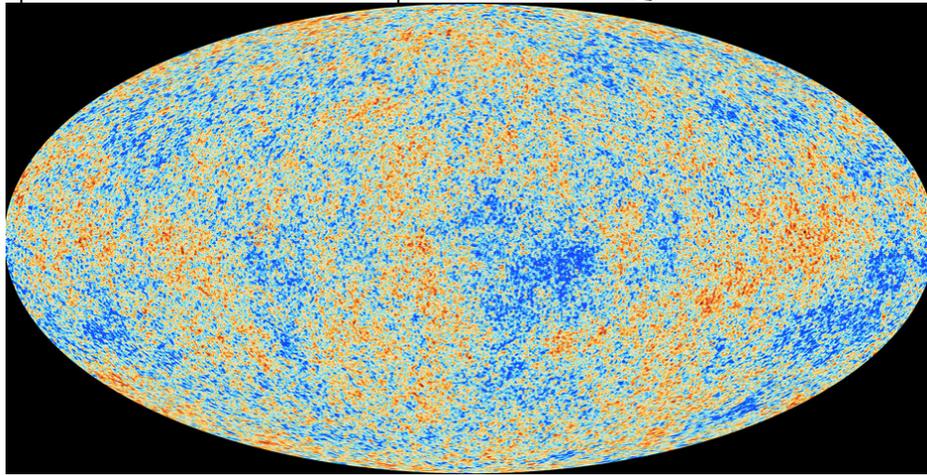


# 宇宙背景放射(CMB) 観測実験の紹介

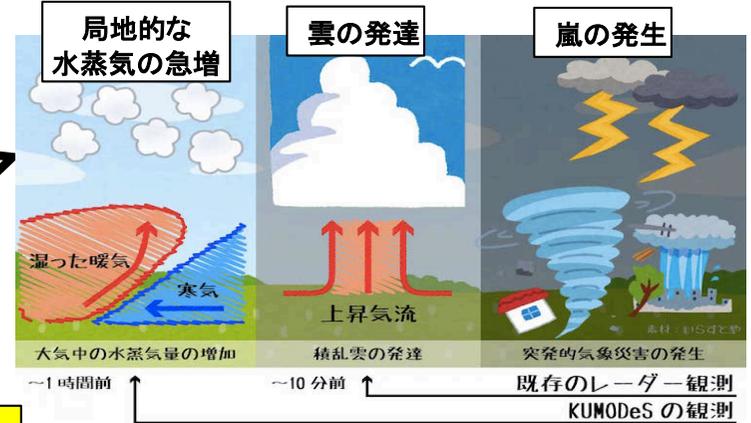
田島 治

# 今やっている観測対象

CMB



スピノフ



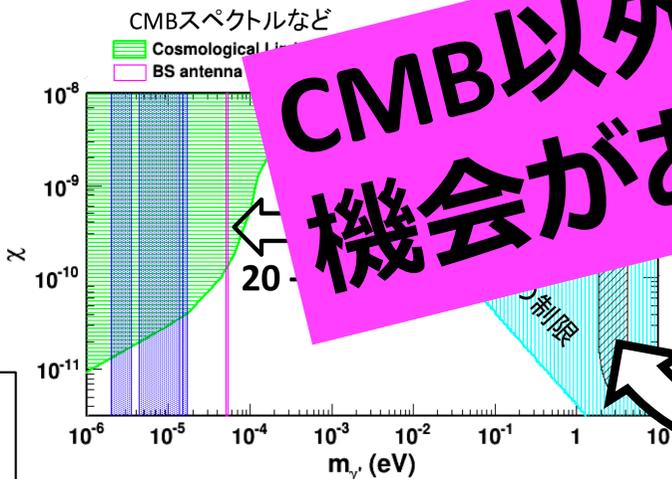
大気観測

気象応用各種デス

宇宙観測

Hidden Photon  
ダークマター

光子・HP結合定数



無線LAN 携帯電話等    ミリ波    赤外線    可視・紫外

観測する転換光子の帯域

CMB以外はいずれ  
機会があったら

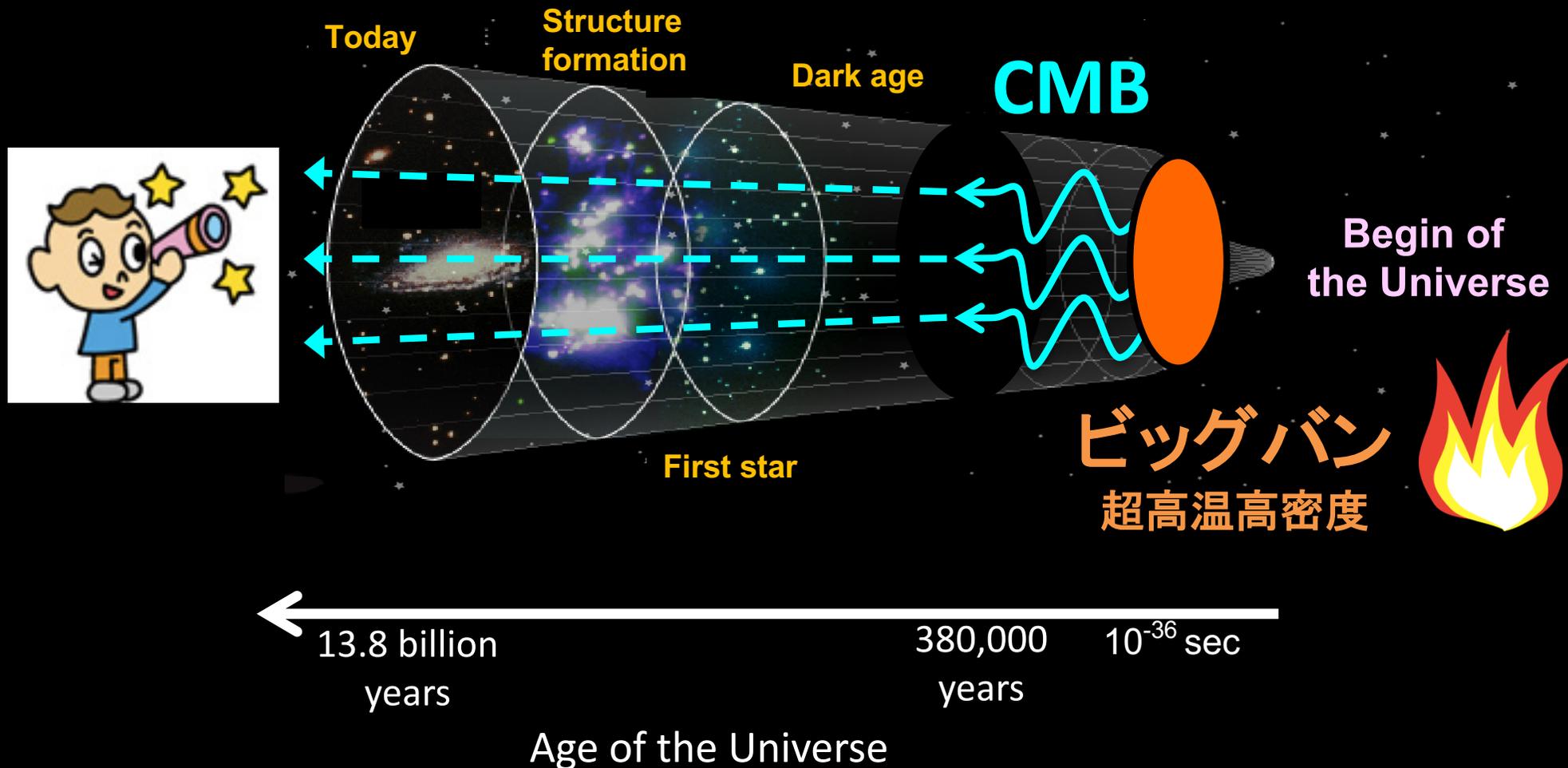
スピノフの  
スピノフ



宇宙マイクロ波  
背景放射

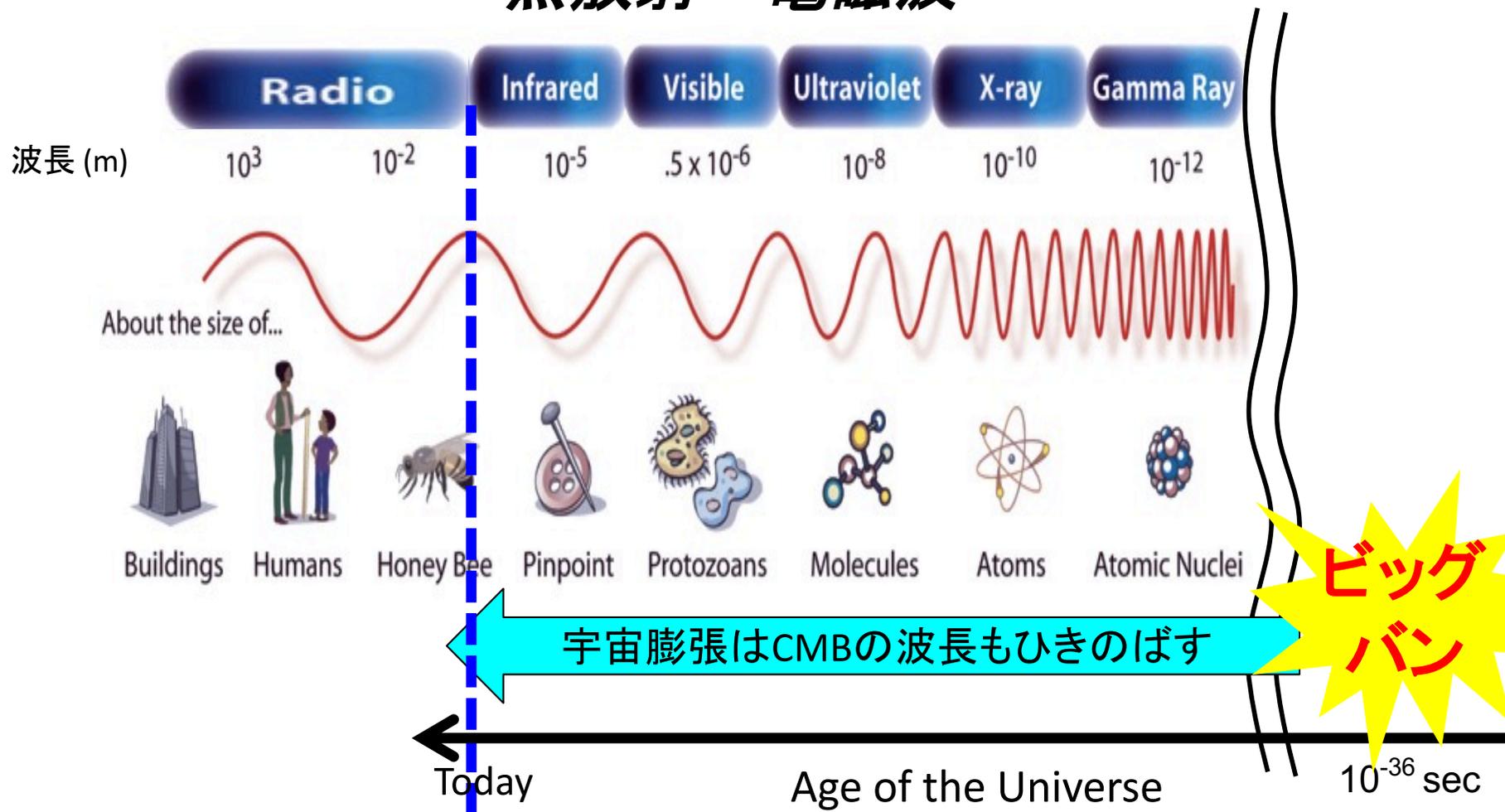
# CMBとは？

## ビッグバン熱放射の残光！

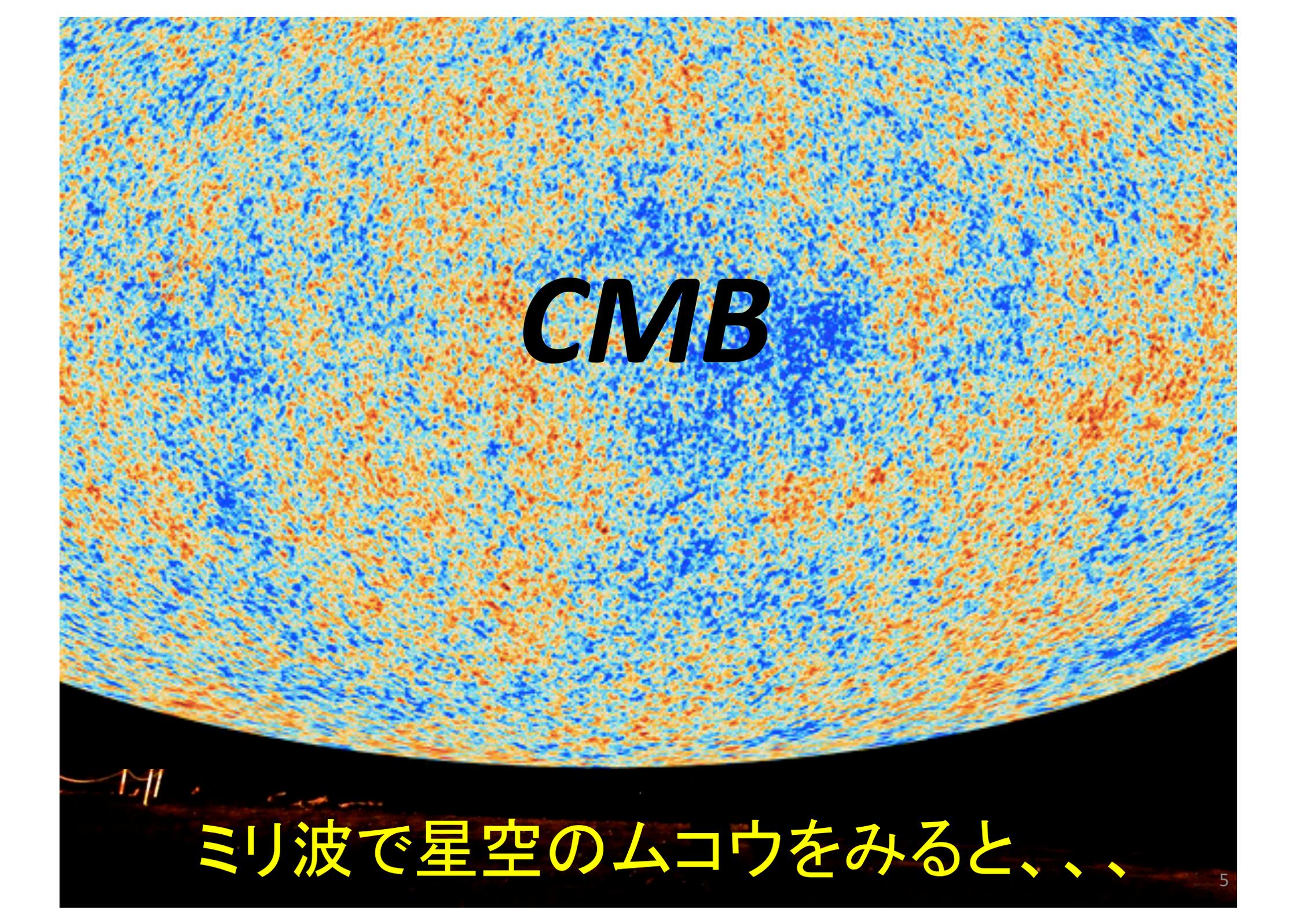


# CMB Today – まだアッチッチ??

熱放射 = 電磁波



わずか2.7 Kの冷たい放射  
⇔ 超微弱の電波(ミリ波)

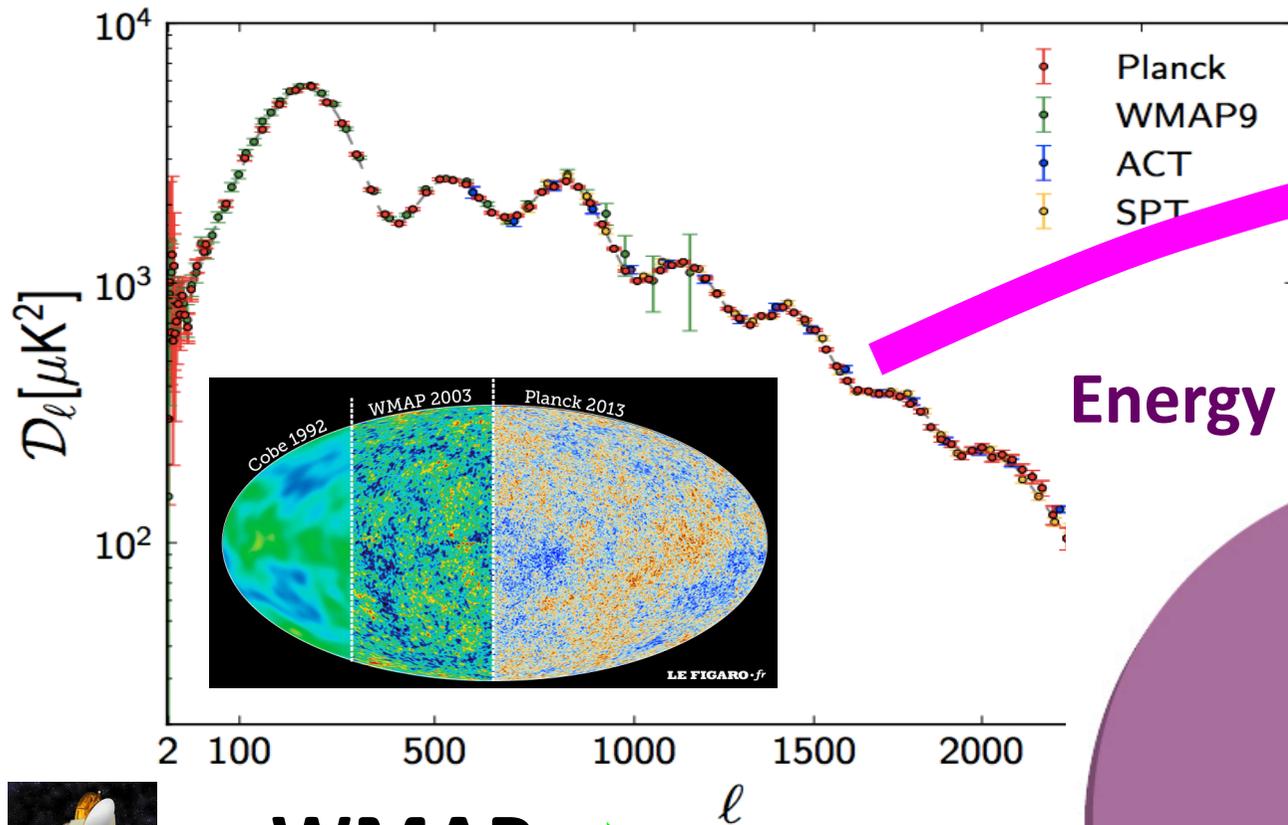


***CMB***

ミリ波で星空のムコウをみると、、、

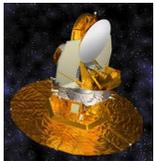
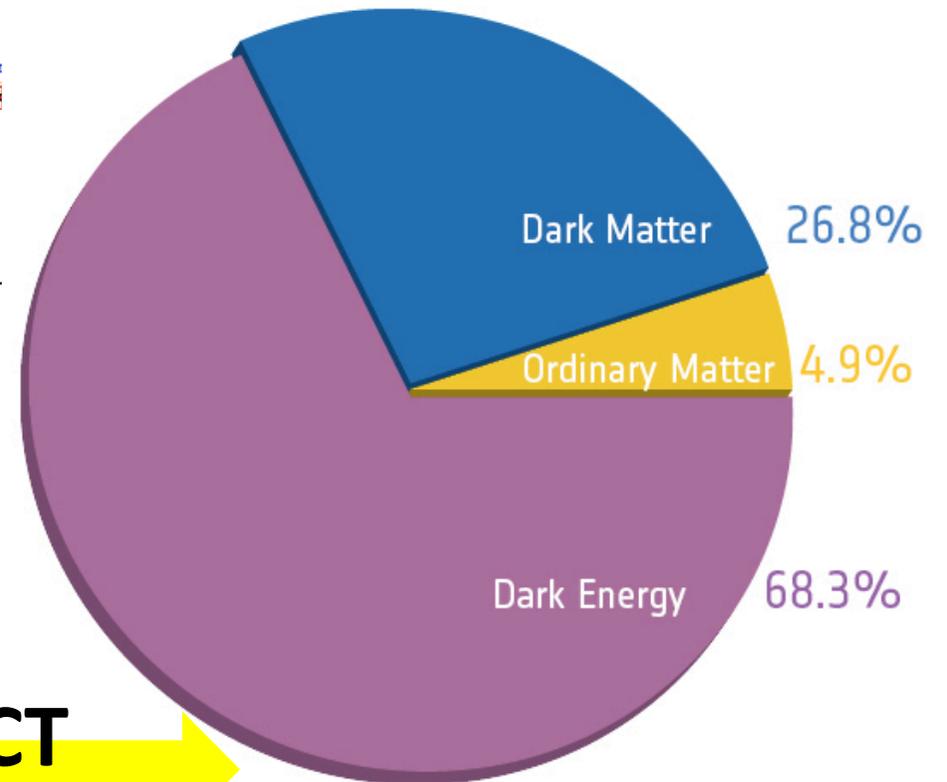
過去20年の  
フロンティア

# 温度ゆらぎ (無偏光ゆらぎ)

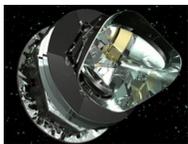


0.001% level of average  
intensity (2.7 K)

## Energy Budget in the Universe



WMAP



Planck

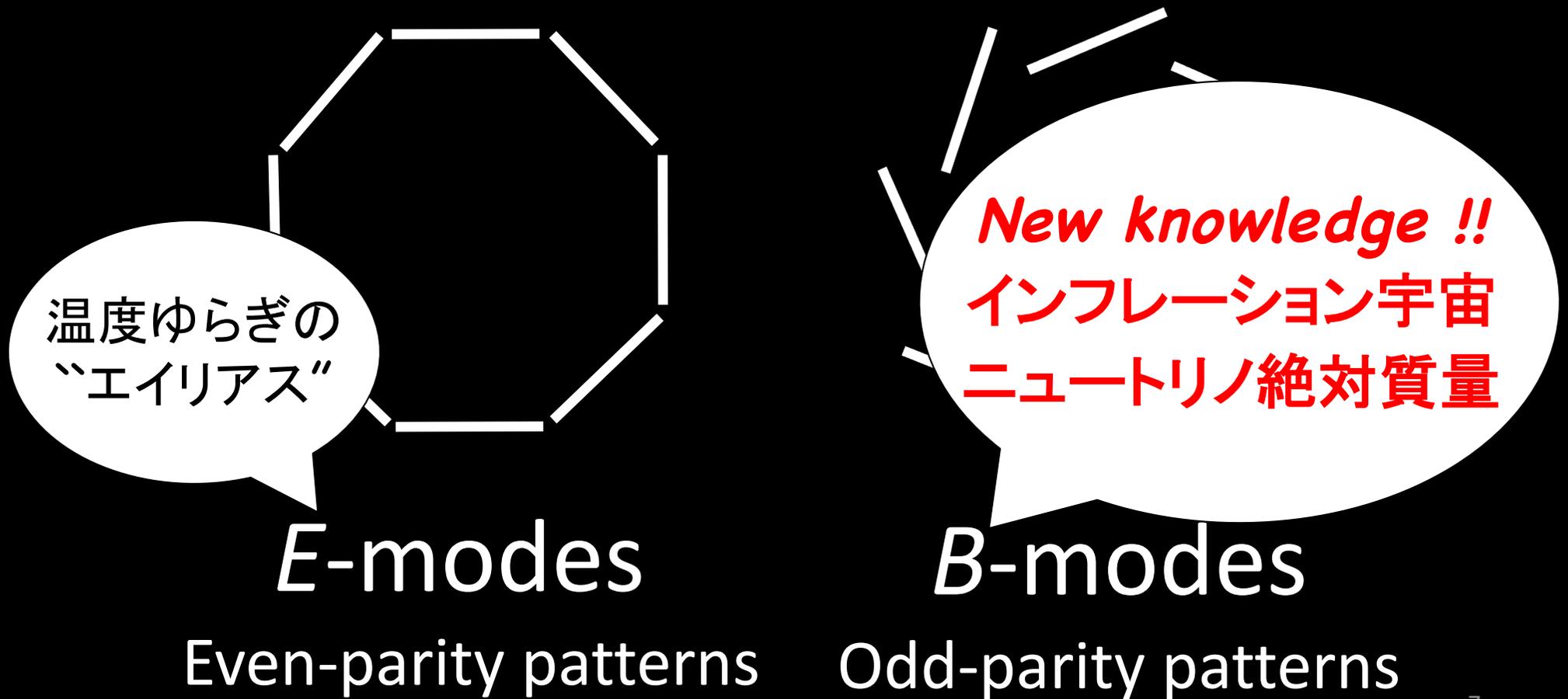


SPT and ACT

(Big ground telescope)

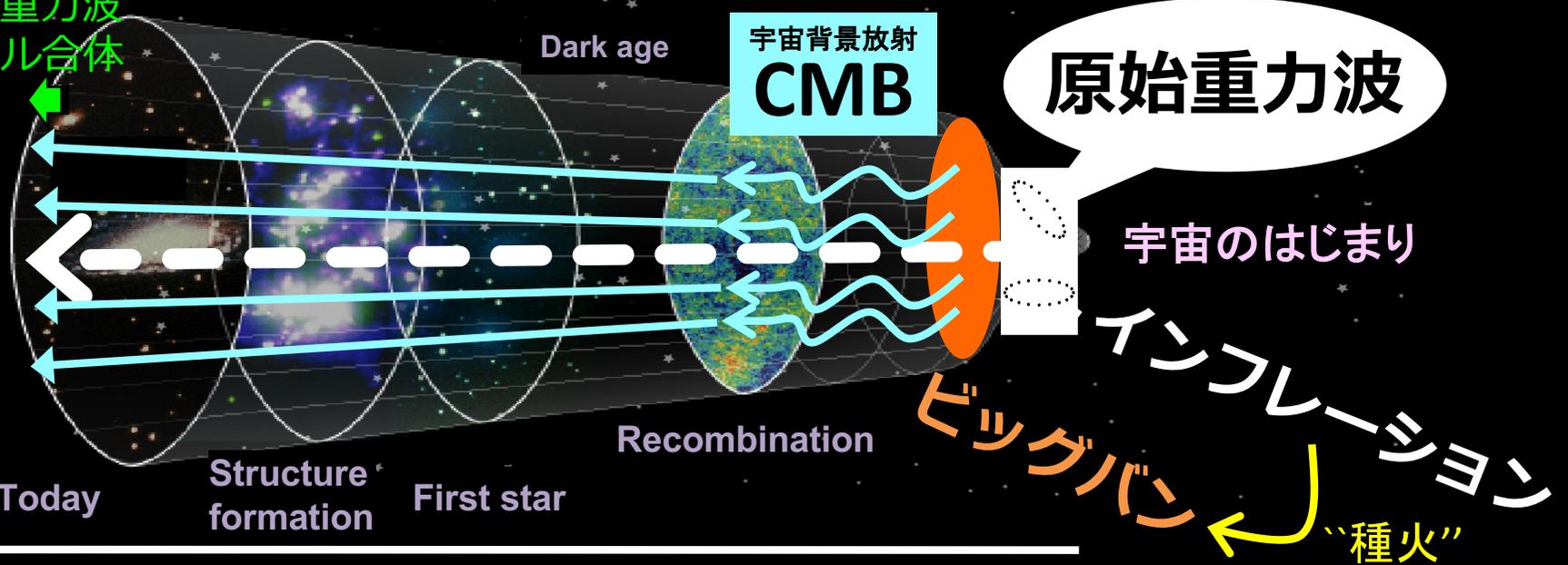


# 今のCMBフロンティアは 偏光パターン観測！



# ビッグバンの種火を観る

LIGOが捉えた重力波  
ブラックホール合体  
はごく最近



原始重力波

宇宙のはじまり

インフレーション  
ビッグバン

宇宙  
年齢

Today

138 億年

Structure  
formation

First star

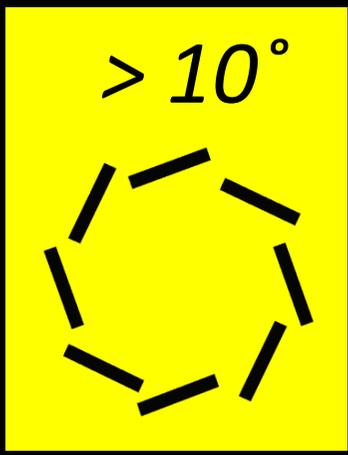
Recombination

38万年

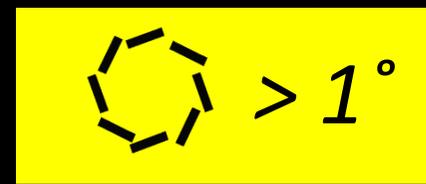
再電離期

晴れ上がり期

CMB・電子散乱  
→ 偏光の生成



原始重力波



月 (0.5°) よりも大きい

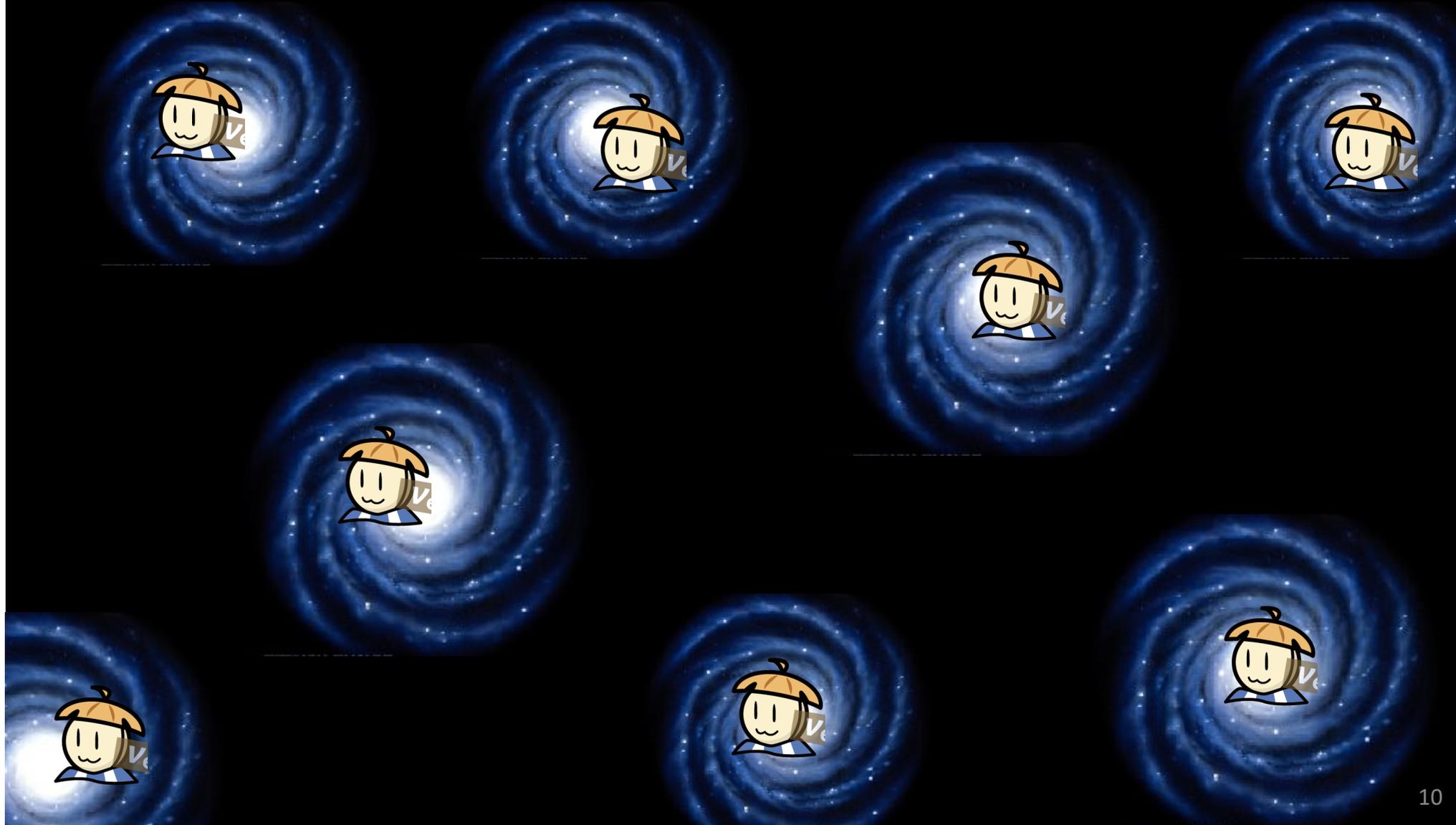
CMB偏光の非対称パターン

「Bモード」で観る

# 原始重力波の検出意義

- **インフレーションの決定的証拠**
  - ⇔ 究極の宇宙観測
- **そのポテンシャルエネルギーが大統一理論スケール ( $\approx 10^{16}$  GeV)**
  - ⇔ 究極の高エネルギー実験
- **重力が量子化されていた証拠**
  - ⇔ 究極の素粒子物理学

# ニュートリノは質量をもつが、 銀河内に局在しない唯一の粒子



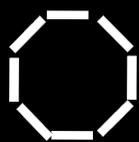
# $\Sigma m_\nu$ が大きいと 重力レンズ効果が小さい

$$\Sigma m_\nu \neq 0$$



# 重カレンズBモードで $\Sigma m_\nu$ を測る

晴れ上がり期  
に生成された  
対称パターン  
Eモード



重カレンズ効果で  
偏光軸がまわる

重カレンズ  
Bモード

$> 0.1^\circ$



月より小さい

$z \sim 1100$   
 $\Leftrightarrow 38$ 万年

(image credit: ESA)

大 重カレンズ 小  
大 Bモード強度 小  
小  $\Sigma m_\nu$  大

now



# $\Sigma m_\nu$ の測定意義

宇宙背景ニュートリノ (CνB) の

◆ **質量和の絶対値** の決定

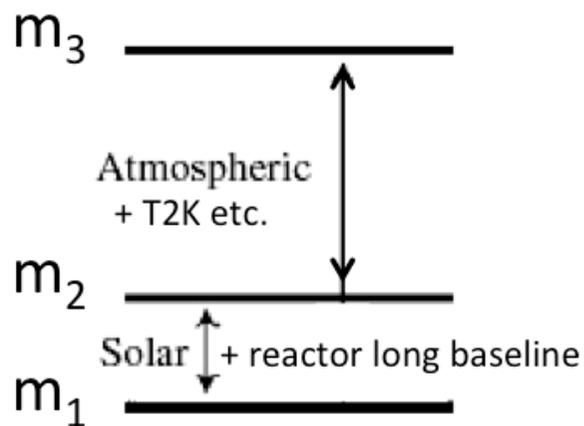
◆ **質量の階層性** の解明手段

京都高エネでやっている

ニュートリノ研究と強いシナジー

# ニュートリノ質量の階層性 に対する質量和測定の意義

## 順階層性

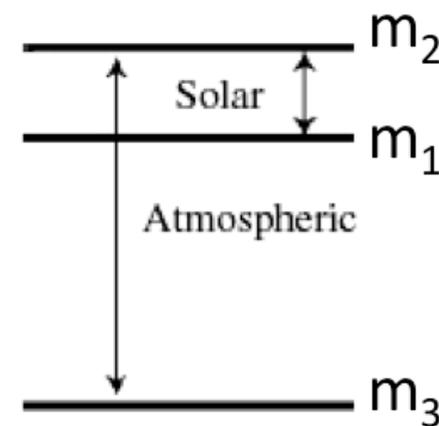


$$\Sigma m_\nu \geq 0.06 \text{ eV}$$

順階層性 ( $m_1 < m_2 < m_3$ ):

$$\Sigma m_\nu > \Delta m_{12} + (\Delta m_{12} + \Delta m_{23})$$

## 逆階層性



$$\Sigma m_\nu \geq 0.1 \text{ eV}$$

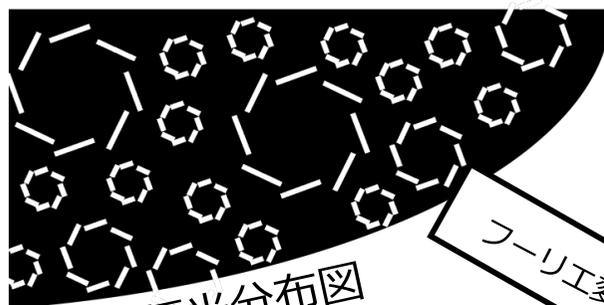
逆階層性 ( $m_3 < m_1 < m_2$ ):

$$\Sigma m_\nu > (\Delta m_{23} - \Delta m_{12}) + \Delta m_{23}$$

$\nu$ 振動  
実験



# 広い角度スケール $O(0.1^\circ) - O(10^\circ)$ にわたる精密観測・分析が大事



偏光分布図  
を観測して

フーリエ変換

**大角度**



**小角度**

パターンの角度スケール

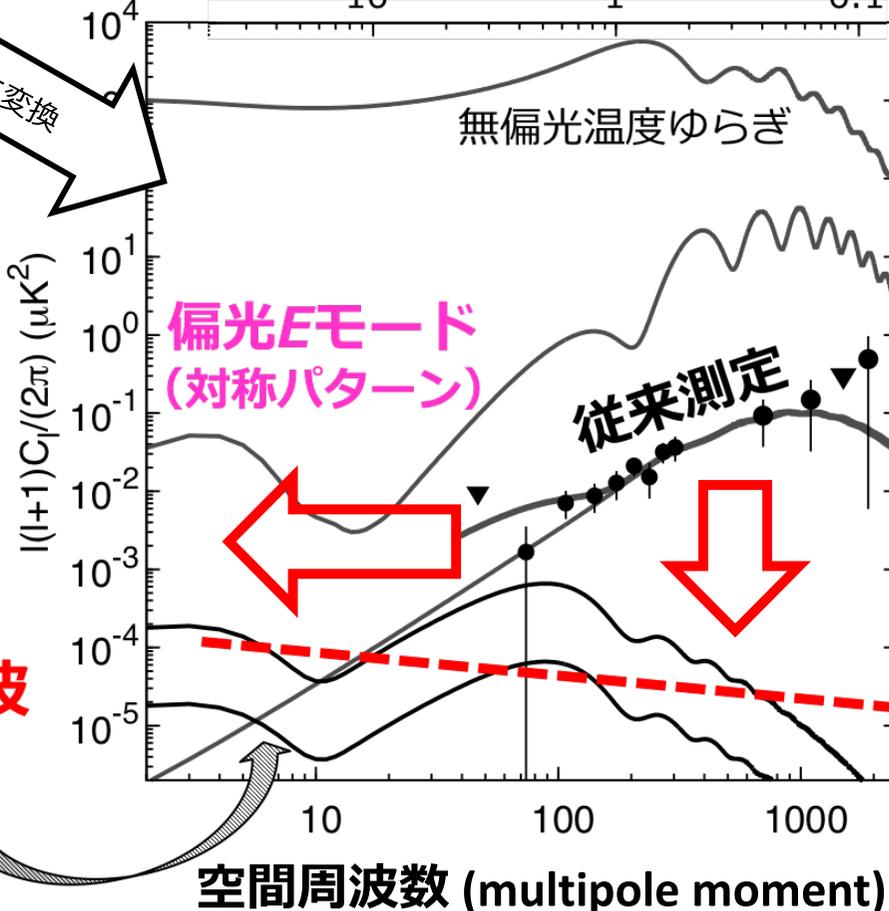
10° 1° 0.1°

大角度のEモード  
測定が系統誤差  
低減のキモ！

$\delta(\Sigma m_\nu)$   
= 0.03 eV

$\delta r = 0.003$   
現上限値の  
およそ1/20

パターン信号強度



重レンズ  
Bモード

今後数年の  
目標感度

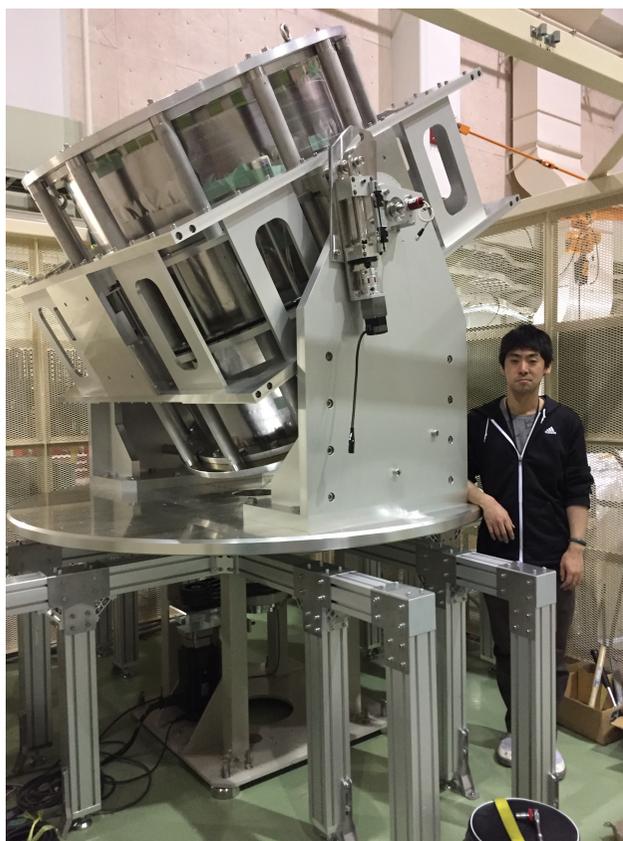
まだ未検出 **原始重力波  
Bモード**

主要理論の  
予言とその下限  
 $r=0.001 \sim 0.01$

# 2 (+1)つの観測プロジェクト

## 日本独自技術！

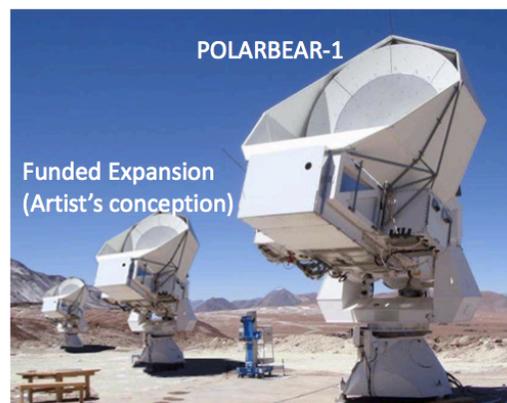
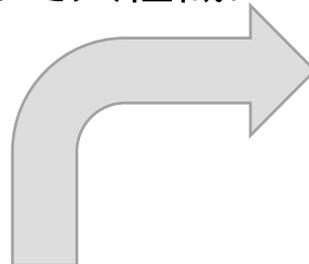
スペイン、韓国、(オランダ)



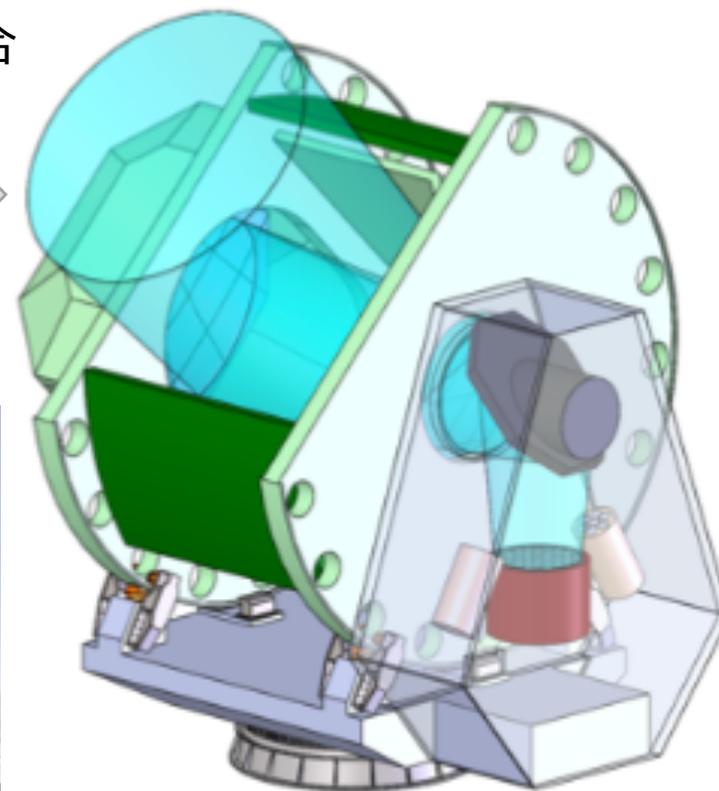
**GroundBIRD (GB)**  
観測 2018 -

## 国際共同プロジェクト (米英チリ)

他有力実験と統合  
して大組織に

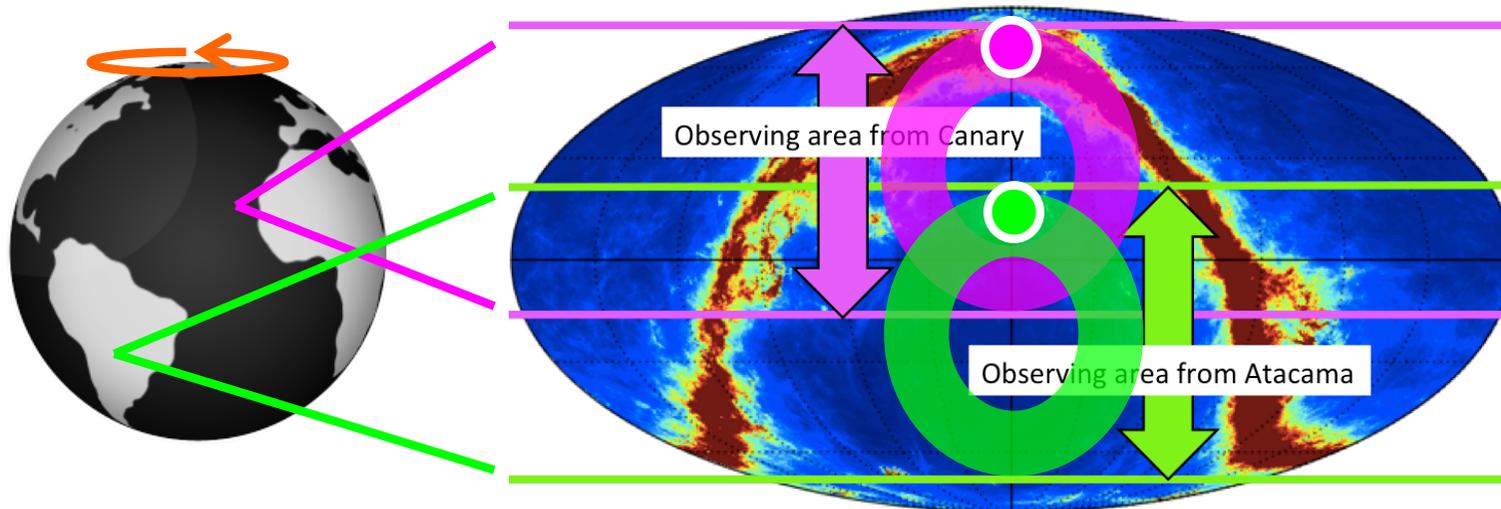


**Simons Array (SA)**  
(upgrade of POLARBEAR)  
観測 2018 -



**Simons Observatory (SO)**  
観測 2020 -

# 北と南から全天観測



**GroundBIRD (GB) 北天観測 FY2017 –**

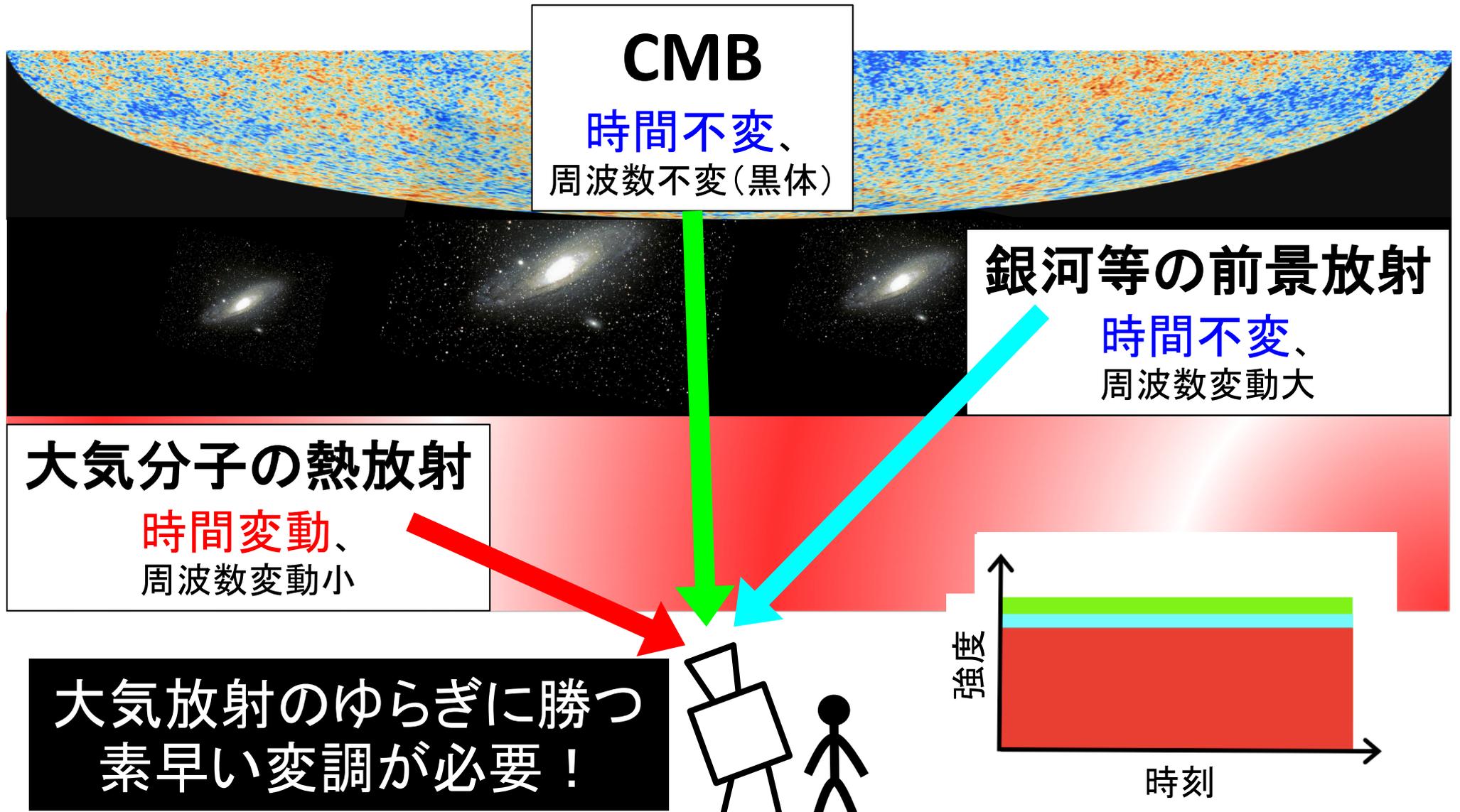
Canary Island (28°N, 2,400 m altitude)

技術移転

**Simons Observatory (SO) 南天観測 FY2020 –**

Atacama, Chile (23°S, 5,200 m altitude)

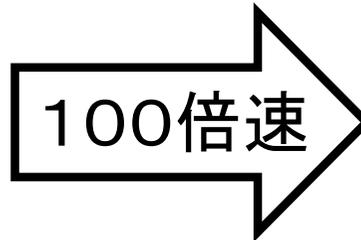
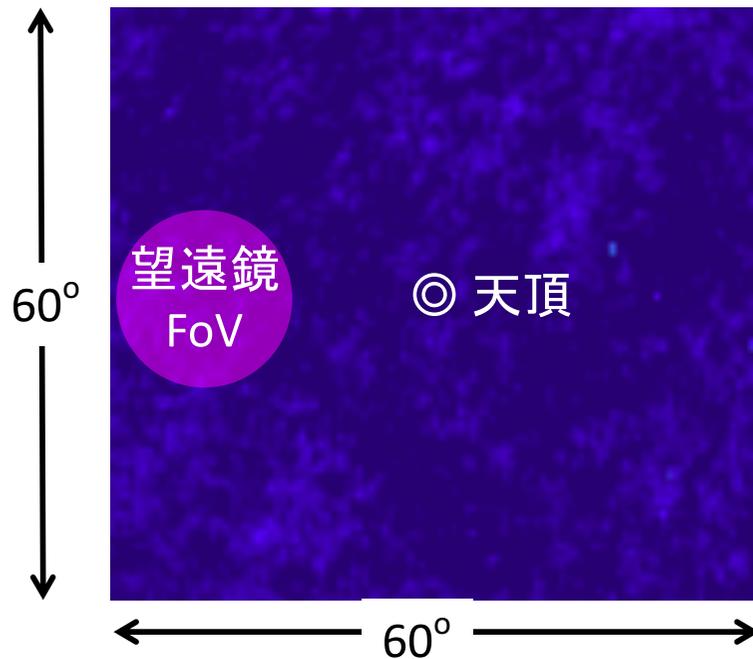
# 広い天域観測の敵



大気放射ゆらぎ

# ベースライン変動(~10秒)に 勝てる変調が必要

Usual left-right azimuth scan  
(≈1 min/scan)



e.g.,  
FOV 20°,  
EL 70°

GB's high-speed rotation  
scan (3 sec/scan)



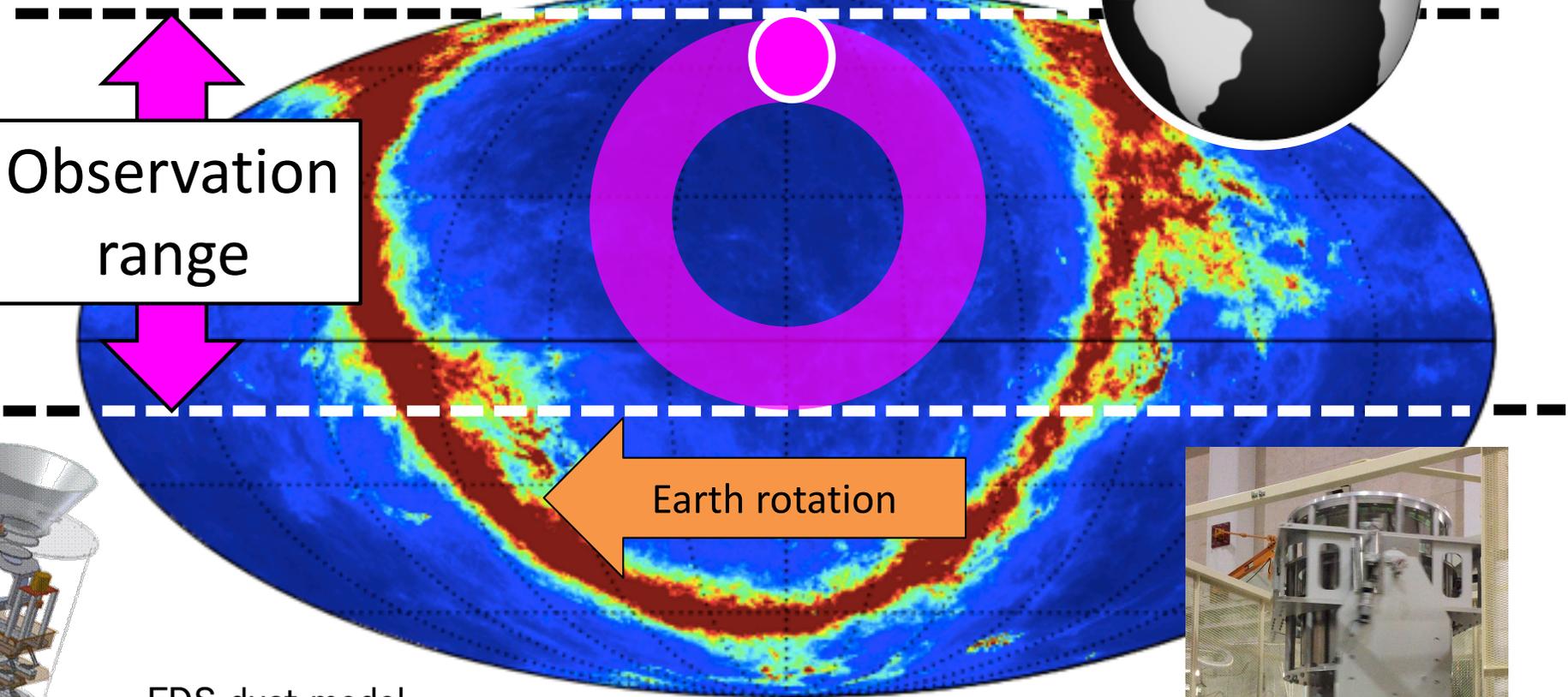
従来のスキャンストラテジー  
変調がゆらぎに負ける 🥲

高速回転スキャンならば...  
変調がゆらぎに勝てる 👍

# 高速回転スキャン＋地球の自転 で全天の1/2に渡る観測を実現

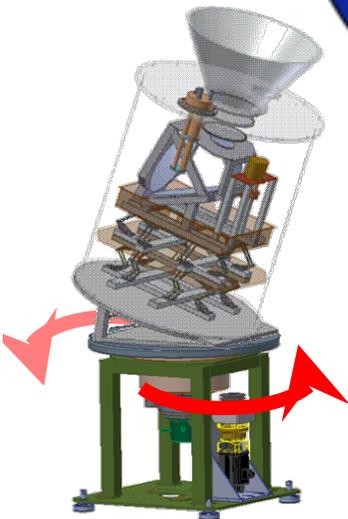
Troidal coverage  
w/ single rotation

$$f_{\text{sky}} \approx 0.5/\text{telescope} > \text{Current ground-based } \times 20$$



Observation  
range

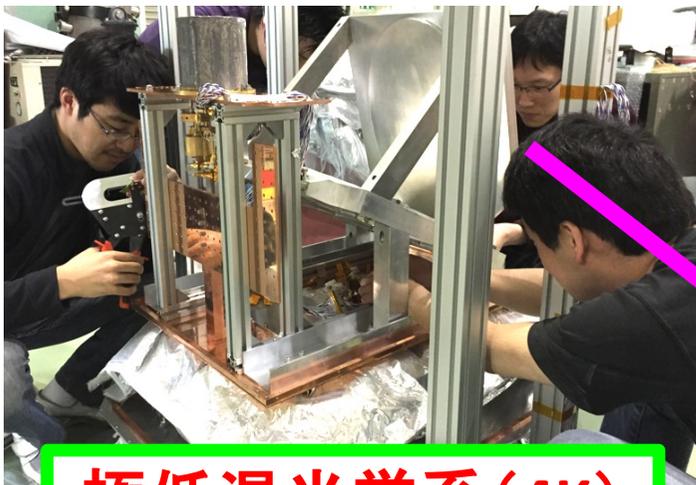
Earth rotation



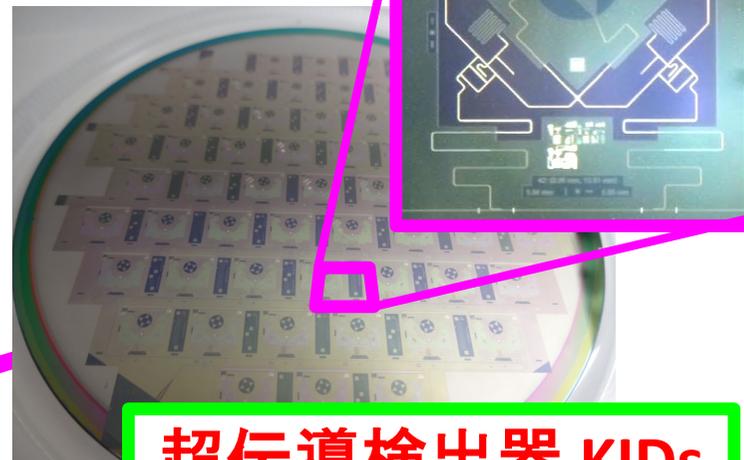
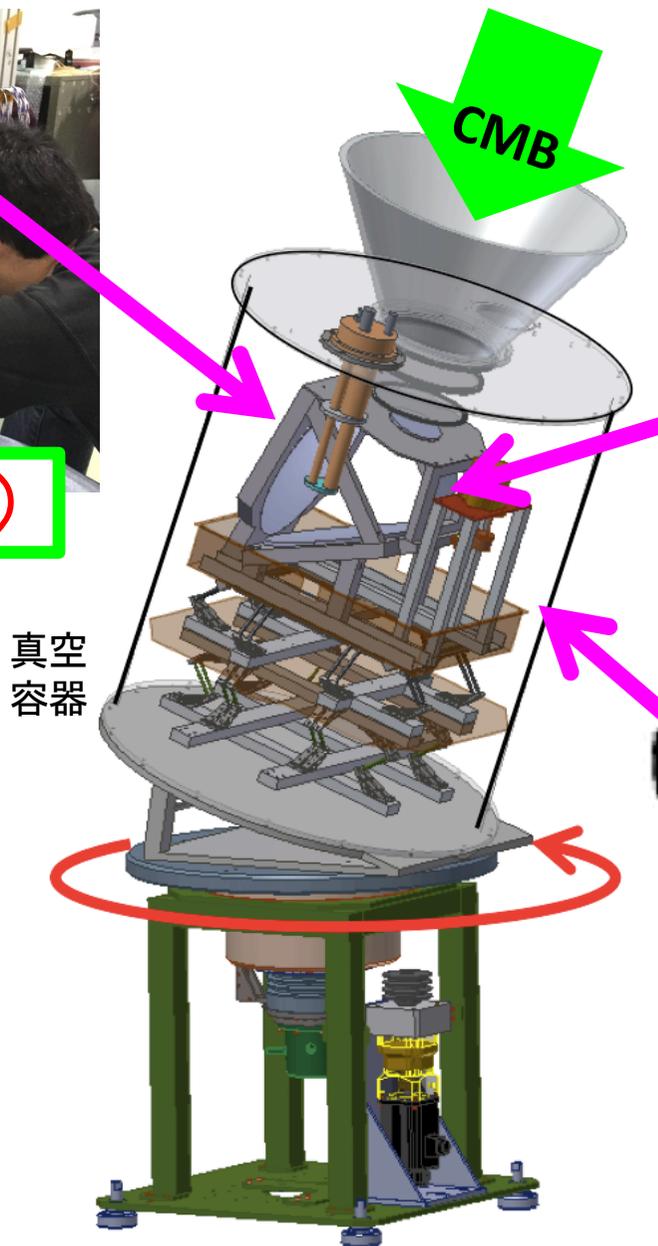
FDS dust model  
@ 94GHz



# 高速スキャンと超伝導検出器を両立！



極低温光学系 (4K)



超伝導検出器 KIDs  
(焦点面 @ 0.25 K)

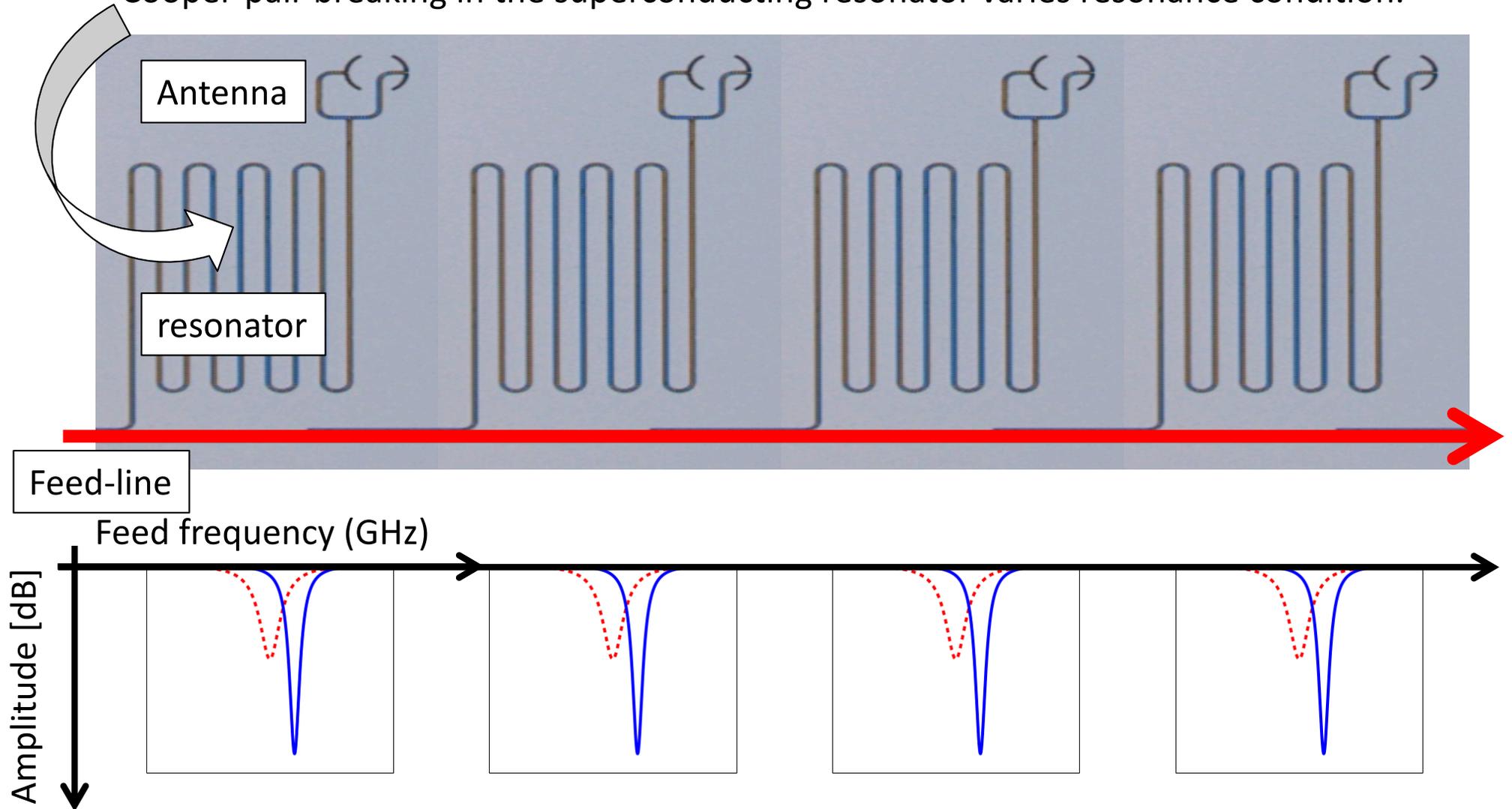


現場の雰囲気



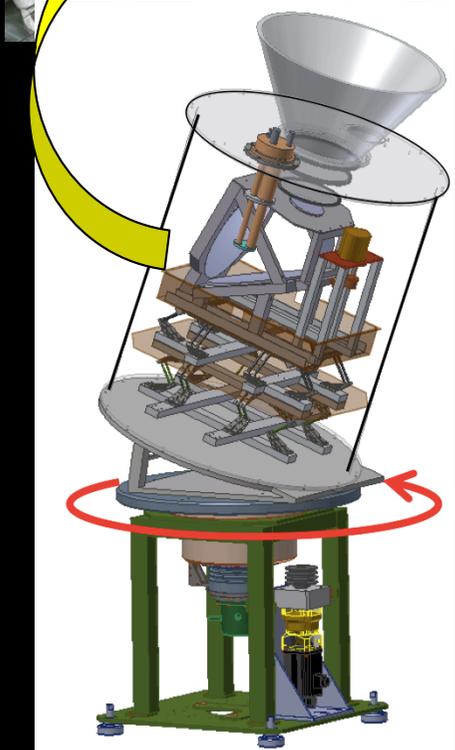
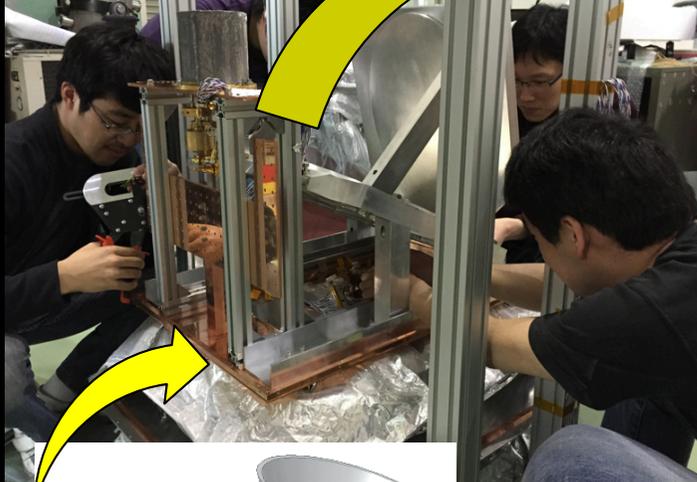
# KIDs : resonator = detector

Cooper-pair breaking in the superconducting resonator varies resonance condition.

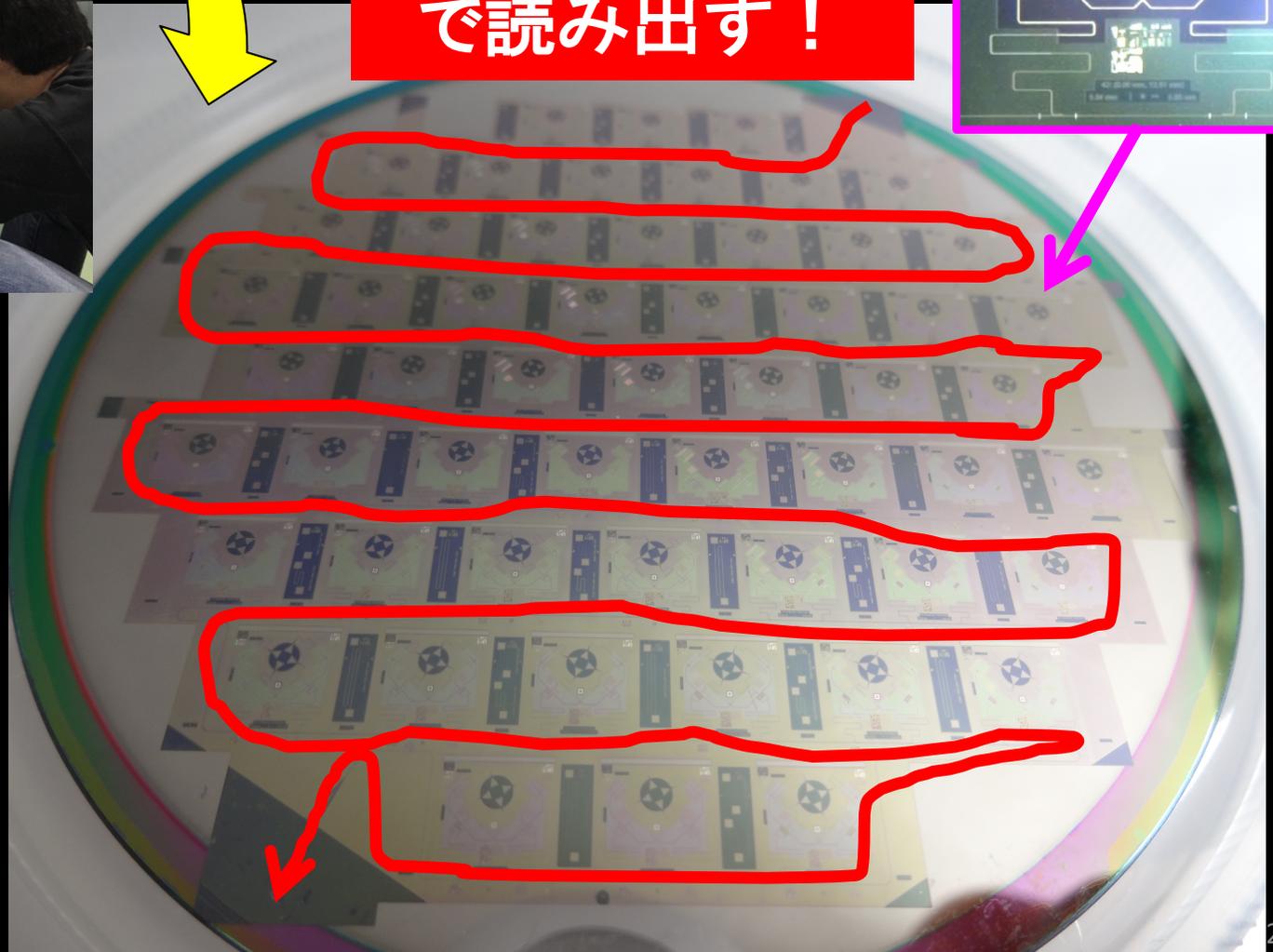
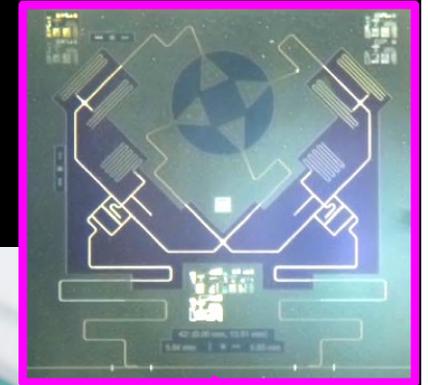


**Natural frequency domain MUX**

# GB's KIDs array, 1<sup>st</sup> prototype



110個の検出器  
信号を配線一対  
で読み出す！

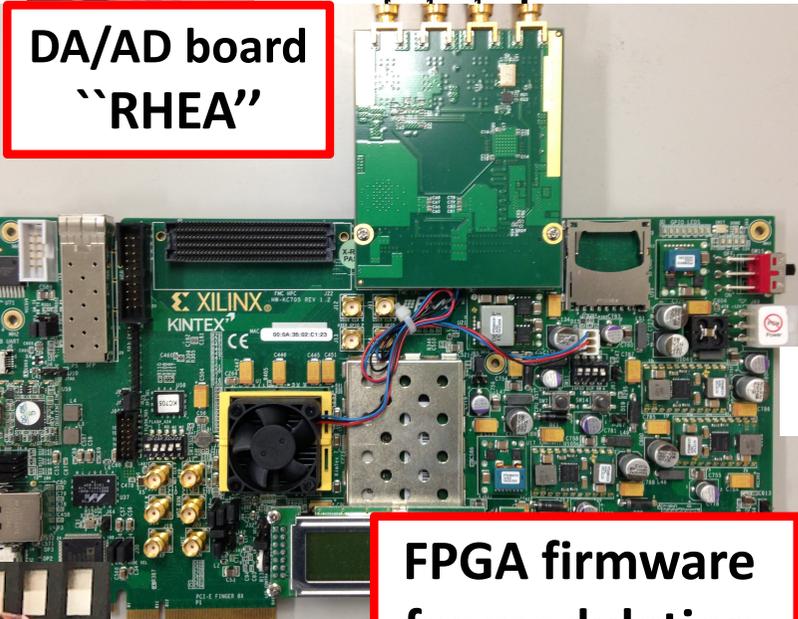


# GB's dead-time less readout system with high multiplex (MUX)

H. Ishitsuka  
and  




Details about "RHEA"  
- H. Ishitsuka *et al.*, J. Low Temp. Phys., 184, Issue 1 (2016).  
- H. Ishitsuka, Master thesis, SOUKENDAI (2015).



DA/AD board  
"RHEA"

DAQ

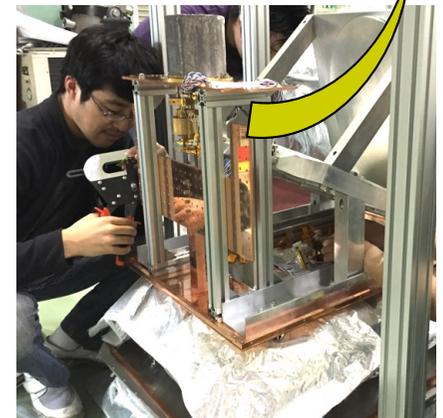
FPGA firmware  
for modulation  
& demodulation



J. Suzuki

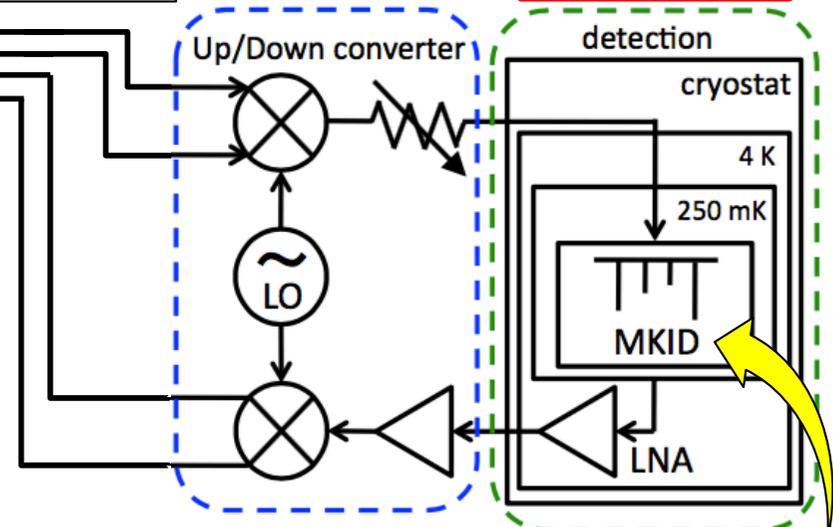


S. Oguri



N. Tomita

Cryogenic  
telescope

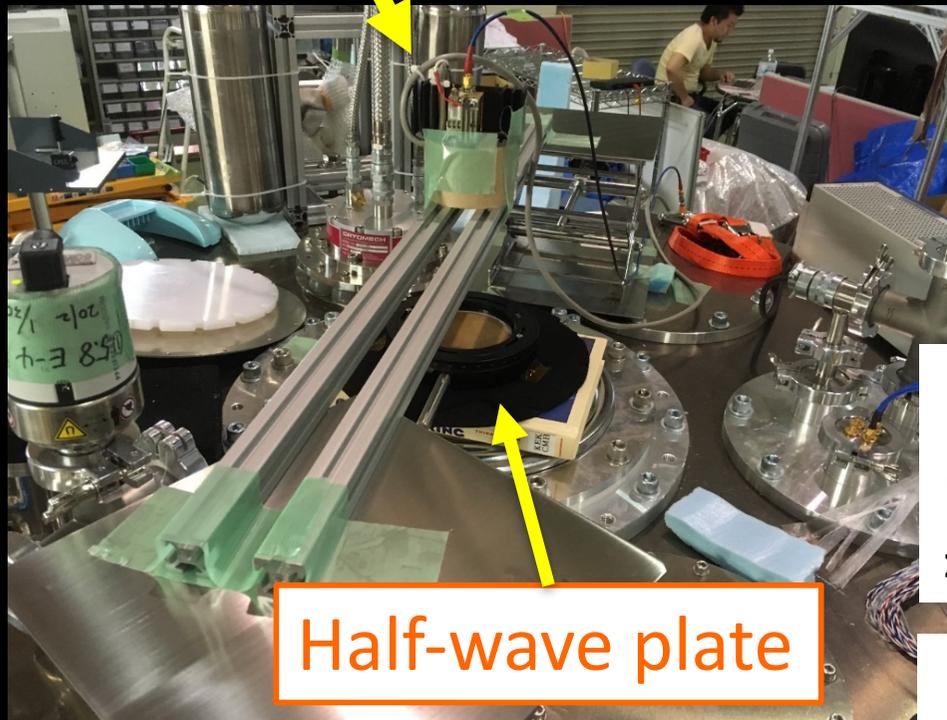


# 偏光信号の初観測！ (in lab.)

*Preliminary*

Frequency multiplier

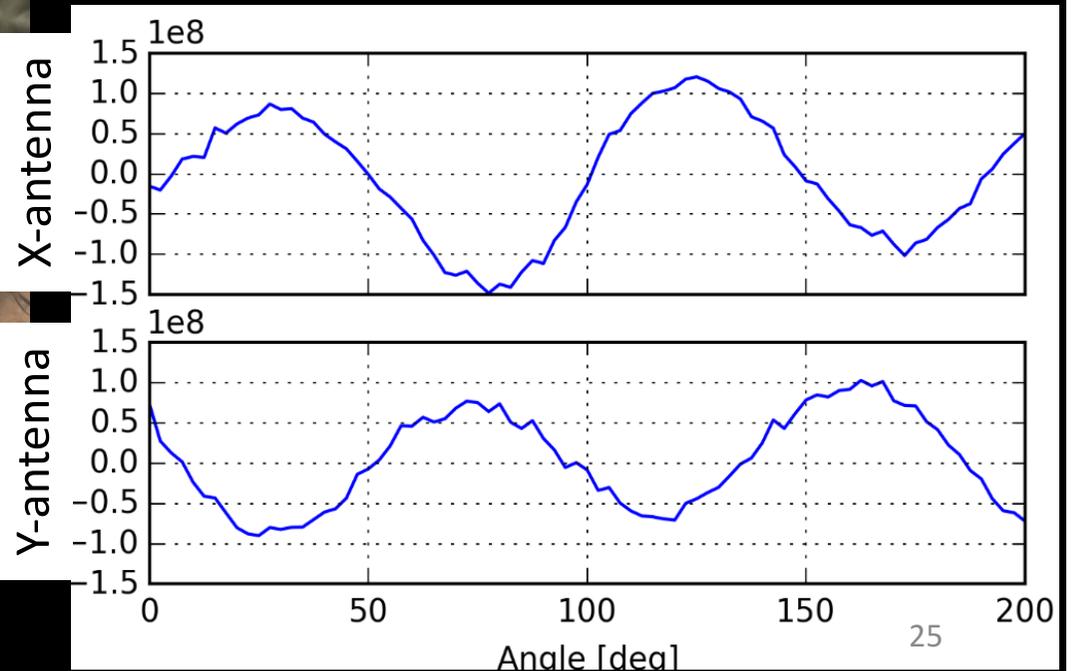
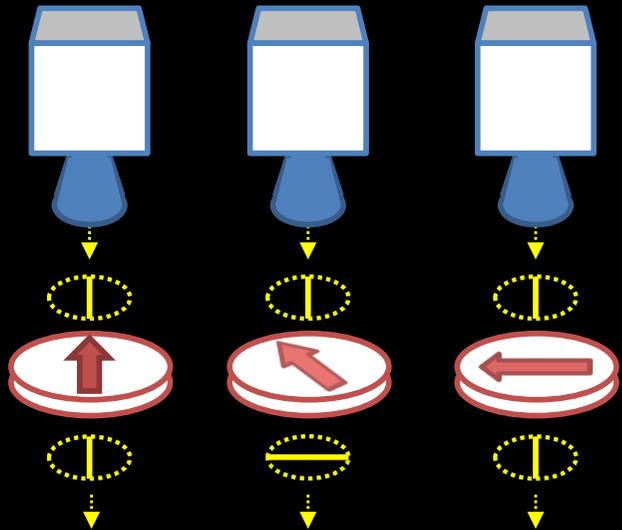
Signal at 150GHz



Half-wave plate

Polarization

Half-wave plate



*$\cos^2 \theta$  responses  
w/ opposite phase !!*

# GBの目標スケジュール

- **課題**
  - (十分な性能で)動く超伝導検出器の開発(理研)
  - 地磁気シールド(東北大M2の学生)
  - 回転構造体のテスト(@KEK)
  - 全部を組み込んだテスト(@KEK)
- (夏頃に)移設練習(KEK内で実験ホール移動)
- 年明けにカナリア諸島に輸送
- 年度末は山の下で研究所でコミッショニング
  - 並行して、雨よけドームのインストール
- 来春に山の上で観測開始

# Simons Observatory (略称SO)

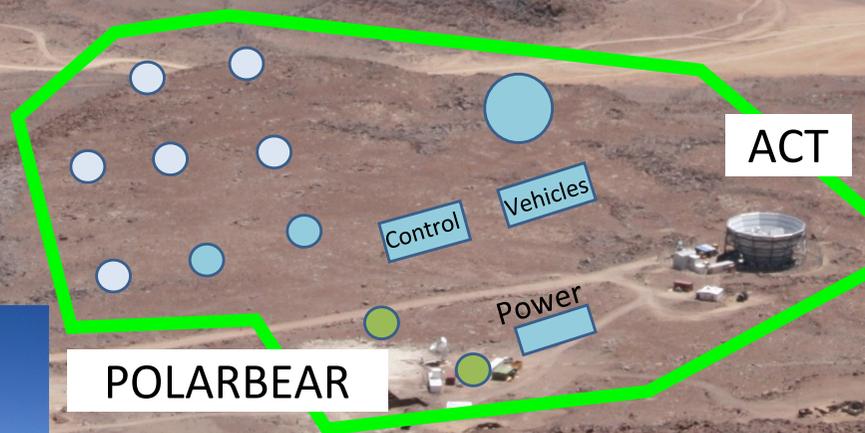
2016年5月に新発足(米国予算\$45M)

ACT と POLARBEAR の統合コラボレーション

チリ・アタカマ高地(海拔5,200m)

望遠鏡`群`で統計を稼ぐ(観測 2020 -)

望遠鏡群  
設置エリア

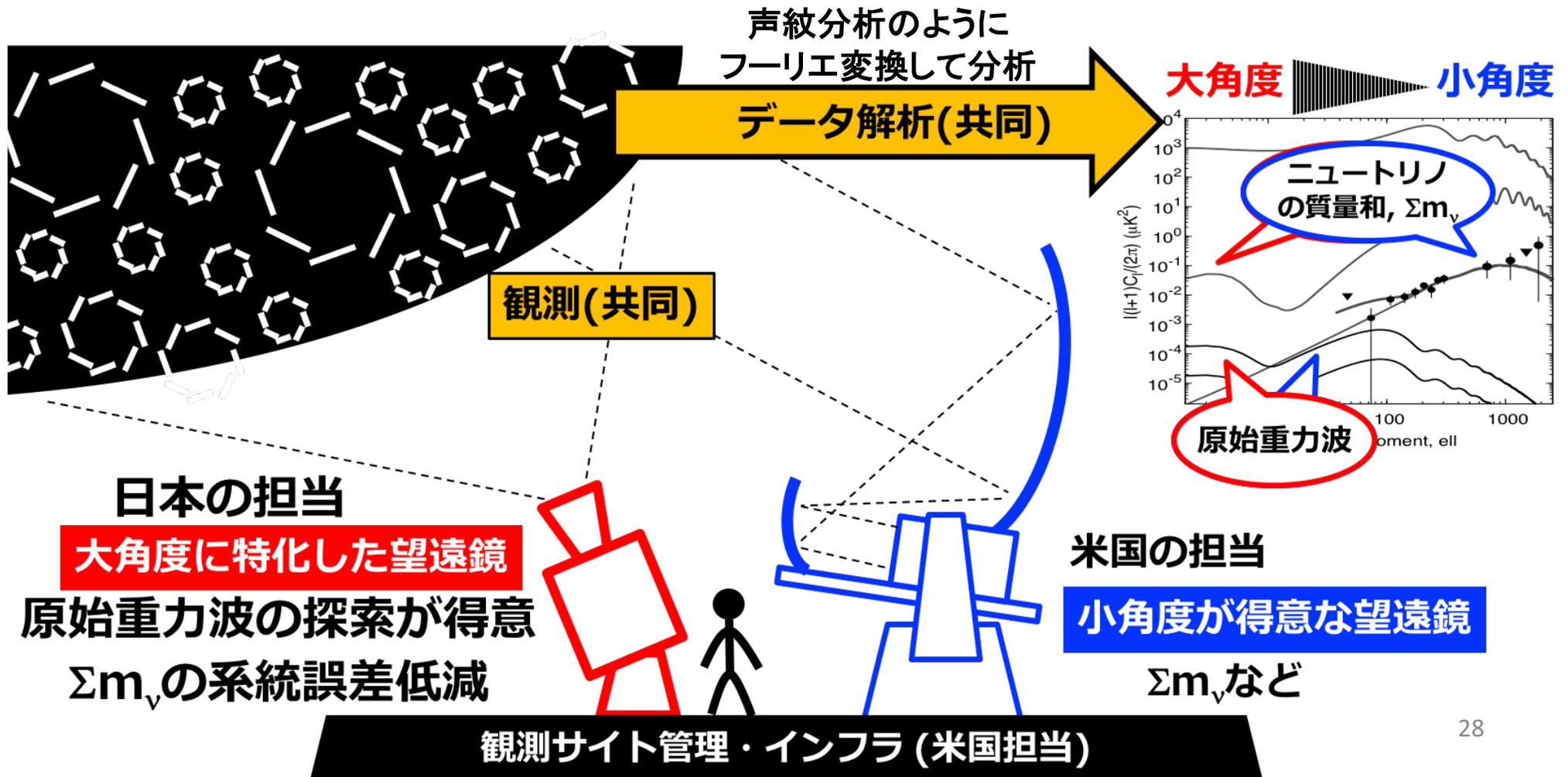


小角度が得意



小角度が得意

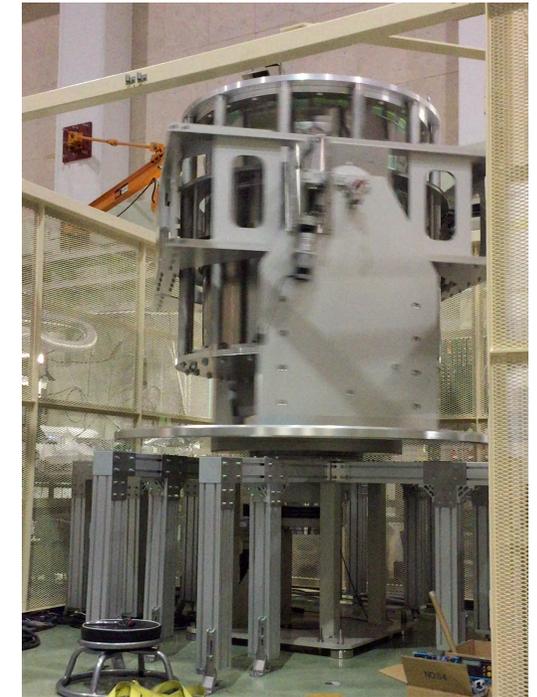
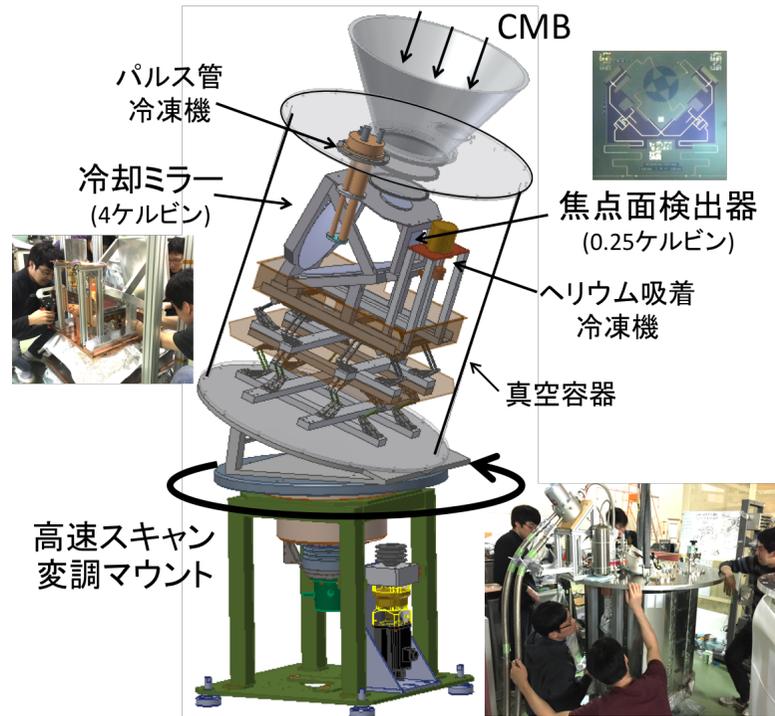
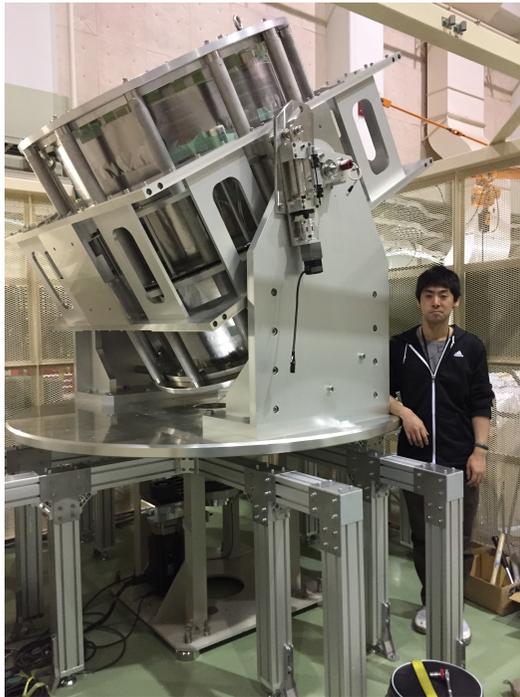
# 国際共同プロジェクトの中での 本課題(大型科研費)の役割



# GBで培った独自性を生かす！

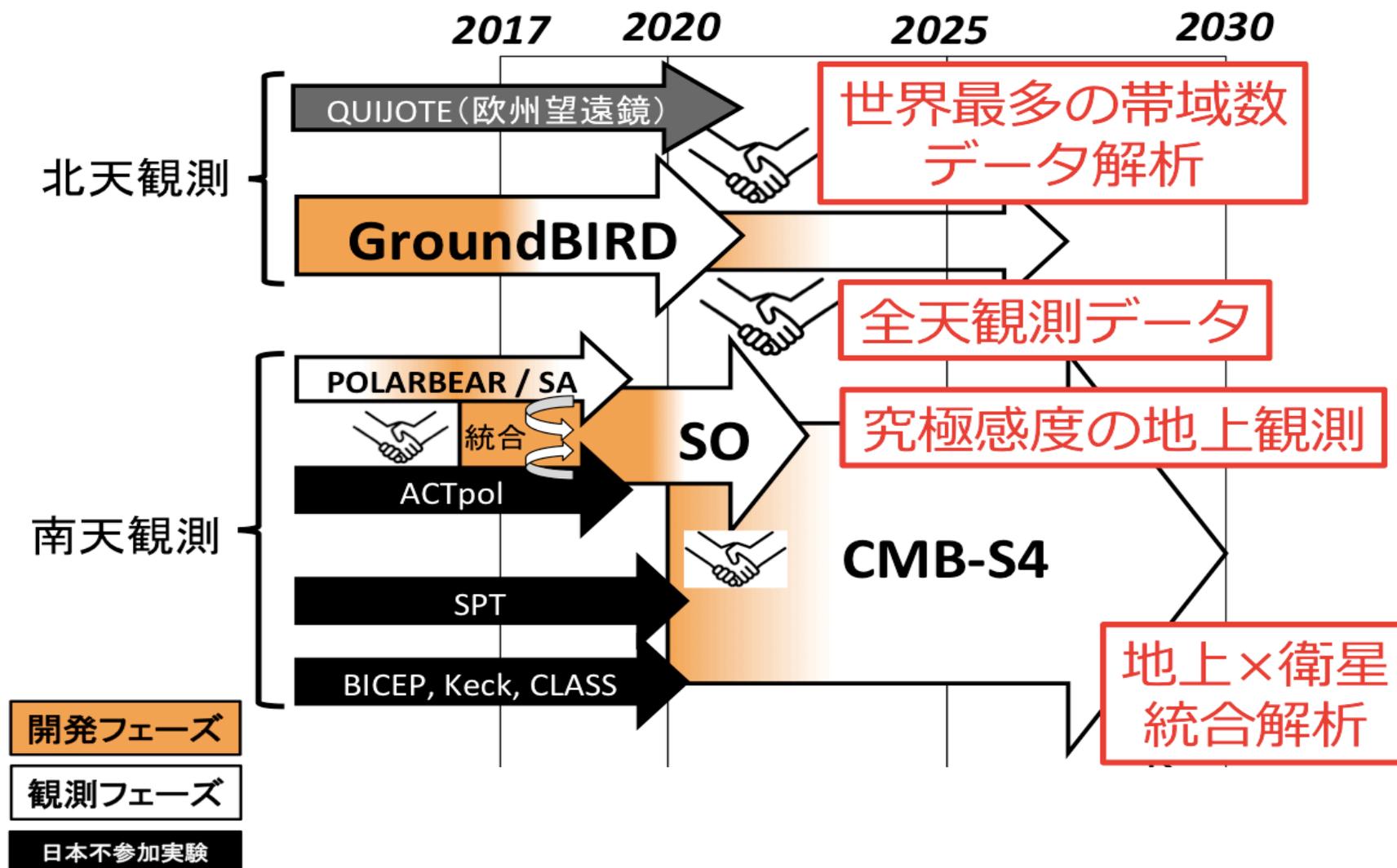
謂わばGBアップグレード機を開発、SOに導入

検出器数を10倍に！



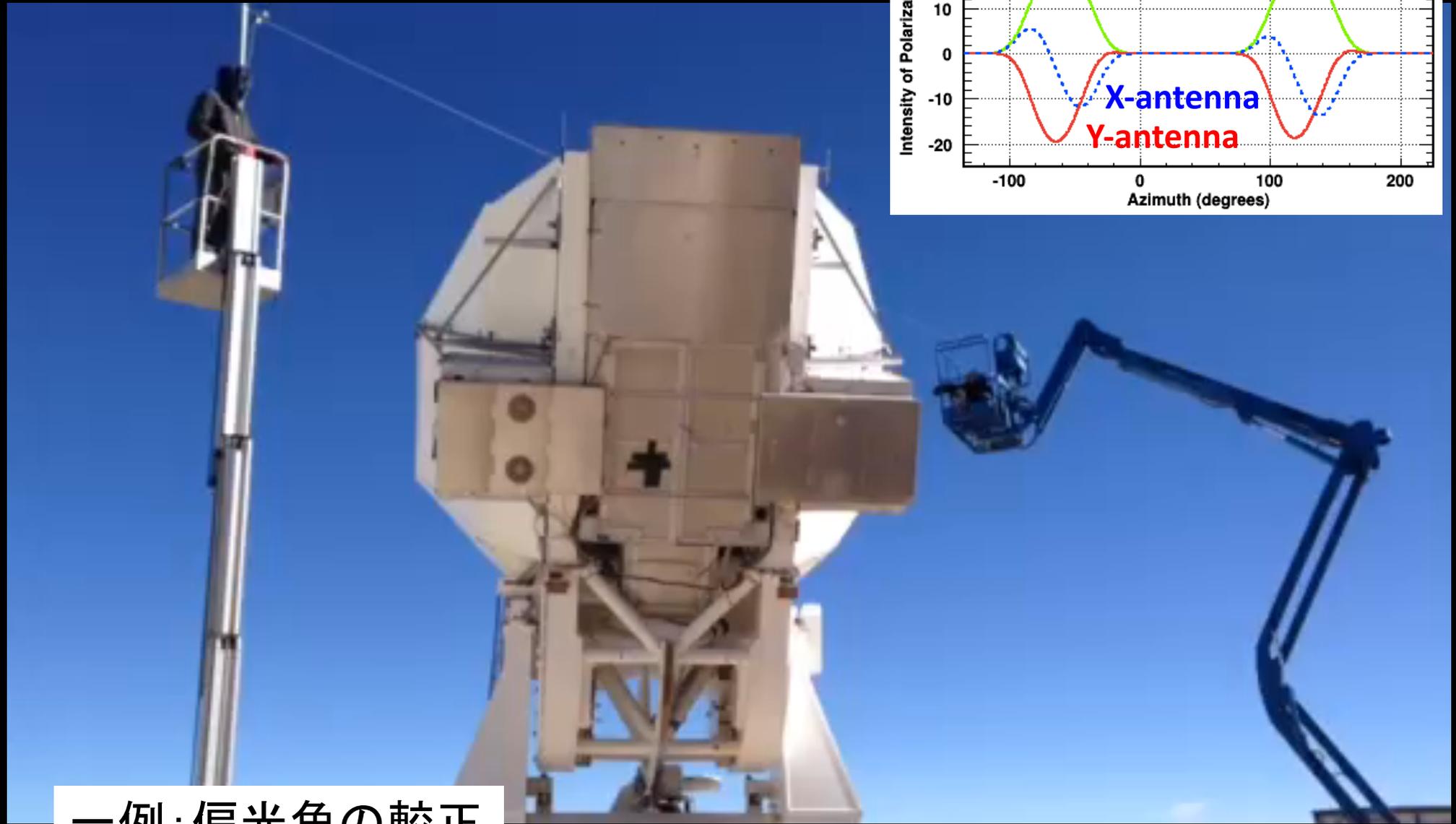
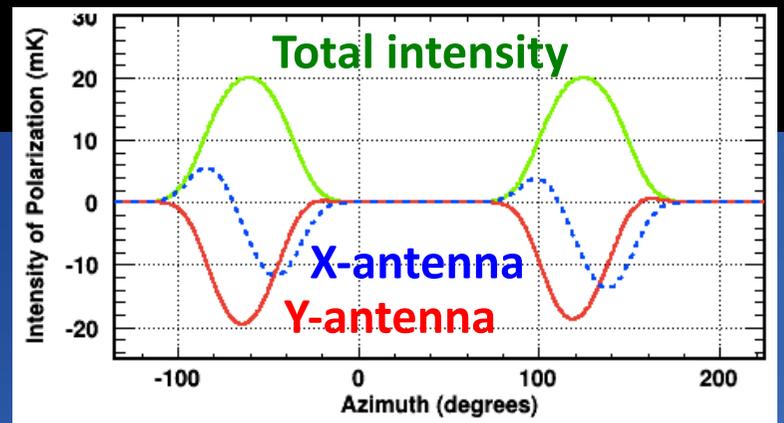
オフィシャルには、SO望遠鏡の仕様は今年度中に決める

# 独自性と国際性を両立する戦略



# SOにむけた、較正等のデモンストレーションが、SAでも実践できる

Detector response simulation  
(because no publication yet)



一例：偏光角の較正

# GB と SO(+SA) をやっていく

- **GB**

- 独自技術で一発逆転を狙う。~30人規模(実働~10人)
- 北半球観測
- 原始重力波(+ $\Sigma m_\nu$ の系統誤差)に特化

- **SO (+SA)**

- 国際共同プロジェクト(>100名、米国主導)
- 南半球観測
- 規模が大きい → 観測感度と手堅いサイエンス
- GB技術を持ち込んでイニシアチブをとることを狙う

# 学べること 手を動かせること

- **物理学**

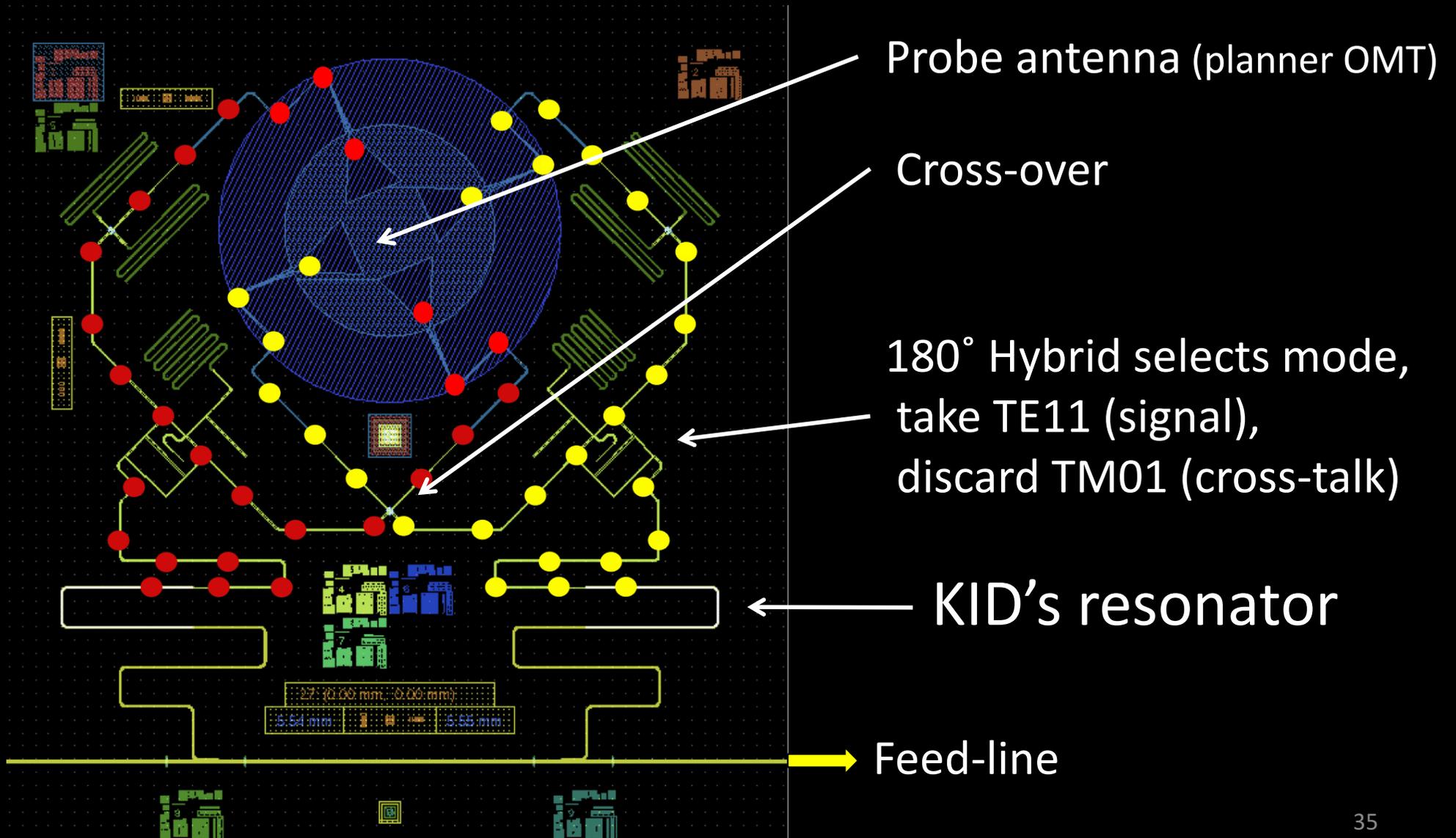
- 宇宙創成を探る、CvBの質量和など
- 超伝導物性、熱統計力学を体感

- **手を動かす**

- ミリ波計測に関する様々な技術開発
- 超伝導検出器の設計・製作・評価実験
- 極低温技術の実用
- 高周波(~GHz)多重読み出しシステムの開発
- キャリブレーションに命をかける(計測器が一種類なので)
- DAQ、データ運用、解析、コンピューティング
- 特殊環境での土方経験

おわり

# Horn coupled dual-pol. KIDs



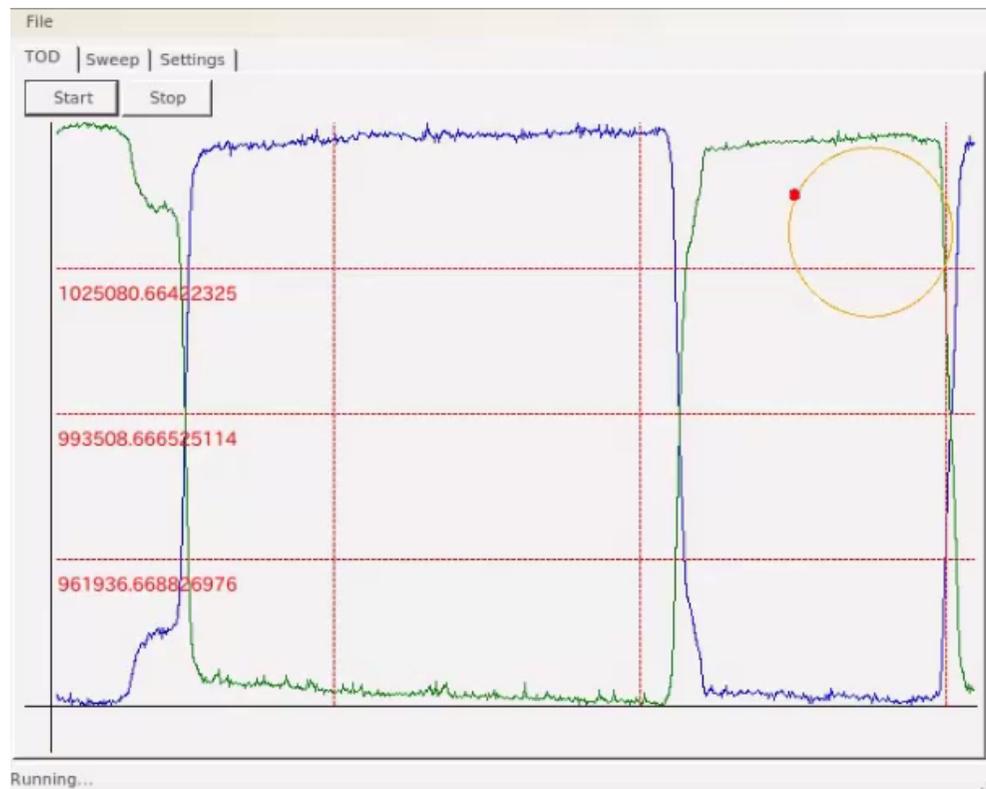
# End-to-end tests

prototype detectors, electronics, and cryogenic telescope

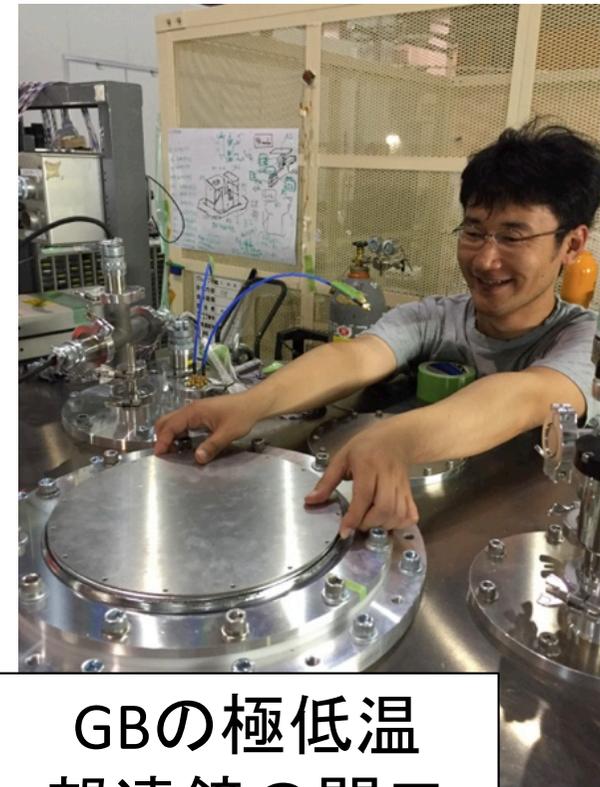
Online viewer shows detector responses as a function of time in **phase** and **amplitude**

Open/Close of aperture is On/Off of inputs

検出器レスポンス



時刻



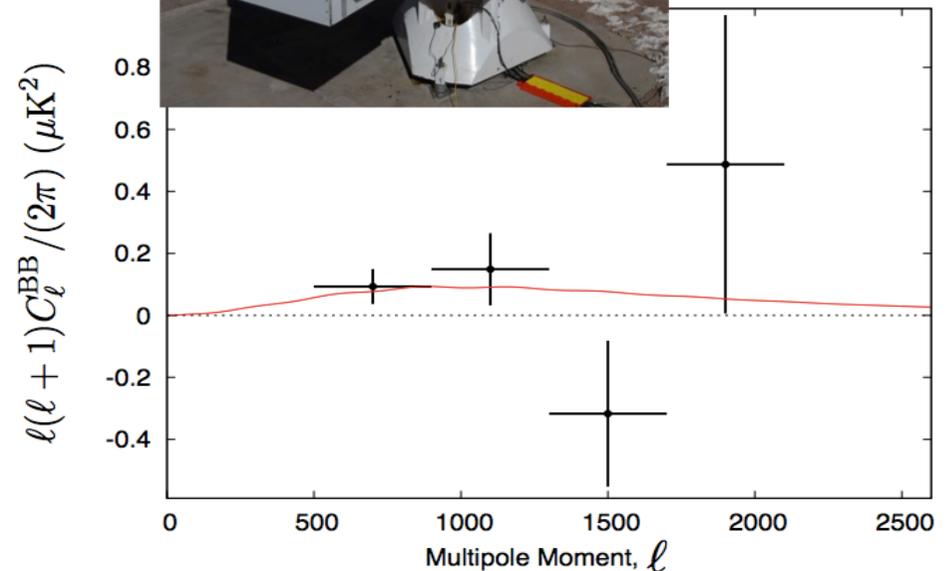
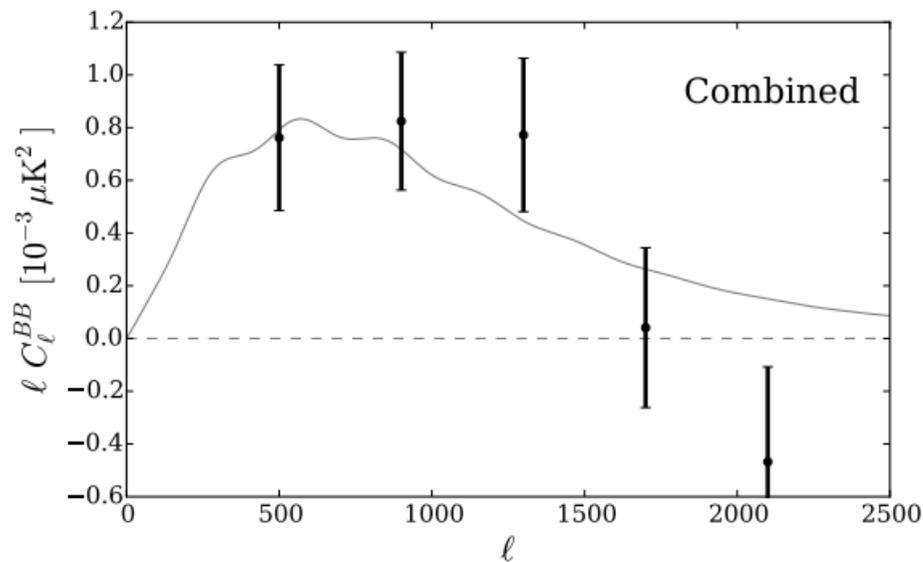
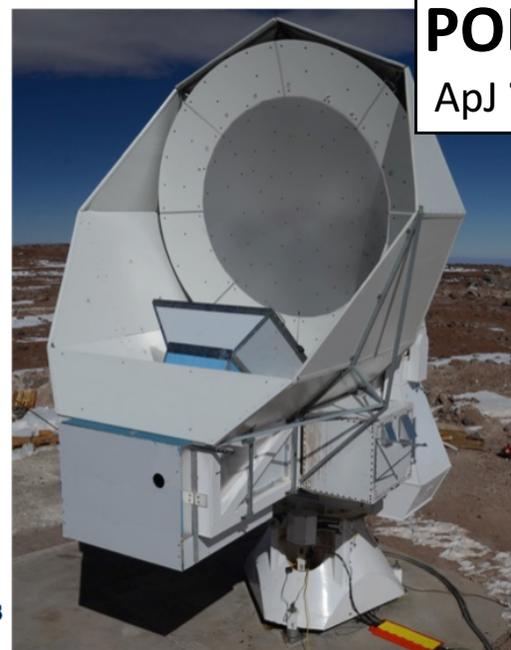
GBの極低温  
望遠鏡の開口

# 重力レンズ $B$ -modes が測定できる 時代にようやく突入！

SPTpol,  
ApJ. **807**, 151 (2015).



POLARBEAR,  
ApJ **794**, 171 (2014).



Exclude “zero” power at  $4.3\sigma$  significance (SPTpol), and 97.5% C.L. (POLARBEAR)