

Roger O'Brient Erin Quealy Christian Reichardt Paul Richards Chase Shimmin Bryan Steinbach Huan Tran Oliver Zahn

University of California, San Diego

David Boettger Hans Brian Keating Ian S George Fuller Mein Nathan Miller

University of Cardiff

Peter Ade

約

Hans Paar Ian Schanning Meir Shimon

Carole Tucker

University of Colorado

Aubra Anthony

Nils Halverson

による 国際共同実験

焦点面検出器

POLARBEARではアンテナ結合型TESボロメータによりCMBを観測する



レシーバーの近況

4月より全システムの検証のためにカリフォルニア州・Cedar Flatにおいて、望遠鏡に検出器、クライオスタットなどを組み込み、試験観測を行う



読み出しのためのSQUID box (He10' Sorption Cooler (0.3K)

焦点面検出器がクライオスタットに インストールされた様子



51

焦点面検出器

・試験観測では、2枚のウェーハを使う
 NEP ~6 x 10⁻¹⁷ WHz^{-0.5}
 (約360チャンネル)(本観測では7枚)
 ・実験室での総合試験では既に期待通りのリイズレベルを達成

POLARBEAR-II

- KEKがレシーバーシステム製作担当
 - 低温部(100mK)はKEK低温センターと筑波大 - JAXAのX線天文グループとの技術提携
- 検出器はバークレイの二色TES(90,150GHz)
 - 実効ピクセル数=3038
- 2013年搭載予定









LiteBIRDとは

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

サイエンス: インフレーションのエネルギースケール決定
 「ビッグバンの前を探る」

2008年9月に
 小型科学衛星WGとして承認

□ 宇宙空間における100GHz を中心としたCMB偏光全天観測

□ 特長:「究極の測定」を
 小型で実現
 (高い角度分解能は必要ない)



LiteBIRDワーキンググループメンバー

- 福家英之、松原英雄、満田和久、吉田哲也(ISAS/JAXA)、
- 篠崎慶亮、佐藤洋一、杉田寛之(ARD/JAXA)、
- 石野宏和、樹林敦子、三澤 尚典、美馬覚(岡山大理)、
- 松村知岳(Caltech)、 ← Planck, BICEP, EBEX

- 大田泉(近畿大)、
- 吉田光宏(加速器/KEK)、
- 片山伸彦、佐藤伸明、住澤一高、田島治、西野玄記、羽澄昌史、長谷川雅也、樋口岳雄(IPNS/KEK)、 CUIET, POLARBEAR
- 柳沼えり(総研大)、
- 高田卓(筑波大)、
- 木村誠宏、鈴木敏一、都丸隆行(低温セ/KEK)、← POLARBEAR
- 小松英一郎(UT Austin)、 ← WMAP
- 鵜澤佳徳、関本裕太郎、野口卓(ATC/NAOJ)、 ← ALMA
- 茅根裕司、服部誠(東北大理)、
- 大谷知行(理研)

41名 2009年12月31日現在

コンサルタント: 小玉英雄(KEK)、中川貴雄(JAXA)、川邊良平(NAOJ)

← SPICA、DIOS、大気球

Strawma

Lenses

Focal plane

³He sorption fridge

SQUIDs

BUS unit

ADR

	- 現目				
	衛星運用期間	2年以上 (ミッション部の顧用年数5年)			
	軌道	Sun-Earth L2点、あるいは近地球の太陽同期軌道			
	姿勢制御精度	5arcmin (ビームの1/10)以下。			
	デレメトリ	レメトリ 2Mbps。			
	重量	ミッション部 200Kg 以下、総重量 400Kj	g 以下。		
	消費電力	ミッション部 200W 以下、総消費電力 50	DOW LUF		
the sector of	斋却系	赤外線天文衛星 SPICA の冷却方式と同志	素、冷媒を使用	しないで、放射	
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1		治却と機械式冷凍機で冷却。打ち上げ後スペースで冷却。			
	焦点面模出器	超伝導検出器アレイ(TES ボロメータ又は STJ)。			
	極出器感度	Total NET $< 1 \ \mu K \sqrt{s}$			
Anti Sun direction/Spin avia	種出周波数	少なくとも 90GHz、150GHz の二周波数	で十分な画派	以、 角度分解能	
Anu-Sun unecuon/Spin axis		(1度以下)、視野を確保。スペースの制限内で45GHz、300GHzを出来			
\leq $>$ \wedge	one and control of	うぼり加える。	10 10 1 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	Constant (1981 ->	
	変調・復調	衛星主体を回転。更にビームによる系統	許定を除くため	つの変調を加えく	
			a a de la se	and the second second	
Bores	sight	ミッション部	重量 (kg)	電力 (W)	
		焦点部 (検出器・光学系)	60	0.000	
		ミッション部電気系 (検出器)	20	100	
ZANN		バッフル・構造	40		
		クライオハーネス	5		
		サブケルビン (ADR) 冷凍機	20	20	
		2K 級 (JT+スターリング) 冷凍機	30	160	
	1	ミッション部合計	175	280	
	1	バス部	重量 (kg)	電力 (W)	
		構造体・熱制御・計装	50	30	
Half ways a	lata	太陽電池バドル・電源系	30	20	
Hall-wave p	late	データ処理・通信系	20	60	
		次動制御系,推進系	50	100	
		ズス部会計	150	210	
			130	210	
		88 AT	325	490	
Ra	adiation sh	ields 軽量化の力さ	ビ(ナ2,占		
		1)SPICAタイ	イブのヨ	予冷 系	
JT/ST and co	cooler hea	ad 2)多色焦点	面		

(including readout electronics, attitude control system, telemetry)



占





59

dr3 for r=0.010 clean3 method

LiteBIRD: 戦略とDesign Concept

- ・ 現在多くの地上/気球実験が進行中・準備中
- アメリカ/ヨーロッパでのCMB偏光衛星実験検討 ⇒大型衛星実験(2020年代)
- インフレーションの直接検証にテーマを絞れば、小型で究極の測定が可能
 → 軽量化を追求し、早期(2020年より前)の打ち上げの道を探る

LiteBIRD Design Concept

- 小型衛星に搭載するために軽量化及びコンパクト化 質量 < 400kg, 全長 < 1m
- 検出器の数を増やし統計誤差を下げるための広い焦点面
 検出器数 >1000, 直径 = 30cm, 視野 30° × 30°
- 前景放射を分離するための広い帯域をカバーした光学系及び焦点面 帯域 60~250GHz
- ・ 偏光の系統誤差を減らすためのシンプルな光学系 1/2波長変調板はサファイアを用いる。直径 < 30cm



CMB観測プロジェクトの特色

4.プロジェクトマネジメント関連

プロジェクトの特徴

- ・人員
 - 地上: 数人~数十人
 - 衛星: 数十人~数百人

(ジャズバンド) (オーケストラ)

- •予算規模
 - 地上: 数億円~30億円
 - 衛星:90億円~1000億円

- (あくまで目安)
- ハイリターン、比較的ハイリスク
 - •実験の難易度はかなり高い

LiteBIRD: プロジェクトマネジメントに関する進展

- 1. 日本物理学会・宇宙線宇宙物理領域 「宇宙背景輻射」セッション誕生(2009年3月)
- 2. 平成21-25年度科研費新学術領域研究(研究領域提案型) 「背景放射で拓く宇宙創成の物理—インフレーションからダークエイジま で—」採択(2009年7月)
 - メインは地上でサイエンスの結果を出すこと
 - LiteBIRDに関しては基礎的試作の経費(特に焦点面検出器)
- 3. 前哨戦としての地上CMB実験(QUIET、POLARBEAR)
 - 要素技術の実証
 - 系統誤差の徹底理解
- 4. 他プロジェクトとの技術的連携 → 相乗効果・波及効果
 - DIOS: 冷凍機システムなど
 - ASTE: TESボロメータ読み出しシステムなど
- 5. 日本学術会議「天文学・宇宙物理学の展望と長期計画」において言及



H21より岡山大・KEK・国立天文台・理化学研究所の共同研究開始 クーパー対破壊型検出器アレイの開発

KEKクリーンルーム作業風景



日本物理学会第65回年次大会(岡山大学)

日本学術会議「天文学・宇宙物理学の展望と長期計画」

表 3-1 電波観測諸計画まとめ

名称	目的	計画概要	代表者、提案・ 推進主体	予算規模	進捗状況
SKA (Squre	①中性水素ガスの直接撮像に	ガスの直接撮像に 長波長用アンテナを 1000km 以上の 欧州・米国		1000億円	2020年完成を目指
Killometer Array)	よる宇宙の暗黒時代の探求、	範囲に 2000~3000 台展開し、集光面	州などによる国		している。現在、
	②宇宙磁場の進化の研究、③	積1 km ² の電波望遠鏡とする。観測	際協力。日本は		SKA フォーラム
	重力理論の検証、④中性水素	波長は 3m から 1.2 cm。画期的な高	参加を検討する		が、検討を進めて
	ガスの観測による近傍銀河全	感度と高分解能(最高0.001秒角)の実	段階。		いる段階。日本は、
	天サーベイ観測と銀河進化、	現を目指し、センチ波帯では現在最大			オブザーバーを派
	⑤宇宙における生命の起源の	の干渉計 VLA の 50 倍以上の感度、			遣。
	探求	100 倍以上の空間分解能を達成する			
CMB 偏光観測衛	インフレーション期に生成さ	偏光の検出に最適な1度角の角度分	羽澄昌史	90億円	2017-2020 年頃打
星(LiteBIRD)	れた重力波によって生成され	解能を持つミリ波超伝導 2 次元検出	高エネルギー物		ち上げ。宇宙理学
	た宇宙マイクロ波背景放射の	器を搭載する無冷媒冷却方式の小型	理学研究機構		委員会にWG設置
	偏光成分の測定	衛星を早期に打ち上げる。		5	
地上大口径サブ	宇宙初期の星形成銀河をサブ	口径 20-30m 級のサブミリ波望遠鏡	川邊良平	30-40 億	2017年頃。
ミリ波望遠鏡計	ミリ波で観測し、そこでのダ	強をチリ高地に建設する。広視野連続	国立天文台野辺	円	
画	ークハロー分布や大規模構造	波・ヘテロダイン受信大型カメラ、超	山観測所		
	を明らかにする。	広帯域分光装置を搭載する。	d:	5	c.
サブミリ波	銀河系中心のブラックホー	アルマを中核に、サブミリ波 VLBI	国立天文台、米	100億円	2020年頃
VLBI によるブ	ル、SgrA*の事象の地平線を	網を構築。観測周波数は230 GHz と	欧などの国際協		
ラックホール解	直接分解観測する。	345GHz、10 局程度の観測局を南米	カ		
像望遠鏡計画		高地に直径8千kmの範囲で配置。			

氏名	職名	プロジェクト		プロジェクト		プロジェクト		備考	KFK―CMBプロジェクト人 昌夫
		Q	PB	LB		(ノーナン会加プロジェクト)			
羽澄昌史	素核研教授	~	~	~		(『はエは参加ノロンエント)			
片山伸彦	素核研教授			~	科研費ベースの参加				
鈴木敏一	低温セ講師			~	科研費ベースの参加				
田島治	素核研助教	~			2年間シカゴ常駐を終え4月1日帰国予定				
長谷川雅也	素核研助教	~							
都丸隆行	低温セ助教		~		1年間。	バークレー常駐を終え6月帰国予定			
吉田光宏	加速器助教			~					
樋口岳雄	素核研助教	~			科研費	マースの参加			
木村誠宏	低温セ助教		~						
佐藤伸明	素核研助教			~					
鈴木純一	機械セ技官		~						
松村知岳	素核研特任助教		~	~	現・カノ	レテクポスドク			
西野玄記	学振PD		~		現·基	盤Aポスドク			
石徹白晃治	A01ポスドク	~			現·東	大D3(重力波·坪野研)			
永井誠	A01ポスドク	~			現·筑	波大準研究員(ミリ波サブミリ波・中井研)			
永田竜	基盤A非常勤	~			QUIET	ーIの基盤A			
茅根裕司	特別共同研究員D3	~			東北大	、服部研D3			
清水景絵	総研大M2		~						
渡辺広記	総研大M2		エネルギ	✓	本務は	A02の超伝導検出器開発			
高田望10/4/10	筑波大助教	(同)-	V	初坦	K雀K低	温セと密接に協力しており、ここに含める 68			

加速器実験とのバランス

- 根本法則探求に関わる宇宙ネタを厳選して高エネルギー物理屋が貢献することは、意義が高いと思われる
 - 宇宙を実験室にして物理の根本法則を探る
 - インフレーション研究は極めて高エネルギー物理学的側面が強い好例
- 重要な加速器実験は準備期間がますます長くなっている。一方、宇宙観測 によるBeyond the Standard Model探索は黄金期を迎えつつある う何とか両方やろう
 - 一人の高エネルギー屋が研究ライフの中で素粒子、宇宙の両方をやれるという スタイルは魅力的
- 次期基幹計画(今のところILC)と小・中規模宇宙計画(例えばLiteBIRD)との組み合わせで分野のアクティビティを最適化する
 - 素粒子・宇宙間の双方向の人事交流でWin-Winの関係が作れればベスト

フルサクセスの場合

(重カレンズ)Bモードの発見
 – QUIET、POLARBEAR、etc.



~5年

~15年

- 原始重力波の発見(if r ~0.05)
 -r~0.01までを探査
- Bモードパワースペクトル測定 とインフレーションモデル絞り込み (if r~O(0.01)) または、Large Field Inflationを棄却

- r ~ 0.001までを探査

まとめ

- 1. CMB偏光観測実験は宇宙創生に最も肉迫できる実験研究。
- 2. 超高エネルギーのユニークなプローブとして高エネルギー物理にとって 重要。
- 3. 観測原理は電波天文が基盤。しかし、ナノケルビンを達成するために、 独自の技術が発展している。
- 4. 比較的小規模の実験が複数存在。日本グループは、今後5年間は国際 協力でチリでの観測(QUIET、POLARBEAR)を推進。
- 5. 今後5年間で重力レンズBモードは発見されるだろう。原始重力波の発見のチャンスも十分にある。
- 6. 10年後に向けた衛星(LiteBIRD)のスタディもはじまっている。素粒子と 宇宙の双方にとって重要な中規模のプロジェクトとして、高エネルギー物 理実験屋が活躍できる。