A large, oval-shaped map of the Cosmic Microwave Background (CMB) showing temperature fluctuations. The map is color-coded, with blue representing cooler regions and red/yellow representing warmer regions. The background is black with some blue decorative lines and dots in the bottom-left corner.

今後のCMB観測計画

とガンマ線天文学

KEK CMB実験グループ

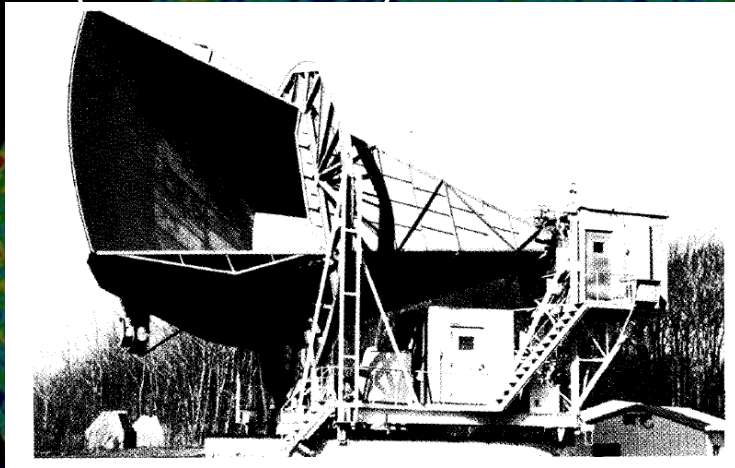
羽澄昌史

masashi.hazumi@kek.jp

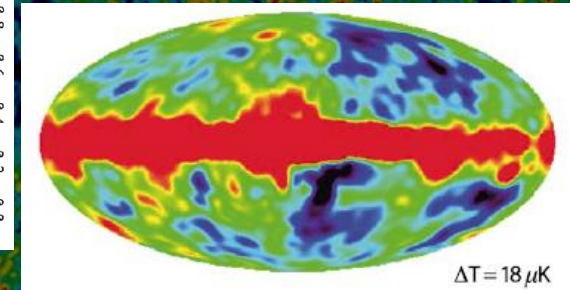
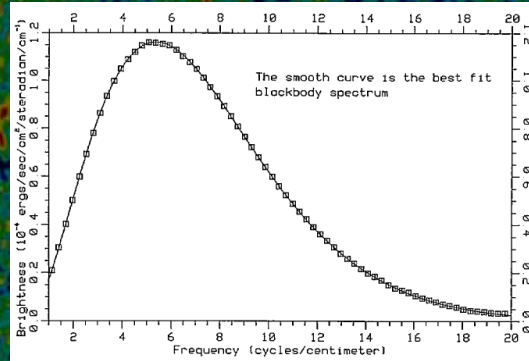
CMB観測：過去の大事件

Discovery of CMB (1965)

“excess noise” of 3.5K
(@ 7.35cm)



Discovery of the blackbody form and anisotropy of the CMB (1992)

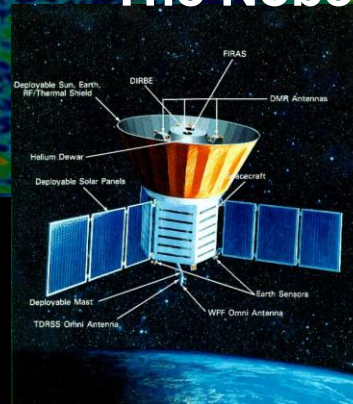


The Nobel Prize in Physics 1978



Arno A. Penzias Robert W. Wilson

The Nobel Prize in Physics 2006



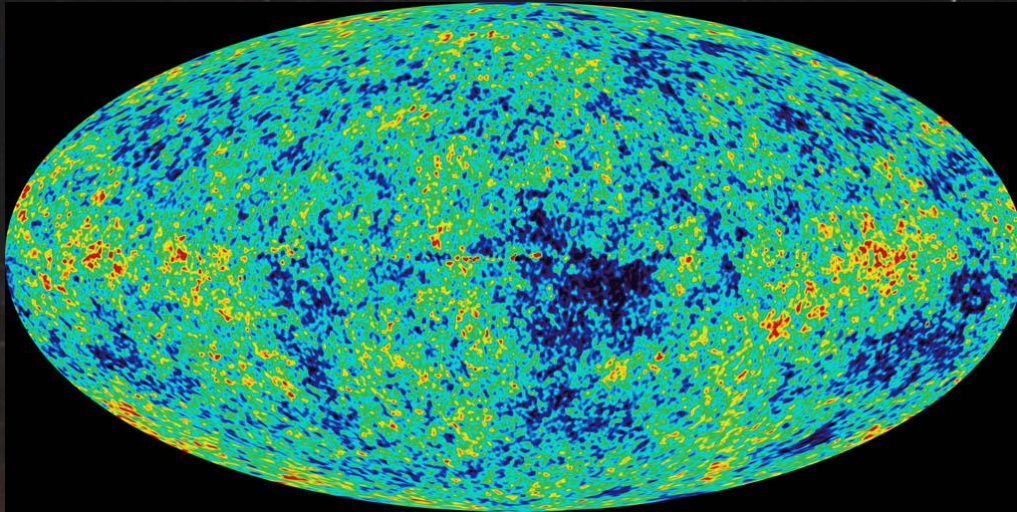
COBE satellite



John C. Mather George F. Smoot

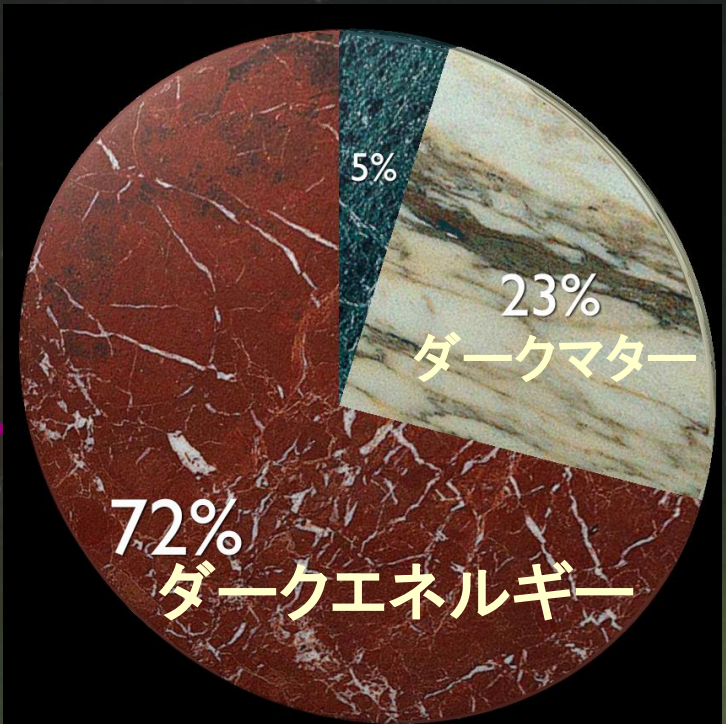
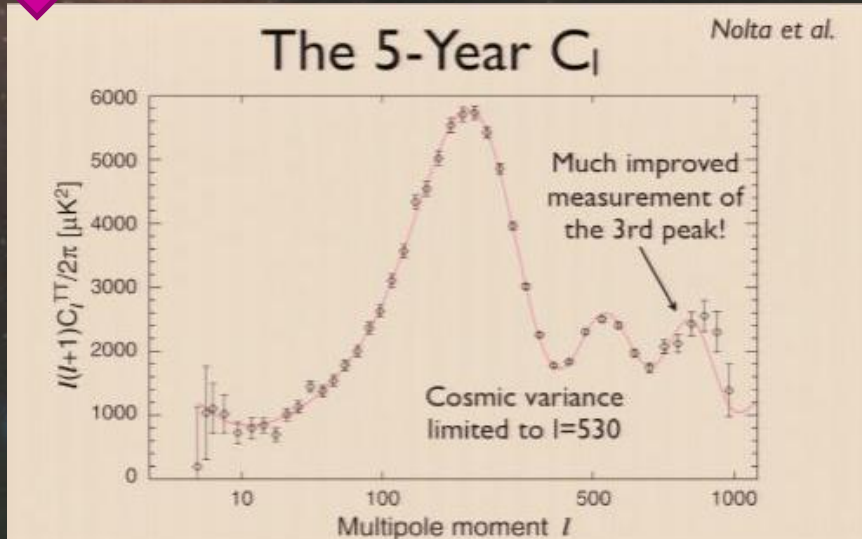
WMAP

圧倒的な解像度で



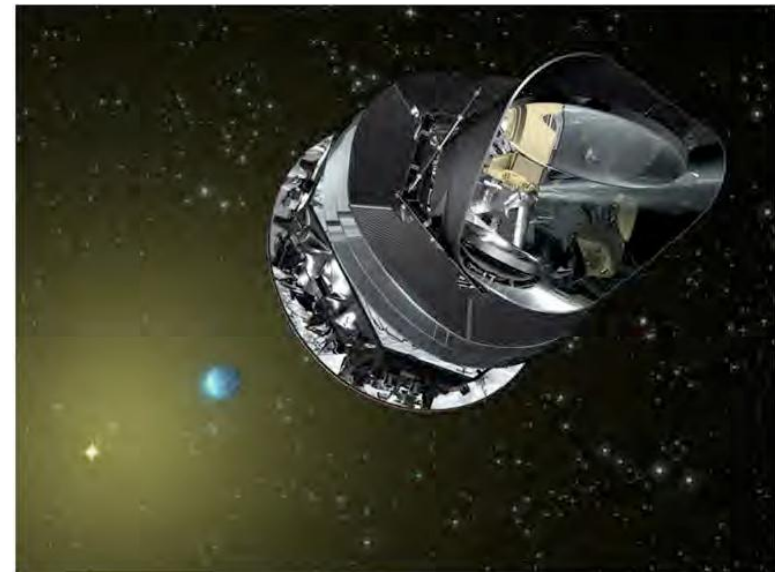
宇宙の謎の成分を
あぶりだした。

温度揺らぎを精密観測し

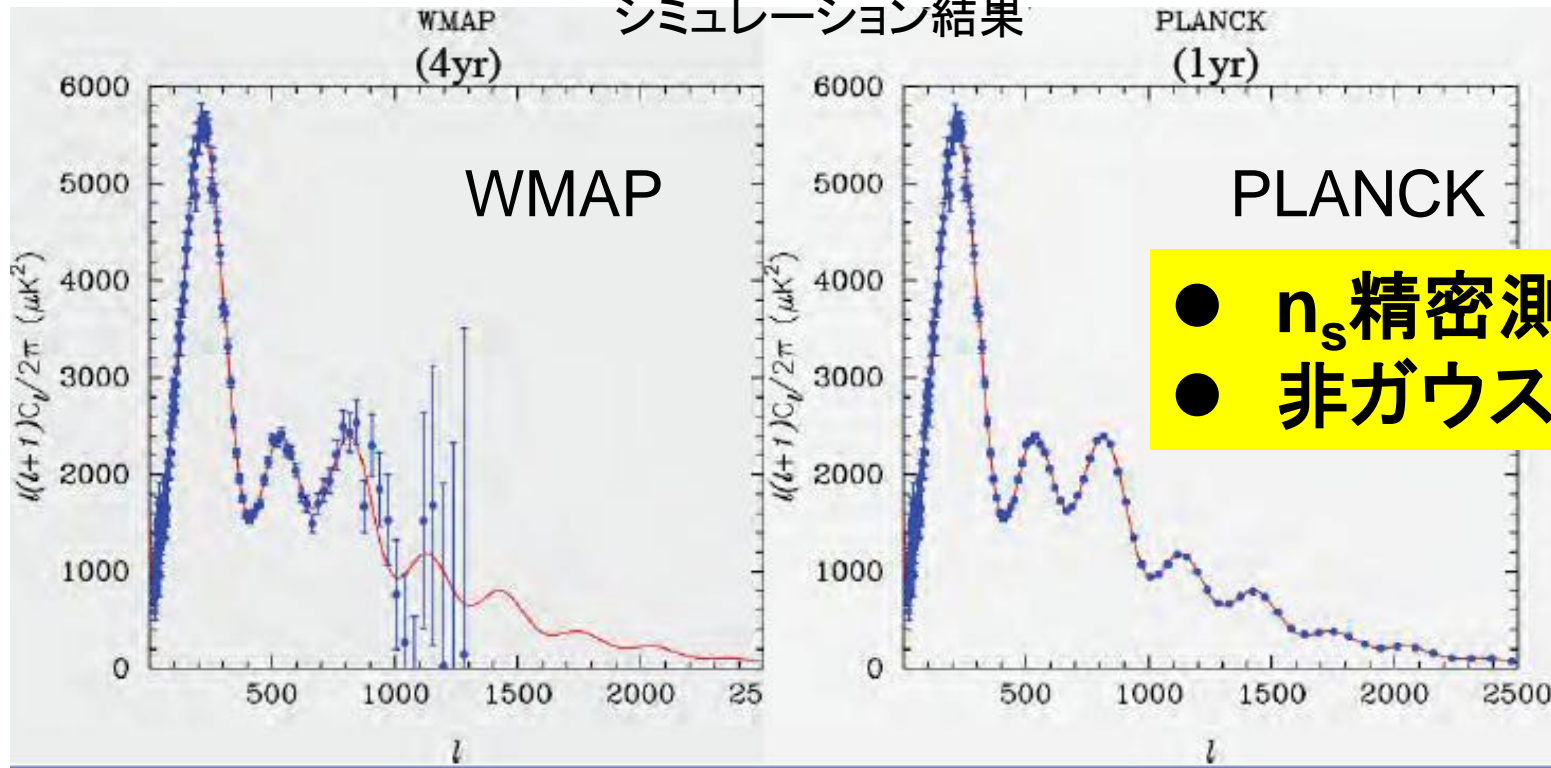


Planck

打ち上げ成功！
温度揺らぎ計測の決定版
2012年に初期結果公開予定



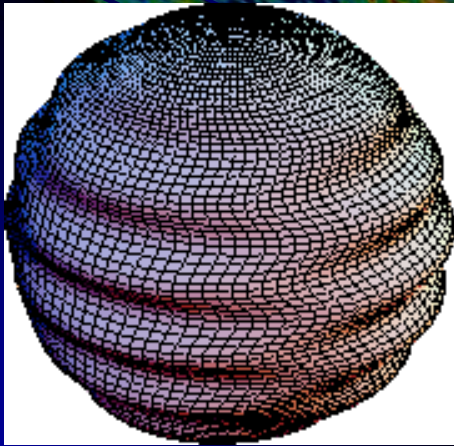
シミュレーション結果



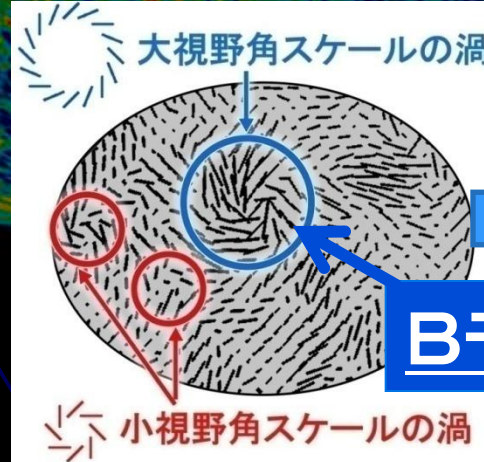
今後の大目標：偏光Bモード

- CMB偏光マップは精密に観測されておらず、謎に包まれている
- CMB偏光測定は、原始重力波発見のベストな方法である
- 原始重力波の検出は、宇宙論、素粒子論双方に大きく寄与する
 - 宇宙論：インフレーションの決定的な検証
 - 素粒子：超高エネルギー（LHCの一兆倍）の物理

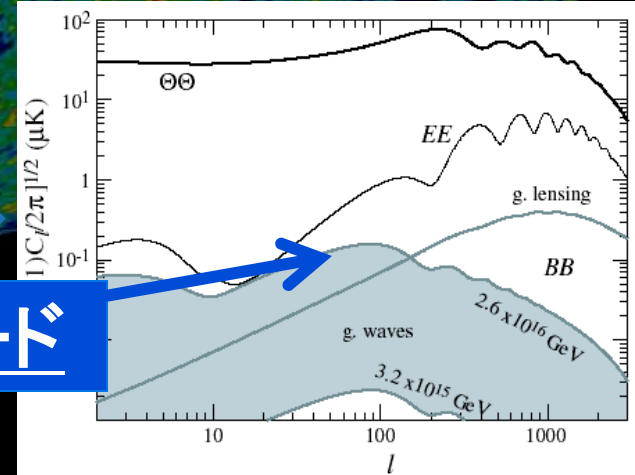
原始重力波



CMB偏光度マップ

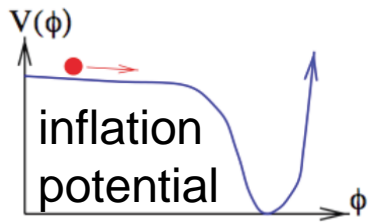
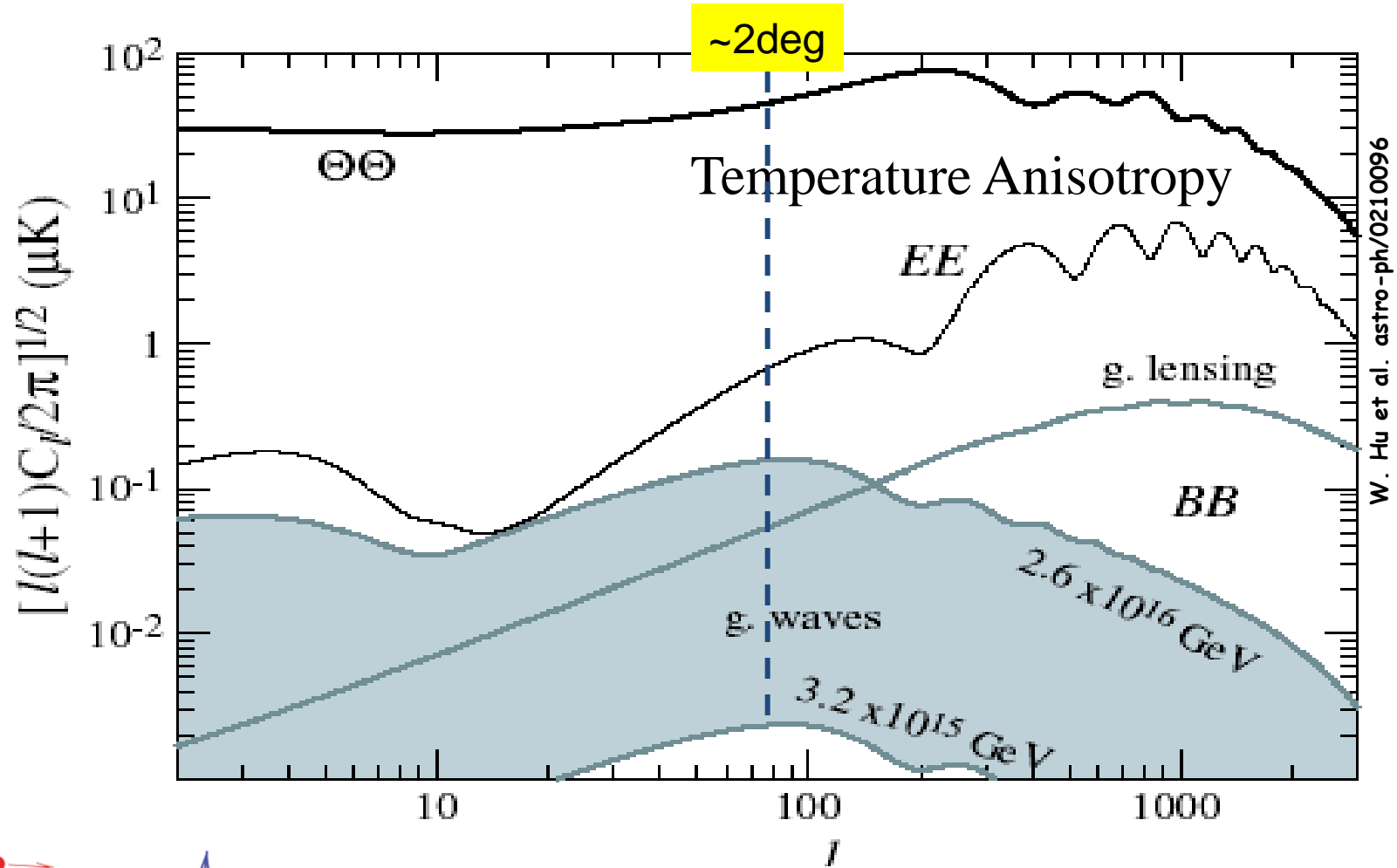


パワースペクトル



Bモード

今後の大目標：偏光Bモード

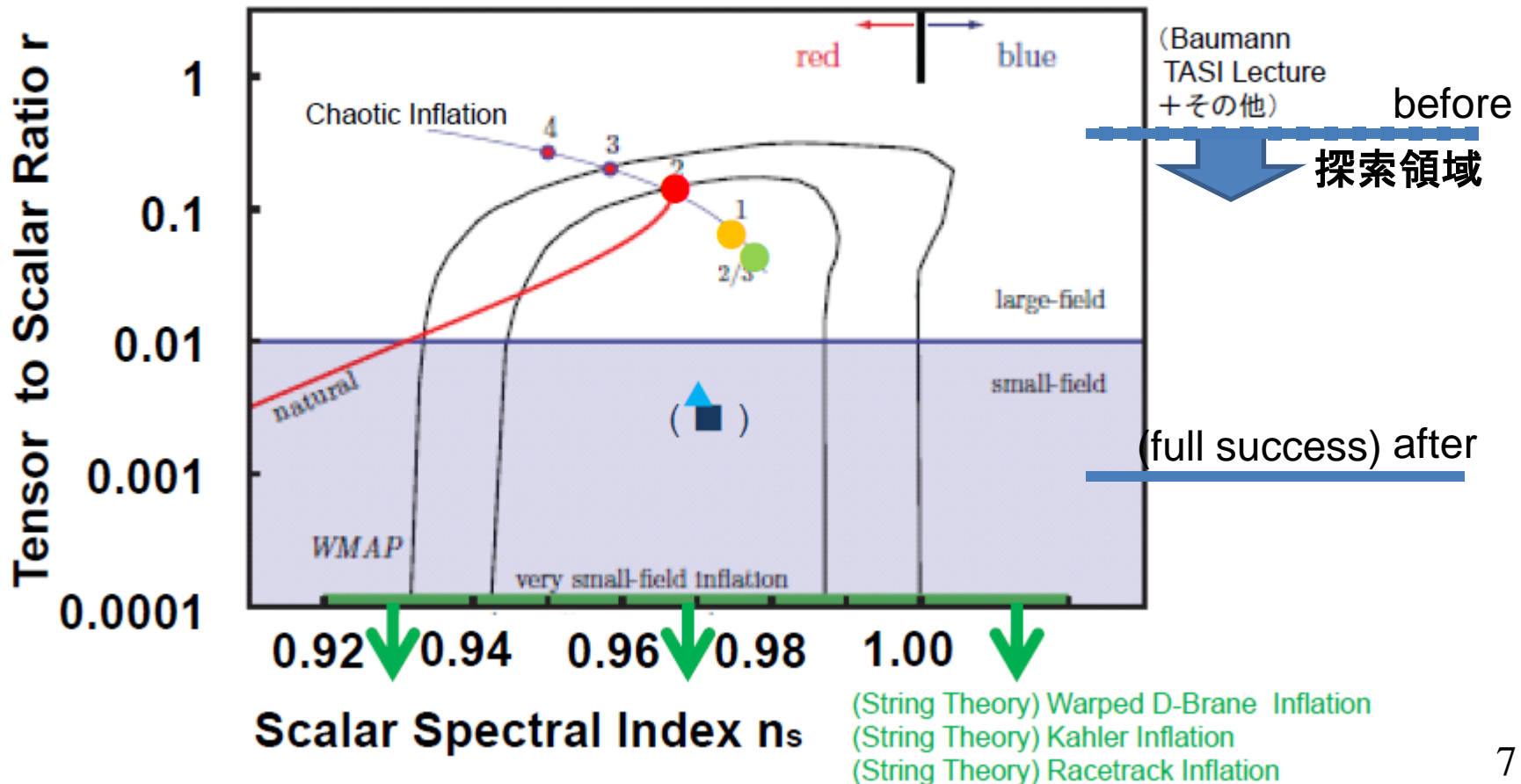


$$V^{1/4} = 1.06 \times 10^{16} \times (r/0.01)^{1/4} \text{ GeV}$$

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！

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



CMB偏光観測の現状1: WMAP

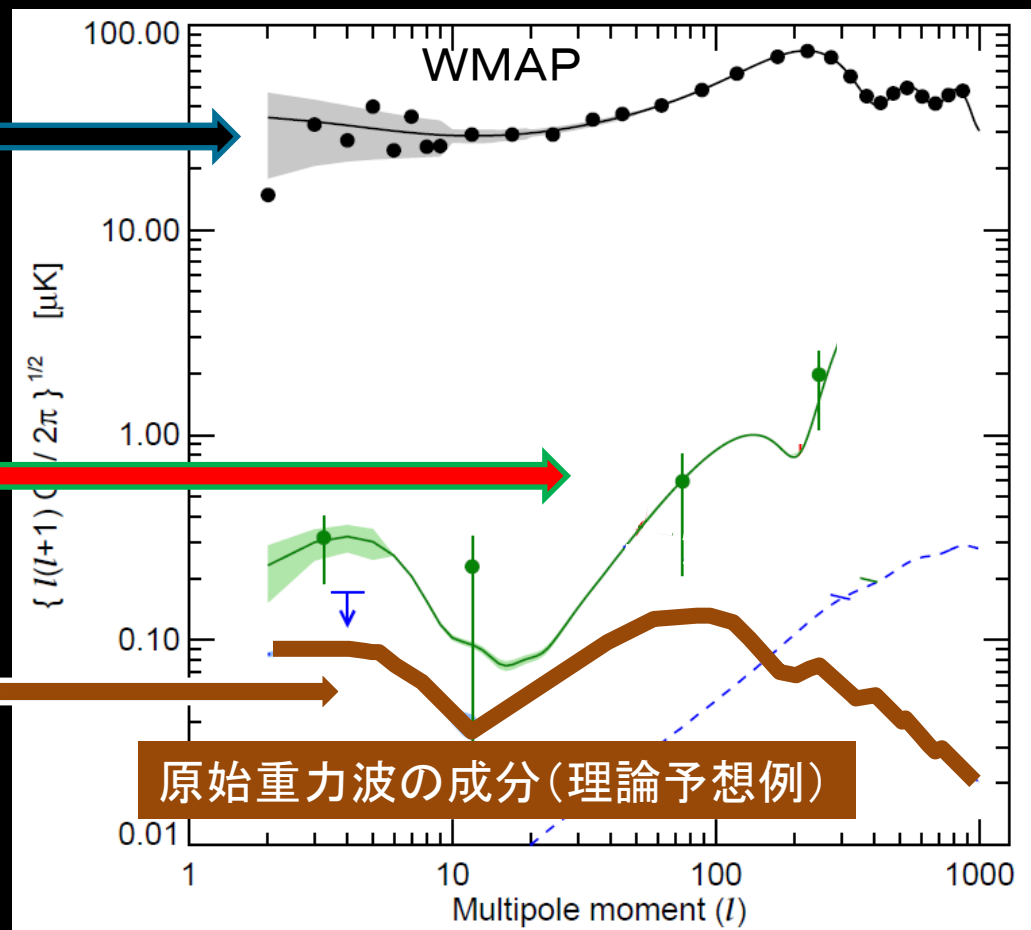
大視野角 ← → 小視野角

温度の
パワースペクトル

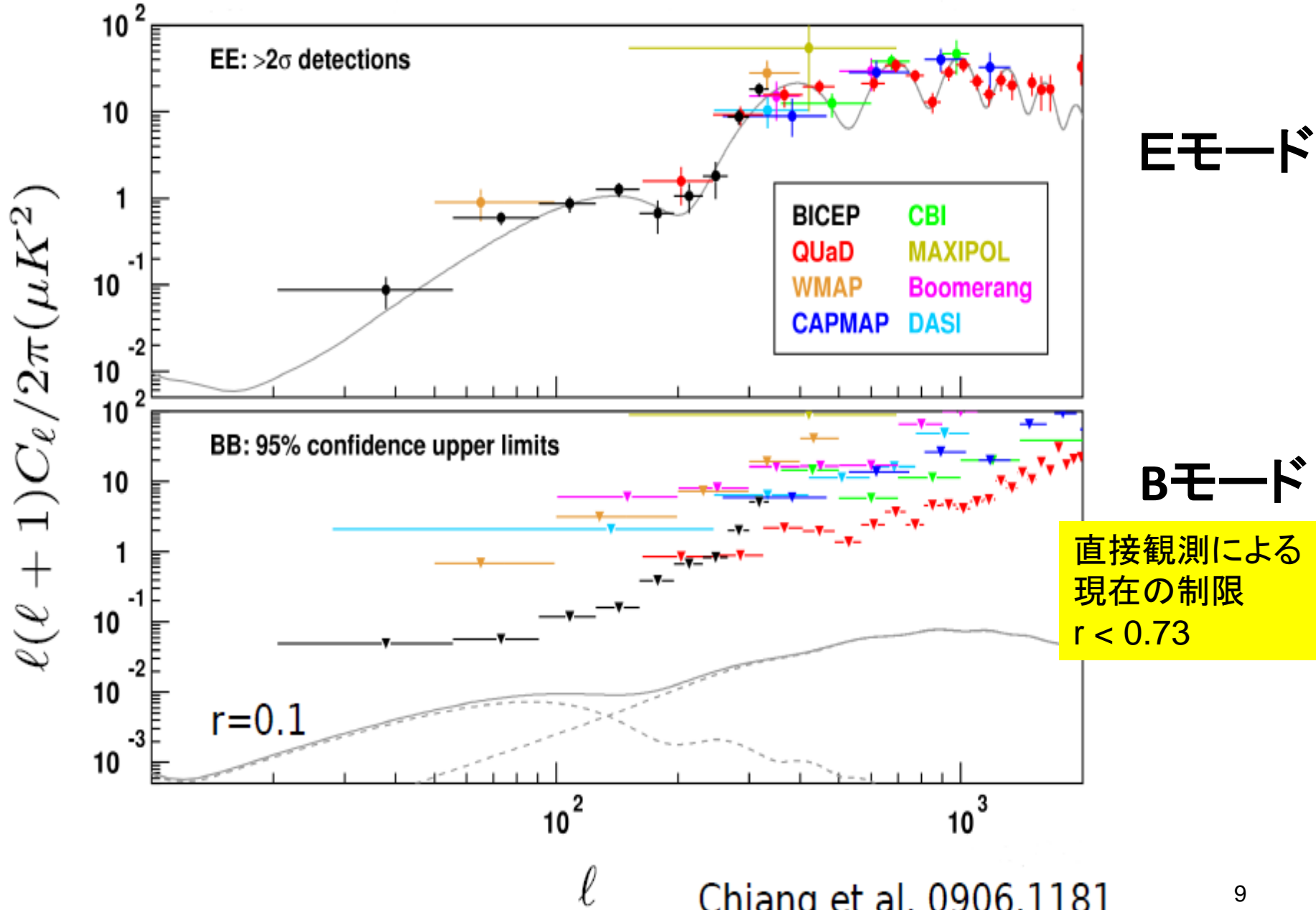
渦なしの
偏光成分 (Eモード)

渦状の偏光成分
(Bモード)

未発見



CMB偏光観測の現状2: 全ての観測結果



Funded CMB Polarization Experiments

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

Name	Type/ location	Institutions	NEQ ($\mu\text{K}\sqrt{\text{s}}$)	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

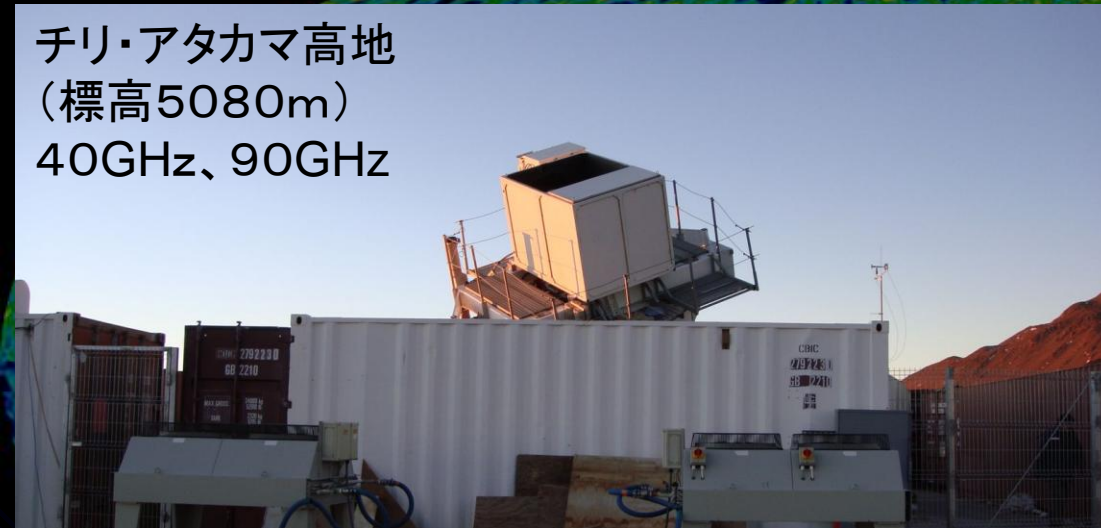
Everyone except Planck claims $r=O(0.01)$ sensitivity and results in 5 yrs.

compiled by Adrian Lee + MH

日本グループが参加する地上観測

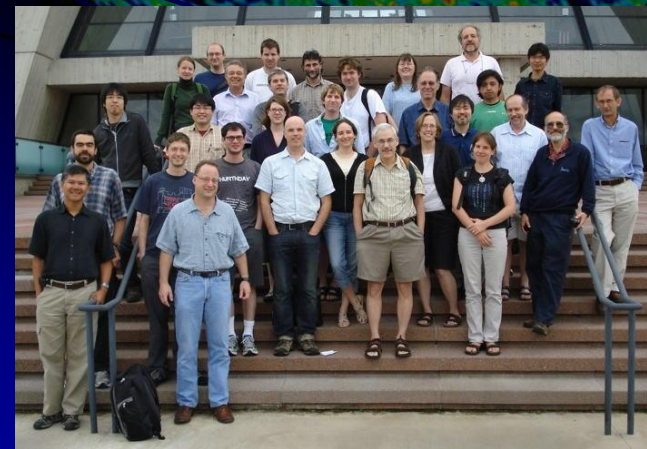
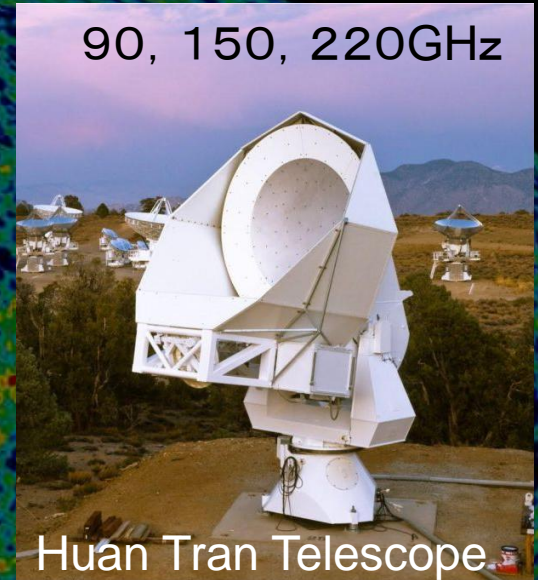
QUIET

チリ・アタカマ高地
(標高5080m)
40GHz、90GHz



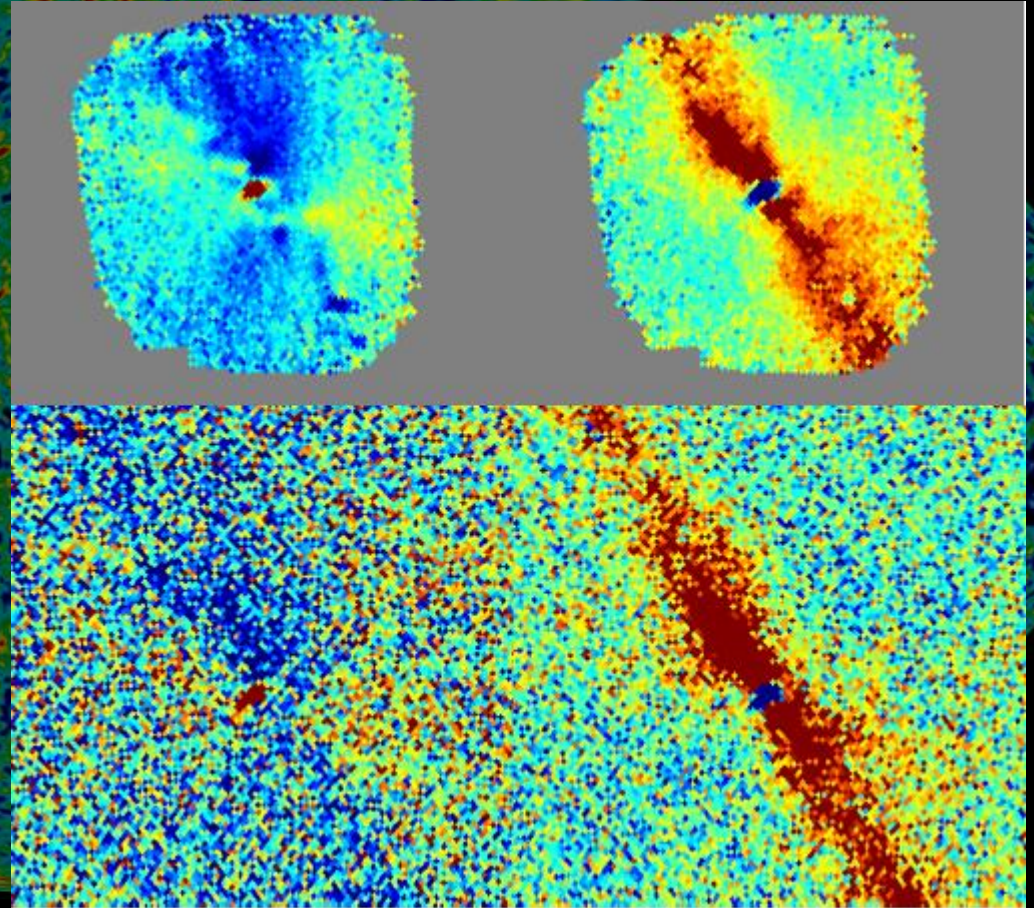
POLARBEAR

90, 150, 220GHz



偏光観測の例

QUIET
100時間未満のデータ



WMAP
公開全データ

- 検出器技術の向上
→ 地上でもWMAPよりはるかに高い偏光感度

LiteBIRD

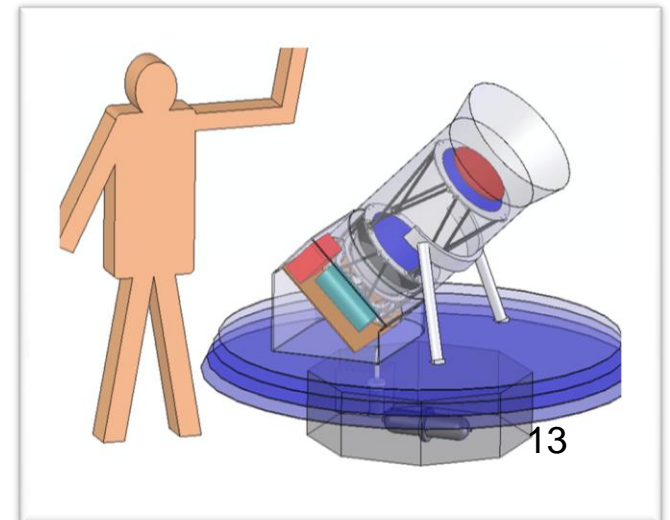
Lite (light) Satellite for the studies of **B**-mode polarization and Inflation from cosmic background **R**adiation **D**etection

- 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、原始重力波の観測

「ビッグバンの前を探る」

- プラットフォーム： 小型科学衛星
2008年9月JAXA小型科学衛星WGとして承認

- 特長：「究極の測定」が小型でできる
(角度分解能は影響しない)



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**
 - ・ William Holzapfel、Bradley Johnson、Adrian Lee、Paul Richards、Aritoki Suzuki、Huan Tran (UC Berkeley/LBNL)、 → **POLARBEAR, EBEX, APEX, EPIC, BICEP, SPT**
 - ・ Julian Borrill (LBNL)、 → **Planck**
 - ・ 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)、 → **QUIET, 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**
 - ・ 鶴澤佳徳、関本裕太郎、野口卓 (ATC/NAOJ)、
 - ・ 茅根裕司、服部誠 (東北大理)、 → **QUIET**
 - ・ 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)

LiteBIRD: 戦略とDesign Concept

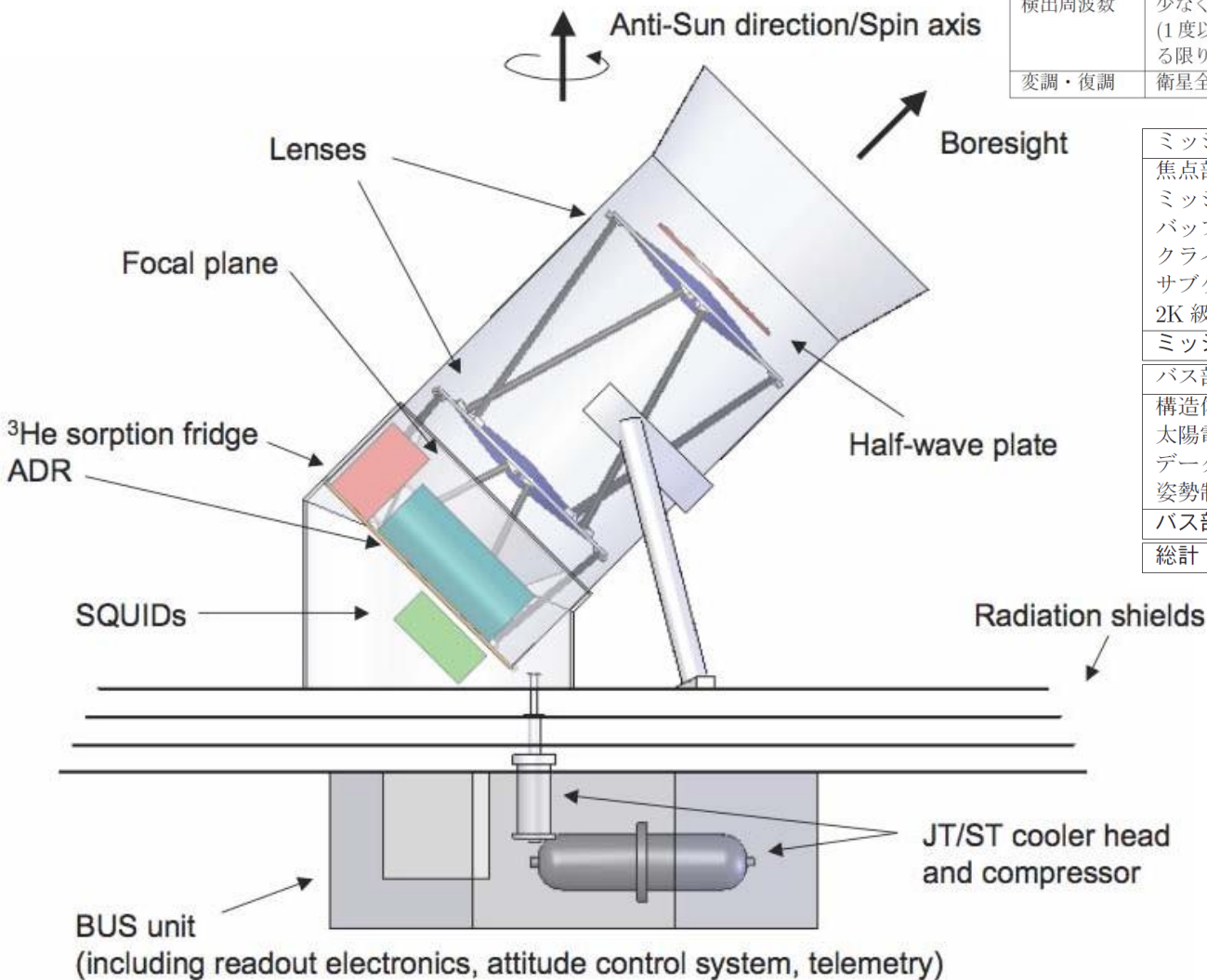
- 現在多くの地上／気球実験が進行中・準備中
- アメリカ／ヨーロッパでのCMB偏光衛星実験検討 ⇒大型衛星実験(2020年代)
- インフレーションの直接検証にテーマを絞れば、小型で究極の測定が可能
→ 軽量化を追求し、早期(2020年より前)の打ち上げの道を探る

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波長板変調機はサファイアを用いる。直径 < 30cm

Strawman Design

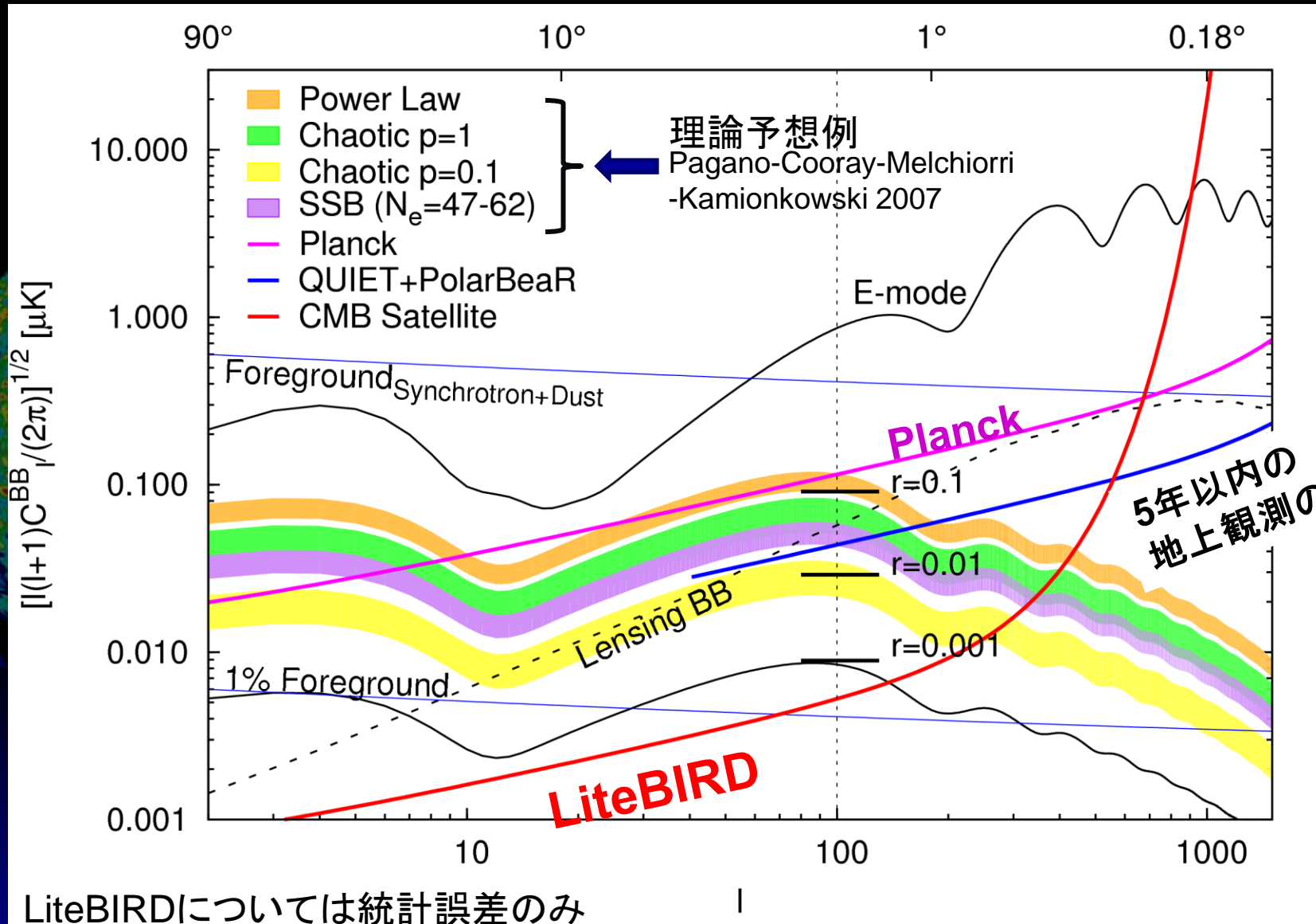
項目	仕様
衛星運用期間	2年以上 (ミッション部の耐用年数5年)
軌道	Sun-Earth L2点、あるいは近地球の太陽同期軌道
姿勢制御精度	5arcmin (ビームの1/10)以下。
テレメトリ	2Mbps。
重量	ミッション部 200Kg以下、総重量 400Kg以下。
消費電力	ミッション部 200W以下、総消費電力 500W以下。
冷却系	赤外線天文衛星 SPICA の冷却方式と同様、冷媒を使用しないで、放射冷却と機械式冷凍機で冷却。打ち上げ後スペースで冷却。
焦点面検出器	超伝導検出器アレイ (TES ボロメータ又はSTJ)。
検出器感度	Total NET < 1 $\mu\text{K}\sqrt{\text{s}}$
検出周波数	少なくとも 90GHz、150GHz の二周波数で十分な画素数、角度分解能 (1度以下)、視野を確保。スペースの制限内で 45GHz、300GHz を出来る限り加える。
変調・復調	衛星全体を回転。更にビームによる系統誤差を除くための変調を加える。



ミッション部	重量 (kg)	電力 (W)
焦点部 (検出器・光学系)	60	
ミッション部電気系 (検出器)	20	100
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
ミッション部合計	175	280
バス部	重量 (kg)	電力 (W)
構造体・熱制御・計装	50	30
太陽電池パドル・電源系	30	20
データ処理・通信系	20	60
姿勢制御系・推進系	50	100
バス部合計	150	210
総計	325	490

軽量化のカギは2点
 1) SPICAタイプの予冷系
 2) 多色焦点面

LiteBIRDの感度



LiteBIRDについては統計誤差のみ

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

プロジェクト関係図

QUIET

観測: 2008 ~ 2010, 2012 ~ 2014

- 枯れた技術で早い実験開始
- 唯一40GHzを持つ地上実験

共同観測

経験・実績

POLARBEAR

観測: 2010 ~ 2014

- 衛星につながる超伝導検出器
- 大きい(3.5m)望遠鏡で
重力レンズに強い

共同開発

LiteBIRD
観測

LiteBIRD

観測: 2018 ~

- 究極の原始重力波発見感度
- 日本主導(得意の小型化)
- 国際協力

CMB偏光観測: Scientific Shopping List

- Bモード(low l)による原始重力波の探索
- 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.)
- 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)

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—

<http://cbr.kek.jp/>

平成21—25年度
領域代表・羽澄(KEK)

A05(KEK・小玉)
究極理論

宇宙マイクロ波
背景放射(CMB)

A04(東北大・服部)
前景放射分離

宇宙赤外線背景
放射(CIRB)

A02(理研・大谷)
超伝導検出器

A01(KEK・羽澄)
CMB偏光
Bモード測定

A03(JAXA・松浦)
CIRB観測

宇宙の
始まり

Bモード偏光
(重力波)

初代天体

原始赤外
銀河

インフレーション期 再結合期 ダークエイジ 宇宙再電離 銀河形成・成長期 現在

宇宙年齢

10⁻³⁶秒

38万年

1億年

10億年

137億年

ガンマ線天文学とCMB

(「fundamentalな探求」に資するテーマがあるか?)

何かありそうかどうか、少し探してみました

- DM annihilations
 - Exciting DM
 - to explain PAMELA/ATIC/PPB-BETS/Fermi/H.E.S.S.
 - Seen as “Haze”
- アクシオン?
- Blazar as foregrounds
- GRB afterglow observation at $\sim 100\text{GHz}$?
 - (井岡さんへの宿題)

DM annihilations (1): Exciting DM (XDM)

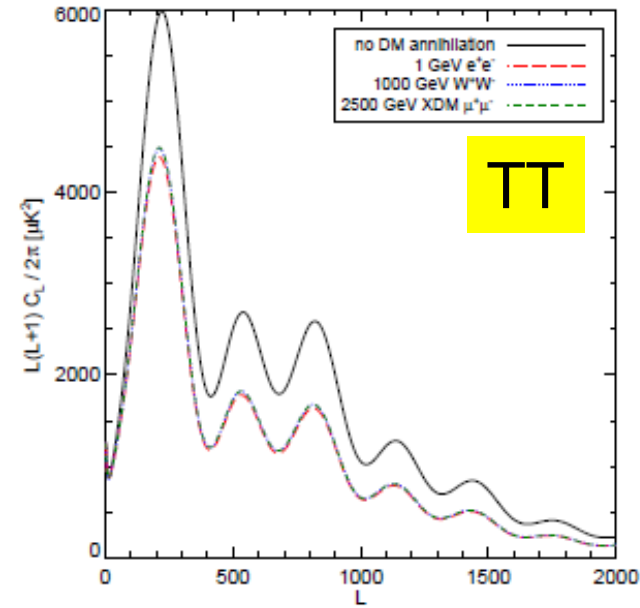
Enhanced DM annihilation to explain PAMELA/ATIC/PPB-BETS/Fermi/H.E.S.S.

→ extra power injected around recombination

→ broadening of last-scattering surface

Tests of XDM models

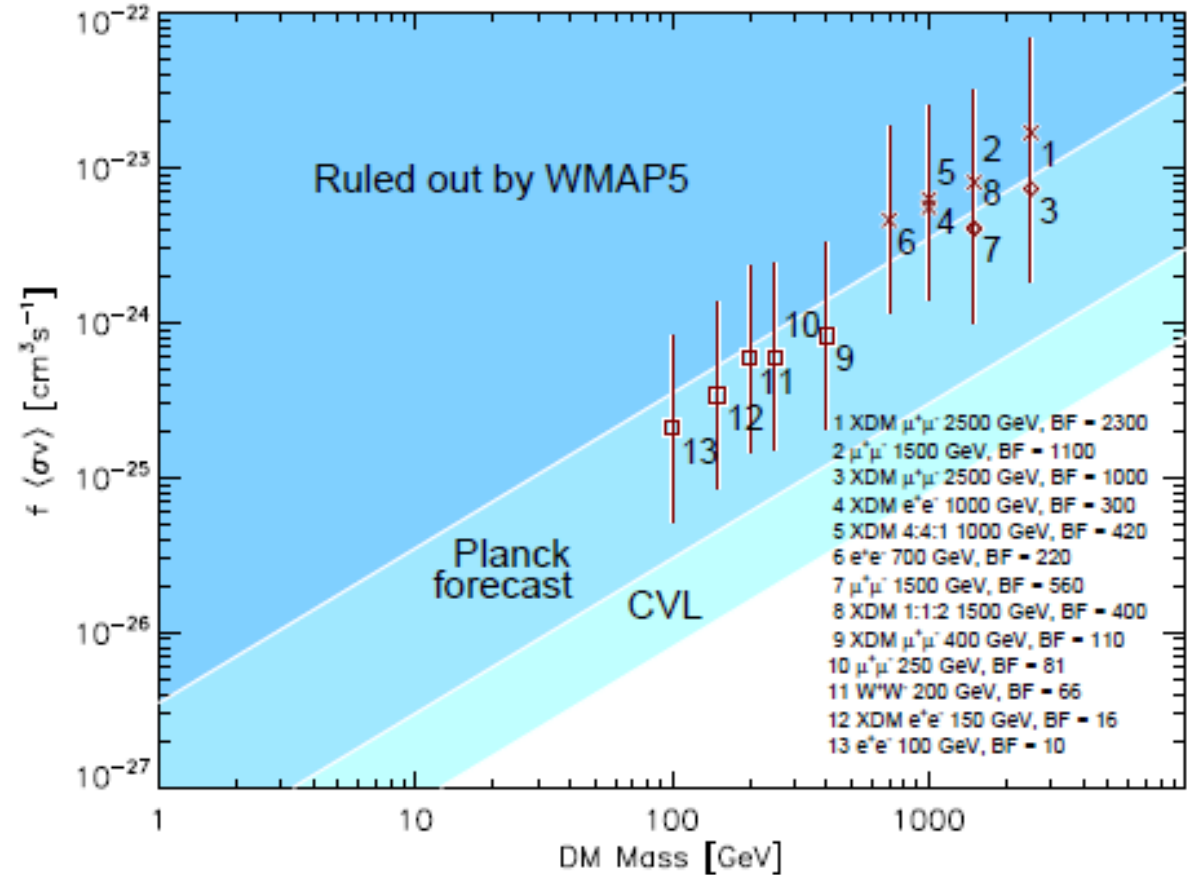
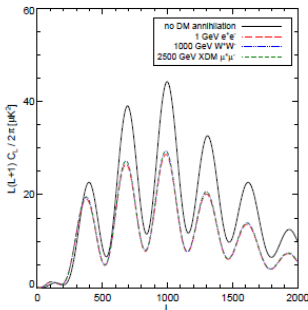
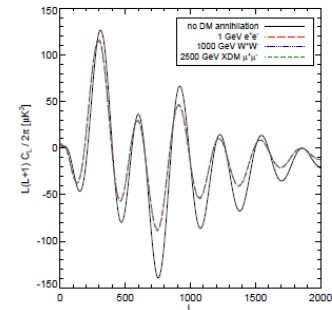
→ Planck seems to be rather decisive



TT

TE

EE



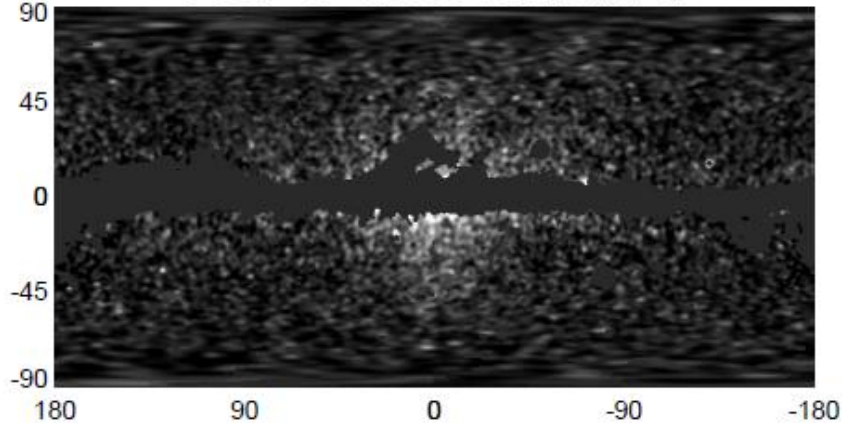
DM annihilations (2): “Haze”

Dobler-Finkbeiner-Cholis-Slatyer-Weiner :arXiv:0910.4583 and references therein

Residual Map

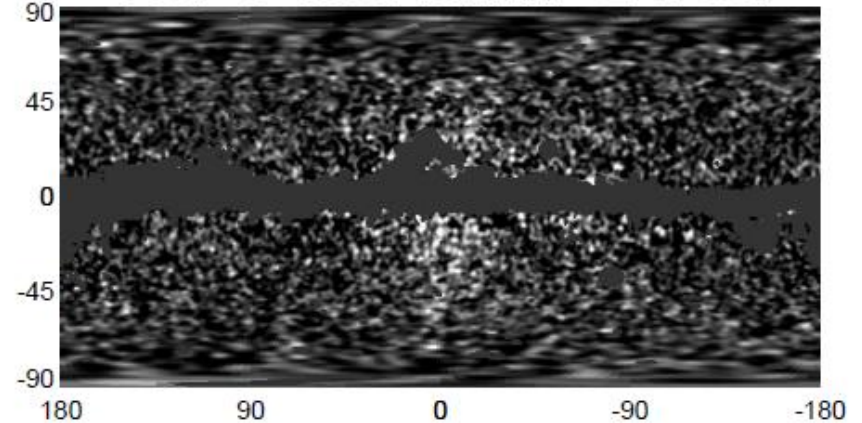
WMAP haze

5 GeV < E < 10 GeV residual (SFD)



FERMI haze

5 GeV < E < 10 GeV residual (1 < E < 2 GeV)



- Not easy to explain these (non-disk) residual maps with disk sources
- Quite similar morphology

DM annihilations ?

WMAP haze due to DM DM $\rightarrow e^+ e^- \rightarrow$ synchrotron emission

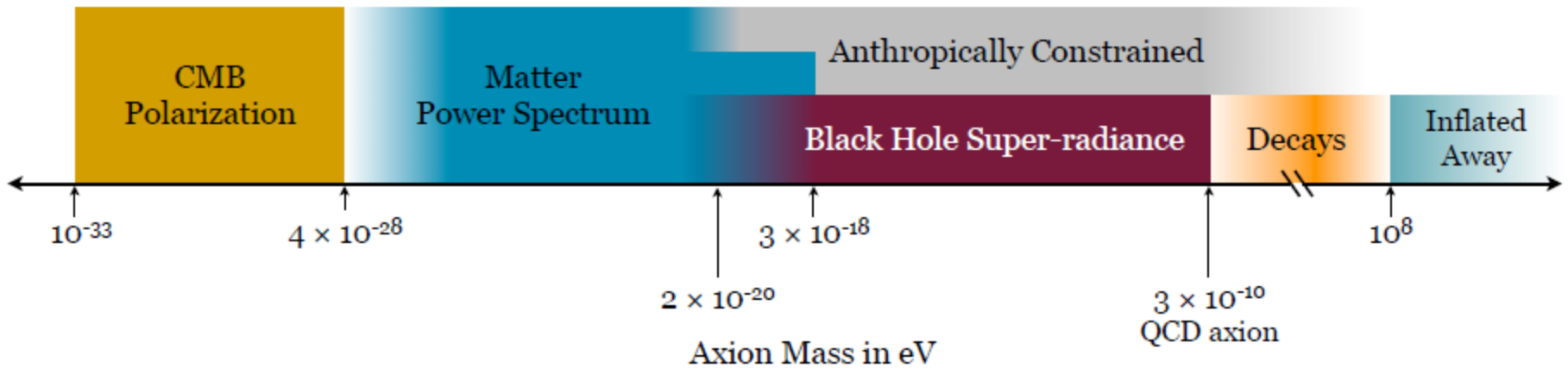
FERMI haze due to DM DM $\rightarrow e^+ e^- \rightarrow$ inverse-Compton for high-E photons

個人的なコメント: どれぐらいsignificantな話か、論文できちっと評価されていない

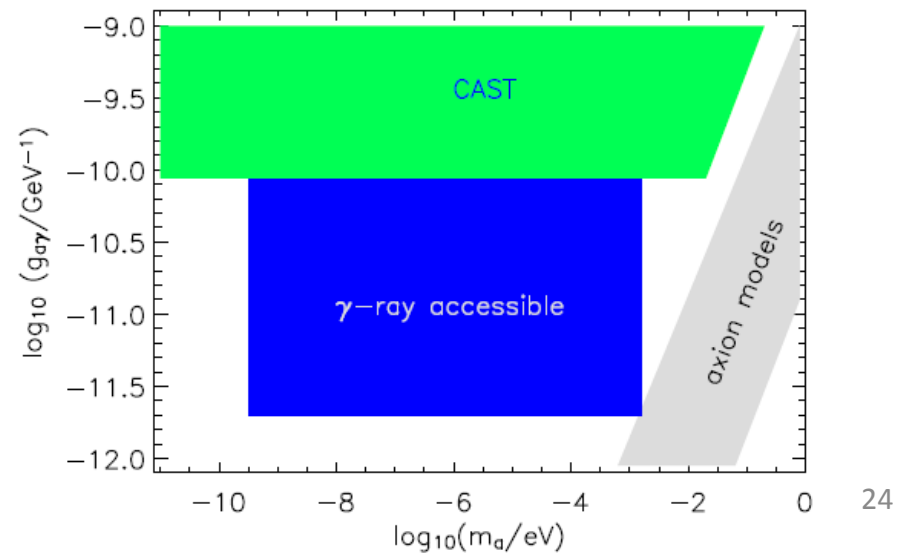
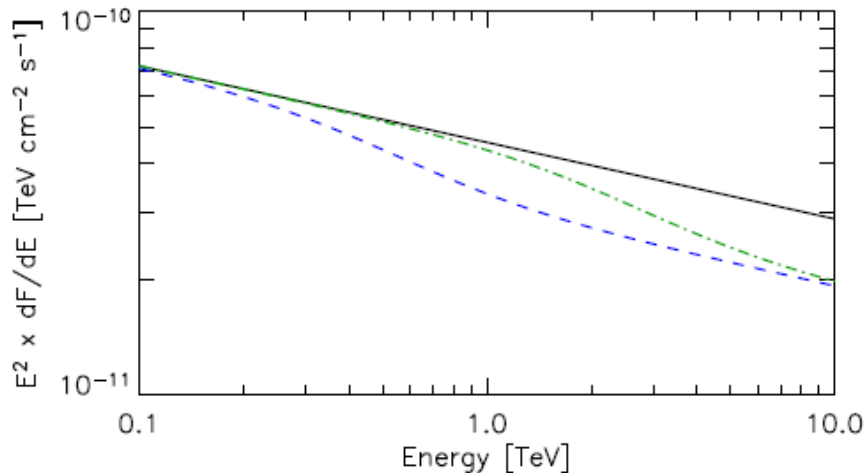
Axions ?

“String Axiverse”

Arvanitaki-Dimopoulos-Dubovsky-Kaloper-March-Russel
arXiv:0905.4720 and references therein

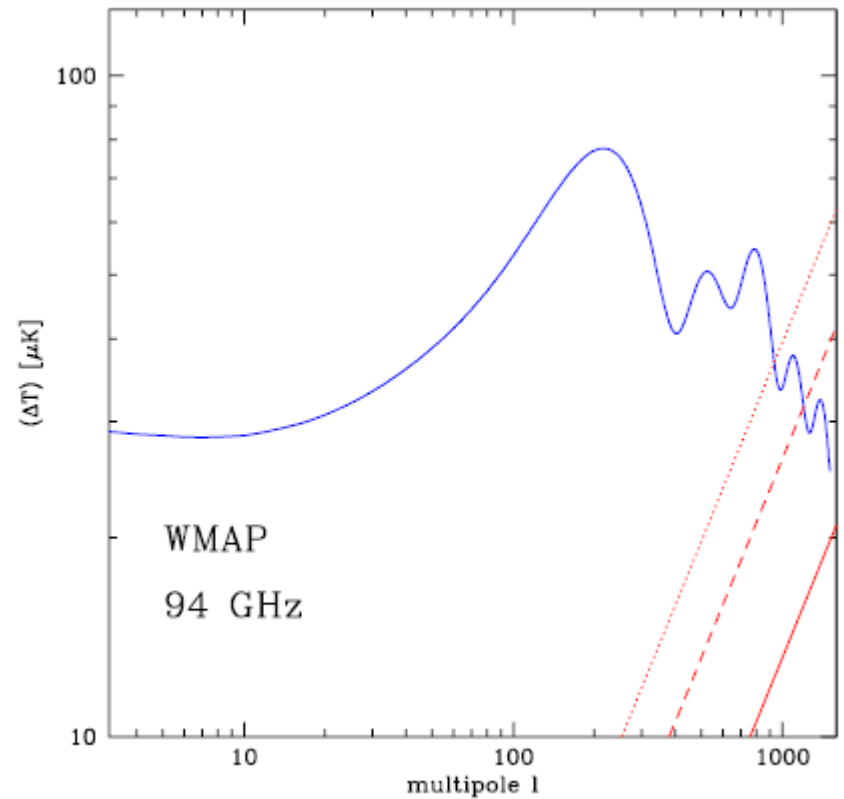
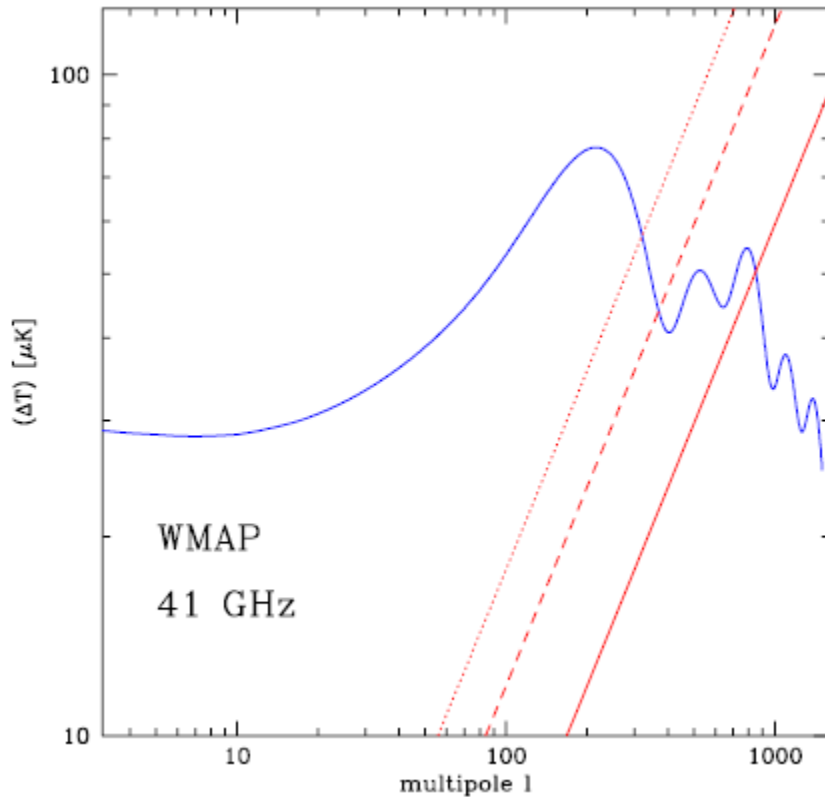


Hooper-Serpico-2007



Blazarとforegrounds

Giommi-Colafrancesco-Cavazzuti-Perri-Pittoni 2006



- Planckの超精密測定では差し引きがWMAPよりsevere
- 他の波長の情報を役立てられるか？

まとめ

- 今後～5年間のCMB実験
 - Planckによる(決定的な)温度揺らぎ観測
 - 地上・気球による偏光Bモード探索
- Planck後
 - 偏光Bモードに特化した衛星 → 小型で可能
- ガンマ線天文学とCMBの相乗効果
 - 未開拓 (except several ideas)
 - Fermi, Planck がデータを出す画期的時代
→ データによる刺激に期待

4月初旬に国立天文台でCMBの研究会をやる予定なので
逆のトークをどなたかをお願いします😊