



# 宇宙観測による 高エネルギー物理の展望

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

高エネルギー物理学研究者会議将来計画検討小委員会タウンミーティング

2011年6月25日

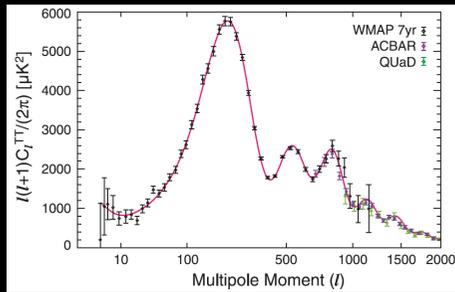
東京大学

# 高エネルギー物理における宇宙観測の基本戦略

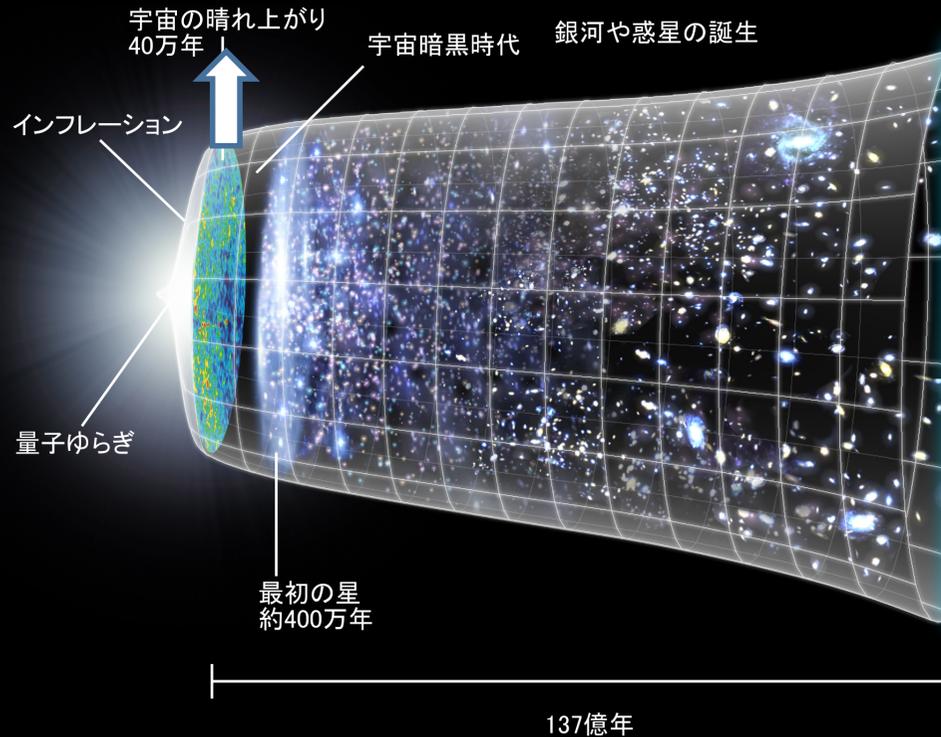


- 高エネルギー物理学  
= 素粒子と時空の根本原理を探る学問
- 根本原理探求に直接関与する宇宙観測を選び、プロジェクトをたてる。

# 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

- 謎の解明をめざし、すでに一部の高エネルギー物理学者が参入し、貢献。
- 素粒子物理にとって、今後10～20年の宇宙観測は、黄金時代。You are lucky !
- 「宇宙を実験室」として高エネルギー物理は今後ますます活発に推進すべき。

# インフレーション

宇宙初期の加速膨張：「一瞬でアメーバが銀河のサイズに！」

- **動機**: ビッグバンの未解決問題(地平線問題、平坦性問題、構造形成)を解決
- **物理モデル**: まだよくわかっていない
  - スカラー場(インフラトン)による加速膨張  
→ **GUTスケールの物理**

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

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

**r: Tensor-to-Scalar Ratio**

rを測ることが  
実験・観測サイドの目標

観測成功ならインフレーション  
エネルギースケールの決定

宇宙年齢

インフレーション期

$10^{-36}$ 秒

晴れ上がり

38万年

ダークエイジ

宇宙再電離

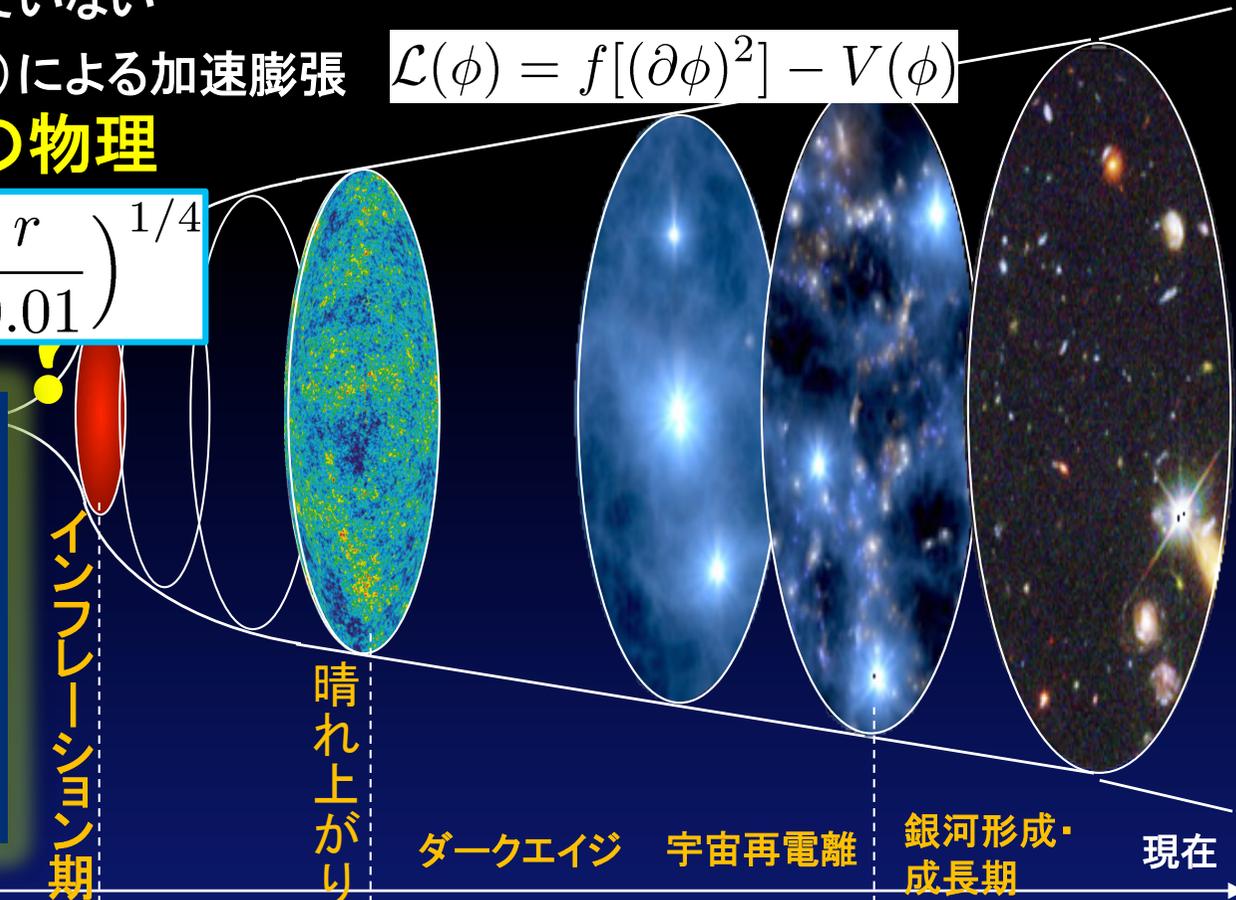
1億年

銀河形成・  
成長期

10億年

現在

137億年



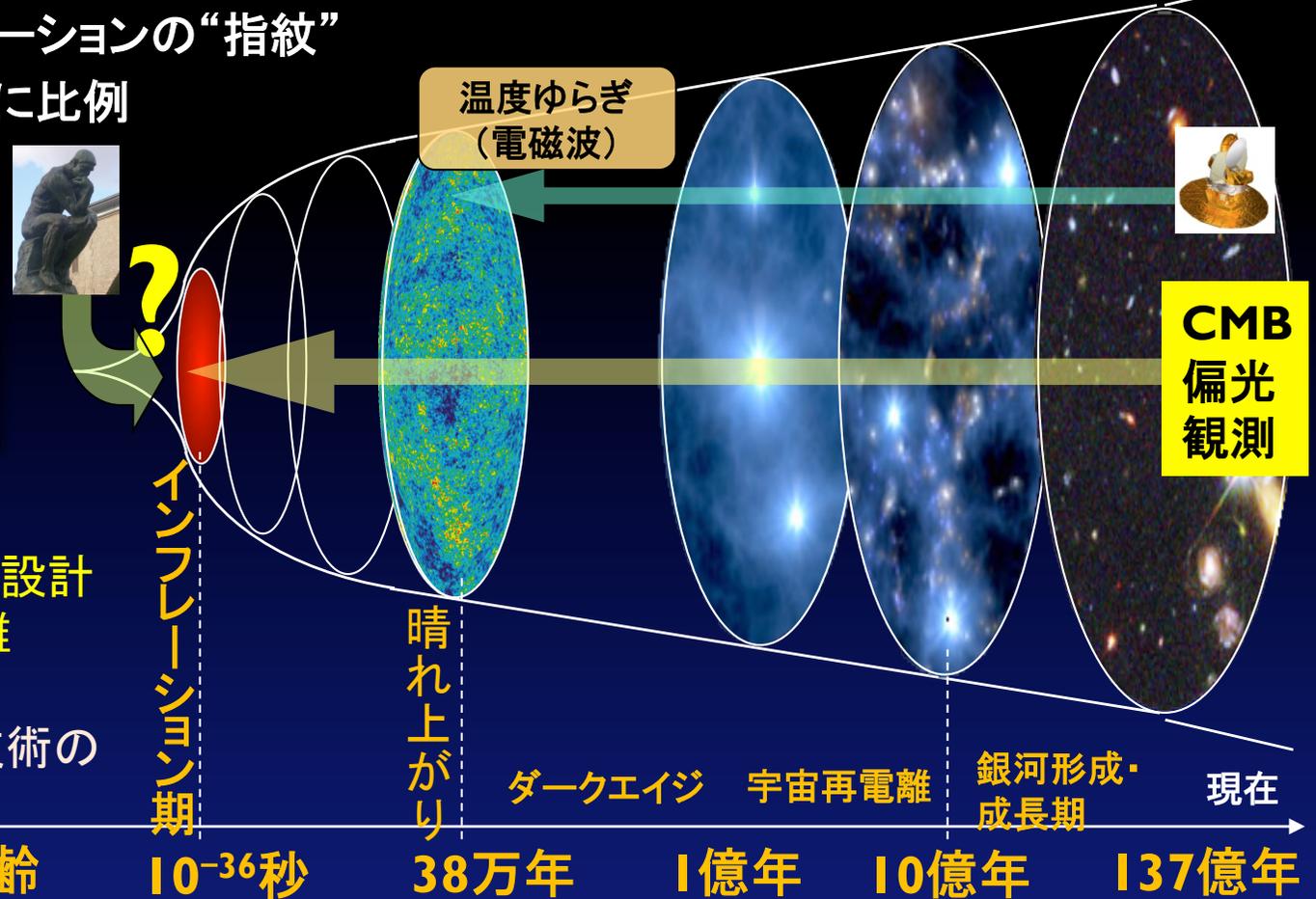
# インフレーションの検証

宇宙背景放射 (Cosmic Microwave Background: CMB) 偏光観測

- **予言:** インフレーションは急激な膨張にともない時空のゆがみ(原始重力波)を生成
- **検出:** 原始重力波+CMB散乱 → CMB偏光パターンにできる“渦”(Bモード)を検出
  - Bモードはインフレーションの“指紋”
  - Bモードパワーが $r$ に比例

**実験・観測の挑戦**  
ナノケルビンの  
ゆらぎをとらえる

- ◆ O(1000)素子の偏光計
- ◆ 系統誤差を考え抜いた設計
- ◆ 前景放射の精密な分離
- ◆ 重力レンズ効果の分離
- ◆ 高エネルギー物理の技術の活用



# 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

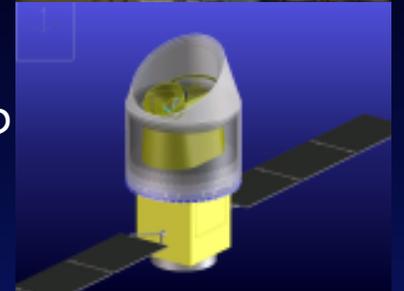
QUIET初期観測結果  
[arXiv:1012.3191]

### • 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

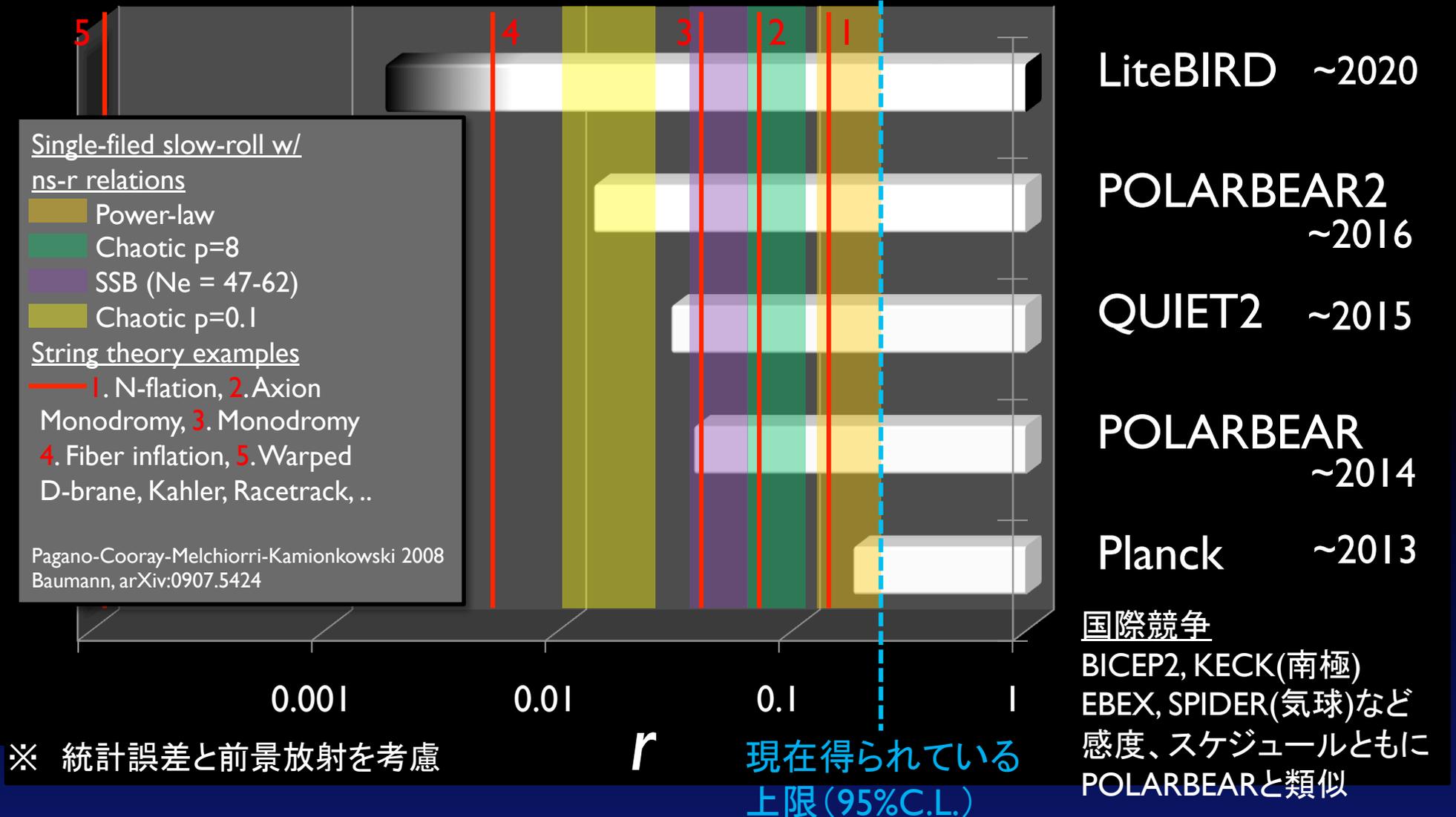
画検討小委員会タウンミーティング(東京大学)

羽澄昌史(KEK)



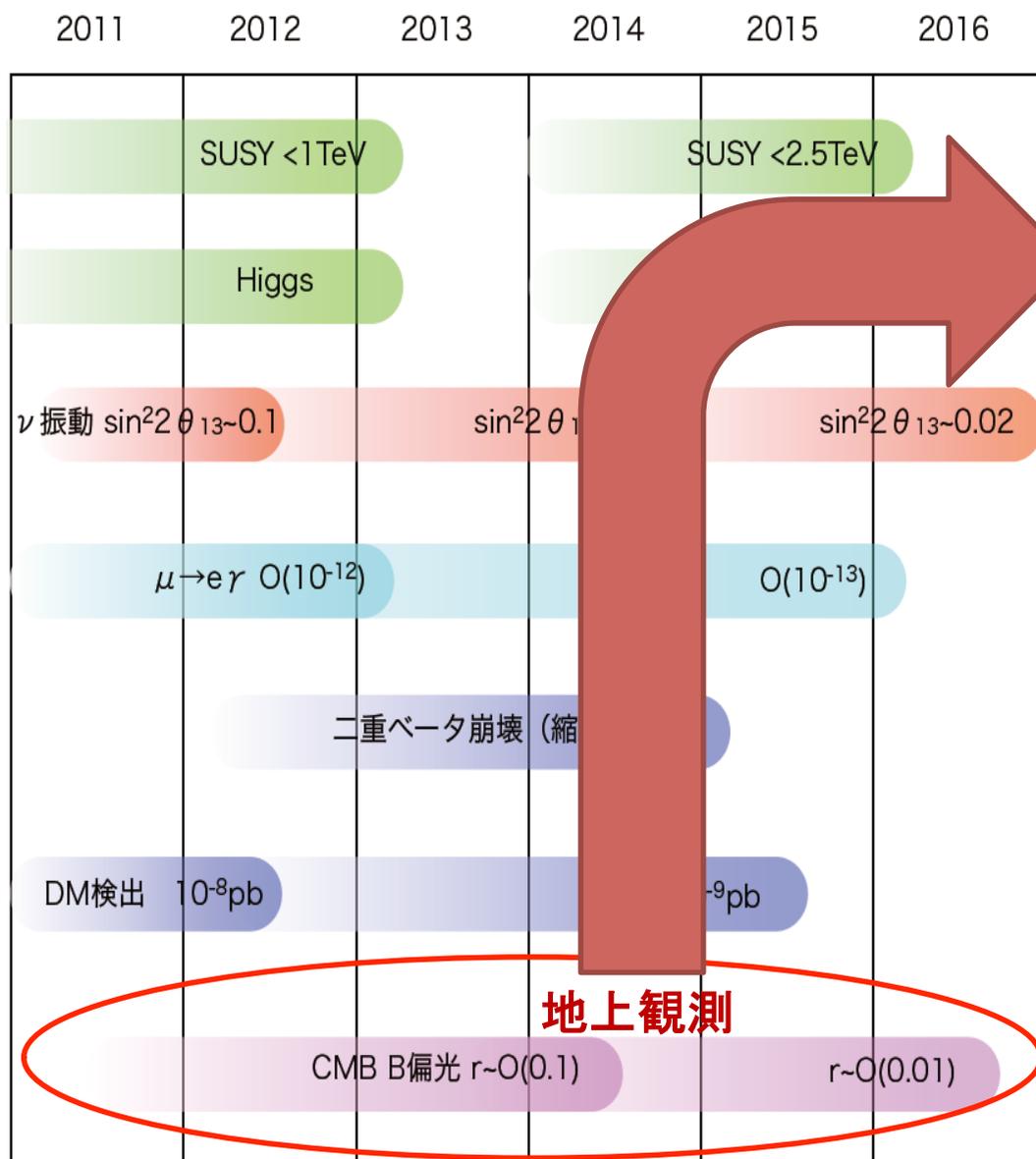
QUIET  
Observing site:  
Atacama, Chile  
(5080m)

# 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  $r > 0.01$  (Large Field Inflation) ← 発見が期待される

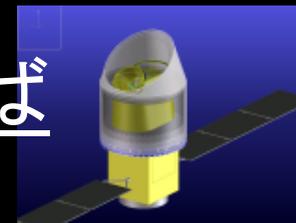
図1 今後数年間に期待される発見 (>3σ)



地上観測

\*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全貌



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

地上でevidenceがなかなか得られない場合、衛星は発見のための最良の道具としてやはり最も重要。cost effectiveな小型衛星を早期に打ち上げ、全天(大角度)での観測を行う。

# ダークエネルギー

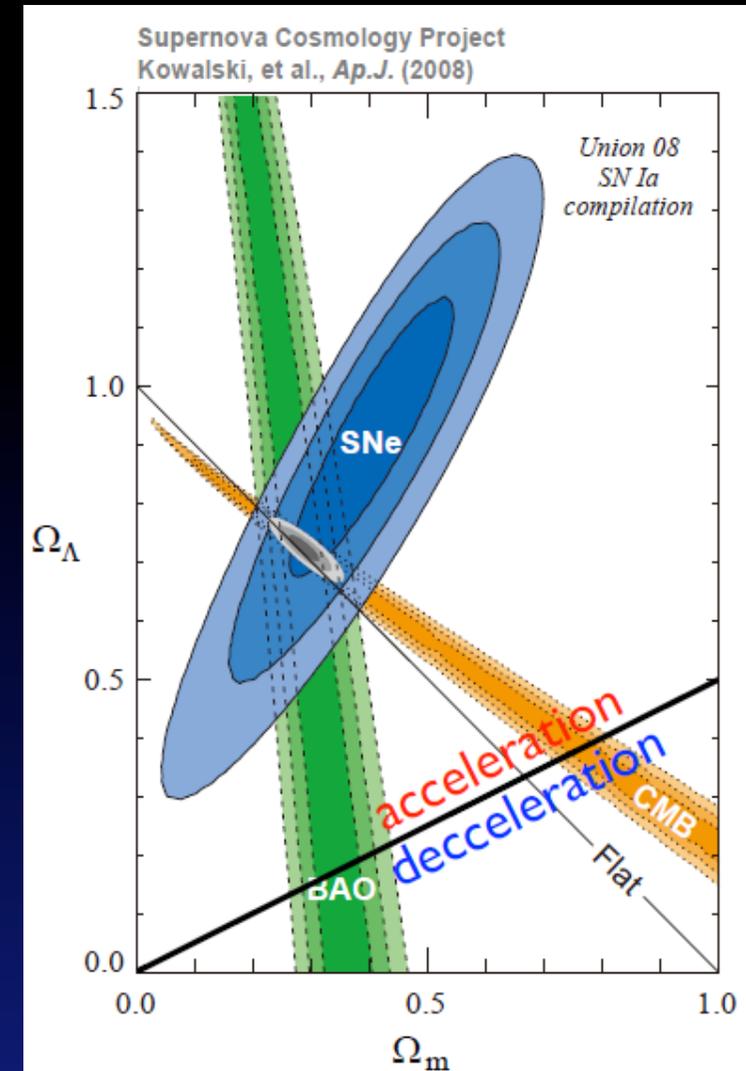
Thanks to  
Murayama-san,  
Aihara-san

- 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)



# SuMIRe

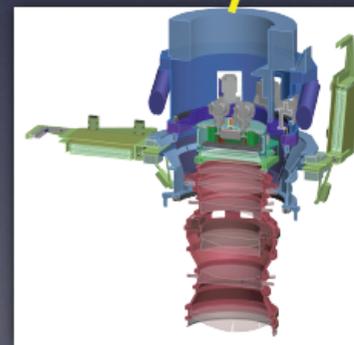
## Subaru Measurement of Images and Redshifts



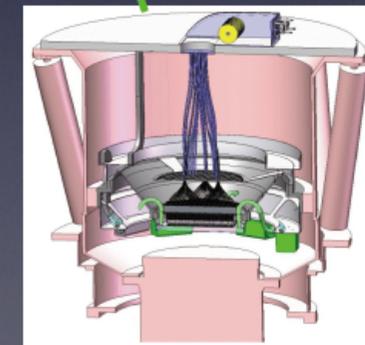
- 8.2 m, excellent seeing 0.6''
- FOV  $1.5^\circ \sim 1000 \times \text{HST}$ ,  $\sim 100 \times \text{Keck}$
- **HyperSuprimeCam**: weak lensing survey
  - 0.9 B pixels, 3 ton camera
  - billions of galaxies
  - $\sim \$50\text{M}$ , secured
- **PrimeFocusSpectrograph**: BAO
  - 2400 fibers,  $\sim 2000$  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

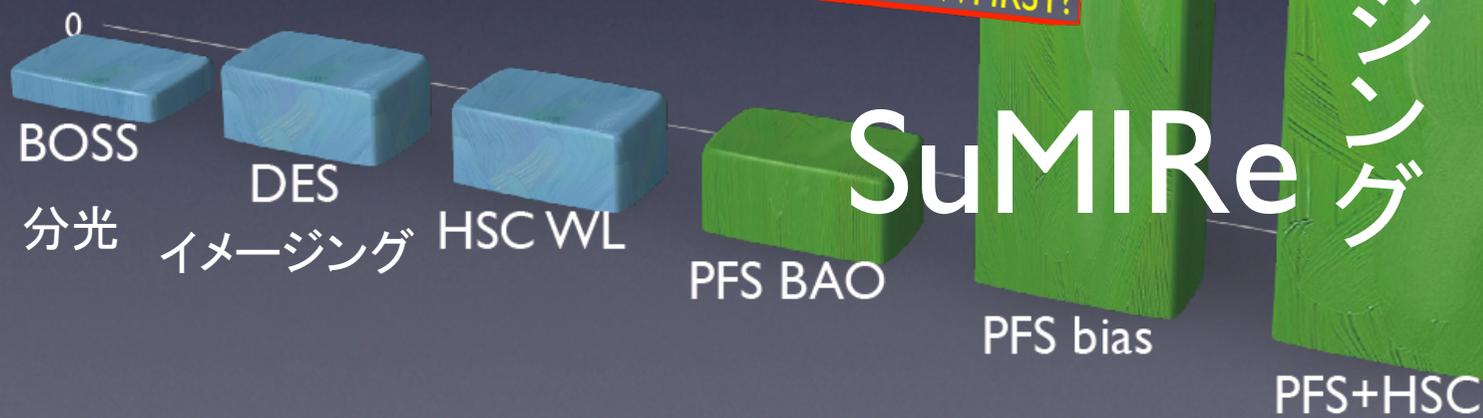
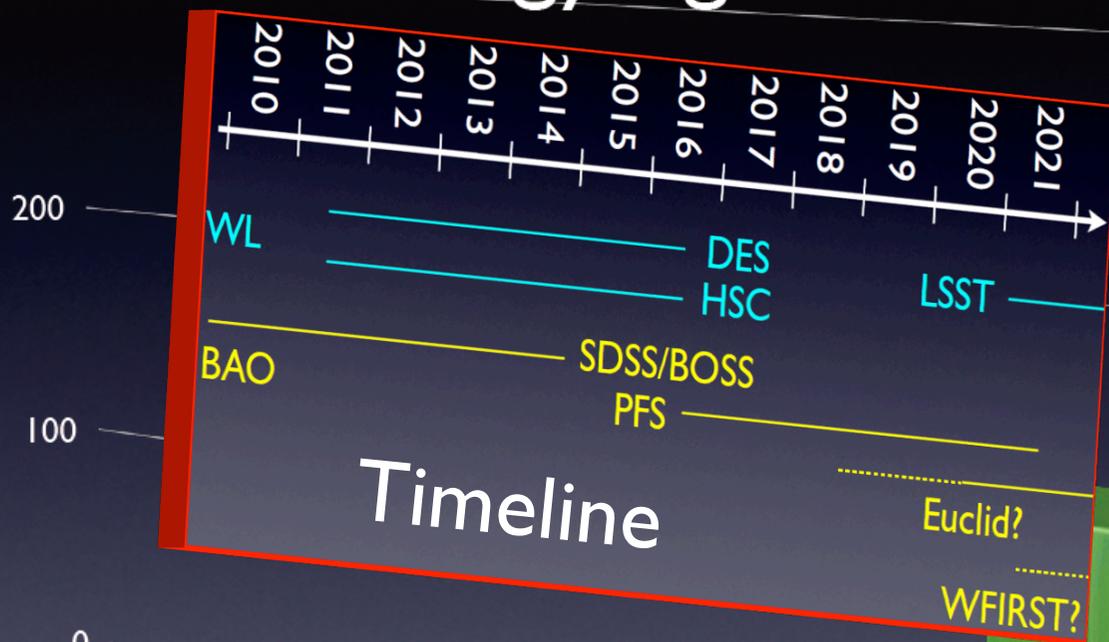


HSC



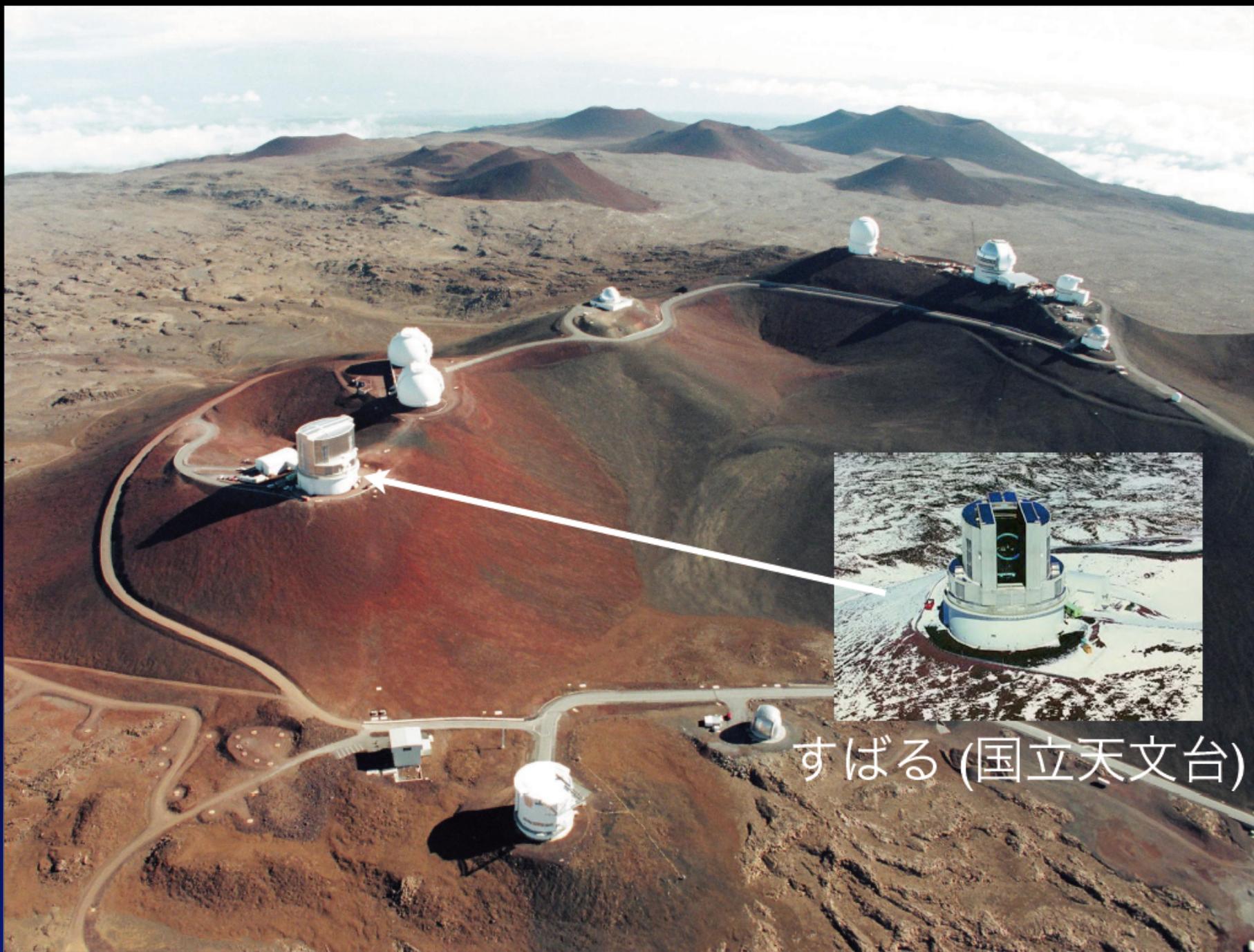
PFS

# competitiveness dark energy figure of merit



分光+イメージング  
FoM  $\uparrow$  better  
 $(\sigma(w_{\text{pivot}})\sigma(w_a)^{-1})$

SuMIRe



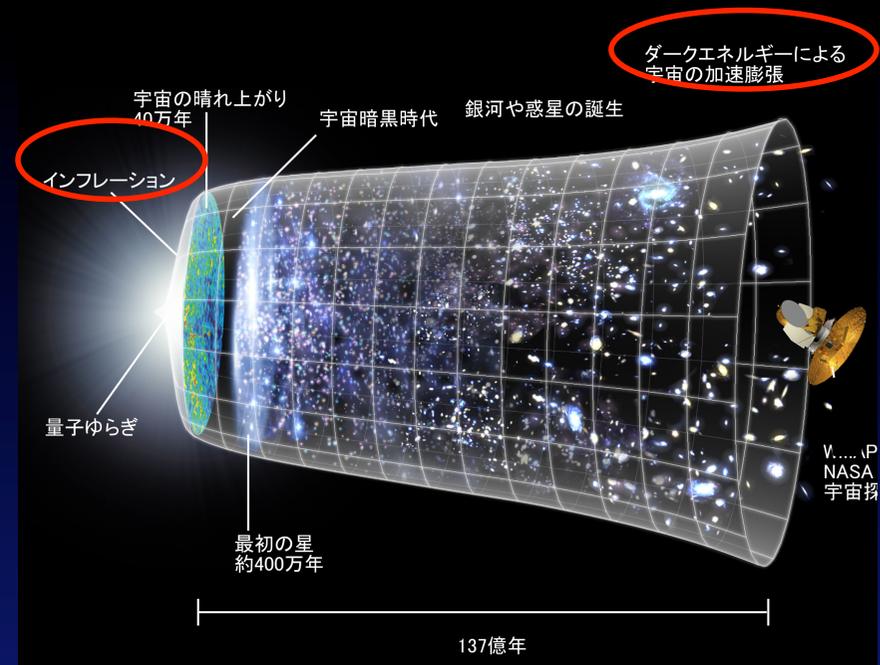
すばる (国立天文台)

# 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



# 宇宙観測と素粒子物理 その他のトピック

- 基本対称性のテスト(重カパリティ、CPTなど) (CMB観測)
  - 新粒子への制限(グラビティーノ、アクシオンなど) (CMB観測)
  - ニュートリノ質量和の制限 (SuMIRe, CMB観測)
  - 非ガウス性 (SuMIRe)
- 加速器実験と相補的
- より広い宇宙観測による素粒子物理
    - 「宇宙物理学と素粒子物理学の相乗的かつ統一的な発展のために」 素粒子と宇宙連絡会 2007年8月21日
    - 「宇宙線分野の将来計画について」 宇宙線研究者会議実行委員会 2011年3月3日
    - 「天文学・宇宙物理学の展望と長期計画」 日本学術会議 記録 2010年3月
  - 推進に関して:
    - 宇宙科学、宇宙線、天文など近隣分野との相互理解を促進し、学問的、技術的連携を強化し、更なる発展をめざす。

「最終答申」で関連分野の活動と連携について記載予定

# 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。

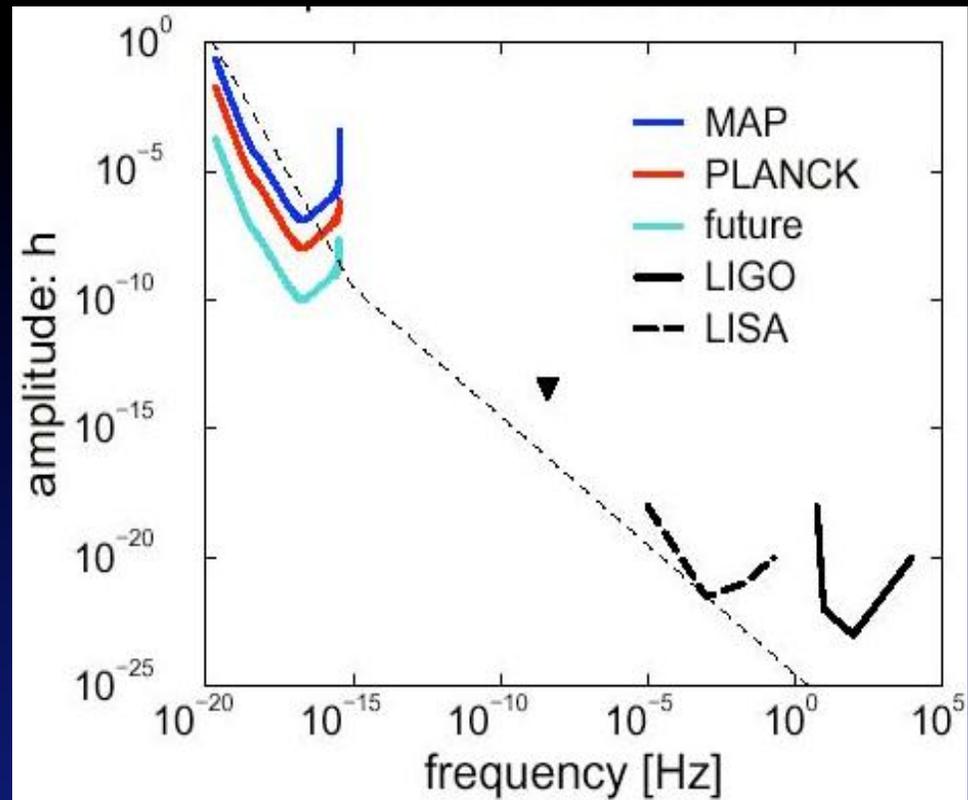
# バックアップ

# 干渉計重力波探索との関係

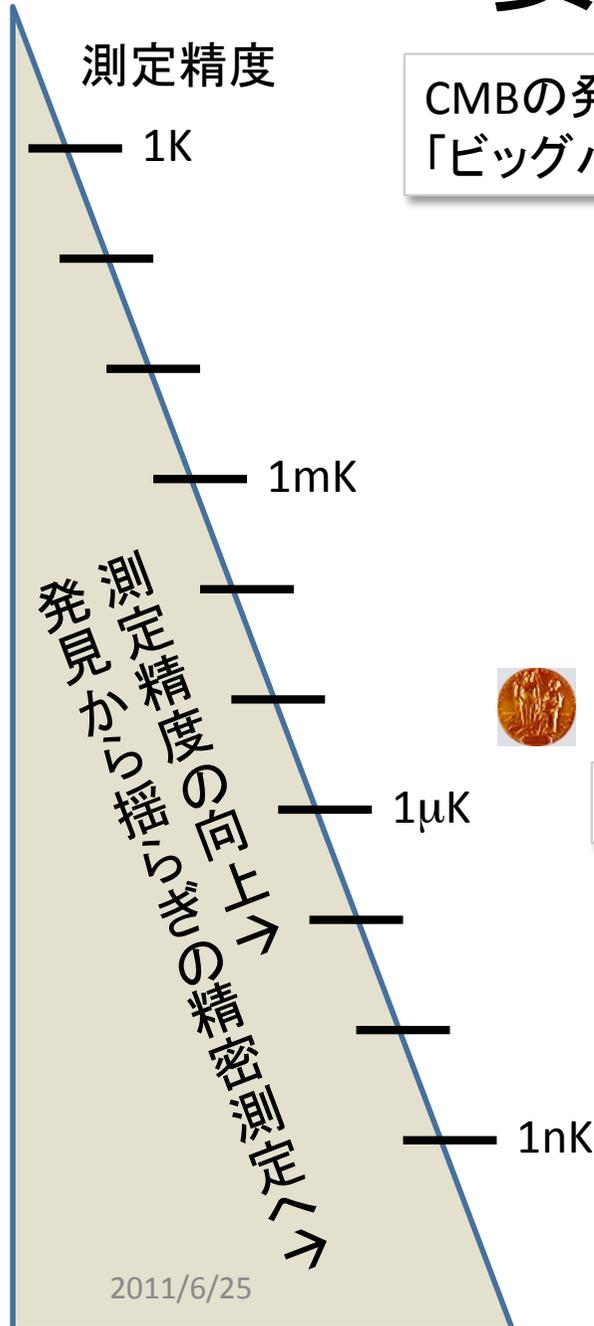
CMBのほうが感度が高いので、原始重力波の発見にはCMB偏光Bモードがベスト。

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。

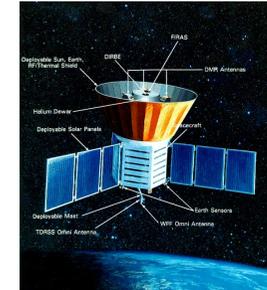
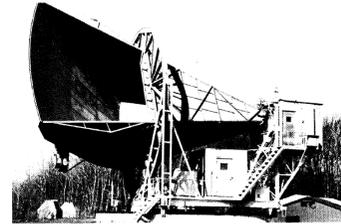
CMB偏光Bモード観測は従来の光学観測と将来の重力波観測との懸け橋となる！



# 要求される観測精度



CMBの発見(ペンジャス、ウィルソン) 1978年ノーベル物理学賞  
「ビッグバンの証拠」



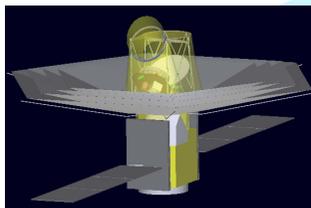
CMB非等方性の発見、プランク分布の証明(マザー、スムート)  
2006年ノーベル物理学賞  
「インフレーション宇宙を示唆、時空の量子揺らぎの証拠」



WMAP, PLANCK : 解像度の向上 → 宇宙年齢、ダークエネルギー



QUIET,  
POLARBEAR  
(チリの高山に設置)



LiteBIRD  
(日本が主導)

CMB偏光揺らぎ精密測定  
による原始重力波の検出  
→ **ビッグバン以前**に放出  
された信号の検出  
→ インフレーション宇宙の  
直接検証

2011/6/25

高エネルギー物理将来計画検討小委員会タウンミーティング(東京大学) 羽澄昌史(KEK)

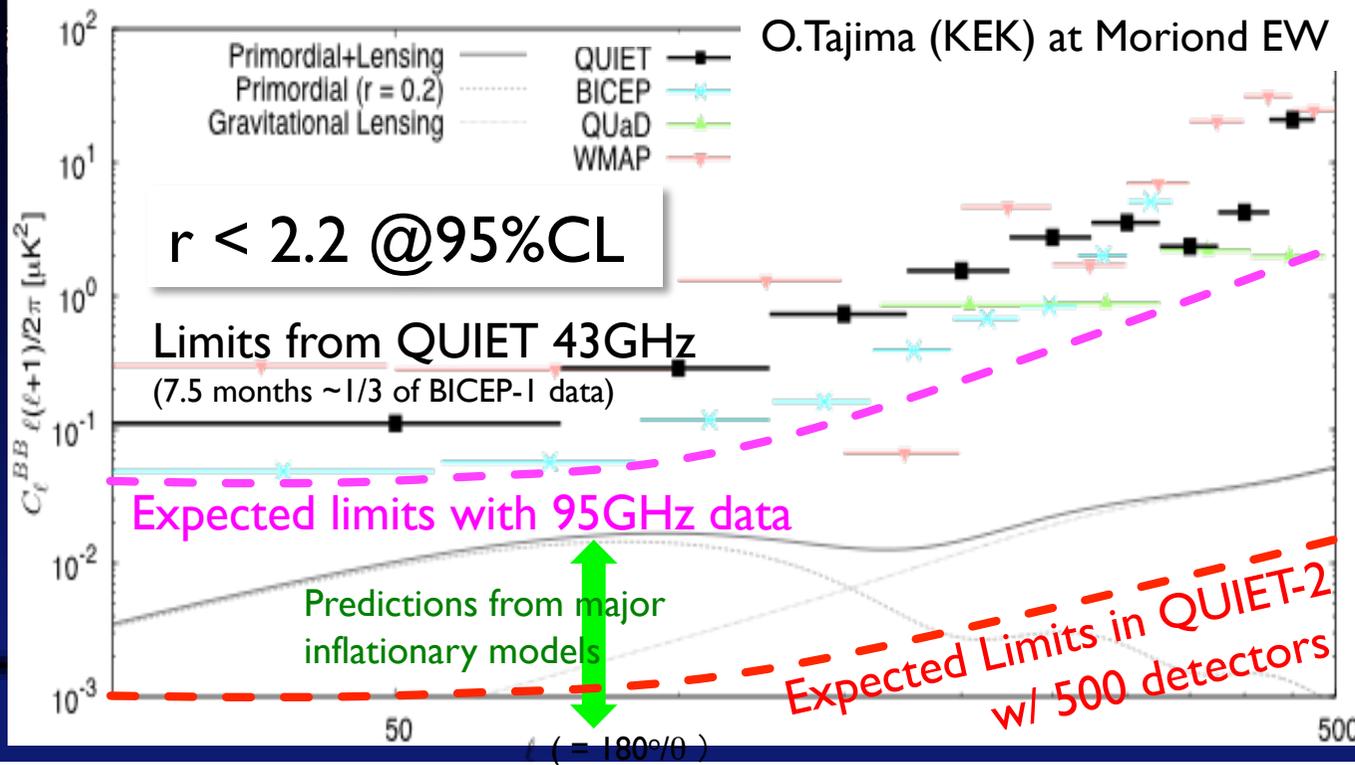
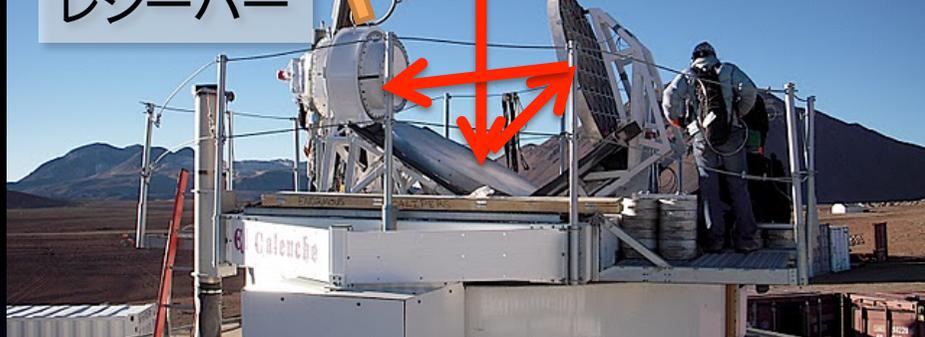
# QUIET初期 観測結果

[arXiv:1012.3191]

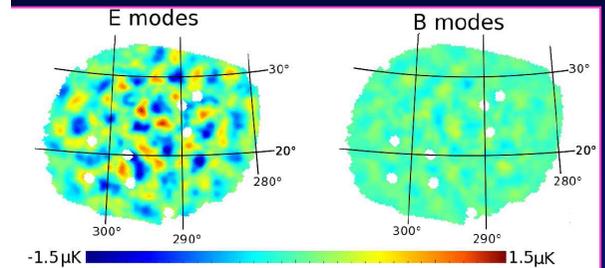


レシーバー

CMB



偏光マップ



# POLARBEAR

POLARBEAR 1 (2011~)  
150GHz TESボロメータ (1274個)



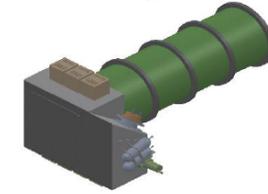
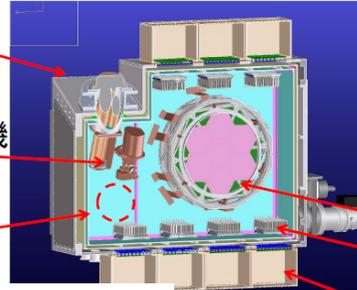
POLARBEAR 2 (2013~)  
150GHz+90GHz TESボロメータ (6076個)

パルス管冷凍機  
(バルブユニット分離型)

ソープシオン冷凍機  
3段 (4He + 3He + 3He)

ADR

KEKが開発を主導

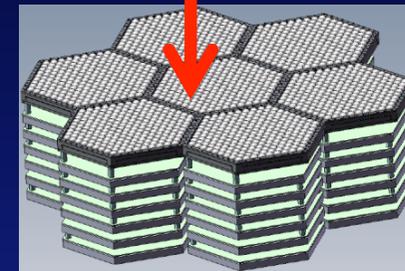
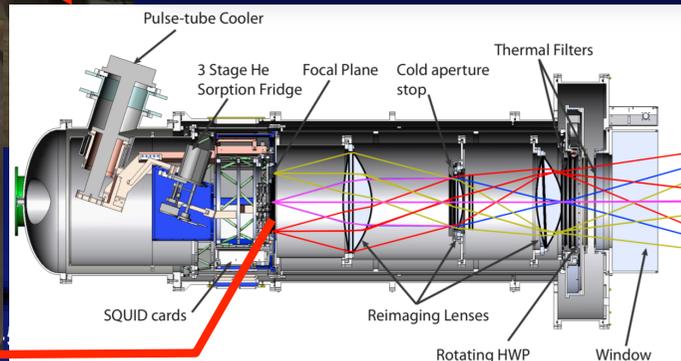


大焦点面: 約φ420mm

SQUID

読み出し回路DfMUX

Berkeley-Cardiff-Colorado-Imperial C.  
-KEK-LAC-LBNL-McGill-UCSD



# LiteBIRD計画

JAXA小型科学衛星ワーキンググループの一つ

(放射シールドは表示していない)

観測視線

半波長板  
(1/fノイズ低減、変調)

4Kの反射光学系  
主鏡、  
副鏡

重量目標: ~400kg  
電力目標: ~500W

100mK  
焦点面超伝導検出器

冷凍機システム  
JT/ST + ADR

軌道:  
LEOとL2を検討中

観測期間: 2年以上

小型衛星標準バス

50名を超えるワーキンググループメンバー  
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

高エネルギー  
物理学

天文学

かつてない規模  
の共同研究

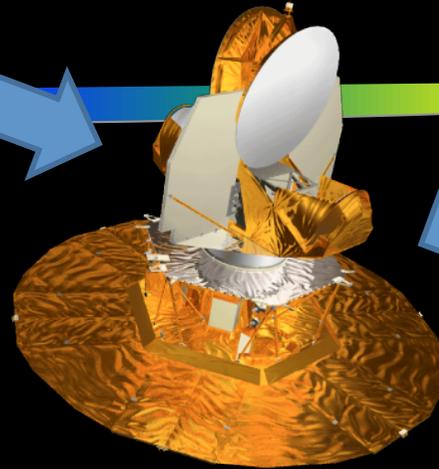
宇宙論  
素粒子論

超伝導  
デバイス工学

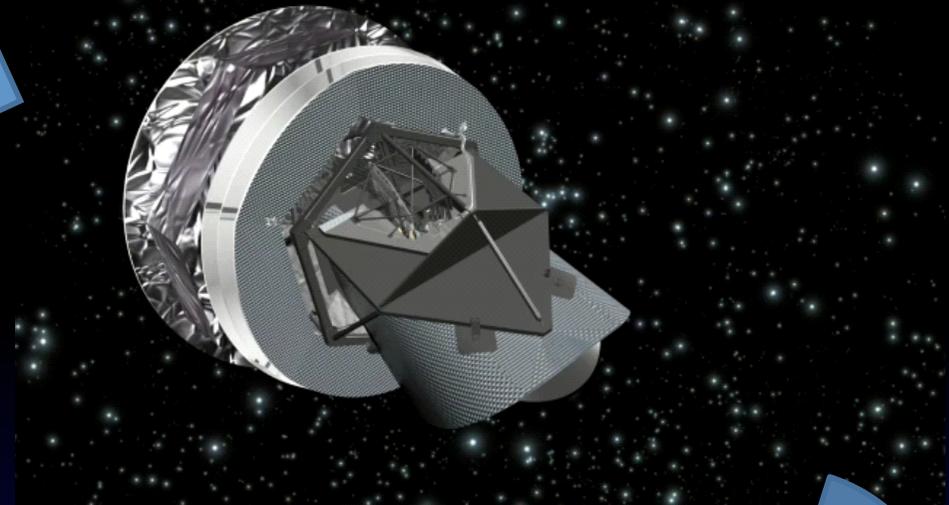
# 衛星観測：国際情勢



**COBE**  
(1989  
—1993)



**WMAP**  
(2001—)



**Planck**  
(2009—)

↑ 温度観測が主目標

↓ 偏光観測が主目標

LiteBIRD (日本) : 小型衛星  
(~2020—) EPIC、PIXIE (米国) : 中・大型衛星  
B-Pol、COre (ヨーロッパ) : 小・中型衛星

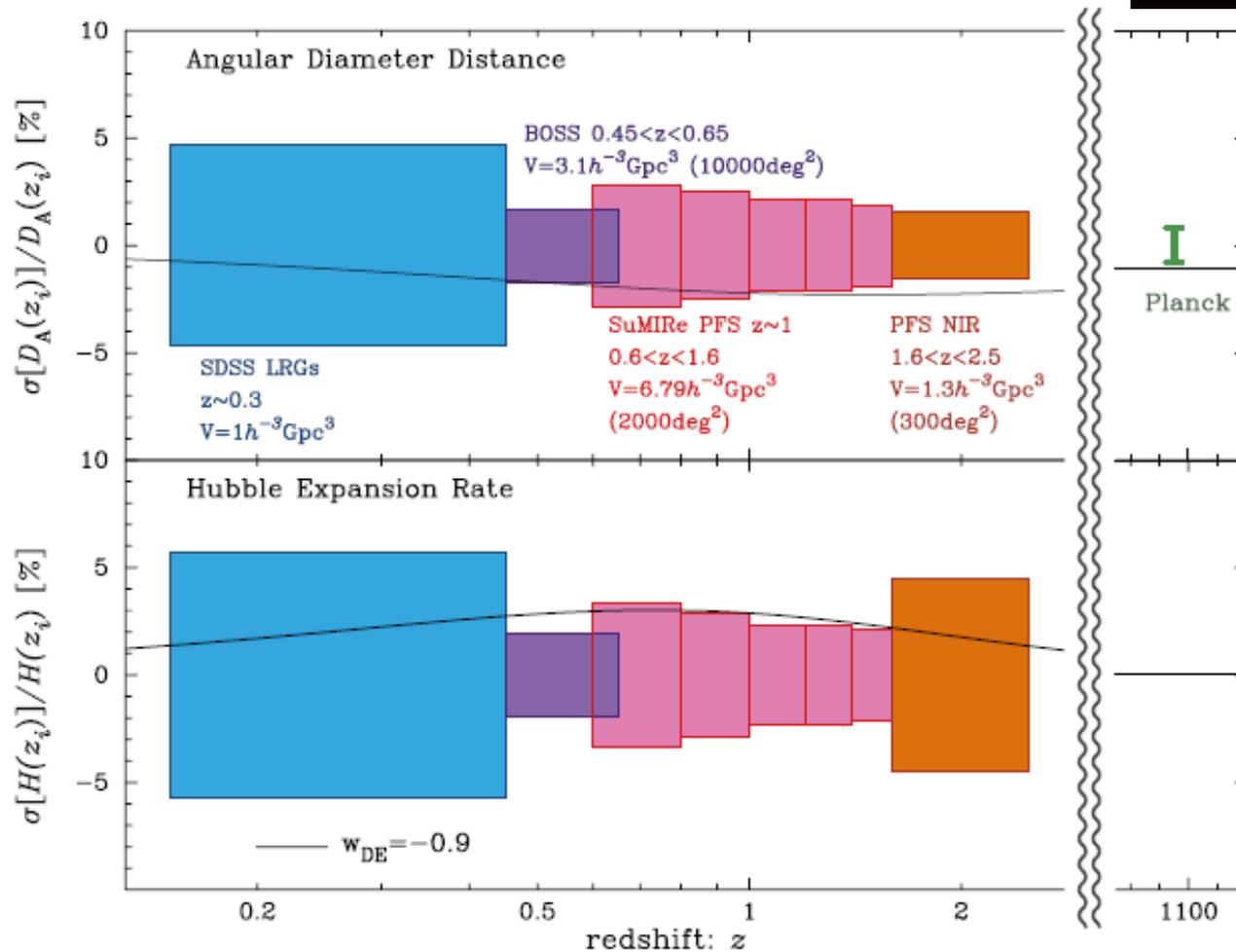


Figure 4.6: Fractional errors in measuring the angular diameter distance and the Hubble expansion rate for each redshift slices for the different BAO surveys, SDSS, BOSS and PFS. For the PFS survey we assumed survey parameters given in Table 4.3. The solid curves in each panel shows the fractional difference of  $D_A(z)$  or  $H(z)$  when changing the dark energy equation of state  $w$  to  $w = -0.9$  from  $w = -1$  ( $\Lambda$ CDM model).

# Multi-purpose

- galaxy formation, evolution, distribution, properties
- impact on high-energy physics
  - map out 3D dark matter distribution
  - neutrino mass  $\sigma(\Sigma m_\nu)=60\text{meV}$
  - test inflation  $\sigma(f_{NL})=5$  ( $\approx$  Planck)

