



# 宇宙観測による 高エネルギー物理学の展望

素粒子と時空の根本原理を探る学問

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

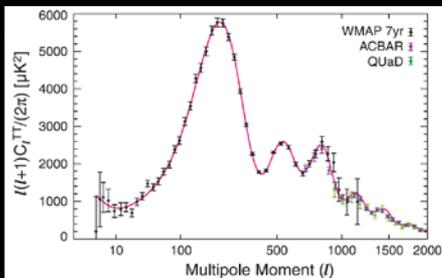
素粒子原子核研究所

羽澄昌史

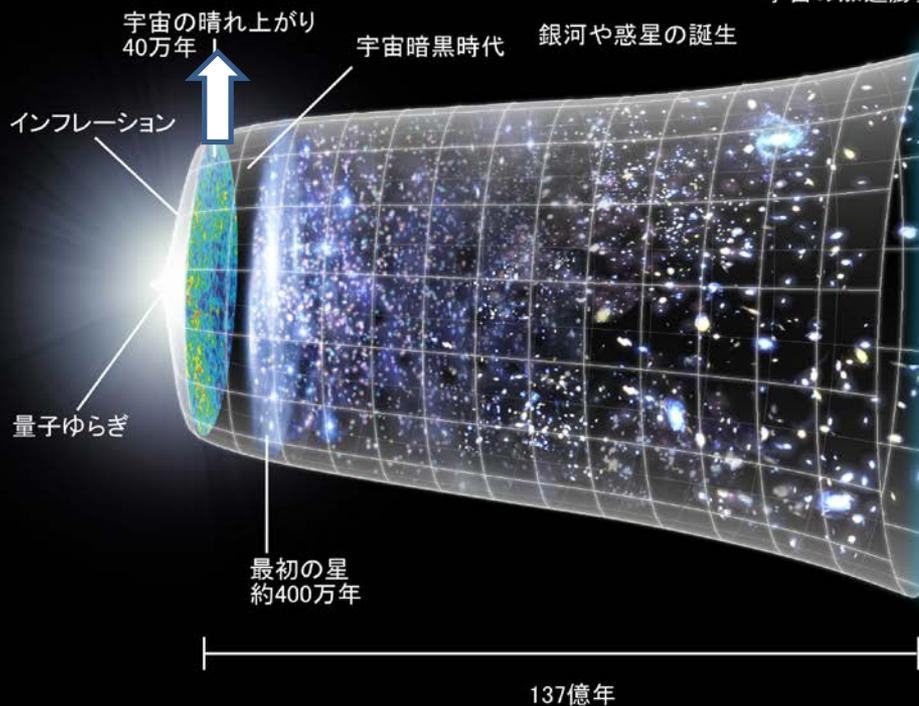
日本物理学会秋の分科会シンポジウム  
「10年先を俯瞰した高エネルギー物理学の将来展望」

2011年9月17日 弘前大学

# 5つの謎



ダークエネルギーによる  
宇宙の加速膨張



## 5つのBeyond the Standard Model

- インフレーション、
- バリオジェネシス、
- ダークマター、
- ニュートリノ質量
- ダークエネルギー

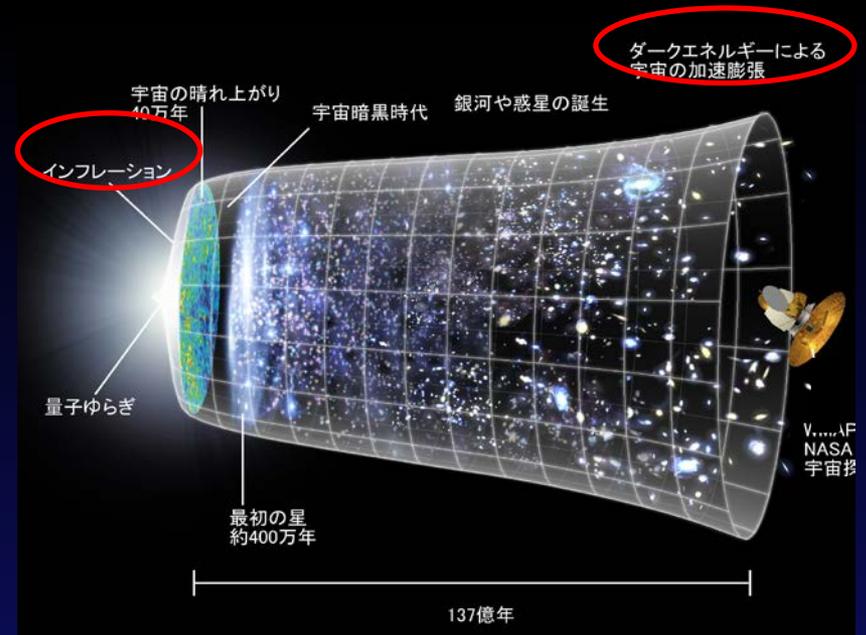
This talk

# Billion-Dollar Question: 加速膨張の本質とは？

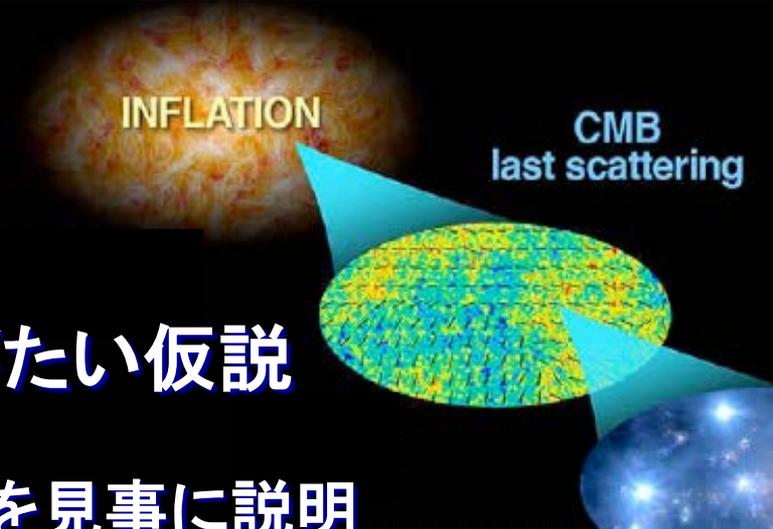
- インフレーションとダークエネルギーは、どちらも宇宙の加速膨張
  - インフレーションは、我々の宇宙のはじまりを支配する
  - ダークエネルギーは、我々の宇宙のおわりを支配する

一般相対論＋宇宙原理という  
“標準理論”と観測結果だけから、  
我々は、加速膨張 ( $d^2a/dt^2 > 0$ )  
という奇妙な解に  
“追い込まれている”

背後にNew Physicsがあるの  
は間違いないが、それが何な  
のか、今のところ全くの謎



# インフレーションによる宇宙創成



- ビッグバン以前を記述する仮説
- 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

# 宇宙マイクロ波背景放射(CMB)偏光観測 によるインフレーションの検証

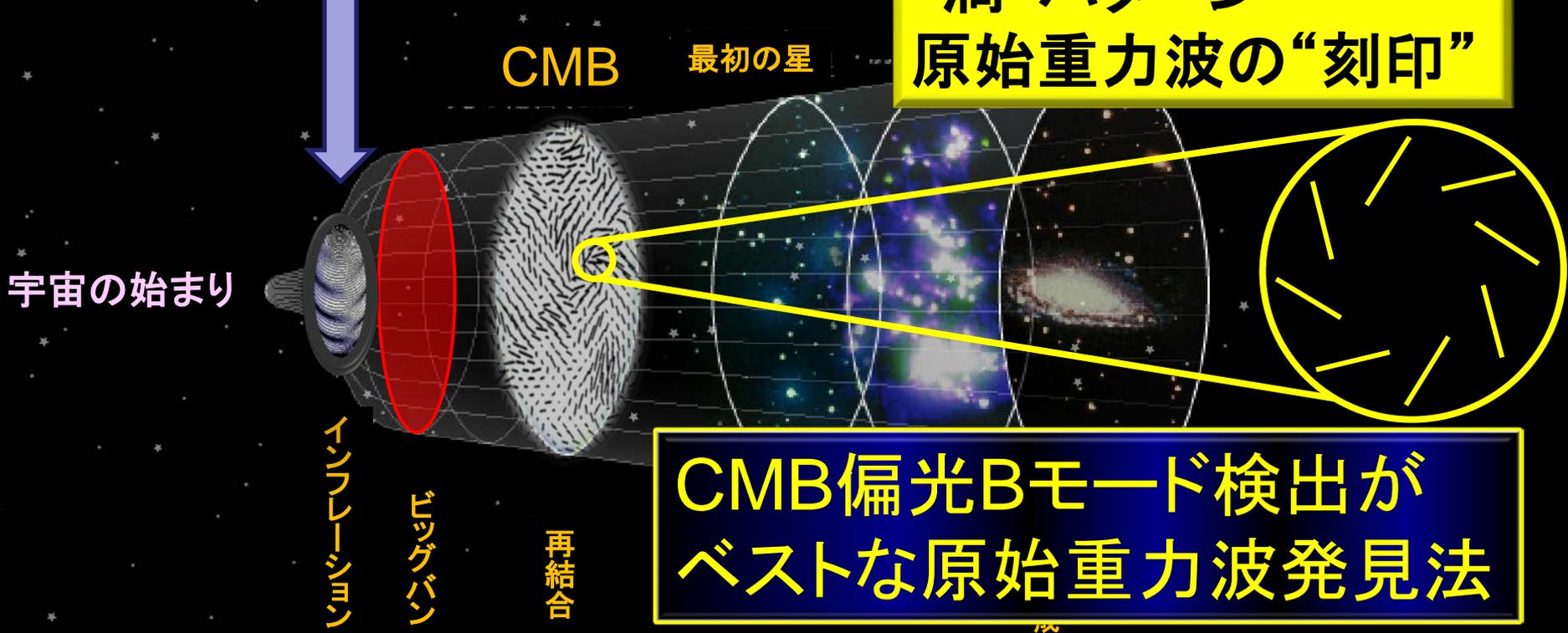
インフレーションの最も重要な予言: 原始重力波の生成

原始重力波

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

宇宙年齢

10<sup>-36</sup>秒

38万年

1億年

137億年

# 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

標準モデルヒッグス  
と似たような議論

- スカラー揺らぎの大きさ $A_s$ 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 $A_s$ は決まっている $\rightarrow V/r$ も決まっている。

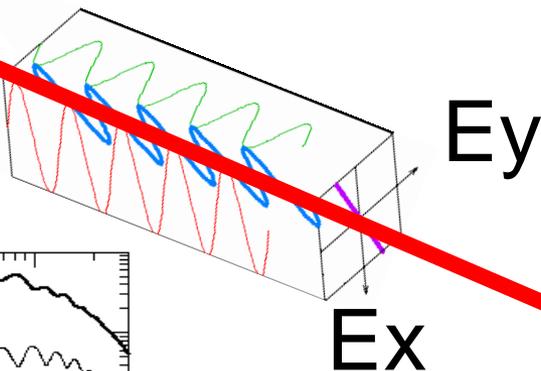
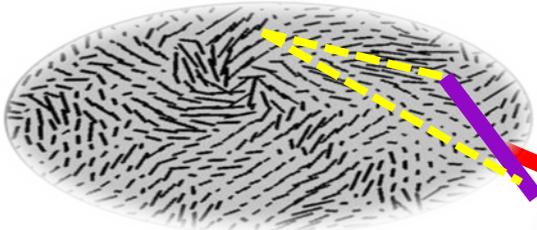
$$A_s = (2.4 \pm 0.1)^{-9}$$

- CMB偏光Bモードの強度は $r$ に比例 $\rightarrow r$ が決まれば、 $V$ が決まる。

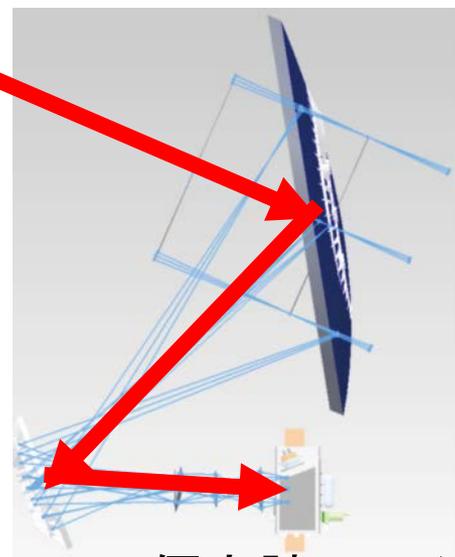
$$V^{1/4} = 1.1 \times 10^{16} \text{ GeV} \left( \frac{r}{0.01} \right)^{1/4}$$

超高エネルギー物理!

# 観測の原理



電波望遠鏡

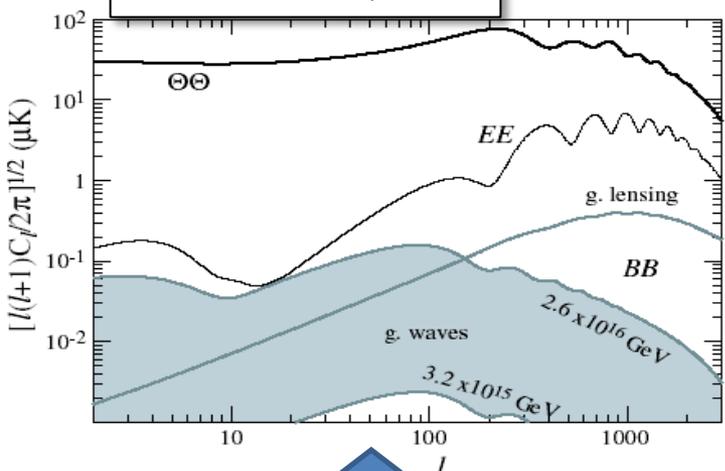


偏光計アレイ

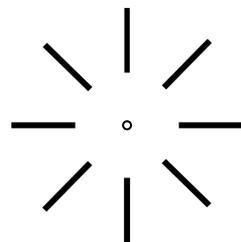
偏光度

- $Ex^2 - Ey^2$
- $ExEy$

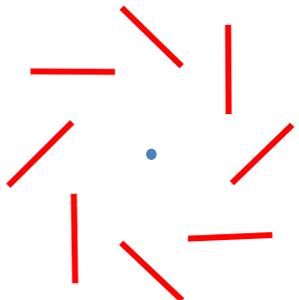
パワースペクトル



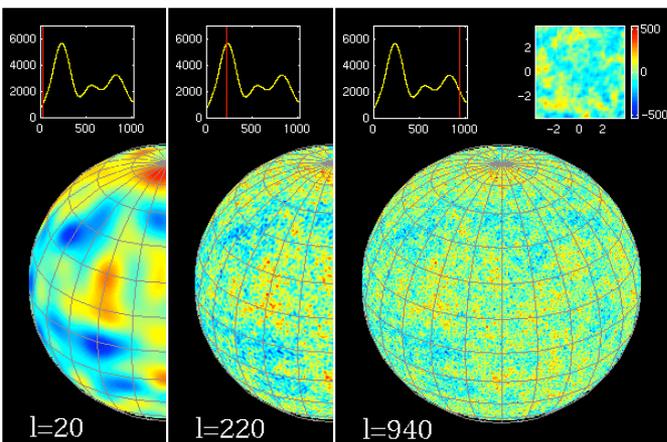
E-mode



B-mode

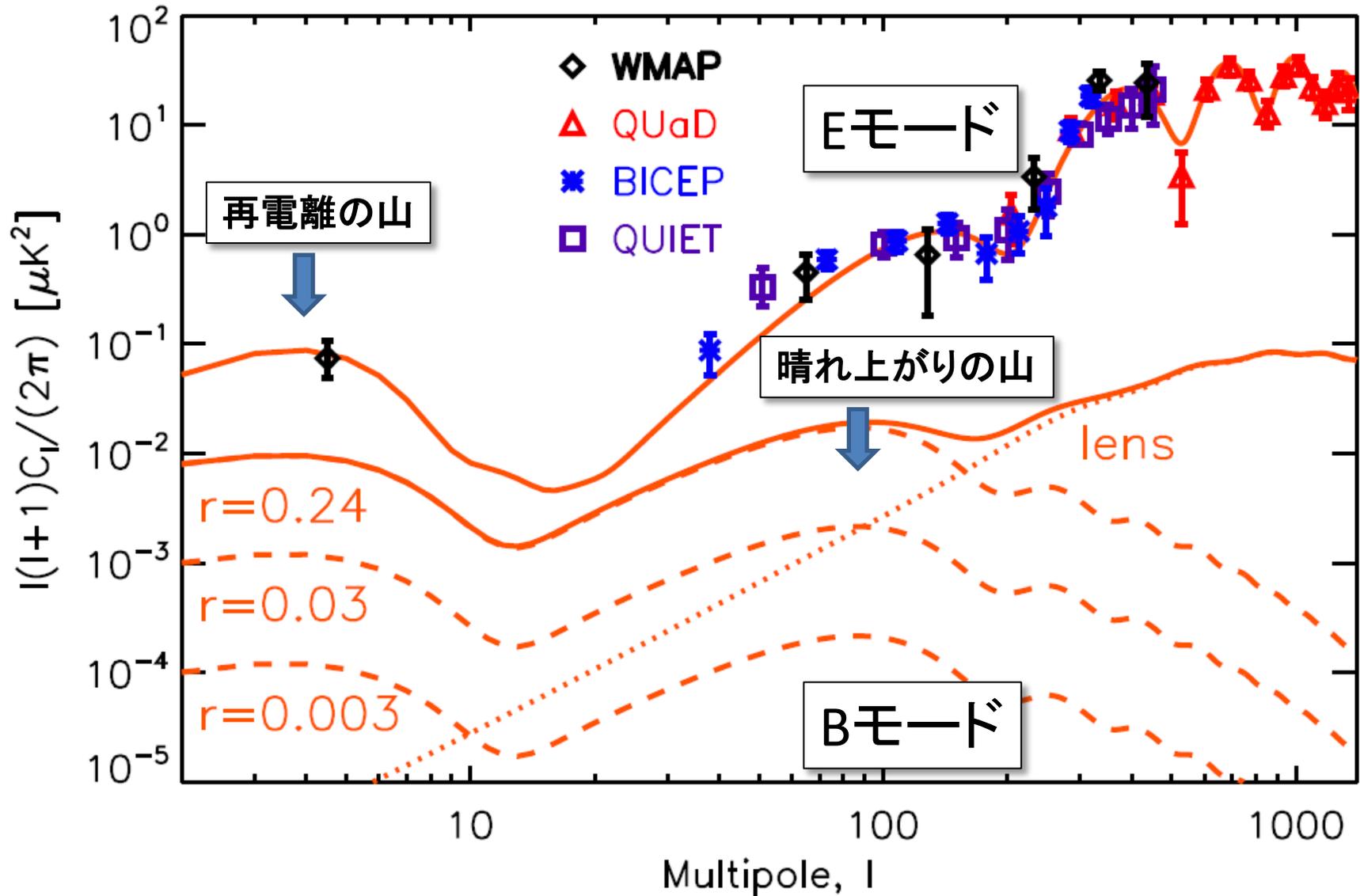


スペクトル解析



2011/9/17

# CMB偏光パワースペクトル

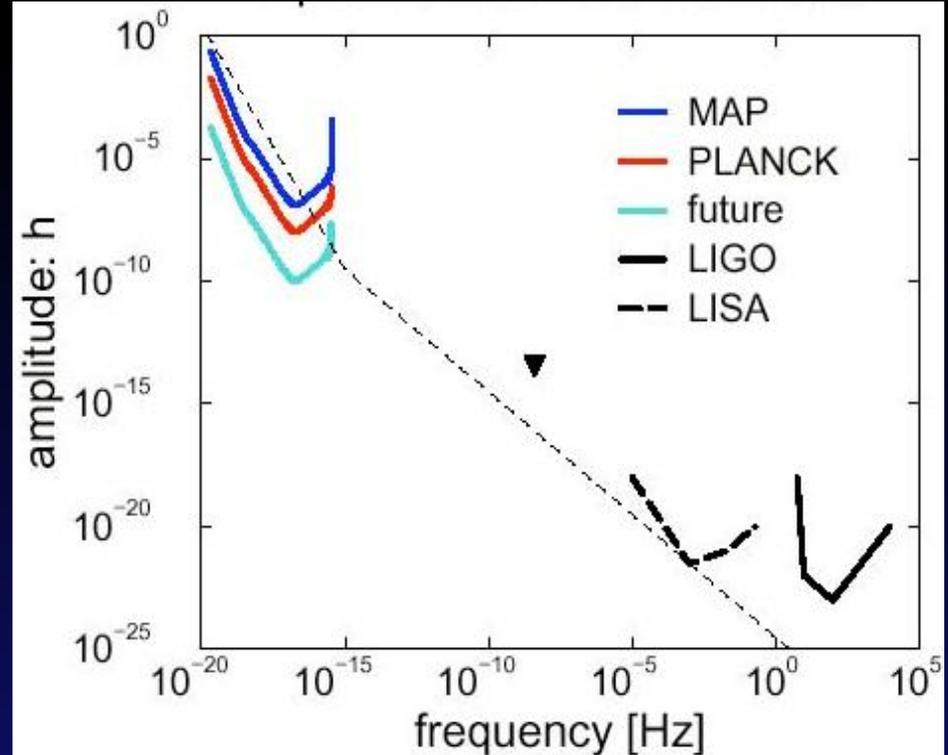


# 干渉計重力波探索との関係

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観測による宇宙論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！



# Scientific Shopping List

Cosmology  
and  
Fundamental  
physics

- Primordial gravitational wave (low- $l$  B mode)
  - inflation model selection
  - Tests of quantum gravity, even string theories !
- Lensing (high- $l$ ) B-mode precision measurements
  - neutrino mass, gravitinos etc.
  - (early) dark energy
- Beyond the Standard Model
  - parity violation in gravity (non-zero  $C_{EB}$  etc.)

Astronomy

- Cosmic reionization science (low  $l$ )
- Foreground science

Rich and important science from CMB polarization

# 3つのCMB偏光観測プロジェクト

## ナノケルビンへの挑戦

### • QUIET

- チリ(5080m)、低い周波数をHEMTアレイで観測、 $D=1.4\text{m}$
- QUIET (2008-2010), QUIET2 (2014~)
- U Chicago, Caltech, Princeton等との国際協力

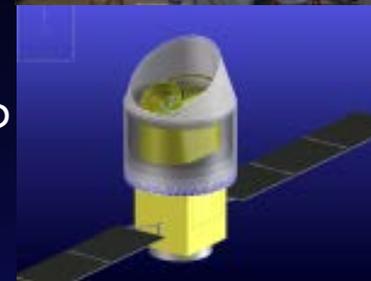
QUIET初期観測結果  
[arXiv:1012.3191]

### • POLARBEAR

- チリ(5100m)、高い周波数をTESボロメータアレイで観測、 $D=3.5\text{m}$
- POLARBEAR (2011-2013)、POLARBEAR2 (2014-2016)
- UC Berkeley等との国際協力: POLARBEAR2レシーバーをKEKが主導

### • LiteBIRD

- 小型人工衛星、広い周波数を超伝導検出器アレイで観測、 $D=0.6\text{m}$
- 2020年頃打ち上げを目指すJAXA小型科学衛星ワーキンググループの一つ
- POLARBEARの技術を導入+地上実証実験GroundBIRD



高エネルギー  
物理学

天文学

かつてない規模  
の共同研究

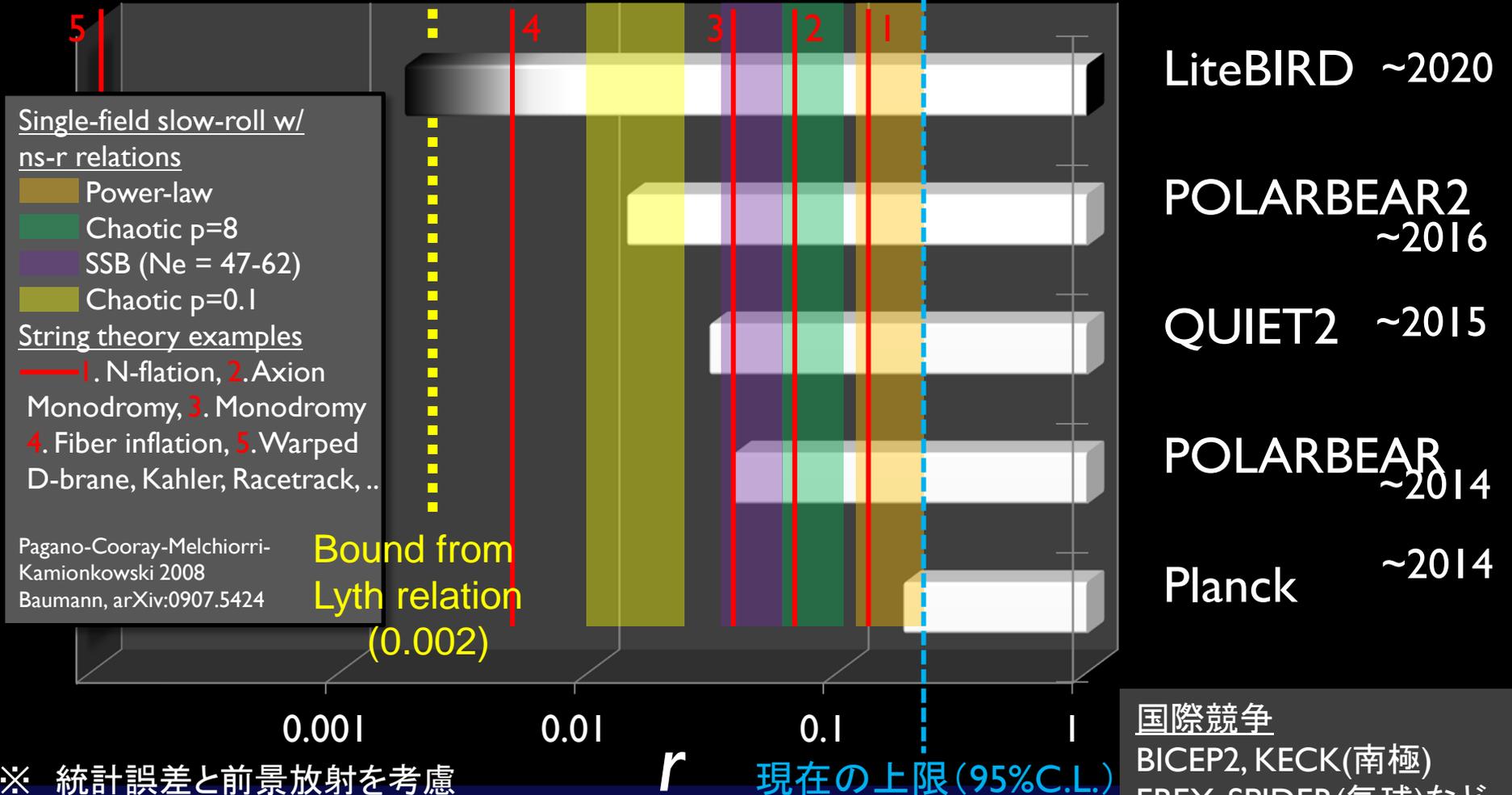
50名を超えるメンバー: 参加者の所属機関: JAXA、岡山大、近畿大、KEK、  
国立天文台、東北大、横浜国大、理研、LBNL、UT Austin、UC Berkeley

宇宙論  
素粒子論

超伝導  
デバイス工学

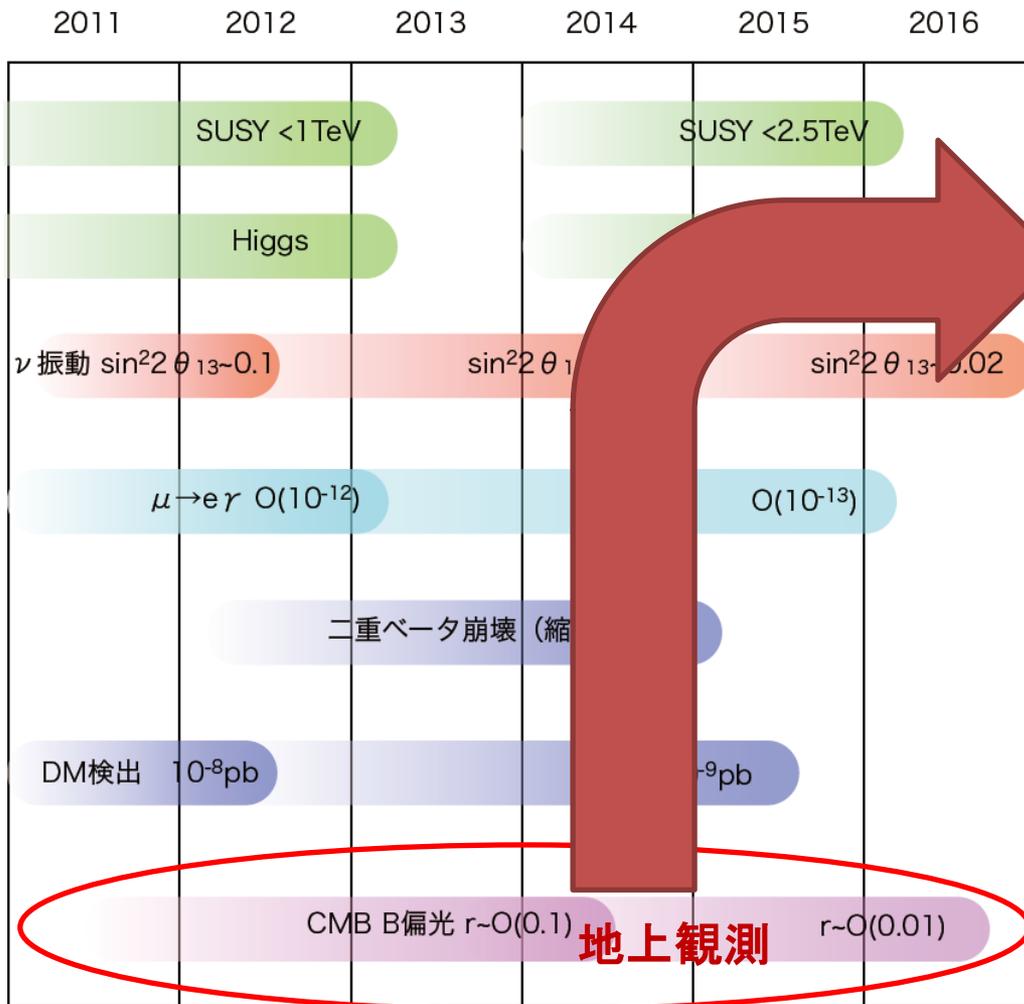
- 
- 地上観測 (QUIET、POLARBEAR) については、  
9月18日午後のCMBシンポジウム (SY会場)  
で詳しい報告がありますので、  
そちらにぜひご参加ください。

# 発見能力 ( $>3\sigma$ ) とインフレーションの予言



多くのインフレーションモデルで  $r > 0.01$   
→ 発見の期待大!

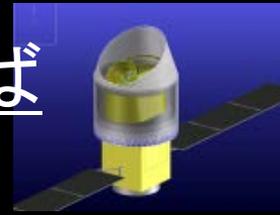
図1 今後数年間に期待される発見 (>3σ)



\*本小委員会が関係資料より作成した私的な予測であることに注意。

地上で兆候あれば

衛星による



全天超精密測定へ

- ◆ rの精密測定
- ◆ 全天→Bモードパワースペクトルの測定



量子重力理論(超弦理論  
など)、時空構造の検証

更なる発展の道筋がある

高エネルギー物理将来計画検討小委員会(2011)  
「将来計画の策定に向けた提言」より

# LiteBIRD 概要

スケジュール:

2020年頃打ち上げ

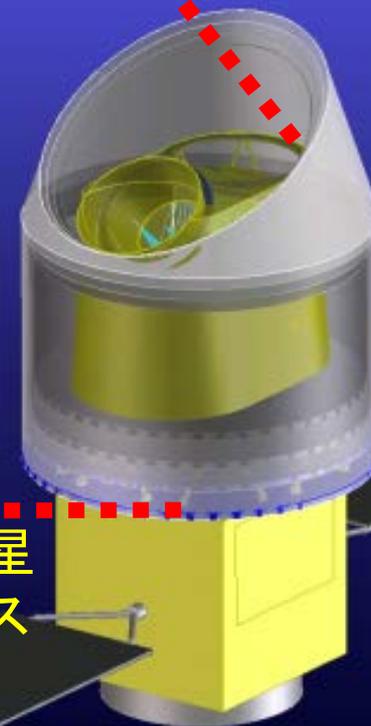
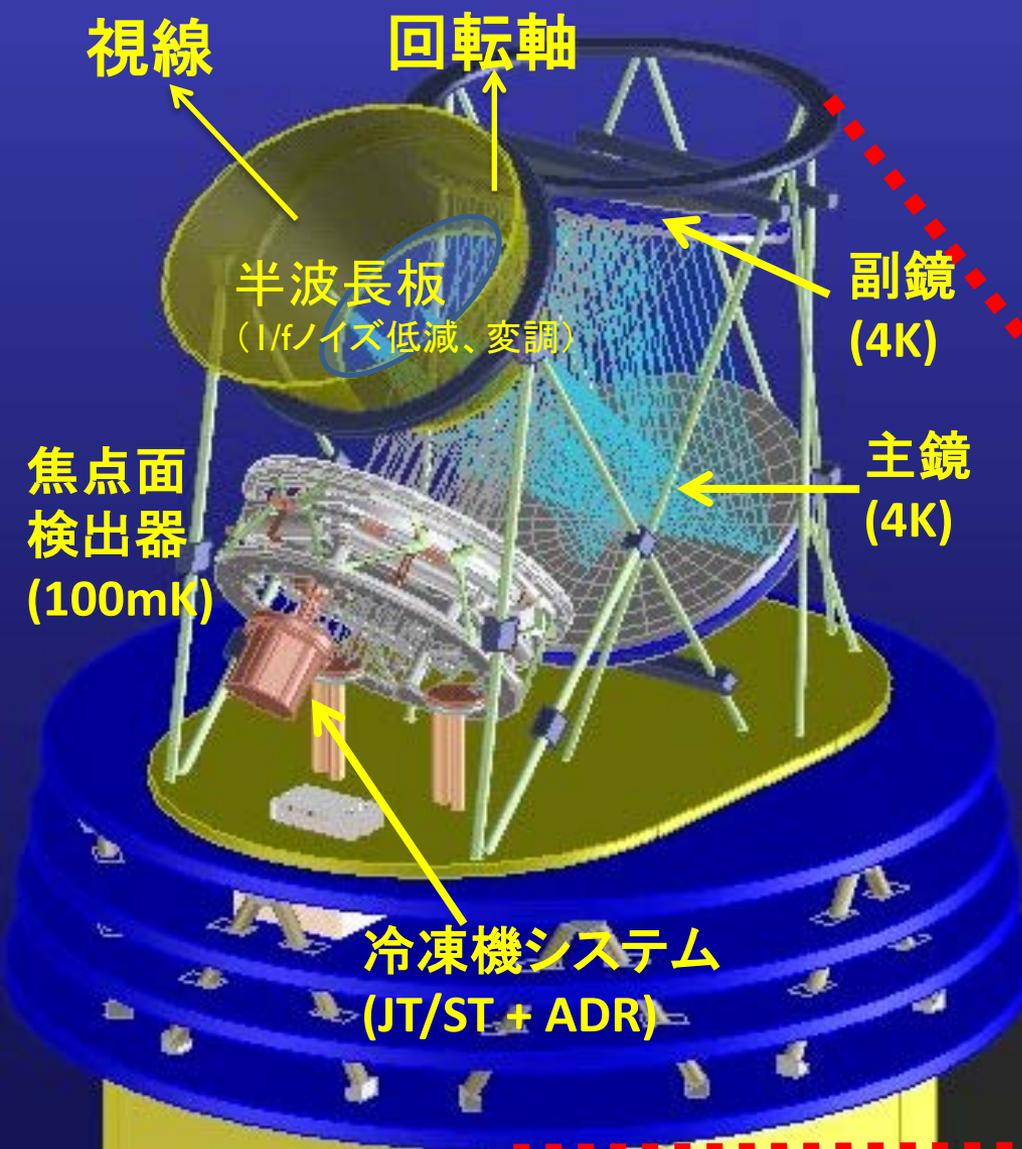
2年間の運用期間

3年間のデータ解析期間

2025年頃プロジェクト終了

軌道:

L2とLEOを検討中



# ダークエネルギー

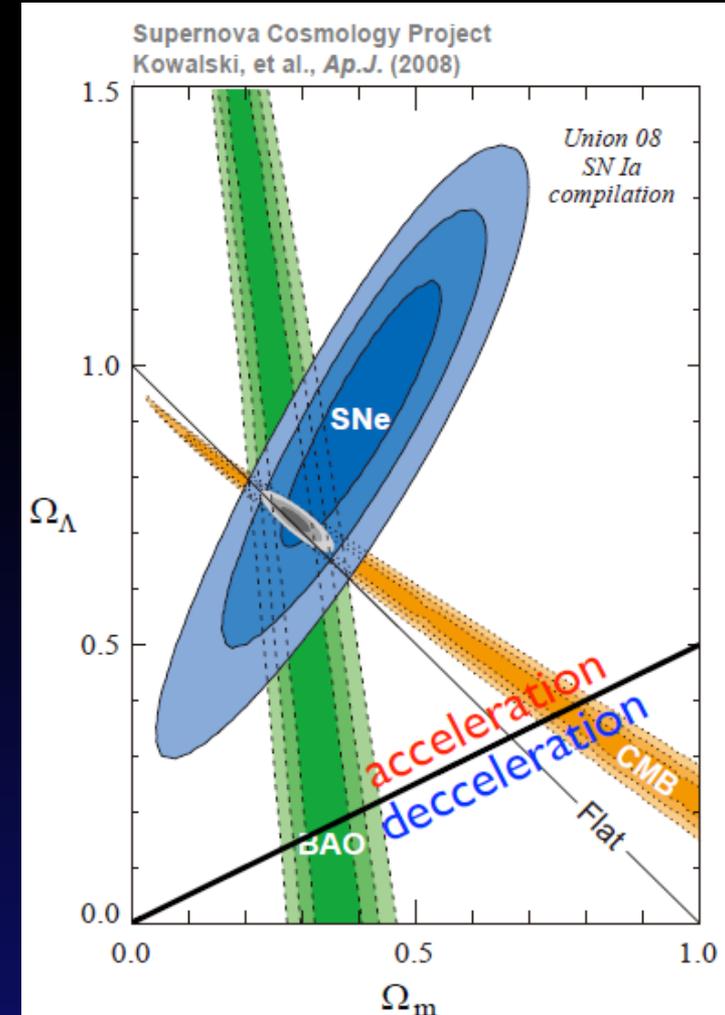
Thanks to  
Murayama-san,  
Aihara-san

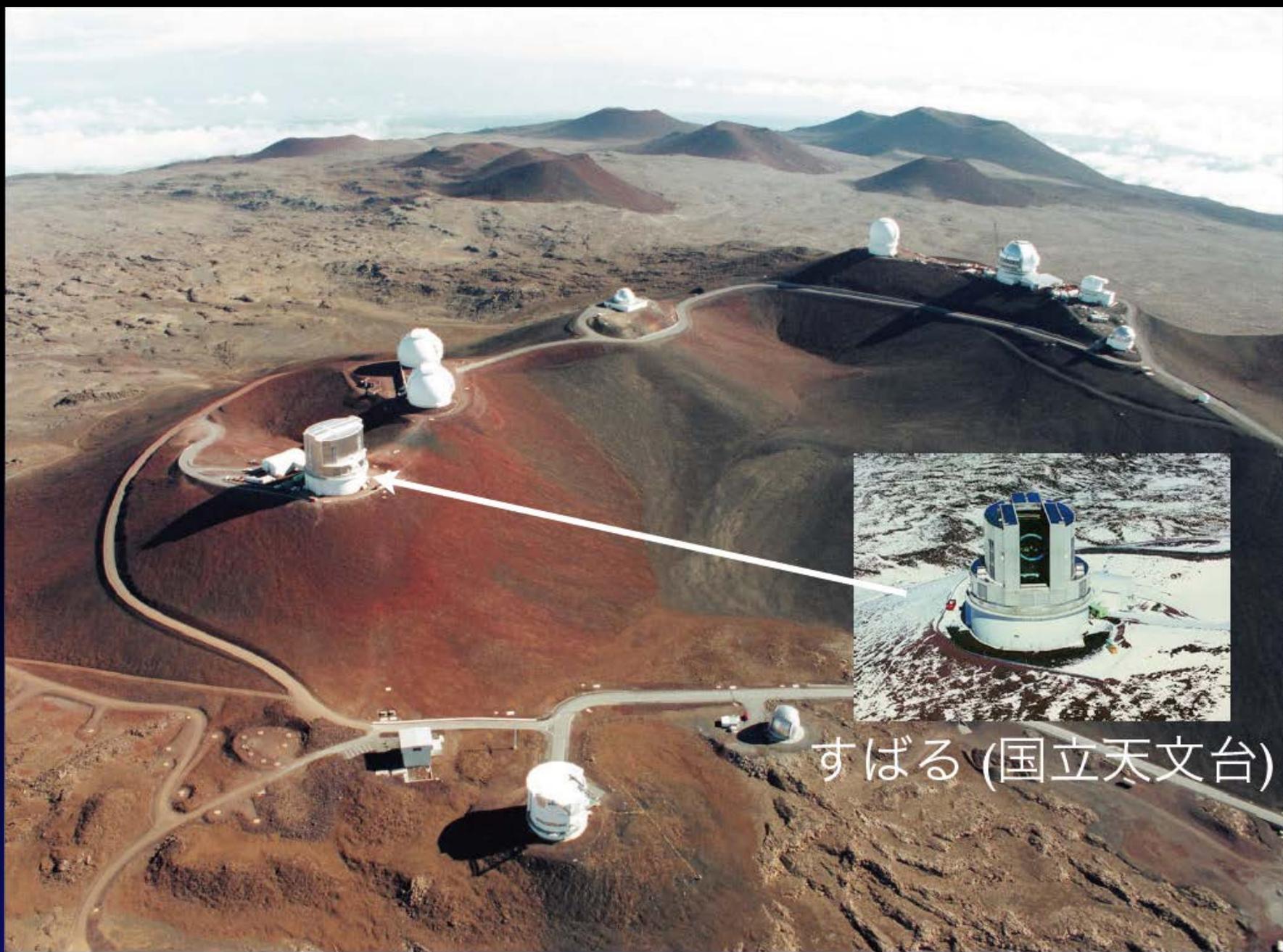
- 動機
  - 驚きの発見「もうひとつの加速膨張」
- 物理モデル
  - 何にも分かっていない
  - データをフィットするための状態方程式

$$p = w\rho$$

$$w(a) = w_0 + w_a(1 - a)$$

- 検証方法
  - SN (Type-Ia supernovae)
  - CL (cluster survey)
  - WL (weak lensing)
  - BAO (baryon acoustic oscillation)





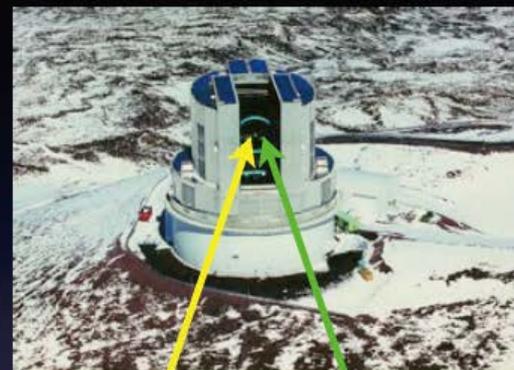
すばる (国立天文台)



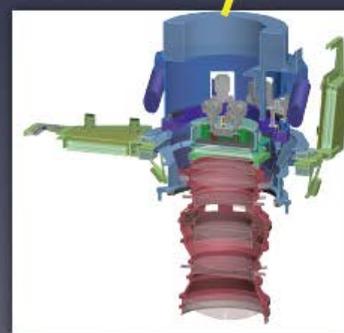
# SuMIRe

## Subaru Measurement of Images and Redshifts

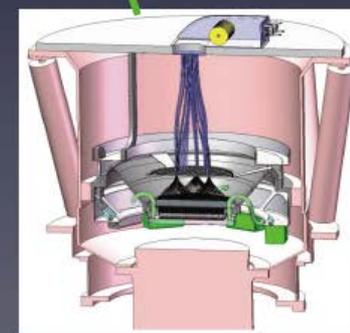
- 8.2 m, excellent seeing 0.6"
- FOV  $1.5^\circ \sim 1000 \times \text{HST}$ ,  $\sim 100 \times \text{Keck}$
- **HyperSuprimeCam**: weak lensing survey
  - 0.9 B pixels, 3 ton camera
  - billions of galaxies
  - $\sim \$50\text{M}$ , secured
- **PrimeFocusSpectrograph**: BAO
  - 2400 fibers,  $\sim 2000$  sq. dg.
  - $> 1\text{M}$  redshifts
  - $\sim \$60\text{M}$ ,  $\sim \$40\text{M}$  secured
- **imaging & spectroscopy** on the same telescope: SDSS on powerful 8.2m!



Subaru



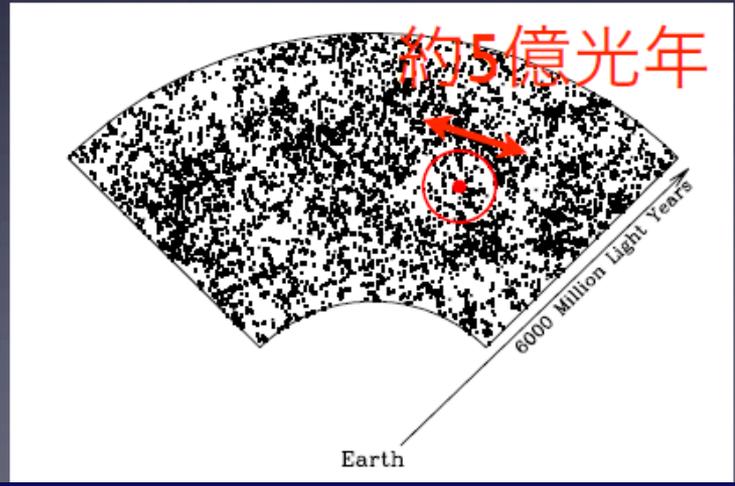
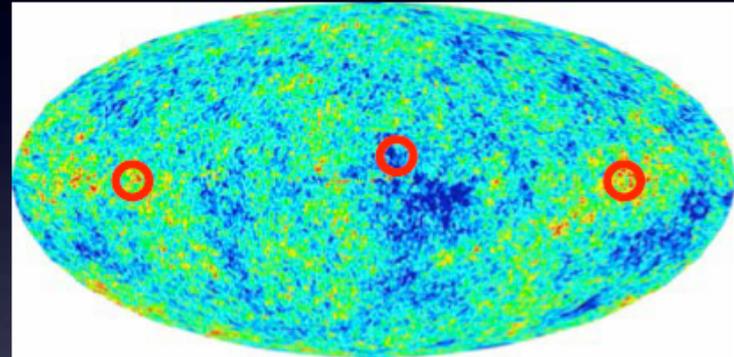
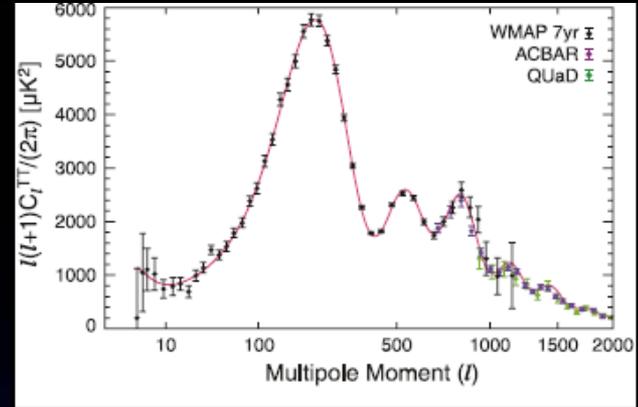
HSC



PFS

# BAO

- 銀河の集まり方には特徴的な距離 ( $148 \pm 3$  Mpc)
- 「バリオン振動」
- 分光器で宇宙膨張の速さ
- 膨張と距離を組み合わせると宇宙膨張の歴史が測れる
- 暗黒エネルギーの正体を暴く
- 膨張の将来を予測
- 宇宙に終わりがあるか？



400

# competitiveness

## dark energy figure of merit

300

200

100

0



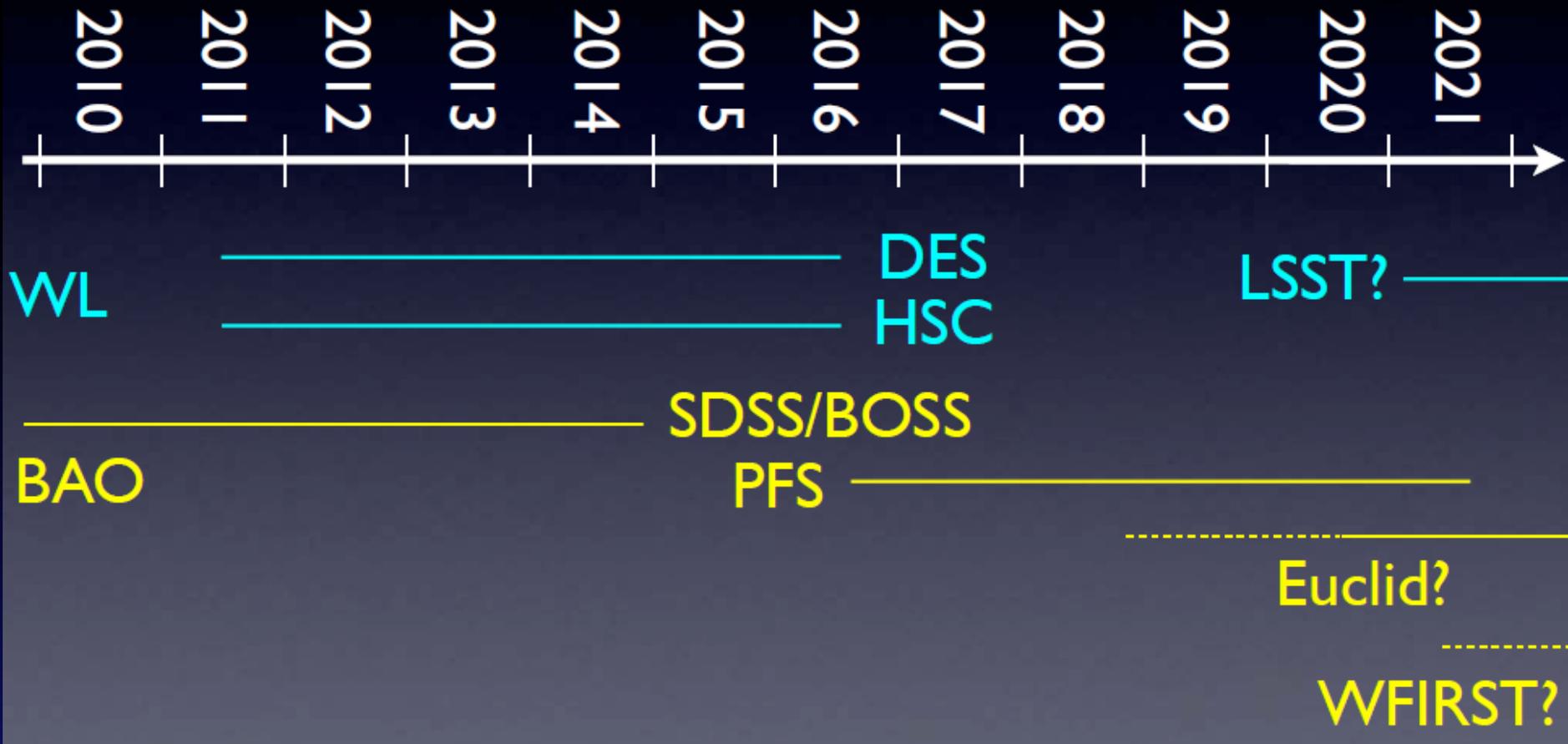
SuMIRe

better

FoM

$(\sigma(w_{\text{pivot}})\sigma(w_a))^{-1}$

# Timeline



# Subaru Users

- Subaru is a user facility
- we have to apply for telescope night allocation
- expanded the science scope
  - galaxy evolution
  - galactic archeology
  - added near IR arm to the spectrograph
- other impacts on high-energy physics
  - map out 3D dark matter distribution
  - neutrino mass  $\sigma(\sum m_\nu)=60\text{meV}$
  - test inflation  $\sigma(f_{NL})=5$  ( $\approx$  Planck)
  - test general relativity @ large distances

# 2つの異なった文化が衝突

## ● 高エネルギー

- Fundamentalist physics
- 基礎原理の追求を目指す: Theory of Everything
- 少ない数の基本的かつ「重要な」問い
  - Origin of mass, grand unification, quantum gravity...
- Specialists

## ● 天文

- Universalist (Interdisciplinary)
- 多様性を受け入れ、複雑な系に存在する多くの真理を探求
- 多様性に基づく多くの問い
  - Formation, Evolution, and Fate of planets, stars, galaxies, cluster of galaxies...
- Generalists

# 宇宙観測にも2つのアプローチ

## ハッブル宇宙望遠鏡

- An observatory
- 一般的な目的
- 広範なコミュニティのため
- プロポーザルに基づくプログラム
- 大小、多くのチーム
- 予想外の多くの結果
- 天文学の先端技術を育てる
- 望遠鏡として一般のサポートを得ている

## WMAP衛星

- An experiment
- 一つの目的
- 一つのまとまったコミュニティのため
- 最初から決まったプログラム
- 一つのチーム
- 予定されていた結果
- データプロセス、統計解析の技術を育てる
- 結果を通じて、一般のサポートを得る

# 天文の将来計画

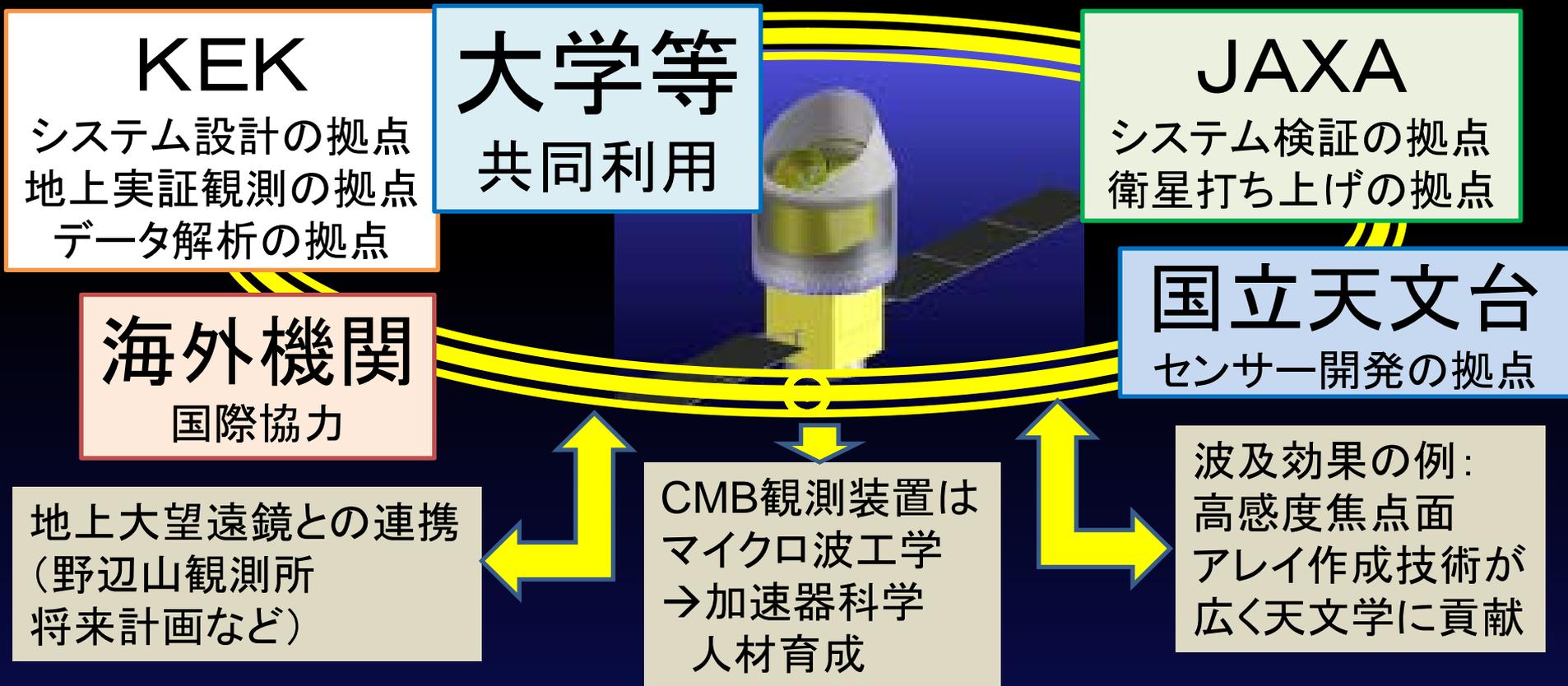
- 学術会議、「マスタープラン」
  - LCGT 大型冷却重力波望遠鏡
    - 時空の動的性質解明、重力波天文学の創始
  - TMT 30m望遠鏡
    - 初期宇宙史解明、系外地球型惑星探査:人類の宇宙観の  
変革
  - SPICA 3m口径赤外線スペース望遠鏡
    - 銀河誕生のドラマ、惑星系形成のレシピ、物質の輪廻の  
解明
  - SKA I 平方キロ電波干渉計
    - 生命起源、パルサーによる背景重力波測定、宇宙再電離  
と初期天体形成解明、宇宙磁場の起源と進化
  - Astro-H X線スペース望遠鏡
    - 銀河団中の高温ガスの速度測定、巨大ブラックホールの  
進化と銀河形成に果たす役割解明

# 天文業界がHEPに期待すること

- WMAP型の明確な目的を持った、fundamentalistとしての計画を進めるのがよい
- そのうえで、天文学を豊かにする実験・観測計画は、分野を超えて最優先になり得る
  - 主目的以外のサブプロジェクトが設定でき、若手に機会が与えられる
  - HEPで培った最先端技術が天文研究に還元される
    - 技術的連携はすでに始まっている(次頁)

LiteBIRD、SuMIReのどちらも天文コミュニティが支援してくれている

# CMBに関連した技術連携



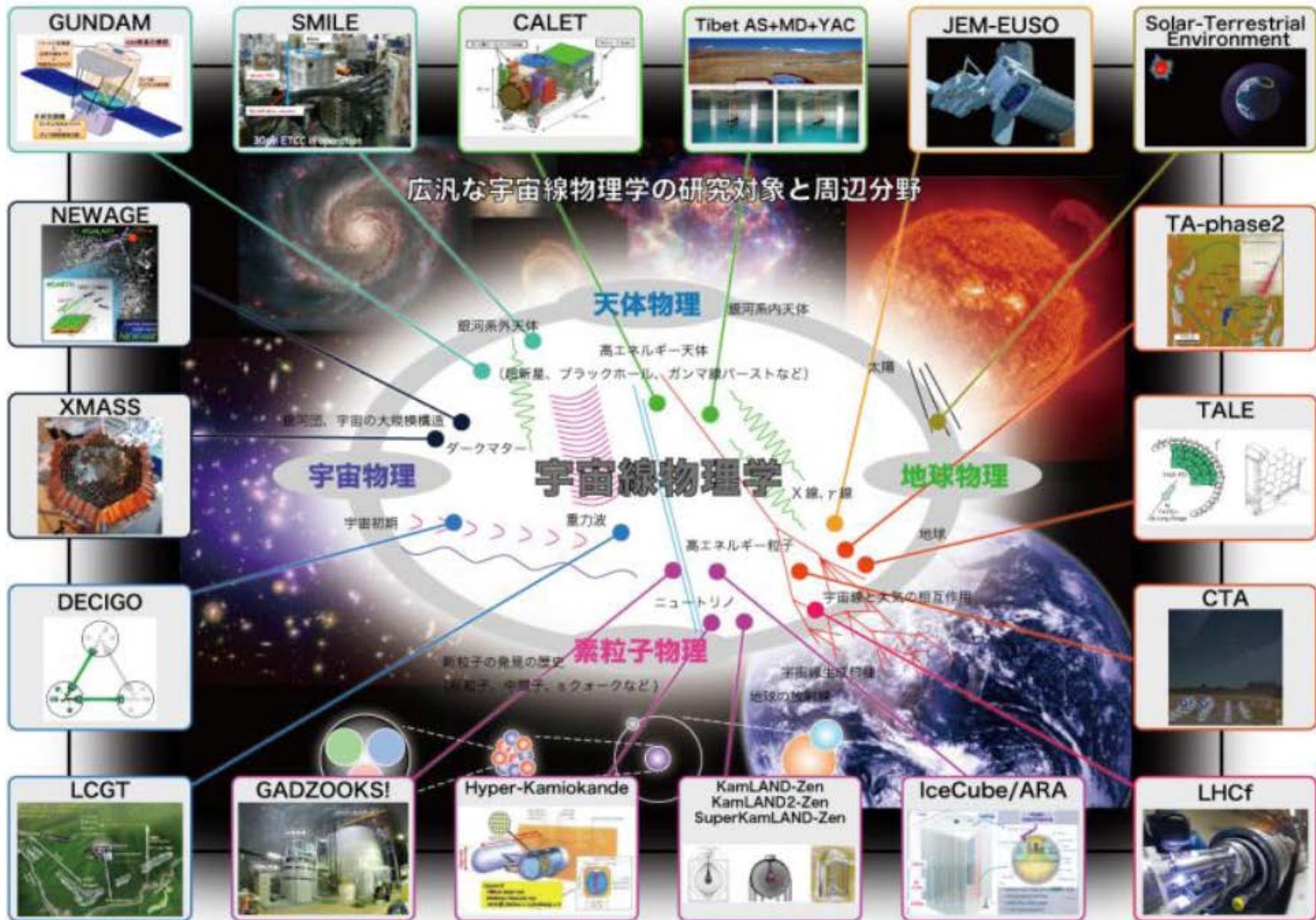
これまでにない規模の技術連携が、新たな可能性を拓きつつある

# 学術会議天文学宇宙物理学分科会での中規模プロジェクトのヒアリング

- 8月30日に実施
- 電波の中規模将来計画について
  - LiteBIRDは高エネルギーコミュニティからの提案ではあるが、体制も整っており、よい計画なので宇宙電波懇談会（宇電懇）としても強くサポートしたいとの評価であった。
  - 全体をまとめると、LiteBIRD以外はまだ概念的段階であり、宇電懇、天文台電波専門委員会で、これから順位付けが行われるとのことである。鈴木委員から、電波コミュニティには、これだけの計画を進めるだけのマンパワーが十分にあるのかとの質問があった。山本運営委員長からは、マンパワーを含めて、きちんと提案されている計画はLiteBIRDだけで、その点を含め他は今後検討されるとの返答があった。

# HEPから宇宙へ乗り出す人へのメッセージ





# ⇒ 井上さんのトーク

# まとめ

- ダークエネルギーの観測や、宇宙マイクロ波背景放射(CMB) Bモード探索によるインフレーションの検証は、素粒子物理学としても重要な課題である。
- POLARBEARやQUIETなどのCMB Bモード地上観測がインフレーションの証拠となる原始重力波の存在を示唆した場合は、その決定的検証と背後にある量子重力理論の解明のため、人工衛星による全天超精密観測の実現を目指すべきである。
- ダークエネルギーに関しては、イメージングと分光を駆使して測定精度を高めていくことが重要である。

「将来計画の策定に向けた提言」 3. 将来計画のシナリオ 「宇宙観測」

# 若い人へのメッセージ



- 一生の中で素粒子も宇宙もやるという研究ライフは可能だ。
- より広く言えば、時代の最もエキサイティングなテーマに果敢に挑む研究スタイルは可能だ。
- 恐れず新しいことにチャレンジしよう。  
物理への情熱と、現場力があれば道は開ける。