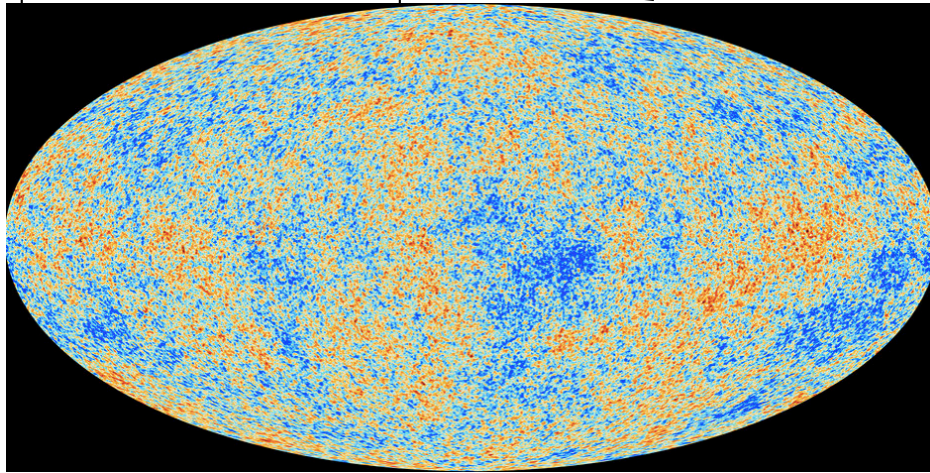


宇宙背景放射(CMB) 観測実験の紹介

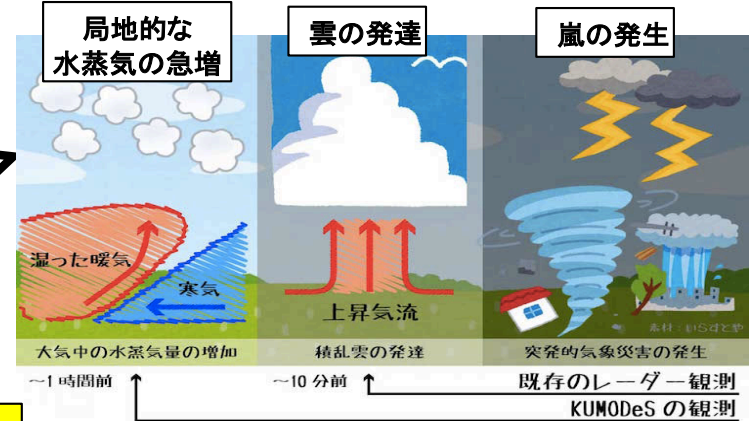
田島 治

今やっている観測対象

CMB



スピンオフ



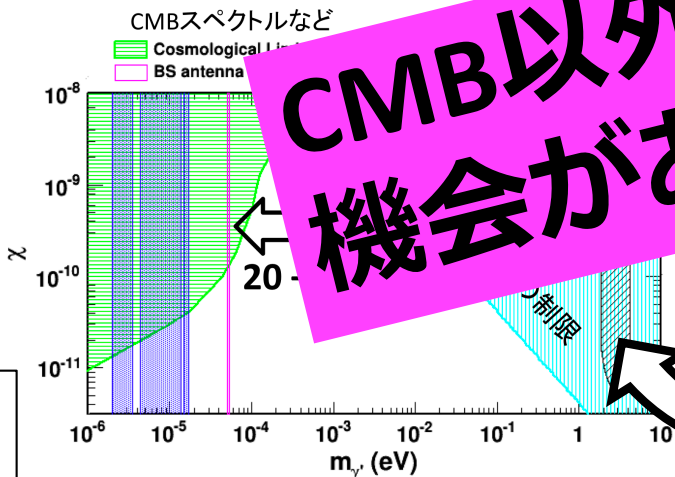
大気観測

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



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

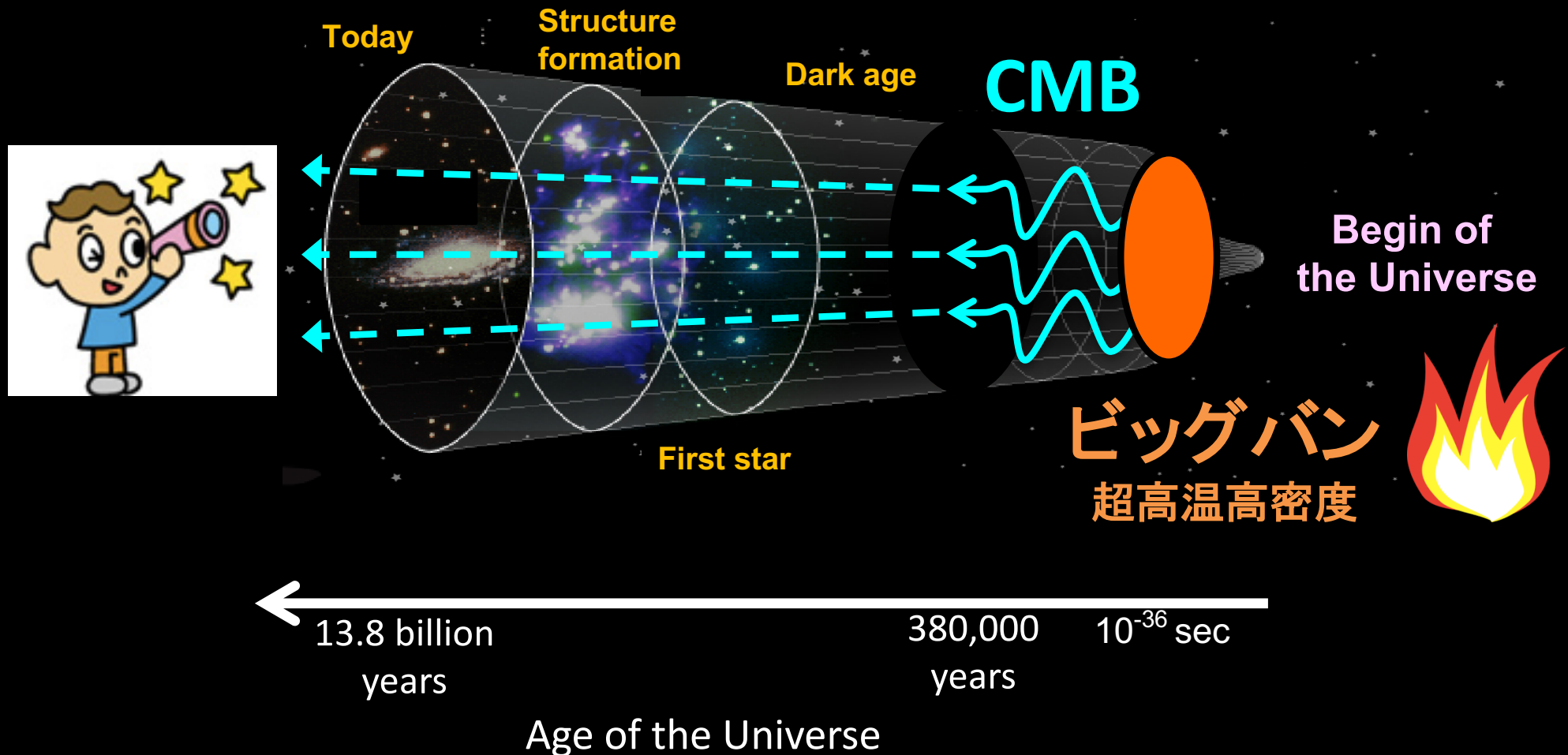
スピンオフの
スピンオフ



宇宙マイクロ波
背景放射

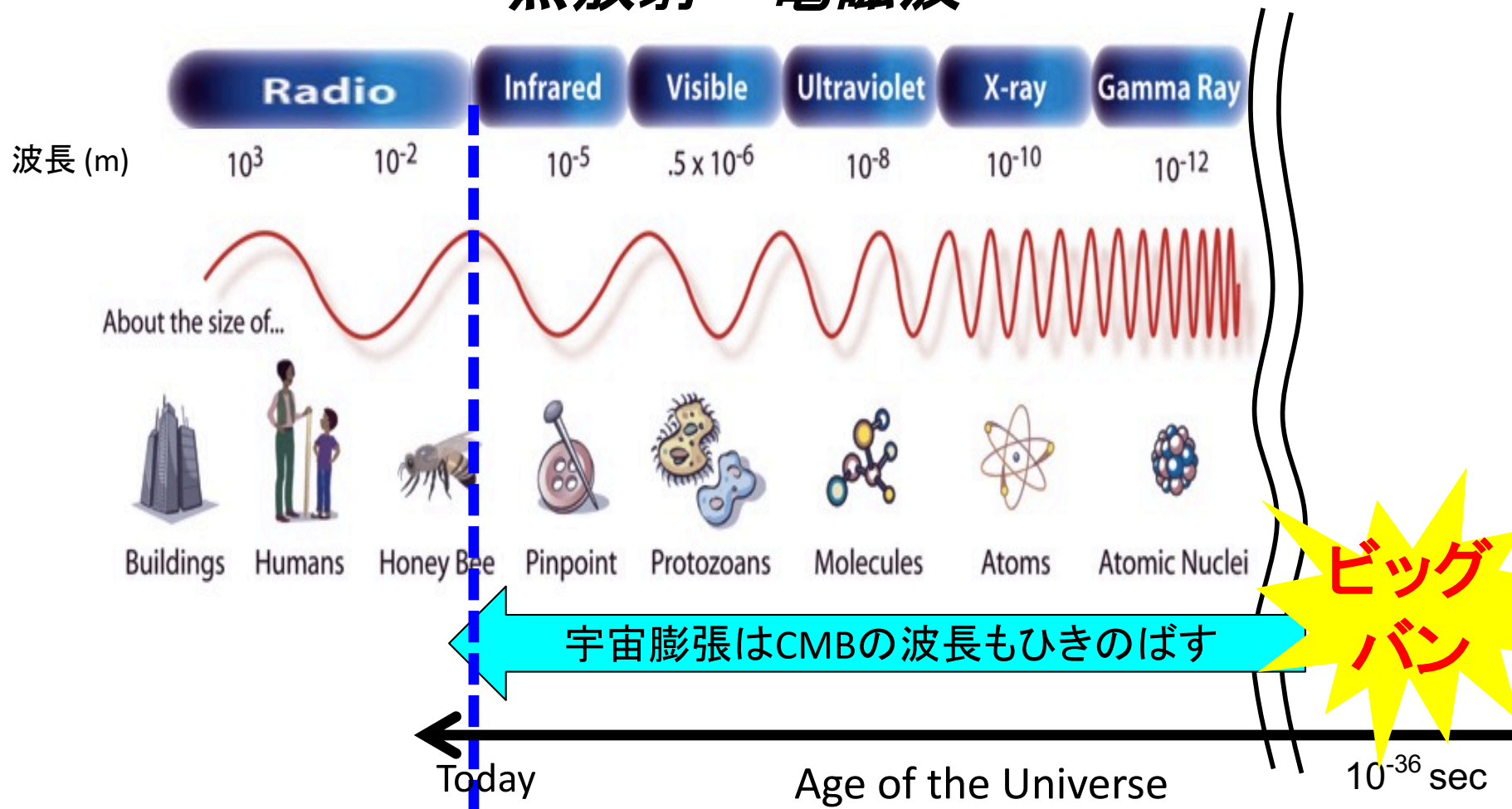
CMBとは？

ビッグバン熱放射の残光！



CMB Today – まだアッチッチ??

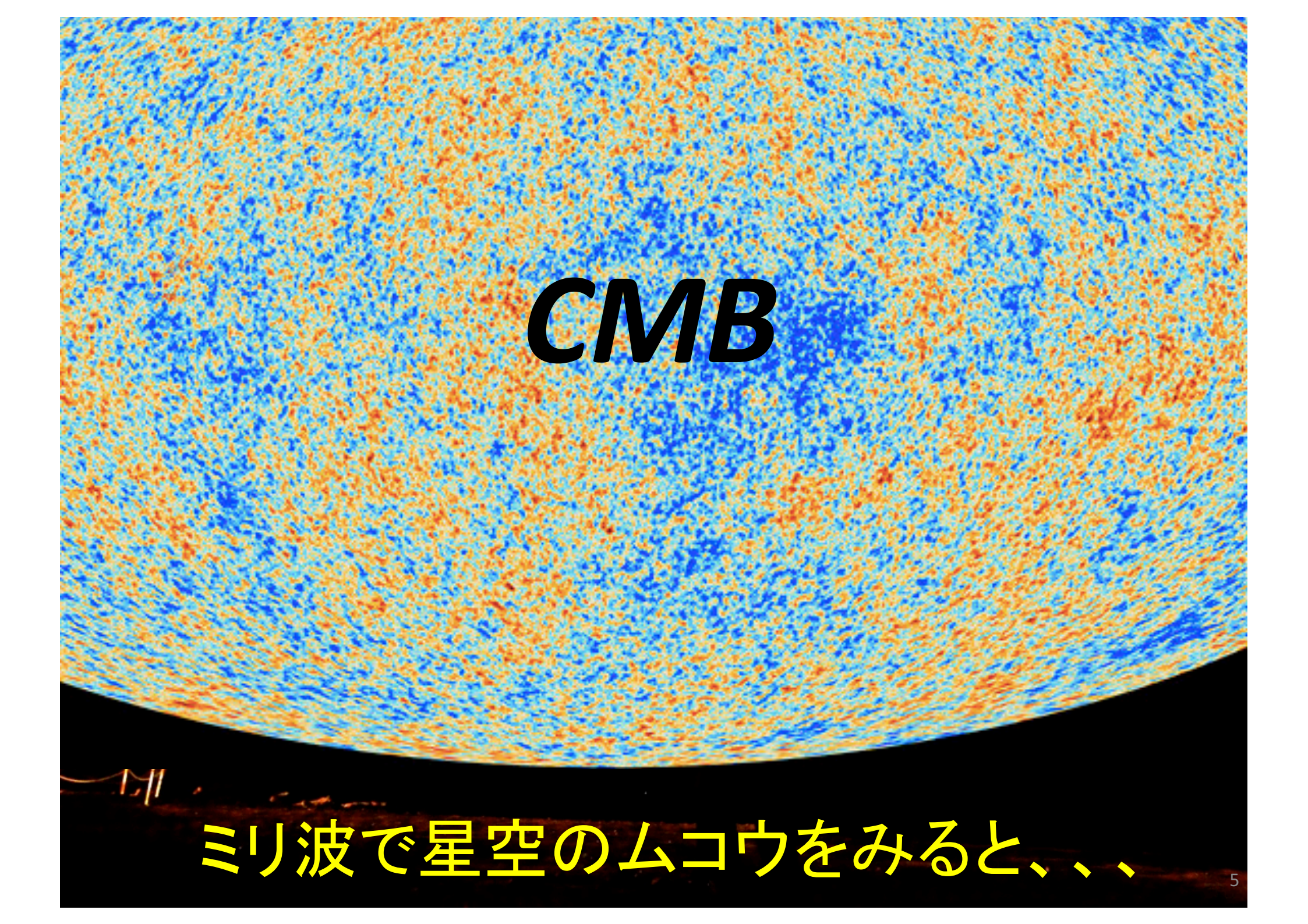
熱放射 = 電磁波



ビッグバン

宇宙膨張はCMBの波長もひきのばす

わずか2.7 Kの冷たい放射
⇔ 超微弱の電波(ミリ波)

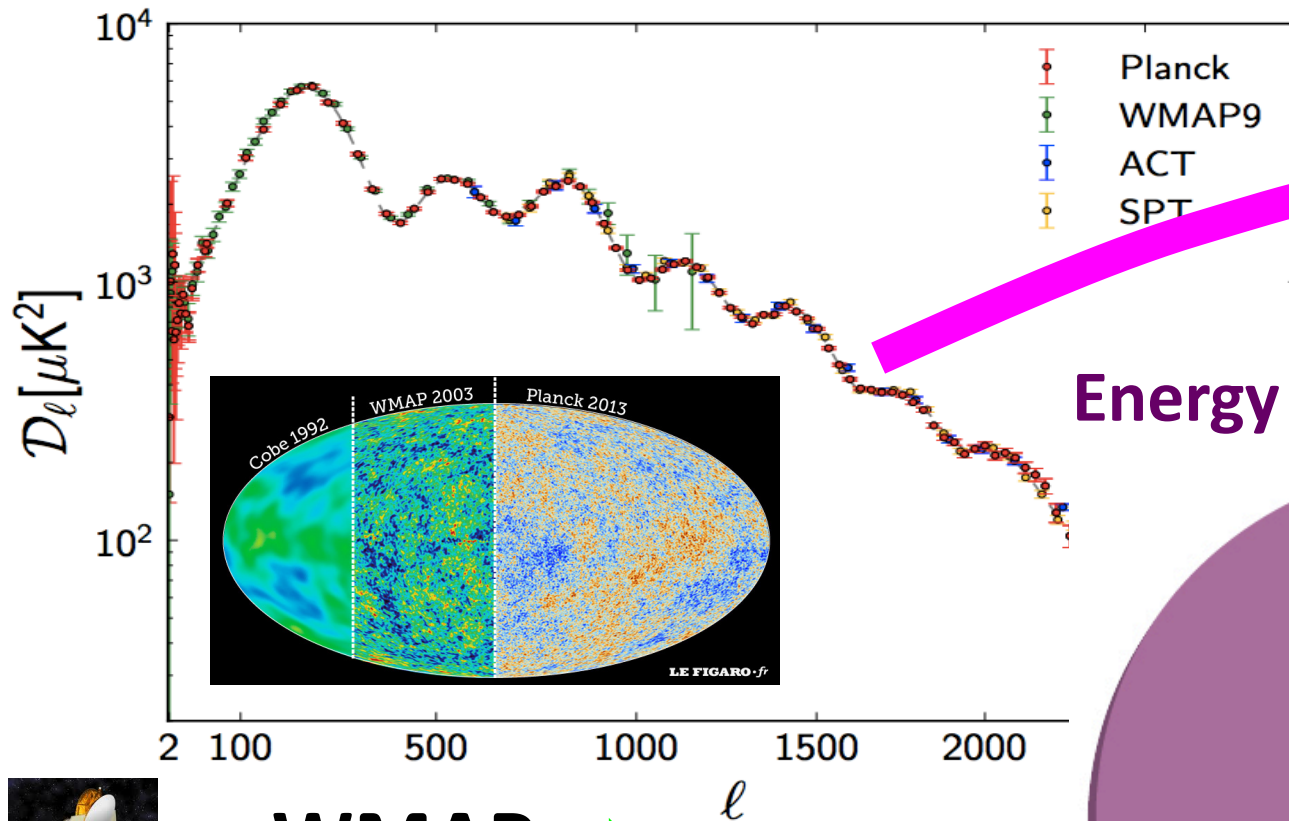


CMB

ミリ波で星空のムコウをみると、、、

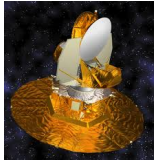
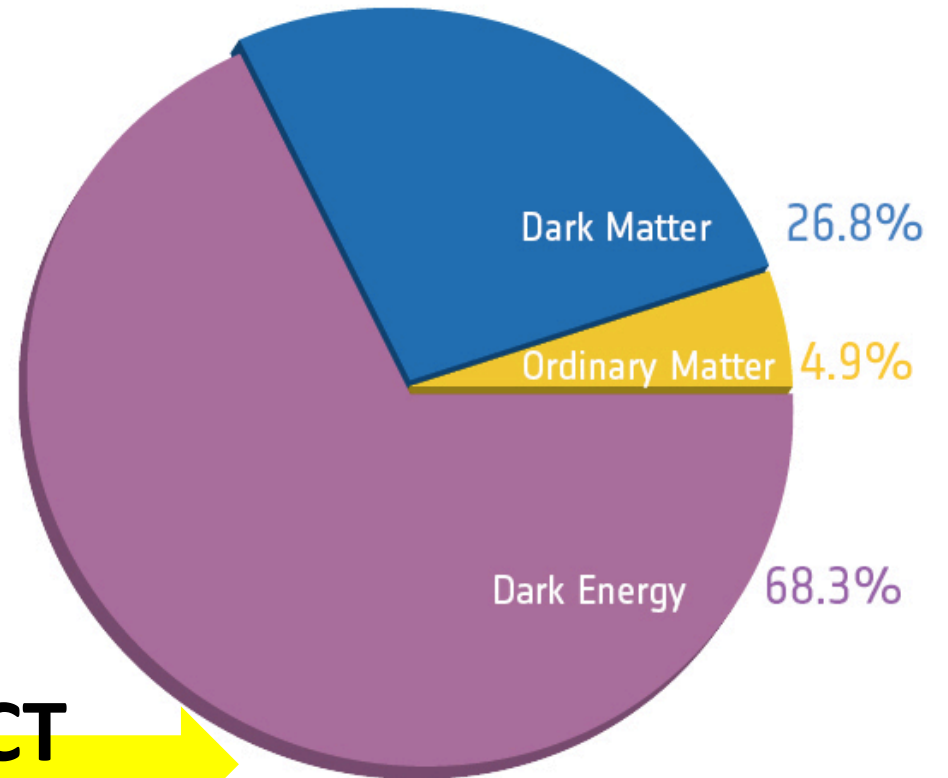
過去20年の
フロンティア

温度ゆらぎ (無偏光ゆらぎ)

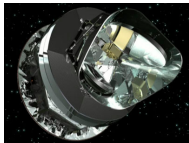


0.001% level of average
intensity (2.7 K)

Energy Budget in the Universe



WMAP



Planck

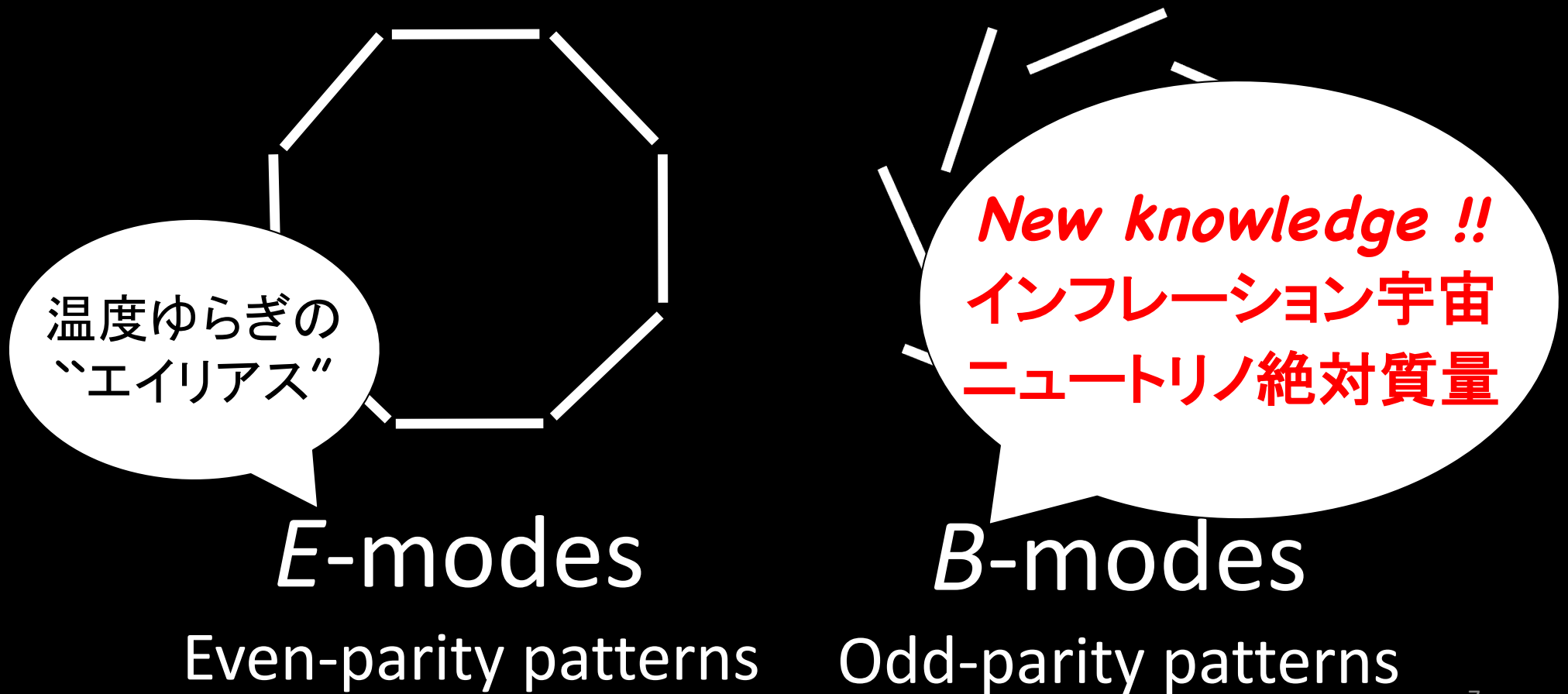


SPT and ACT

(Big ground telescope)

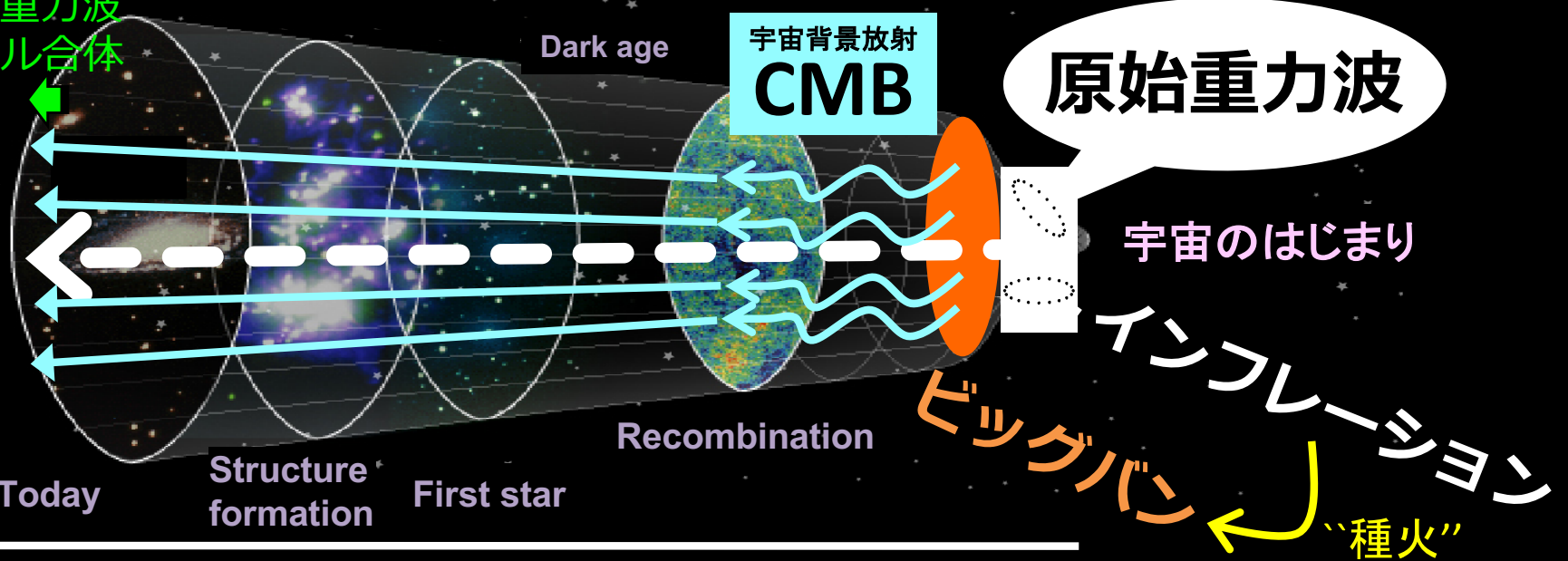
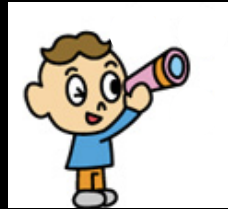


今のCMBフロンティアは 偏光パターン観測！



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



宇宙
年齢

Today
138 億年

Structure
formation

First star

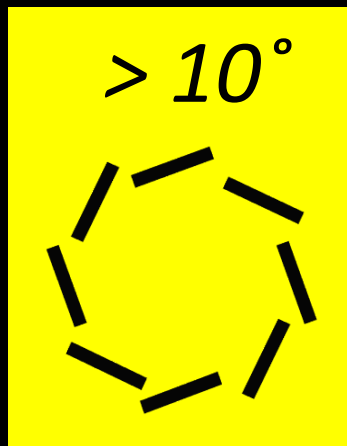
Recombination

38万年

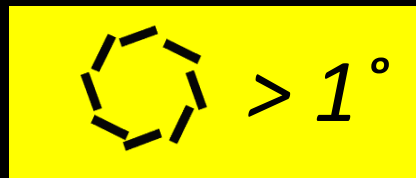
再電離期

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

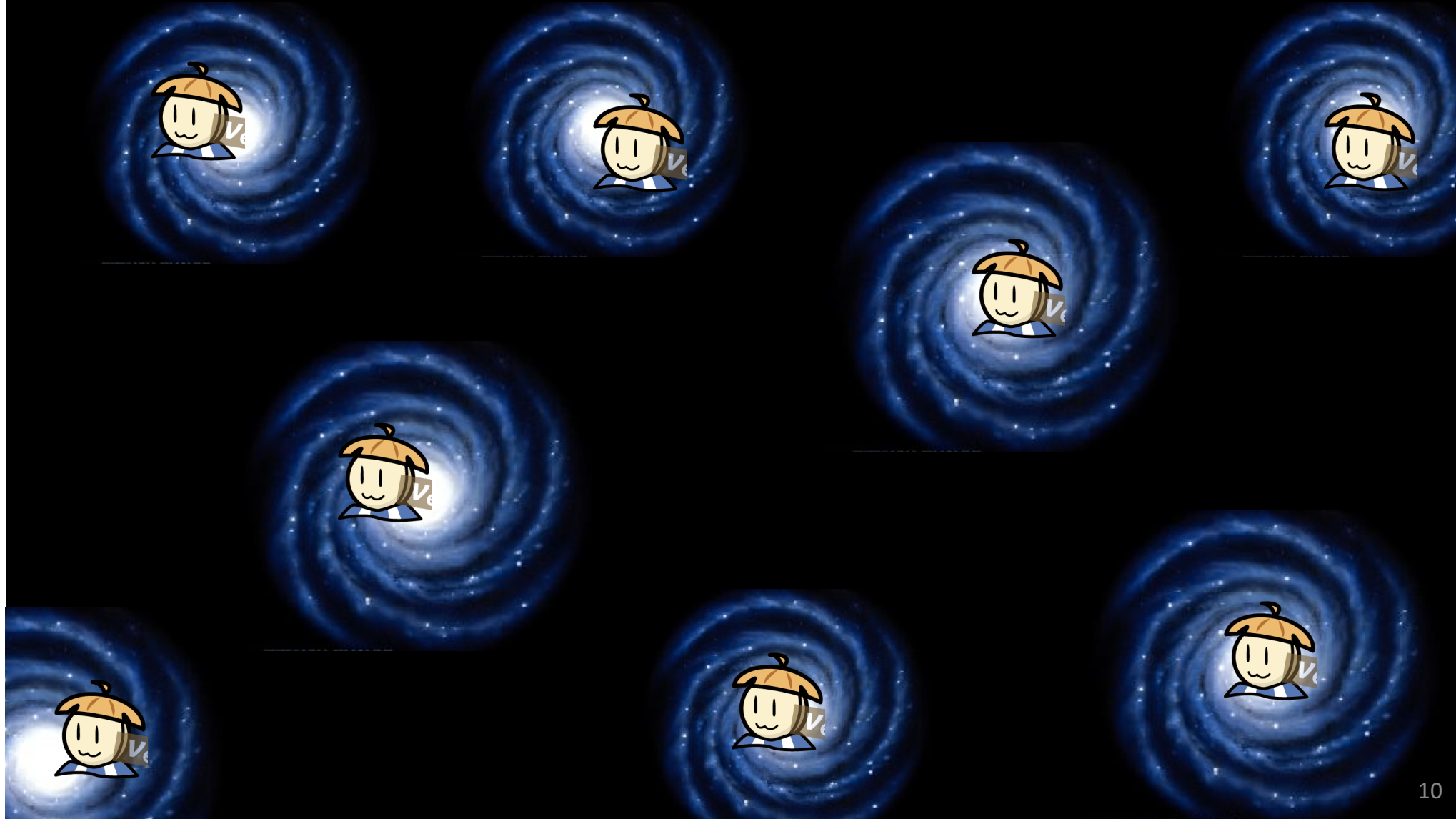
CMB偏光の非対称パターン

「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



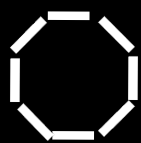
Σm_ν が大きいと 重力レンズ効果が小さい

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



重カレンズBモードで Σm_ν 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 Σm_ν 大

now



Σm_ν 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

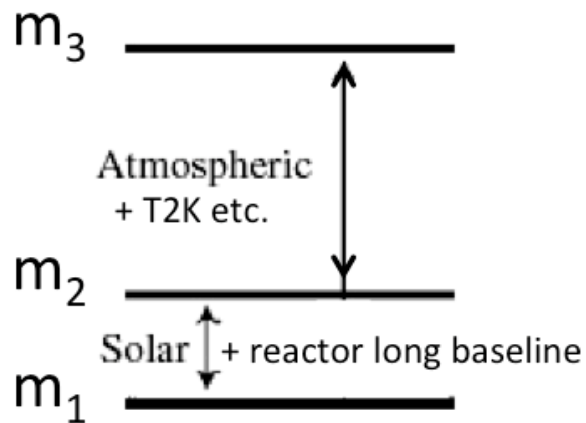
◆ **質量の階層性** の解明手段

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

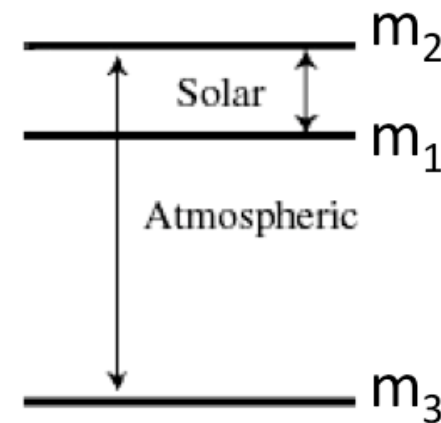


$$\Sigma m_\nu \geq 0.06 \text{ eV}$$

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

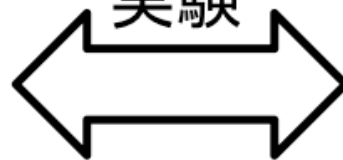


$$\Sigma m_\nu \geq 0.1 \text{ eV}$$

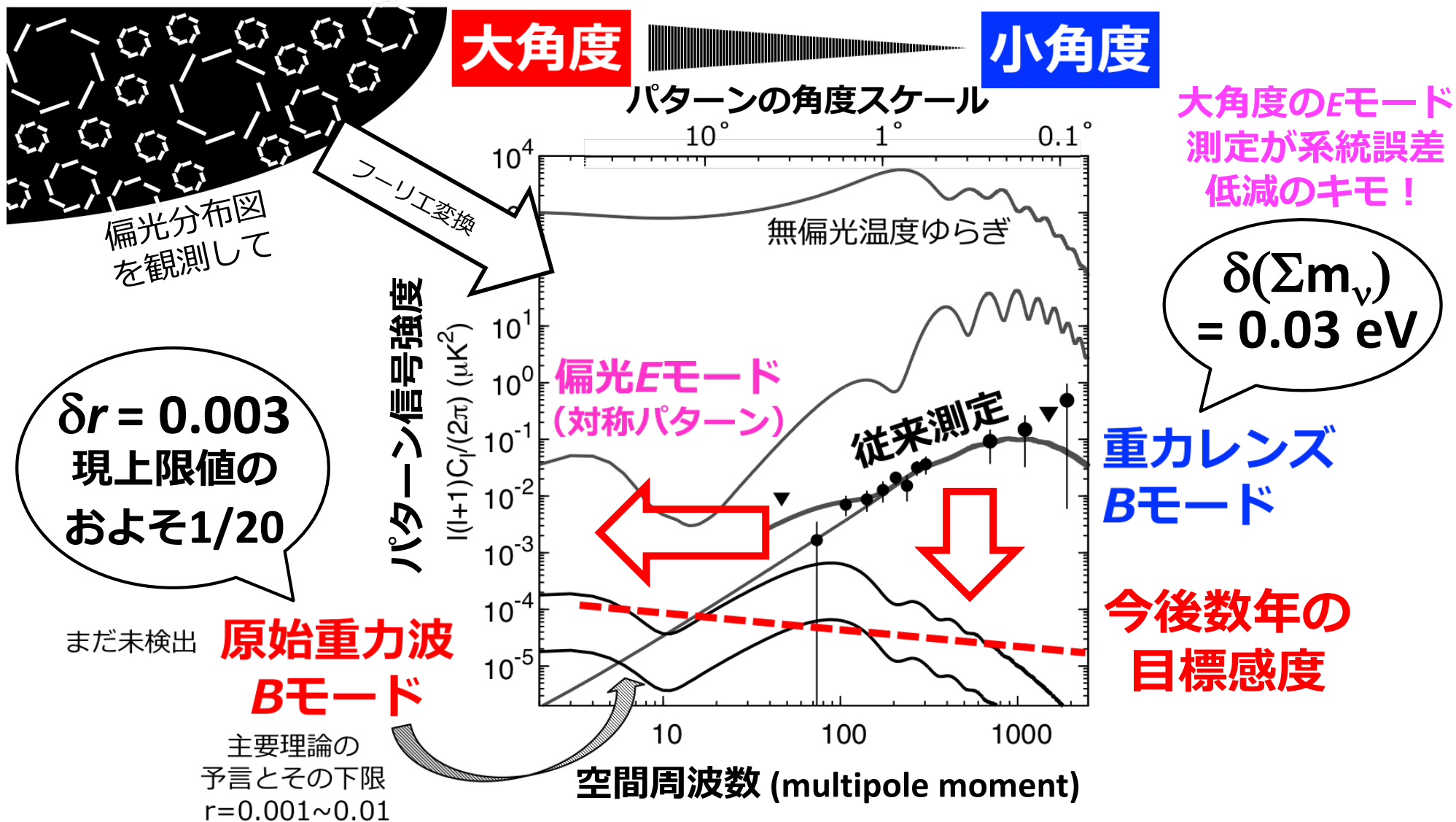
逆階層性 ($m_3 < m_1 < m_2$):

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

ν 振動
実験



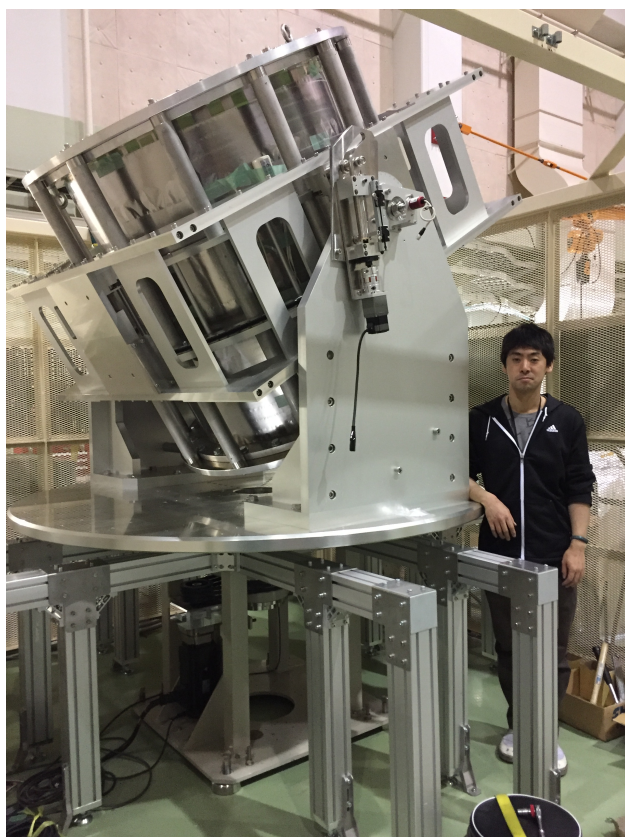
広い角度スケール $O(0.1^\circ) - O(10^\circ)$ にわたる精密観測・分析が大事



2 (+1)つの観測プロジェクト

日本独自技術！

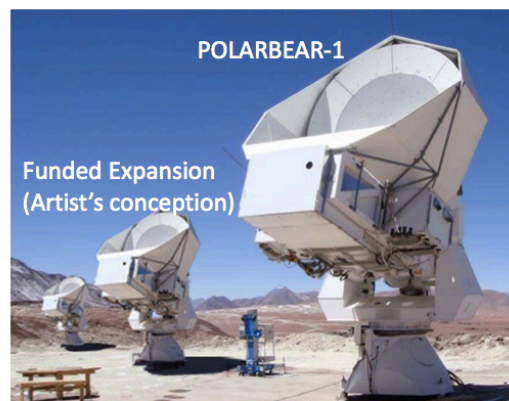
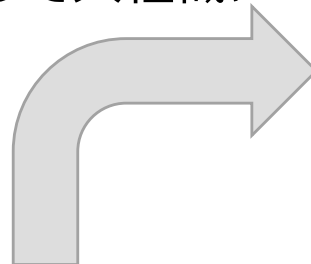
スペイン、韓国、(オランダ)



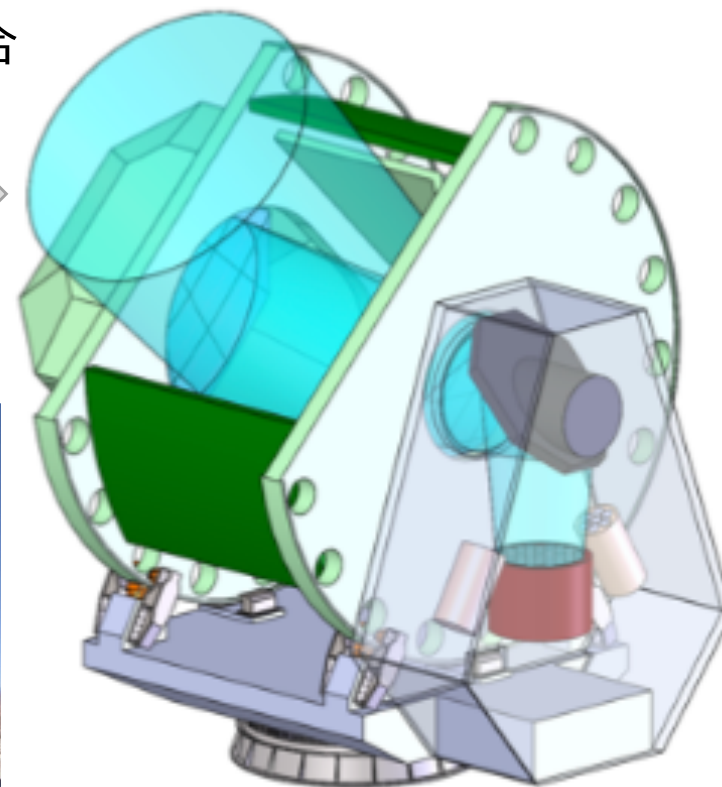
GroundBIRD (GB)
観測 2018 -

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

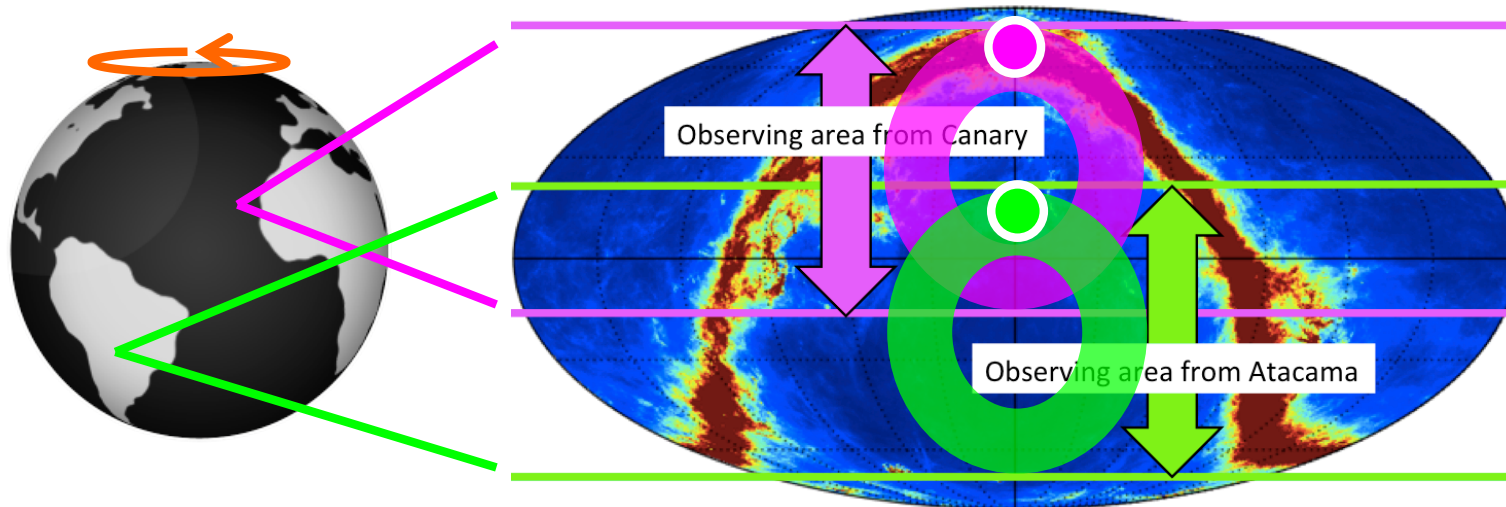


Simons Array (SA)
(upgrade of POLARBEAR)
観測 2018 -



Simons Observatory (SO)
観測 2020 -

北と南から全天観測



GroundBIRD (GB) 北天観測 FY2017 –

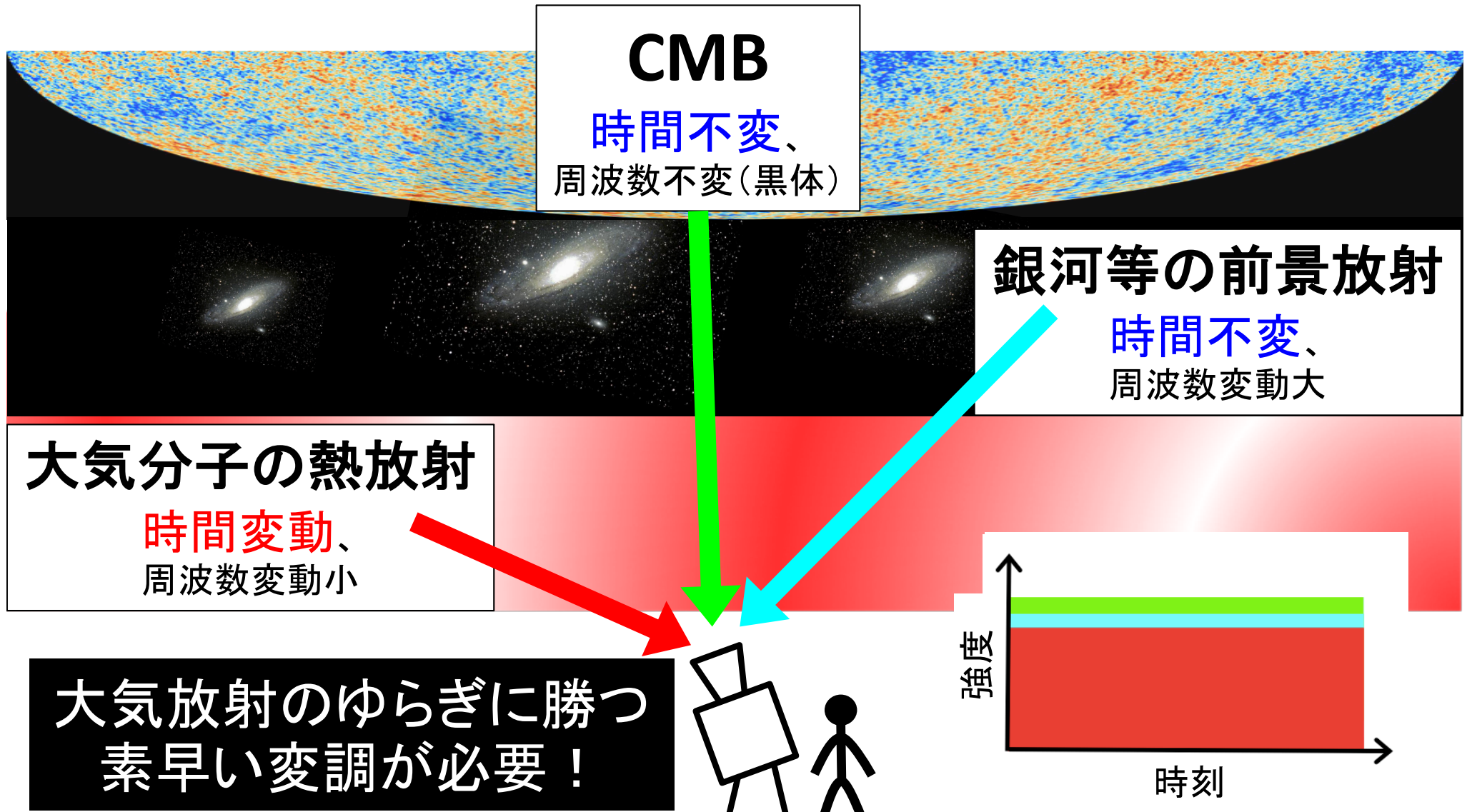
Canary Island (28°N, 2,400 m altitude)

技術移転

Simons Observatory (SO) 南天観測 FY2020 –

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

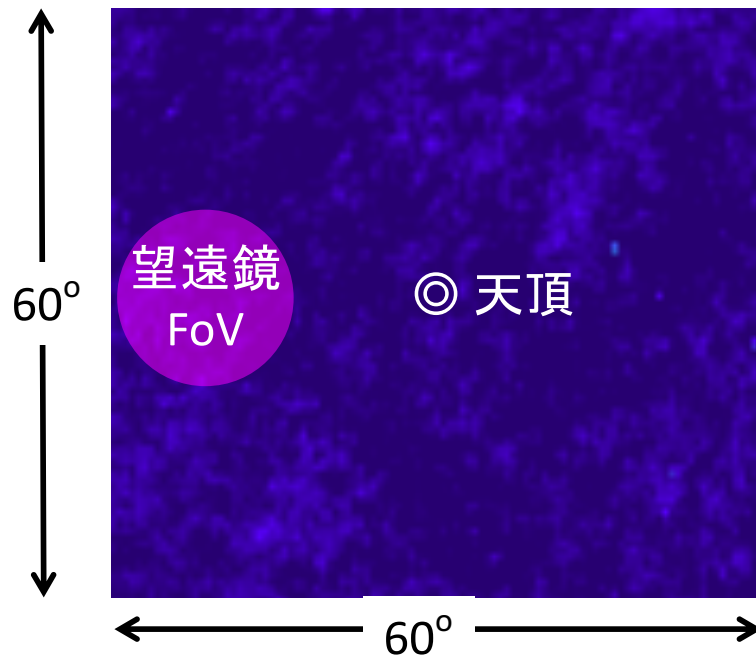
広い天域観測の敵



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)



100倍速

e.g.,
FOV 20°,
EL 70°

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



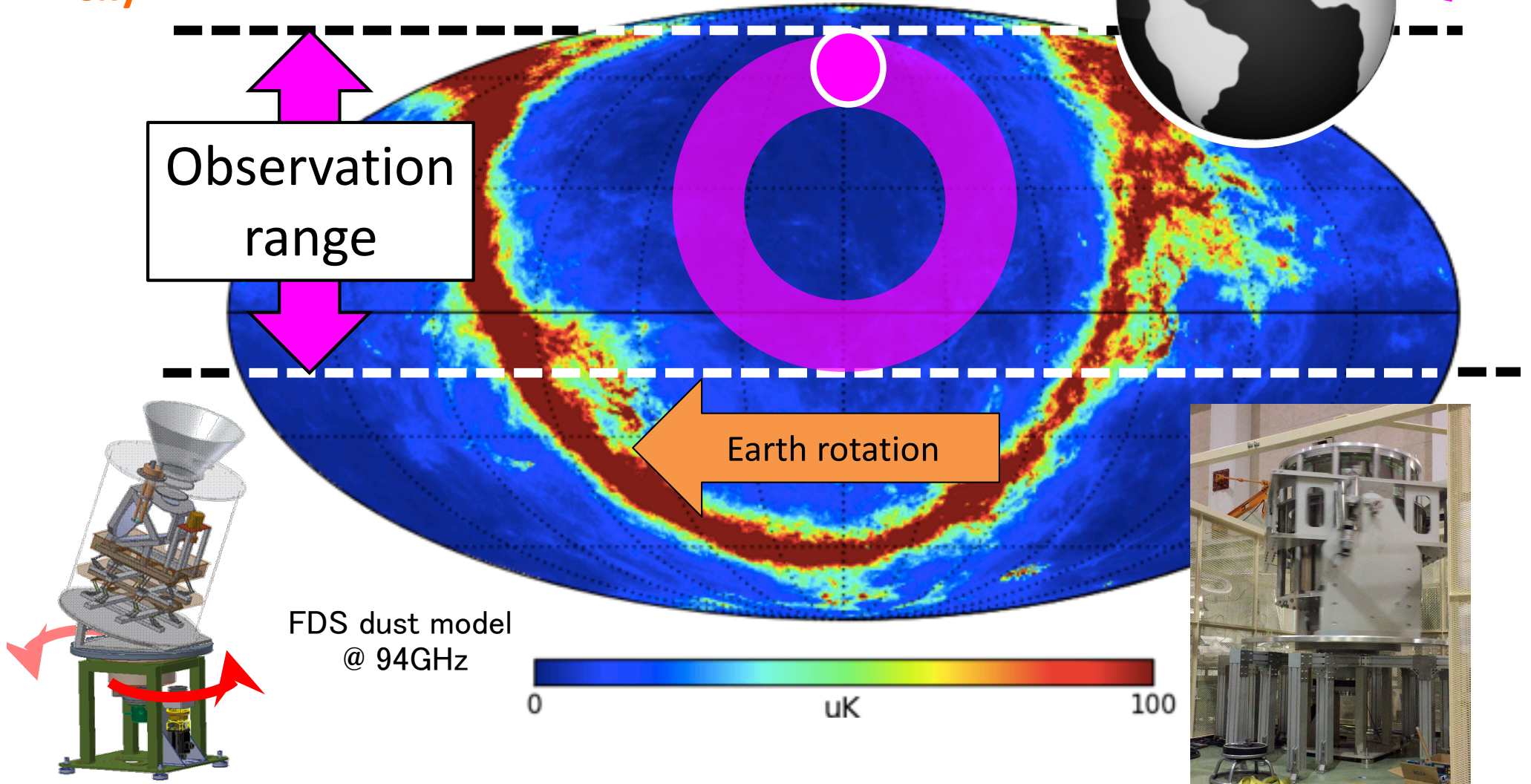
従来のスキャンストラテジー
変調がゆらぎに負ける 🥲

高速回転スキャンならば...
変調がゆらぎに勝てる 👍

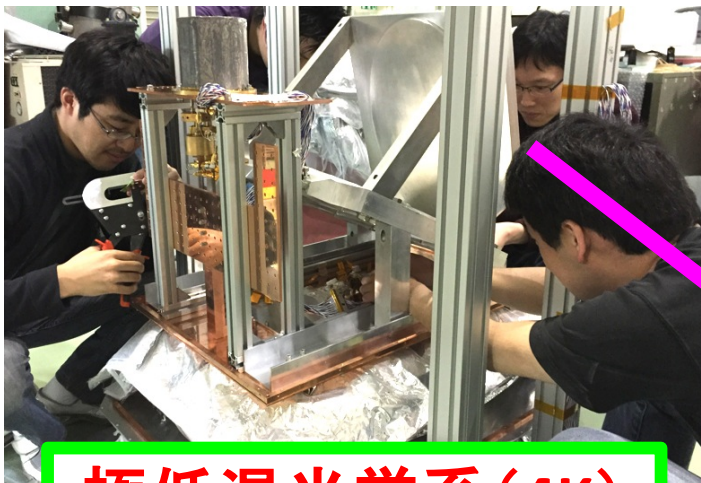
高速回転スキャン＋地球の自転 で全天の1/2に渡る観測を実現

Troidal coverage
w/ single rotation

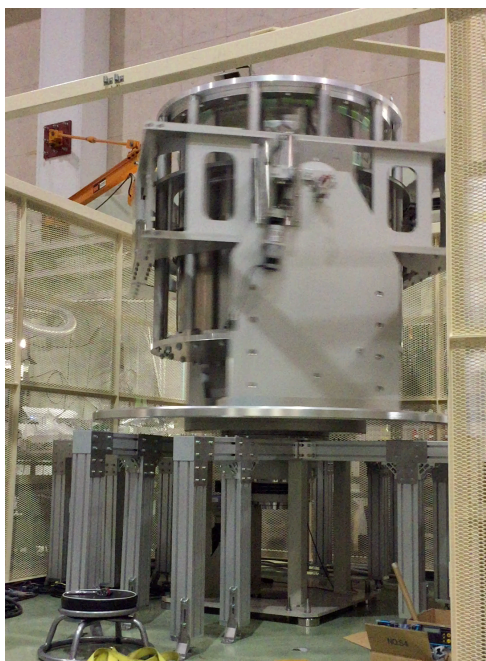
$$f_{\text{sky}} \approx 0.5/\text{telescope} > \text{Current ground-based} \times 20$$



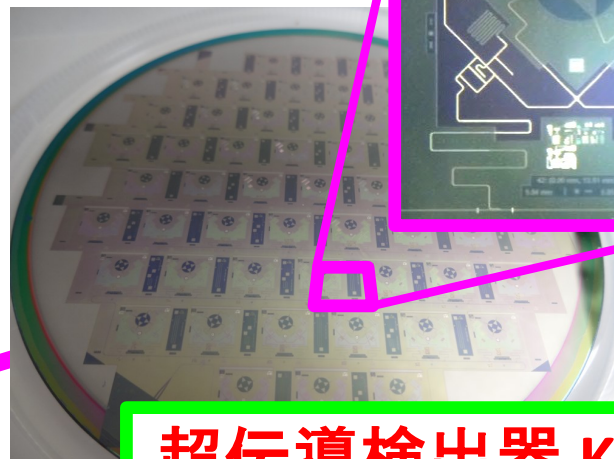
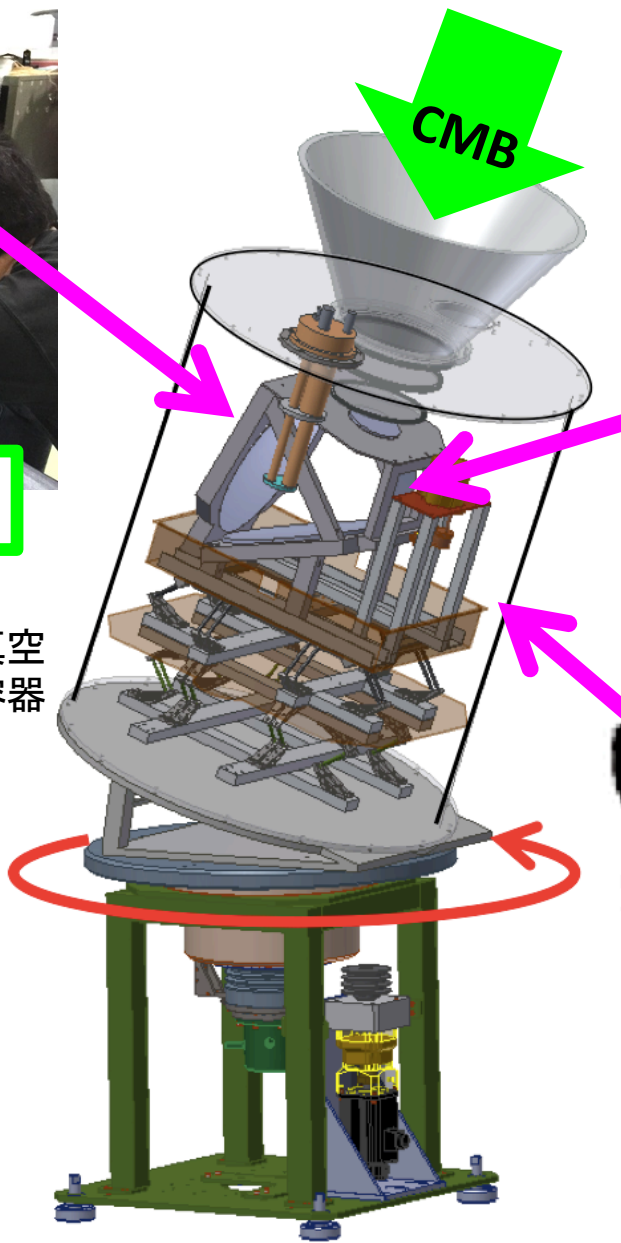
高速スキャンと超伝導検出器を両立！



極低温光学系 (4K)

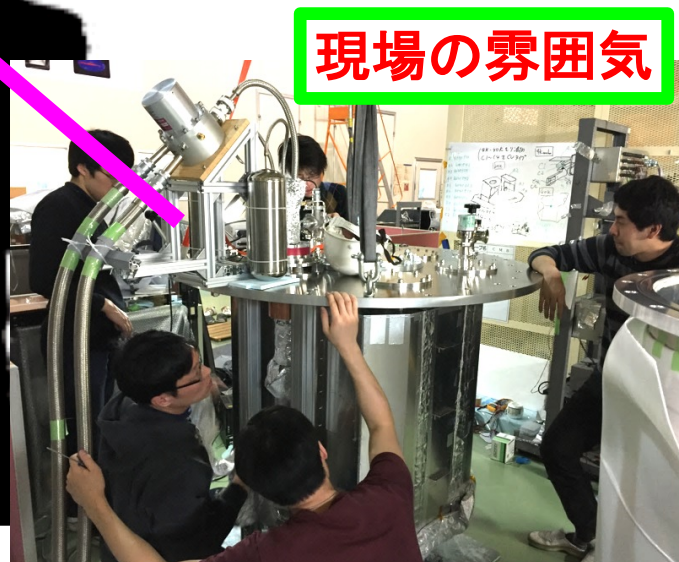


真空容器



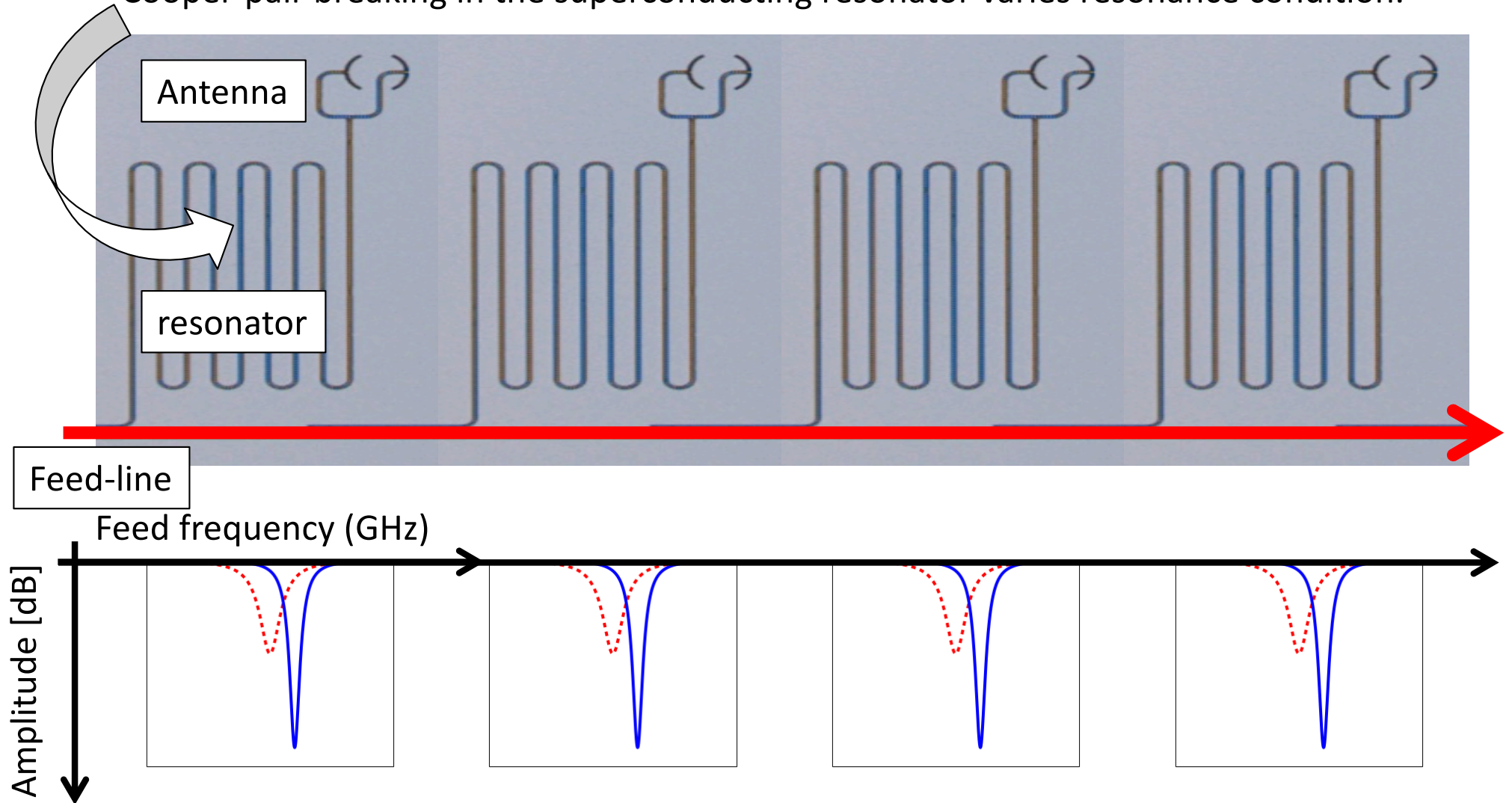
超伝導検出器 KIDs
(焦点面 @ 0.25 K)

現場の雰囲気



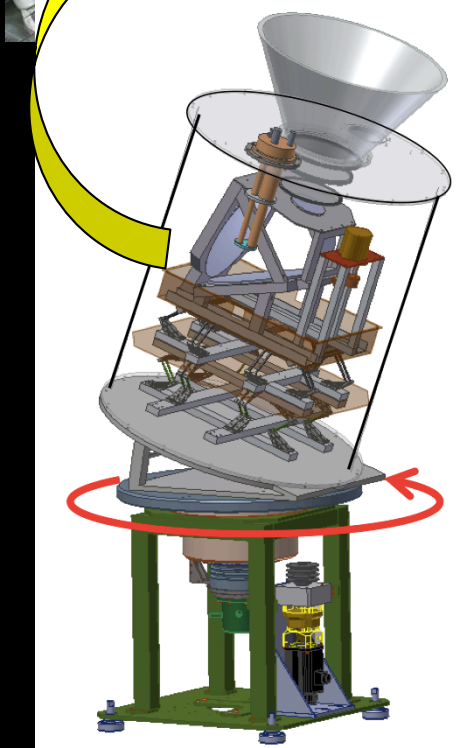
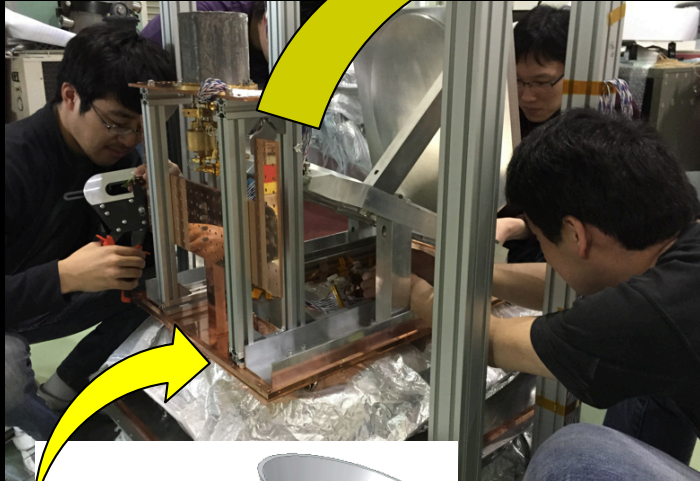
KIDs : resonator = detector

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

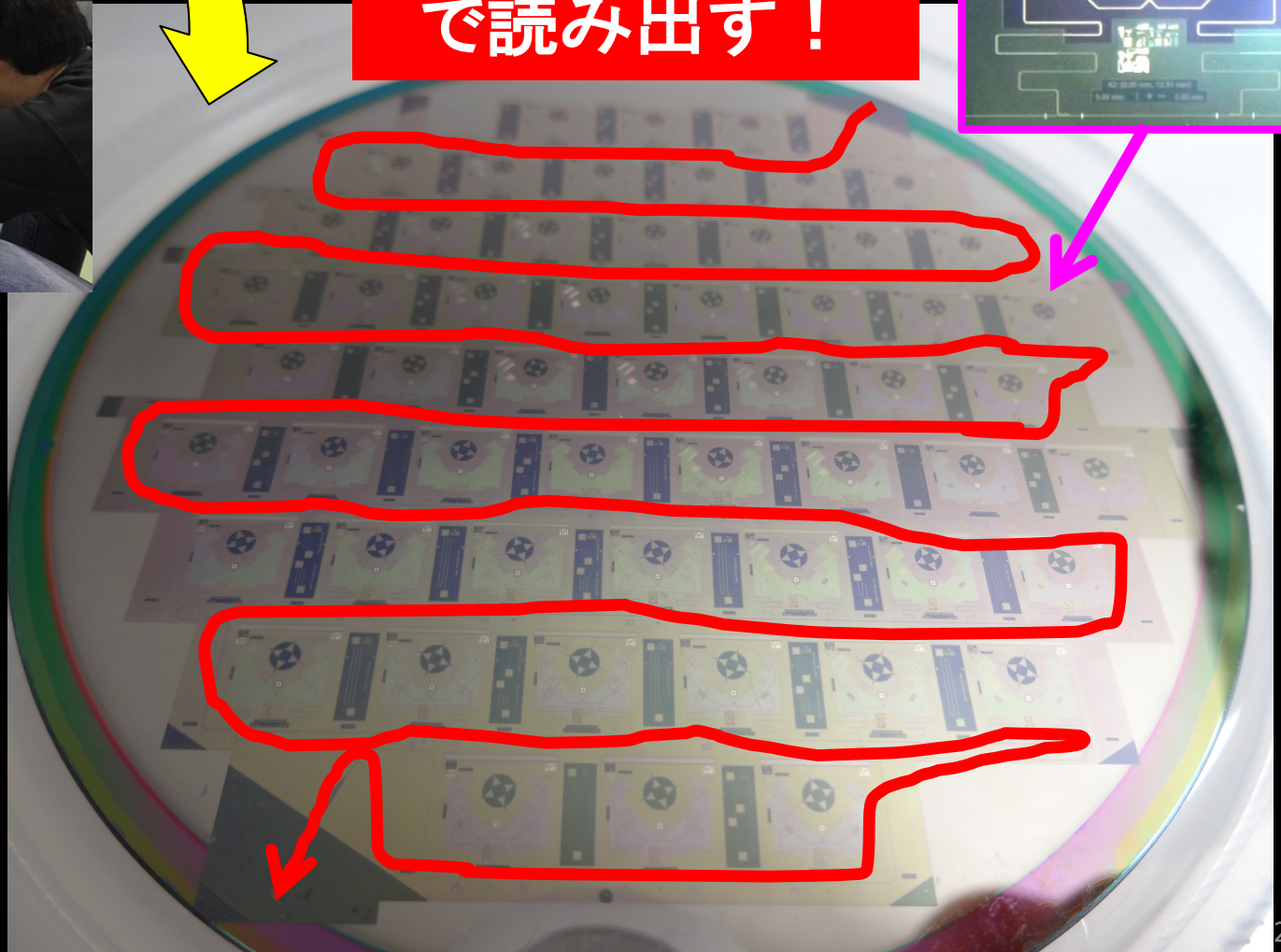
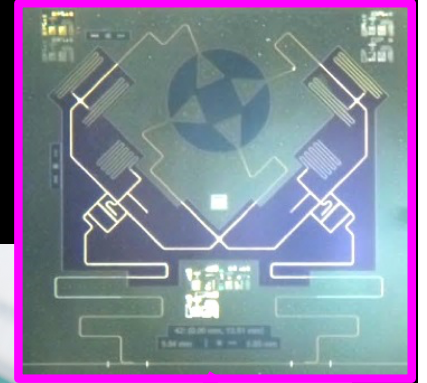


Natural frequency domain MUX

GB's KIDs array, 1st prototype



110個の検出器
信号を配線一対
で読み出す！

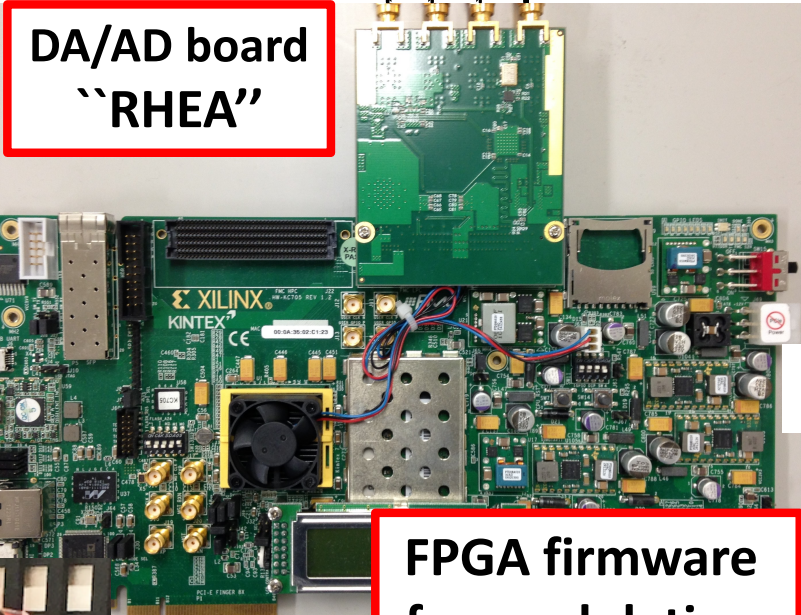


GB's dead-time less readout system with high multiplex (MUX)

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

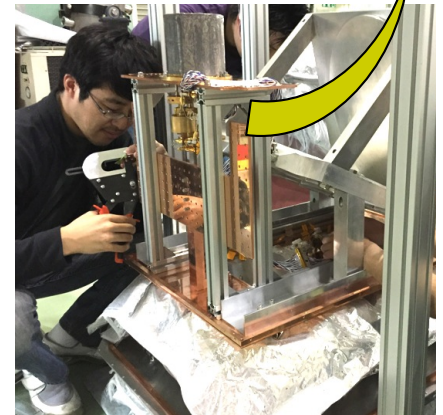
FPGA firmware
for modulation
& demodulation



J. Suzuki

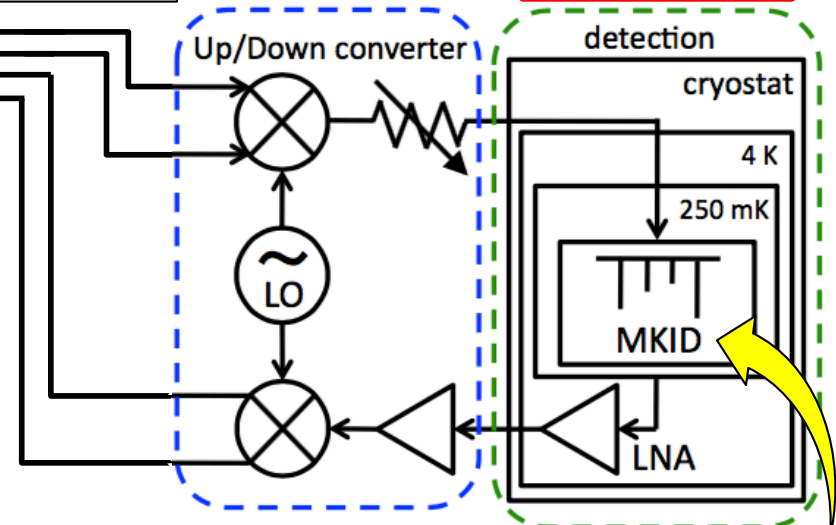


S. Oguri



N. Tomita

Cryogenic
telescope

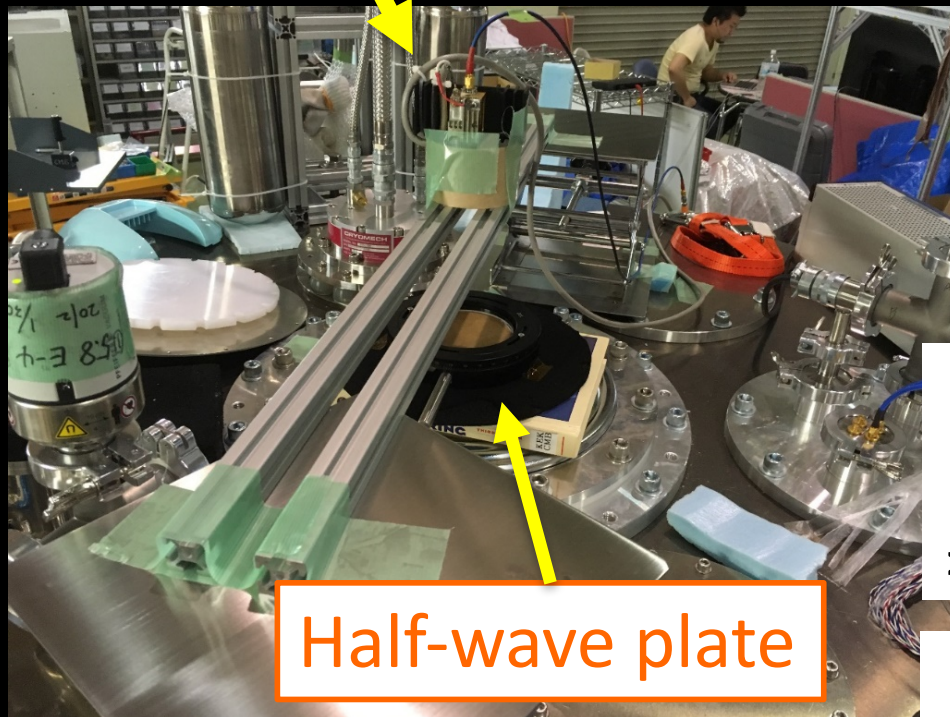


偏光信号の初観測！ (in lab.)

Preliminary

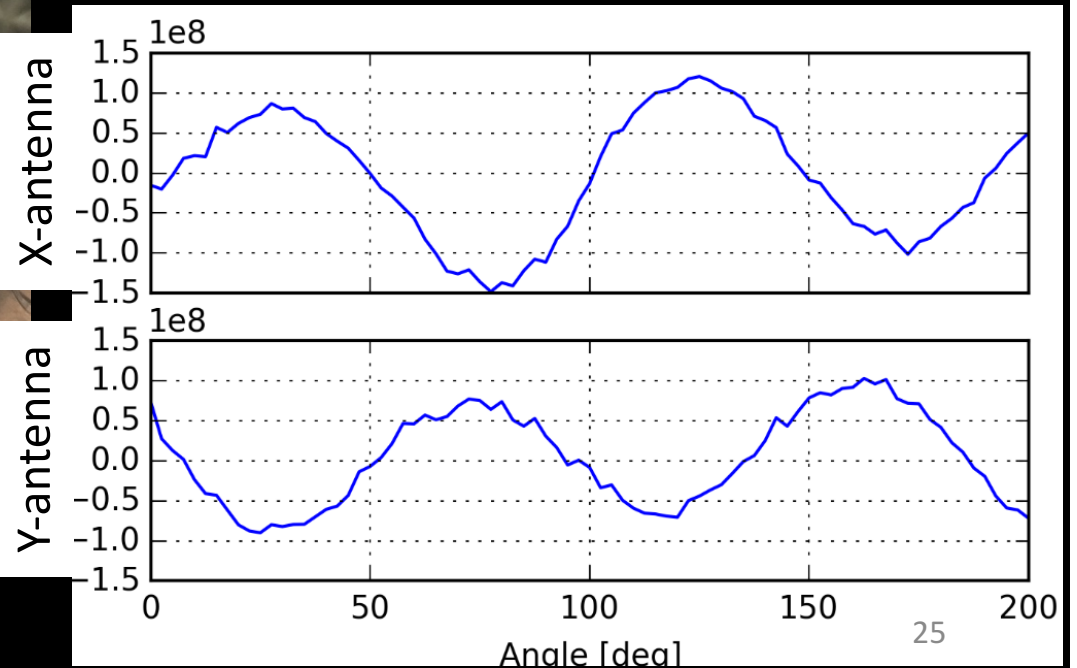
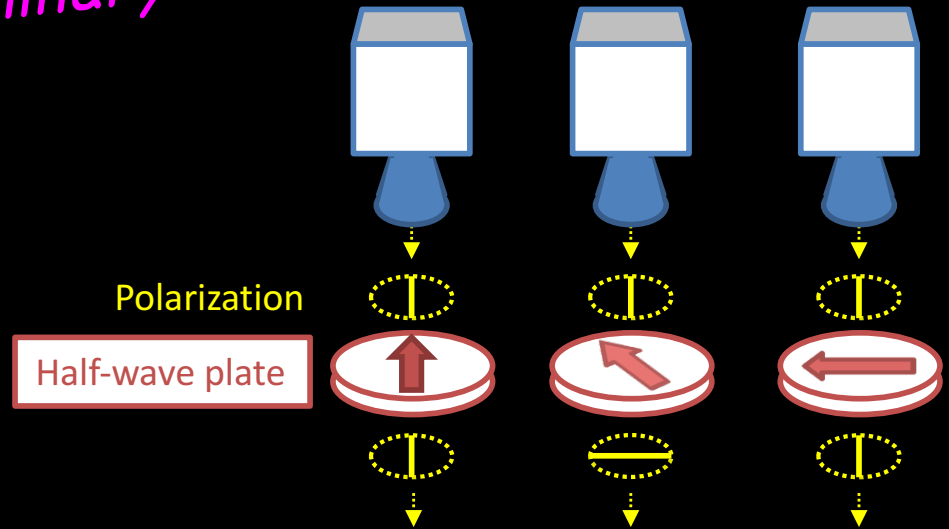
Frequency multiplier

Signal at 150GHz



Half-wave plate

*cos²θ 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
- 年度末は山の下の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)

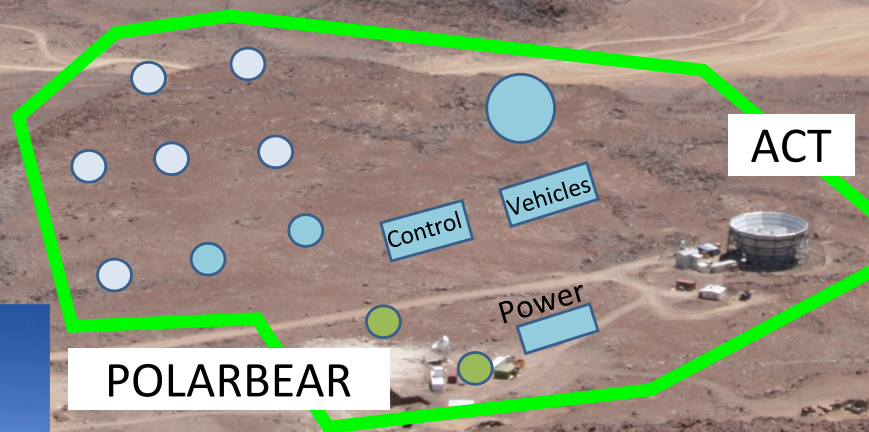
2016年5月に新発足(米国予算\$45M)

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

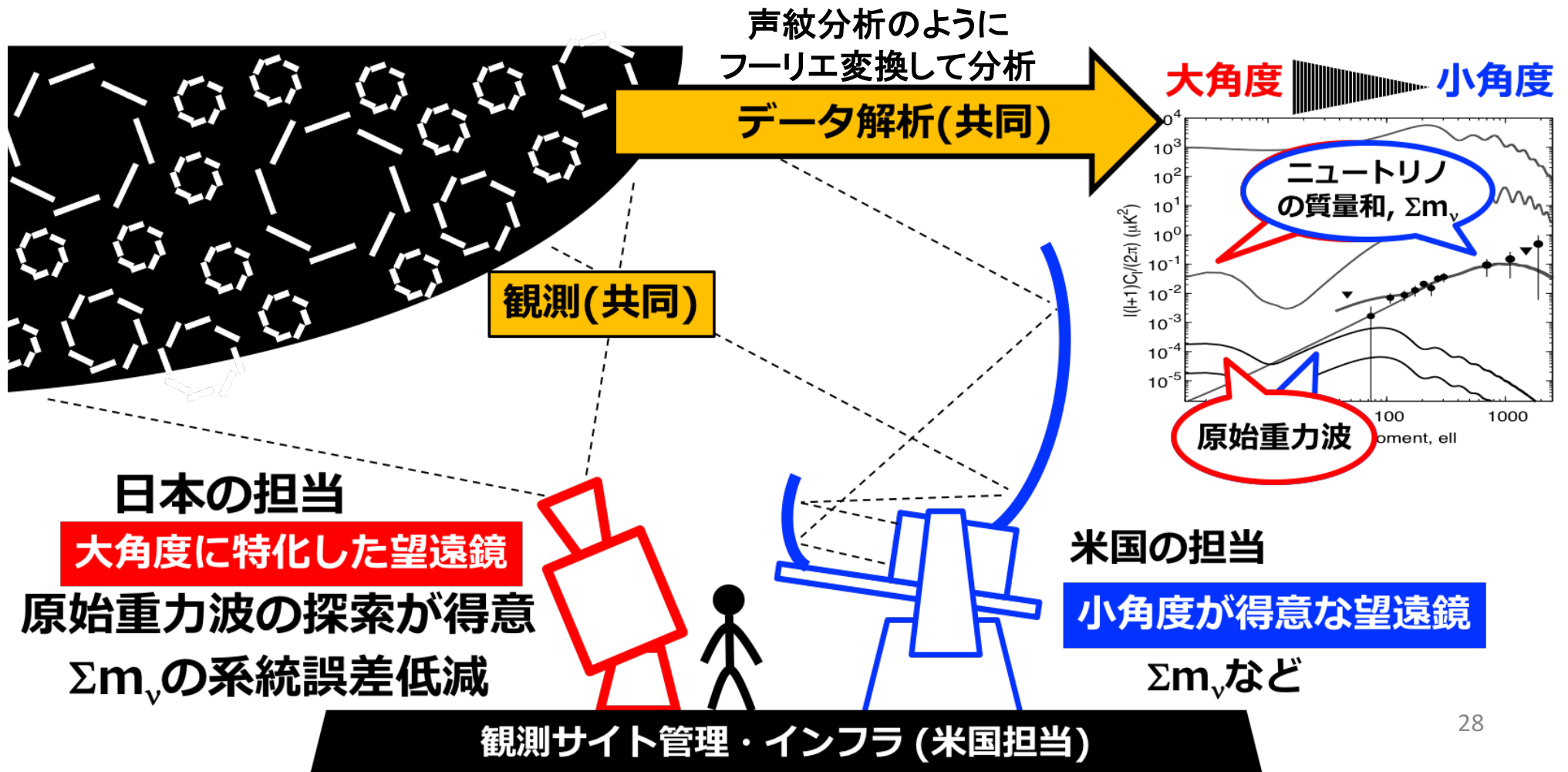


小角度が得意



小角度が得意

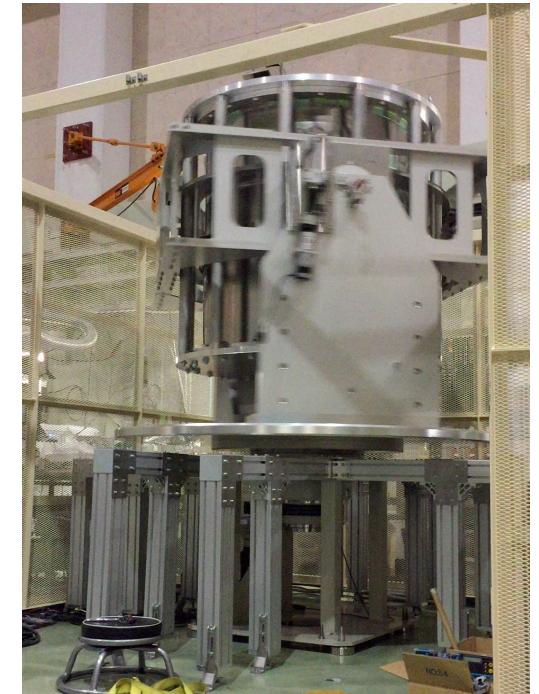
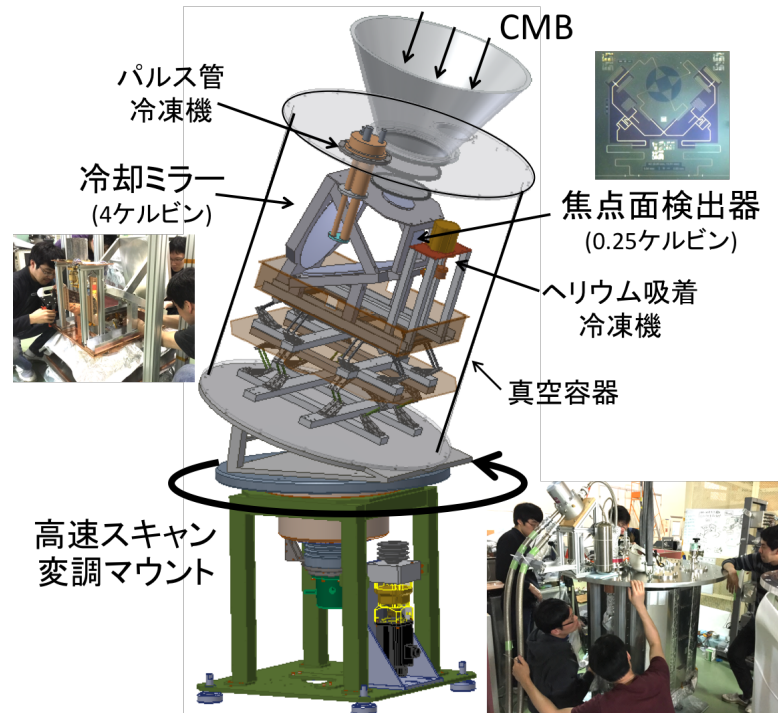
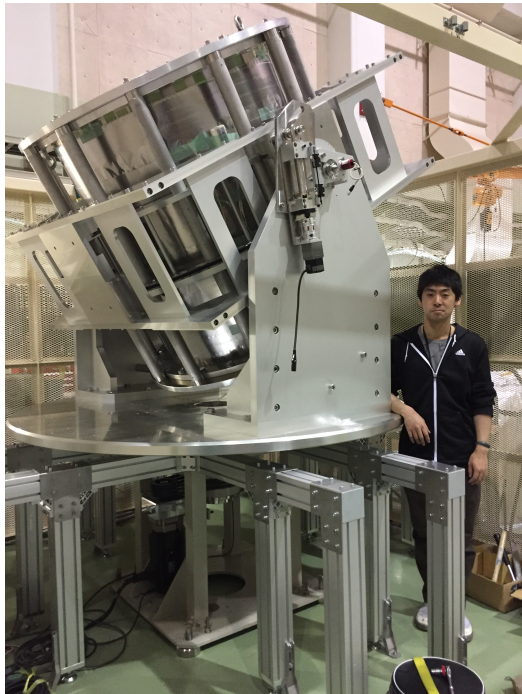
国際共同プロジェクトの中での 本課題(大型科研費)の役割



GBで培った独自性を生かす！

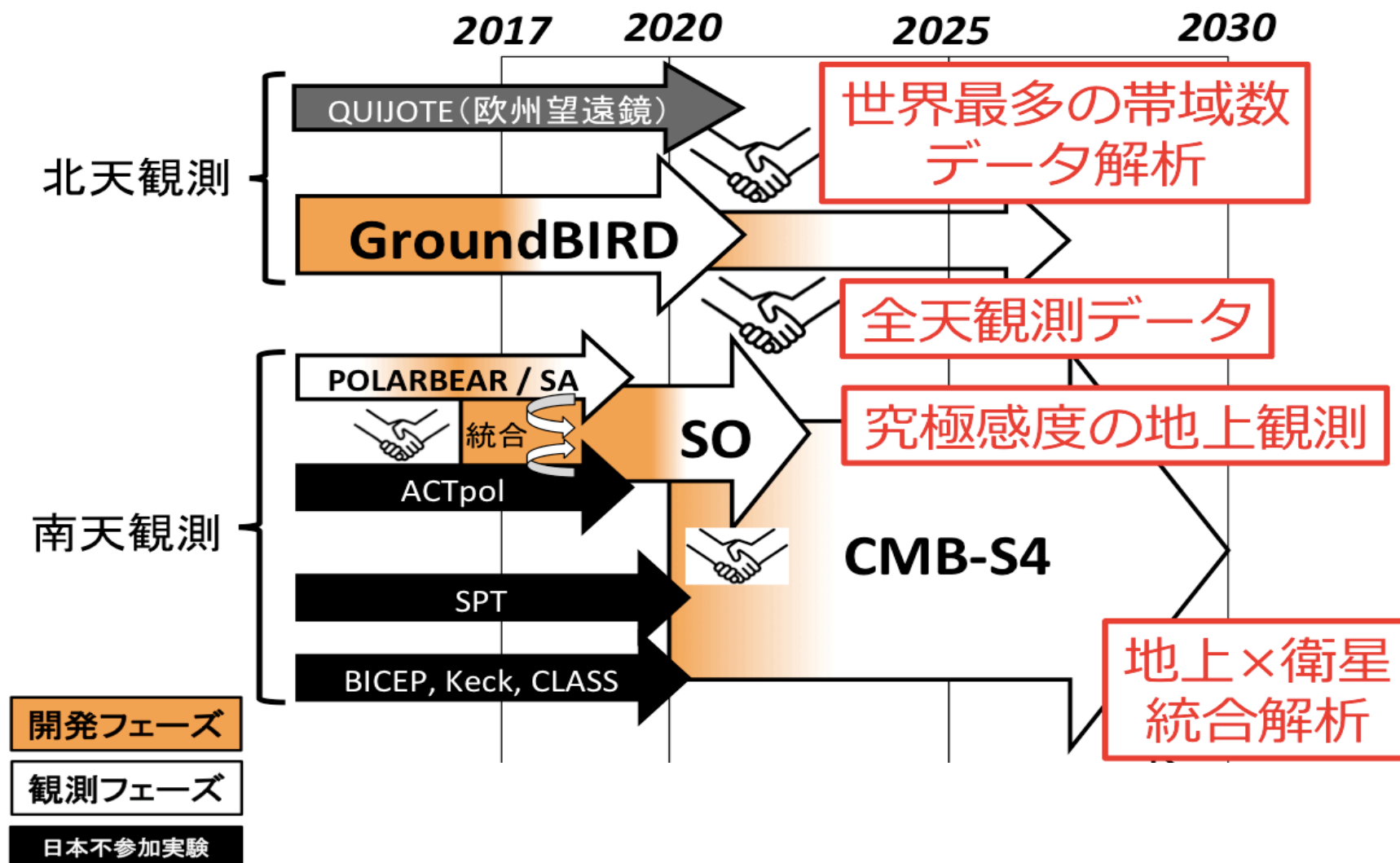
謂わばGBアップグレード機を開発、SOに導入

検出器数を10倍に！



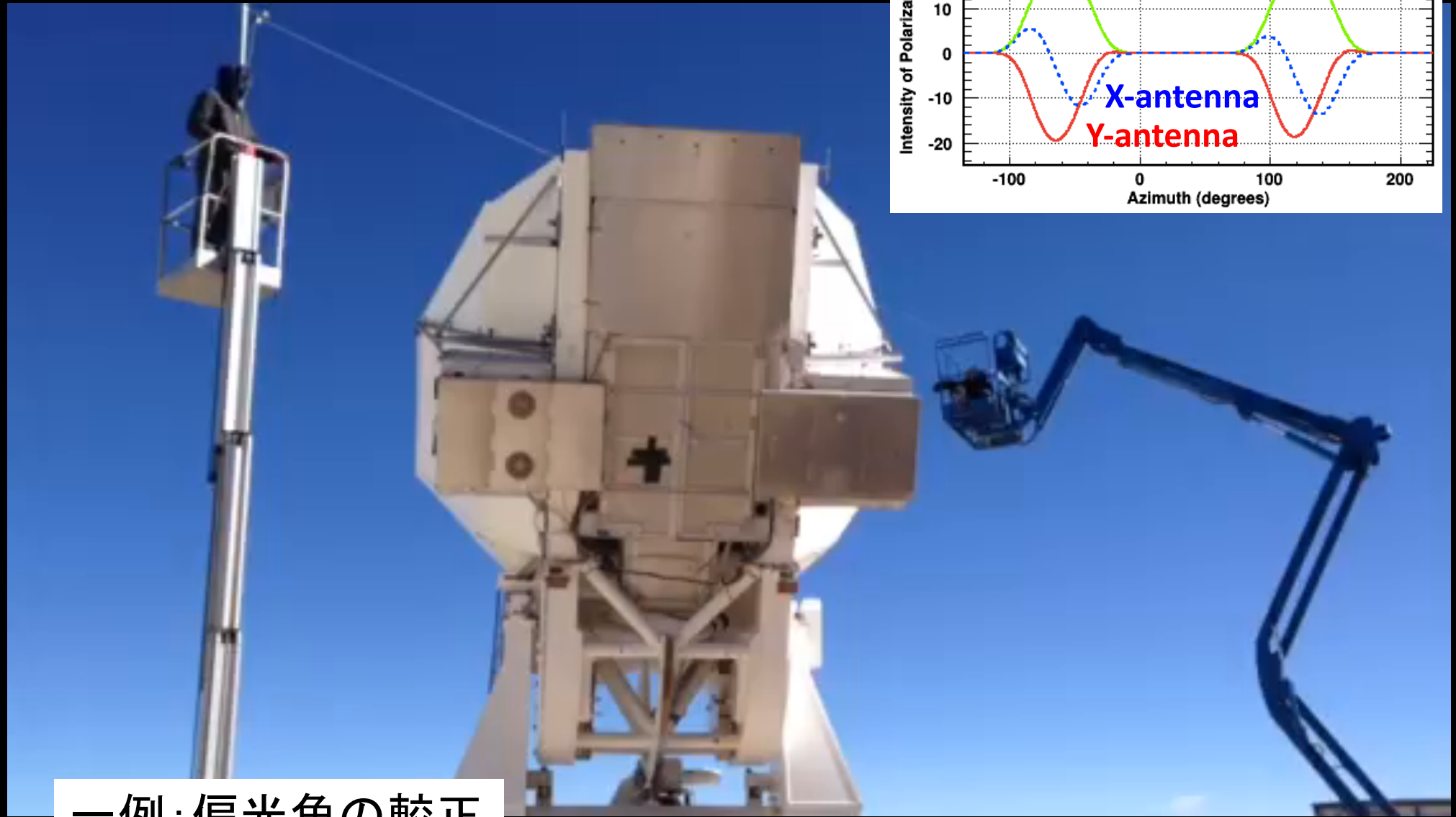
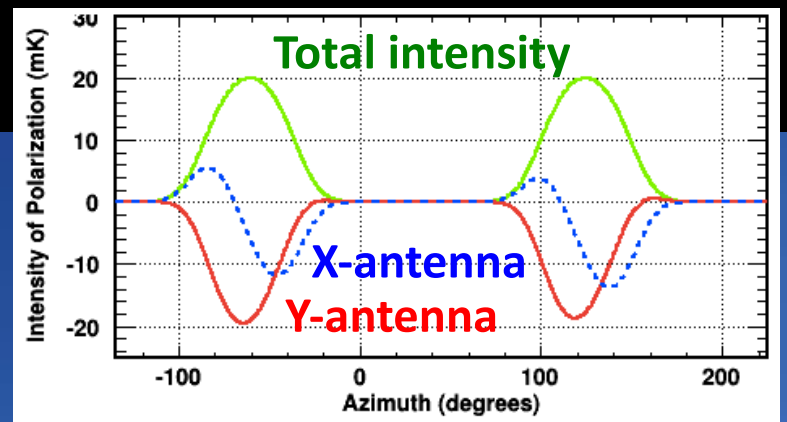
オフィシャルには、SO望遠鏡の仕様は今年度中に決める

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(+ Σm_ν 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**

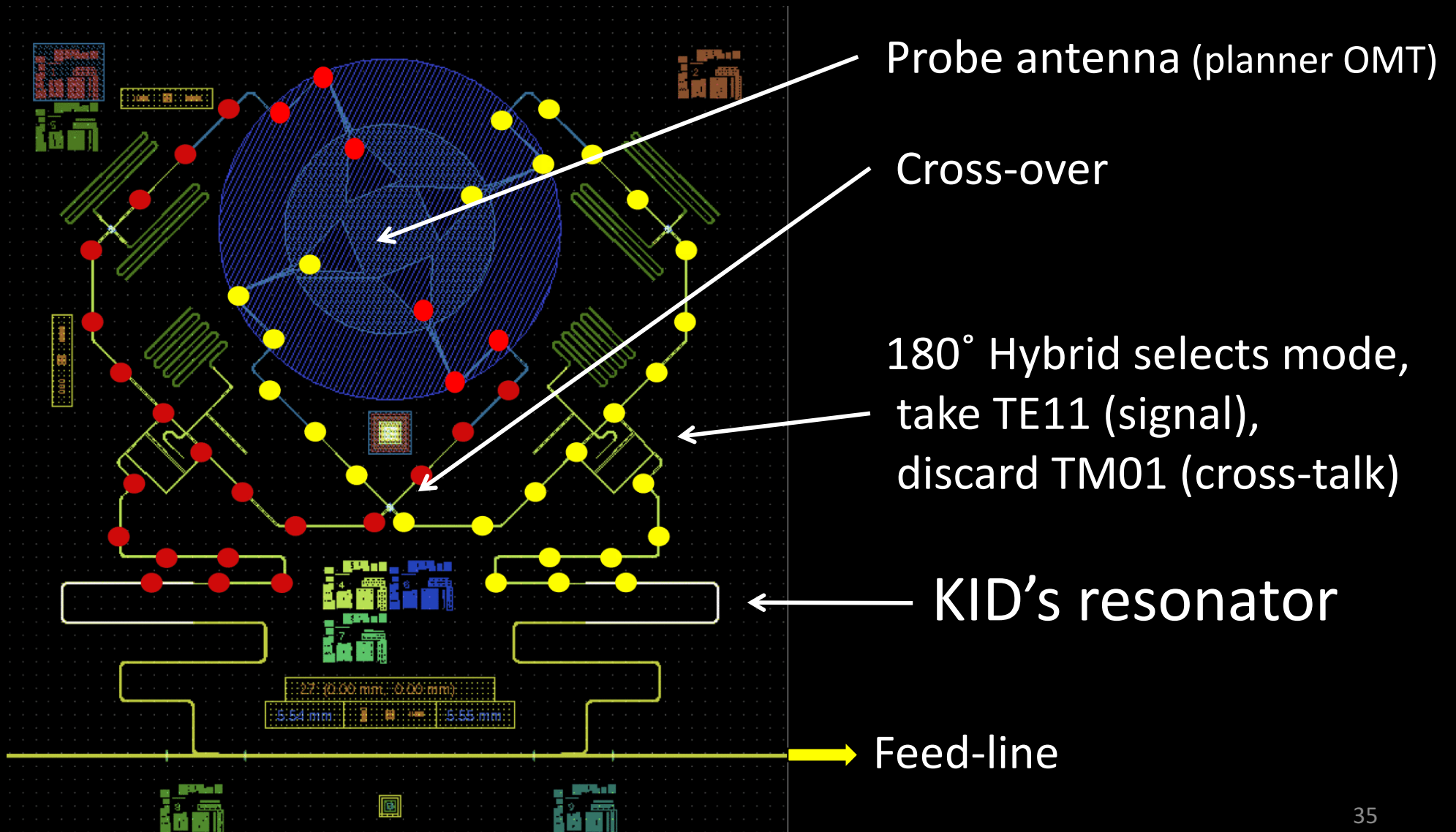
- 宇宙創成を探る、CvBの質量和など
- 超伝導物性、熱統計力学を体感

- **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



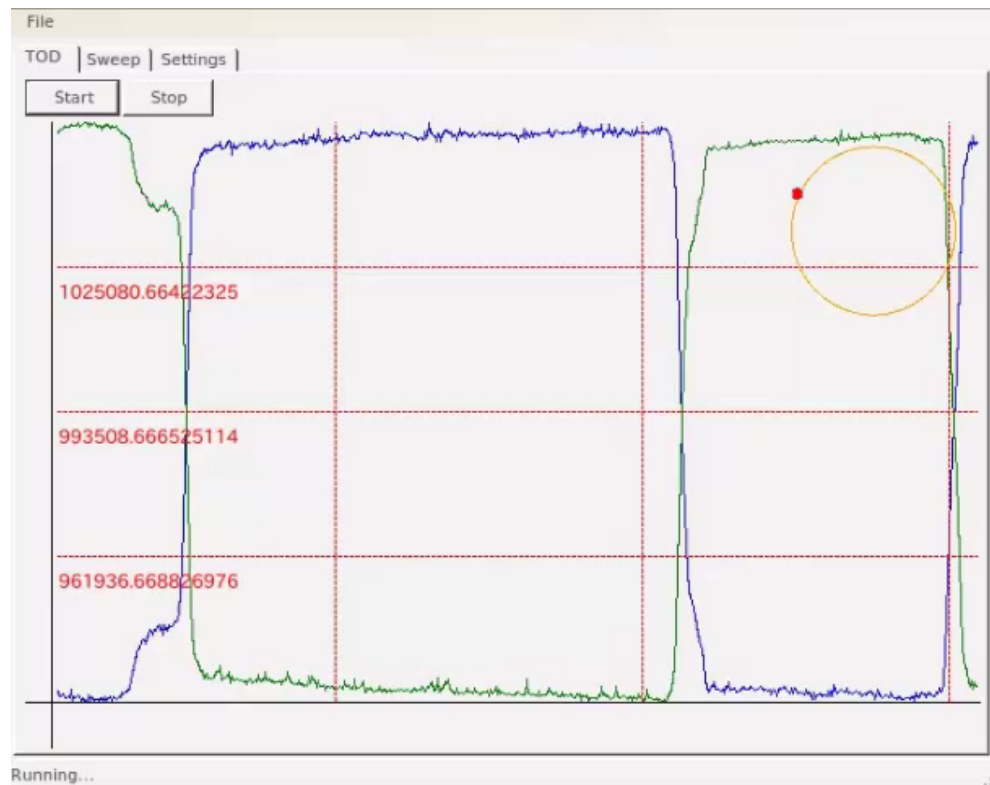
End-to-end tests

prototype detectors, electronics, and cryogenic telescope

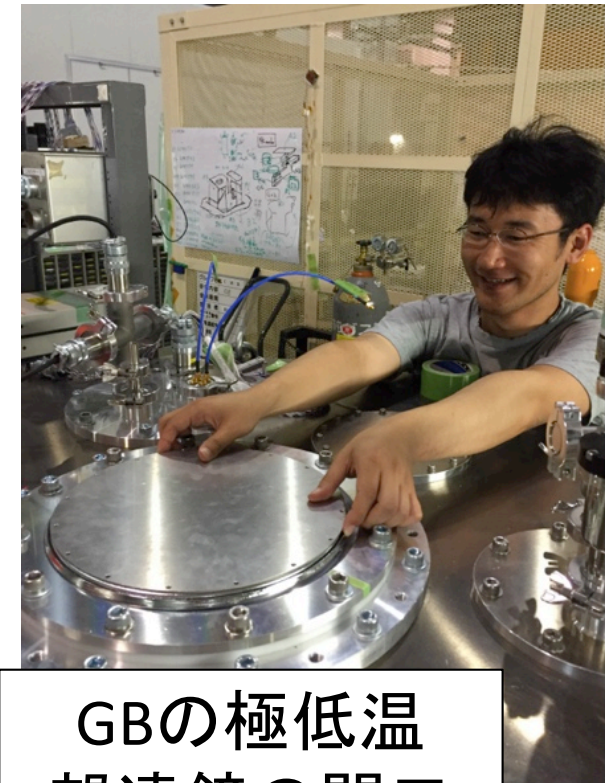
Online viewer shows detector responses as a function of time in **phase** and **amplitude**

Open/Close of aperture is On/Off of inputs

検出器レスポンス



時刻



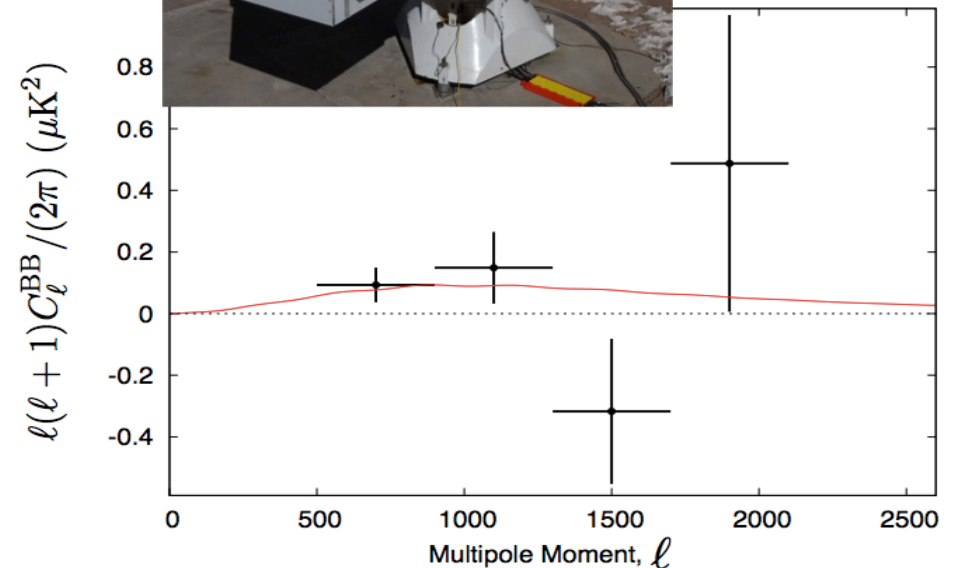
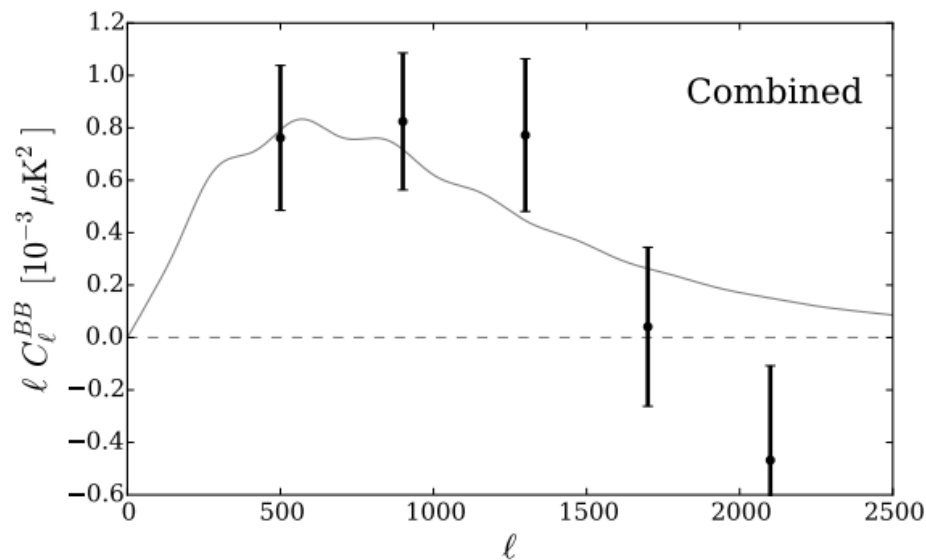
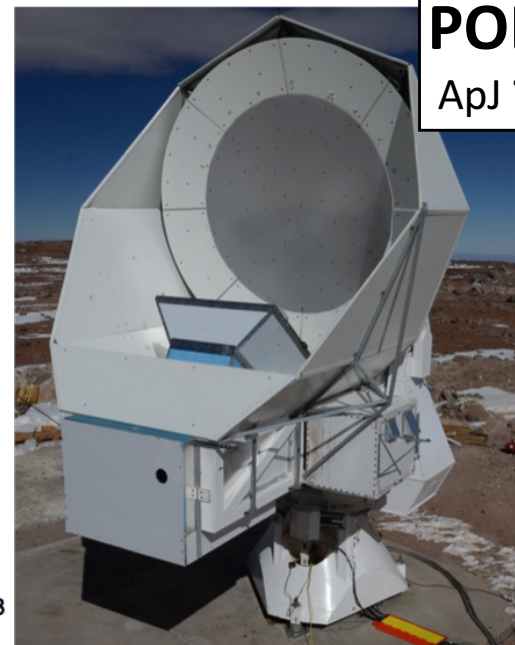
GBの極低温
望遠鏡の開口

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 4.3σ significance (SPTpol), and 97.5% C.L. (POLARBEAR)