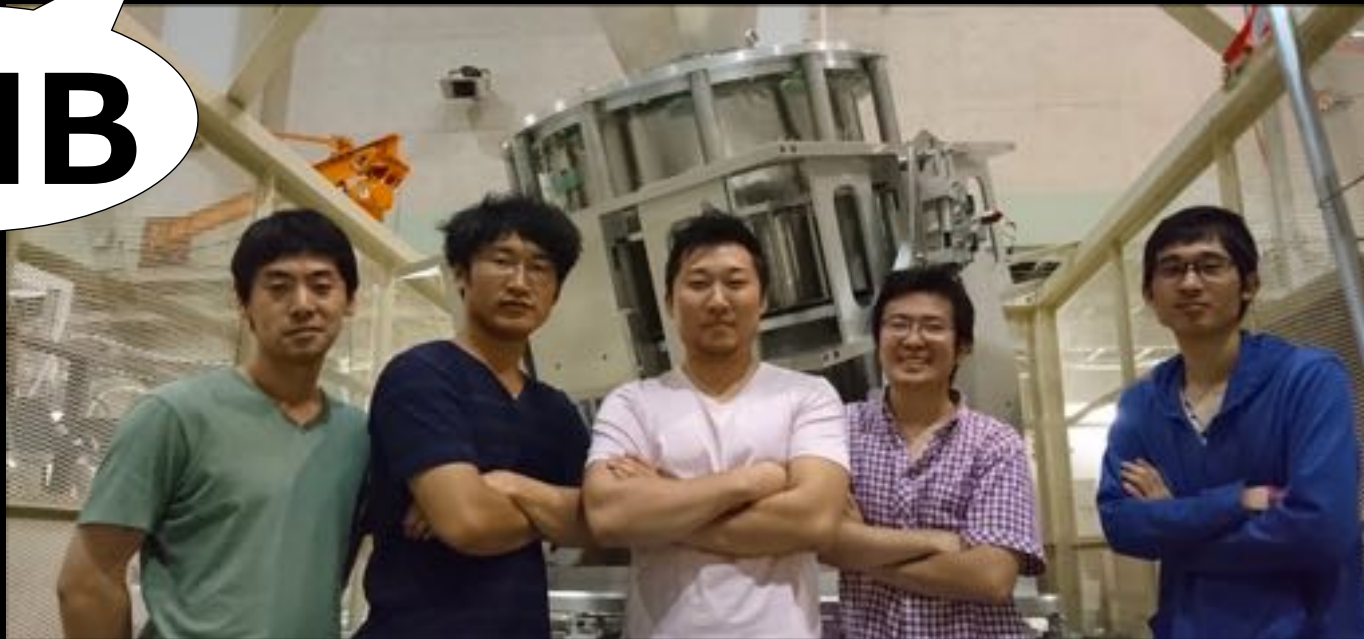


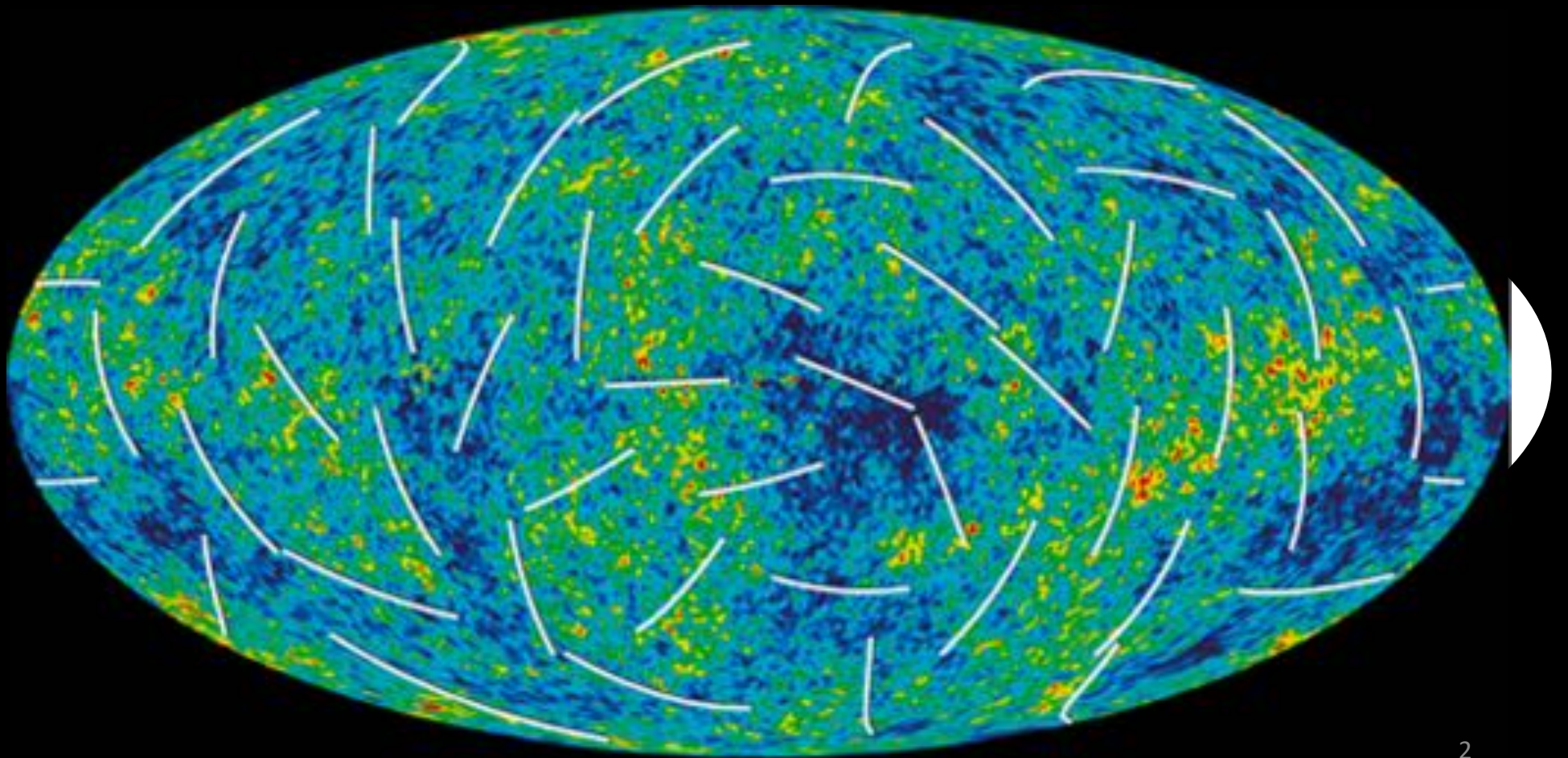
# (GB) GroundBIRD実験と 関連技術の動向・展望

CMB



田島治 (京都大学)

# 今のCMBフロンティアは 偏光パターン観測！



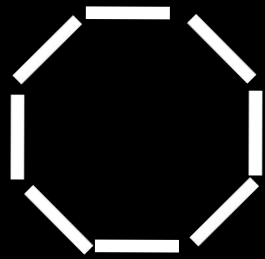
Bモードの素は？

重力レンズ

原始重力波

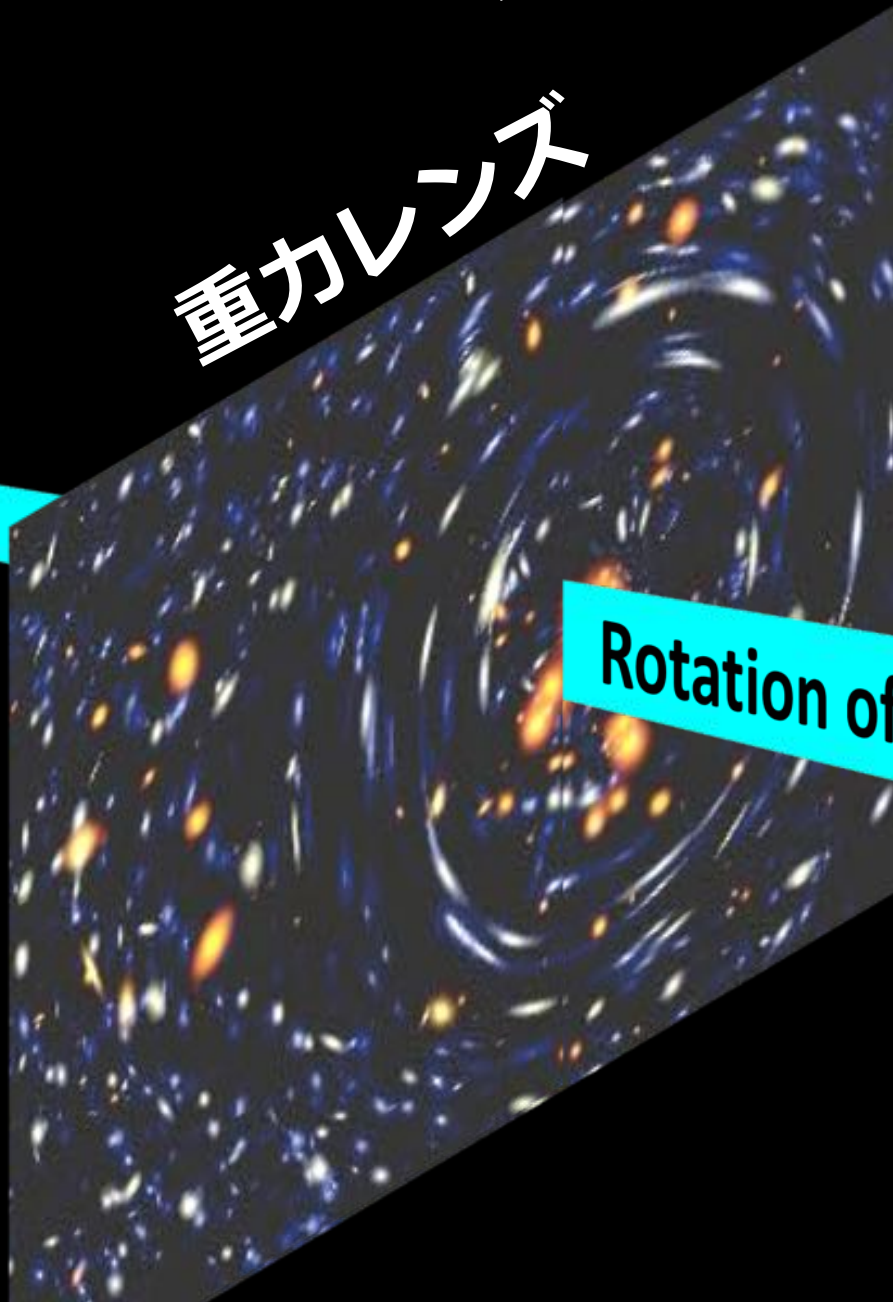
# 重カレンズBモード

Eモード



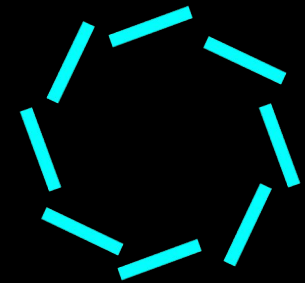
Recombination era,  
380,000 years

重カレンズ



Lensing *B*-modes  
at sub-deg. scale

Rotation of axis



Observation, today



# Lensing B-modes today

50°



5°



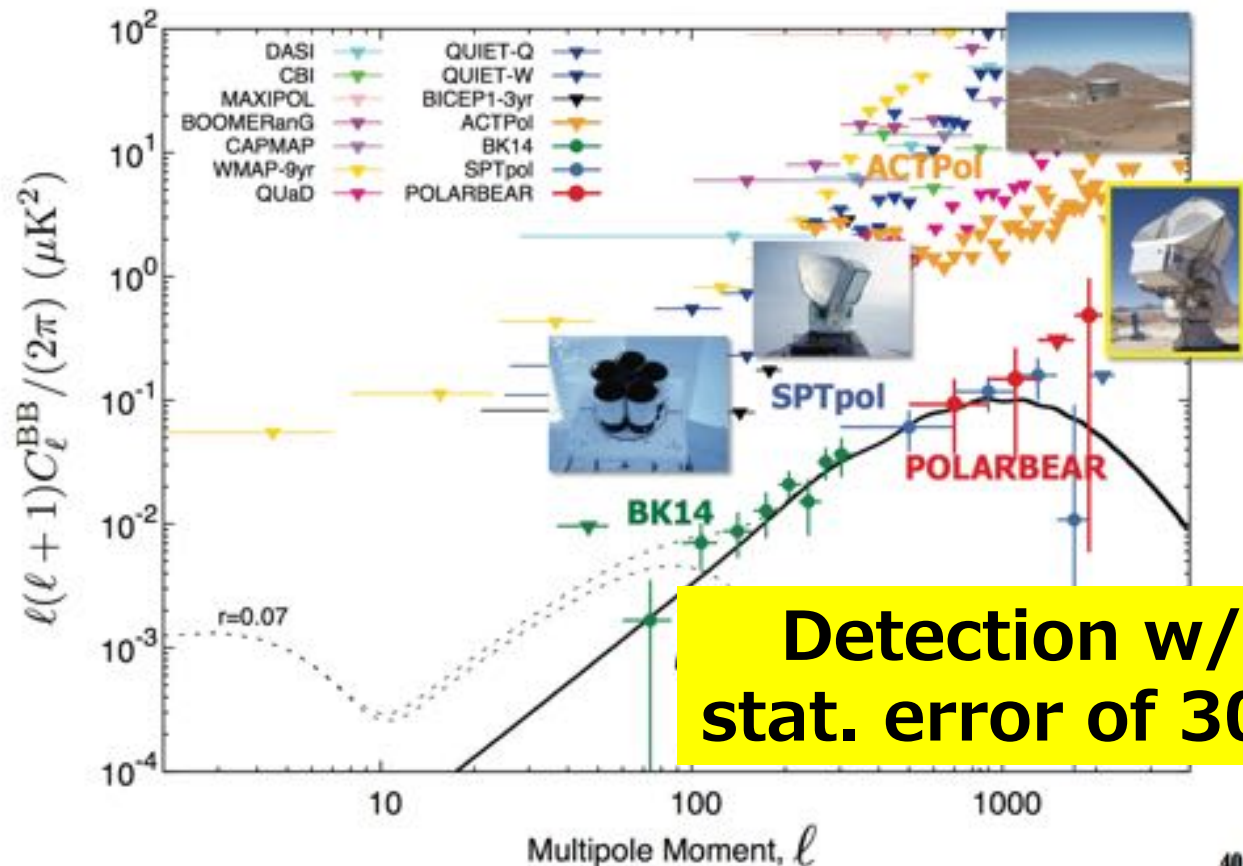
0.5°



⇔ Moon scale

ログスケール

B-mode Power



Detection w/  
stat. error of 30%

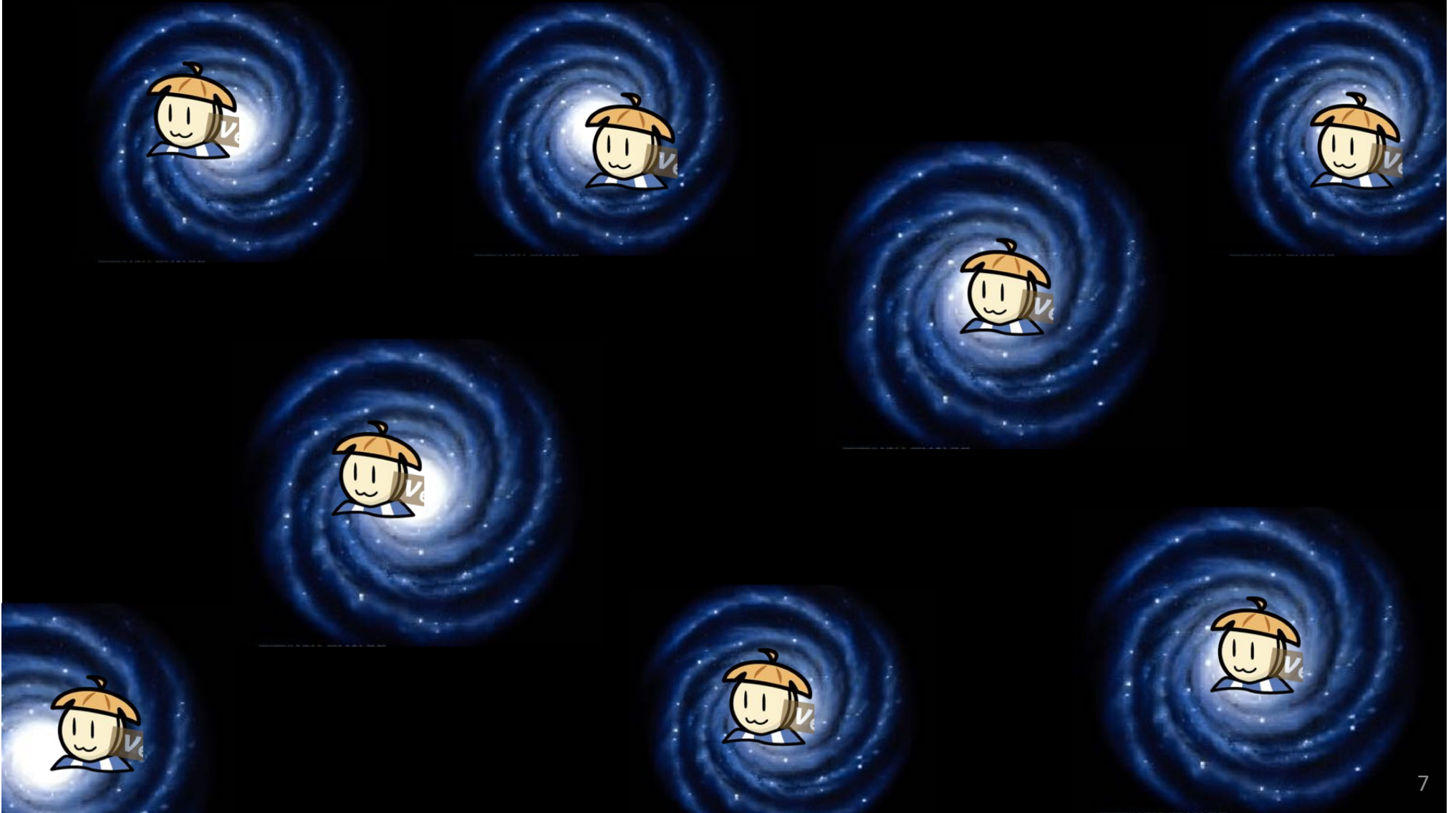
Figure credit: Y. Chinone

CMB偏光Bモード

重力レンズで測る  
ニュートリノ質量和  
 $\Sigma m_\nu$

**$\nu$ 質量の絶対値は未観測の重要課題！**

# CvB is unique massive particle NOT localized in galaxies



# Precise measurements of gravitational lens effects give knowledge about $\Sigma m_\nu$





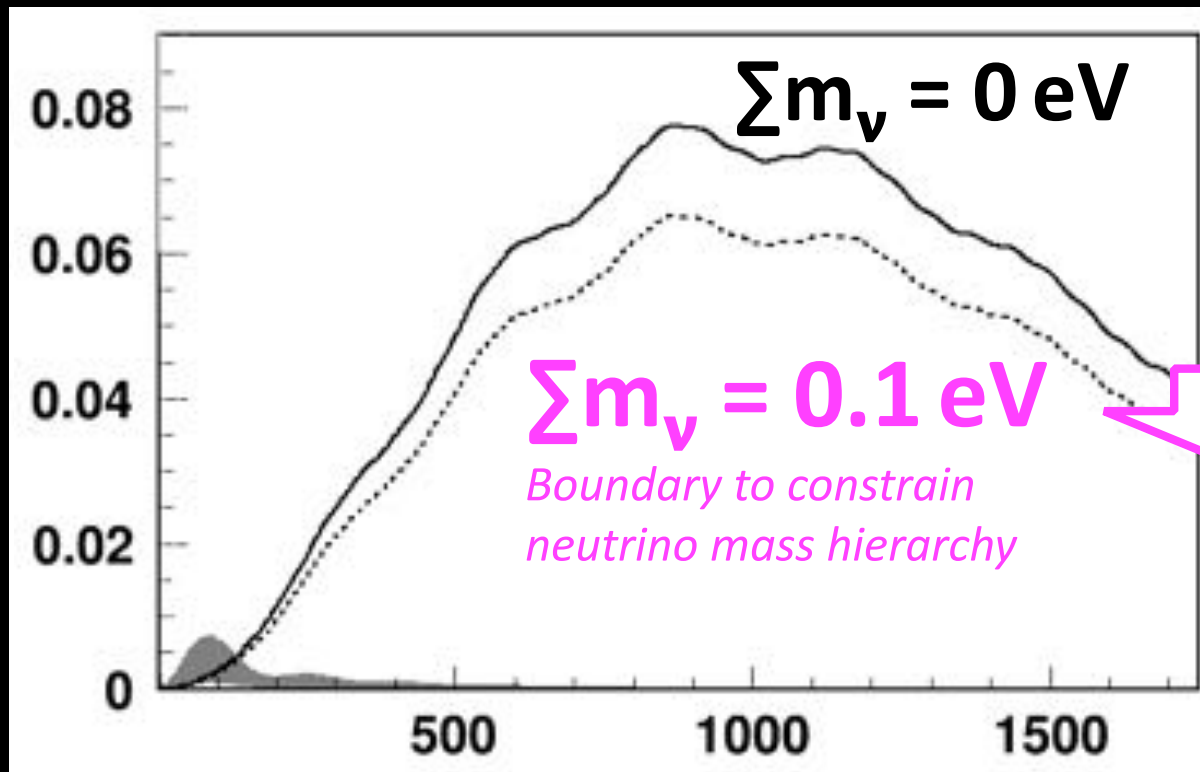
# Target statistics for $\Sigma m_\nu$ measurement ?

5°  
↓

0.5°  
↓ ⇔ Moon scale

0.2°  
↓

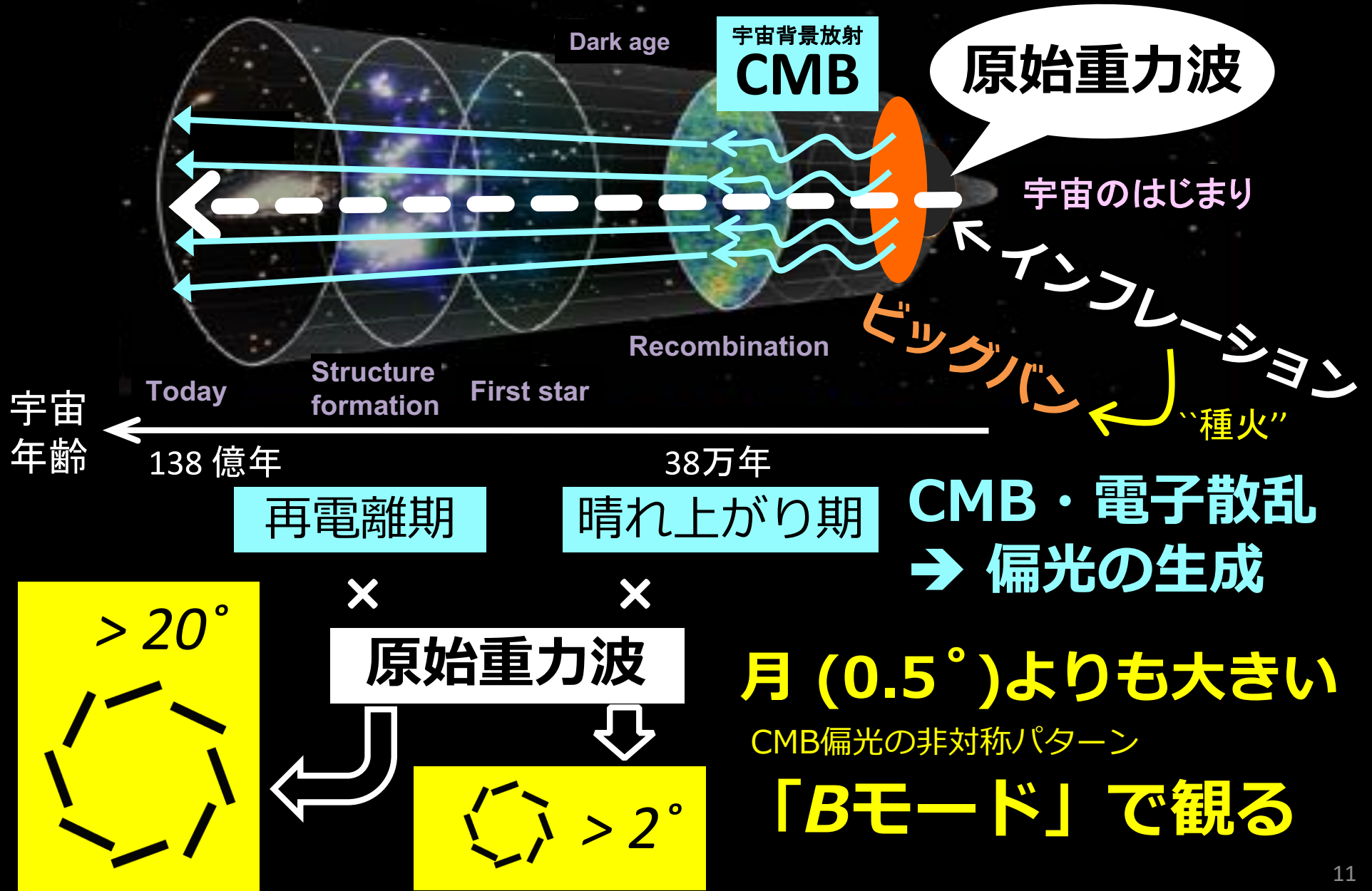
リニアスケール  
B-mode Power



Multipole /

# CMBで探る 原始の重力波

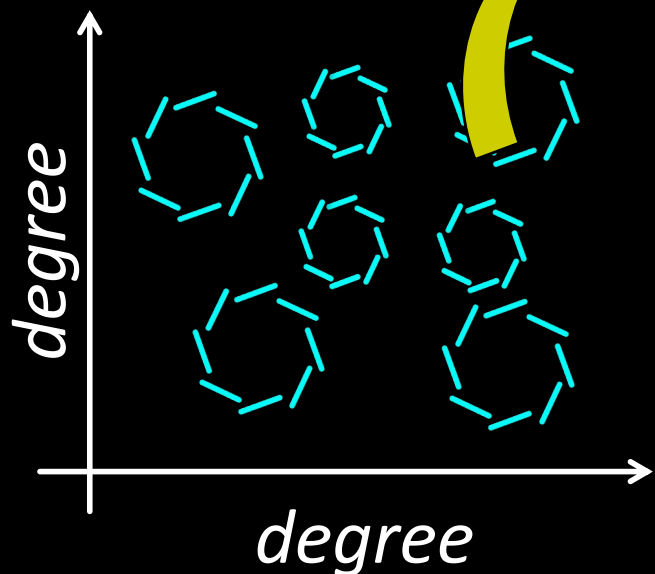
# 原始重力波を観る



# 「見る」ことの利点



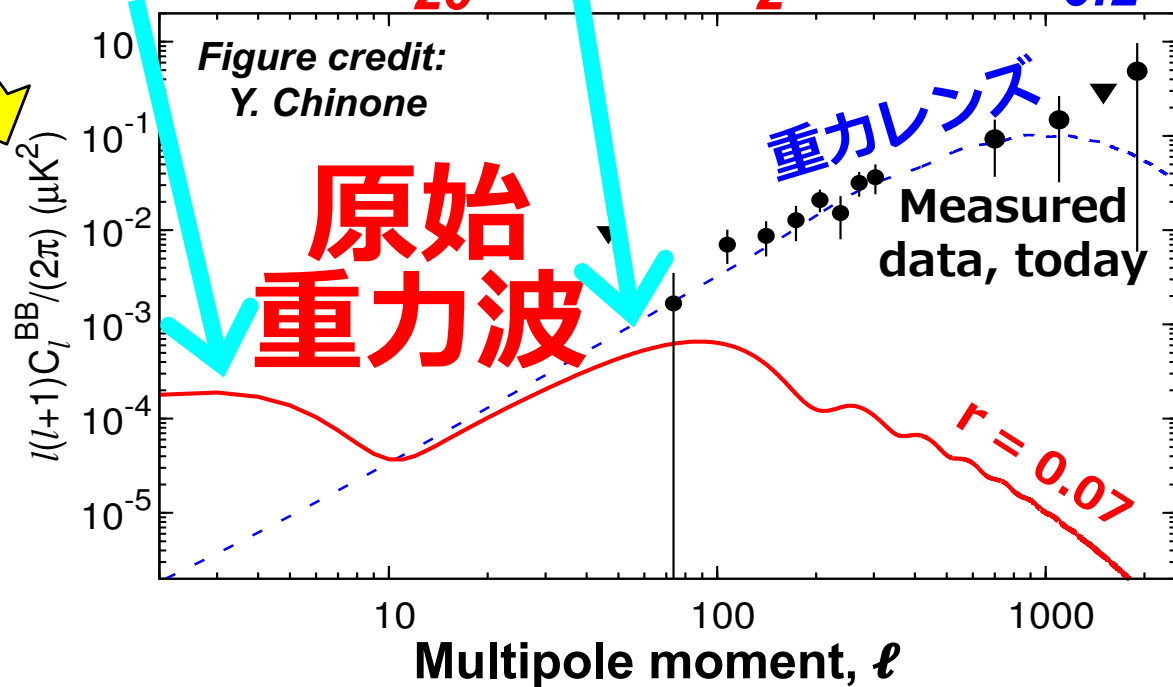
Characterization  
in Fourier space



Reionization

Recombination

Power of B-modes



# 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
  - ⇔ 究極の場の理論

# BICEP2実験

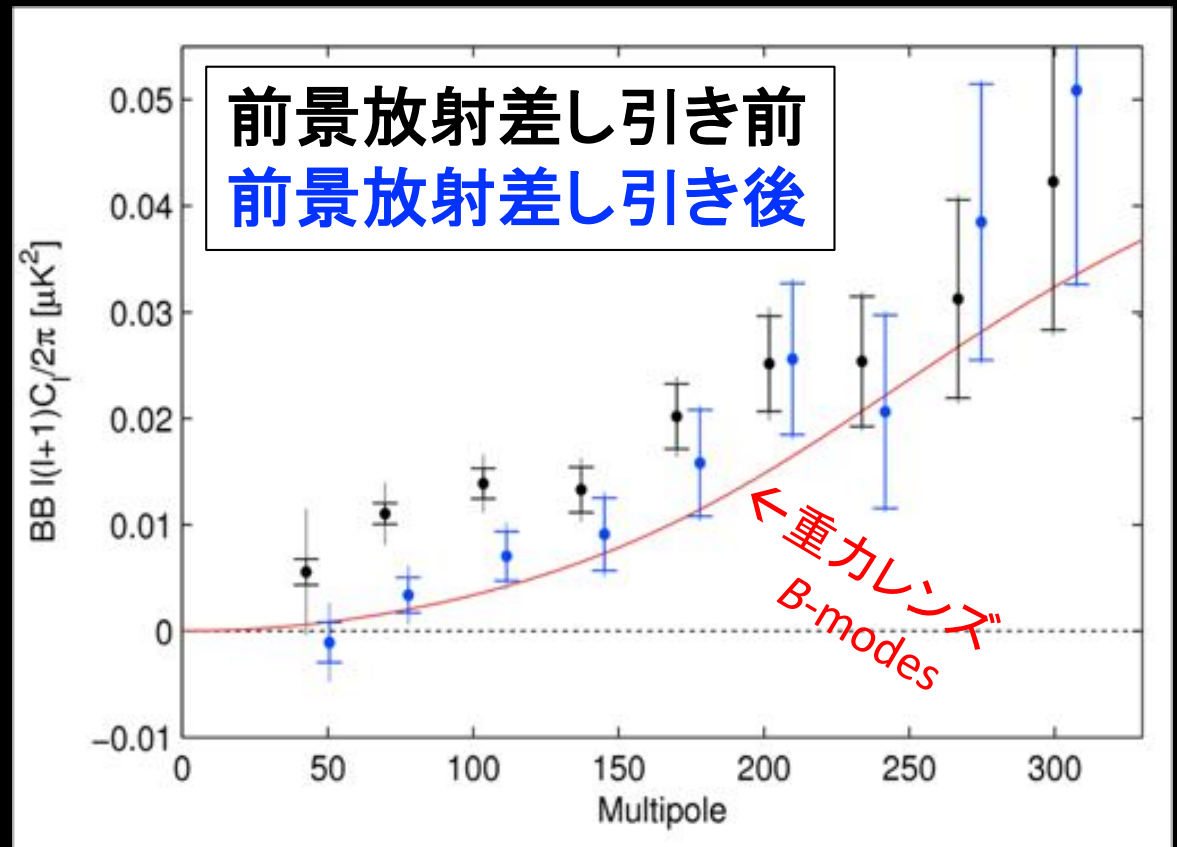
Mar. `14 → 修正Jan. `15



修正後の上限値

$r < 0.09$  (95% C.L.)

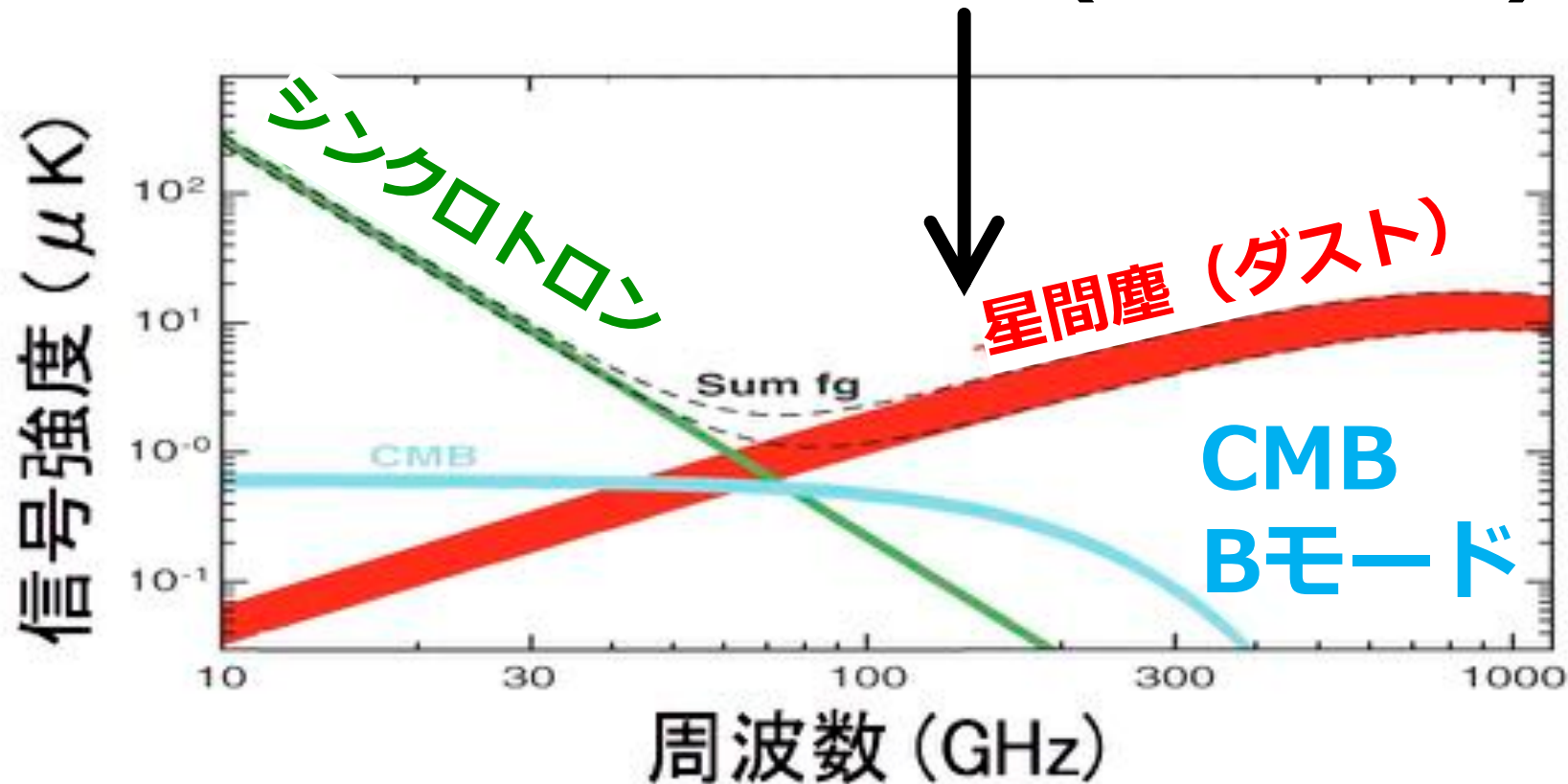
PRL 116, 031302 (2016).



前景放射の理解が重要

# 観測帯域を増やして、 前景放射の影響を差し引く

BICEP2 (2014当時)



ニ ッ チ

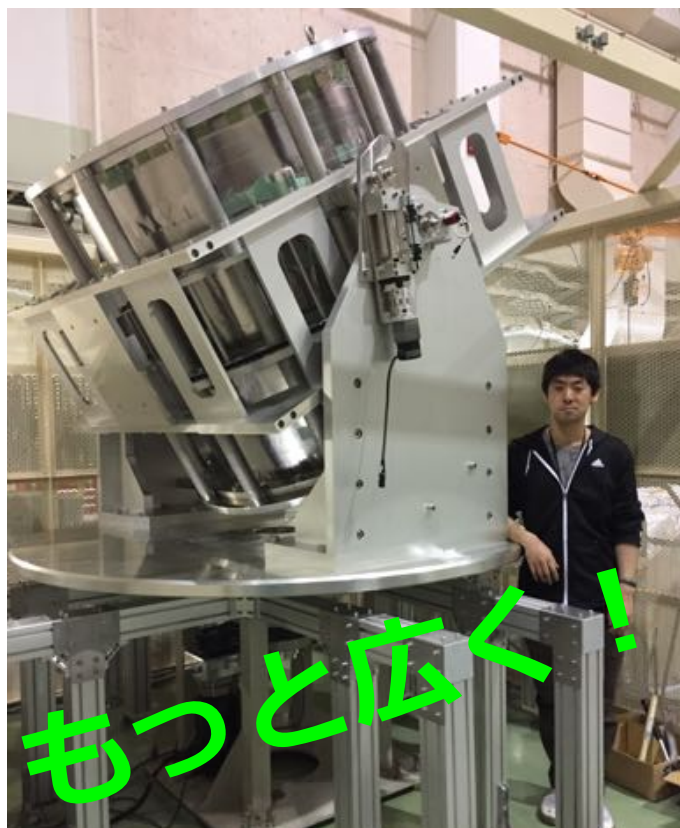
# GBと世界のトレンド

**日本独自技術！**

スペイン、韓国、オランダ

**GroundBIRD (GB)**

観測 FY2018 -

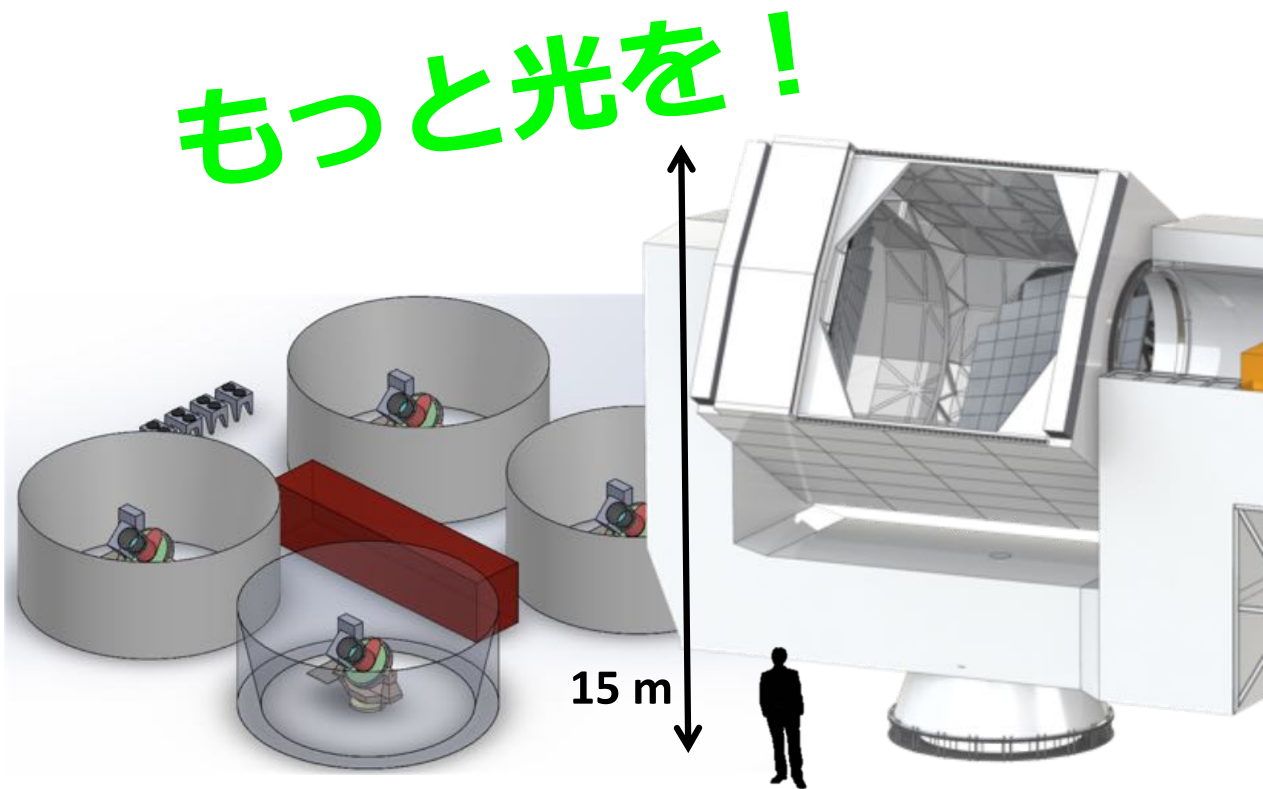


代表例 **国際共同で望遠鏡“群”**

(米英チリ)

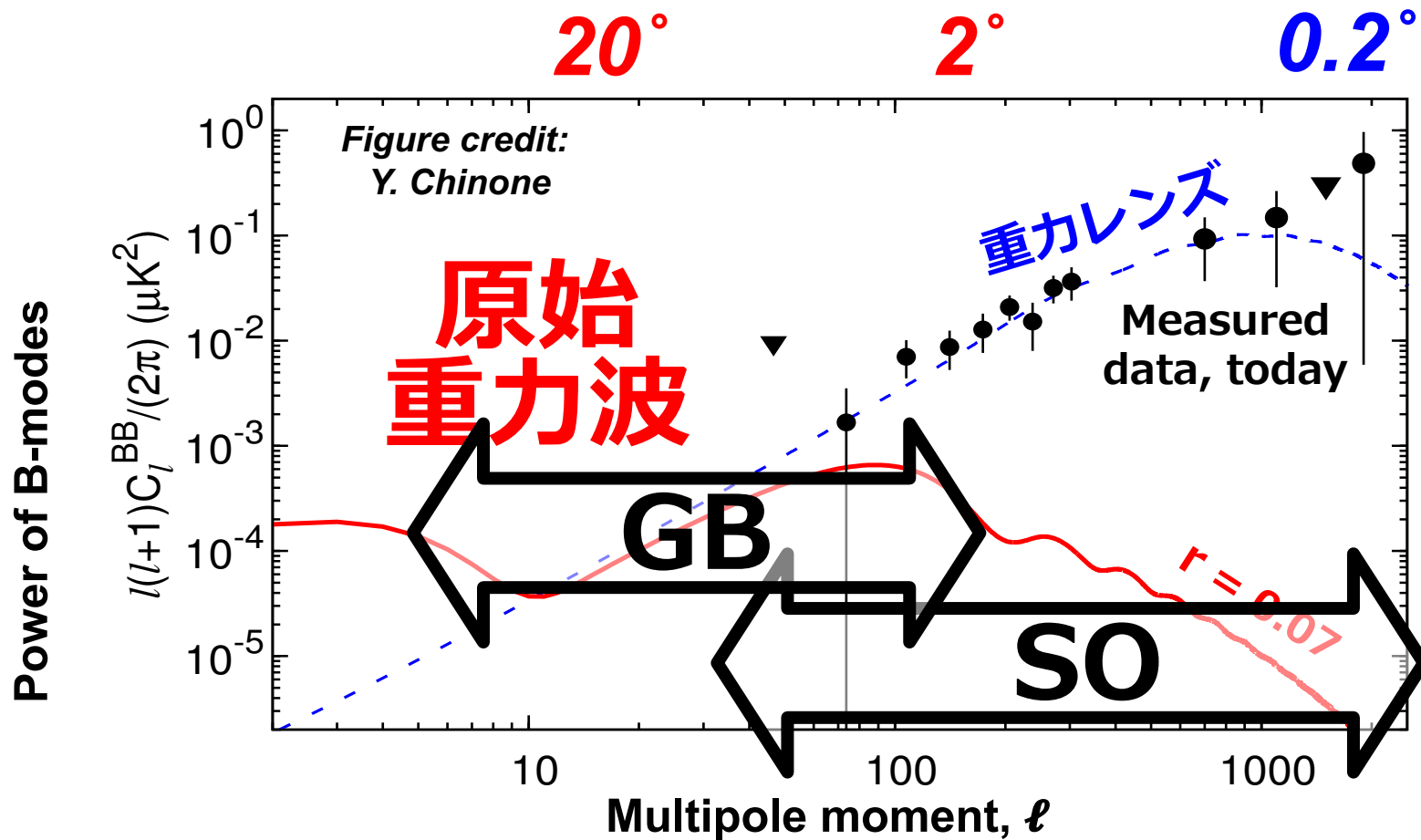
**Simons Observatory (SO)**

観測 FY2021 -





# B-modes空間スペクトル測定 を通して物理を理解する

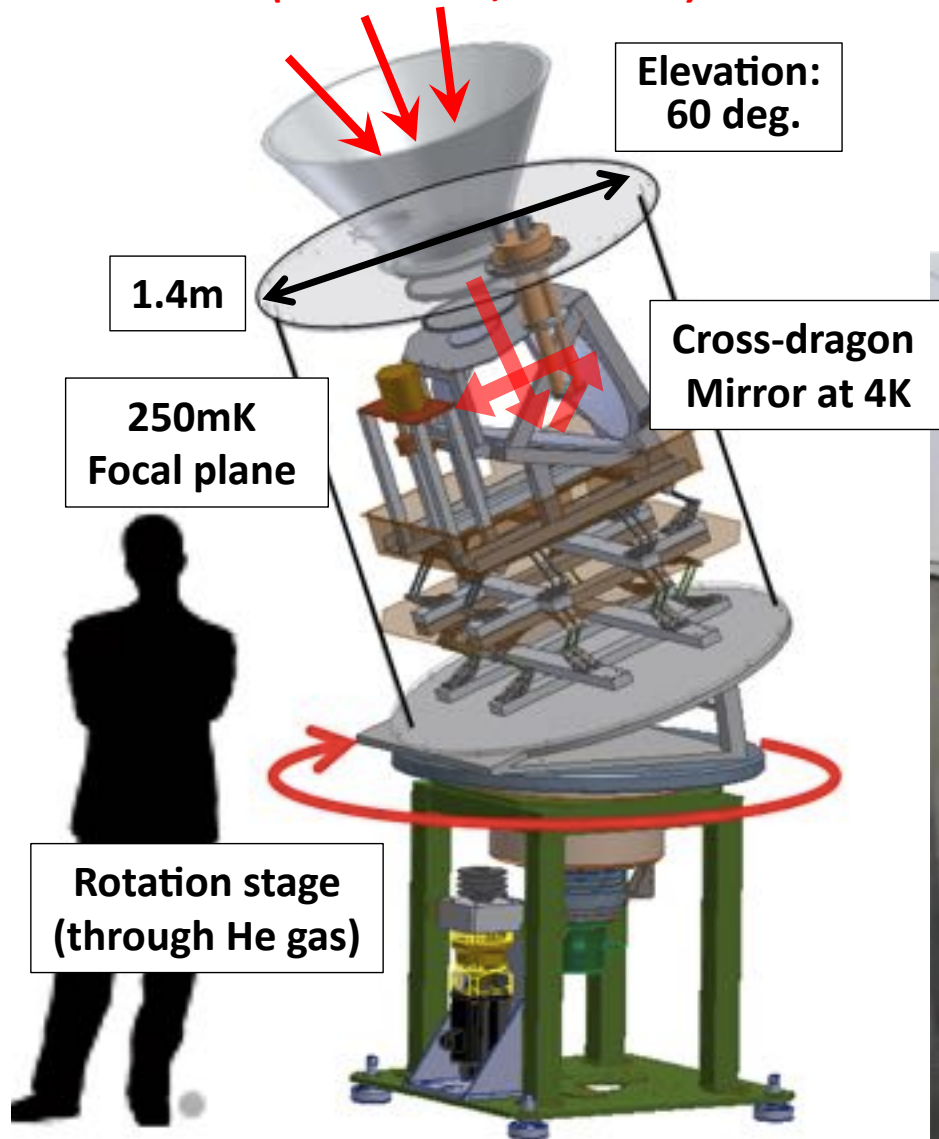


# Overview of GB

See *J. Low Temp. Phys.* 176, 691 (2014), and *Proc. SPIE* 8452, 84521M (2012).

**CMB** (FOV  $\sim 20^\circ$ ,  $\vartheta \sim 0.6^\circ$ )

**Super high-speed scan modulation  
( $120^\circ/\text{s}$ ) mitigates effects of  
atmospheric fluctuation**





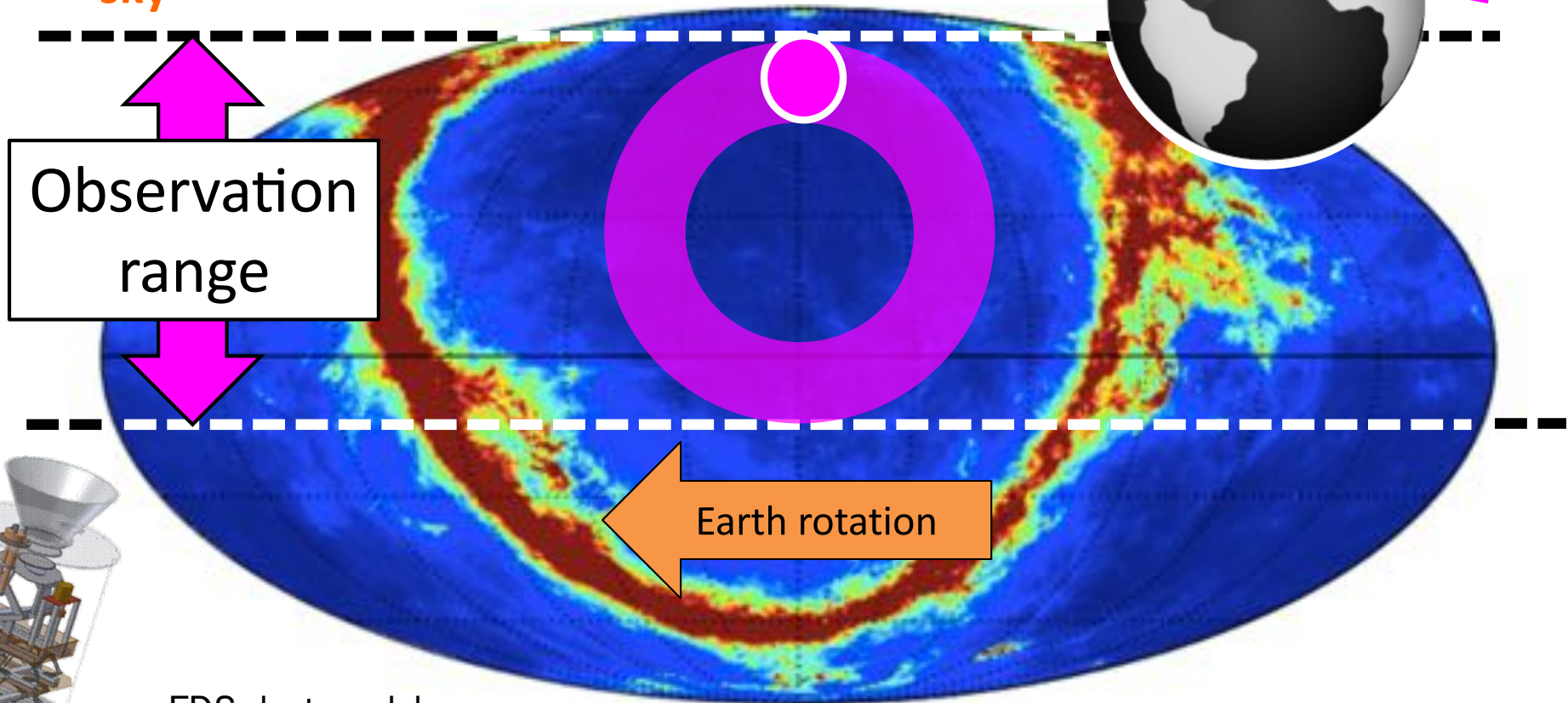
**“Mecca” of astronomical observation**  
**Fine weather above clouds at 2,400 m altitude**



# Super high-speed scan modulation provides us wide sky coverage !

Troidal coverage w/ single rotation

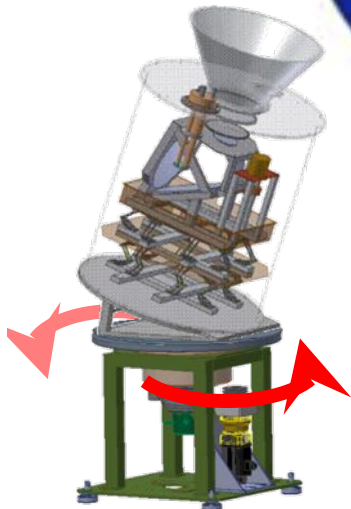
$f_{\text{sky}} \approx 0.5$  > Current ground-based x10



Observation range

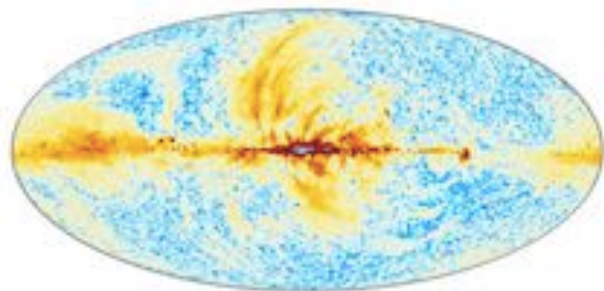
Earth rotation

FDS dust model @ 94GHz



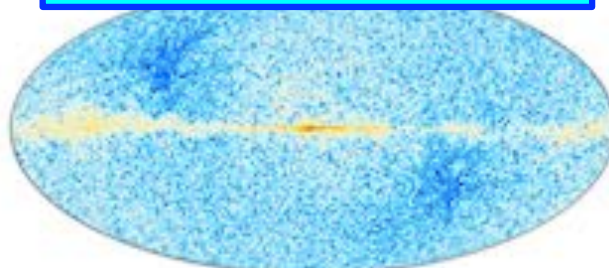
# 世界最多帯域での前景放射対策

QUIJOTE (スペイン)



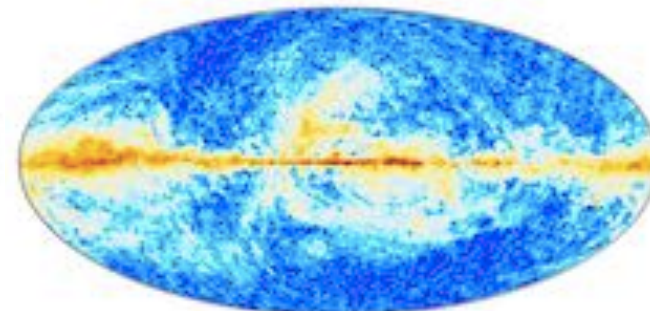
10, 20, 30, 40 GHz  
(図はPlanck衛星の30GHz)

国際連携のNEW!  
(日本×スペイン)

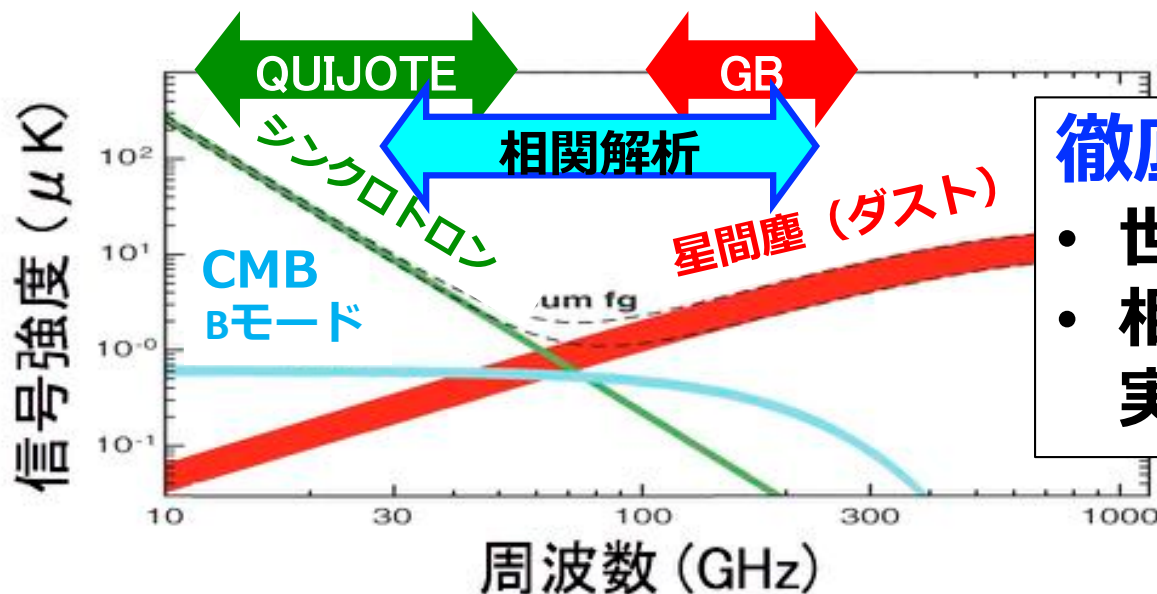


相関解析

GroundBIRD (日本)



145, 220 GHz  
(図はPlanck衛星の145GHz)



徹底した前景放射対策

- 世界最多の帯域数
- 相関解析により新たな実効帯域を創出

A photograph of five men standing in a row in front of a large, complex piece of scientific equipment, identified as the GB telescope at KEK. The men are dressed in casual attire like t-shirts and button-down shirts. The background shows the intricate metal framework and various components of the telescope. A red ribbon is tied to a vertical pole on the right side of the frame.

**GB望遠鏡 @ KEK**

**小栗秀悟  
(理研)**

**鈴木惇也  
(KEK)**

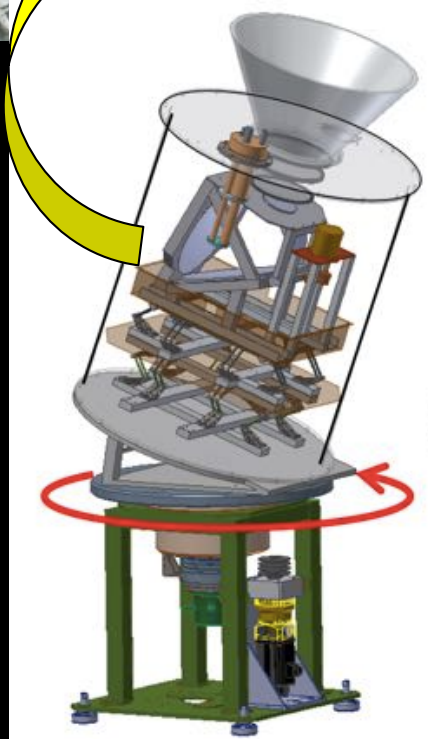
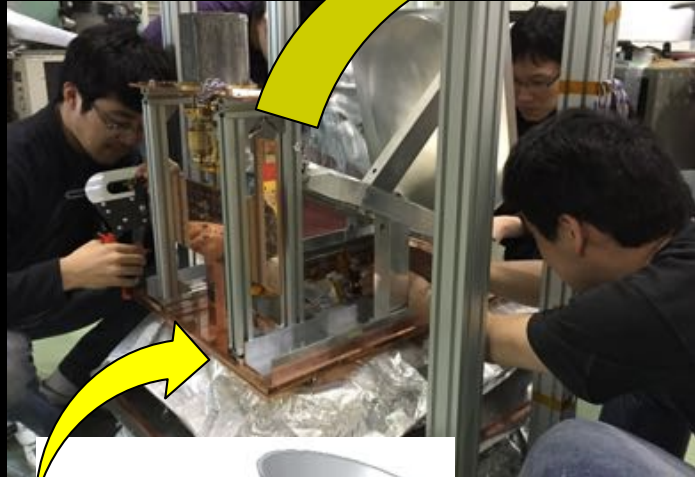
**長崎岳人  
(KEK)**

**小峯順太  
(京大)**

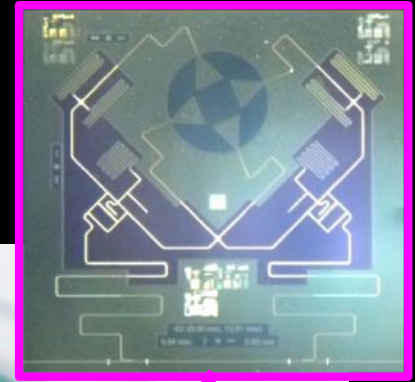
**沓間弘樹  
(東北大)**

# 国産のMKIDsアレイ

Acknowledgements:  
NAOJ, TUDelft/SRON



110個の検出器  
信号を配線一対  
で読み出す！



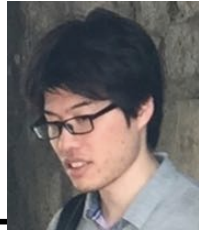
K. Kiuchi, S. Mima, T. Nagasaki

# MKIDs electronics for GB

**120-MUX dead-time-free in 1 kSpS**

( 64-MUX for CMB currently deployed )

H. Ishitsuka



DA/AD interface board "RHEA"  
 $\Delta f = 250 \text{ MHz}$

TCP/UDP



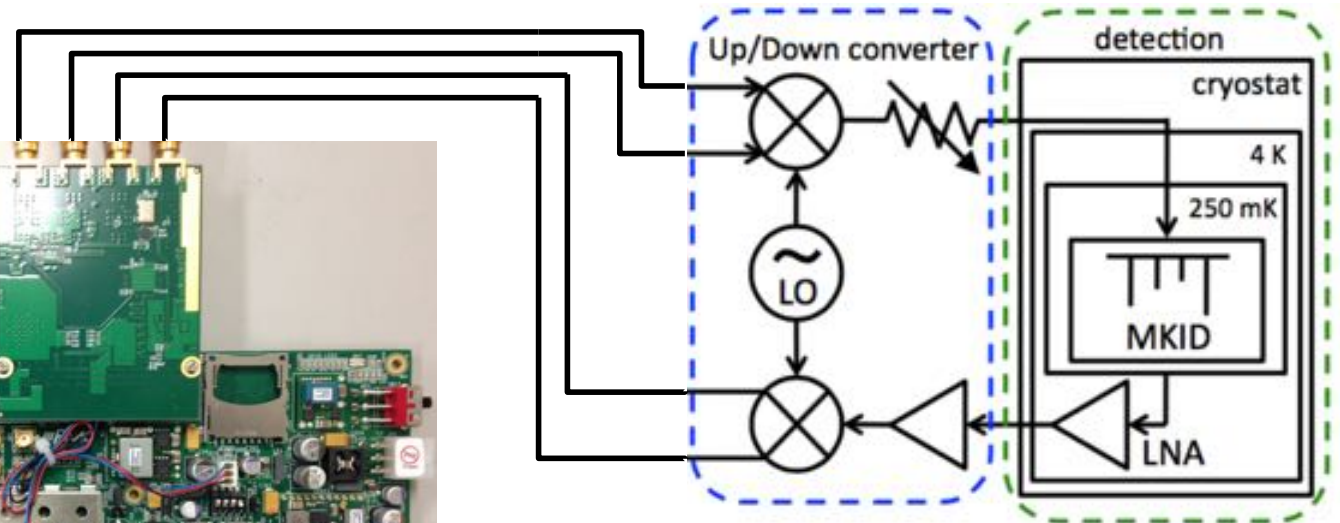
FPGA board (KCU105)



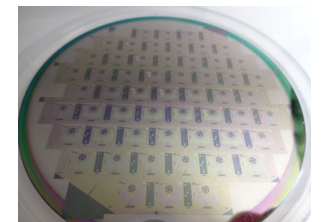
J. Suzuki



S. Oguri



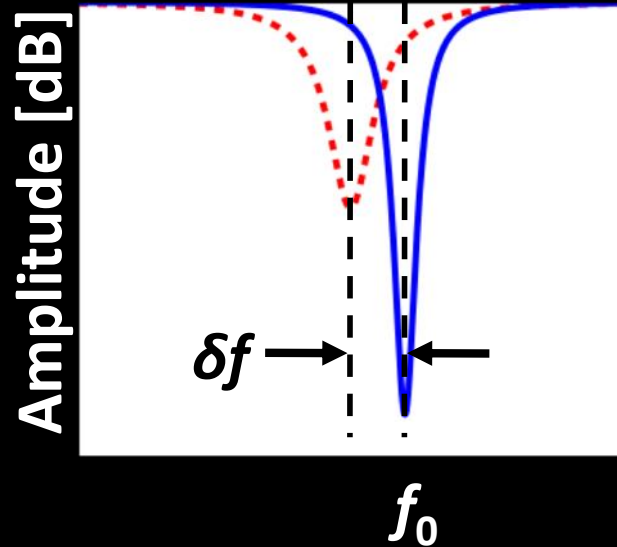
MHz  $\leftrightarrow$  GHz Resonant freq.  
conversion 4 – 8 GHz



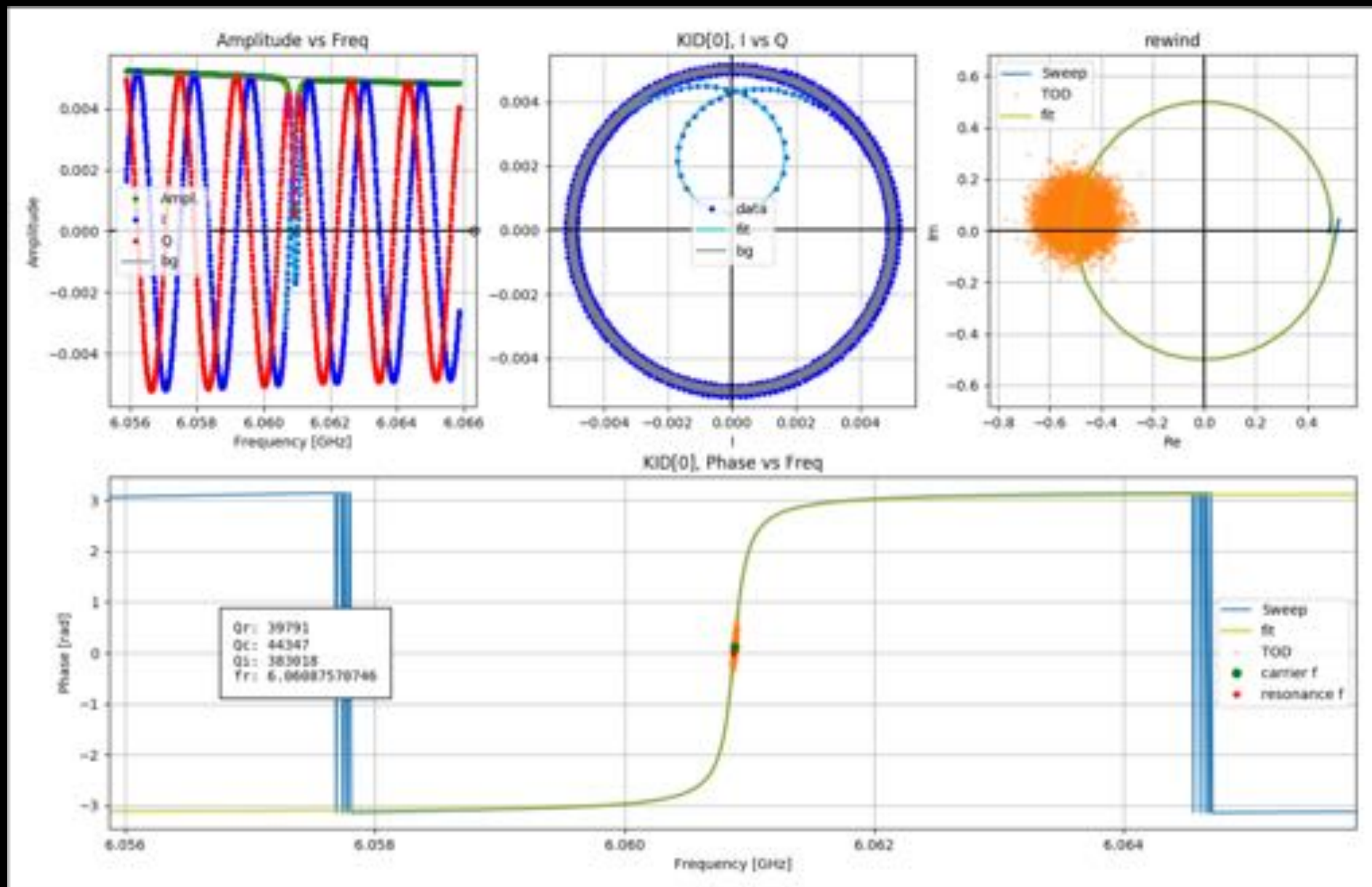


観測にむけたソフトの充実

# Auto-peak finder



# Semi-auto peak analyzer

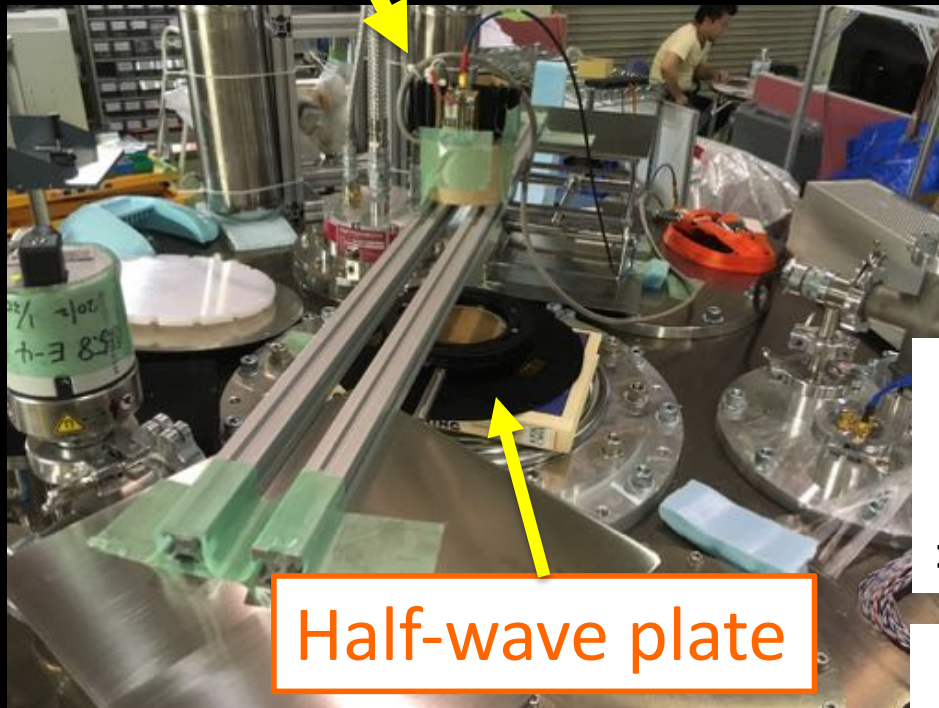


# 偏光信号の測定デモ

*Preliminary*

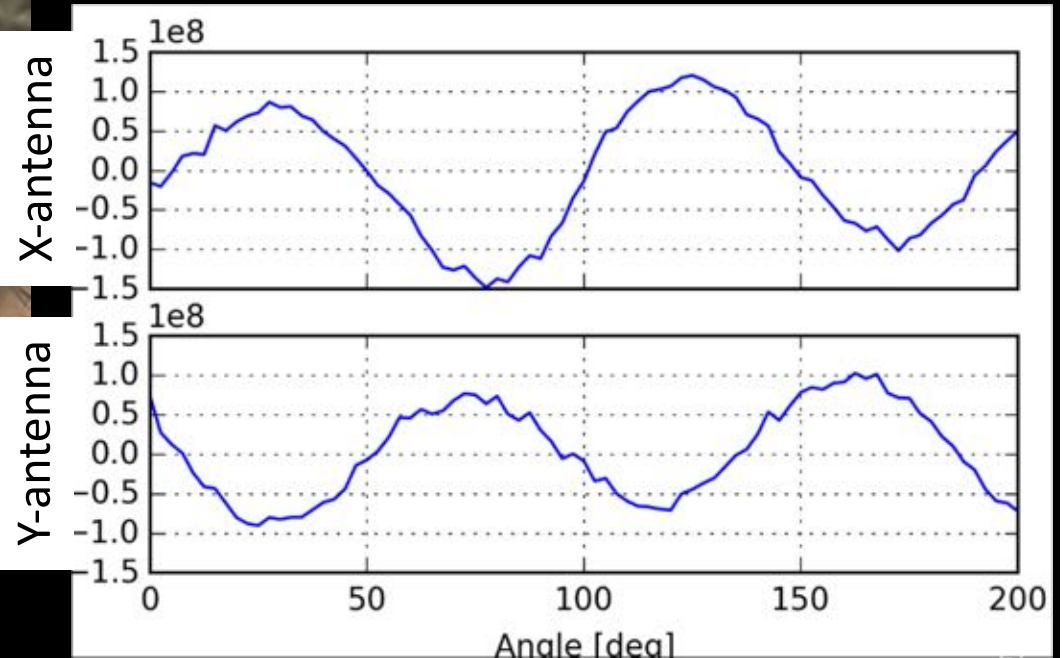
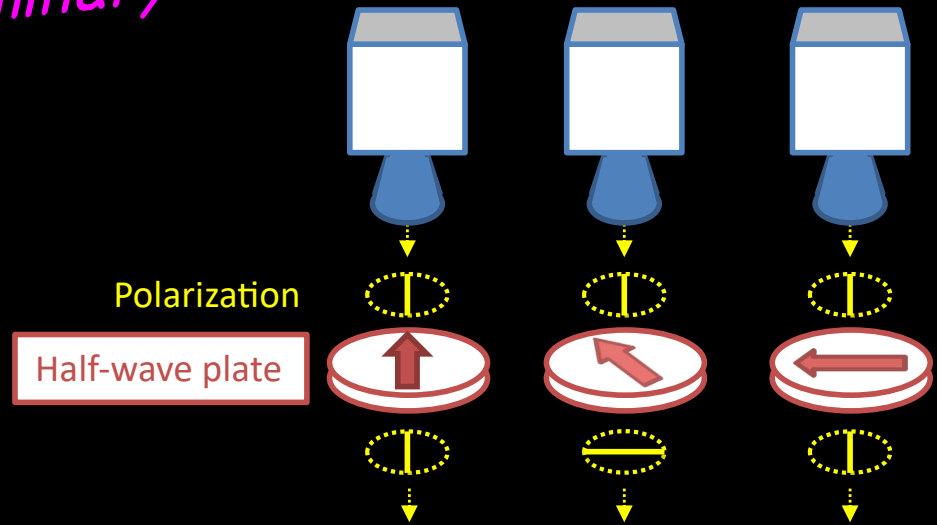
Frequency multiplier

Signal at 150GHz



Half-wave plate

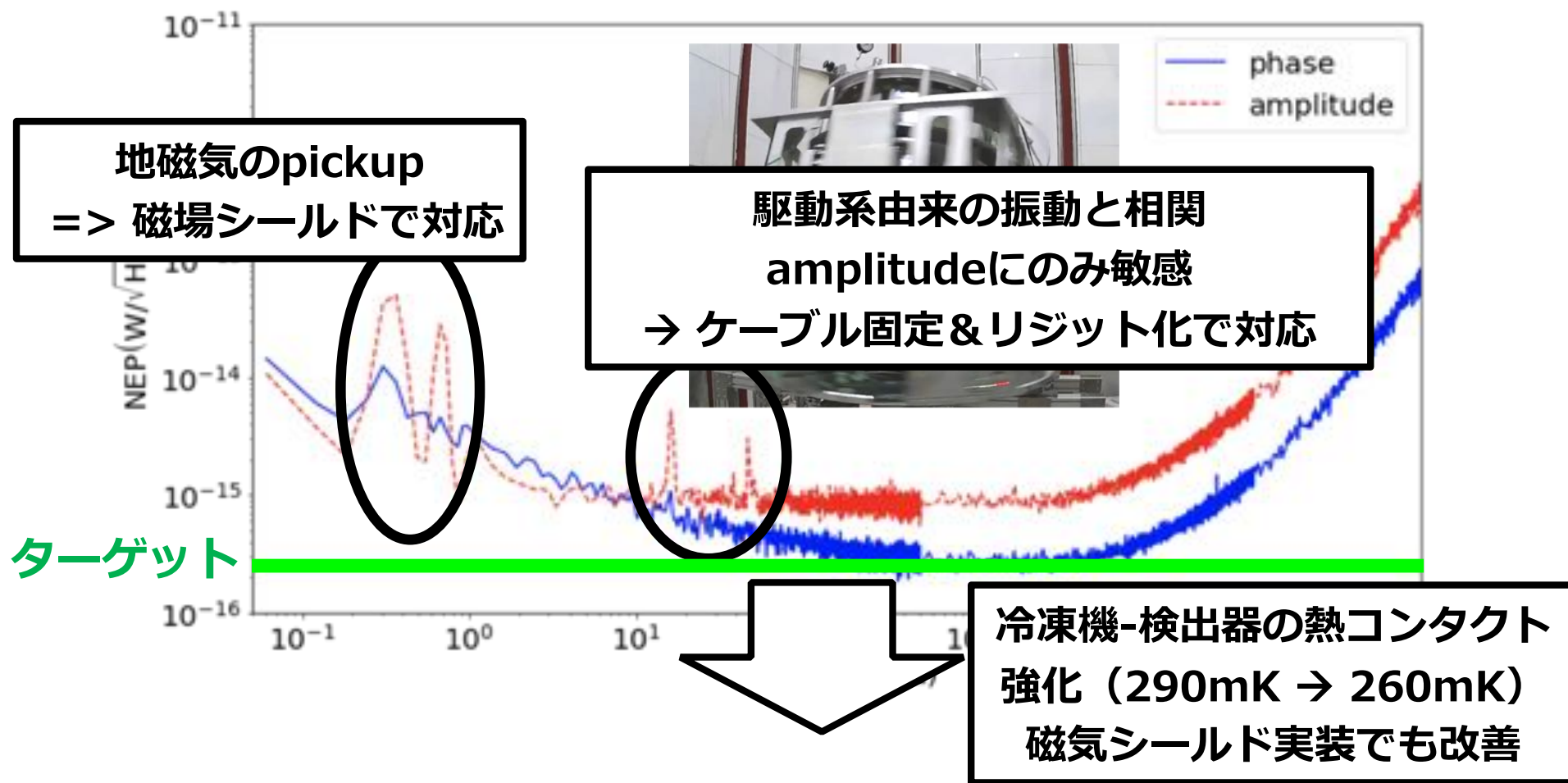
*cos<sup>2</sup>θ responses  
w/ opposite phase !!*



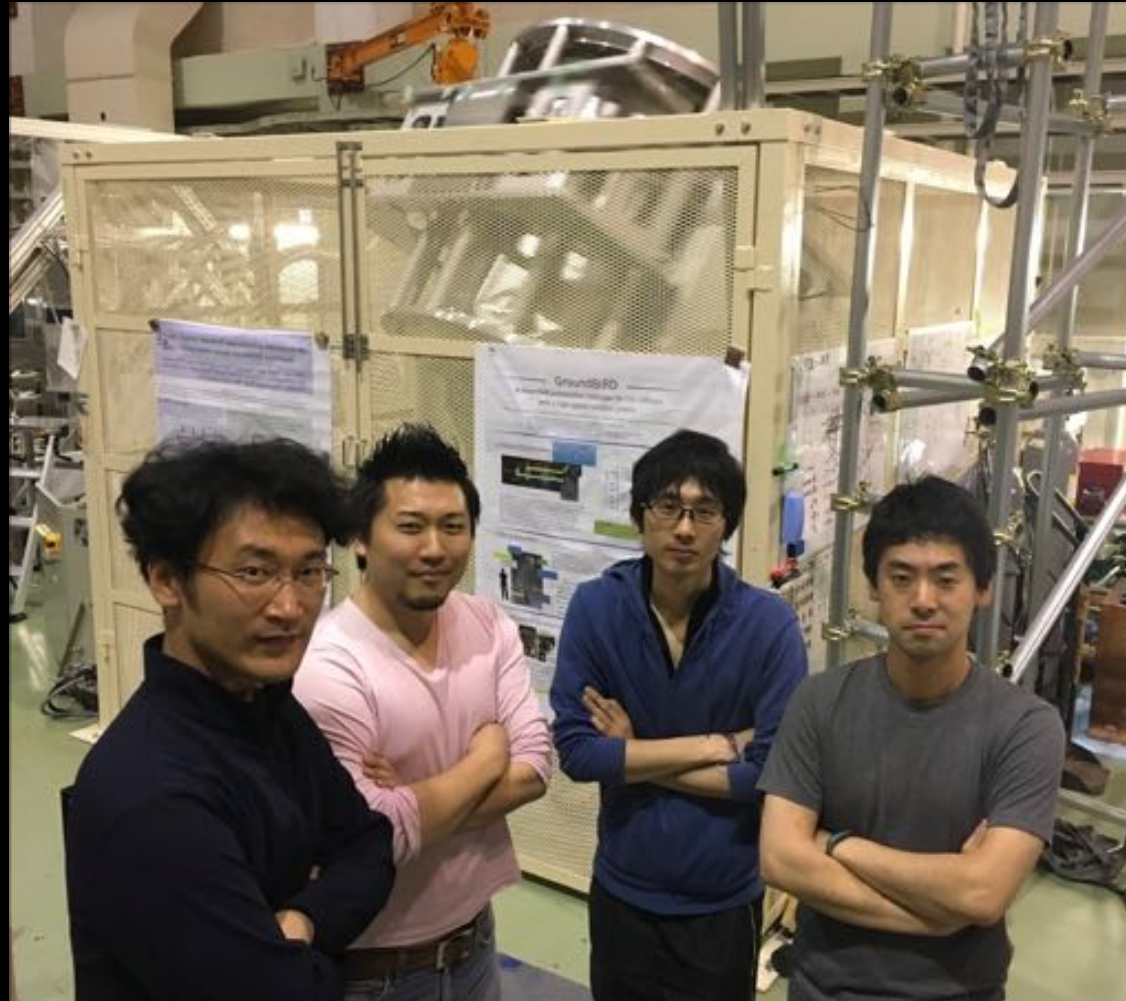
# 分速20回転系でのNEP測定

磁気シールドは未完全実装 (設計済み, 3月末納品, -57dB design)

300K窓に蓋 (いわゆるdark環境よりは過酷な評価)



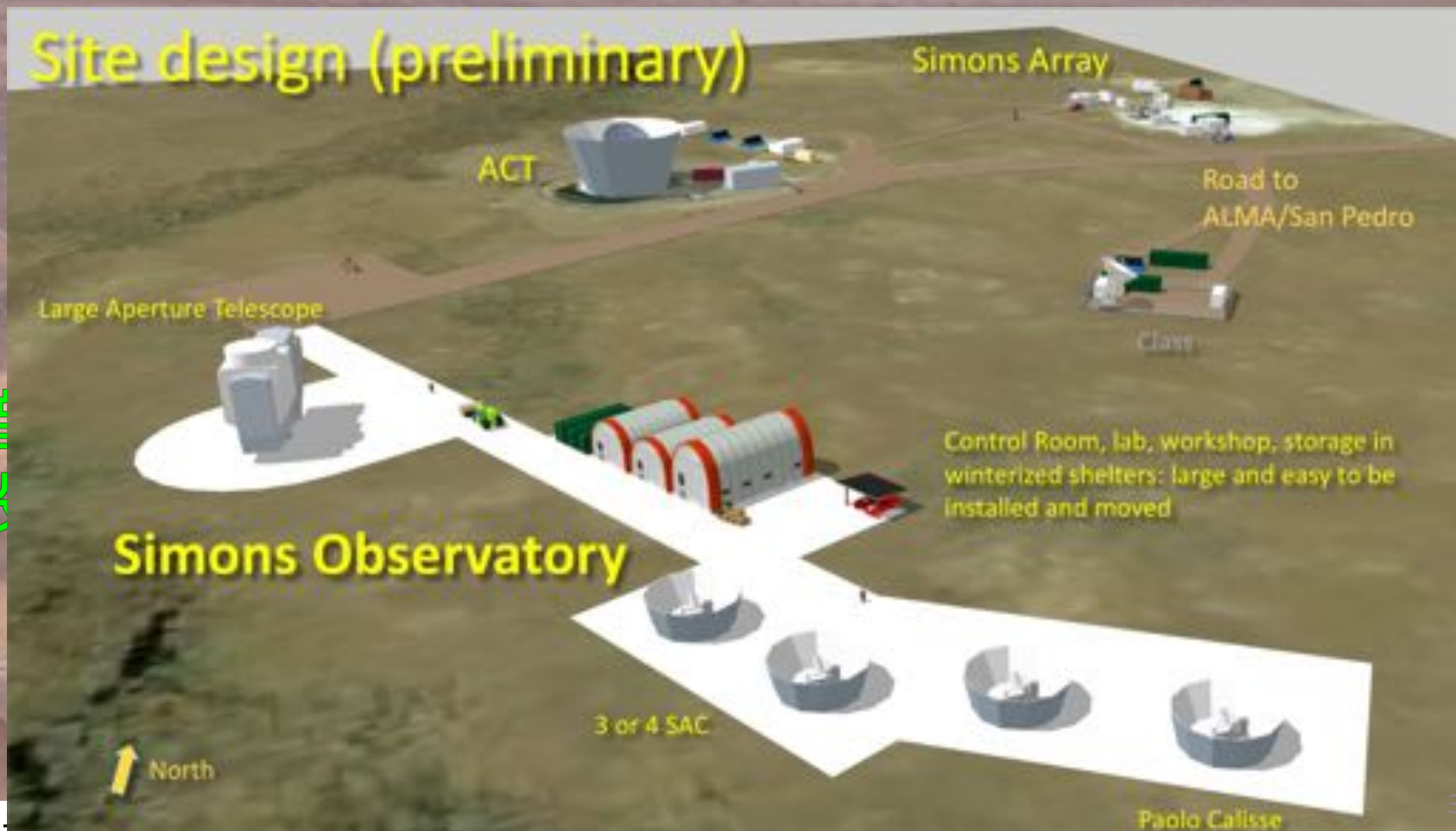
# 来年度の進展を乞うご期待



Cryostat team, be cool 😊

# Simons Observatory (略称SO)

2016年5月に新発足(米国予算\$45M)



**SOの検出器数**

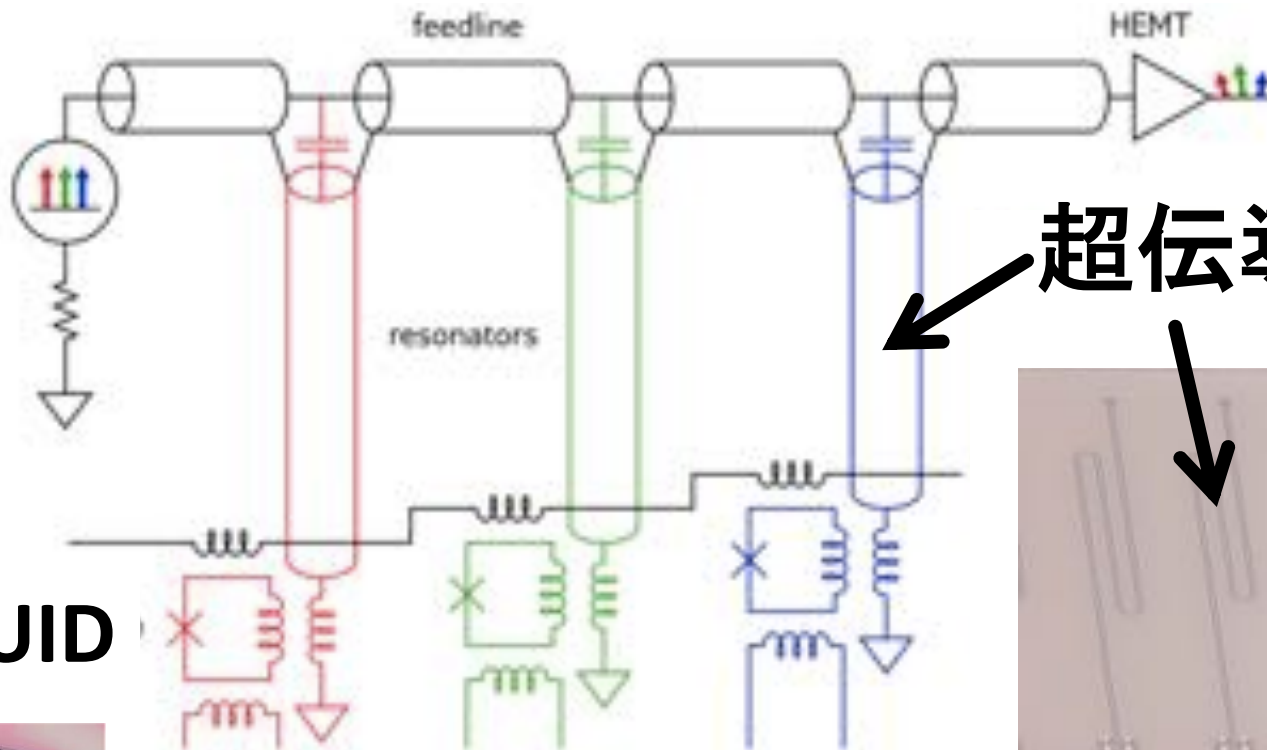
**100,000 TES**

**次世代CMB-S4では、  
その数倍規模**

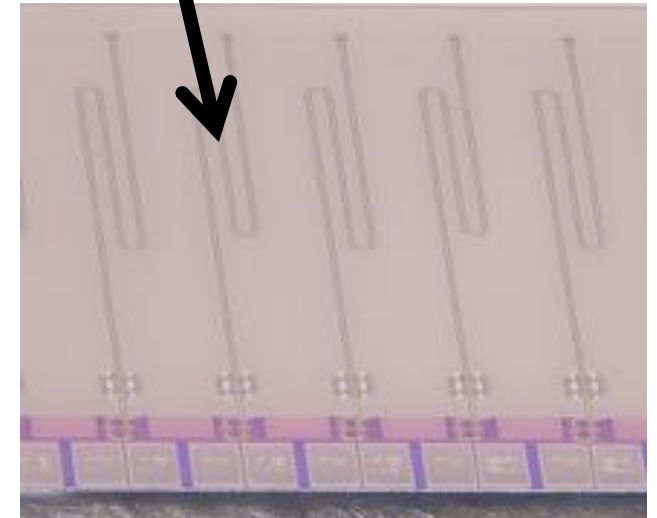
# $\mu$ MUX $\approx$ TES + MKID's MUX



Made by SLAC



超伝導共振器



Made by NIST

RF-SQUID



TES detector  
(Berkeley)

TES

TES

TES

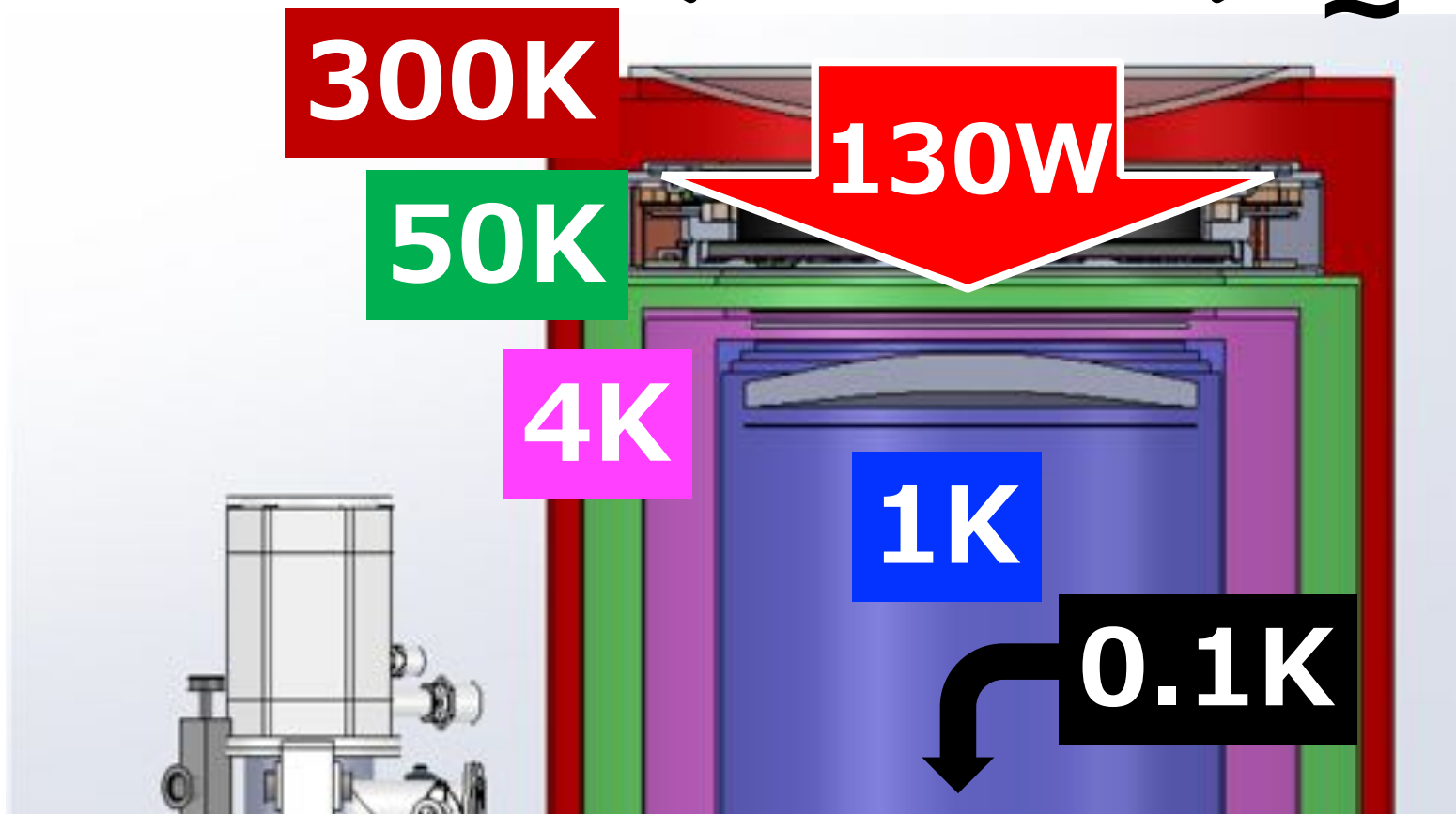
帯域UP (MHz  $\rightarrow$  GHz) で多重度UP



# 大開口径

300K → 50KのIR-blockerを  
低熱負荷かつ低放射にするのがキモ

← →  $\geq 0.6 \text{ m}$



# IR-blockerに 求められる性能

電波に透明 **低放射**

赤外線を実効反射 **低熱負荷**

大きさ制限のない機構

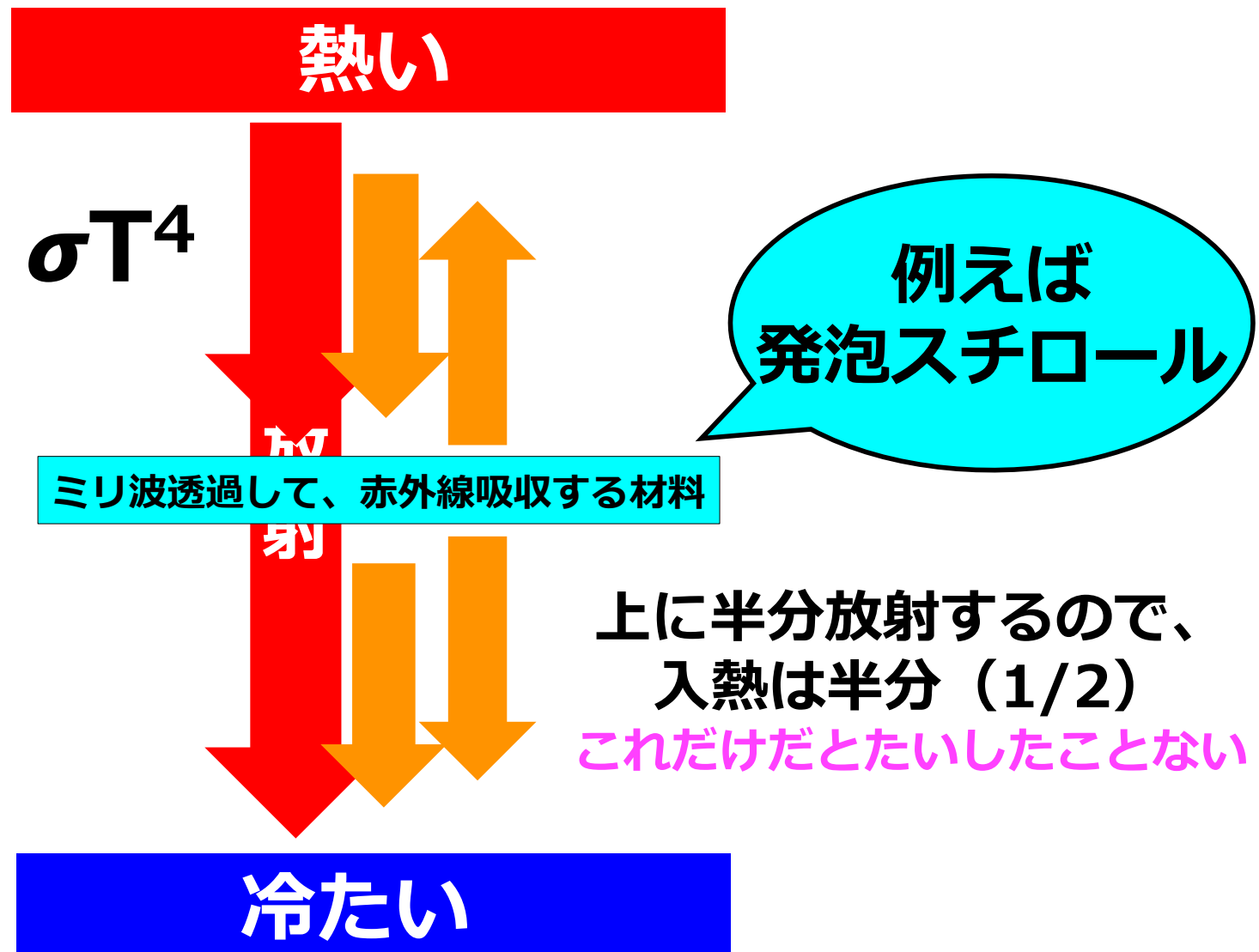
**大開口系**

# RT-MLI

吸収率 < 0.1 %,  $n=1.03$   
GBで発明 (特許第6029079号)



# 放射冷却で冷やす!?



# 日本古来の教え「三本の矢」

毛利元就

力をあわせれば強くなる！



# キューレンジャーの教えを実践！ 放射冷却の強化

熱い

↓  $q_1$

1枚

↓  $q_2$

2枚

⋮

N枚

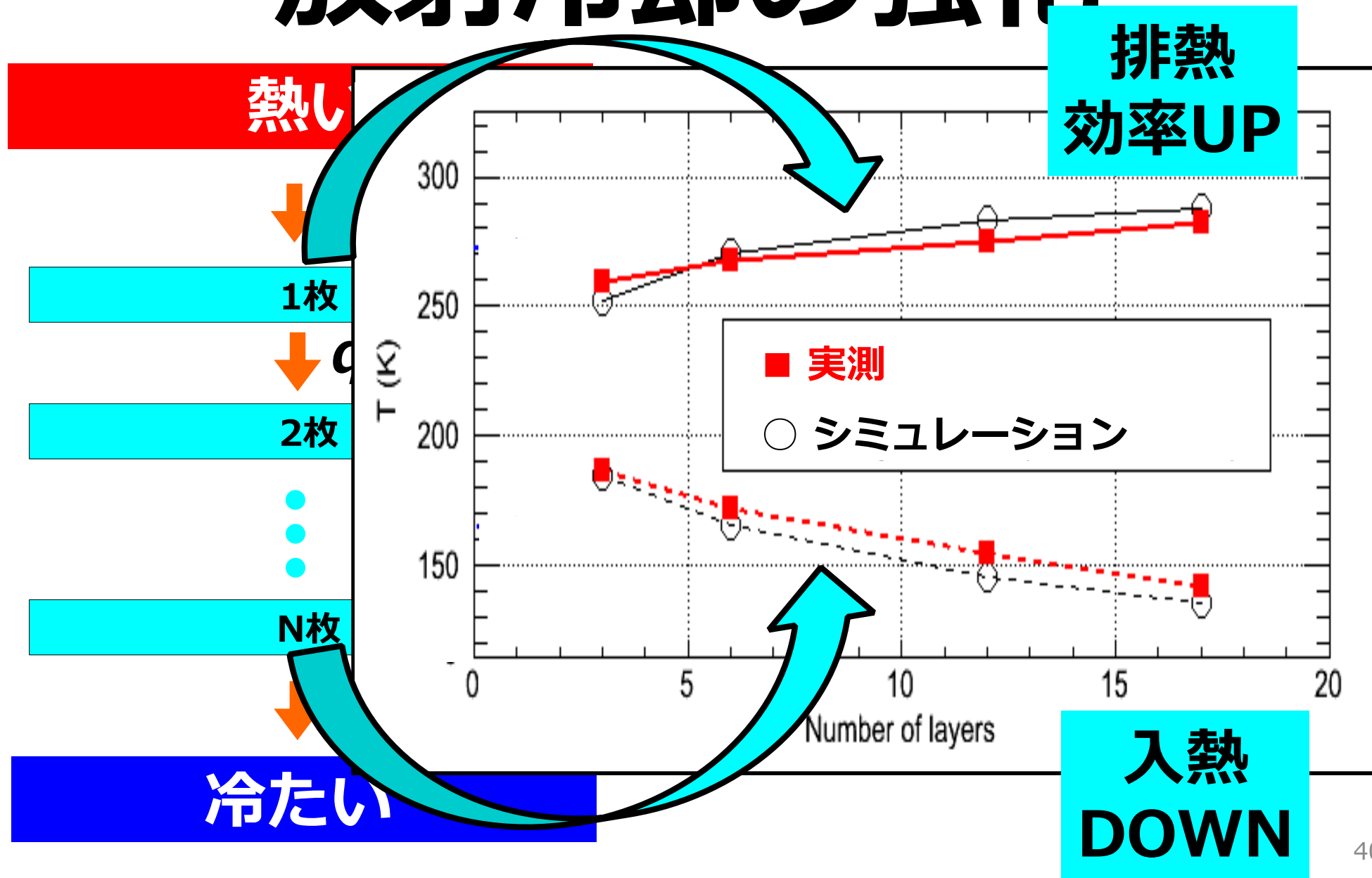
↓  $q_{N+1}$

冷たい

$$\text{入熱} \approx \frac{1}{(N+1)}$$

キューレンジャーの教えを実践！

# 放射冷却の強化



# RT-MLIのもう一つのウリ

高いコストパフォーマンス

安い



# RT-MLIの実装実績

## CMB

GB, Simons Array, BICEP3,  
Simons Observatory (candidate), ...

## 電波天文

MOSAIC (のアンテナ試験用受信機)

## その他

クモデス (気象応用)

→ 導波管窓や冷却校正源窓の結露防止

# 独自性と流行に乗るバランス

## 目指す物理

原始重力波、 $\Sigma m_\nu$  etc.

実験戦略：大口径x高統計、多バンド

$O(10^4)$ の検出器アレイx10受信機

## 戦略にむけた技術

$\mu$ MUX ( $\approx$ TES + MKIDs)

GBの実績次第ではMKIDsも

RT-MLI：大口径IR-blocker

# 電波技術の用途

天文

CMB

社会（気象、測地、火山）

超軽量ダークマターの直接測定

...

**学際で無限の用途を！**

**独自性が生かせるのは  
1分野だけではない！**