

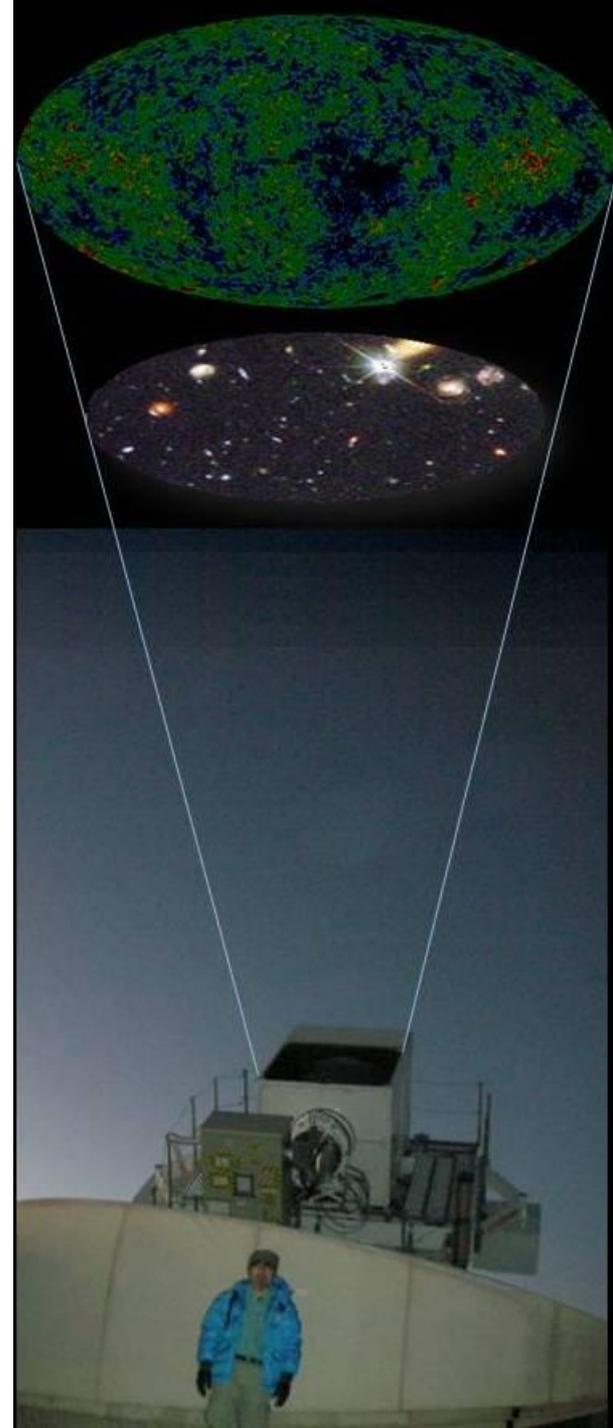
# ビッグバンの前を探る 新しい宇宙観測

羽澄昌史

KEK・CMB実験グループ

2009年度KEK公開講座 (10月31日)

テーマ「ノーベル賞の先の未来へ」



2004年KEK公開講座でのスライド

# 素粒子物理の道 = 「非常識」の道



森羅万象の基礎理論  
(宇宙のルールブック)

11次元? 全ては「ひも」?

宇宙物理の道

超対称性?

時空の拡張、  
隠れた次元?

Bファクトリー

巨大なCPの破れ  
未知の素粒子?

様々な「非常識」な理論を学びながらここまで来るのに大学入学後何年もかかる。標準理論などという名前と呼ばれているが、実は「非常識」の集大成。

素粒子の標準理論

重い光(ウィークボソン)  
全ては場だ!

小林・益川の理論

6種のクォーク。反粒子は  
粒子と本質的に違う!

クォークモデル

直接見る事が出来ない粒子

相対論的量子力学

反粒子(未来から過去へ走る粒子)

量子力学

波の粒子

相対性理論

光速不変、4次元時空、質量は保存しない!

高校の物理: エネルギー保存則、ニュートン力学、電気と磁気、などなど、宇宙を考えるためには絶対に必要!

楽しいが、ながい道のり。

# 宇宙物理の道 = 「非常識」の宝庫

- バリオジェネシス : 失われた反世界
  - ダークマター : 見えないものが、一番重い
  - ダークエネルギー : 万有斥力
  - インフレーション : 一瞬でアメーバのサイズが銀河サイズへ
- どれも、素粒子の標準理論では説明がつかない



今後の物理学の課題について南部氏は、  
**「極微の世界の素粒子論と、極大の世界の宇宙論という2つの未知の領域の関係が非常に大事になる」**  
と話す。\*

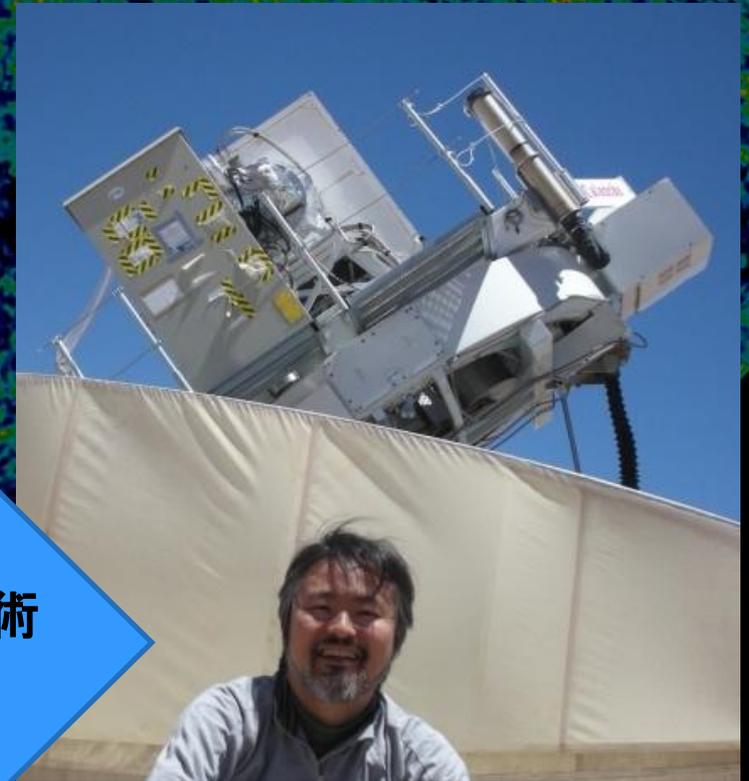
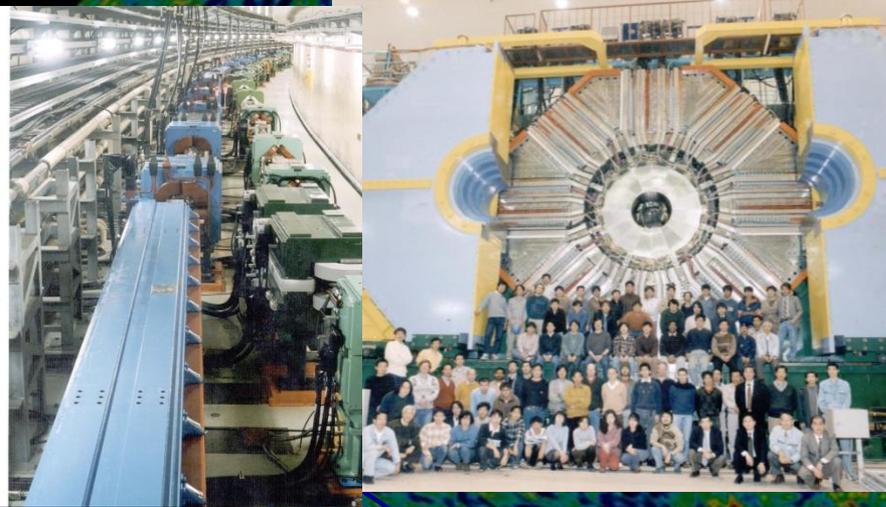
\* 出典:産経ニュース

<http://sankei.jp.msn.com/culture/academic/081007/acd0810072037011-n2.htm>

# 私の「非常識」

Bファクトリー  
(加速器を用いた素粒子実験)  
“CP対称性の破れ”

宇宙背景放射  
偏光観測



加速器実験の最先端技術  
を宇宙観測へ「輸出」

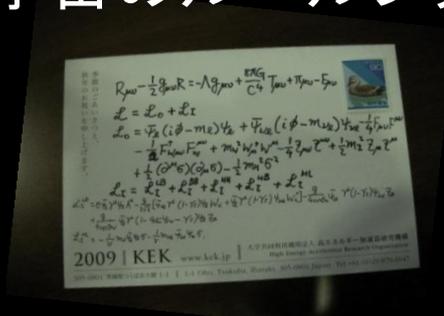
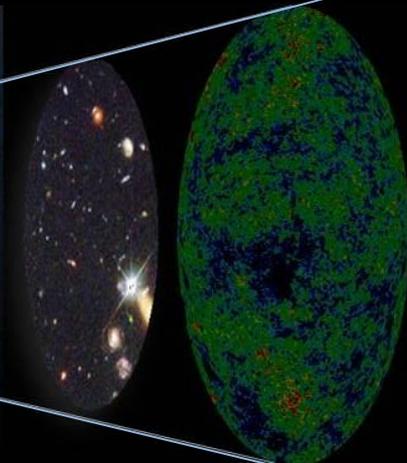
QUIET実験(チリ・アタカマ)<sup>4</sup>



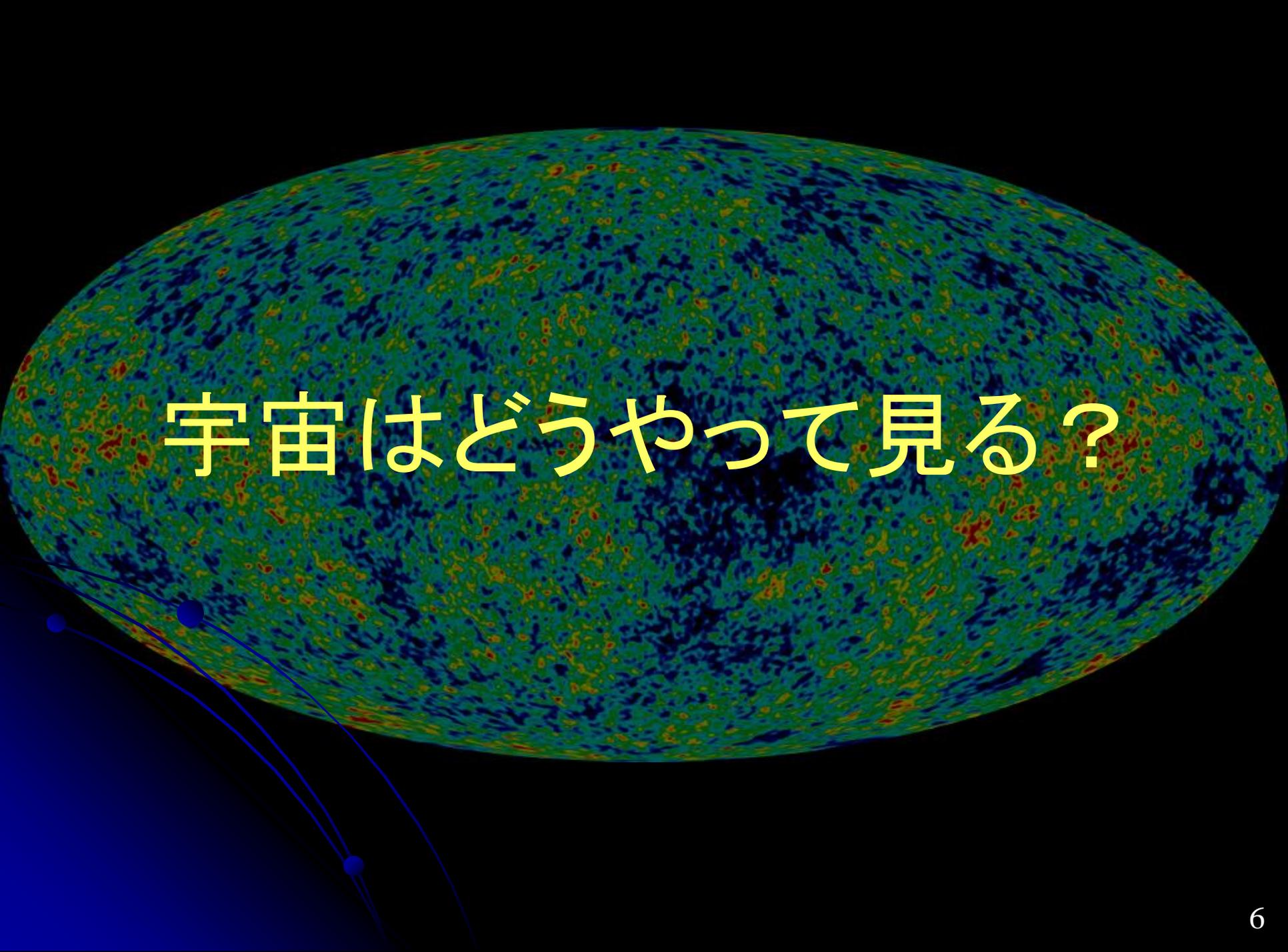
# KEKで宇宙観測をする動機

## 「宇宙の背後にある法則を観測したい」

遥かなる  
宇宙のルールブック



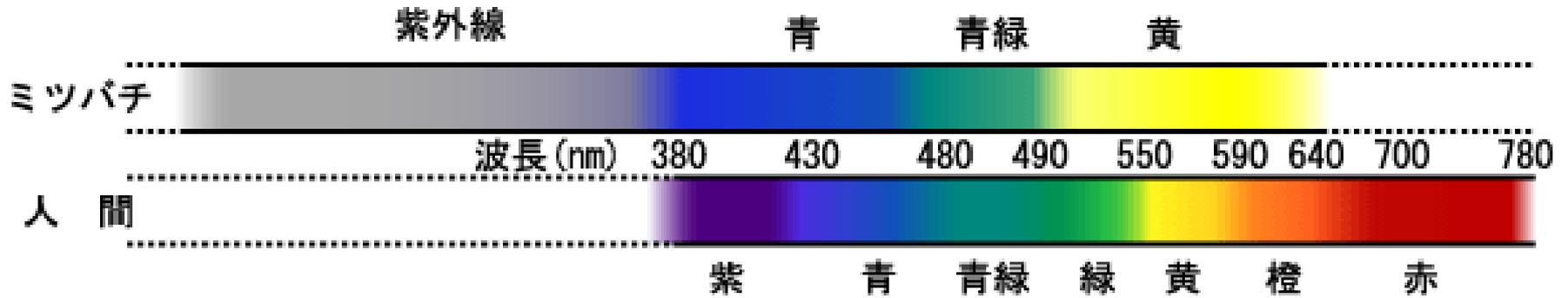
葉書き一枚で書けると期待している

A large, oval-shaped map of the Cosmic Microwave Background (CMB) showing temperature fluctuations. The map is filled with a complex pattern of blue, green, and red colors, representing different temperature variations across the sky. The text "宇宙はどうやって見る?" is overlaid in the center in a yellow font. In the bottom left corner, there are several blue dots connected by thin blue lines, suggesting a network or data points.

宇宙はどうやって見る？

# 可視光でみる夜空





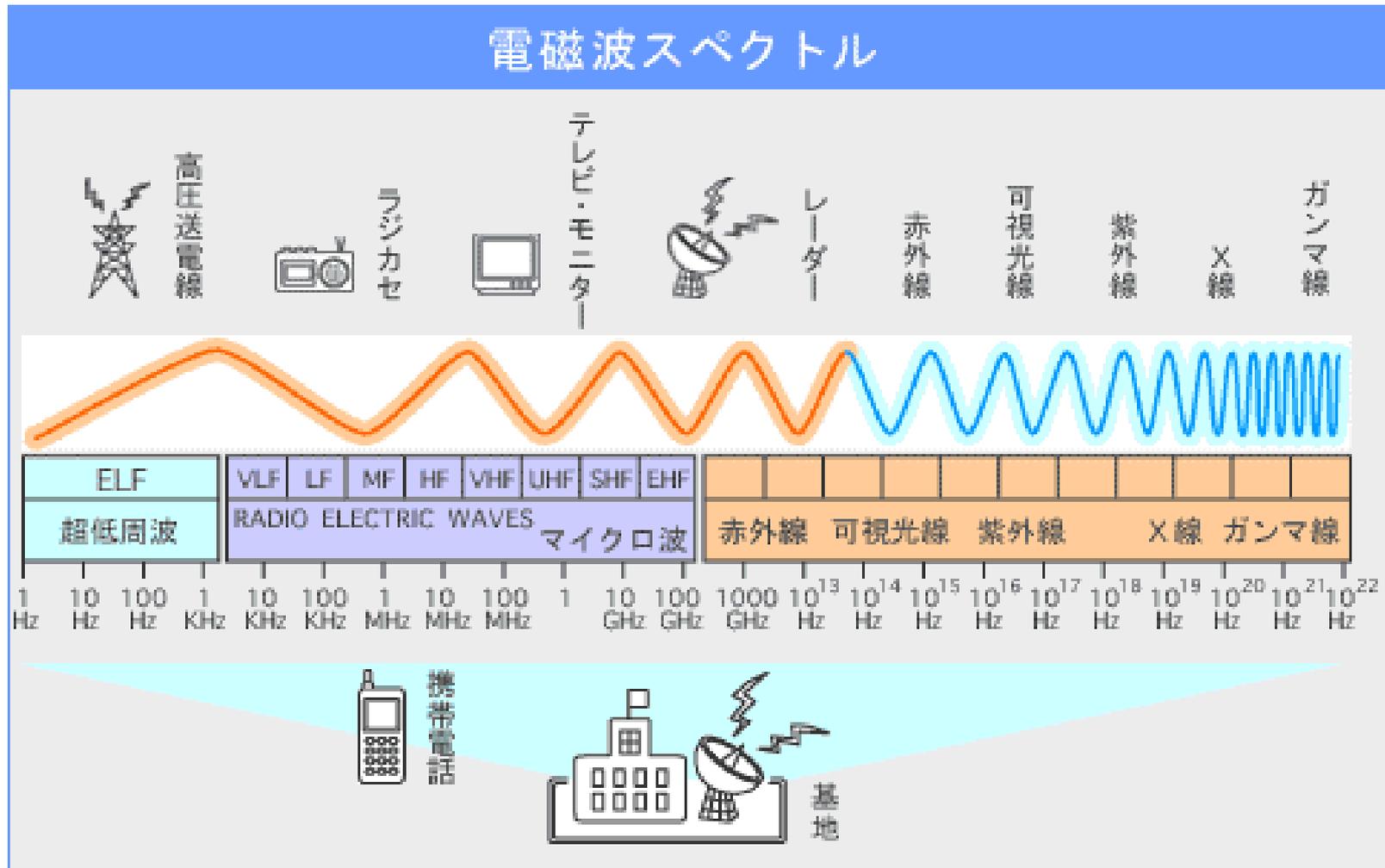
### タンポポ

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



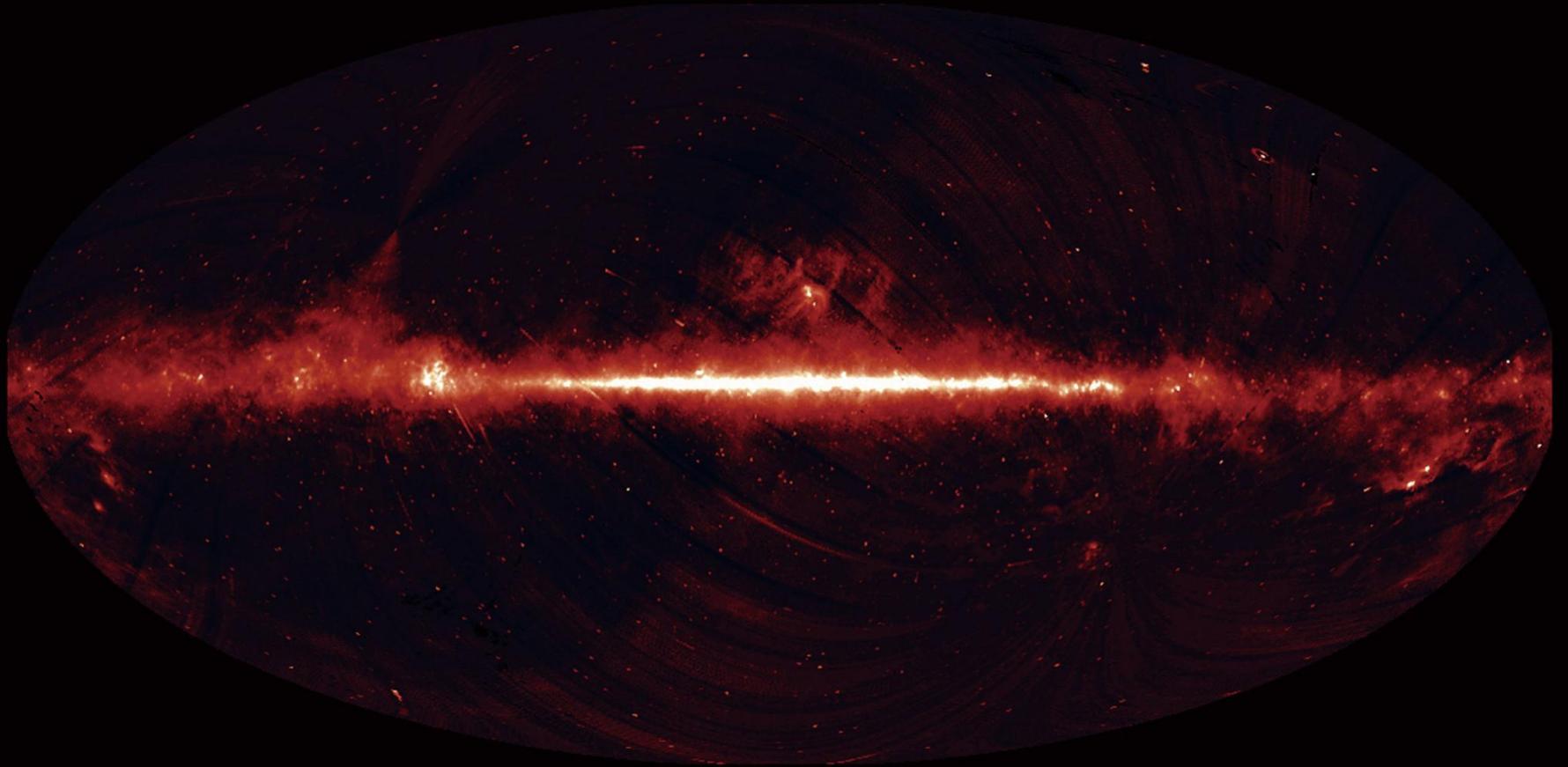
# 電磁波(=光)

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



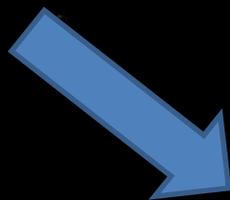
光速cは3億メートル/秒なので、100GHzのマイクロ波の波長は3ミリメートル

# 赤外線宇宙地図

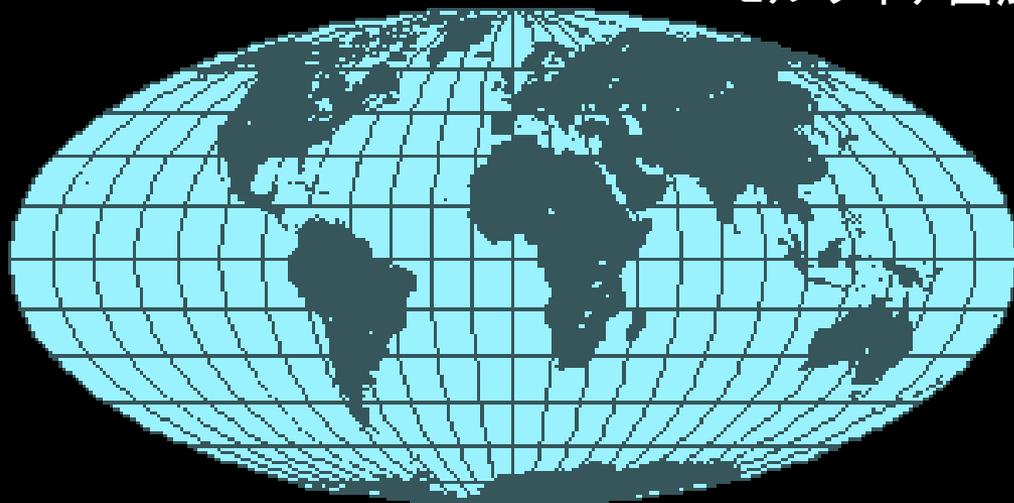


「あかり」による全天マップ

# 地図の見せ方



メルワイデ図法

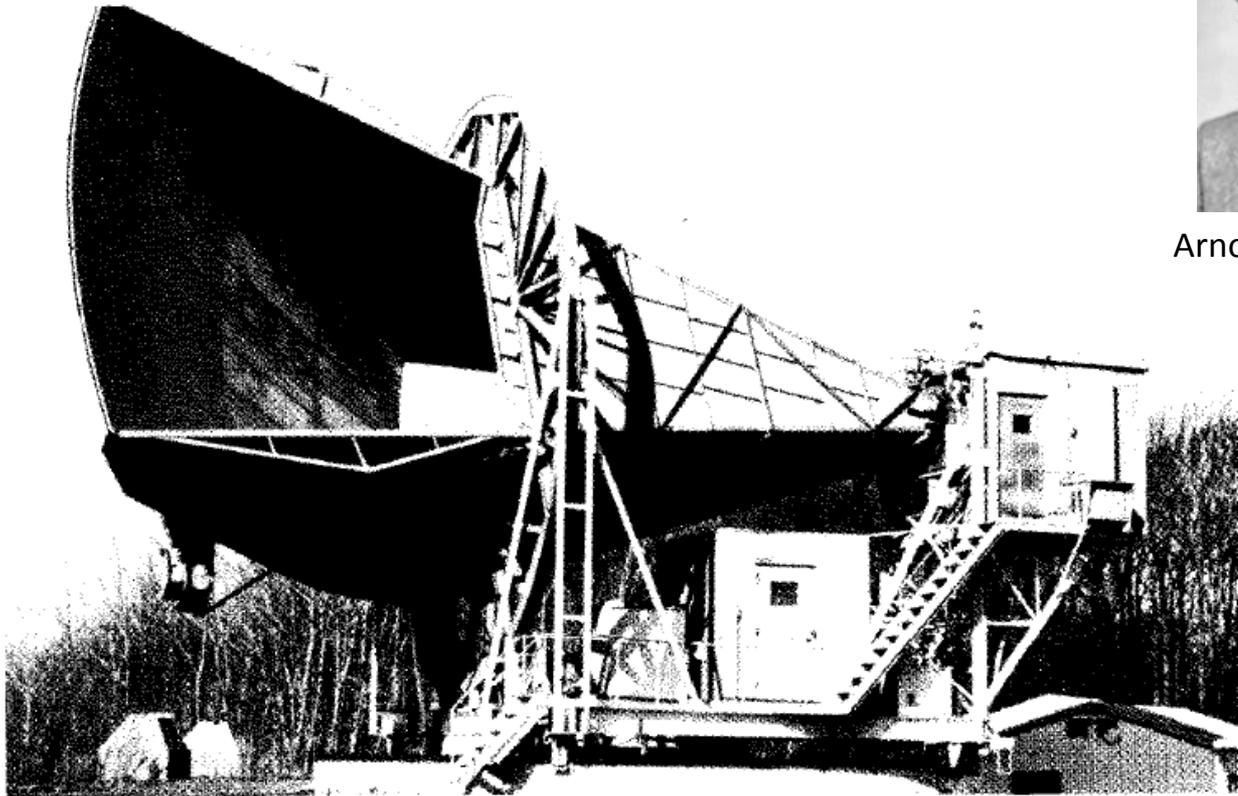


# マイクロ波宇宙地図



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

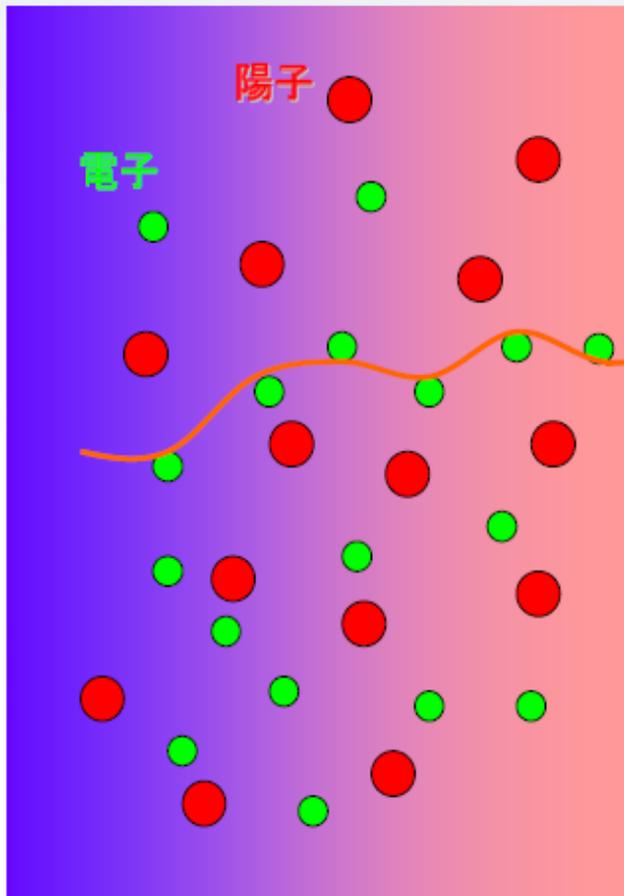
# 宇宙マイクロ波背景放射の発見 (1965)



Arno A. Penzias    Robert W. Wilson

1978年  
ノーベル物理学賞

電磁熱平衡(プラズマ)状態



陽子

電子

最終散乱面  
Last Scattering Surface (LSS)



クエーサー

銀河

宇宙マイクロ波背景放射

C  
M  
B

Bigbang

30万年

10億年

100億年

現在

陽子と電子が結合して宇宙が  
中性化=宇宙の晴上り

~137億年



背景(筑波山)

前景(鉄塔など)

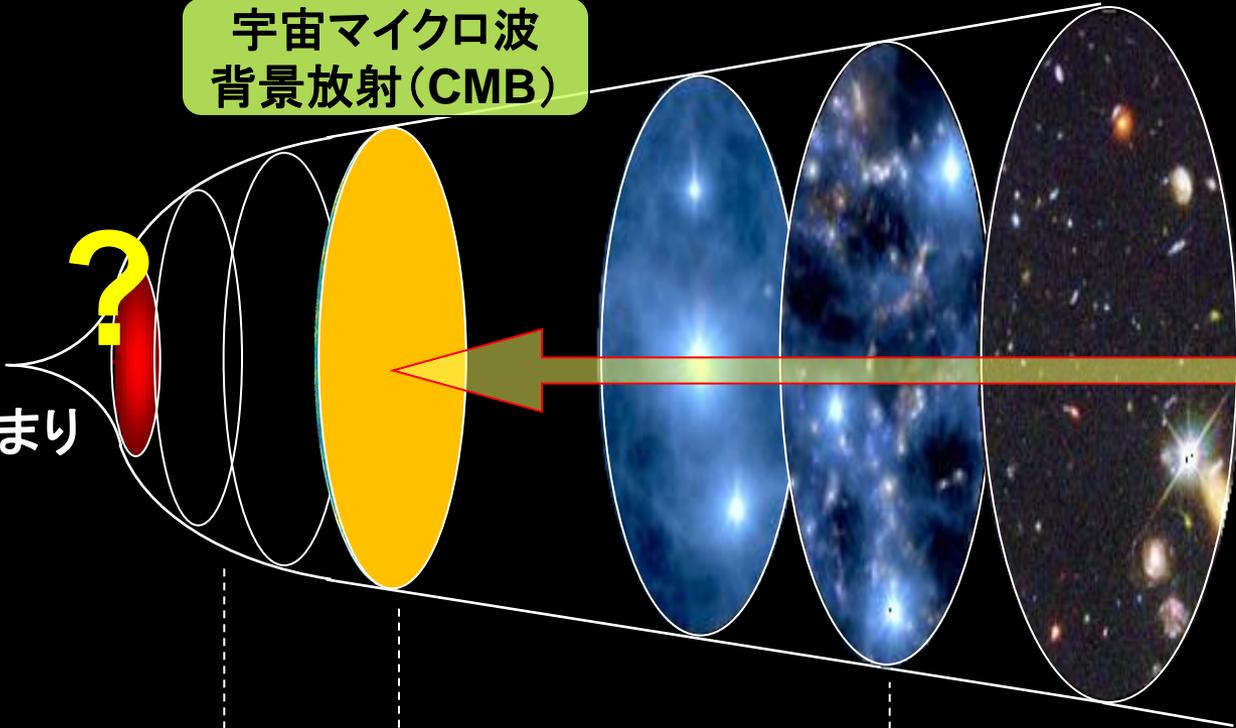
# 宇宙マイクロ波背景放射 Cosmic Microwave Background (CMB)

前景放射(天体現象)

宇宙マイクロ波  
背景放射(CMB)



宇宙の始まり



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

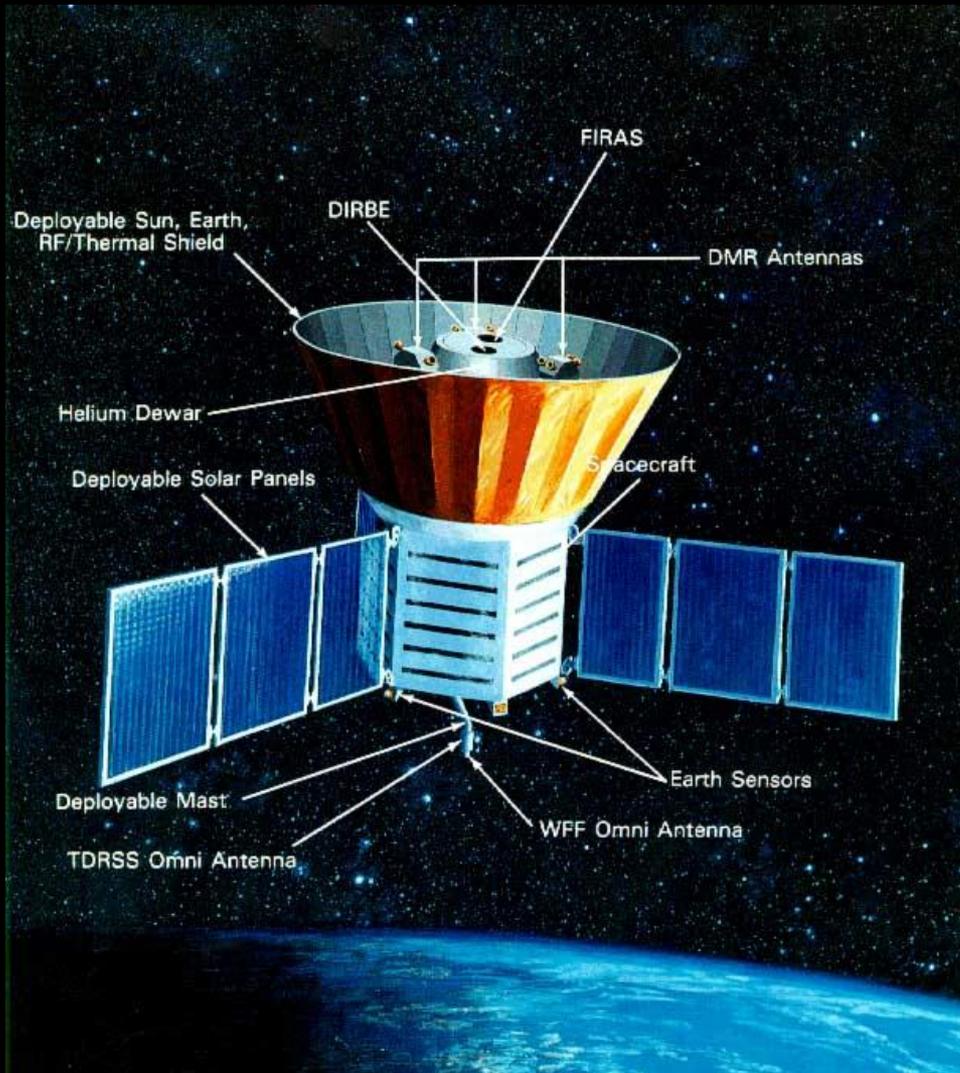
38万年

1億年

10億年

137億年

# 衛星観測1: COBE衛星



2006年ノーベル物理学賞



John C. Mather

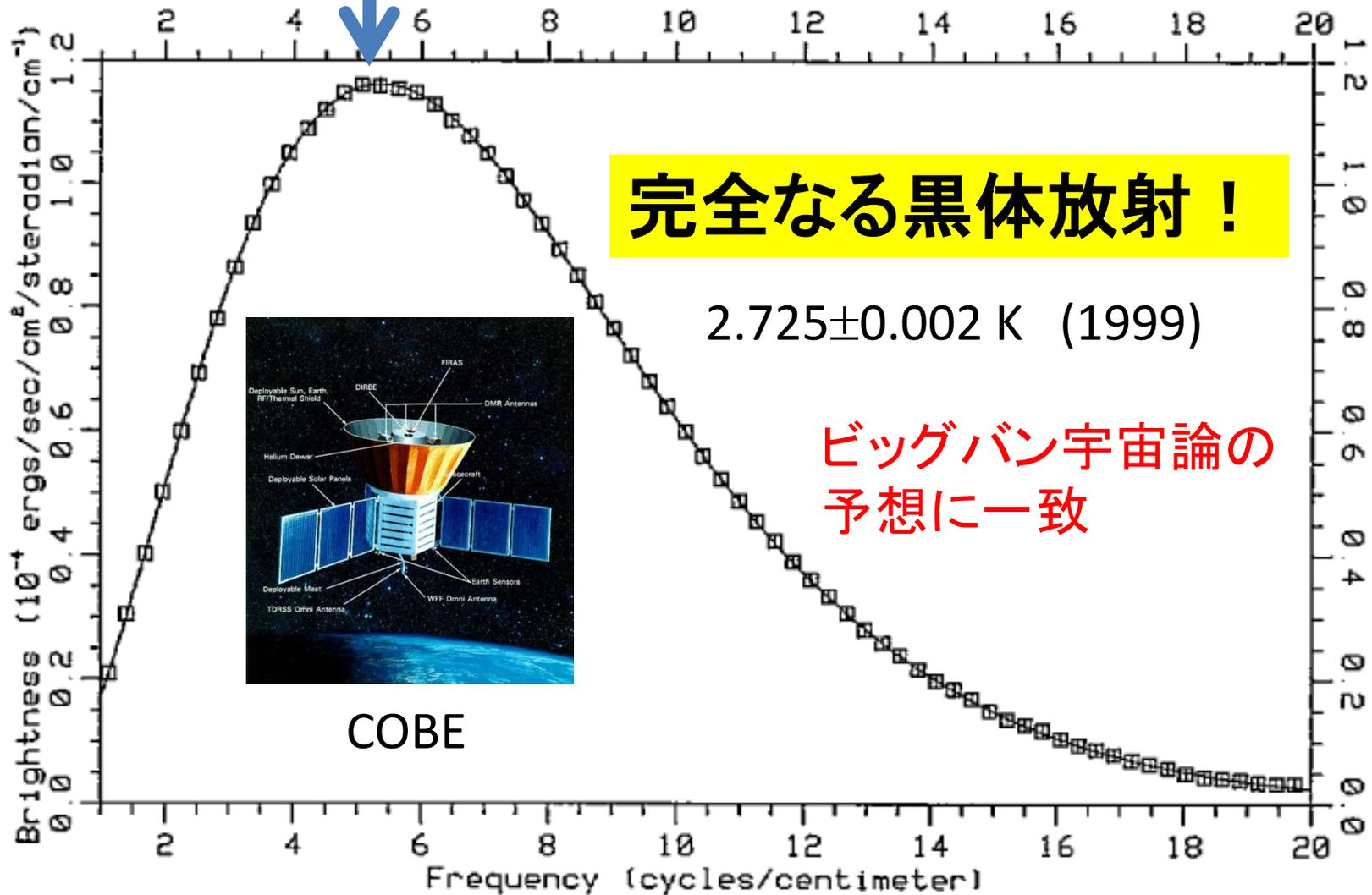


George F. Smoot

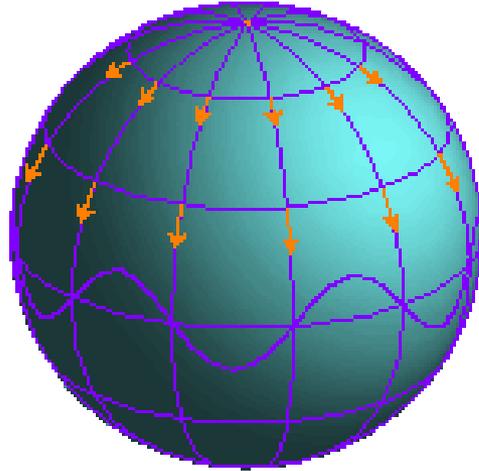
1989—1993

# COBEの衝撃的結果(1)

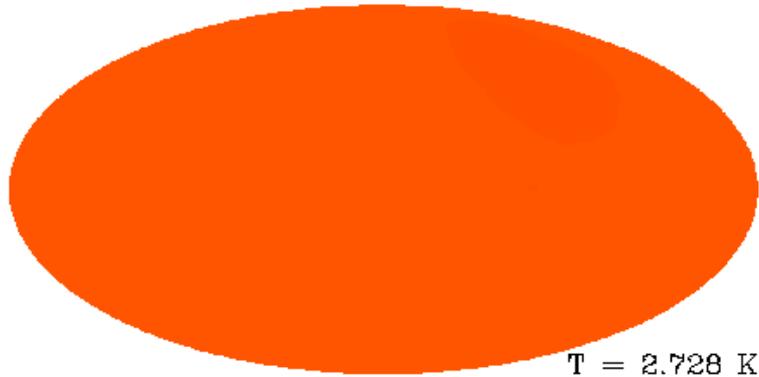
160GHz



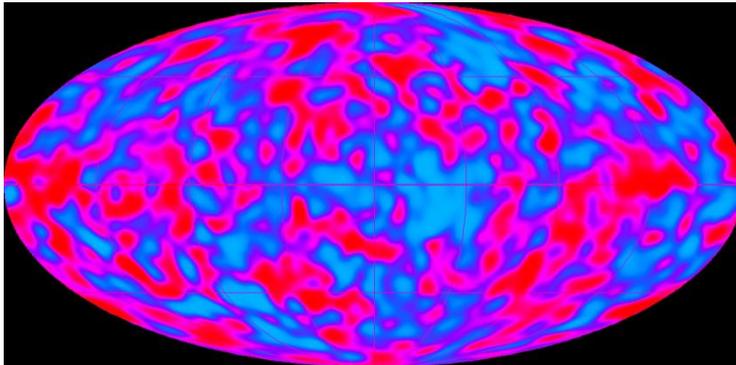
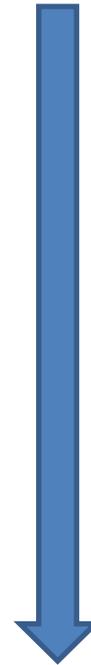
# ビッグバン＝空間そのものの膨張



# COBEの衝撃的結果(2)



温度センサーの感度を  
あげていく

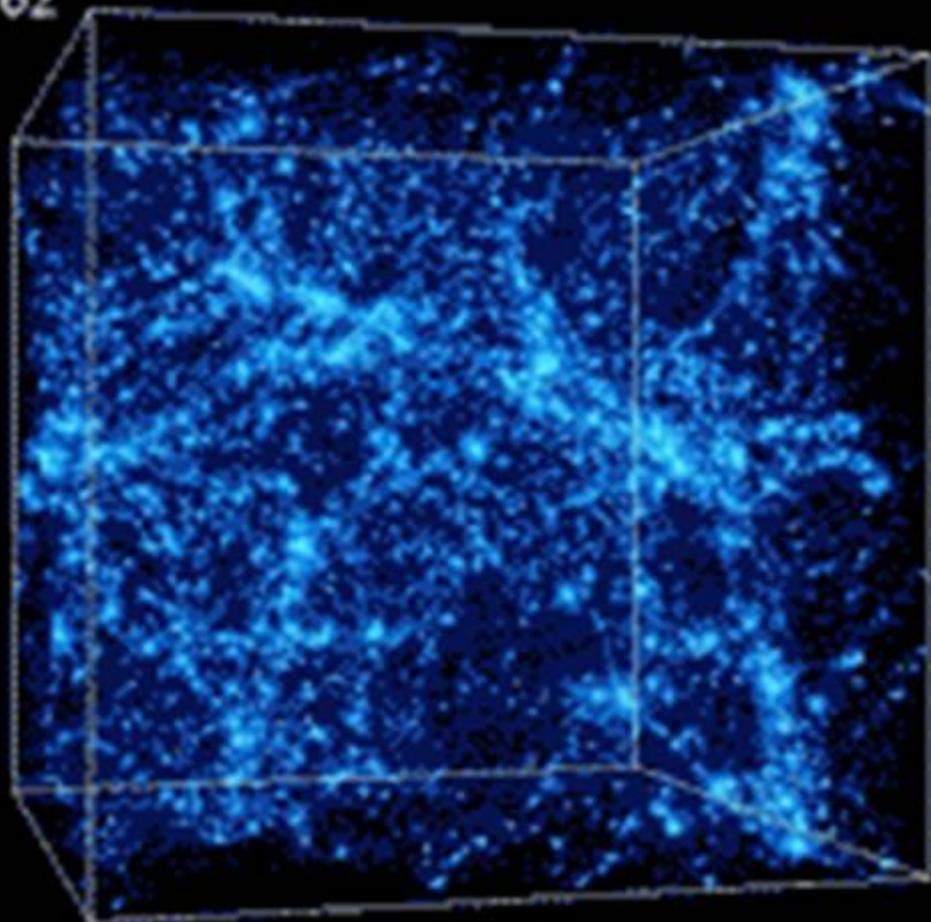


30マイクロケルビン程度  
でこぼこ(異方性)がある

健脚  
コース

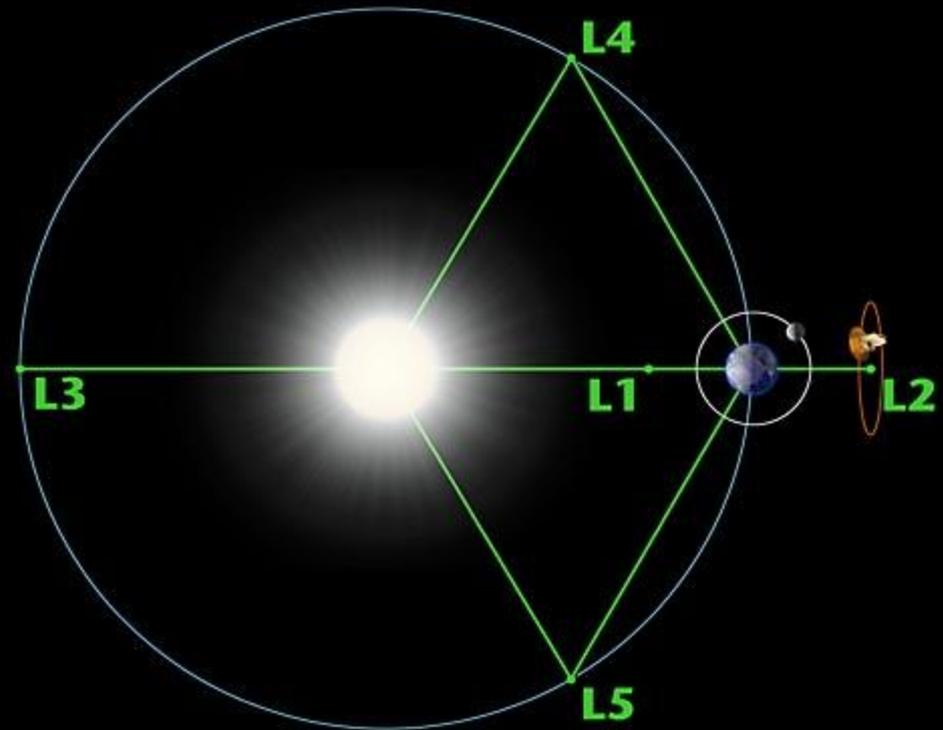
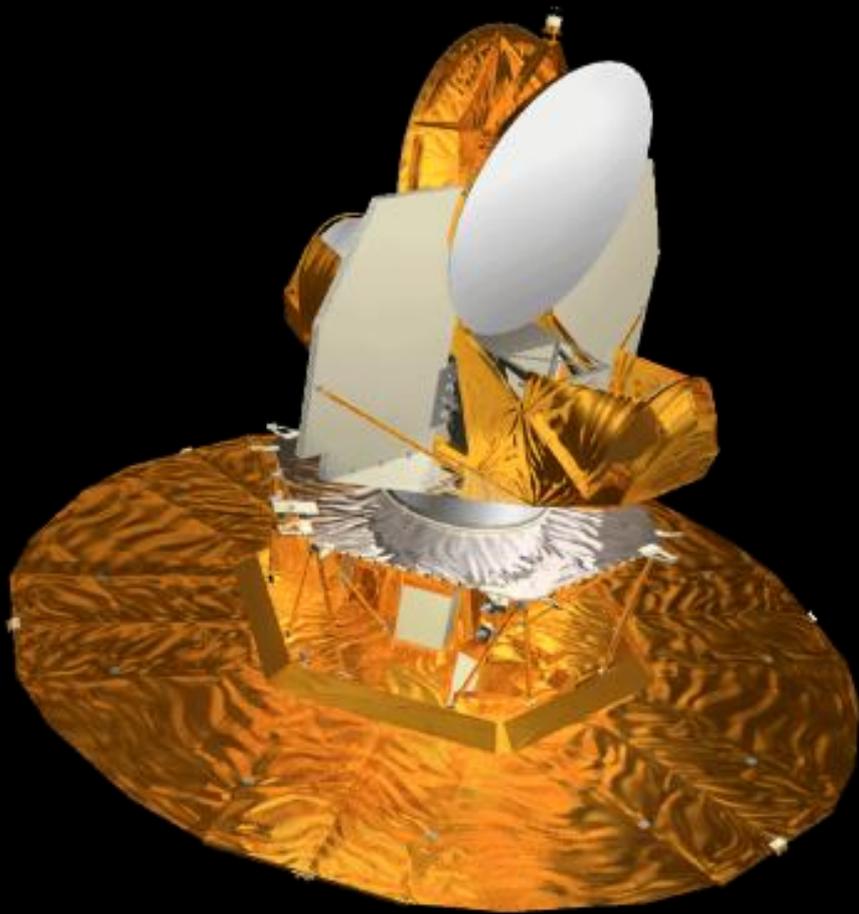
これは量子論的ゆらぎ！ それで、やがて銀河へと成長  
つまり人類の起源は量子ゆらぎ！

$Z = 0.62$



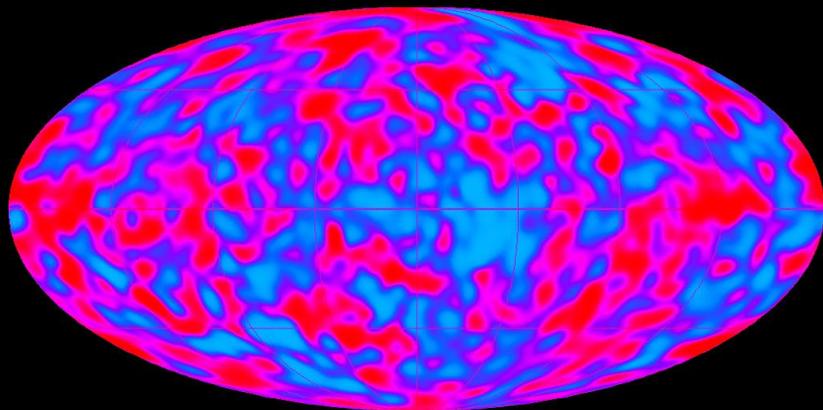
Courtesy of Andrey Kravtsov

# 衛星観測2:WMAP衛星

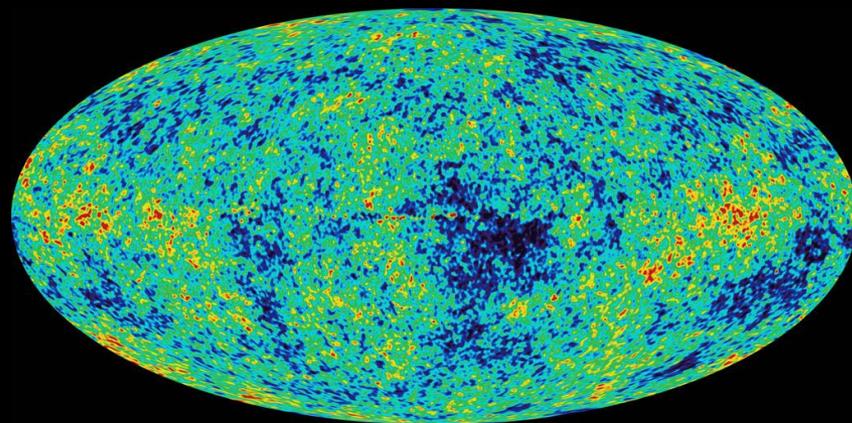


2001年打ち上げ  
現在も観測を続けている

COBE



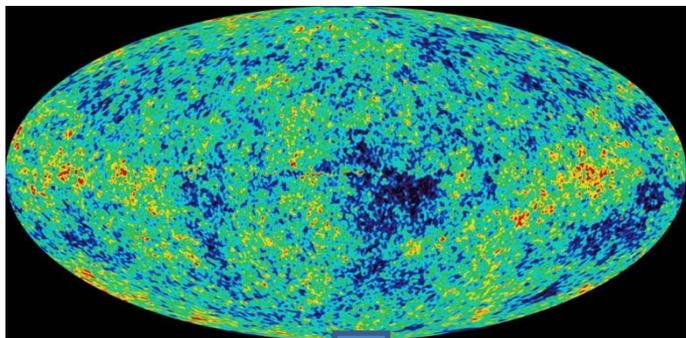
WMAP



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)

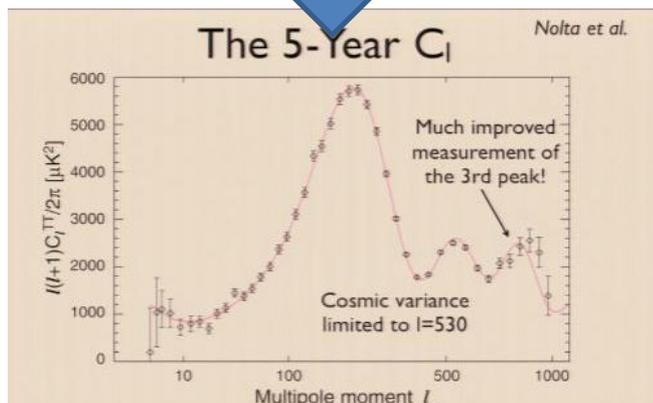
## 宇宙の年齢は137億年



温度(明るさ)の全天マップ



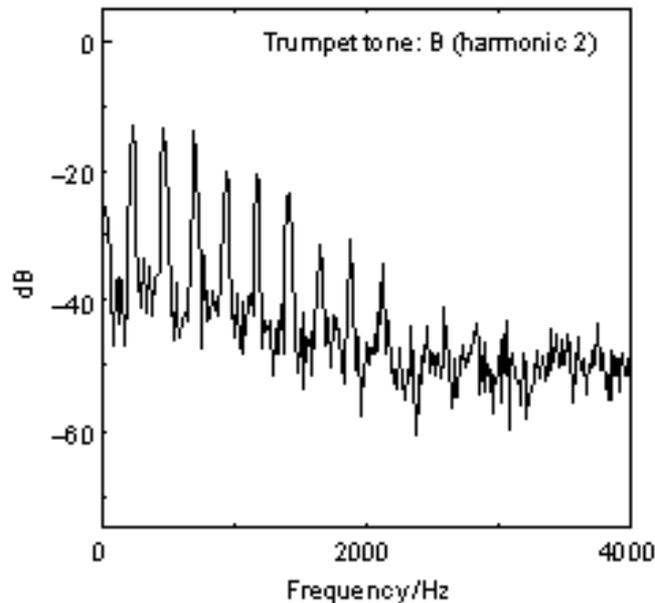
スペクトラムアナライザ  
(計算機を使用)



パワースペクトル

# スペクトラムアナライザ：音波の例

ウェブで見つけた例



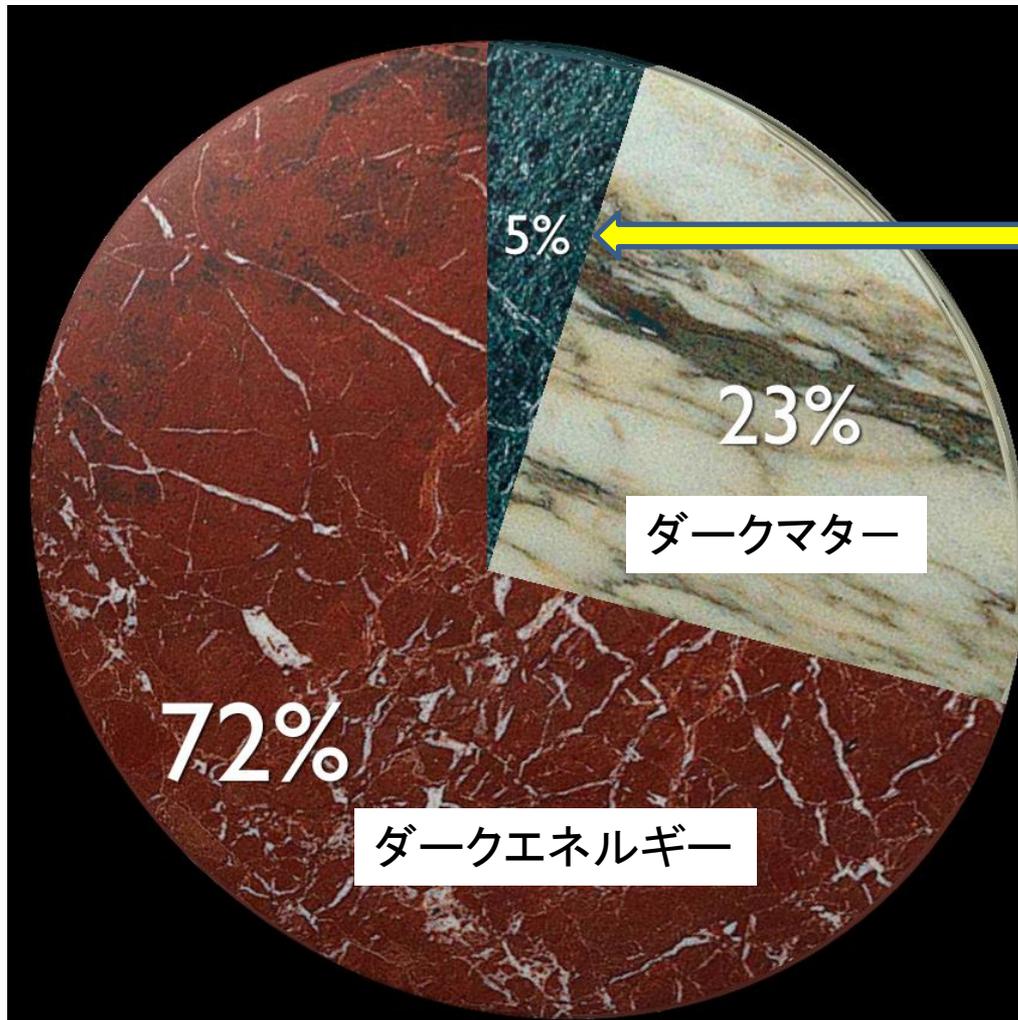
、、、華やかな音が出る人は高次倍音が強く、  
柔らかな音が出る人は基準振動が強く  
高次倍音は5次くらいまでしか出ていない  
ようです。7次倍音以上が強い人は確かに  
やや音がうるさく感じられたりもします。

<http://homepage2.nifty.com/fpo/spectrum.html>

スペクトラムアナライザで音色(倍音)を可視化・客観化

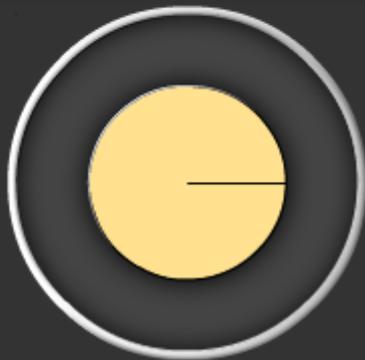
# WMAPの衝撃的結果(2)

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

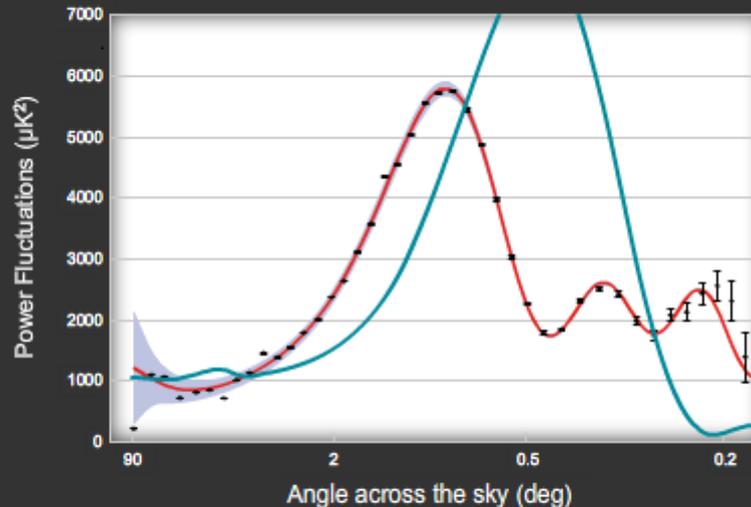
# WMAP CMB Analyzer



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

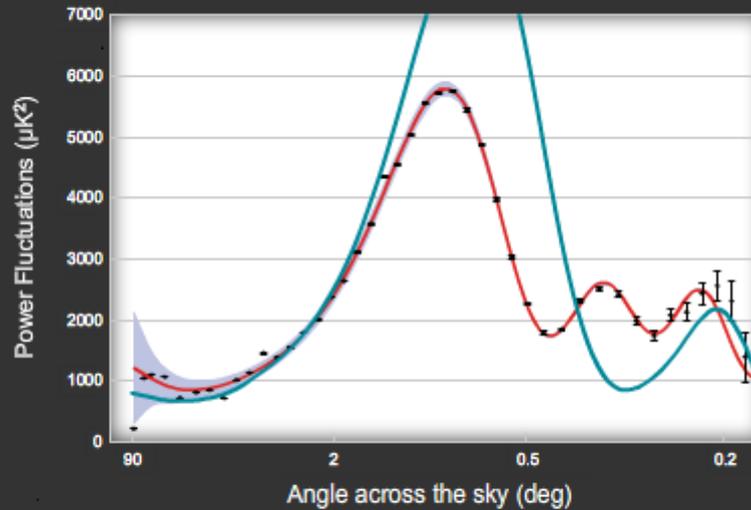
# WMAP CMB Analyzer



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

# 補足

「ホーキング未来を語る」より

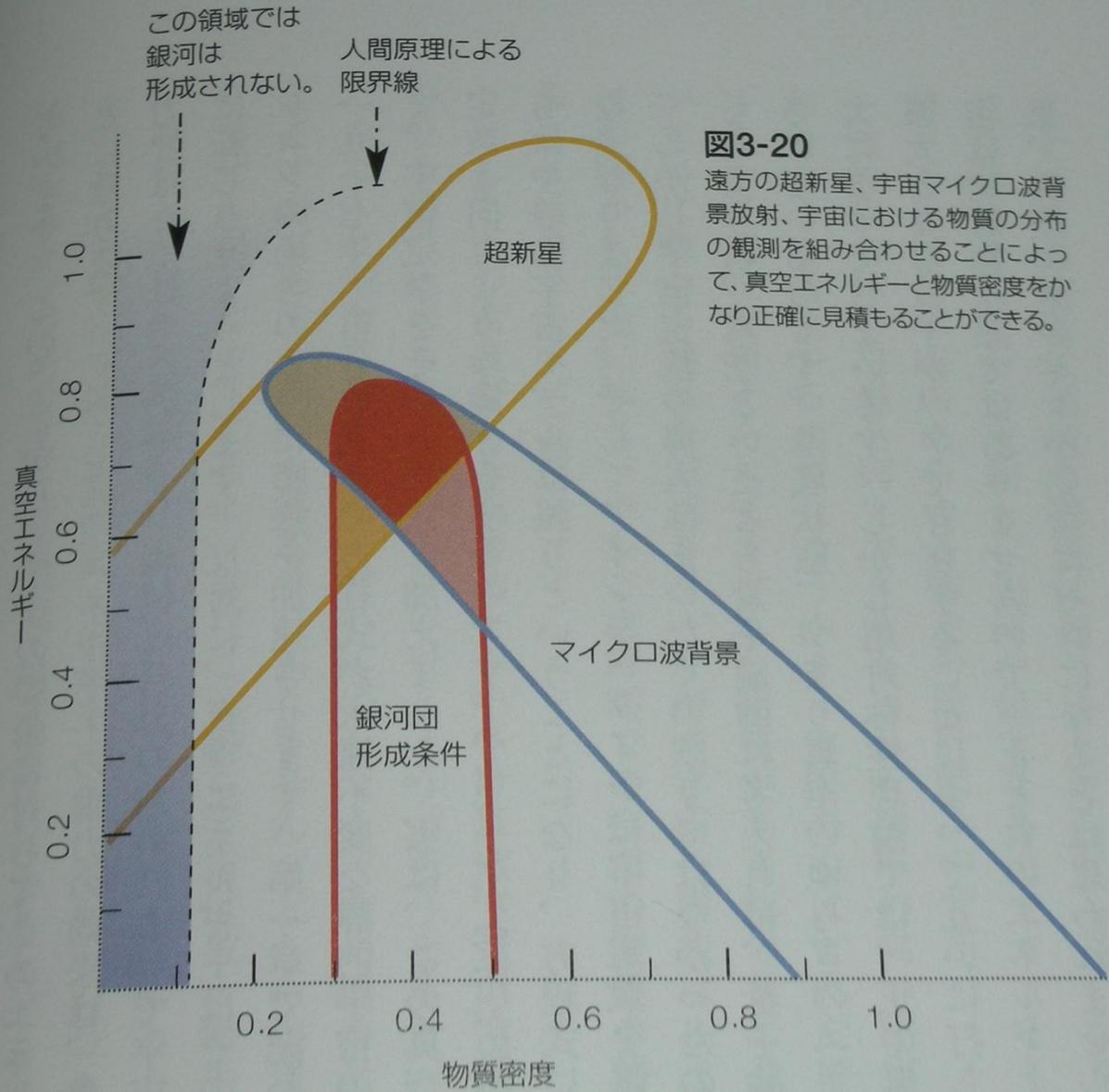


図3-20

遠方の超新星、宇宙マイクロ波背景放射、宇宙における物質の分布の観測を組み合わせることによって、真空エネルギーと物質密度をかなり正確に見積もることができる。

# 昨日の天気も理解できないのに 137億年前のことがわかる！

なぜ？

答え(理由は二つ)

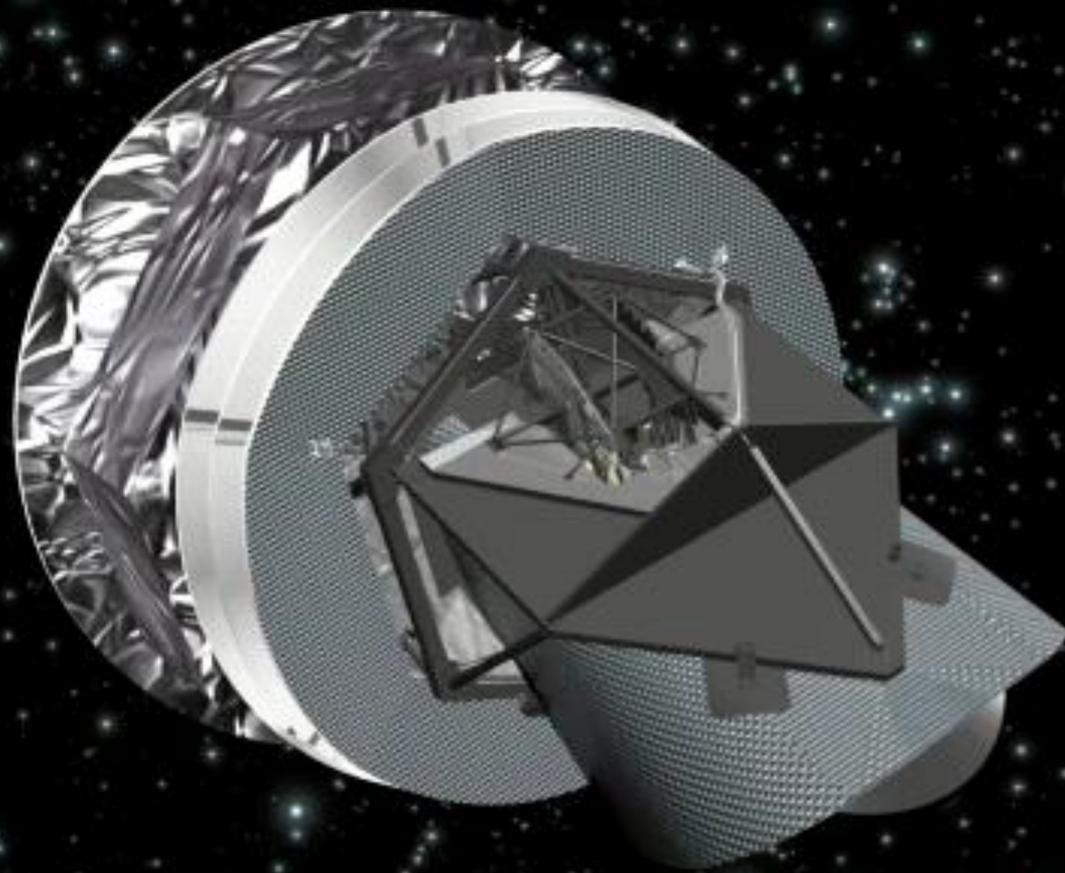
1) CMBは137億年の間(つまり人類の作った検出器に捕まるまで)何物にも干渉されなかったから

いわば、シベリアのマンモスのように「氷漬けになった電磁波」

2) スペクトラムアナライザが使えるから

専門用語では、「線形なシステム」だから

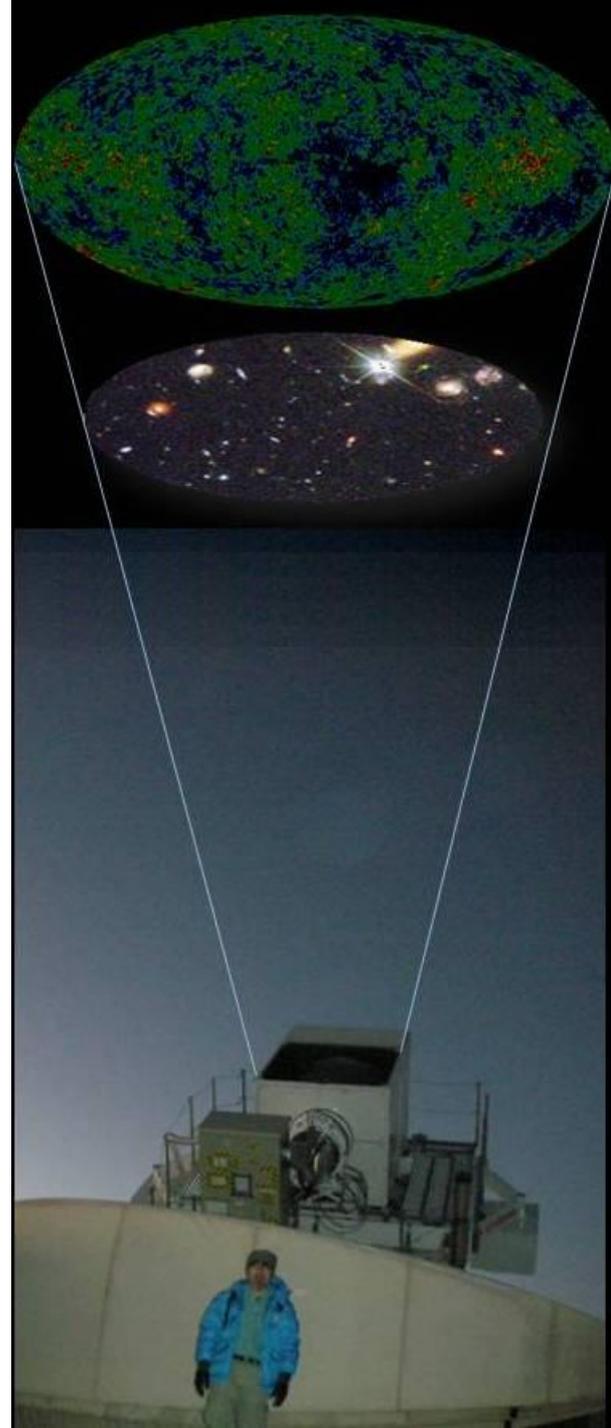
# 衛星観測3: PLANCK衛星



今年5月打ち上げ成功:2012年に最初の結果を発表する予定

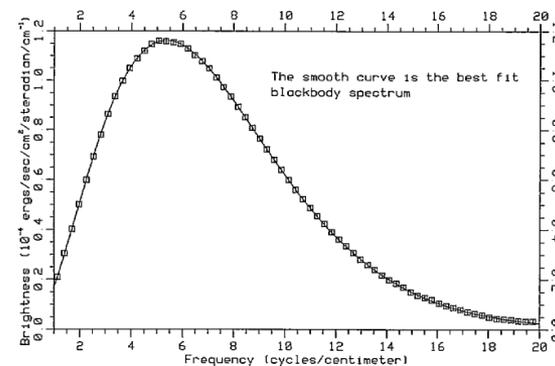
# パート2

## KEK・CMBグループ の挑戦

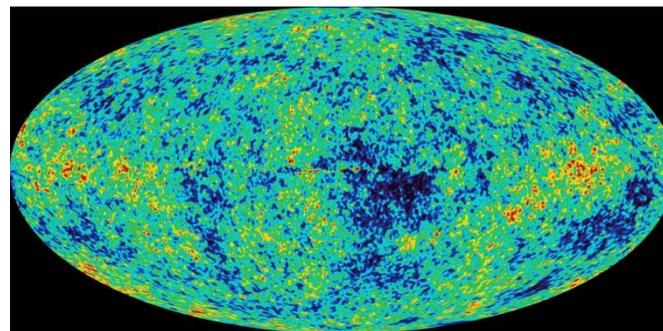


# 電磁波(光)の三要素 $\leftrightarrow$ 対応するCMB観測

- 色(波長)



- 強度

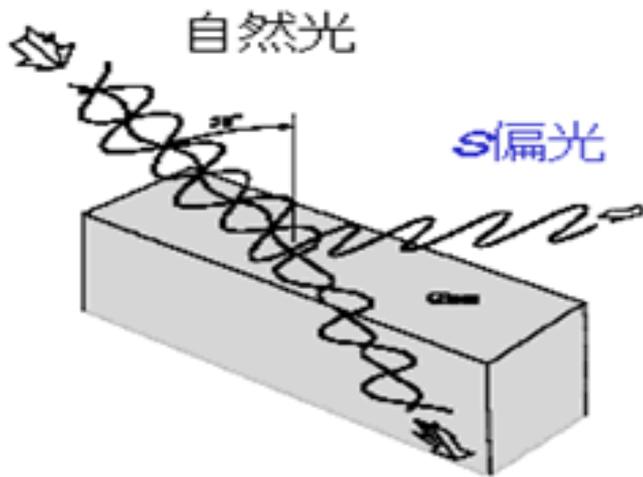


- 振動方向(偏光)

?

# 偏光

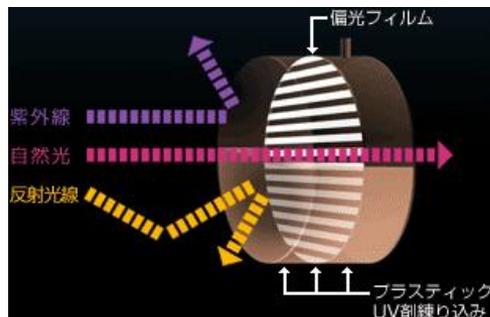
反射光は偏光である



身近な偏光の例：床で反射した光

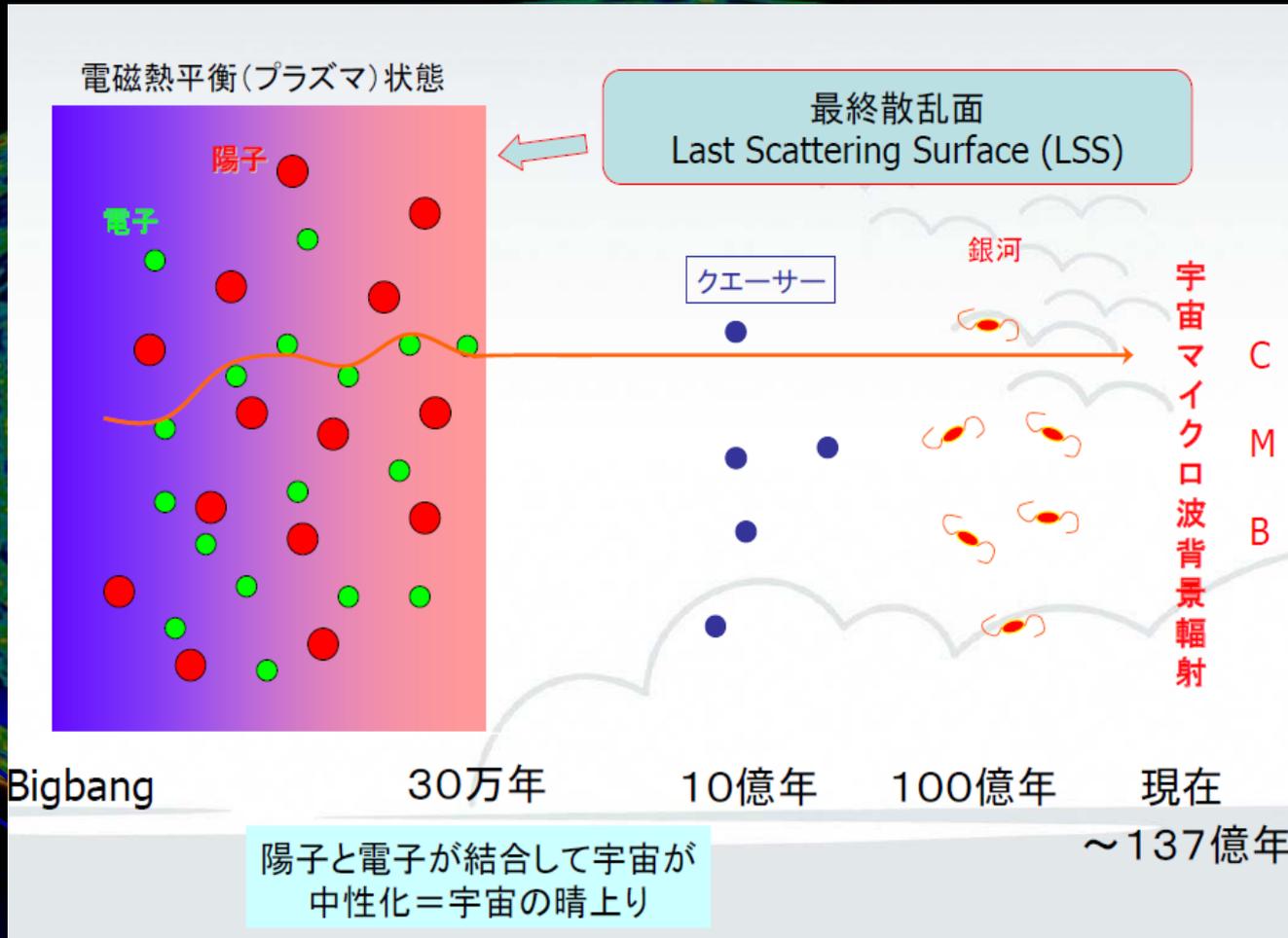


偏光板(特定の向きの光だけ通す)で確認できる



反射光：  
入射光と垂直な向き（床と平行）に偏光

# CMBも偏光である



CMBフォトン

晴れ上がり時の電子との最後の散乱により、偏光となる

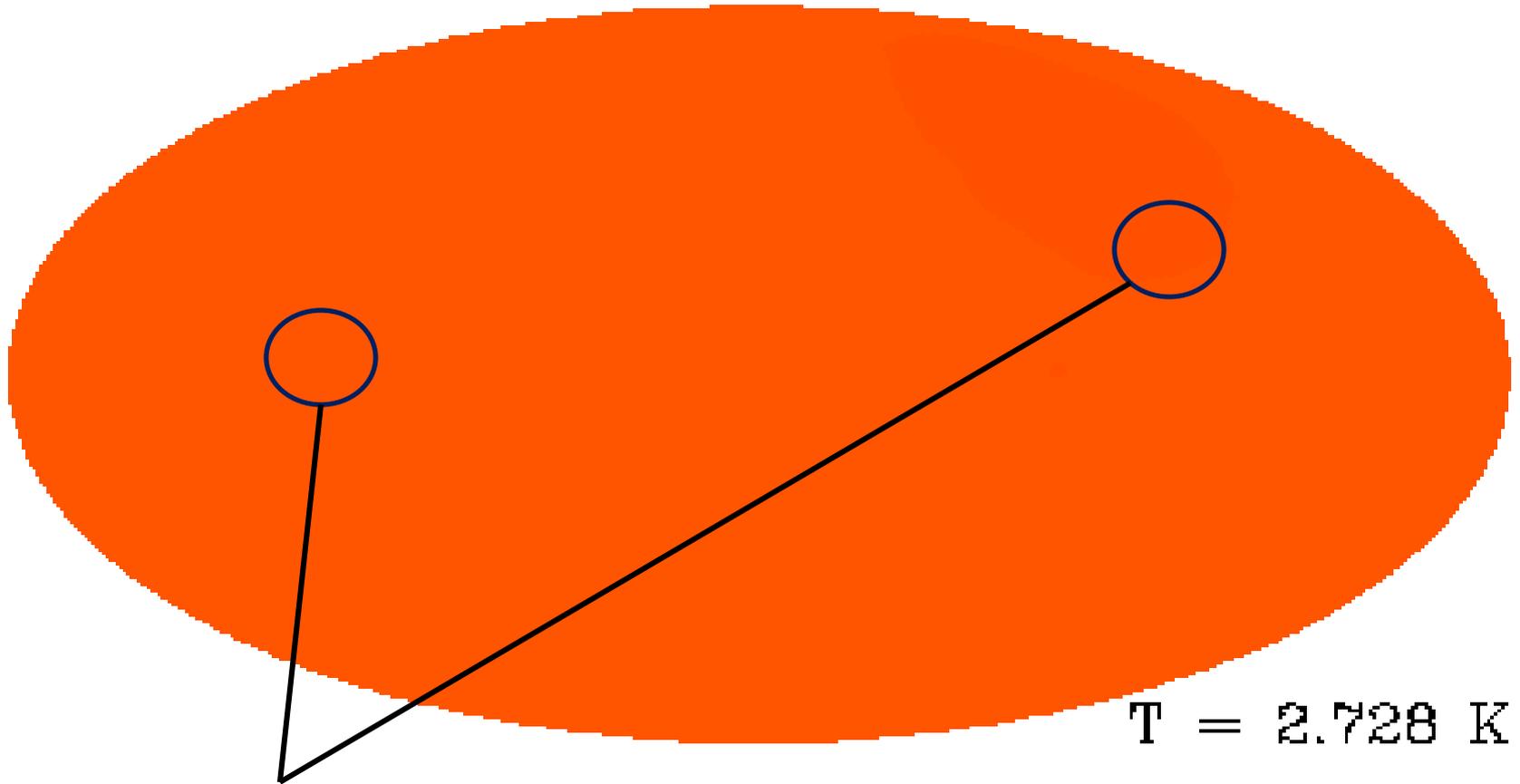
# CMB偏光から何がわかるか？

- 1) ビッグバン宇宙論の「地平線問題」を解決し、「ビッグバンの前」に何が起きたかを科学の目でとらえられるようになる可能性がある
- 2) 背後にある宇宙のルールブックが見えてくる可能性がある。

この観測が、宇宙の真の起源を知るための現時点での切り札といってよい

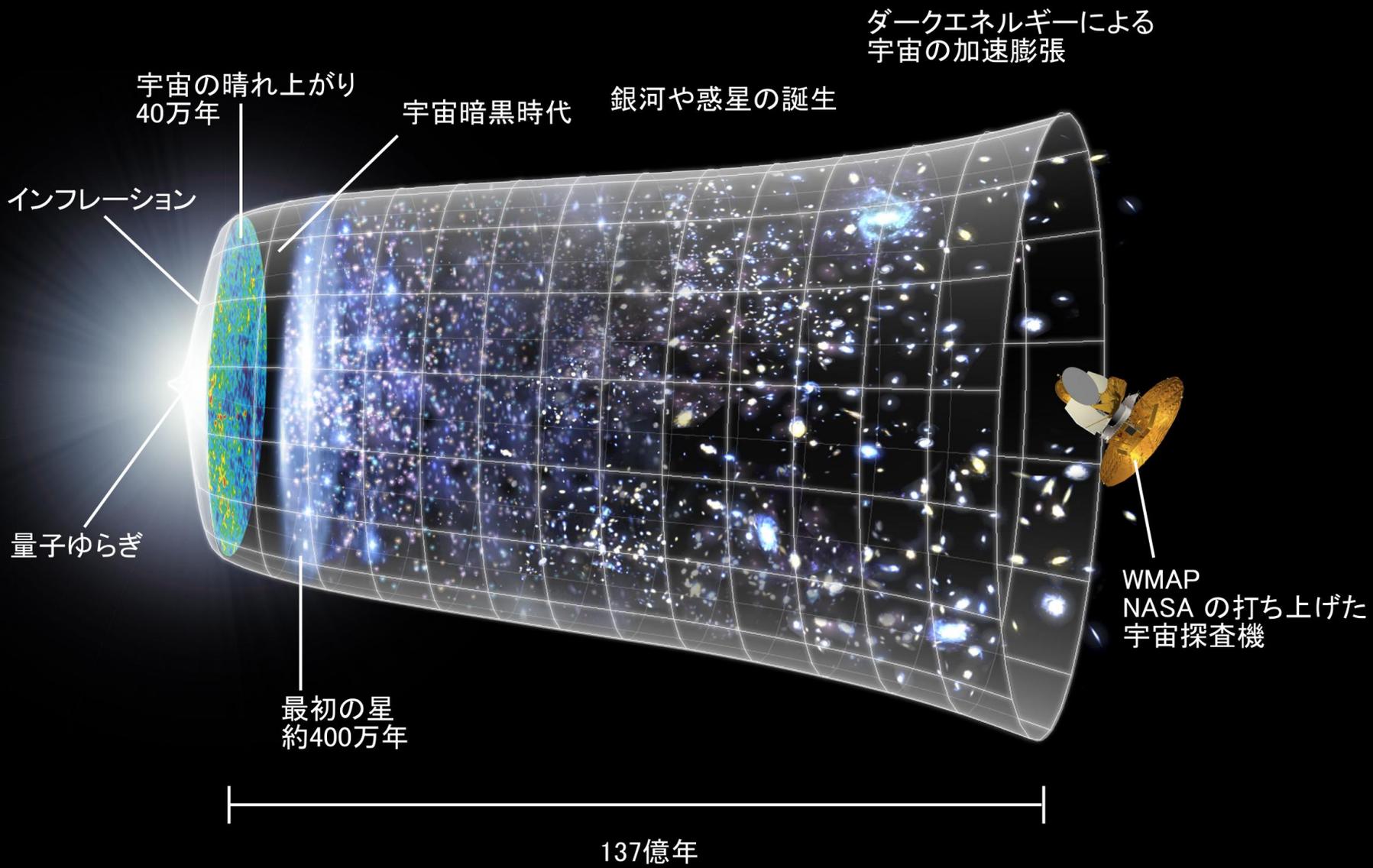
# 地平線問題

“会ったことない人が口裏合わせる問題”



離れすぎていて、過去に情報を交換することができないように見える  
なぜ、CMBの温度(強度)は同じなのか？

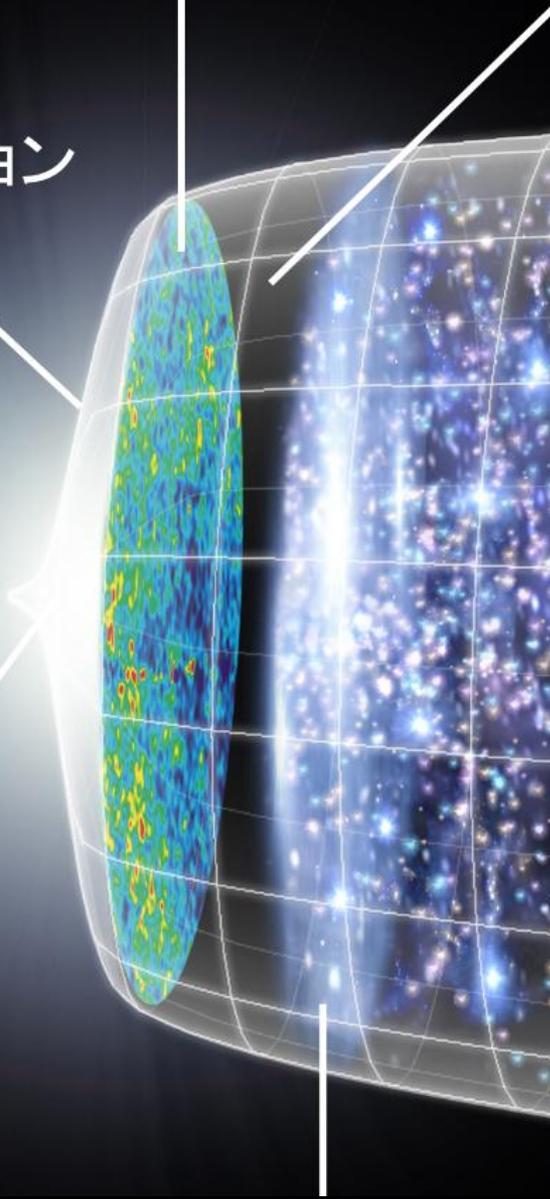




宇宙の晴れ上がり  
40万年

インフレーション

量子ゆらぎ

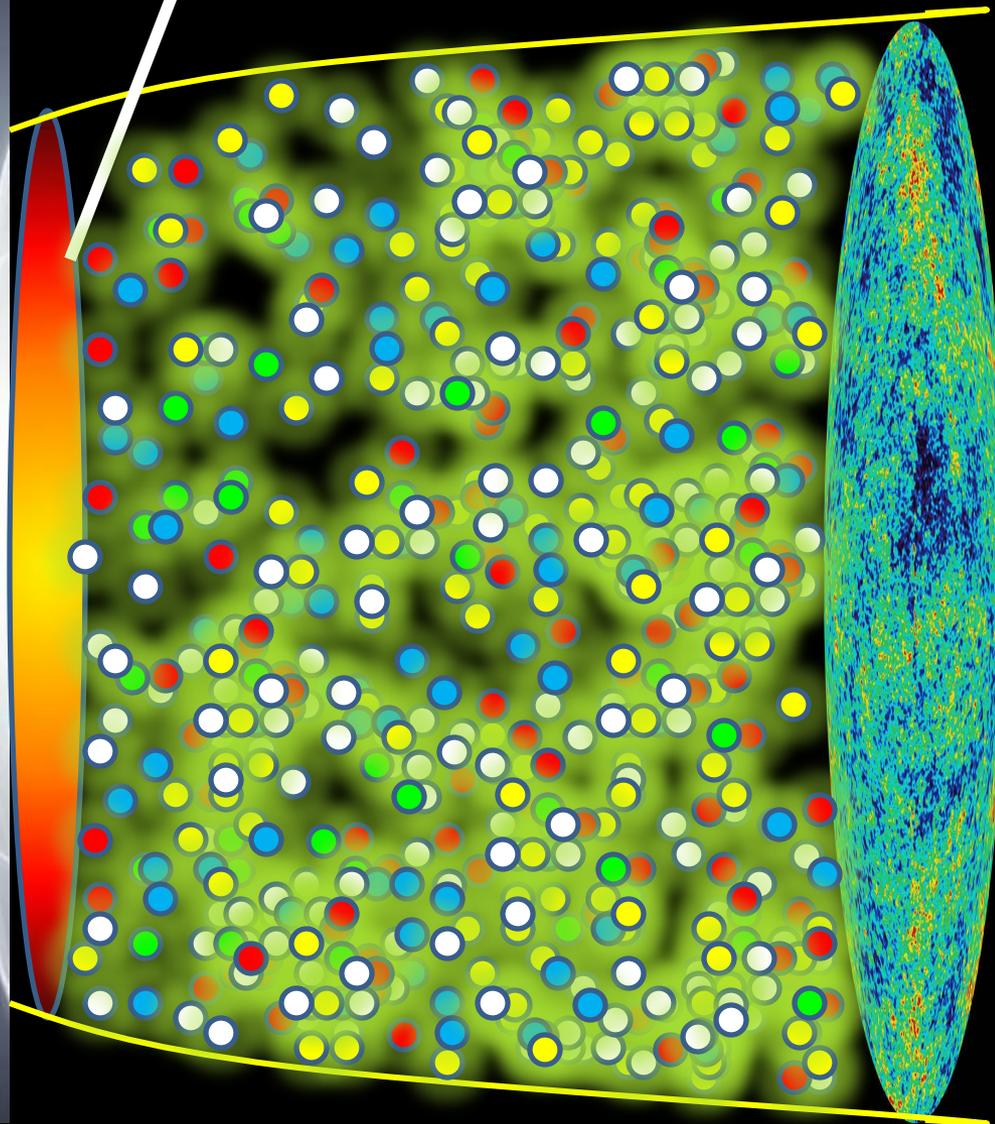


インフレーション

ビッグバン

CMB

量子ゆらぎ



# インフレーション理論の最も大事な予言

## 急激な膨張にともなう 重力波の生成

量子ゆらぎ

A diagram showing a vertical line of yellow dots representing quantum fluctuations. A white arrow points from the text '量子ゆらぎ' to this line. The background is a dark blue gradient with a white light flare on the left side.

重力子



あっという間に  
離れるので  
再結合せず実体化

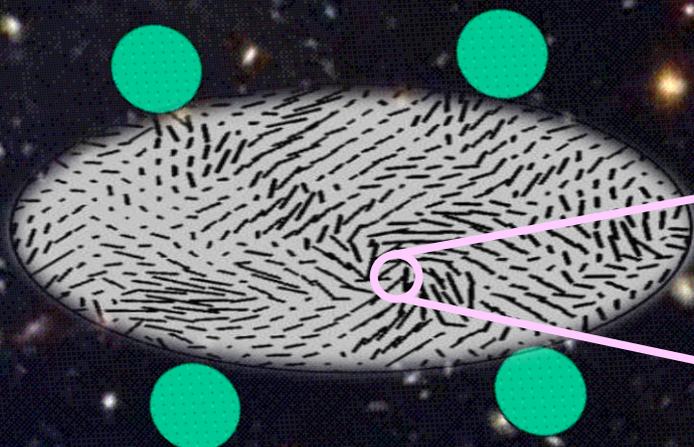


重力子

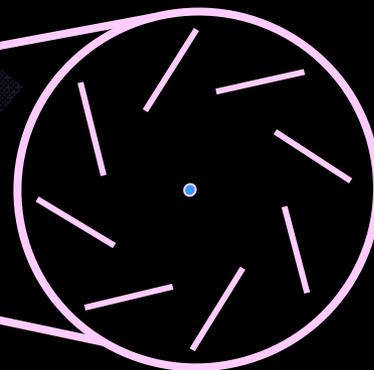
天体現象による重力波と区別して、**原始重力波**と呼ぶ

# CMBによる原始重力波検出ー温度から偏光へー

CMB直線偏光マップ

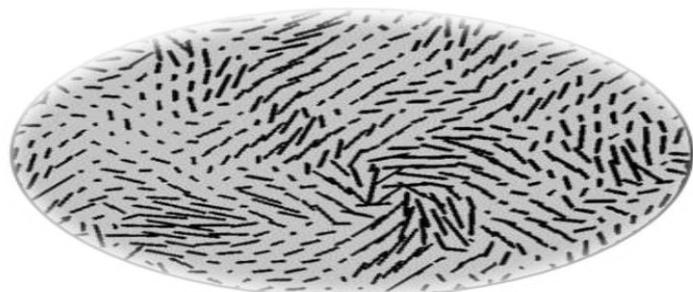


CMB偏光Bモード  
“渦”パターン  
原始重力波の“刻印”



CMB偏光Bモード検出が  
ベストな原始重力波発見法

# 偏光マップをスペクトラムアナライザにかける



偏光の全天マップ(イメージ)



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

# CMB偏光観測の現状1: 衛星

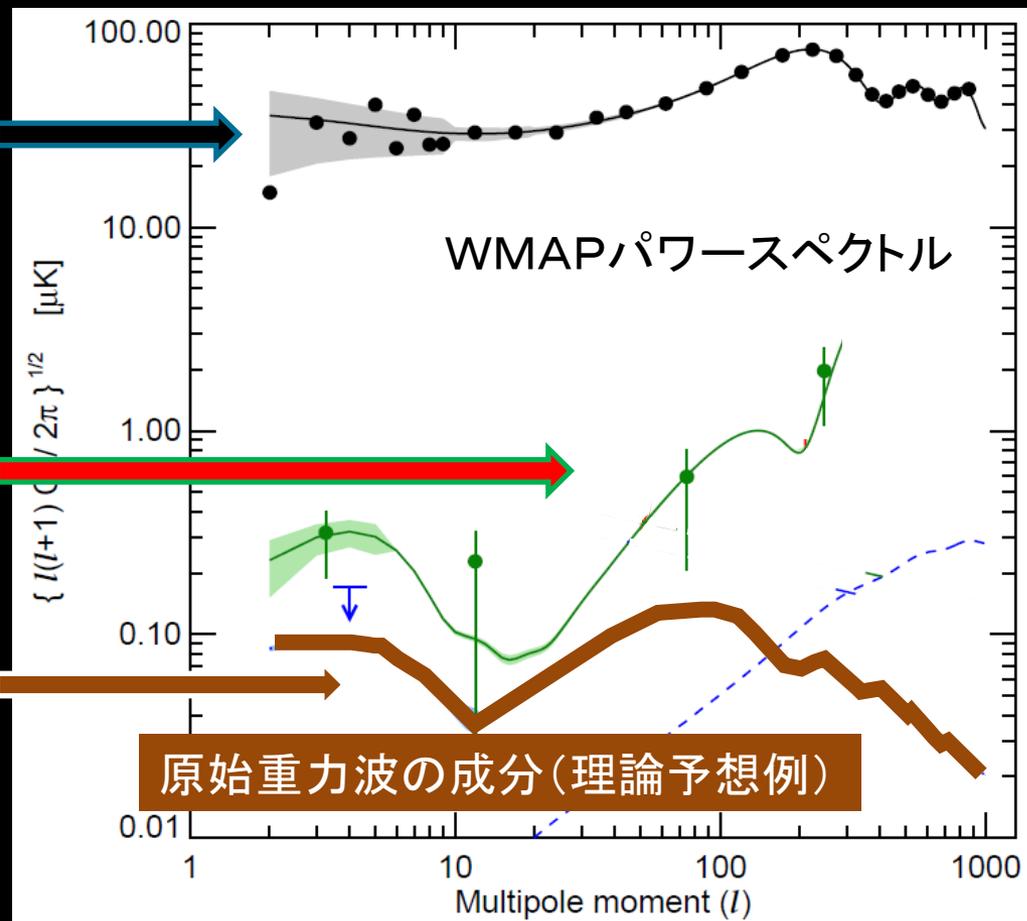
大視野角 ← → 小視野角

温度の  
パワースペクトル

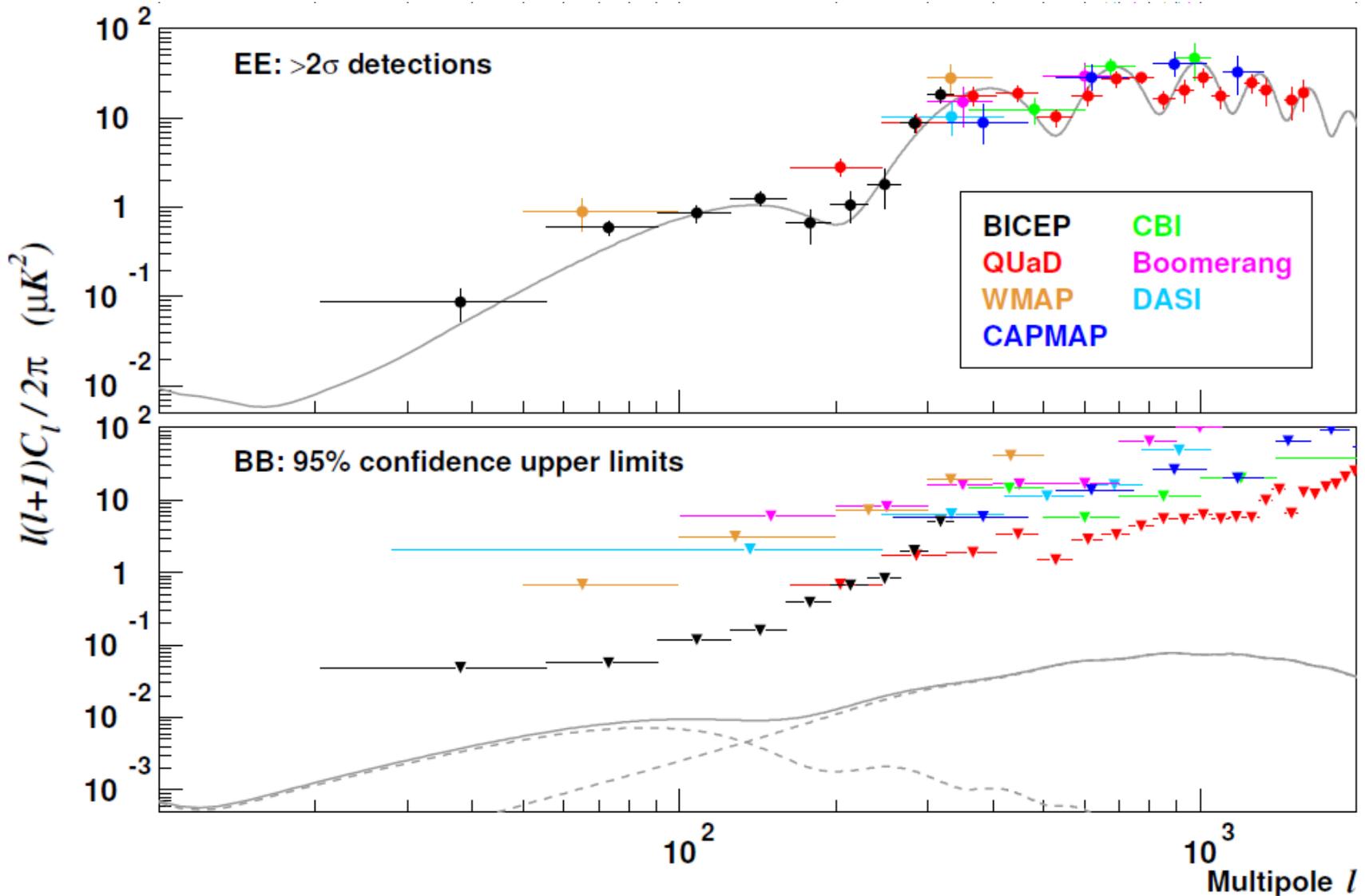
渦なしの  
偏光成分 (Eモード)

渦状の偏光成分  
(Bモード)

未発見



# CMB偏光観測の現状2: 地上実験も含んだ全ての結果



# なぜ地上観測？

- 高い感度を達成する原理

- 極低温偏光計 : 熱雑音の減少
- アレイ化(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、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

# KEK CMBグループのプロジェクト

- QUIET 現在進行中
- PolarBeaR 準備中
- LiteBIRD デザイン中

3つのプロジェクトを推進

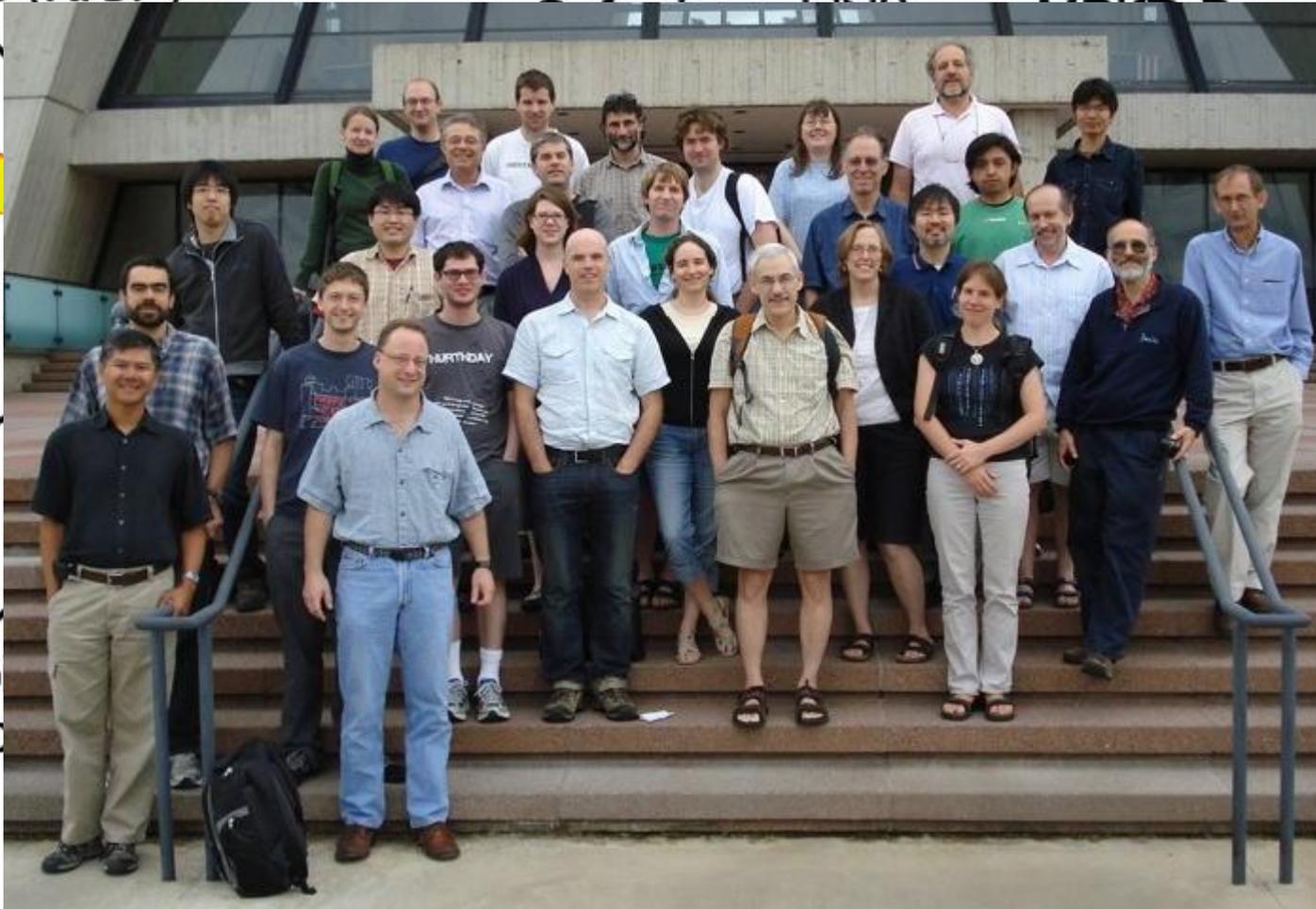
# QUIET国際グループ

(<http://quiet.kek.jp>)

Chicago (KICP)

Manchester

Oslo



Stanford  
(KIPAC)

KEK

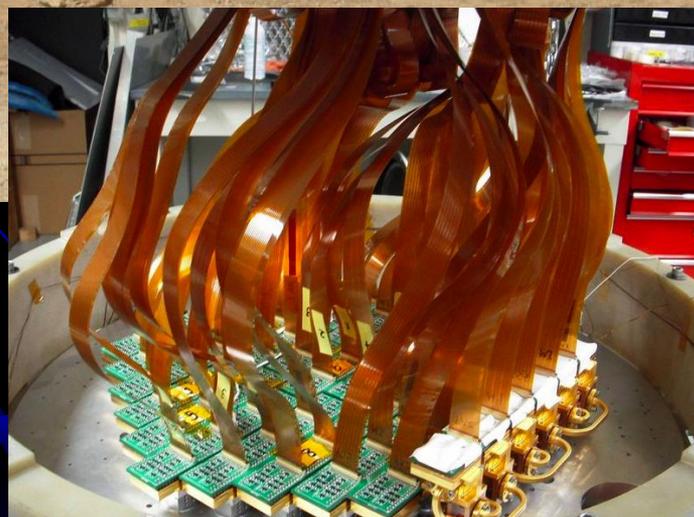
Caltech  
JPL

Columb  
Princeto

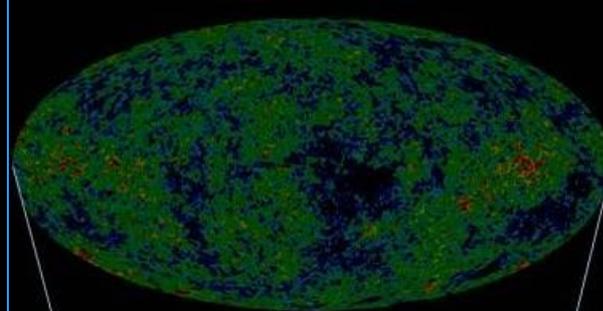
5 countries, 12 institutes, ~40 people

# QUIET実験概要

QUIETは南米チリ、アタカマ高地(標高5,000m)に設置。現在データ取得中！



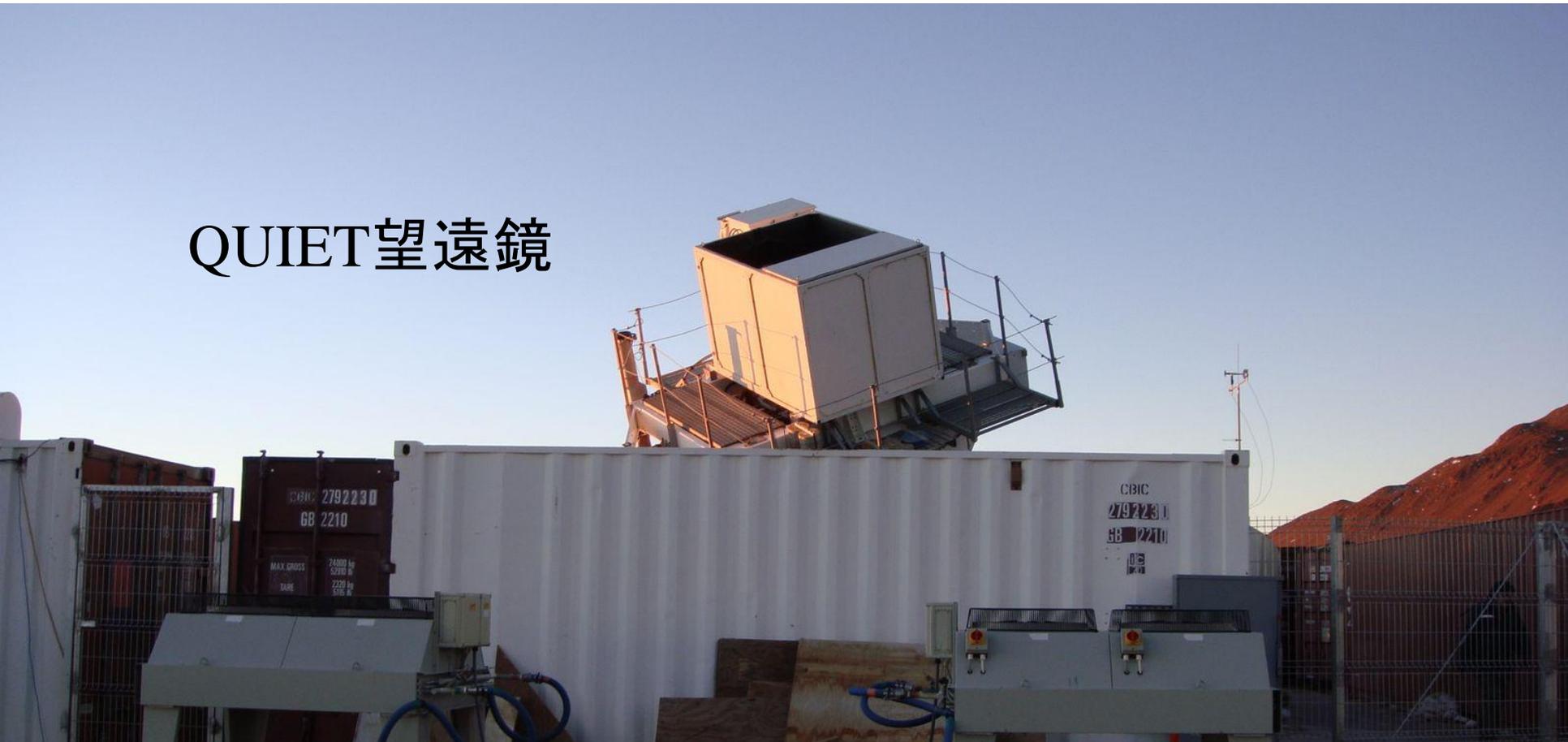
最先端の  
検出器内部



QUIET望遠鏡



# QUIET望遠鏡



酸素ポンベを  
背負って作業



# 違うタイプの観測



# PolarBeaR望遠鏡

現在カリフォルニアで試験中  
来年度チリに移設予定  
カリフォルニア大バークレー校などとの共同実験

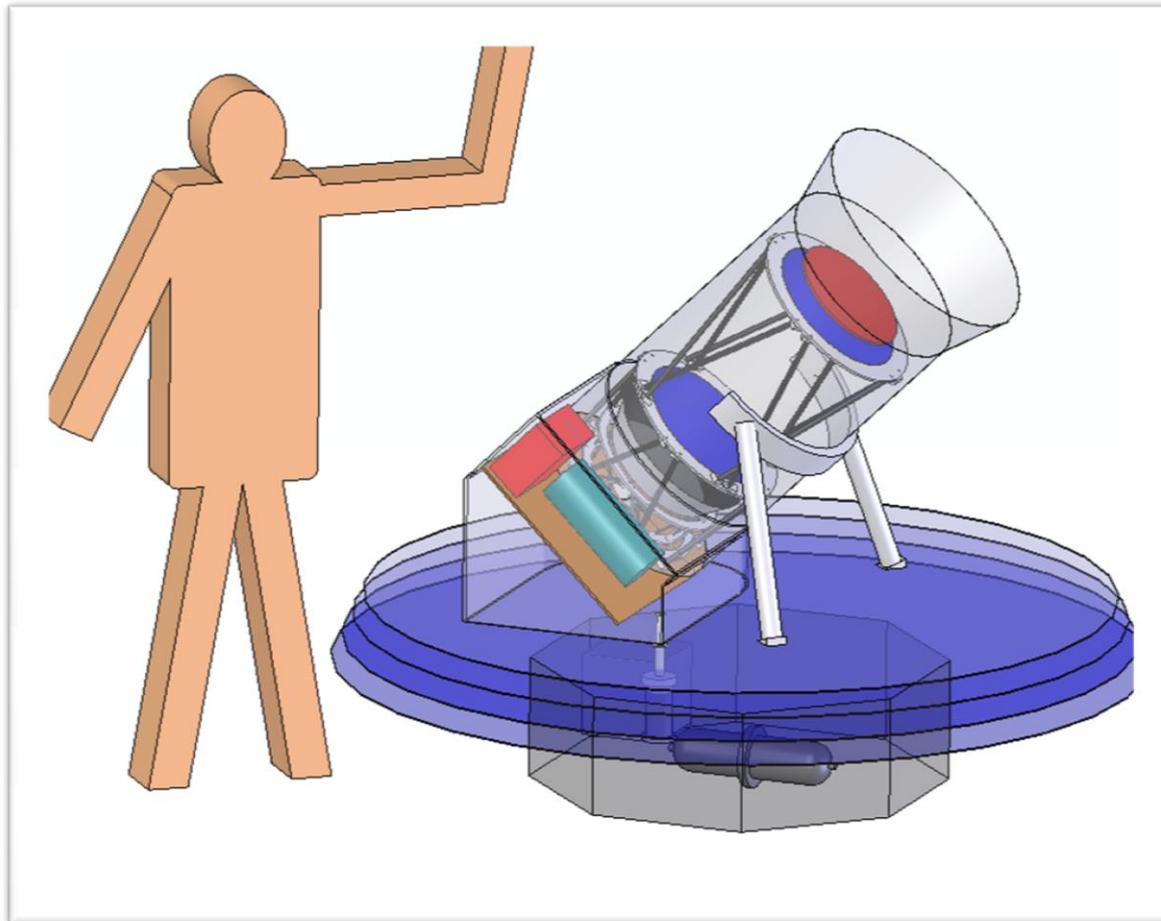


QUIETより感度の高い検出器： 超低温(0.3K)、超伝導

# LiteBIRD

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

2008年9月JAXA小型科学衛星ワーキンググループとして承認



国内外から  
30余名の  
研究者が  
参加

10年後の  
打ち上げを  
目指す

# 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

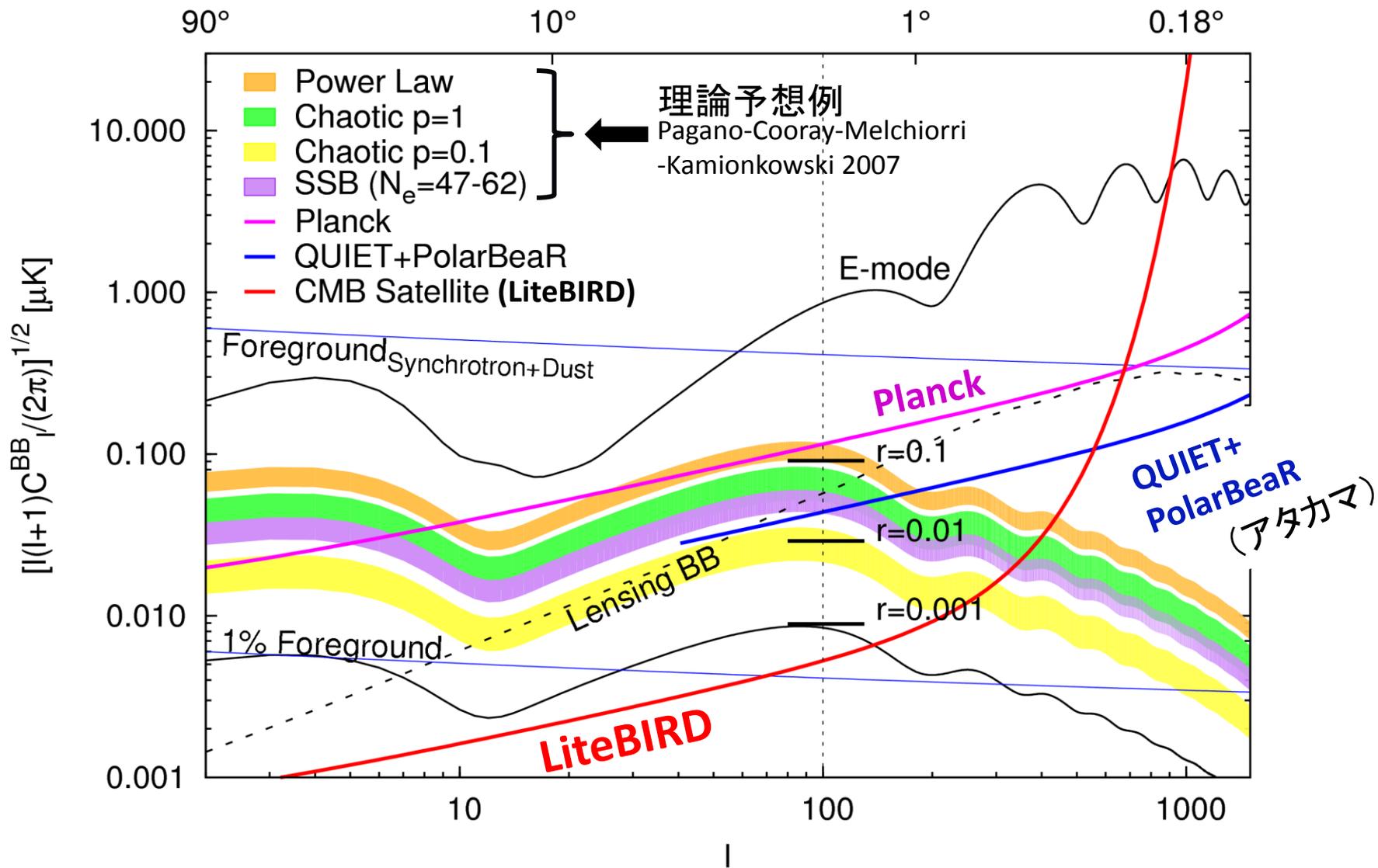
クラス 1000 クリーンルーム

パターンを  
描く装置

化学薬品を扱う  
ための装置



# 将来の予想



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

# インフレーションと自然界の究極理論

時間

↑ 137億年 (現在)

## 宇宙論

38万年

? 秒

原始重力波?

$10^{-36}$  秒?

宇宙マイクロ波  
背景放射 (CMB)

ビッグバン

インフレーション期?

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

## 素粒子論

4つの力

加速器

$10^4$

インフラトン?

$10^{16}$  ?

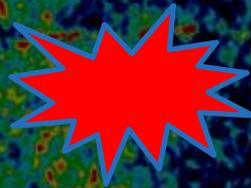
エネルギー (ギガ電子ボルト)

# 現代物理学の最重要課題は？

小さいものの物理学  
量子論

重いものと時空の物理学  
重力理論

力がすべて



力なんてない

統一するために、小さくて重いものを見たい

初期宇宙 → この講演

ブラックホール → 磯先生の講演

# 宇宙と素粒子の新しい研究を拓く

観測対象

CMB偏光と  
インフレーション宇宙

何であれ  
とてつもない  
「非常識」  
が待っている  
に違いない

*Beyond Einstein*

human curiosity