A Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation map, showing a complex pattern of blue, green, and red spots against a dark background. The map is centered and occupies most of the frame. The text is overlaid on this map.

ビッグバンの前を探る
小型観測衛星

LiteBIRD ✨ ✨

冷凍機ユーザーの立場から

KEK宇宙マイクロ波背景放射観測グループ

羽澄昌史

masashi.hazumi@kek.jp

CMBに関する(長い)イントロ

宇宙マイクロ波背景放射
(**C**osmic **M**icrowave **B**ackground)

可視光でみる夜空



紫外線

青

青緑

黄

ミツバチ

波長 (nm) 380 430 480 490 550 590 640 700 780

人間

紫

青

青緑

緑

黄

橙

赤



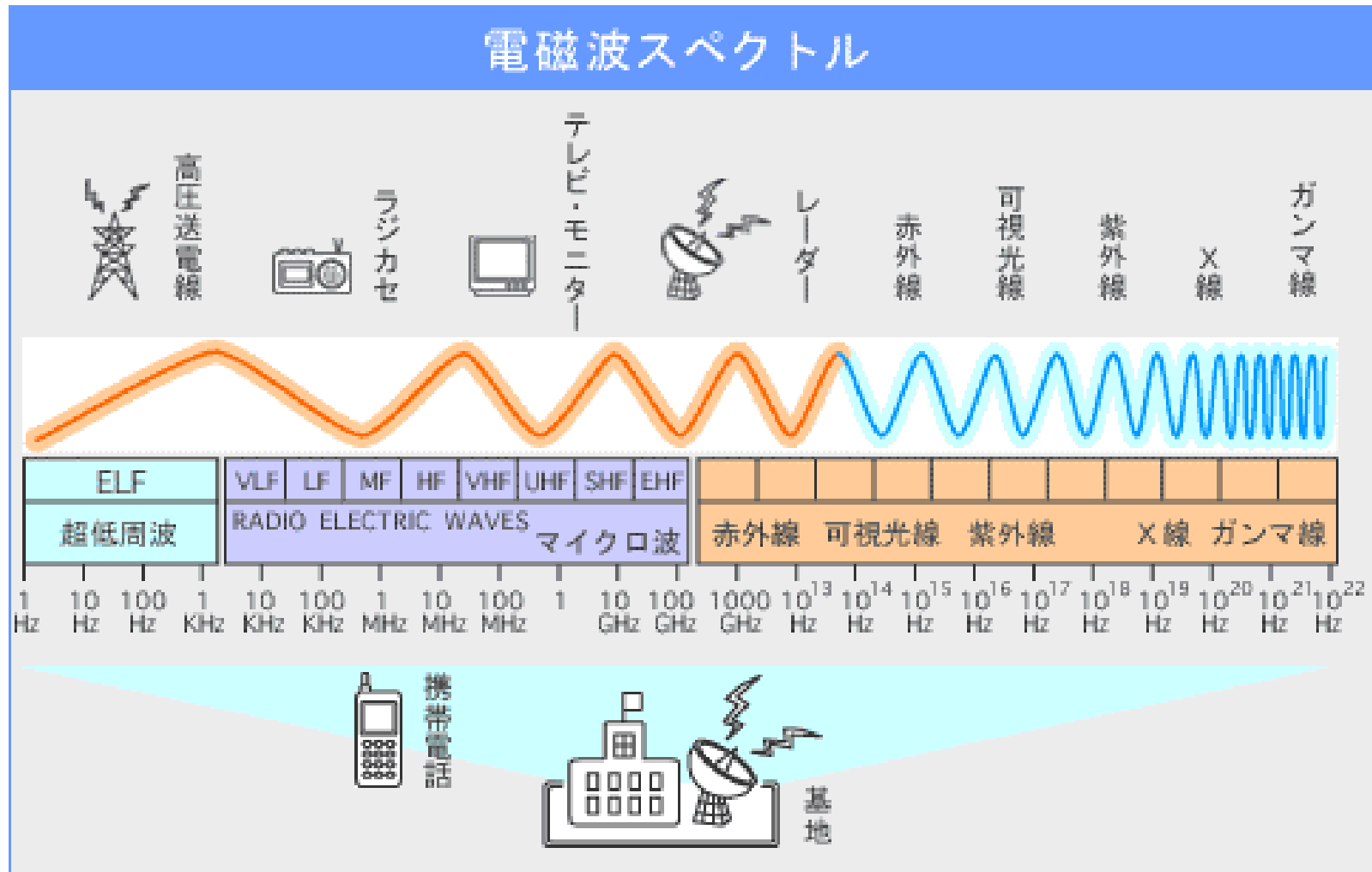
タンポポ

蜂の目(紫外線に感度がある)で見ると、花粉や蜜の場所がよくわかる



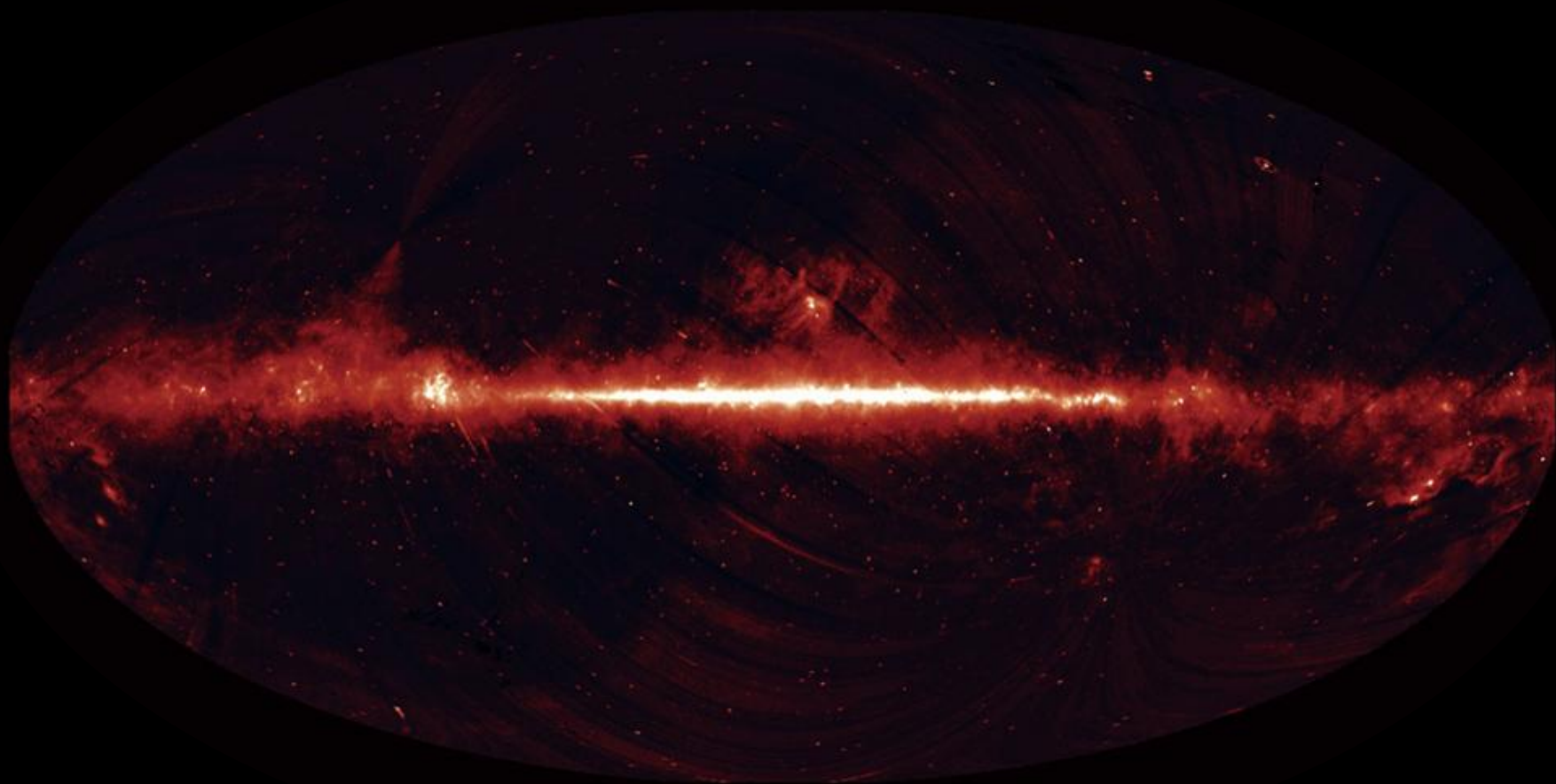
電磁波(=光)

<http://www.mytecno.jp/tecnoao/index.html>



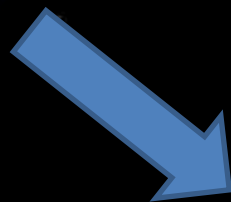
光速 c は3億メートル/秒なので、100GHzのマイクロ波の波長は3ミリメートル

赤外線宇宙地図

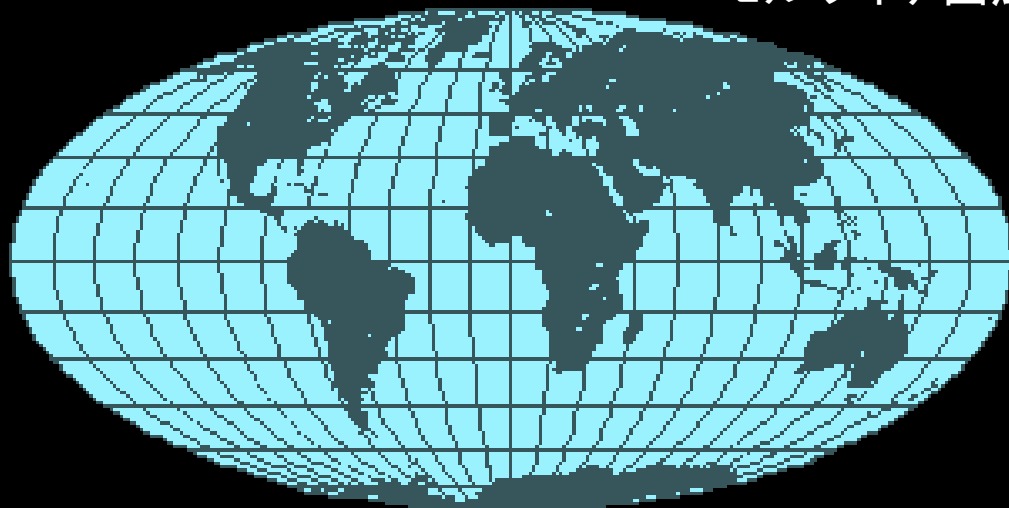


「あかり」による全天マップ

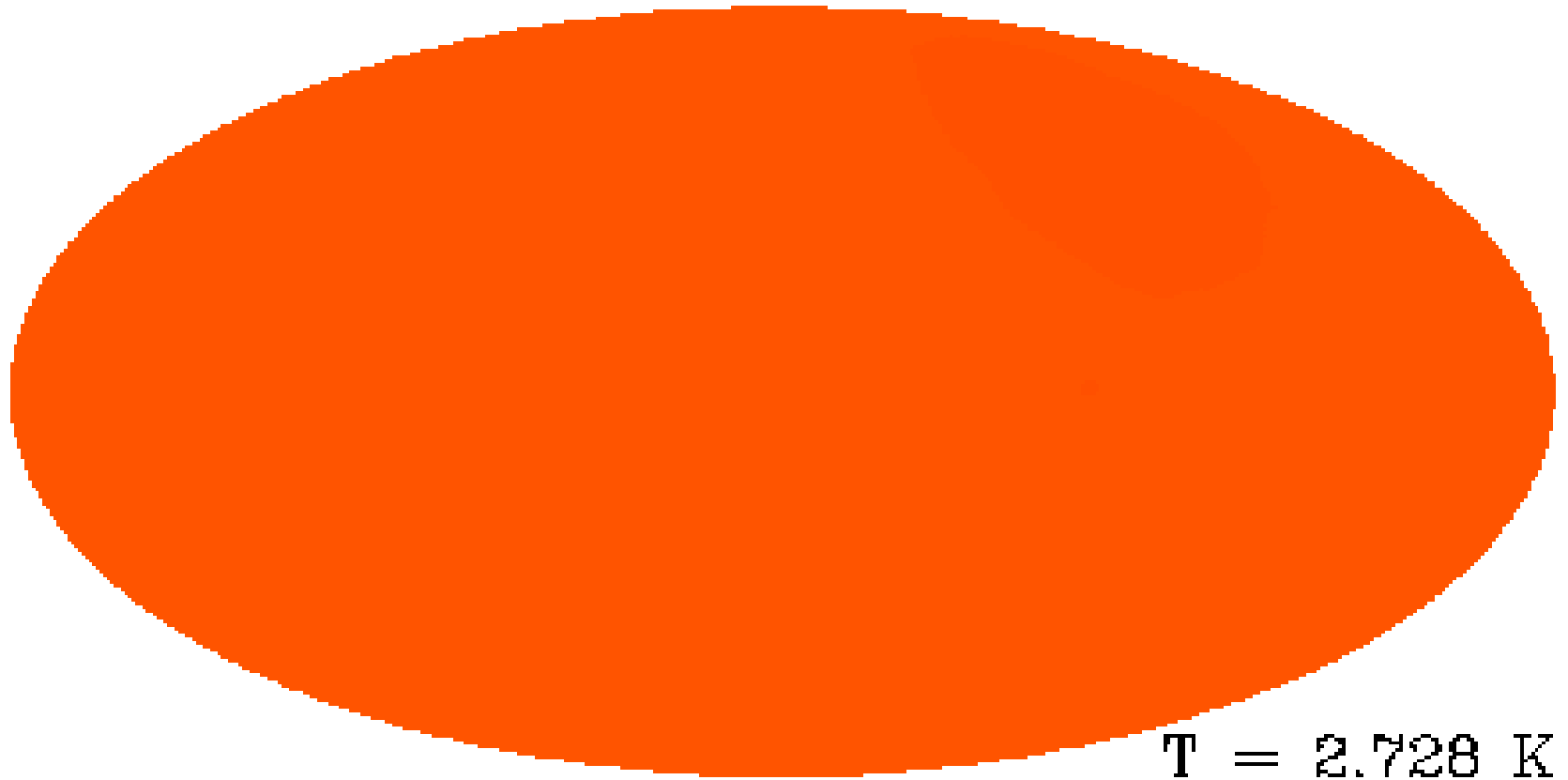
地図の見せ方



メルワイデ図法

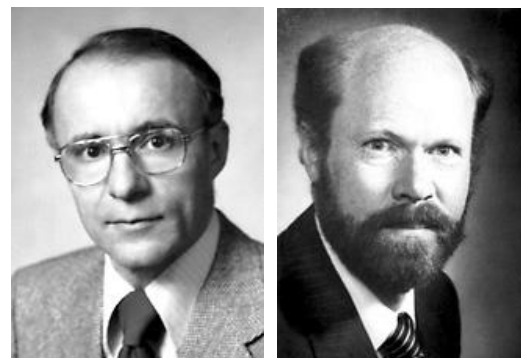
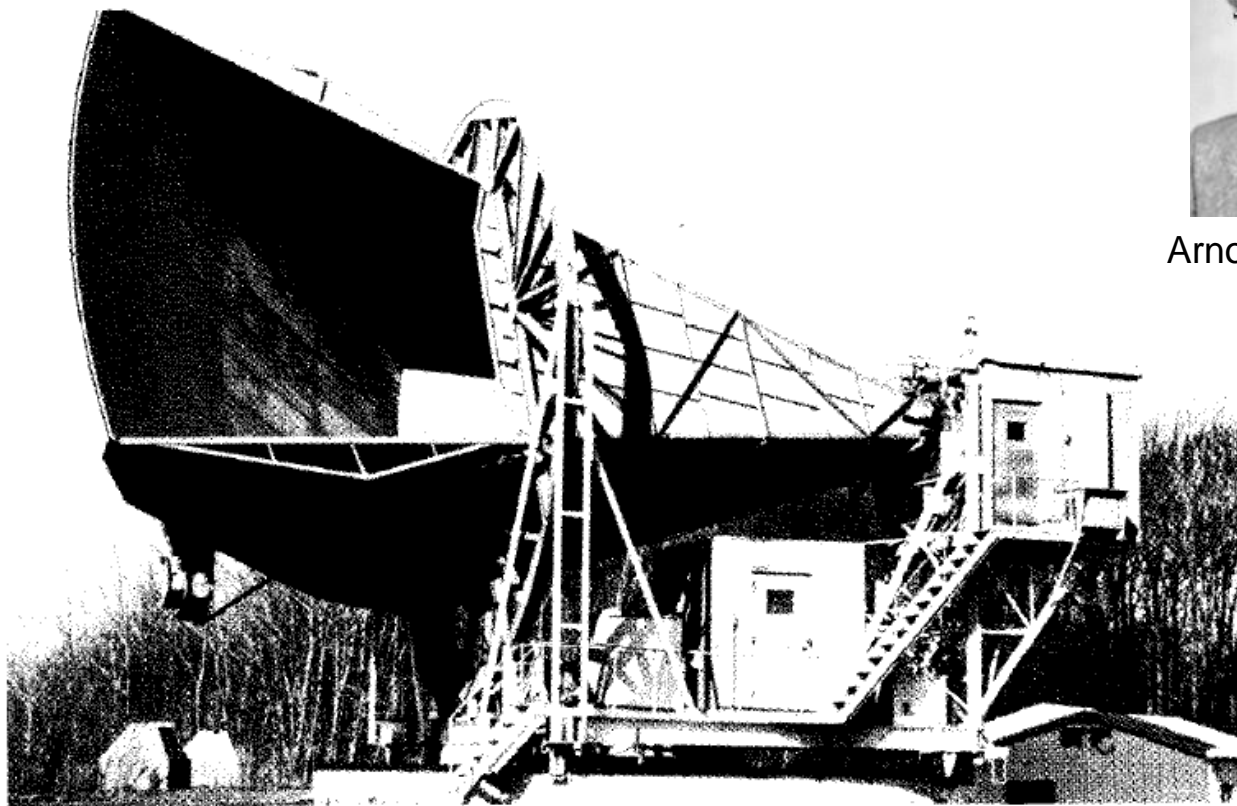


マイクロ波宇宙地図



つまらない地図？ しかし、これこそが、1978年のノーベル物理学賞

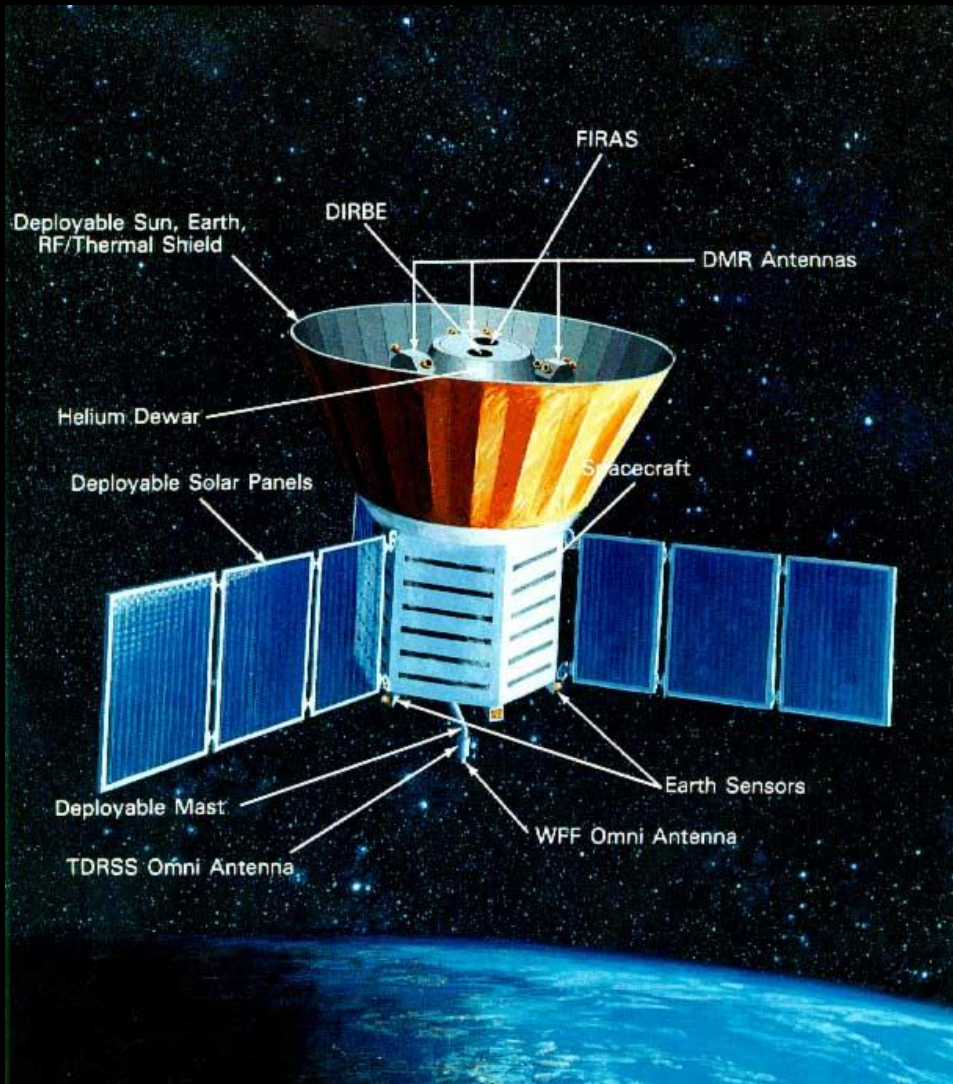
宇宙マイクロ波背景放射の発見 (1965)



Arno A. Penzias Robert W. Wilson

1978年
ノーベル物理学賞

衛星観測1: COBE衛星



2006年ノーベル物理学賞



John C. Mather

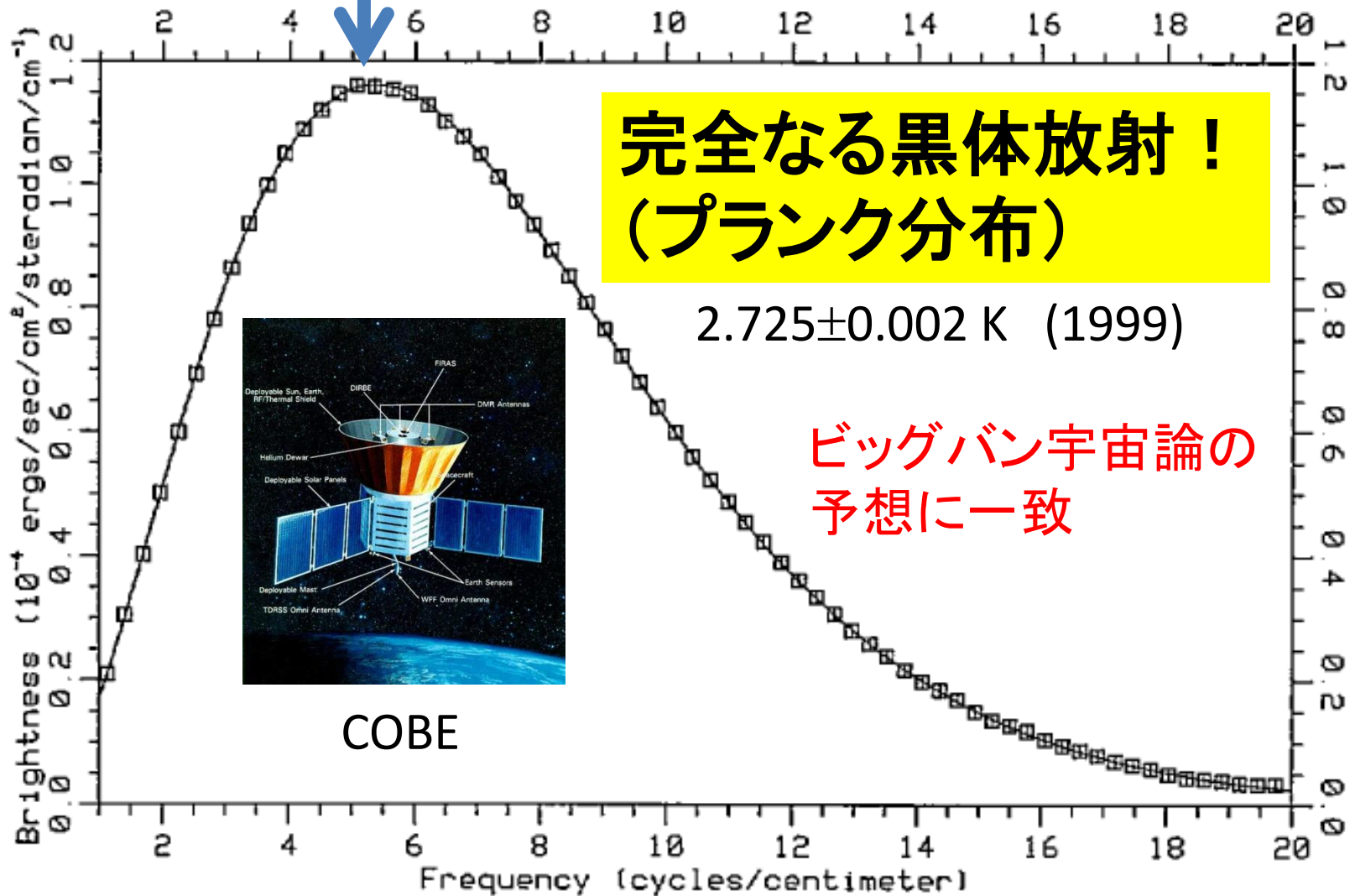


George F. Smoot

1989—1993

COBEの衝撃的結果(1)

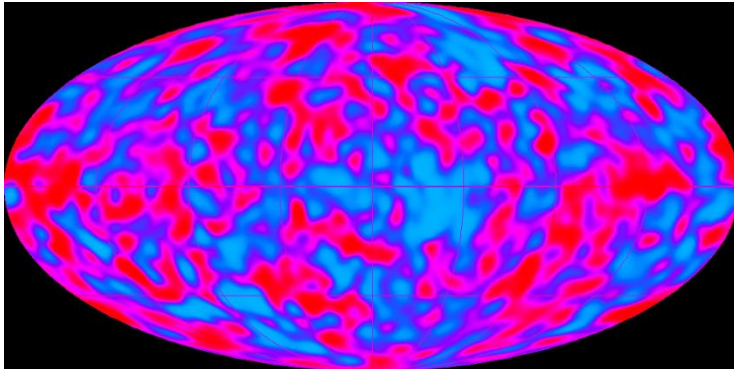
160GHz



COBEの衝撃的結果(2)



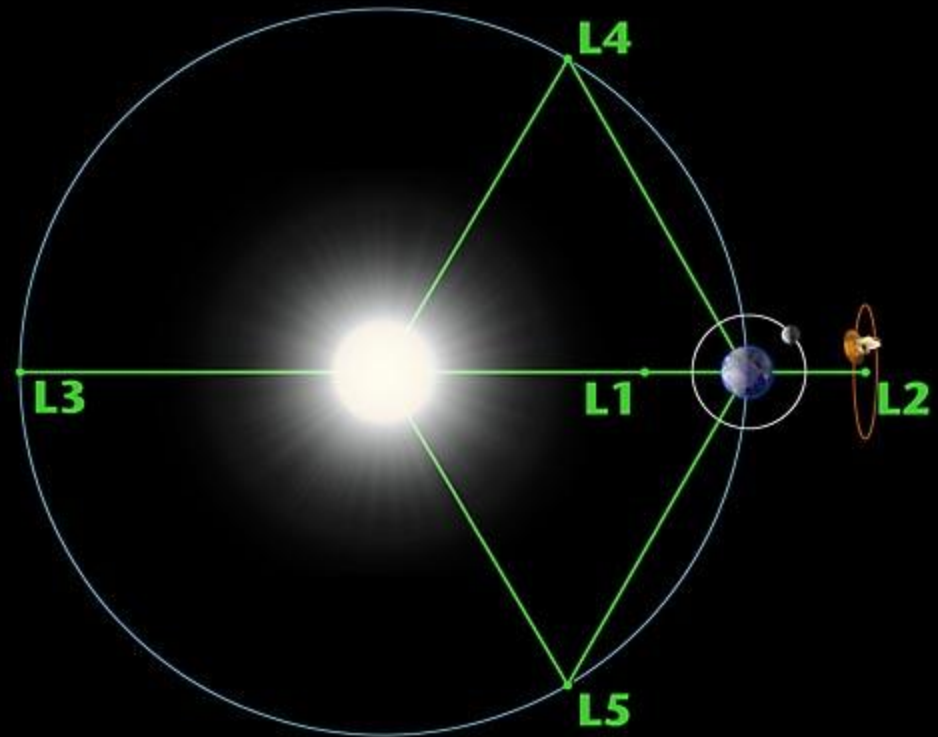
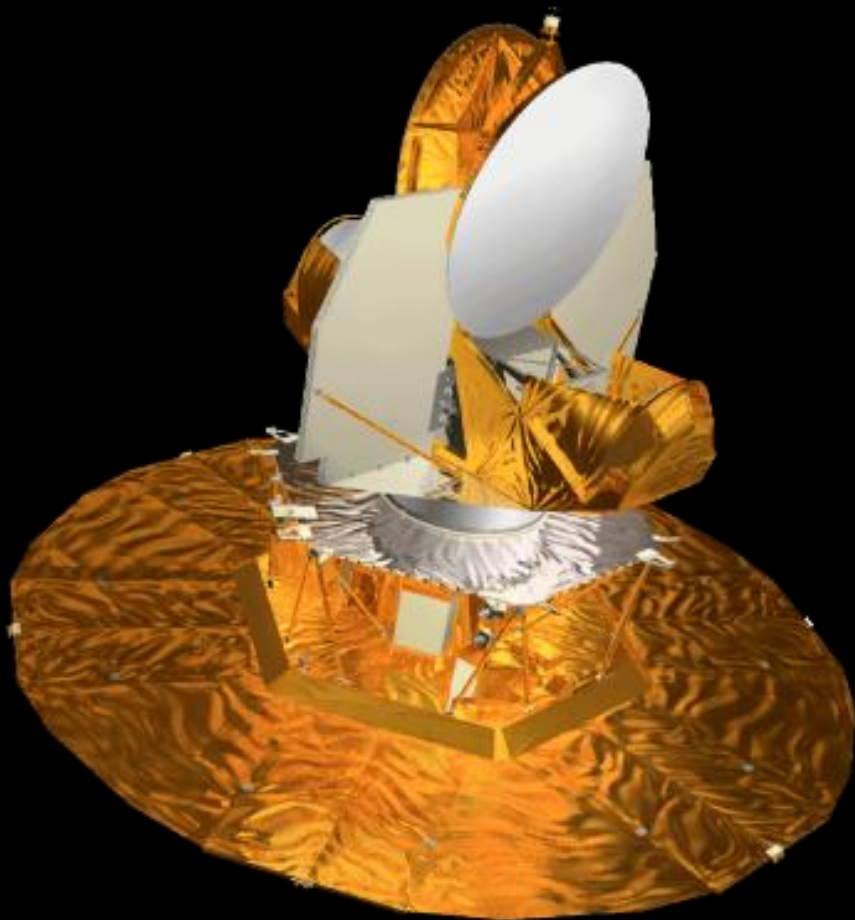
温度センサーの感度を
あげていく



30マイクロケルビン程度
でこぼこ(異方性)がある

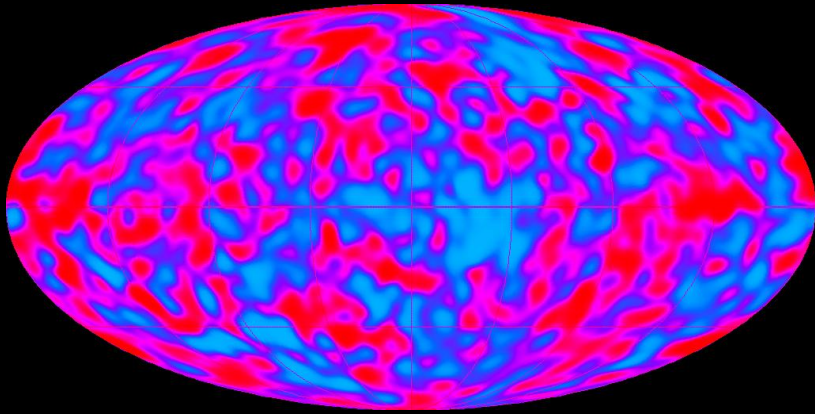
これは量子論的ゆらぎ！ それが、やがて銀河へと成長。
つまり人類の起源は量子ゆらぎ！

衛星観測2:WMAP衛星

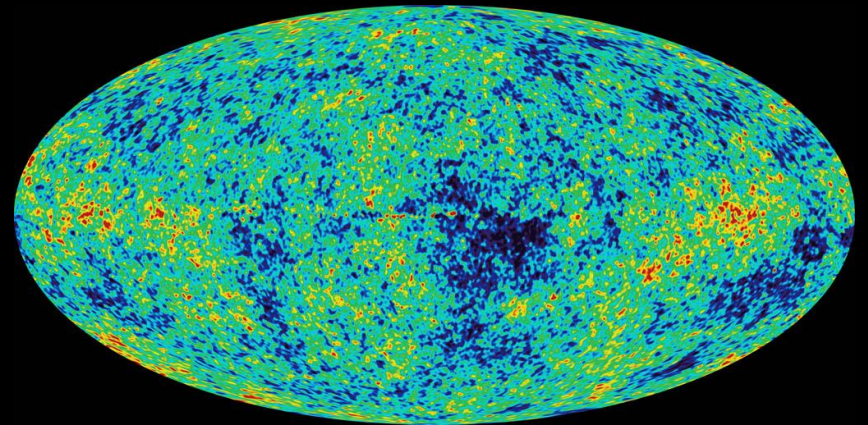


2001年打ち上げ
現在も観測を続けている

COBE



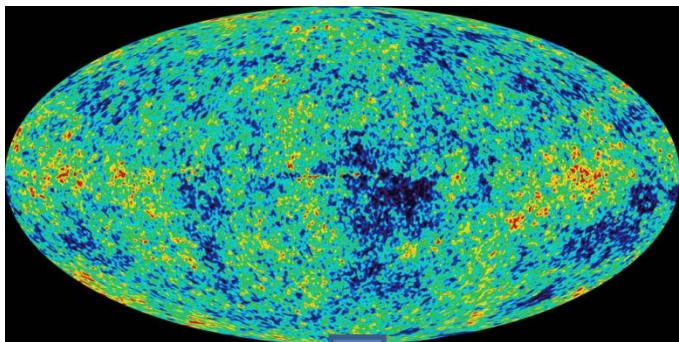
WMAP



圧倒的な解像度の向上が
何をもたらしたか？

WMAPの衝撃的結果(1)

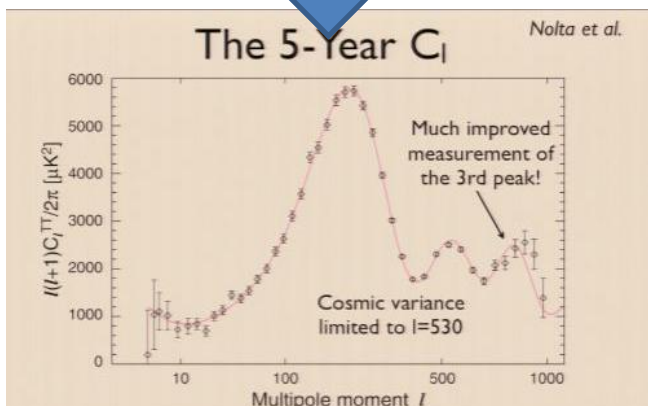
宇宙の年齢は137億年



温度(明るさ)の全天マップ



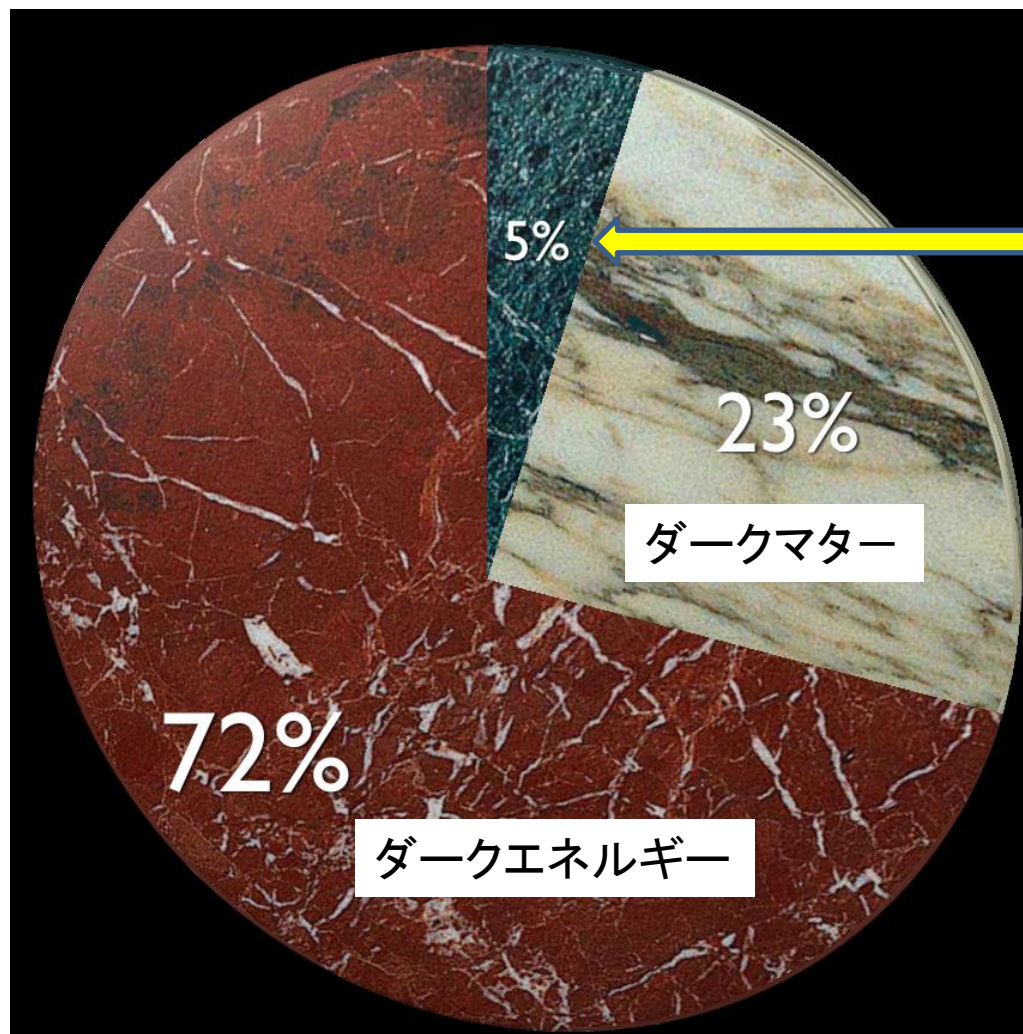
スペクトラムアナライザ
(計算機を使用)



パワースペクトル

WMAPの衝撃的結果(2)

宇宙の謎のエネルギー成分をあぶりだした

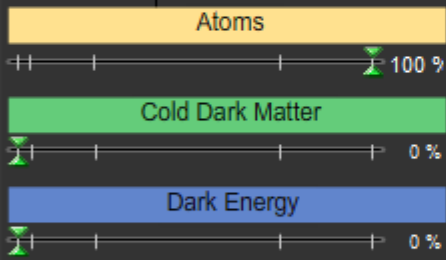


素粒子標準理論で説明できる部分

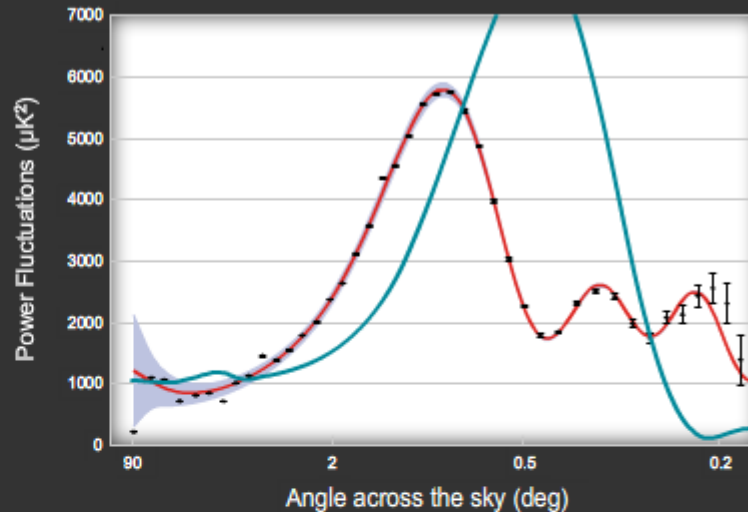
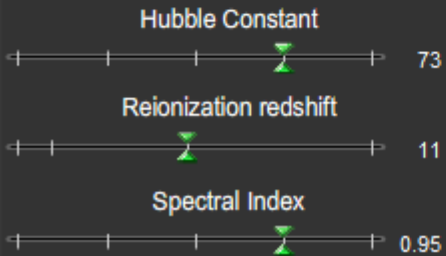
WMAP CMB Analyzer



Universe Content



Additional Properties



Age: 9.1 billion years **Flatness:** 1.00

Power Spectrum Plot: This plot shows how temperature varies with the angular size of patches on the sky. This reveals the energy emitted by different size ripples of sound traveling through the early universe.

- Red line = analyzed sky / universe signal.
- Blue line = your simulated sky / universe signal.
- Black points with error bars = 'binned' (grouped) data to analyze data accuracy.
- Light blue area = likelihood of results being caused by random chance- only a concern at large scale (left).

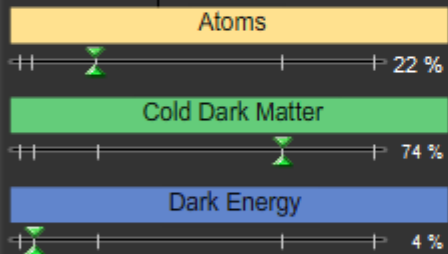
ANSWER

RESET

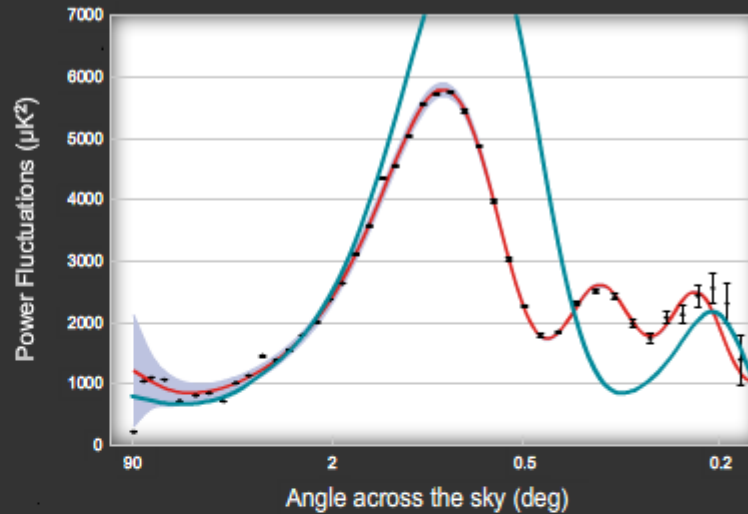
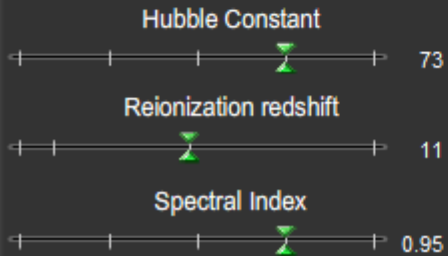
WMAP CMB Analyzer



Universe Content



Additional Properties



Age: 9.2 billion years

Flatness: 1.00

Dark Energy: The amount of dark energy in your universe, as a percentage of the critical density. Unlike cold dark matter, dark energy exerts a gravitational push (a form of anti-gravity) that is causing the expansion of the universe to accelerate or speed up.

ANSWER

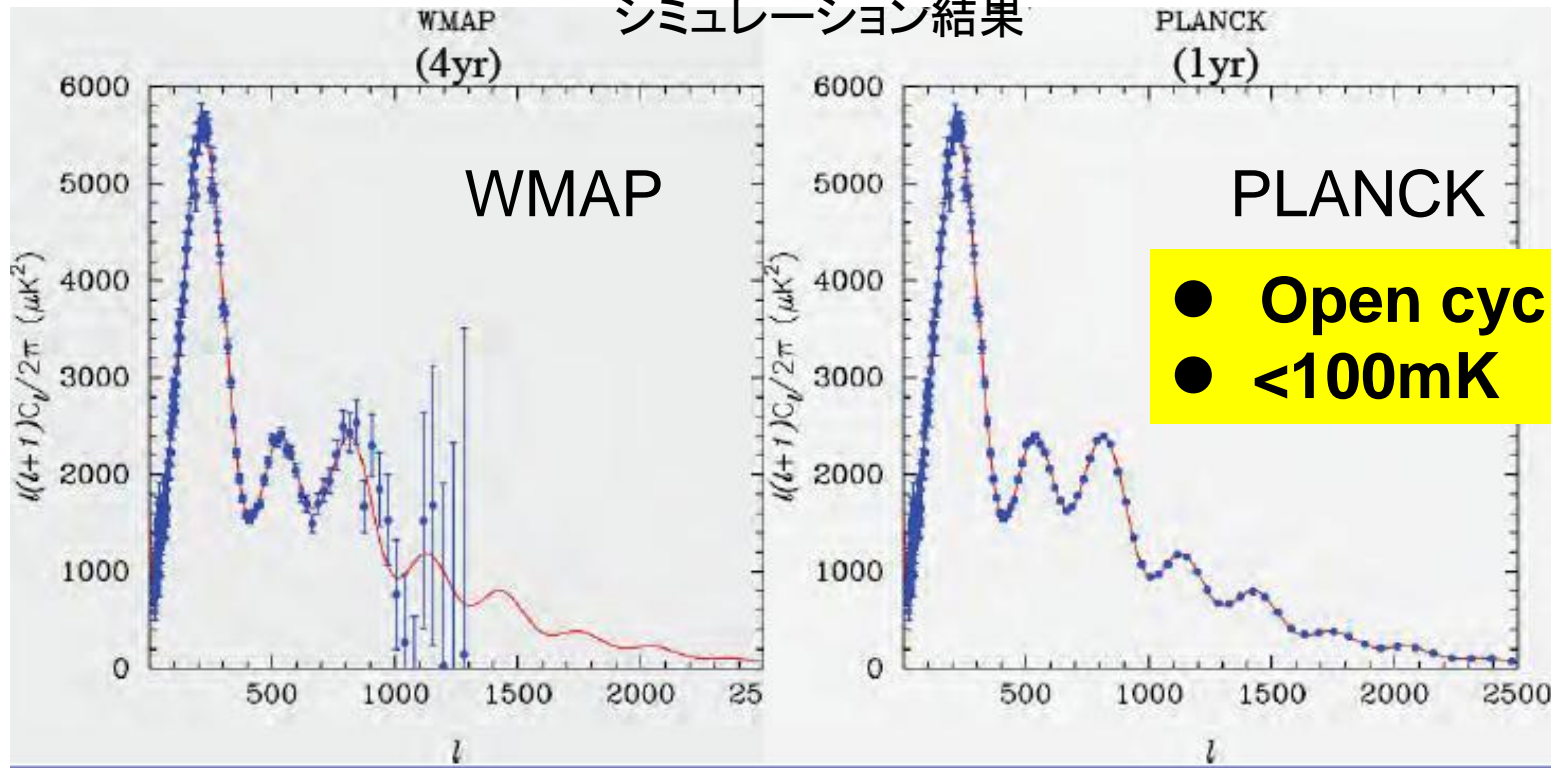
RESET

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



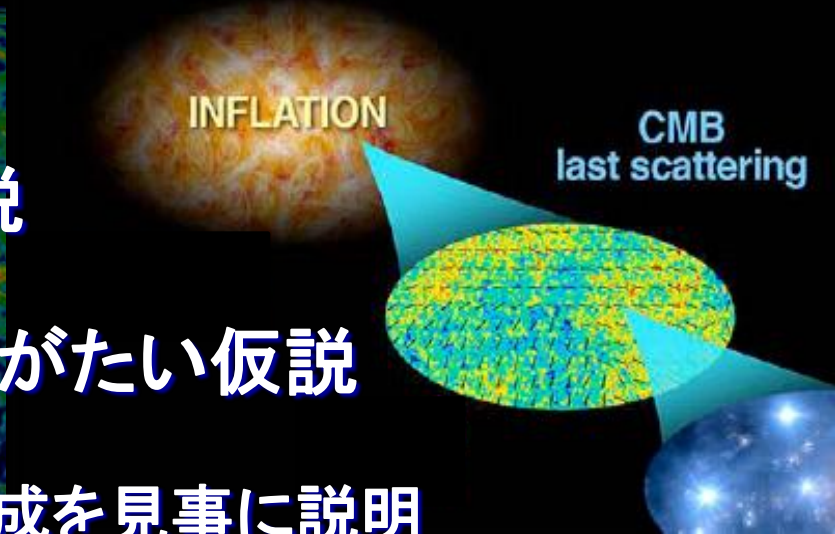
シミュレーション結果



CMBに関する長いイントロ 終わり

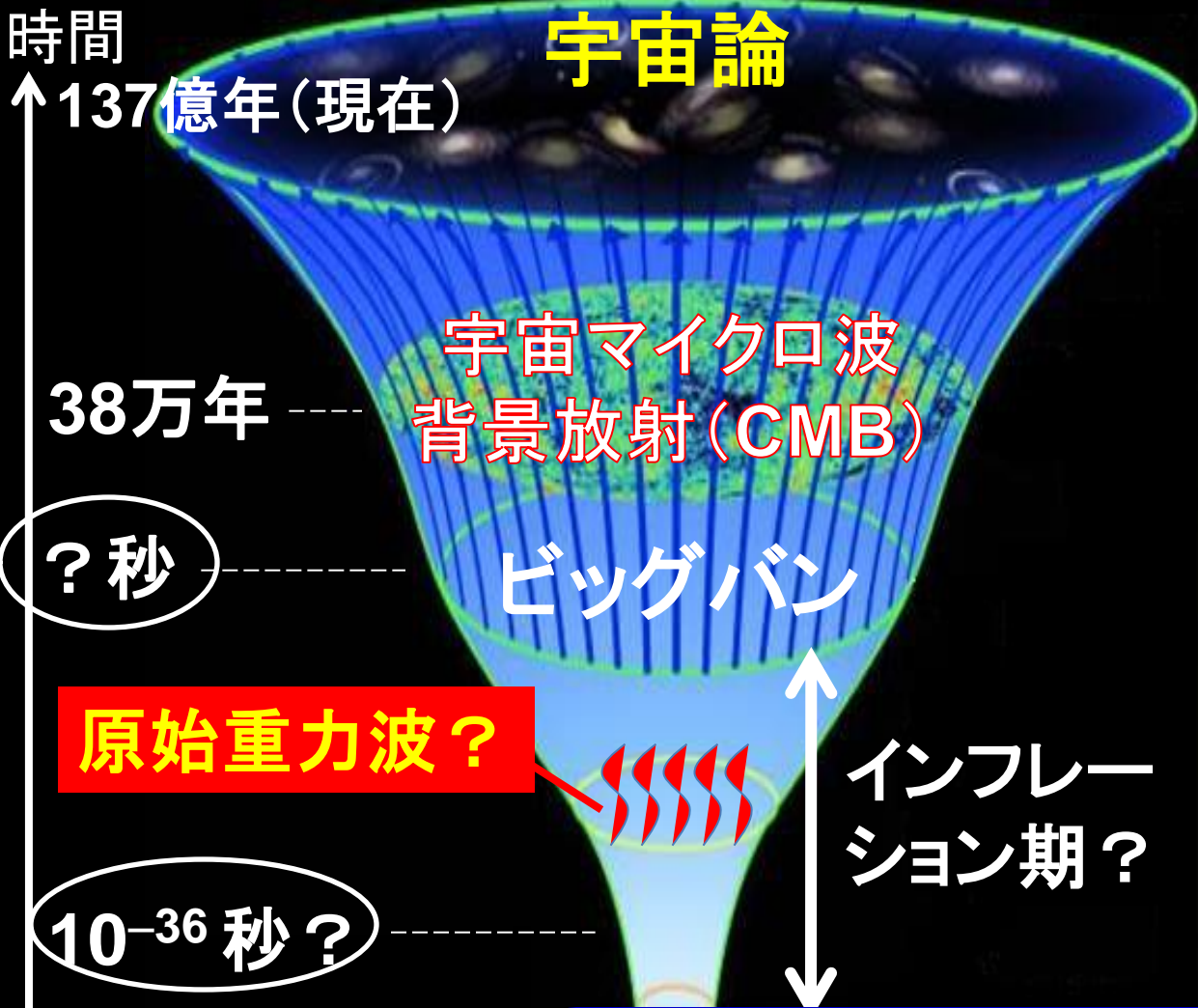
インフレーションによる宇宙創成

- ビッグバンの前を記述する仮説
- 最も有望、しかし常識では信じがたい仮説
 - 宇宙の一様性、平坦性、構造形成を見事に説明
 - 一瞬で“アメーバが銀河サイズになる”宇宙の加速膨張
- 背後の物理法則は未知。素粒子標準理論で説明不可能

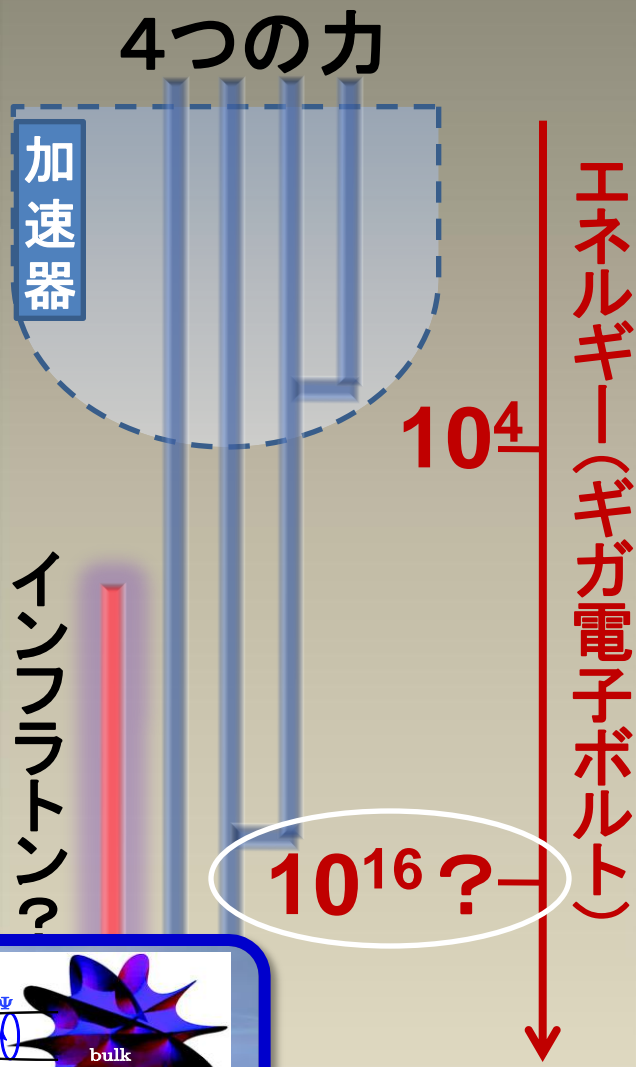


人類に課せられた最大の知的挑戦

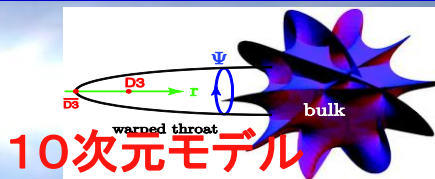
インフレーションと自然界の究極理論



高エネルギー物理



究 極 理 論
(超弦理論など)



宇宙を見る新しい“眼”

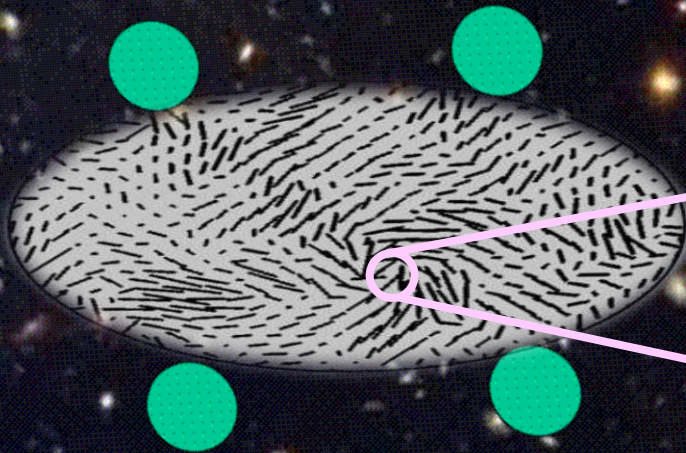
低温＝低ノイズ
新しい“眼”を得るには
革新的低温系が鍵

新しい宇宙像

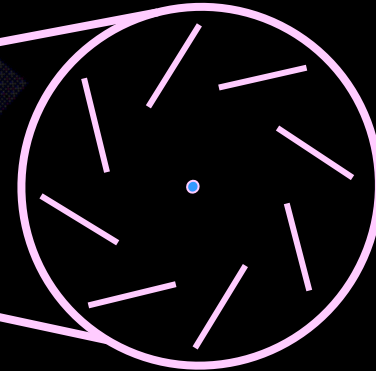
物理学の根本法則探求

CMBによる原始重力波検出ー温度から偏光度へー

CMB直線偏光マップ



CMB偏光Bモード
“渦”パターン
原始重力波の“刻印”



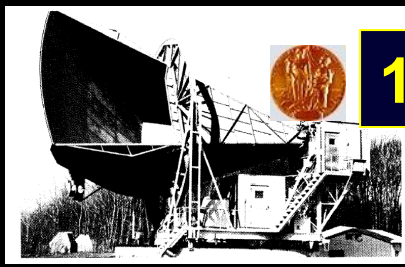
CMB偏光Bモード検出がベストな原始重力波発見法

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!

$$\begin{aligned} &\text{インフレーションエネルギー} \\ &= 1.06 \times 10^{16} \times (r/0.01)^{1/4} \text{ GeV} \end{aligned}$$

CMBによるインフレーションの検証

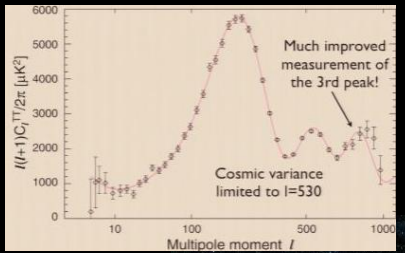
✓ 宇宙の一様性 ←



1978年ノーベル物理学賞

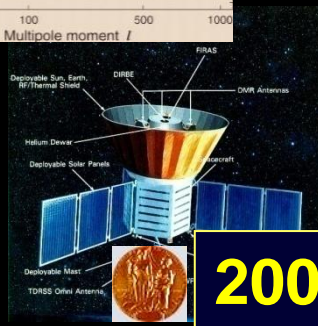
初期CMB観測

✓ 宇宙の平坦性 ←



BOOMERanG,
WMAP, MAXIMA

✓ 宇宙構造の起源 ←



COBE, WMAP,
銀河宇宙地図

2006年ノーベル物理学賞

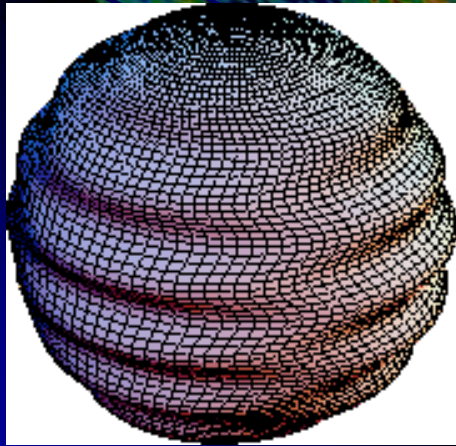
● 原始重力波 ← 未発見

原始重力波は、インフレーションの存在を直接証明できる、最も重要な予言

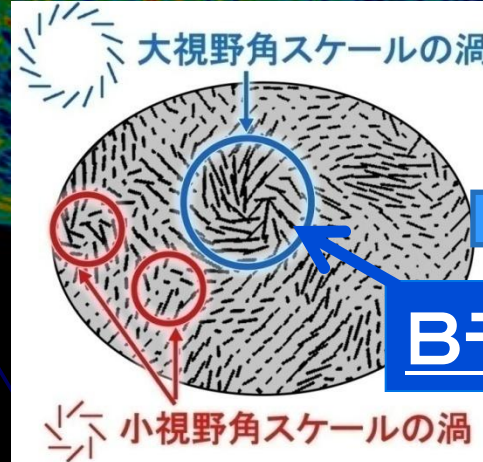
今後の大目標：偏光Bモード

- 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

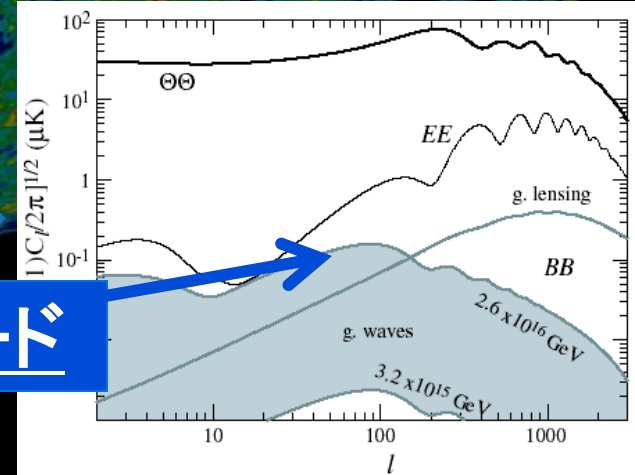
原始重力波



CMB偏光度マップ



パワースペクトル



Bモード

LiteBIRDとは

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

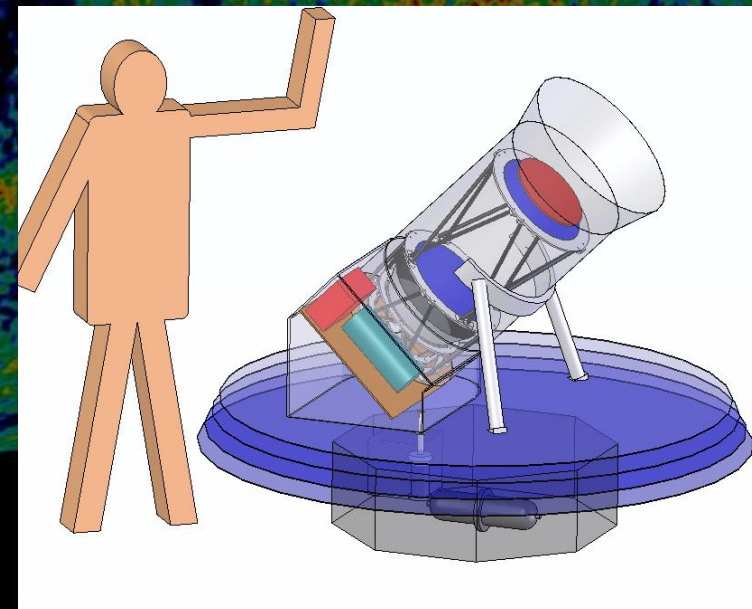
□ サイエンス：インフレーションのエネルギースケール決定
「ビッグバンの前を探る」

□ 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)

100mKで動作する超伝導検出器を使用



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)、 ← SPICA、DIOS、大気球
 - 篠崎慶亮、佐藤洋一、杉田寛之 (ISAS/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)、 ← 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)

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)→ 基礎的試作の経費
 - 公募研究(H22-23, H24-25)
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

次スライド以降で、2と3について補足

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—

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

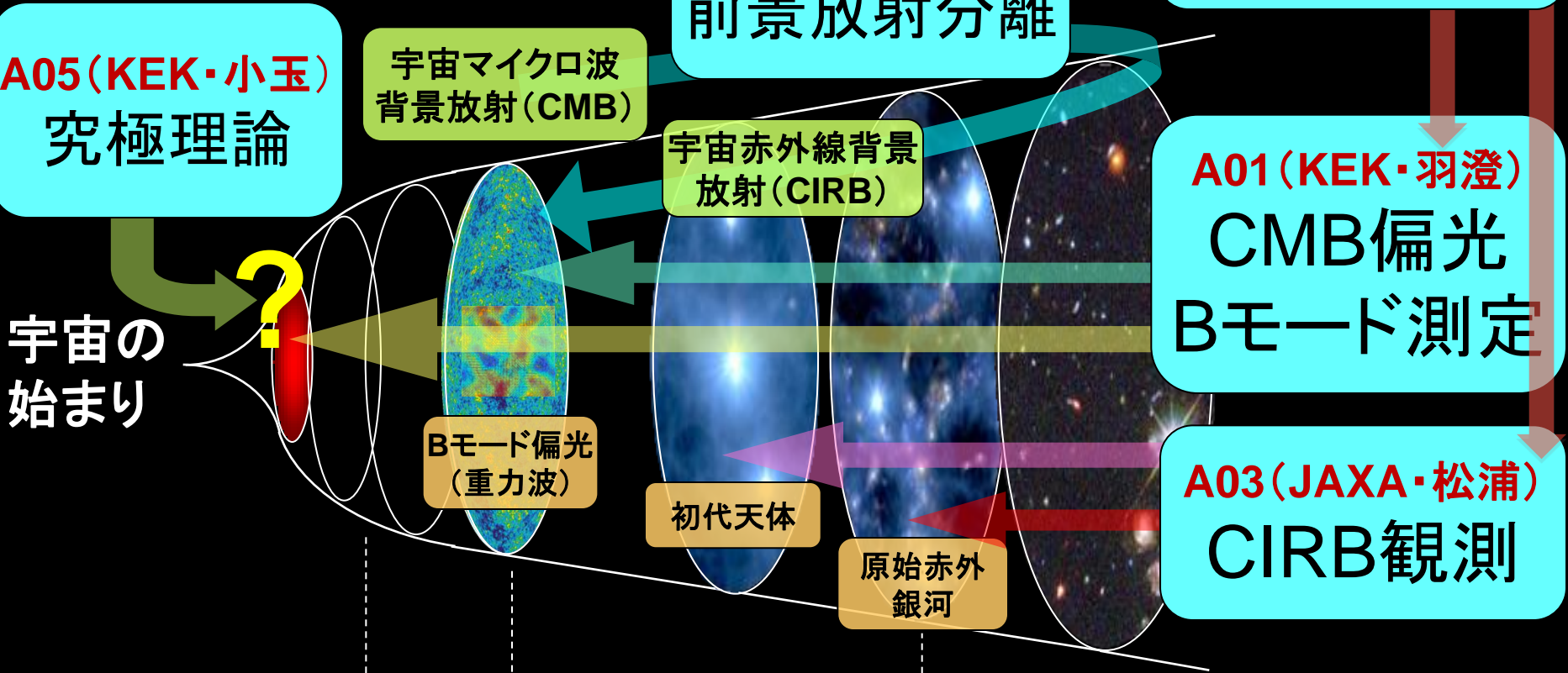
宇宙赤外線背景
放射(CIRB)

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

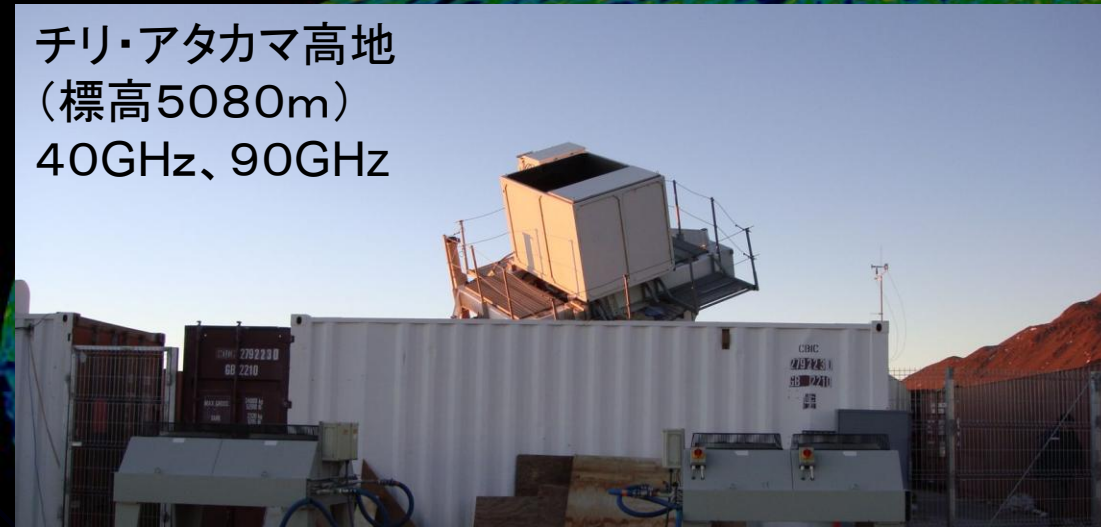
インフレーション期 再結合期 ダークエイジ 宇宙再電離 銀河形成・成長期 現在

宇宙年齢 10^{-36} 秒 38万年 1億年 10億年 137億年

LiteBIRDの前哨戦：地上観測

QUIET

チリ・アタカマ高地
(標高5080m)
40GHz、90GHz

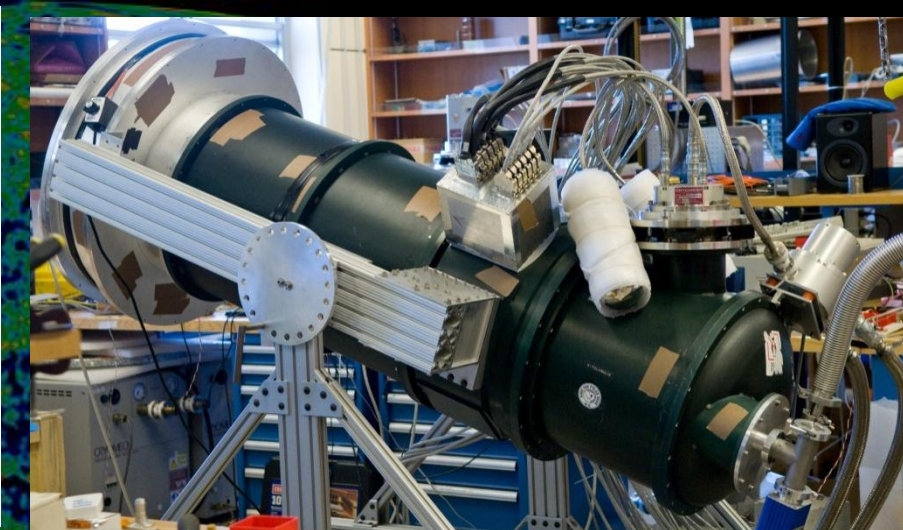
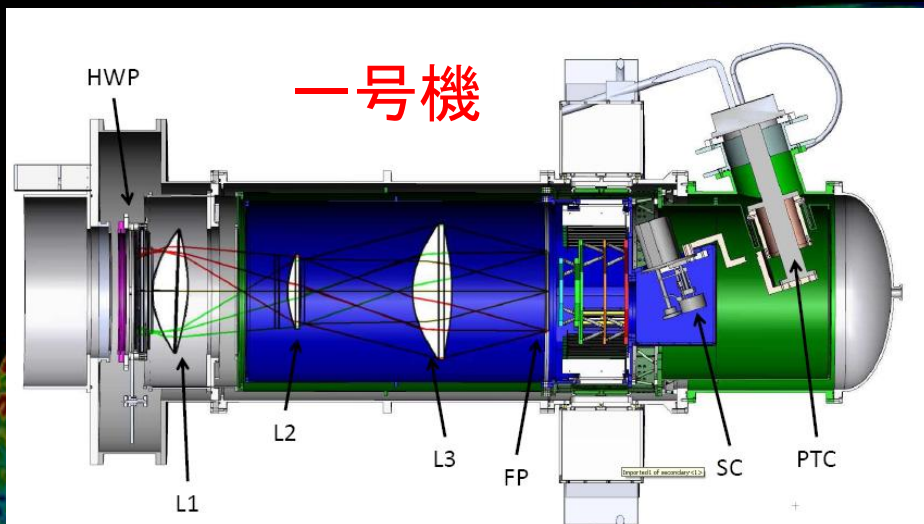


POLARBEAR

90, 150, 220GHz



POLARBEAR2号機クライオスタート

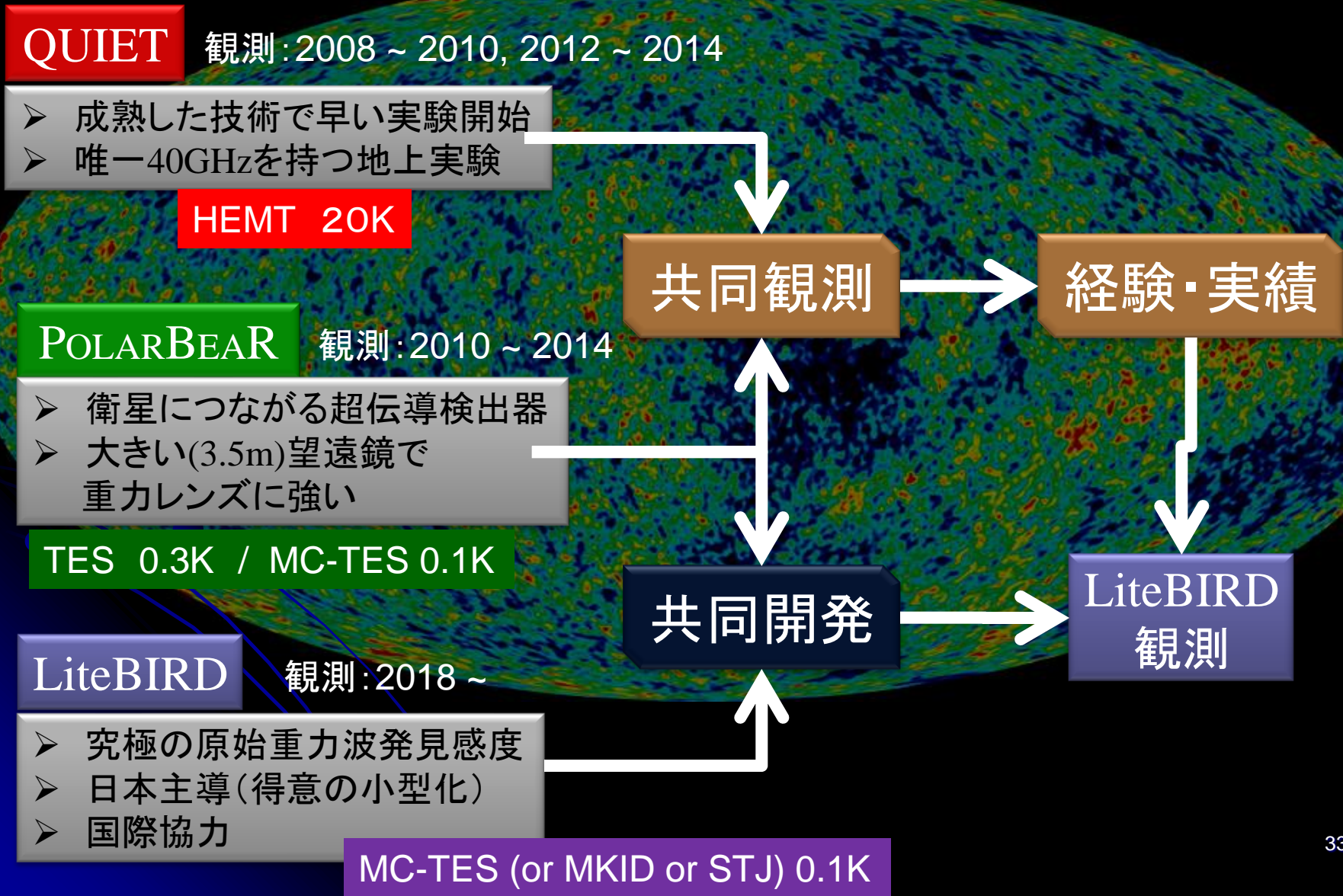


2号機 の仕様

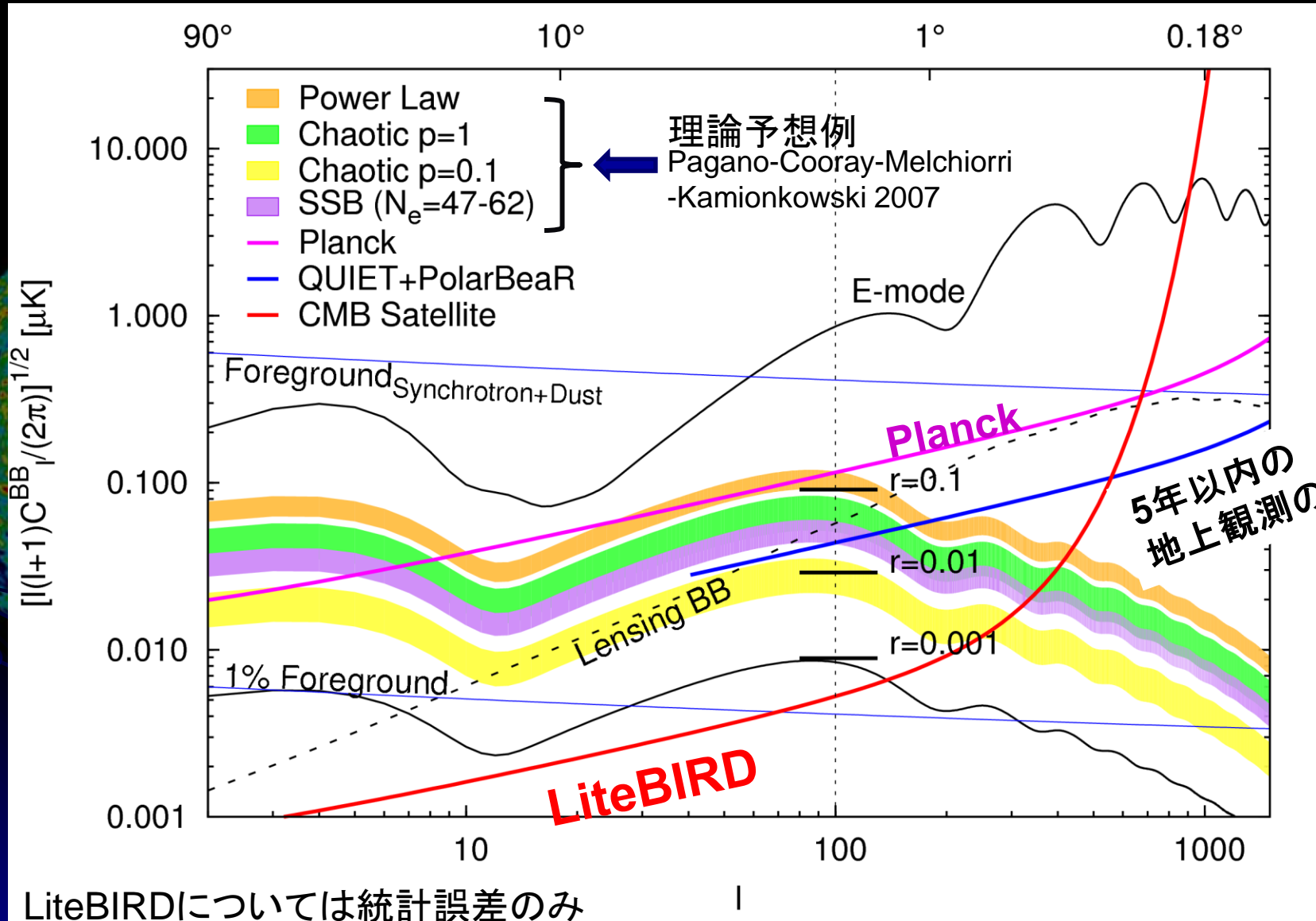
- ◆ 0.3Kまでは一号機を踏襲：PTC + SC
- ◆ PTC: Cryomech PT415を2台 (1号機は1台)
- ◆ SC: Chase He10 sorption cooler
- ◆ 0.3K → 0.1Kのために一段ADR
 - ◆ 超伝導スイッチ、CPA (ソルトピル)
- ◆ センサーはMC-TES (90GHz+150GHz)
- ◆ 焦点面を倍にする (感度向上): 熱設計へのインパクト

2号機: 日本グループが設計・製作

プロジェクト関係図



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

LiteBIRD: 戦略とDesign Concept

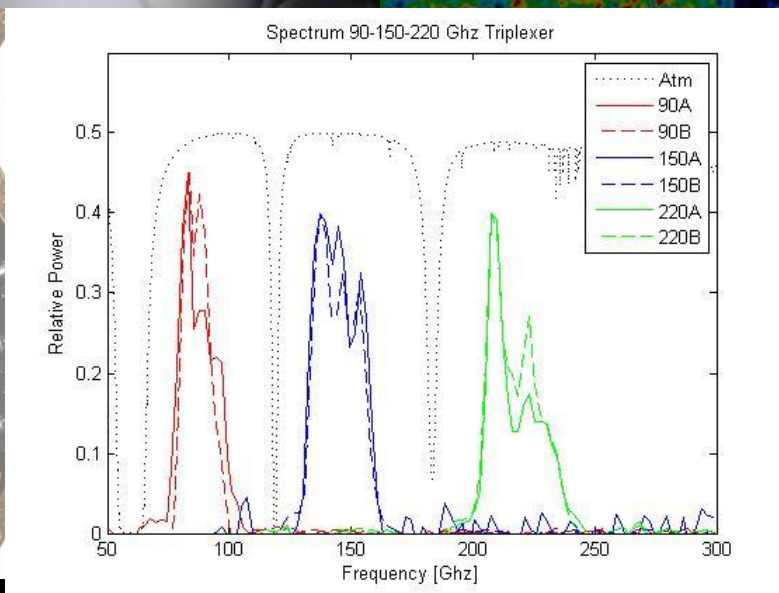
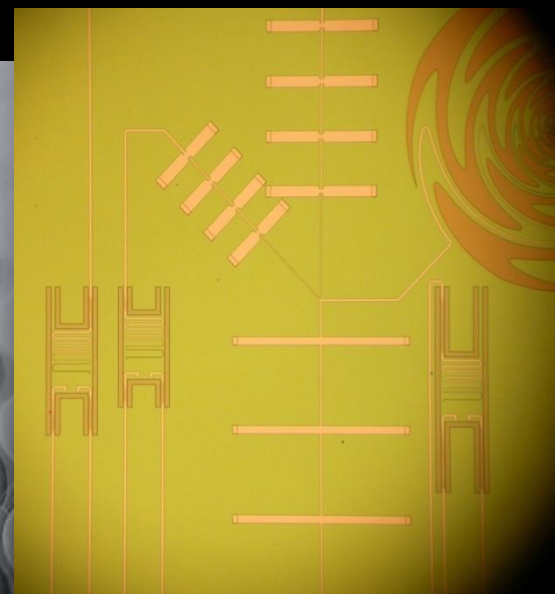
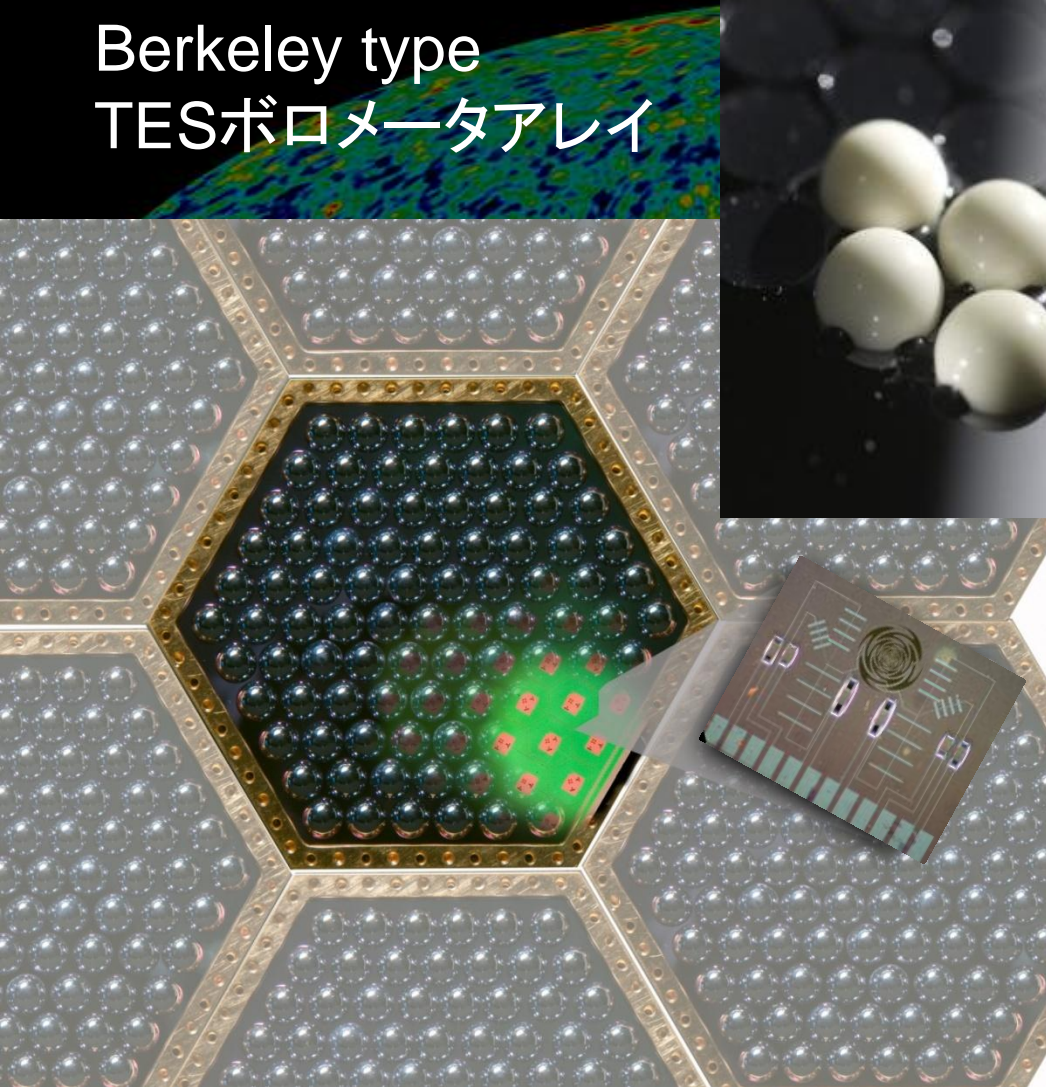
- 現在多くの地上／気球実験が進行中・準備中
- アメリカ／ヨーロッパでのCMB偏光衛星実験検討 ⇒大型衛星実験(2020年代)
- インフレーションの直接検証にテーマを絞れば、小型で究極の測定が可能
→ 軽量化を追求し、早期(2020年より前)の打ち上げの道を探る

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 $30^\circ \times 30^\circ$
- 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

多色焦点面：超伝導検出器

Berkeley type
TESボロメータアレイ



- オプションとしてSTJ、MKID

KEKの新しいクリーンルーム



蒸着装置

金属の膜を作る装置

絶縁体の膜を作る装置 膜を削る装置

クラス10000
クリーンルーム

LiteBIRDのための
超伝導ミリ波カメラ開発



クラス 1000 クリーンルーム

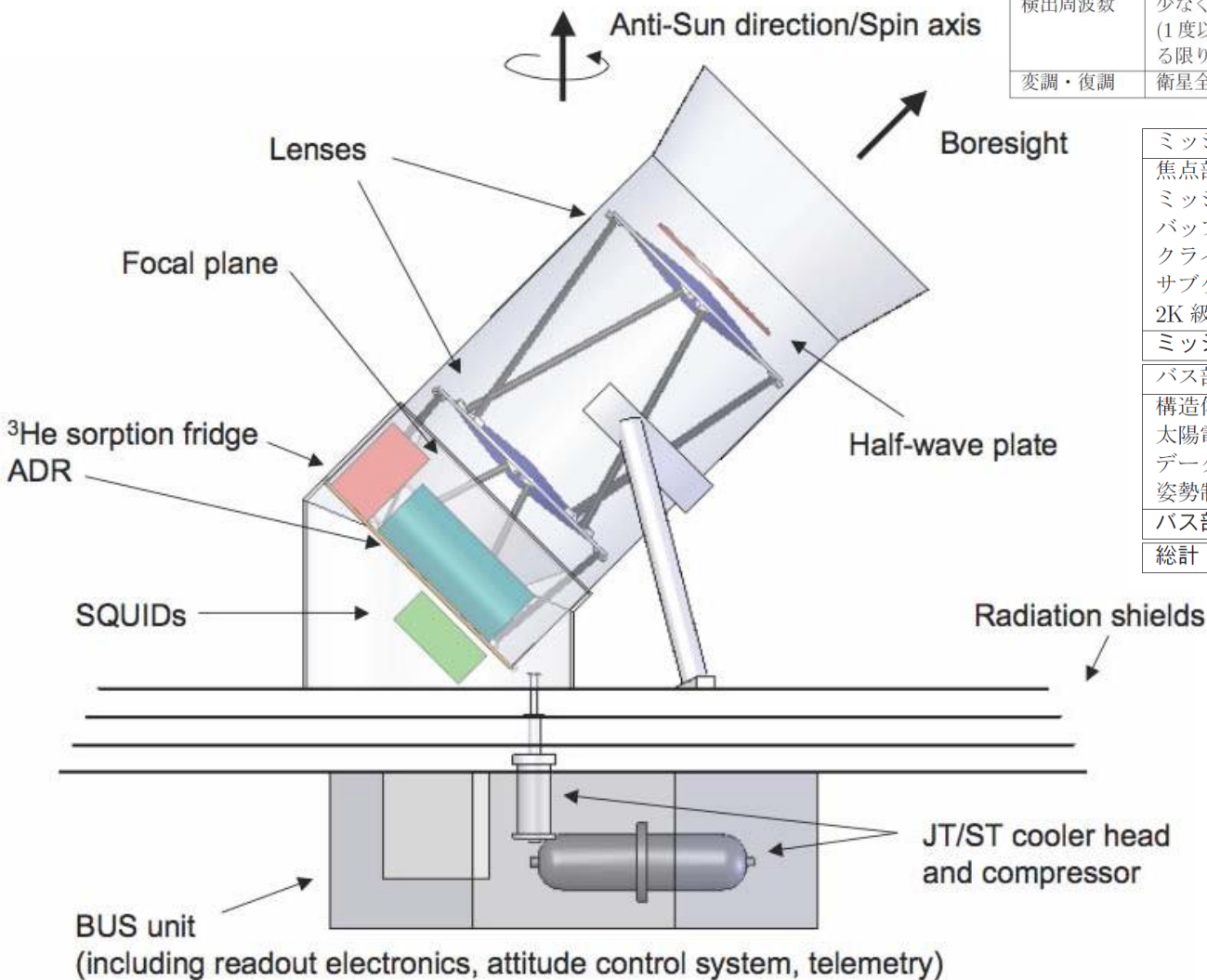
パターンを
描く装置

化学薬品を扱う
ための装置



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

冷却系に課せられる条件

- 使用環境: 宇宙空間 (地球周回太陽同期軌道、またはL2)
 - JAXA小型科学衛星の仕様を満たすこと
 - 無重力状態であることに留意
- 耐用年数: 2年以上 (5年間の観測を目指す)
- 冷凍能力: 100mKで1 μ W以上
- 磁場シールド: 検出器系 (クライオパーム含む) への外部磁場が地磁気以下
 - 上記二点はTESを想定した場合
- 低ノイズ:
 - 電磁場シールド、防振

LiteBIRD 冷却系概要

(数値は暫定)

ミッション部・バス部あわせて
約+500W。バッテリーの動作条件
から設定温度は280Kが望ましい

冷凍能力~1W、熱侵入
1.1W。G10サポートの
構造設計改良により軽減。

冷凍能力150mW、熱侵入
100mW。

冷凍能力30mW w/ 4He (3He)、
熱侵入10.6mW。

熱侵入 $0.57\mu\text{W}$

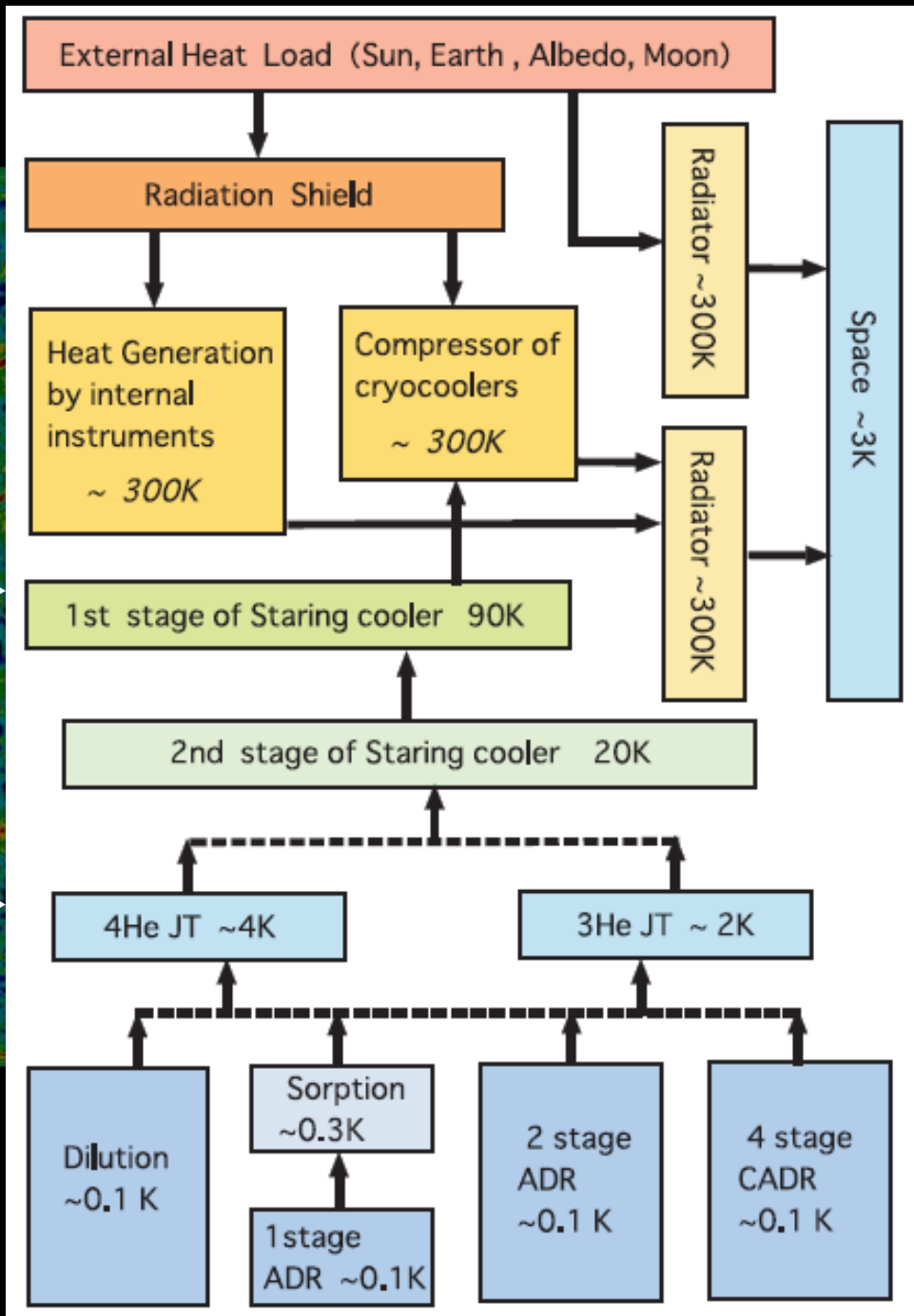
Cf.

Planck: open-cycle dilution

Astro-H: CADR

DIOS: 2ADR

POLARBEAR II: SC+1ADR



LiteBIRD: まとめ

- **Lite** (light) Satellite for the studies of **B**-mode polarization and **I**nflation 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
- デザインコンセプト:
 - 60-250GHzのミリ波の偏光を全天で精密観測 ($2\mu\text{K}\cdot\text{arcmin}$ 以下)
 - 多色焦点面とWarm launch (SPICA方式)で軽量化
 - ゆがみの少ない光学系+回転半波長板で系統誤差を極力おさえる
- プロジェクトマネジメント関連:
 - 2008年9月: JAXA小型科学衛星WGとして承認
 - 2009年7月: 科研費新学術領域採択(平成21-25年度)
 - 前哨戦としての地上プロジェクト(特にPOLARBEAR II)
 - DIOS、ASTEとの技術連携 → 相乗効果・波及効果



調査研究会に期待すること

- LiteBIRD and/or POLARBEAR IIへの参加！
 - 現在の陣容(敬称略)
 - 高田卓(筑波大)
 - 木村誠宏、鈴木敏一、都丸隆行(KEK)
 - 篠崎慶亮、佐藤洋一、杉田寛之(JAXA) : LiteBIRD WG
- Closed-cycle Dilutionの調査とADRとの総合的比較
 - 技術的課題の明確化
 - R&Dに必要な期間の予測

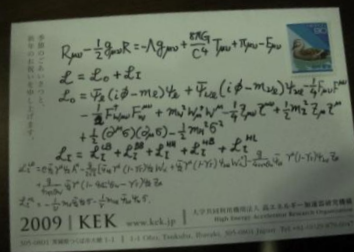
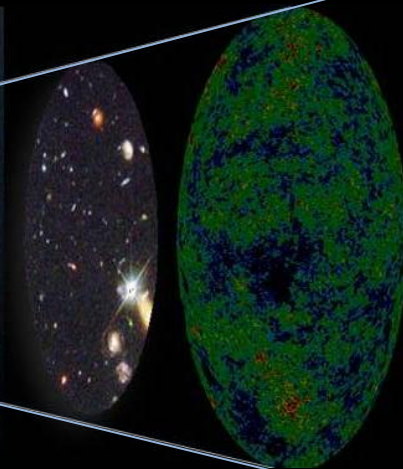
LiteBIRD WG
POLARBEAR II

補足スライド

KEKで宇宙観測をする動機

「宇宙の背後にある根本法則を発見」

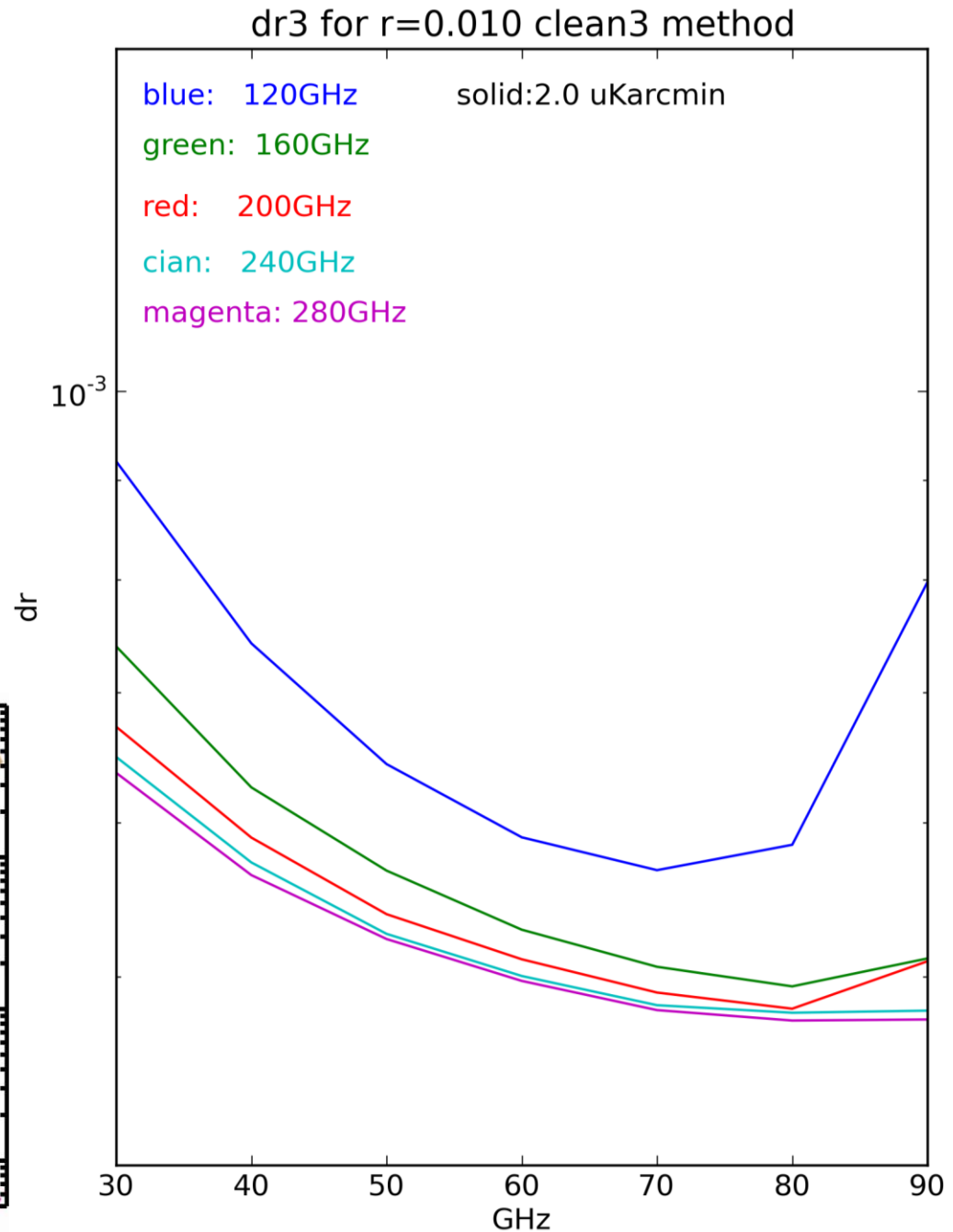
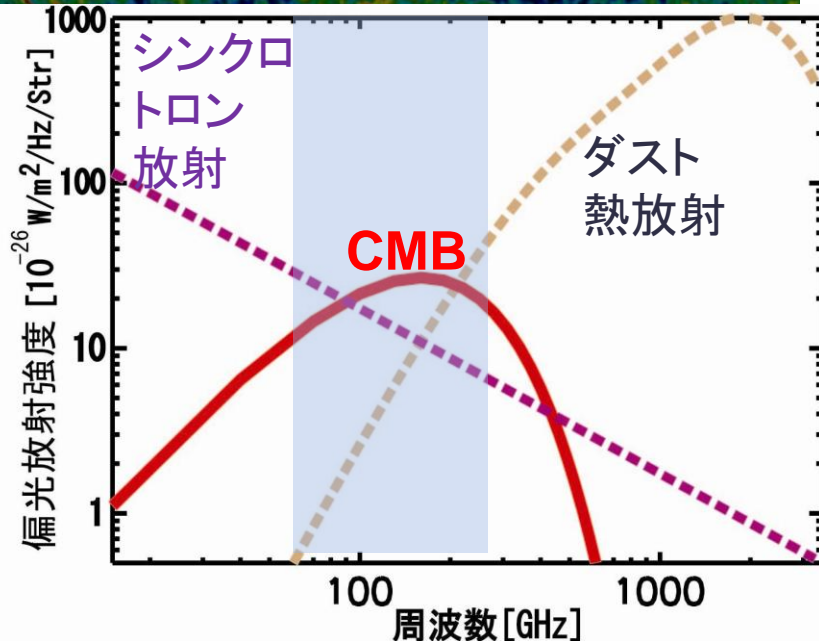
遥かなる
宇宙のルールブック



葉書き一枚で書けると期待している
(作業仮説)

前景放射 の分離

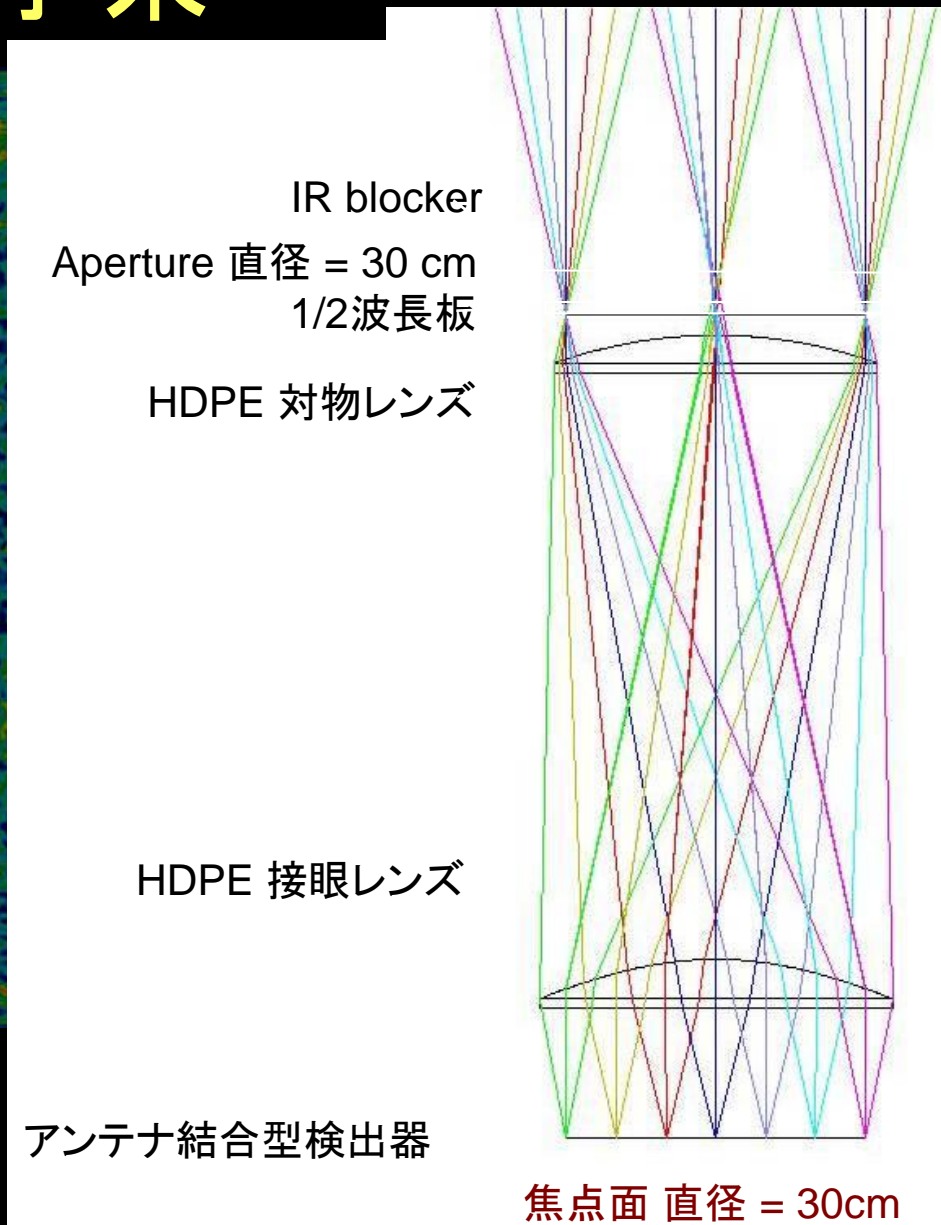
- シミュレーションスタディ
の(暫定)結論:
60GHz-250GHz
をカバーすればよい



光学系

Zemaxを使った光学デザイン。

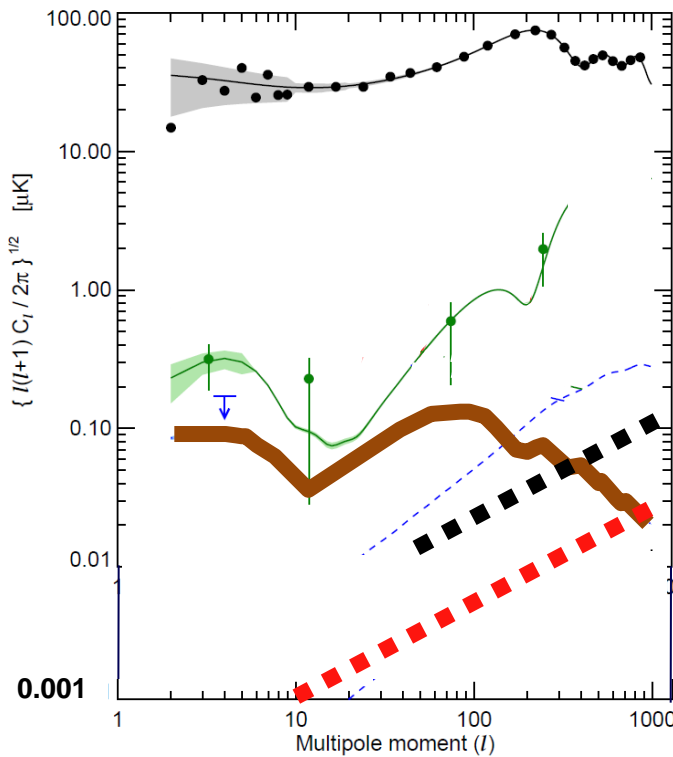
- 光軸対称の屈折望遠鏡
- 視野: $30^\circ \times 30^\circ$
- Strehl ratio > 0.8 (回折限界) を平面焦点面全域 @ 300GHzで実現。
- レンズ: 高密度ポリエチレン
(高密度ポリエチレンの放射耐性、酸化への影響によってはSiレンズを用いる。)
- 光学系の温度は2Kに保つ
- 1/2波長板を用いた偏光変調
- 偏光角度を回転
- メインビームの系統誤差
- サイドローブをコントロールする



A02:初期宇宙探査のための超高感度アレイデバイスの研究開発

代表:大谷知行(理研)

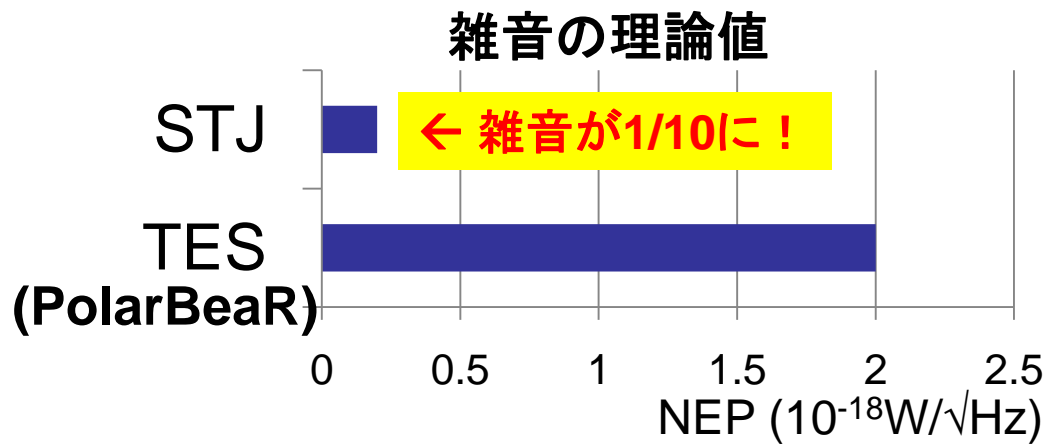
“検出器を制するものはCMBを制する”



超伝導トンネル接合素子 (STJ)
による超高感度検出器

NEP 10^{-18} W/√Hz
1000画素

→ 10倍の感度



究極のCMB観測の基盤技術

A01(KEK)

計画研究A02: 研究内容

A03(JAXA)

CMB観測用STJ (理研)

CIRB観測用STJ (国立天文台)

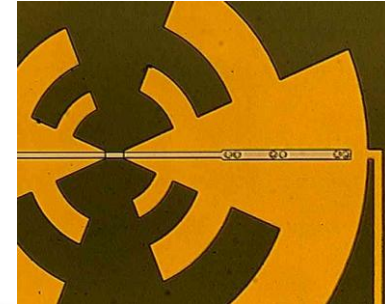
共通課題の解決
を一体で推進

AI-STJアレイ開発

Nb/NbN-STJアレイ開発



1000画素アレイ
超高感度
(NEP <math>< 10^{-18} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}</math>)
最適な光学設計



共通基盤技術

多素子信号読み出し技術 (KEK)

RF-STJによる多素子同時読み出し
バックエンド回路開発

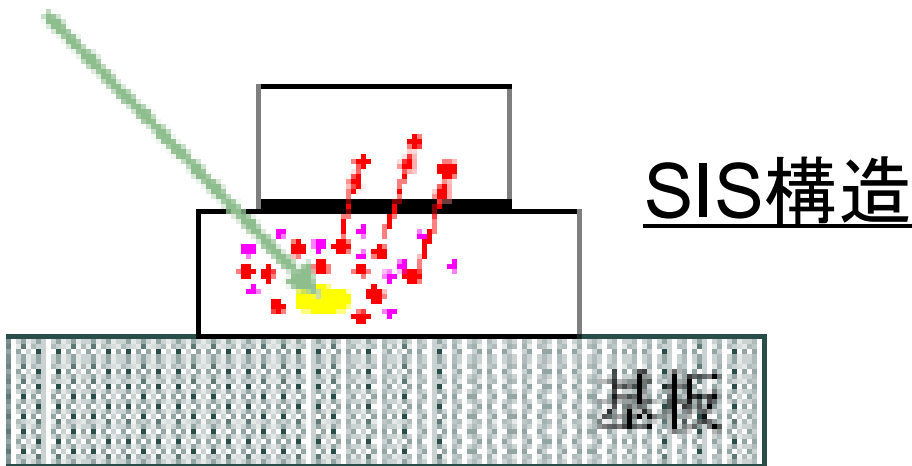


国際的CMB/CIRB観測基盤の確立

STJ Overview

- Superconducting Tunneling Junction Detector (超伝導接合検出器)
- meVの光子に対するphotoconductor
- 他の超伝導検出器よりノイズが小さく、高速、ダイナミックレンジが大きい: **最高の次世代検出器**

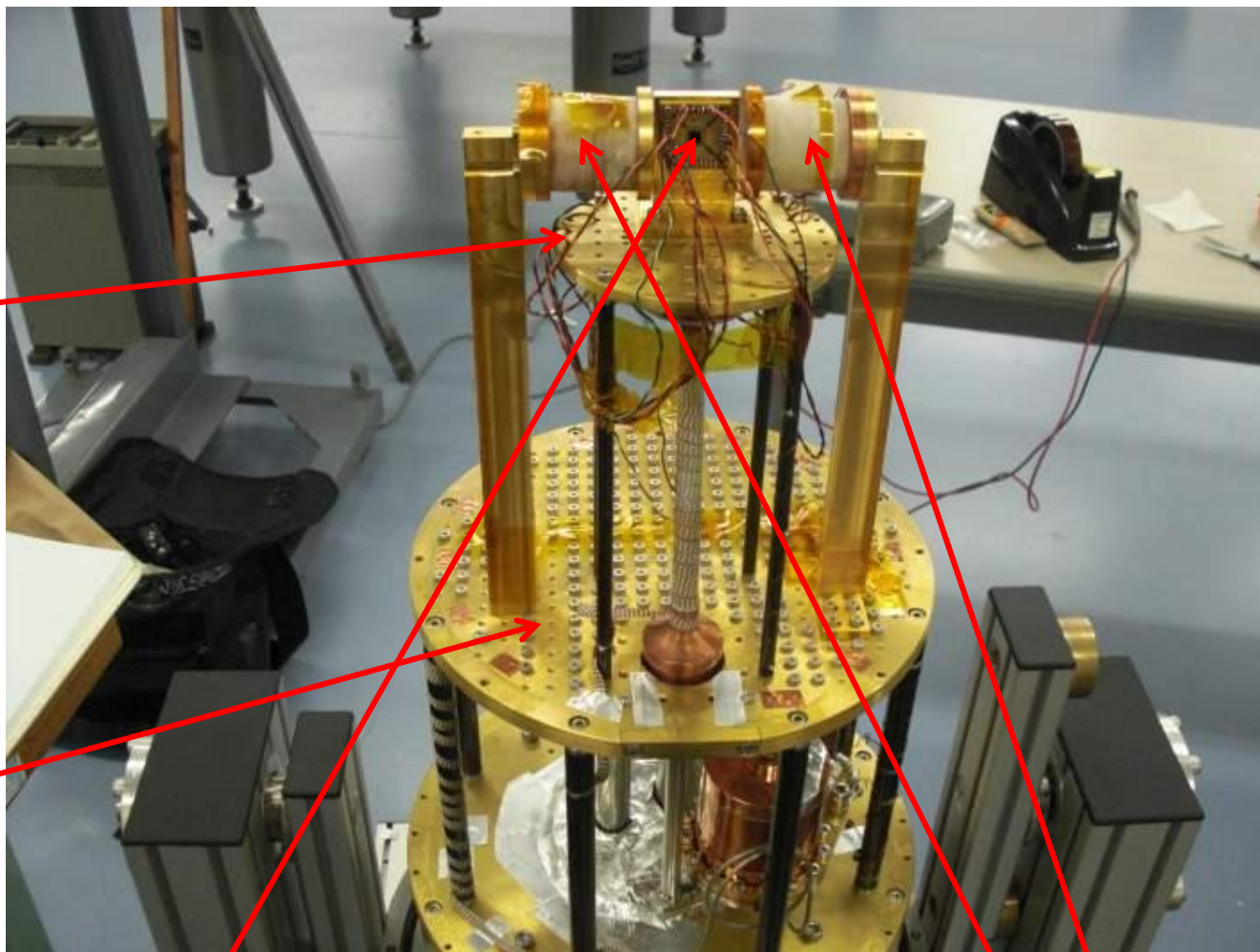
meV光子



クーパー対が壊れ、
電子に戻る。

量子物性理論的には
「準粒子が生まれる」

0.3K無冷媒冷凍機@KEK



0.3Kステージ

4Kステージ

Nb/Al-STJ

超伝導マグネット

ミリ波シグナルを観測！

・測定温度: 0.3K

・ギャップ: $2\Delta = 1.1\text{mV}$

結果

90GHzのミリ波照射により、フォトン検出によるギャップの変化を確認した。右図でギャップ0.3mV(90GHz)の電圧変化が見える

