

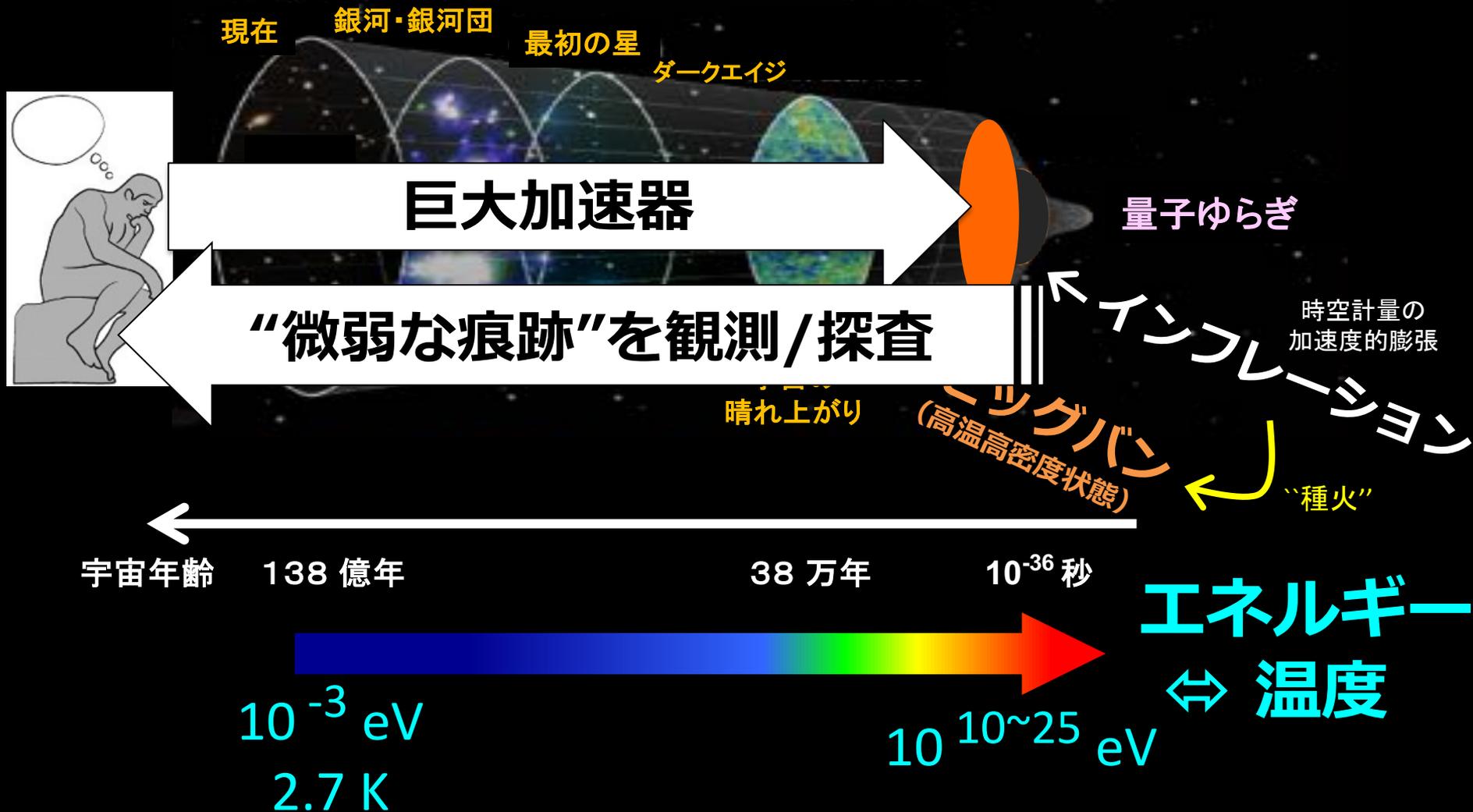
最古の光  
**CMB観測で探る  
宇宙と物質起源**

コロナでキャンセルになった“教室発表会”のタイトル

**田島治（高エネ）**

↑  
元M2の阿部くん  
チリ・アタカマ高地にて

# “起源”を探る2大手法



138億年の  
奥行きを持  
つ実験室

# 宇宙最古の光“CMB”は 宇宙を照らすバックライト

## 原始重力波

## ダーク放射

$\Sigma m_\nu$

## ダークエネルギー

38万年

1億年

10億年

40億年

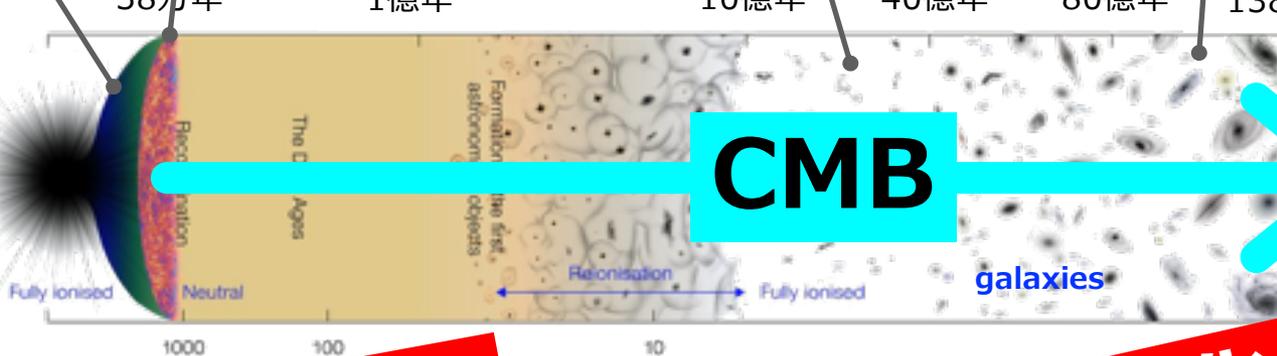
80億年

138億年

量子ゆらぎ

CMB

credits: ESO

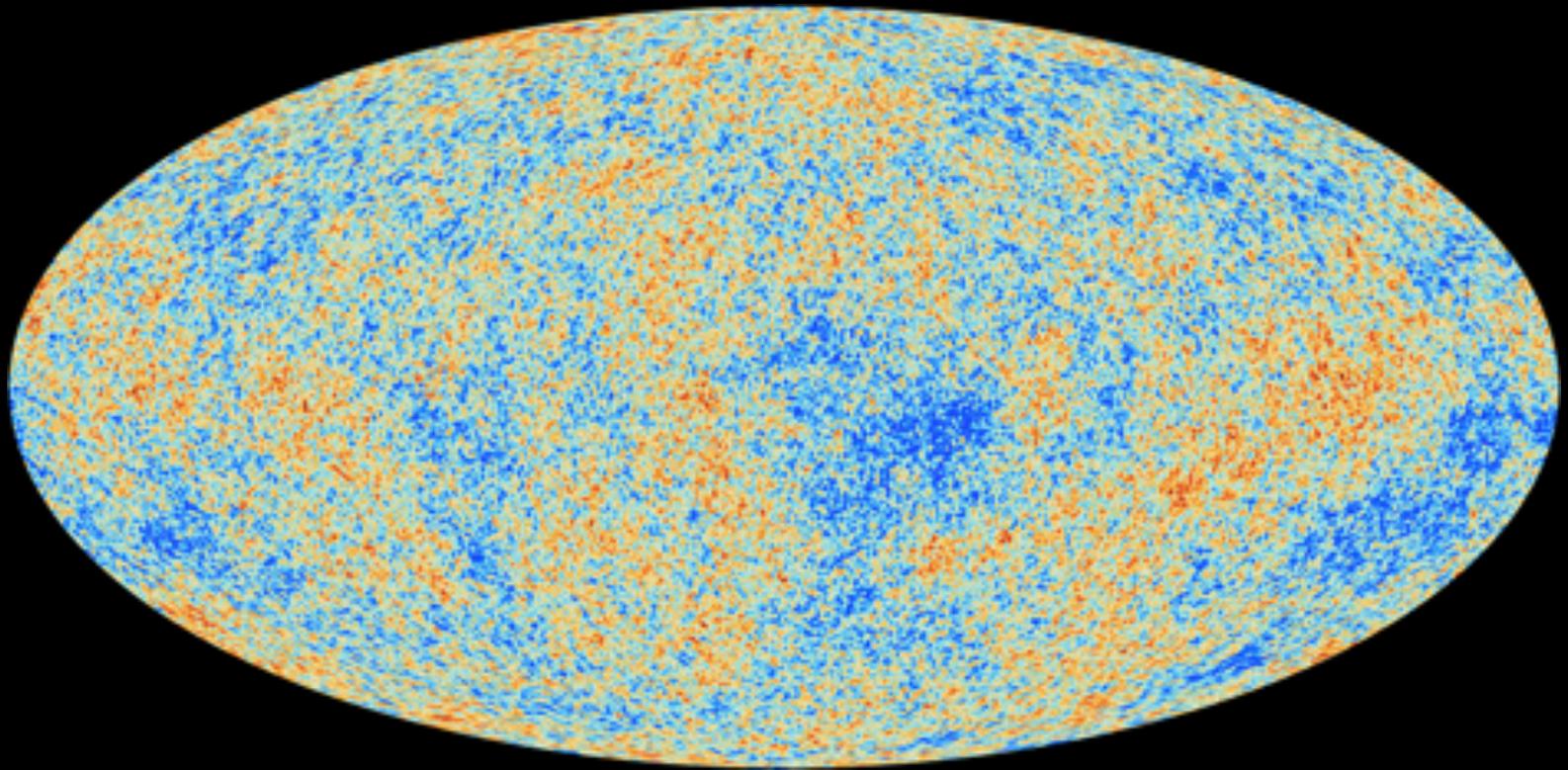


CMB  
望遠鏡

宇宙のはじまり  
の研究  $O(1 \sim 10^\circ)$

宇宙構造の進化  
の研究  $O(0.1^\circ)$

# CMB – 温度ゆらぎmap

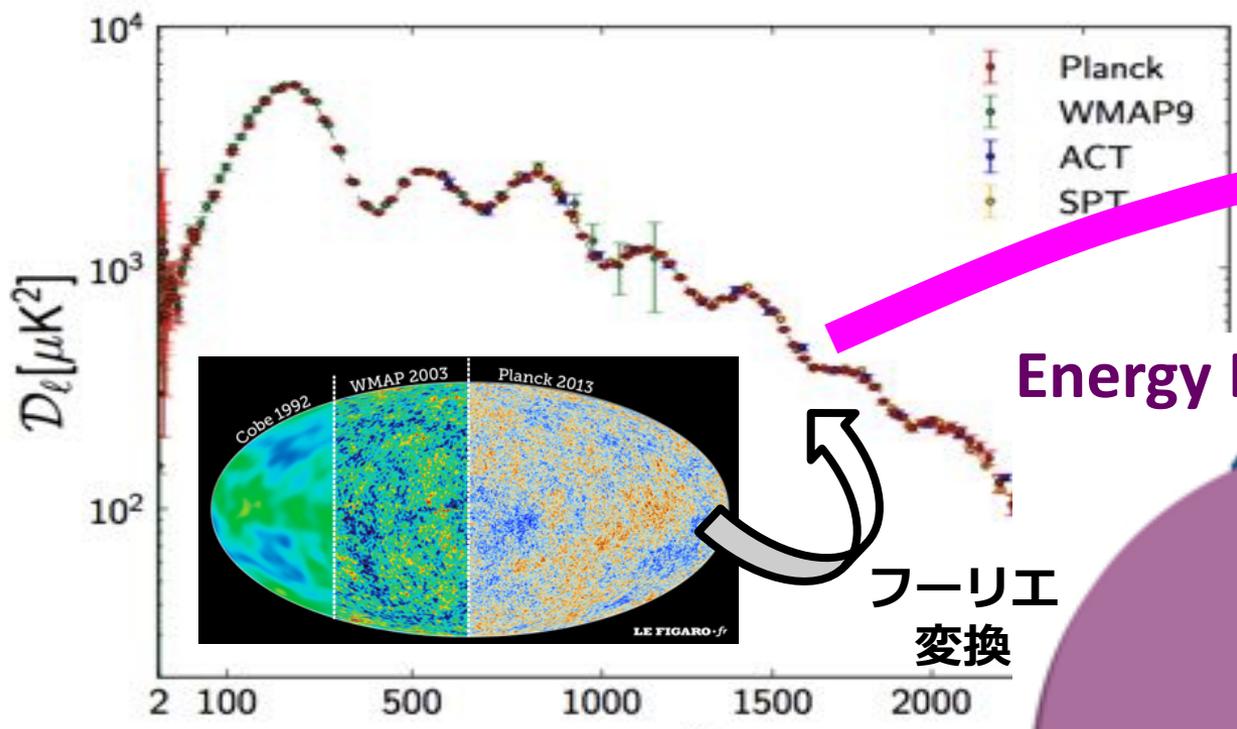


各点の温度 – 平均温度(2.725 K)

$$\Delta T/T = 10^{-5}$$

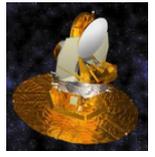
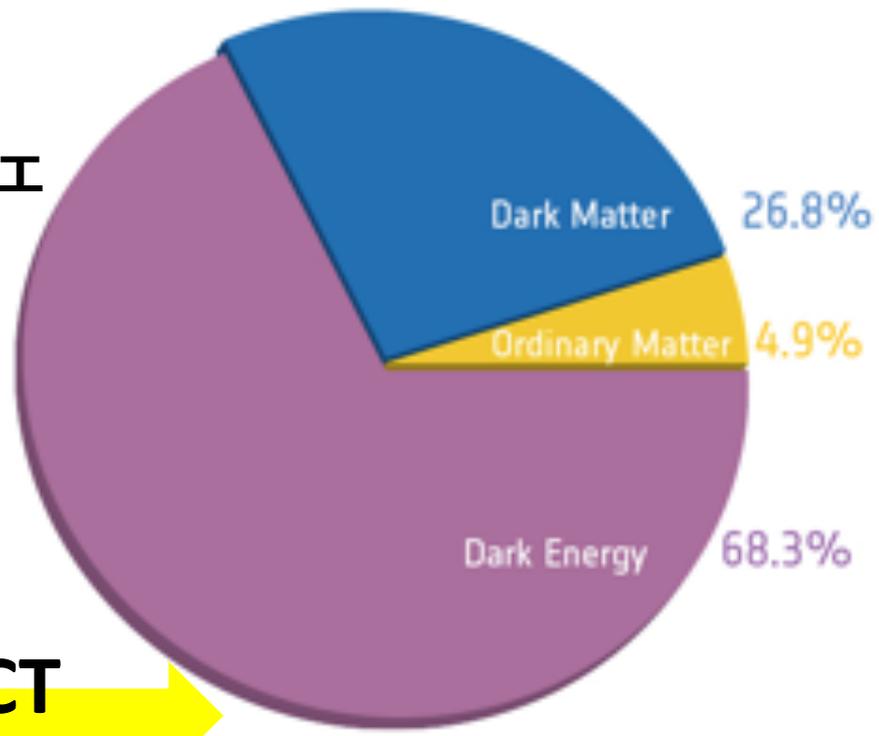
過去20数年の  
フロンティア

# 温度ゆらぎ (無偏光ゆらぎ)

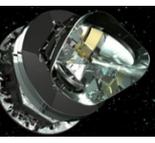


0.001% level of average  
intensity (2.7 K)

## Energy Budget in the Universe



**WMAP**



**Planck**



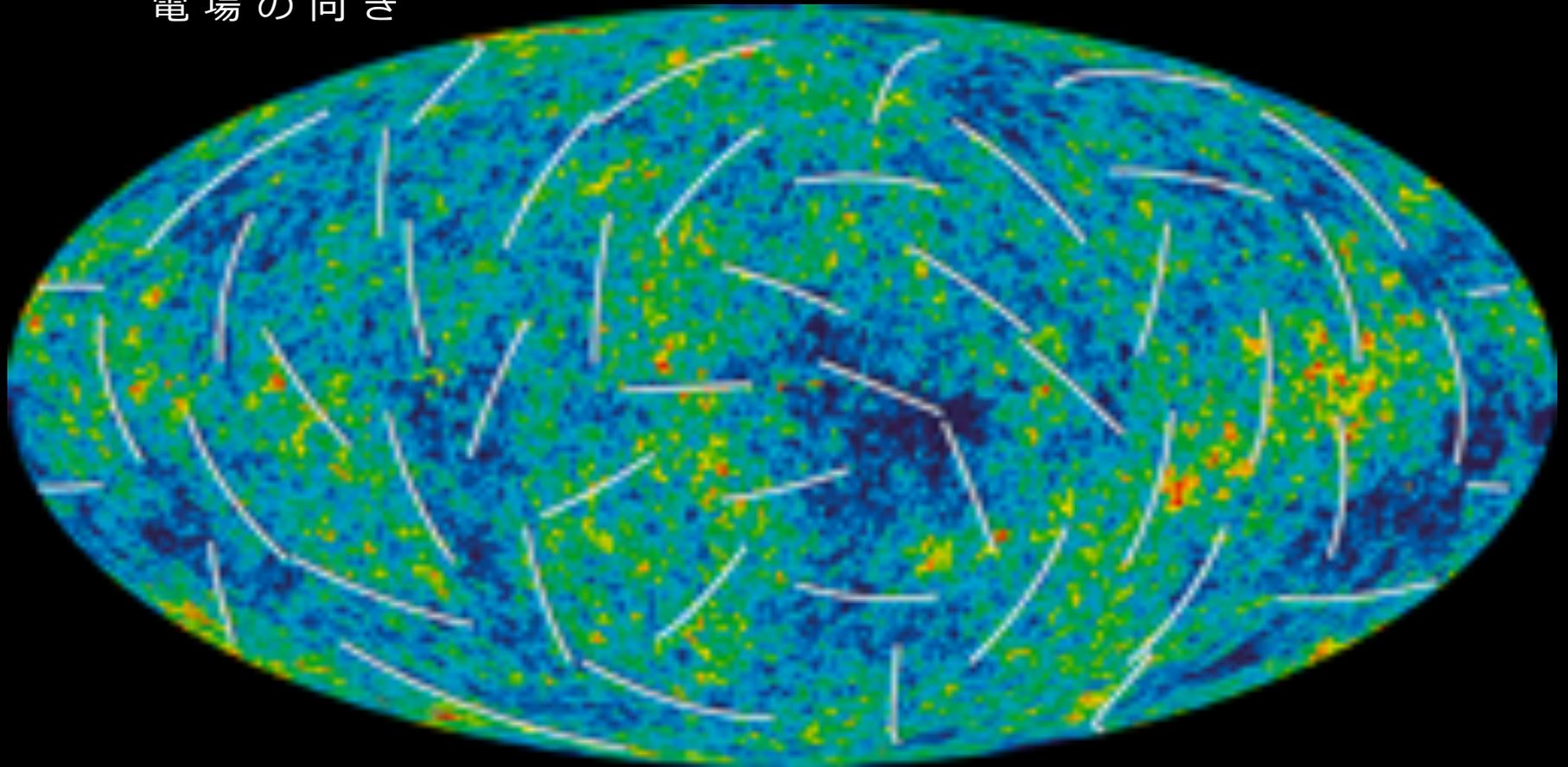
**SPT and ACT**

(Big ground telescope)



# 今のCMBフロンティアは 偏光パターン観測！

電場の向き



# 重力

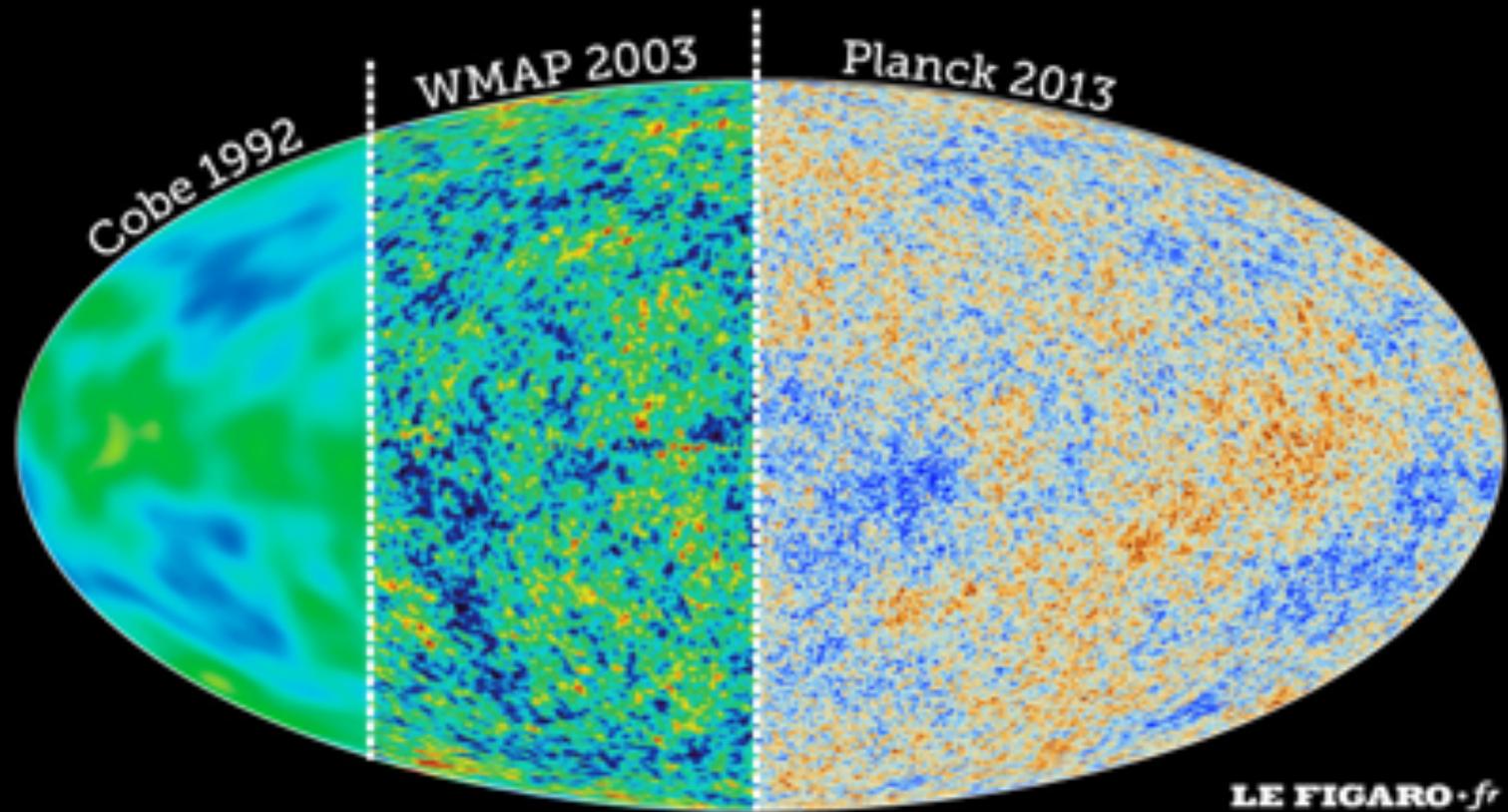
# 原始重力波

→ 量子宇宙×インフレーション

# 弱重力レンズ

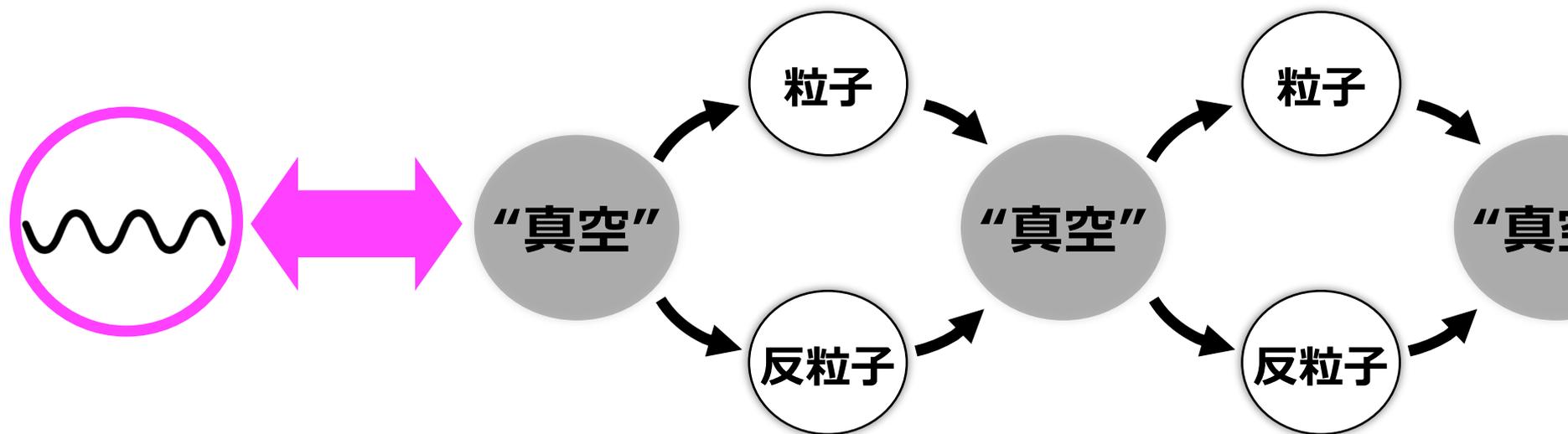
→  $\Sigma m_\nu$

# 量子宇宙×インフレーション 最初のヒント



## 温度ゆらぎの発見

# “量子ゆらぎ”って？



ミクロの世界で繰り返される  
粒子の“生成”と“消滅”

# インフレーションの膨張

**$10^{-36}$ 秒間で $10^{27}$ 倍**



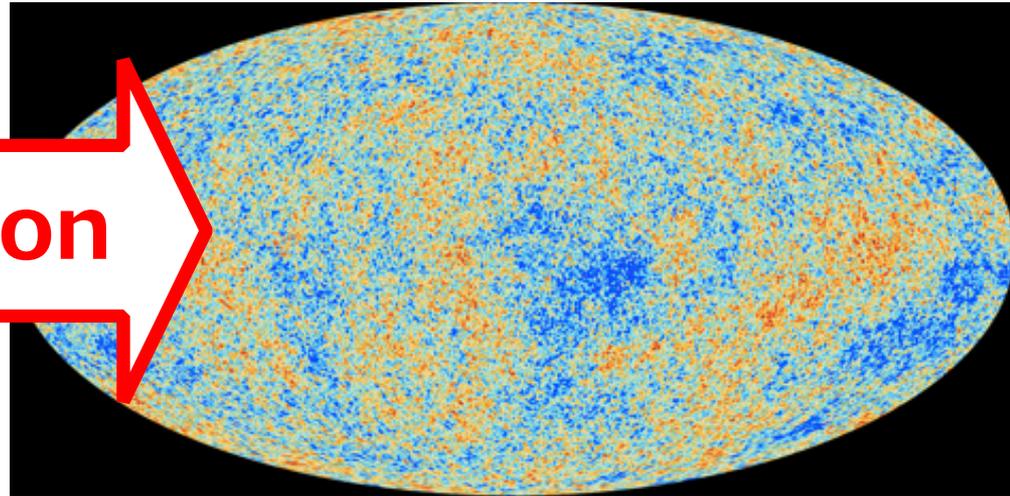
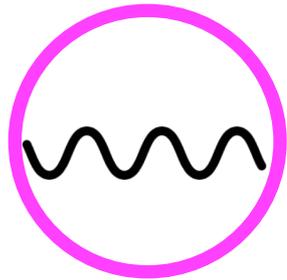
# インフレーションのご利益 量子ゆらぎの残存



「量子ゆらぎ」  
生成・消滅を繰り返す

消滅しない  
⇔ ゆらぎが残存

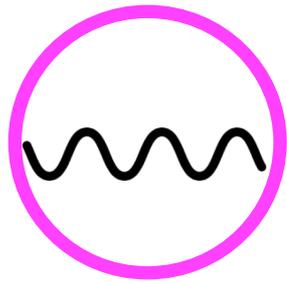
# 密度ゆらぎ (温度ゆらぎ)



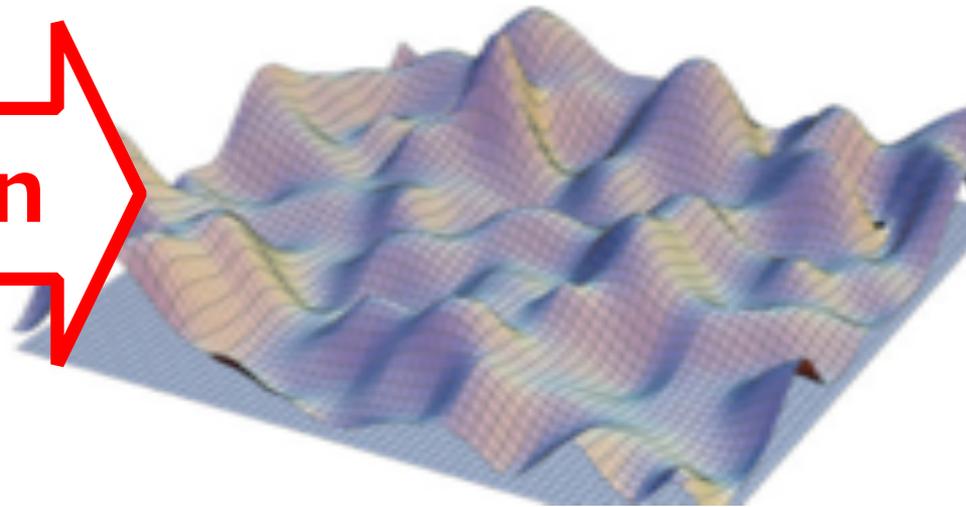
粒子 (物質) の  
「量子ゆらぎ」

密度ゆらぎに！  
(温度のムラムラ)

# 原始の重力波



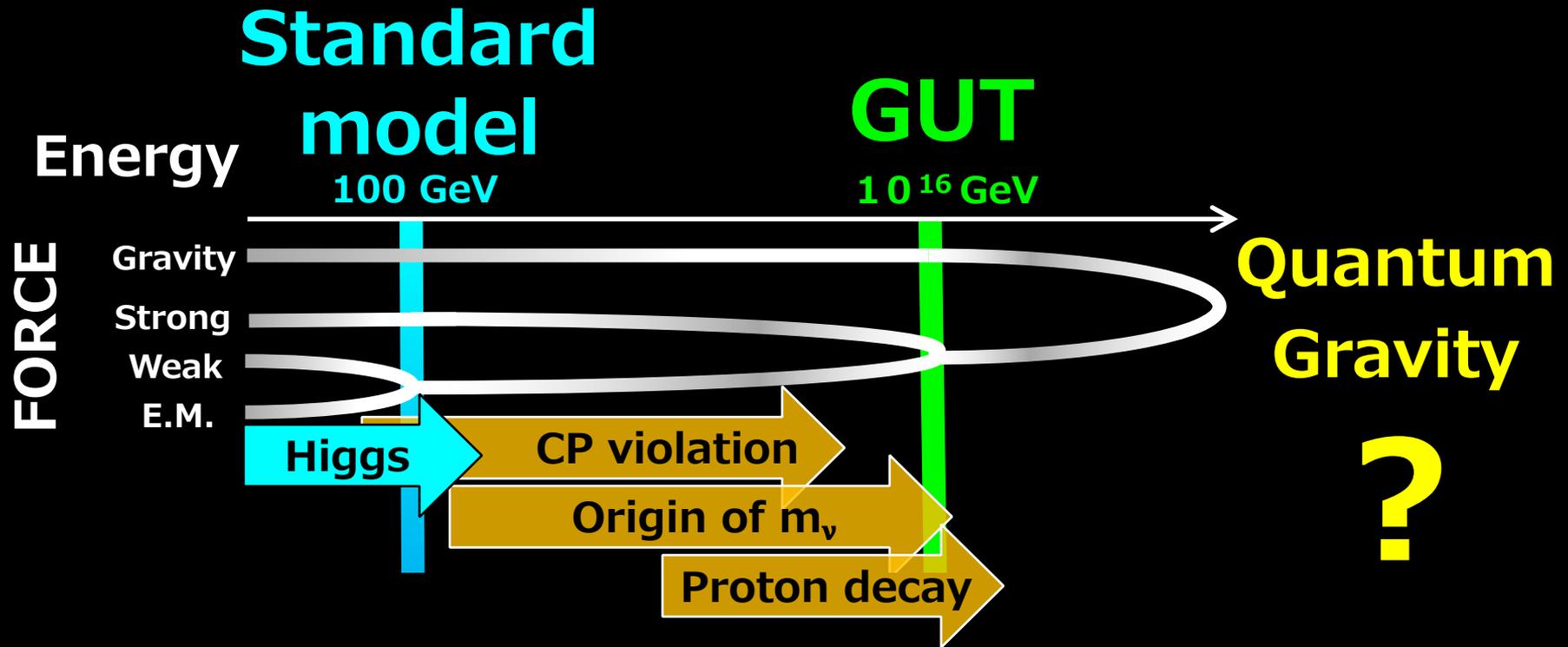
Inflation



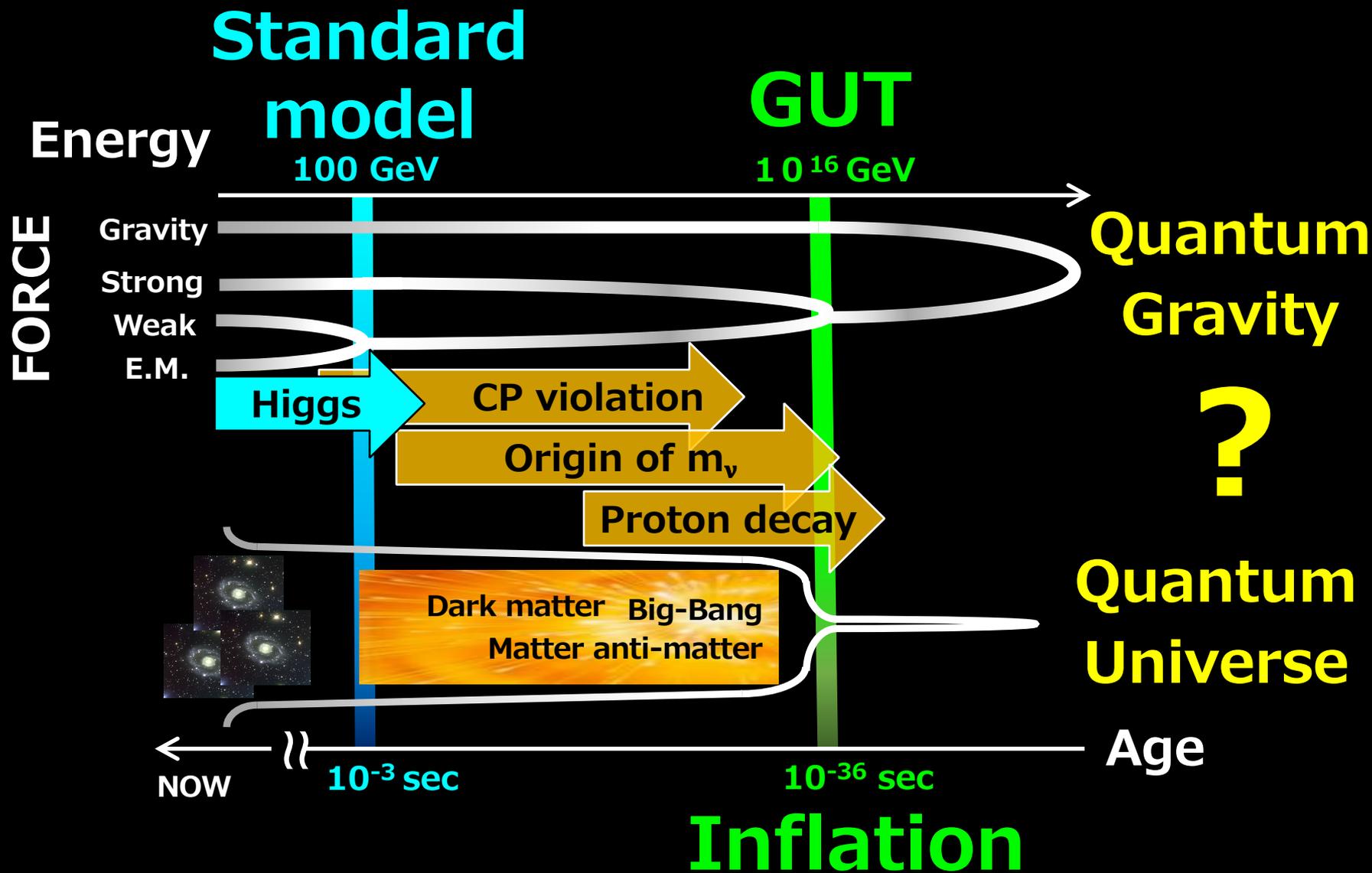
重力子の  
「量子ゆらぎ」  
重力場の量子化

原始の  
重力波に！  
まだ未発見

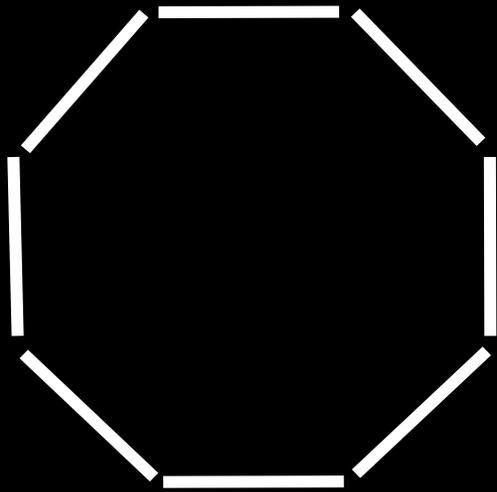
# Particle physics & Cosmology



# Particle physics & Cosmology

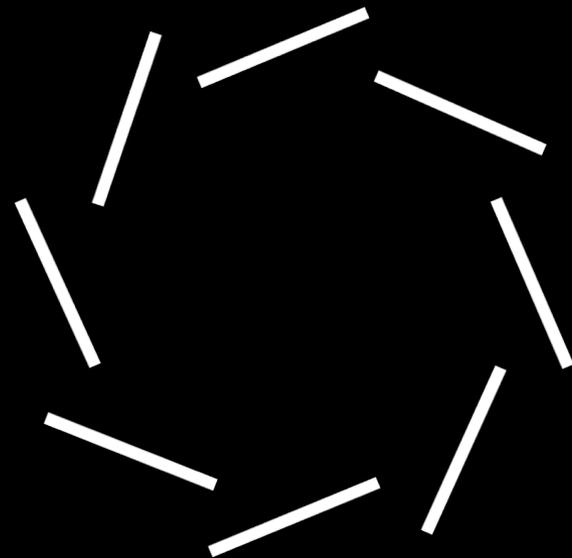


# 原始重力波は CMB偏光パターンで測る



*E*-modes

Even-parity patterns

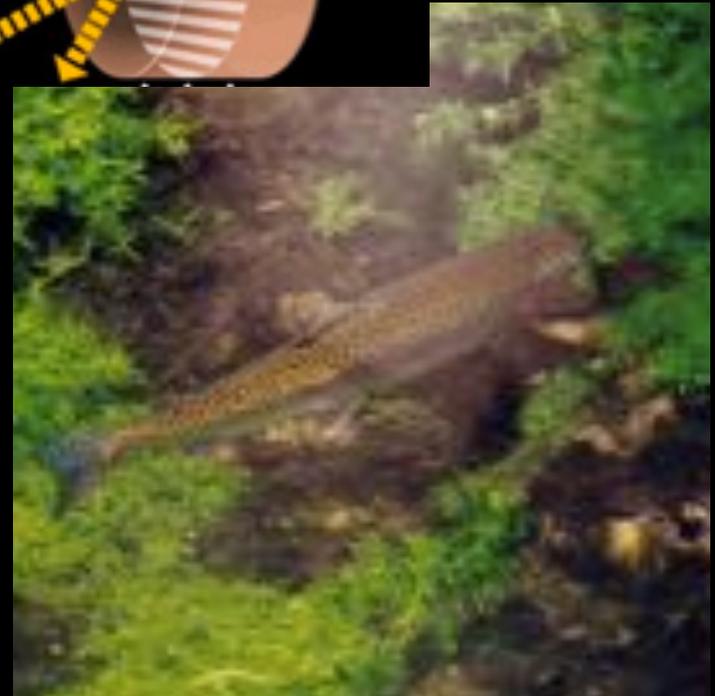
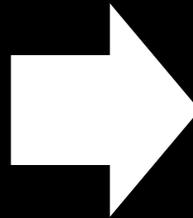
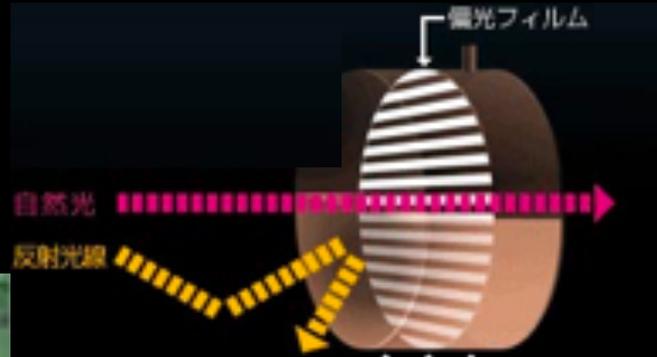


*B*-modes

Odd-parity patterns

# どういう時に偏光ができる？

ワイヤーグリッドで  
ヨコ向きの電場を吸収

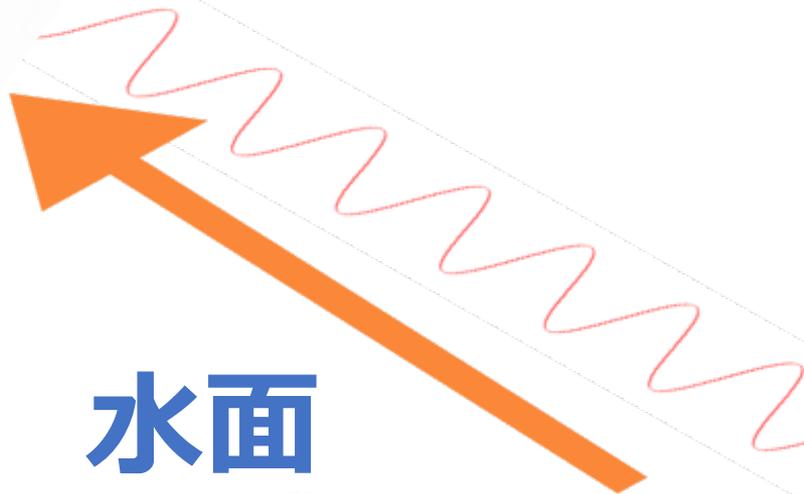


某メガネ屋のwebより

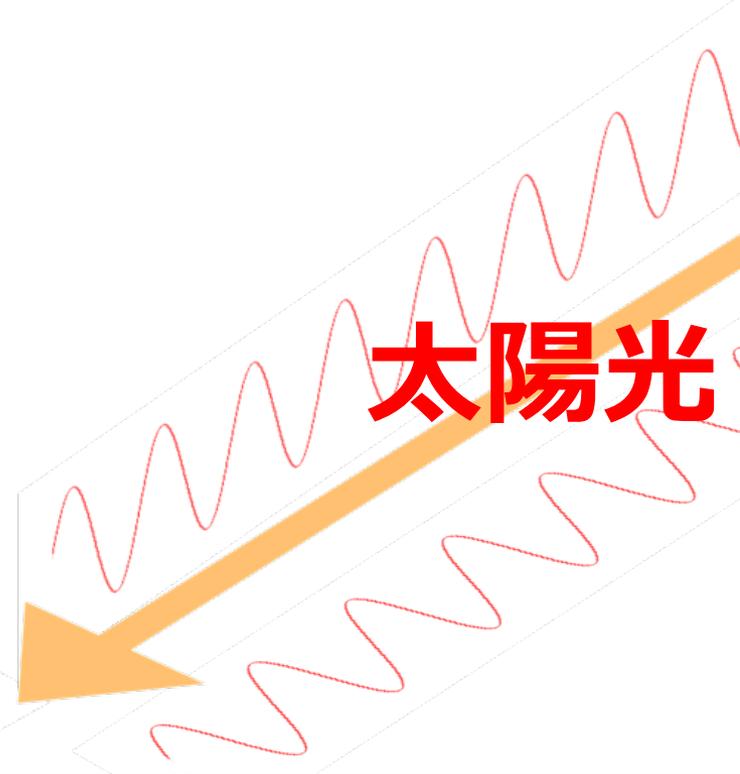
# どういう時に偏光ができる？



反射で  
偏光する！



水面



太陽光

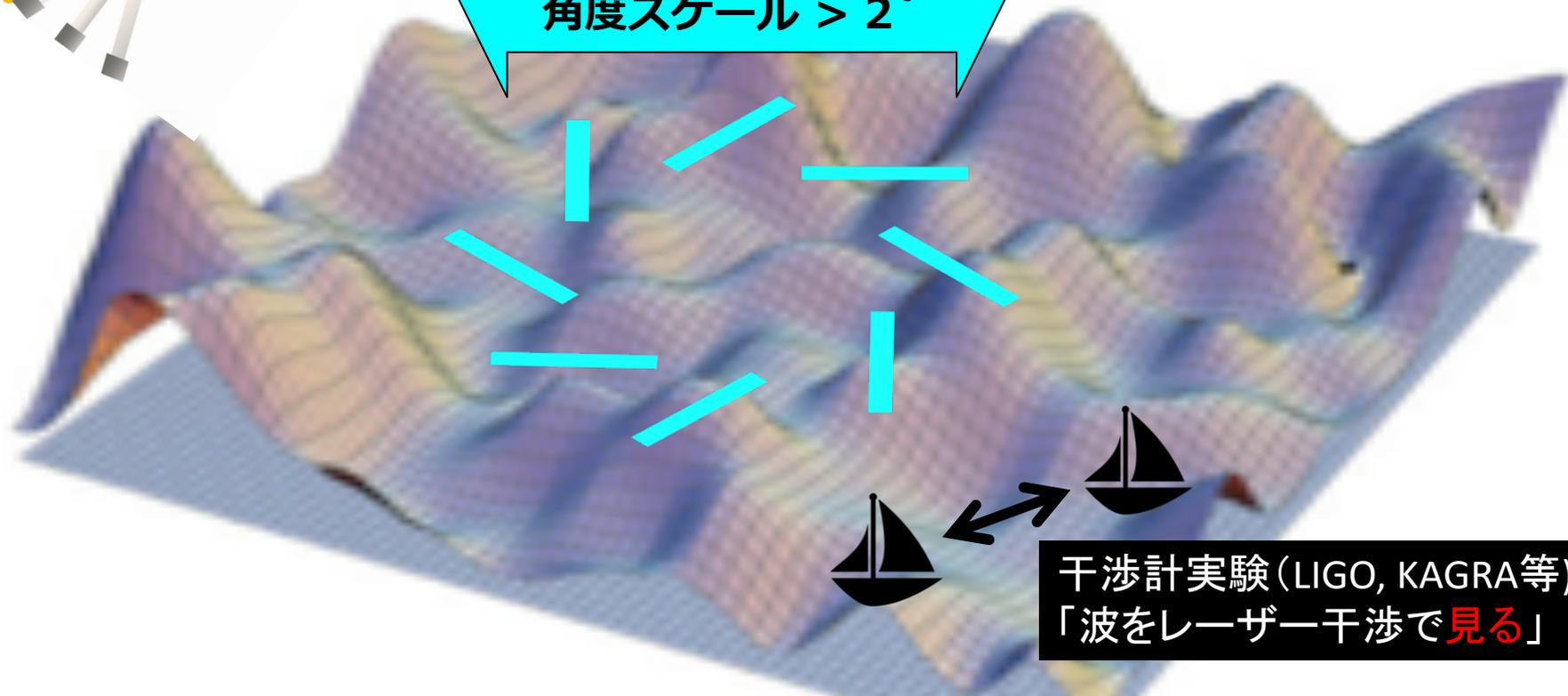
自由電子

# CMB“偏光”で波面模様をみる



空間非対称なパターン  
角度スケール  $> 2^\circ$

原始重力波面

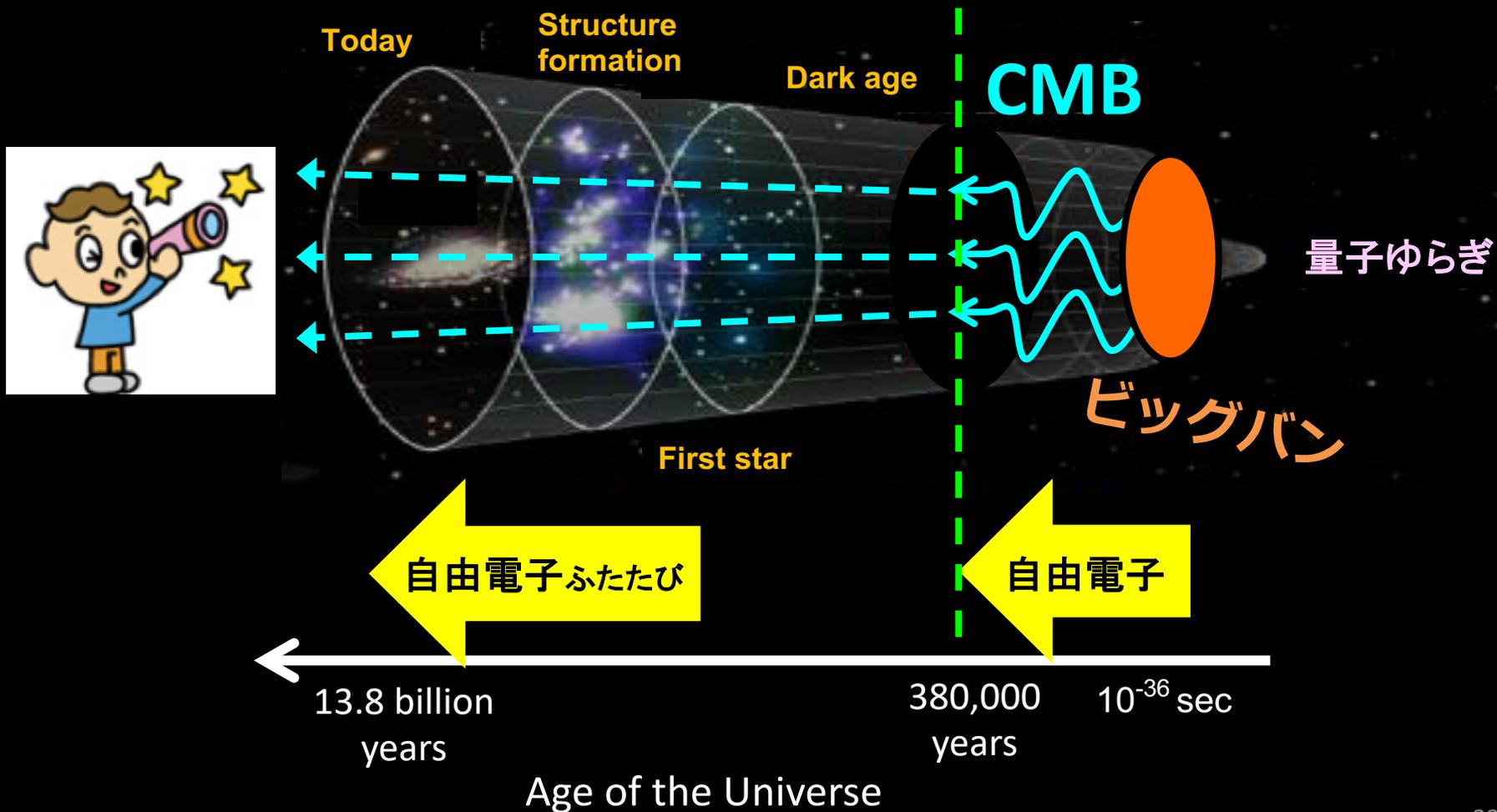


干渉計実験 (LIGO, KAGRA 等)  
「波をレーザー干渉で見る」

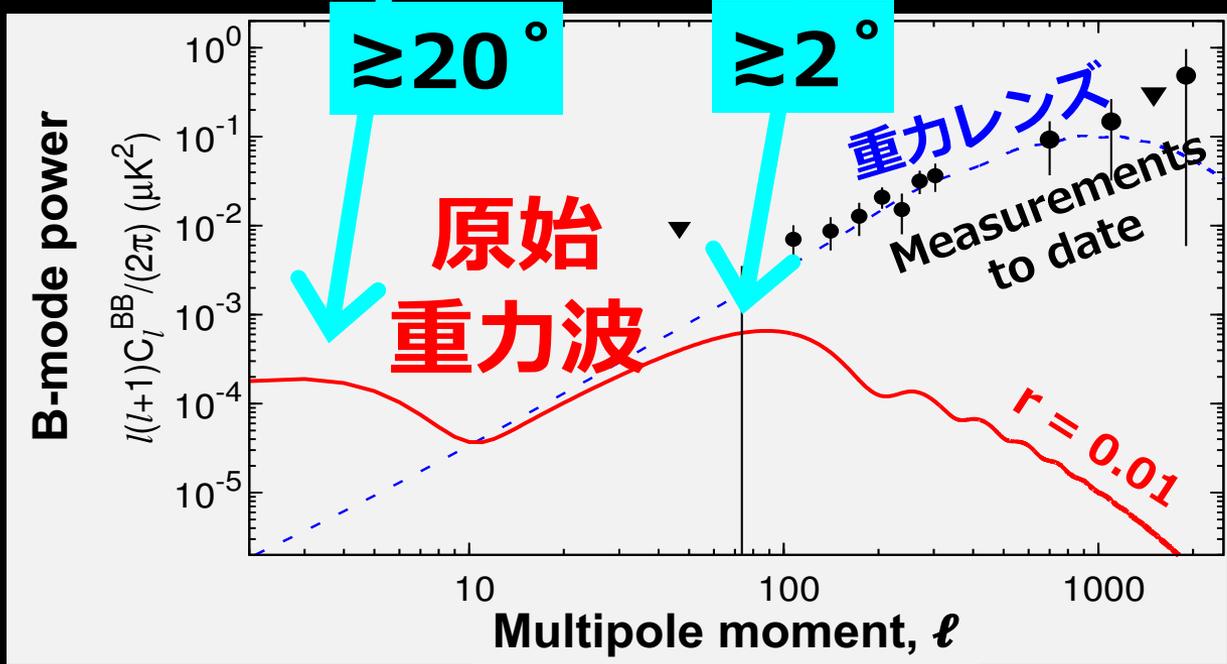
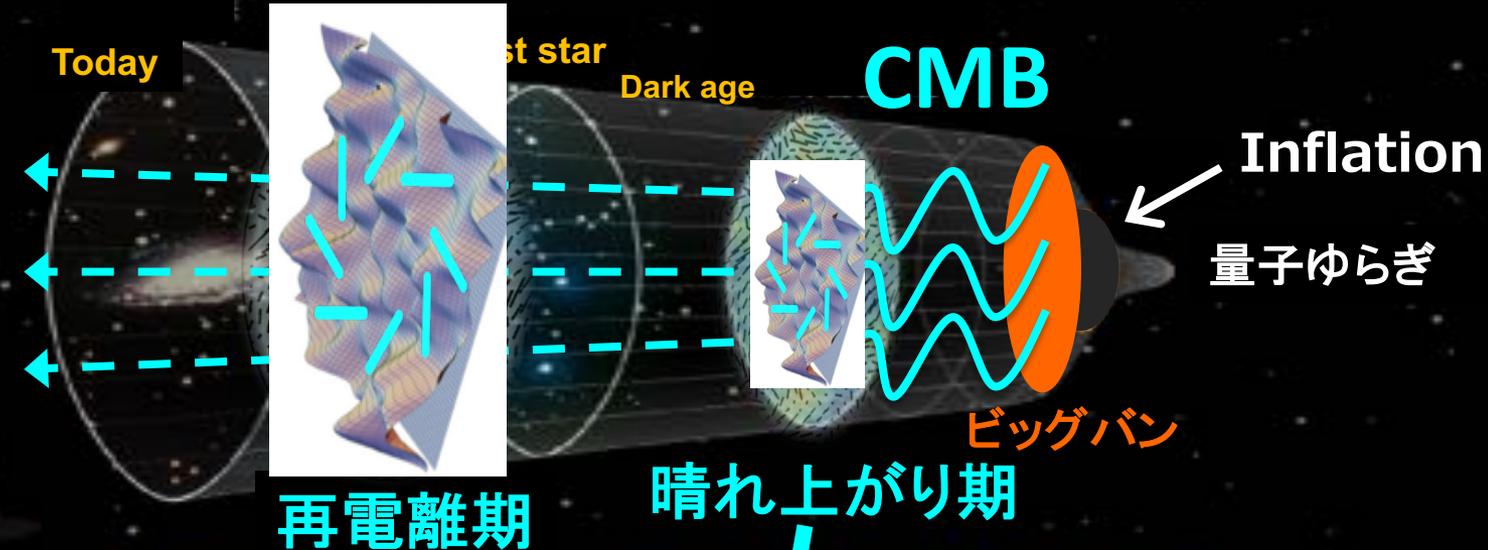
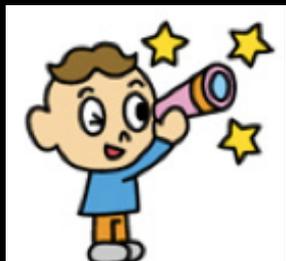
# CMBにとっての水面？

「再電離」期

「晴れ上がり」期以前



# 原始重力波の波模様をみる

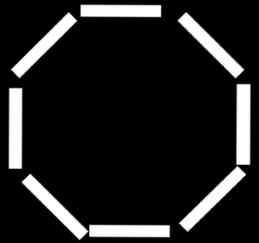


Courtesy of  
Y. Chinone

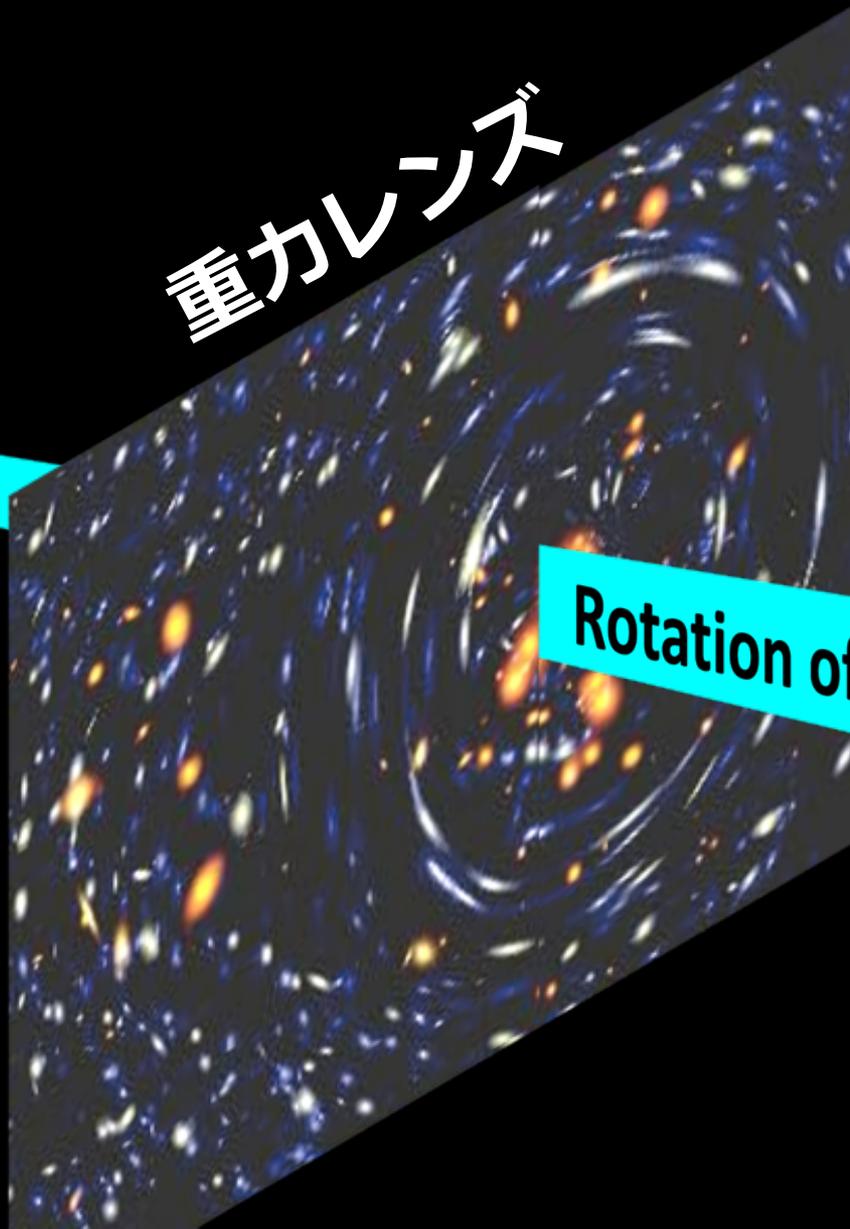
# 重カレンズBモード

Eモード

重カレンズ

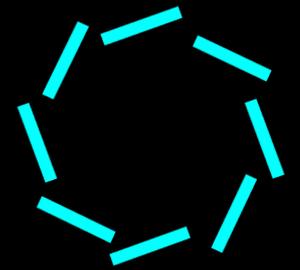


晴れあがり期  
38万年



重カレンズ  
Bモード  $O(0.1^\circ)$

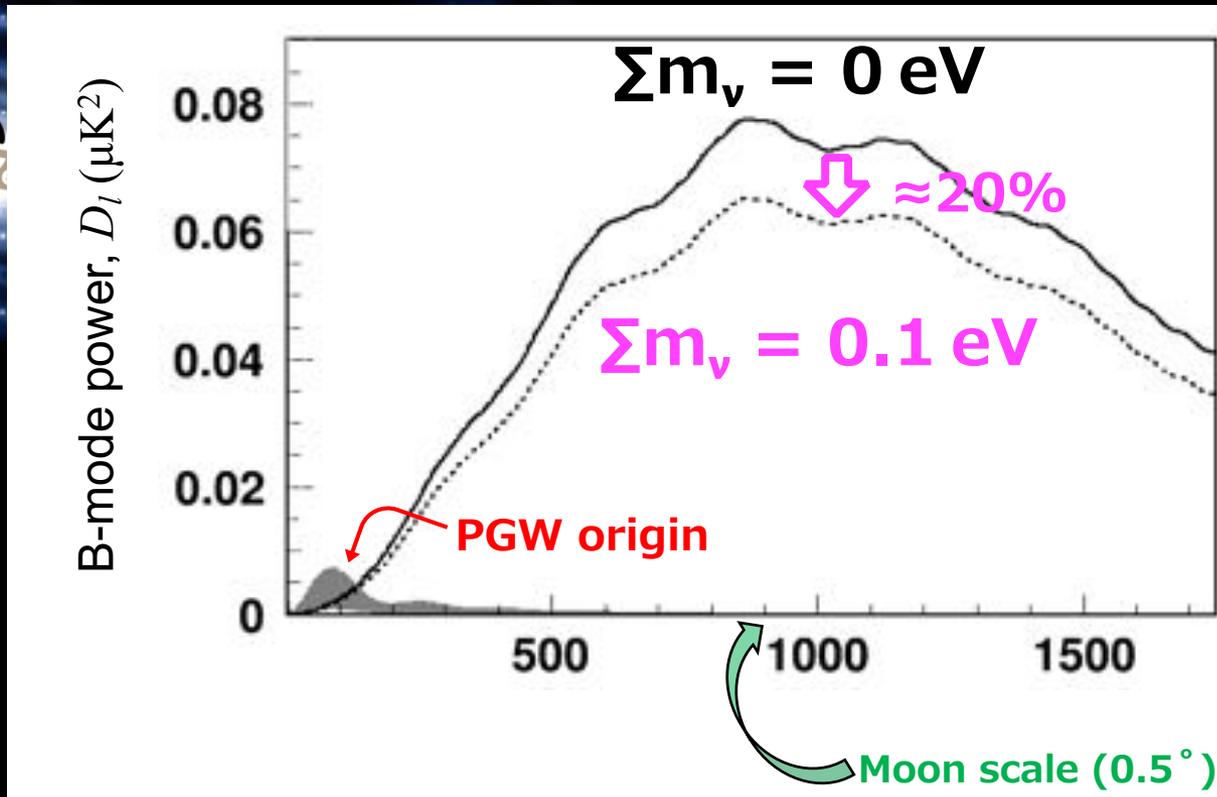
Rotation of axis



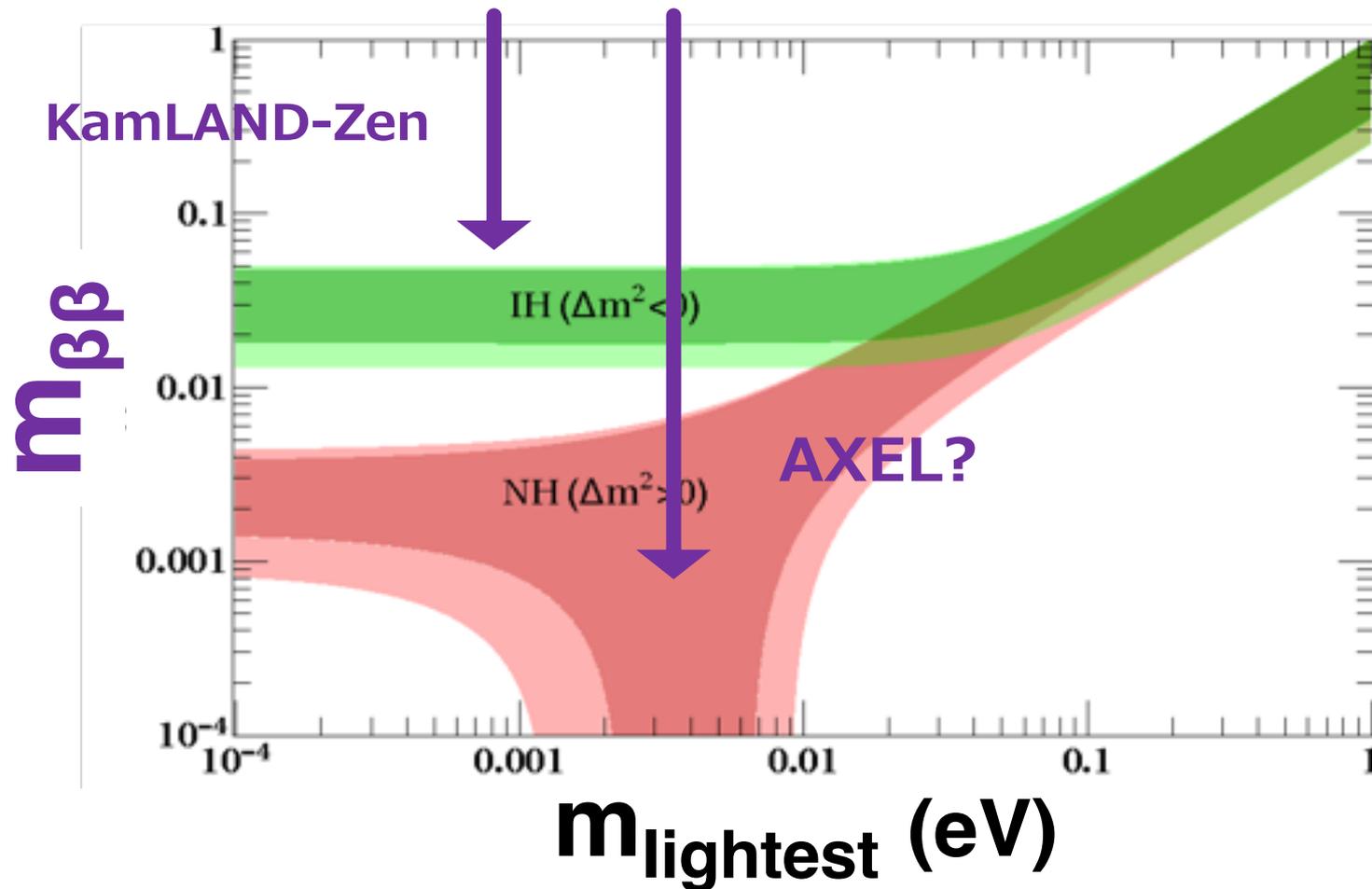
Observation, today



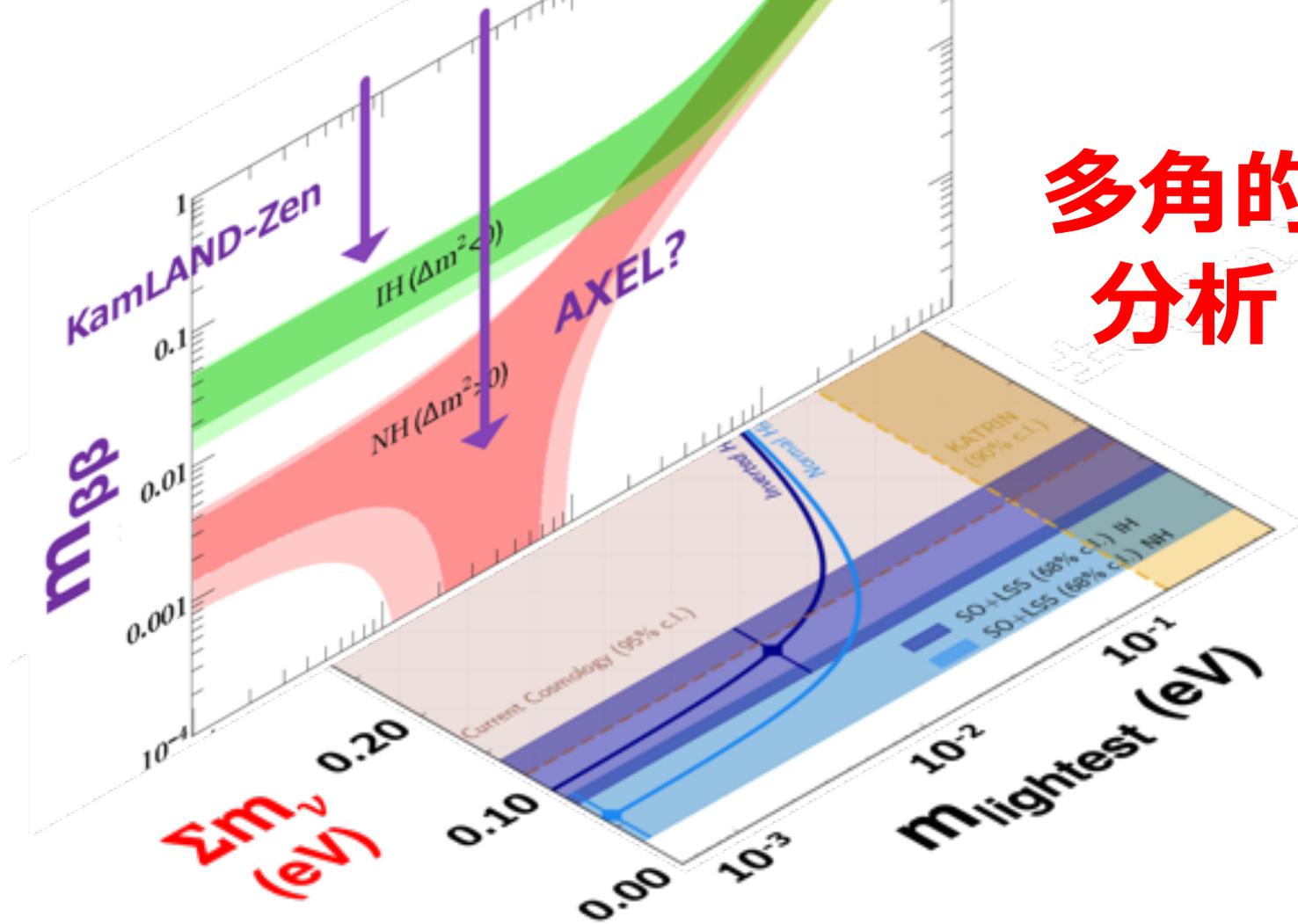
# $\Sigma m_\nu$ 重力レンズを薄くする



# $m_\nu$ 絶対値へのアプローチ (これまで)

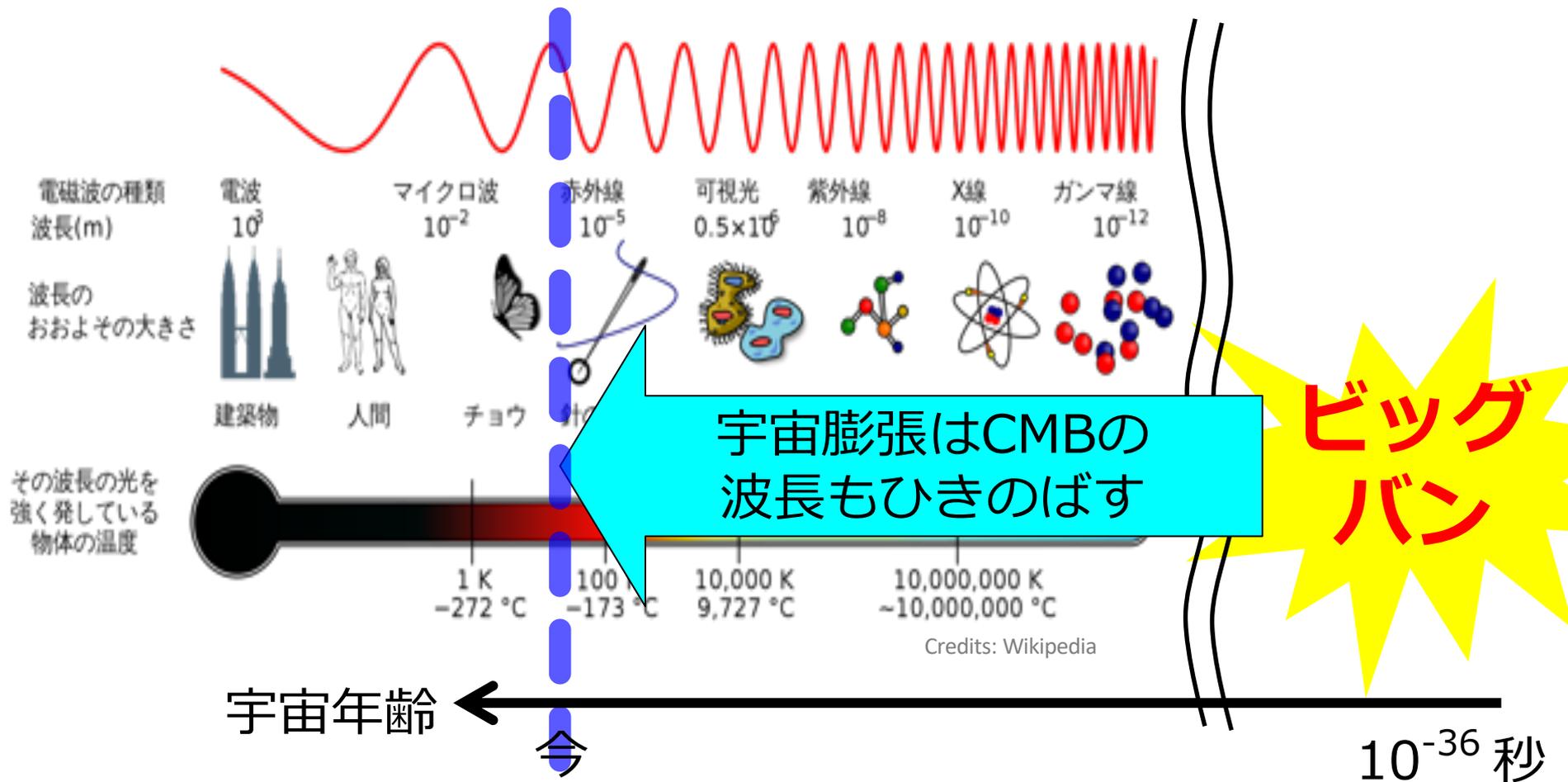


# $m_\nu$ 絶対値へのアプローチ (これから)

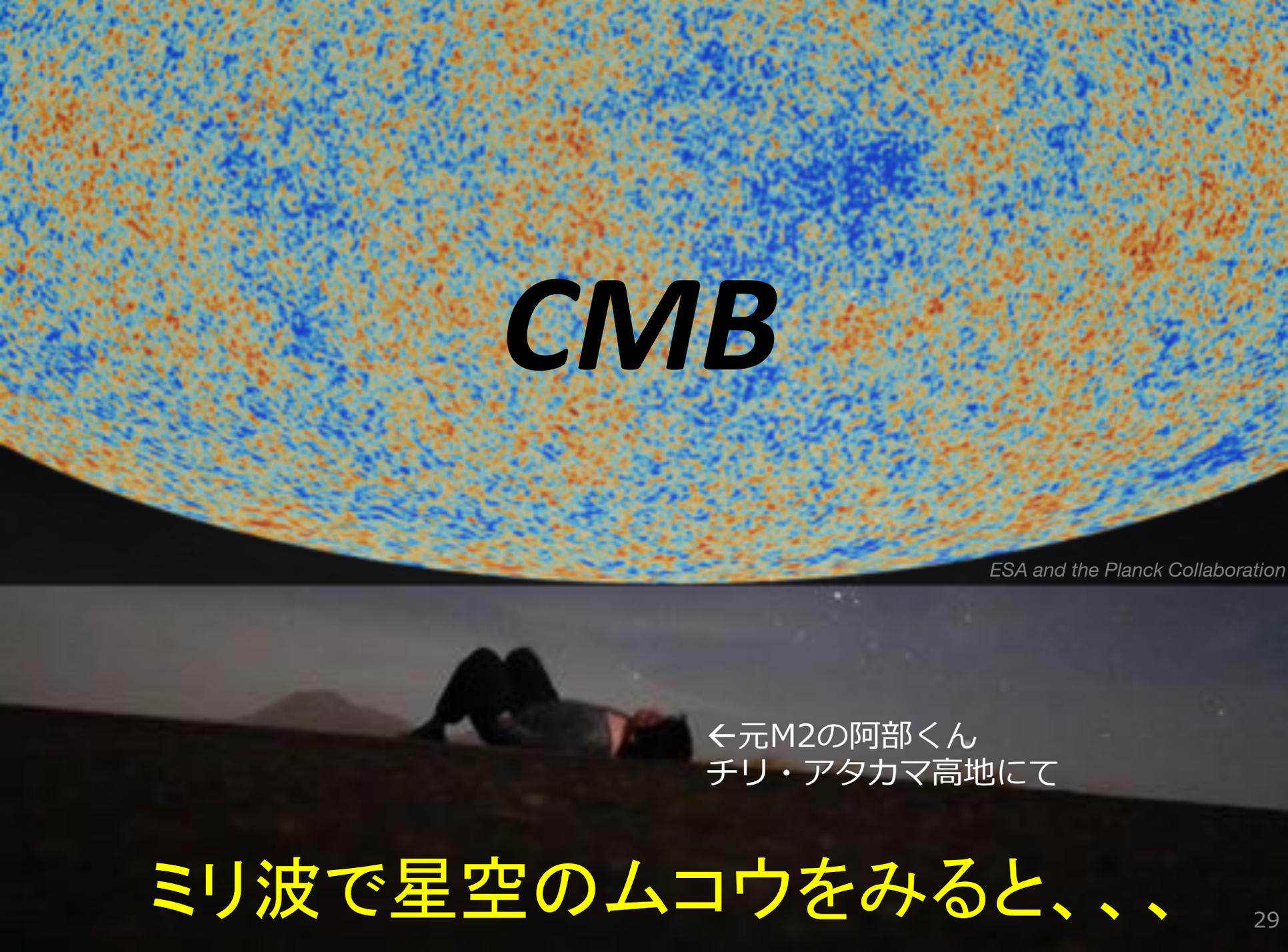


# CMB Today – まだアツチツチ??

## 電波 = 光 = 熱放射



## 超微弱の電波(ミリ波)



# CMB

ESA and the Planck Collaboration

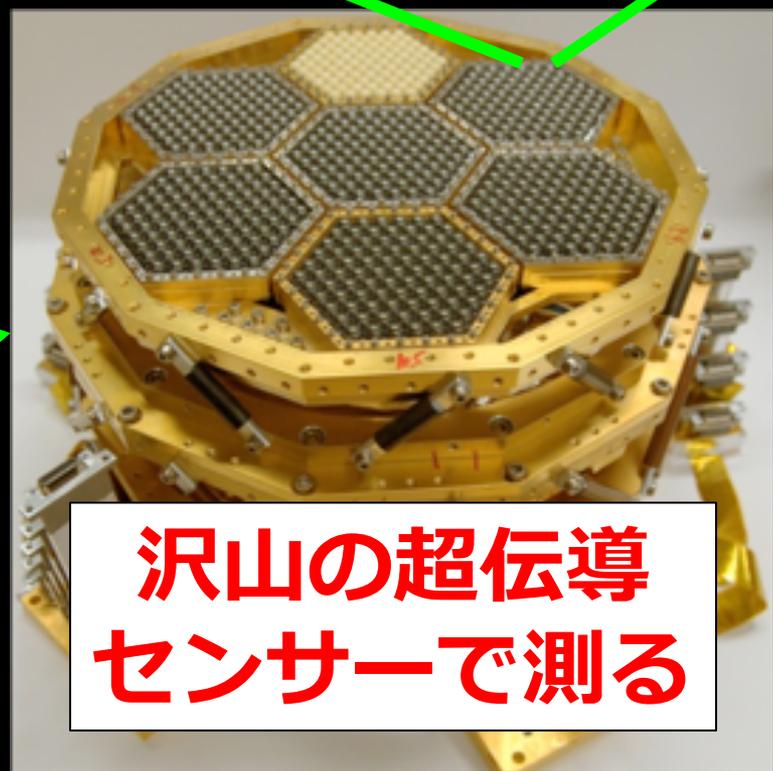
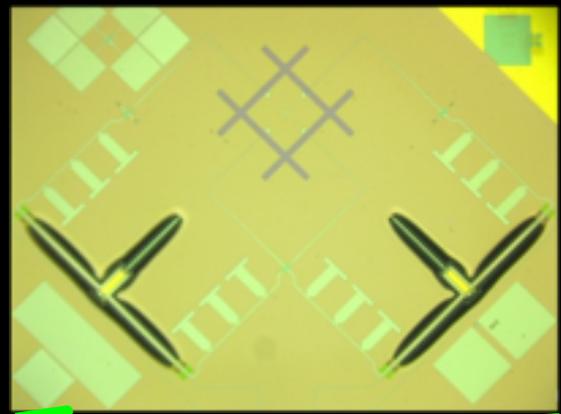
←元M2の阿部くん  
チリ・アタカマ高地にて

ミリ波で星空のムコウをみると、、、

# ミラー(or レンズ)で集光して

## CMB

Antenna coupled  
superconducting detector



**沢山の超伝導  
センサーで測る**

HTT telescope for POLARBEAR experiment

# 観測サイト：カナリア諸島テネリフェ島 Teide Observatory, 2,400 m alt.



**Dry area above clouds  
+28.3°, -16.5°**



Atacama plateau in Chile

# チリ・アタカマ高地（海拔5,200m）



# 実際に行って研究



K-M. Lee  
(コリア大)

M. Peel  
(IAC)

鈴木惇也  
(京大)

田島治 (京大)

本多俊介  
(京大)

小栗秀悟  
(理研)

末野慶徳  
(京大)

## カナリア諸島テイデ観測所



池満



小峯

安達



阿部



## チリ・アタカマ高地



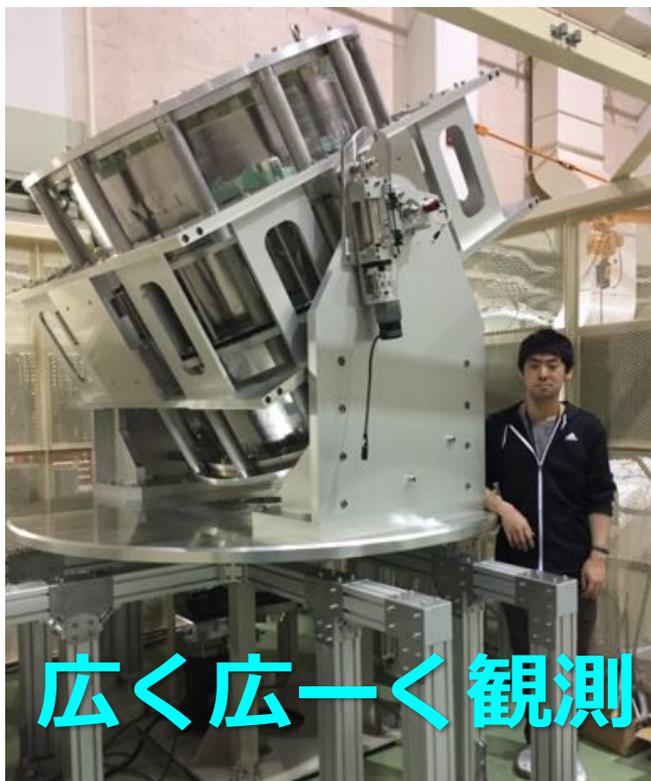
# 注力するプロジェクト2つ

## 日本独自技術！

スペイン、韓国、オランダ

## GroundBIRD (GB)

2019. 9 ファーストライト達成！



## 国際共同で望遠鏡“群”

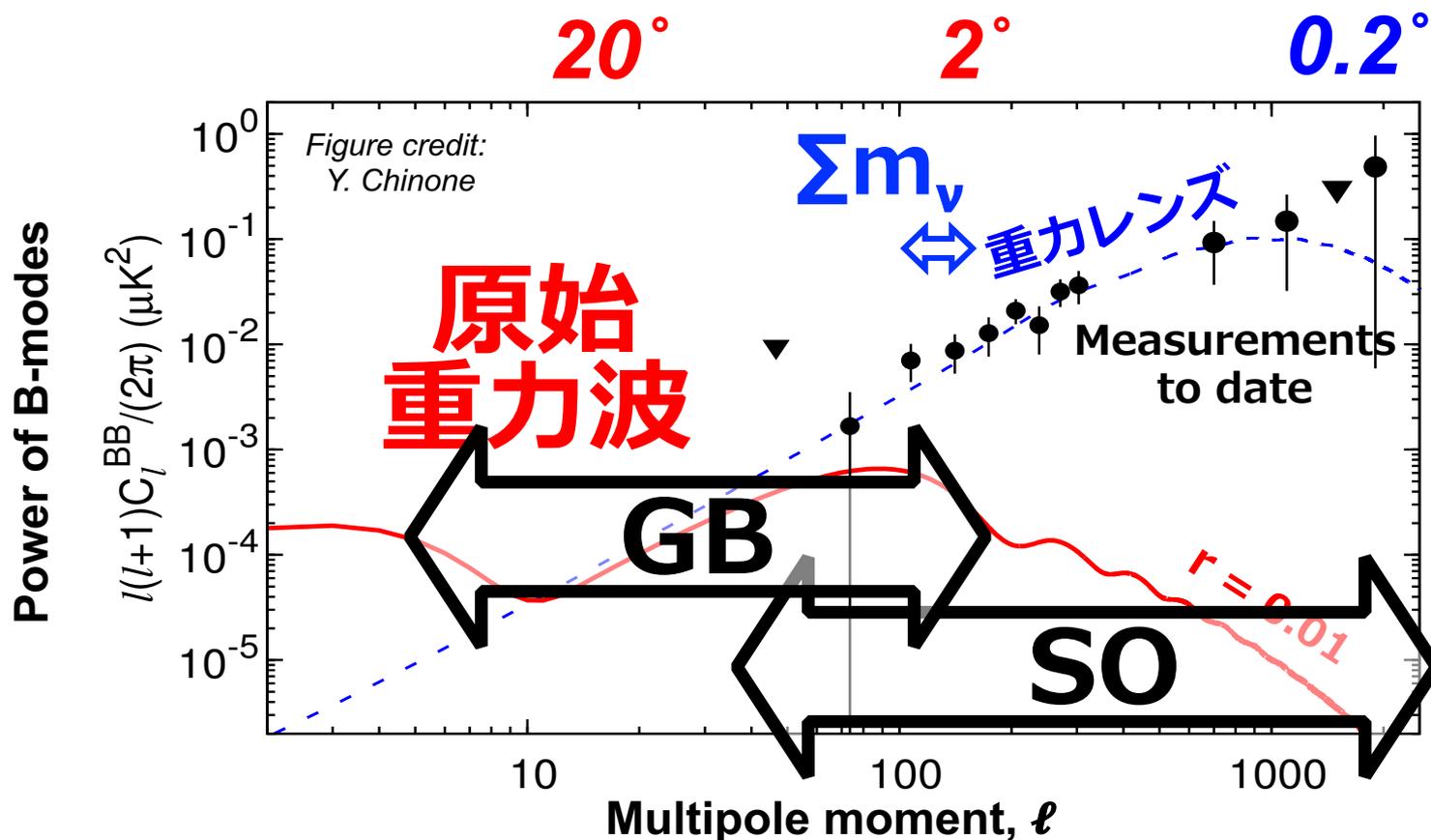
(日米欧チリ)

## Simons Observatory (SO)

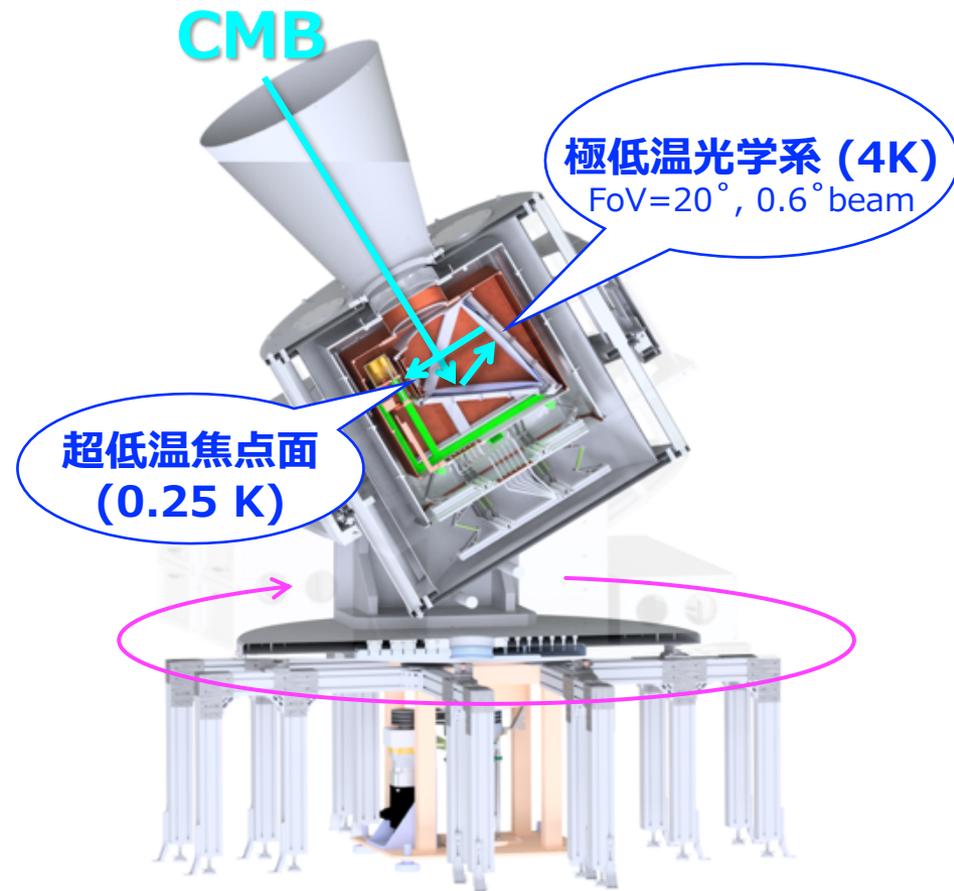
FY2021 ファーストライト予定



# 独自性と王道の両立で 場外ホームランとヒットを狙う



# GBのウリ

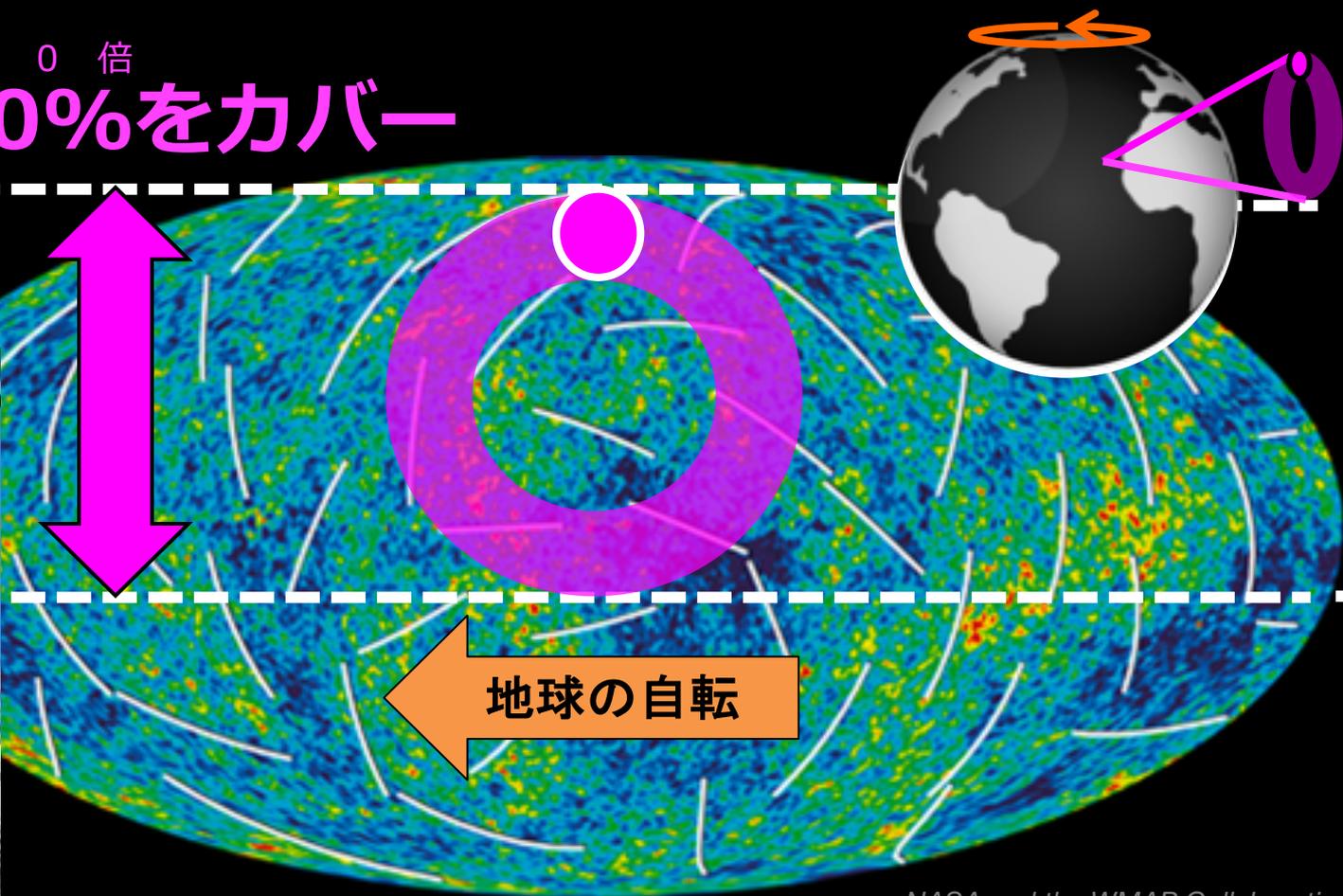
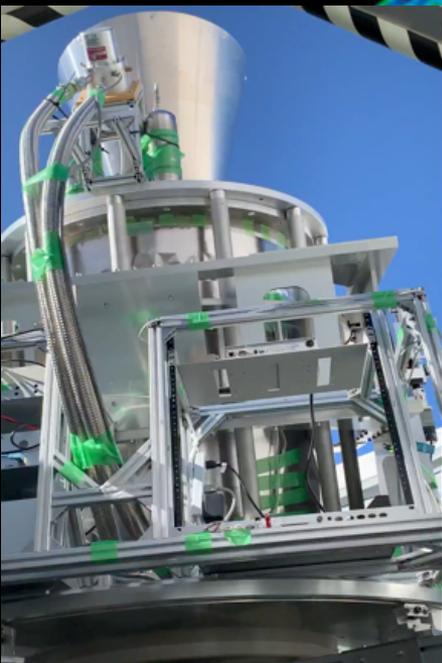


**世界最速のスキャン変調！**  
**(従来の100倍速)**

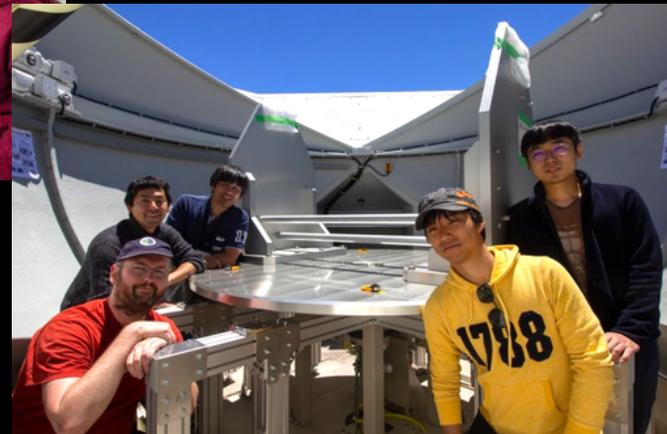
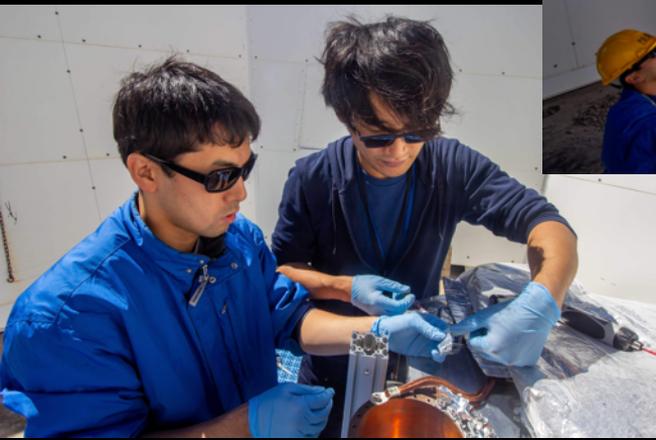
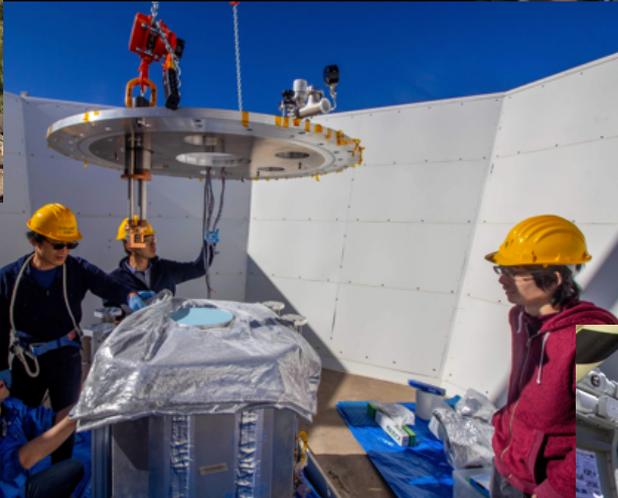
# 広大な観測領域を 超高速回転スキャンで実現

他実験の10倍

全天の40%をカバー

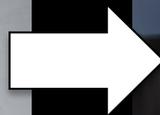


# 研究員と大学院生が 現地で建設！（2019）



# 望遠鏡マウント部の移設

2019年6月



# GB受信機のインストール

4 September, 2019

@ Teide Obs, Canary, Spain





M. Peel  
(IAC)

K-M. Lee  
(コリア大)

鈴木惇也  
(京大)

田島治 (京大)

本多俊介  
(京大)

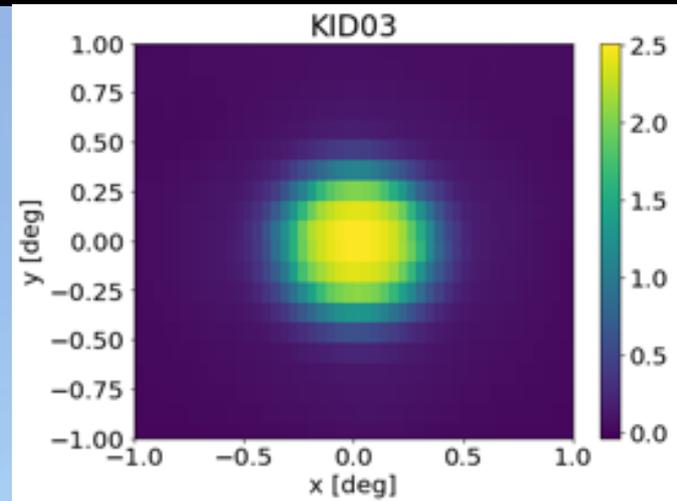
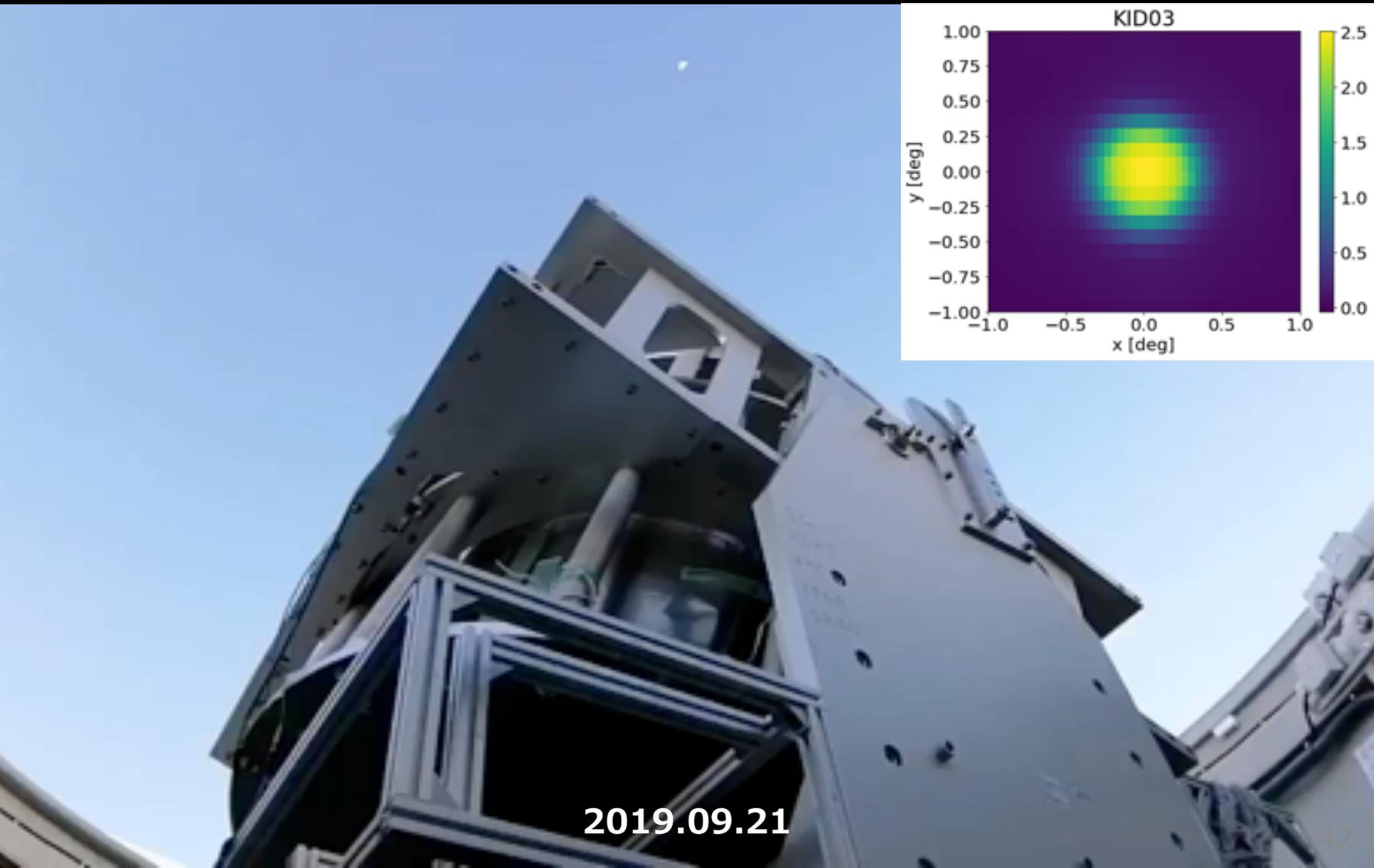
末野慶徳  
(京大)

小栗秀悟  
(理研)

4 September, 2019 @ Teide Obs, Canary, Spain

試 験 観 測 の 開 始

# ファーストライトの達成！



2019.09.21

# 広い天域の試験観測



今後：超伝導センサーのアップグレード → 本観測

# CMB望遠鏡“群” Simons Observatory (SO)

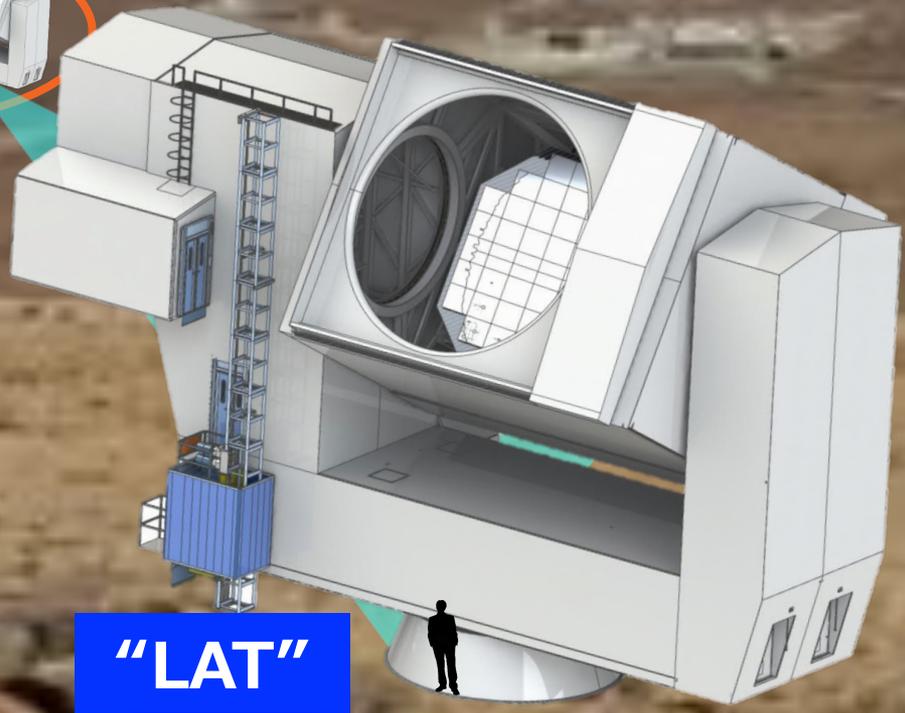
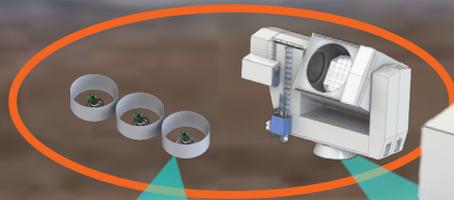


国際共同プロジェクト（～300人）

# CMB望遠鏡“群”

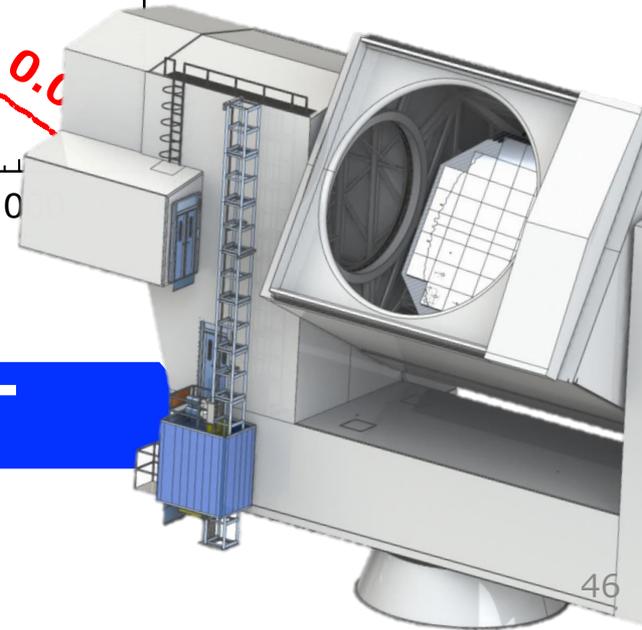
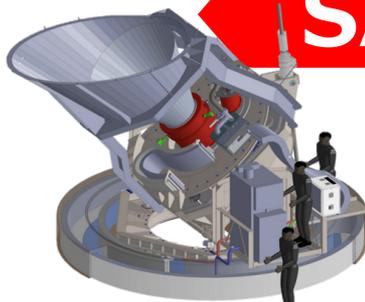
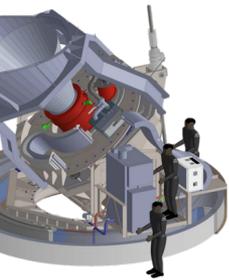
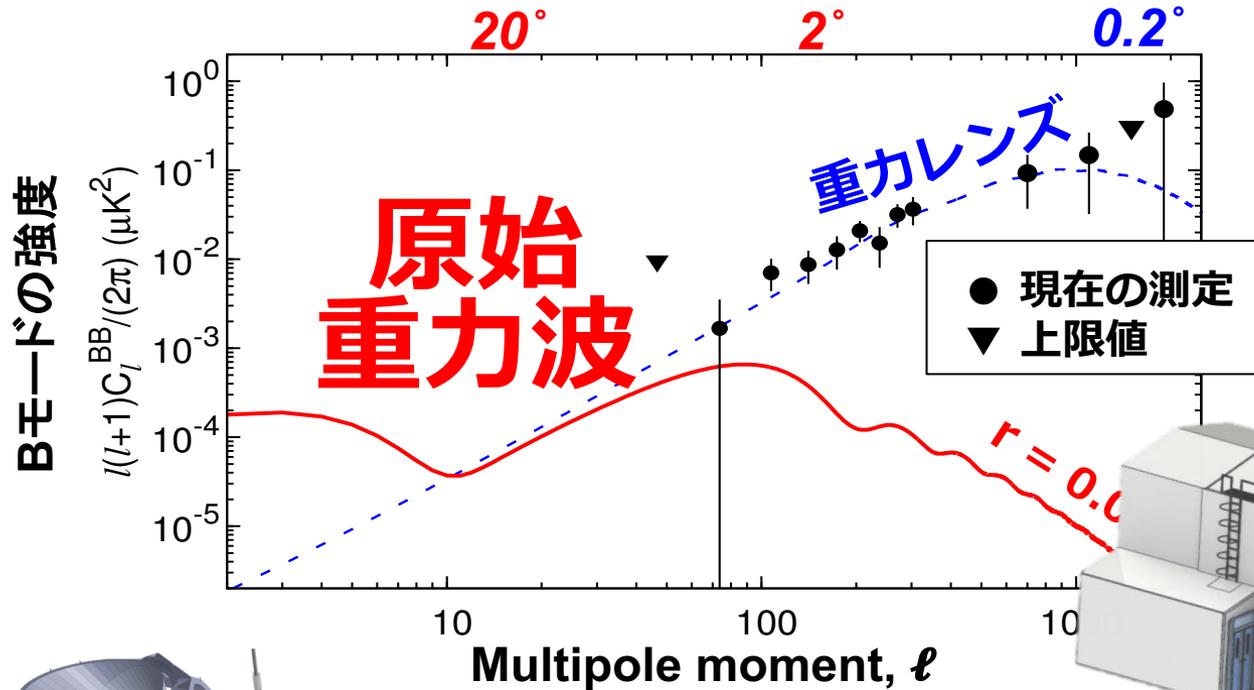
## Simons Observatory (SO)

*First Light in FY2021  
Atacama, Chile (5,200m)*



# 望遠鏡“群”を活かす！

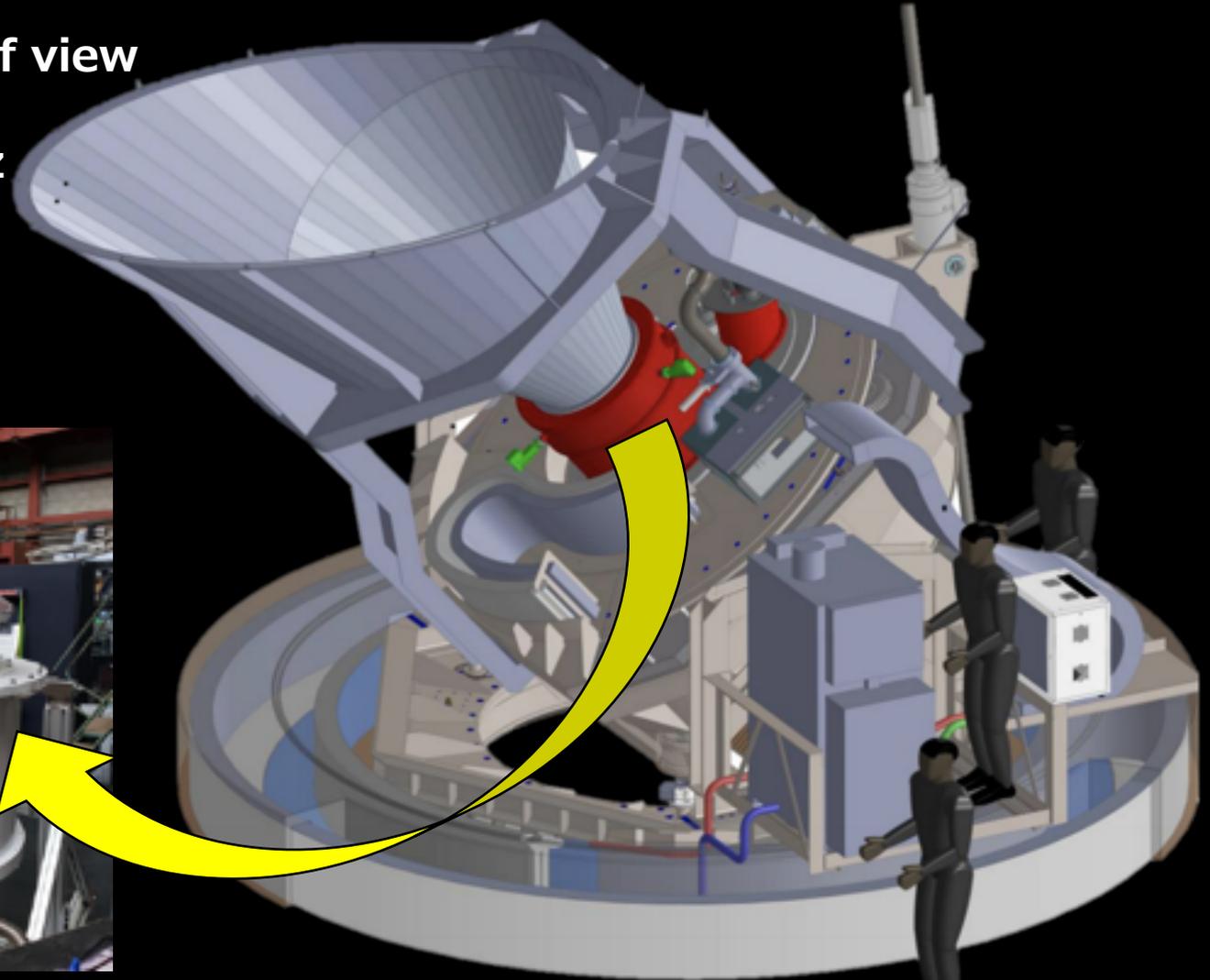
感度と角度スケール・カバレッジの両立



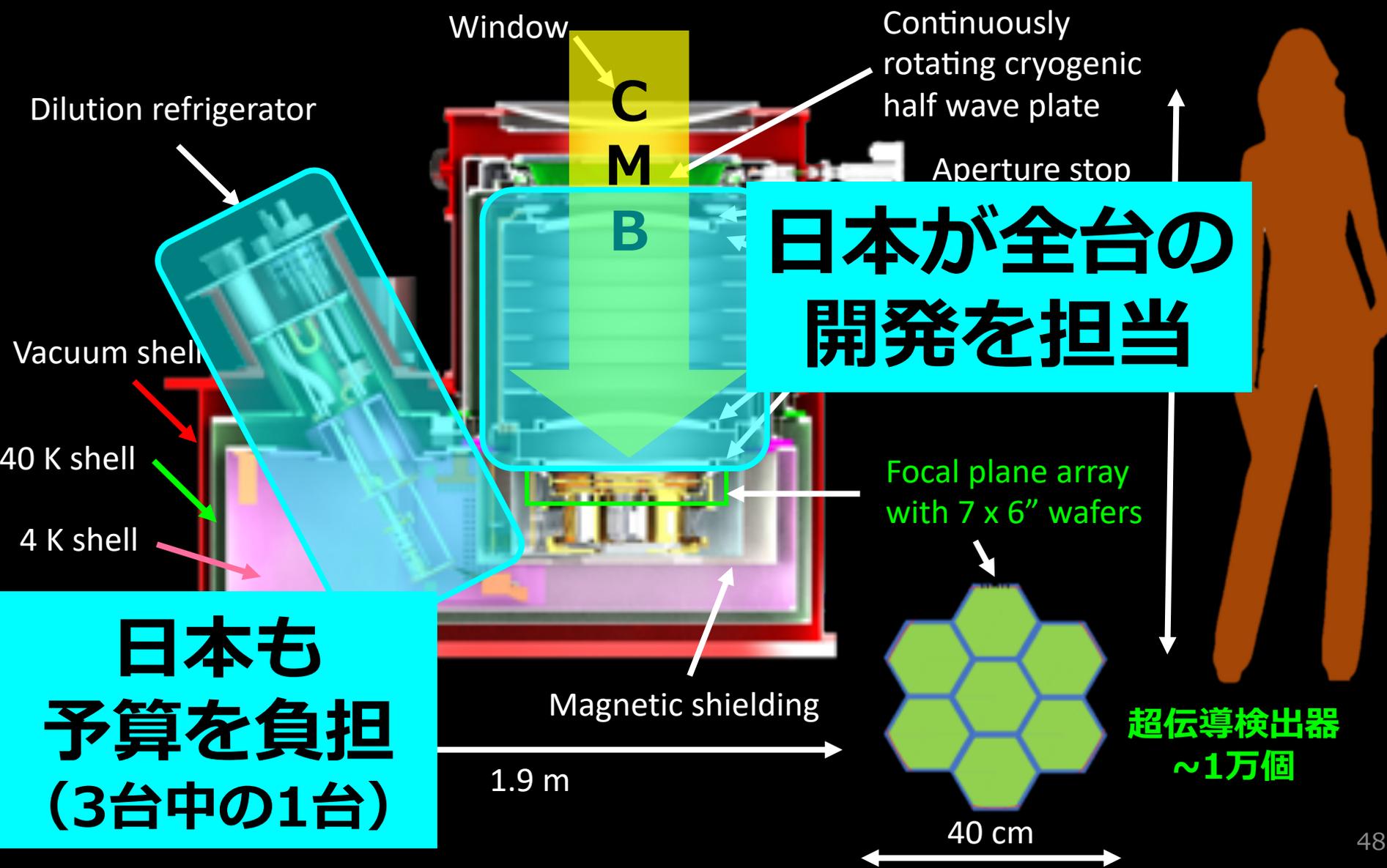
# Small Aperture Telescope

3 telescopes

- 42 cm aperture
- 35 degree field of view
- 2 x 90/150 GHz
- 1 x 220/270 GHz



# SAT受信機



日本が全台の開発を担当

日本も  
予算を負担  
(3台中の1台)

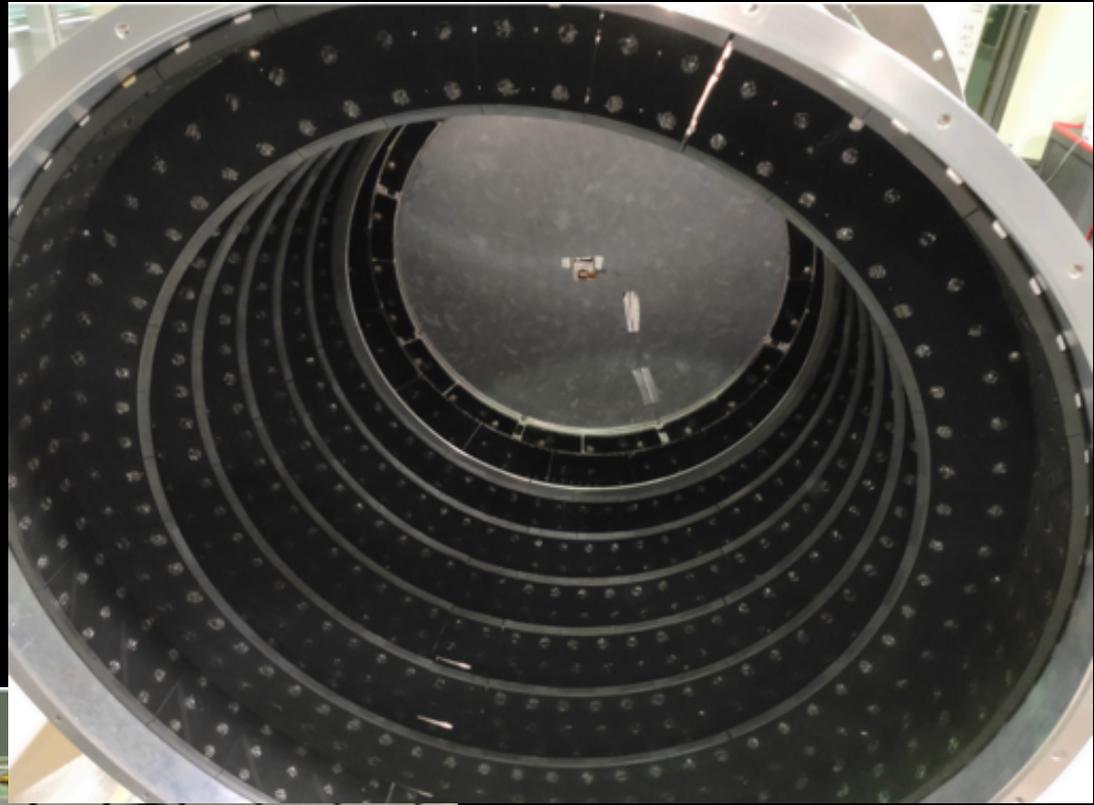
超伝導検出器  
~1万個

1.9 m

40 cm

# Optics Tube (OT) 開発

3Dプリンタ黒体&冷却試験：京大  
OTメカ：東大（本郷）  
OT冷却試験：Kavli IPMU & KEK



木内  
(東大)

仲村 (IPMU)

Fred 松田  
(IPMU)

安達 (京大)

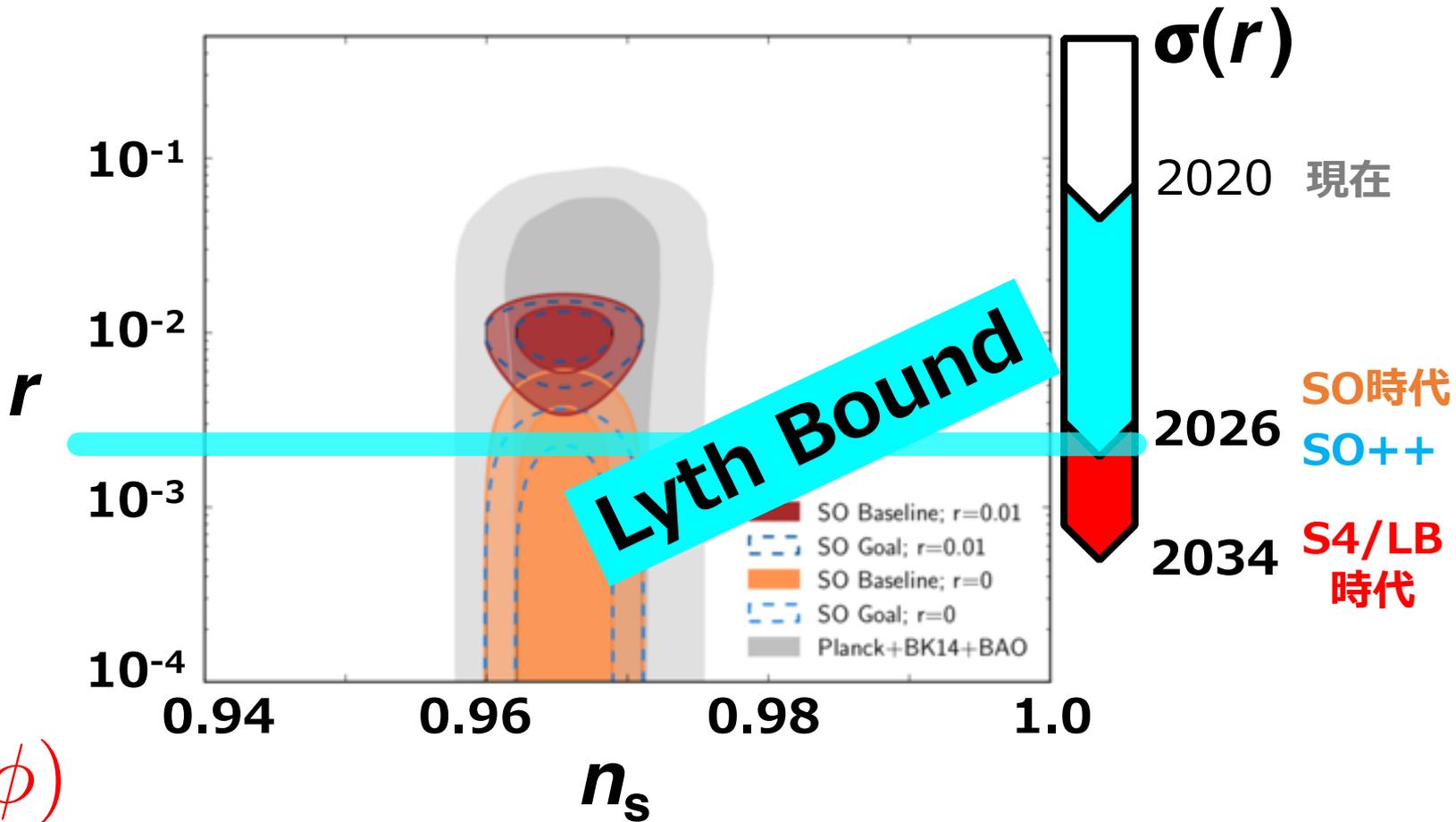
↑  
黒体を貼ったOT

3Dプリンタ黒体の論文  
S. Adachi et al., Rev. Sci. Instru.,  
(2019).

← IPMUのcryostatを  
使ってOTの冷却試験

# 原始重力波とインフレーション

原始重力波の強度

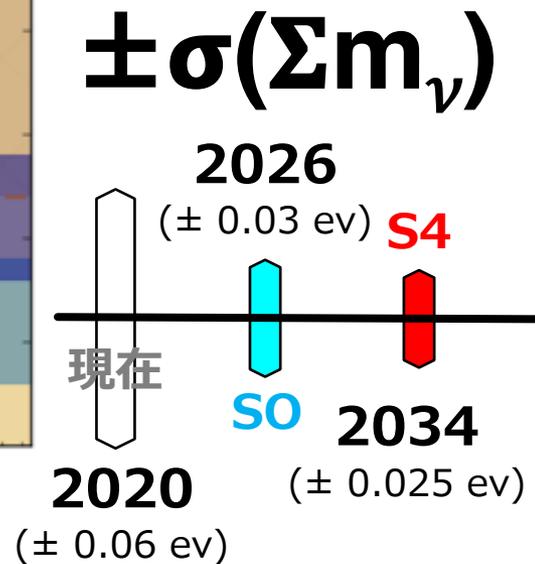
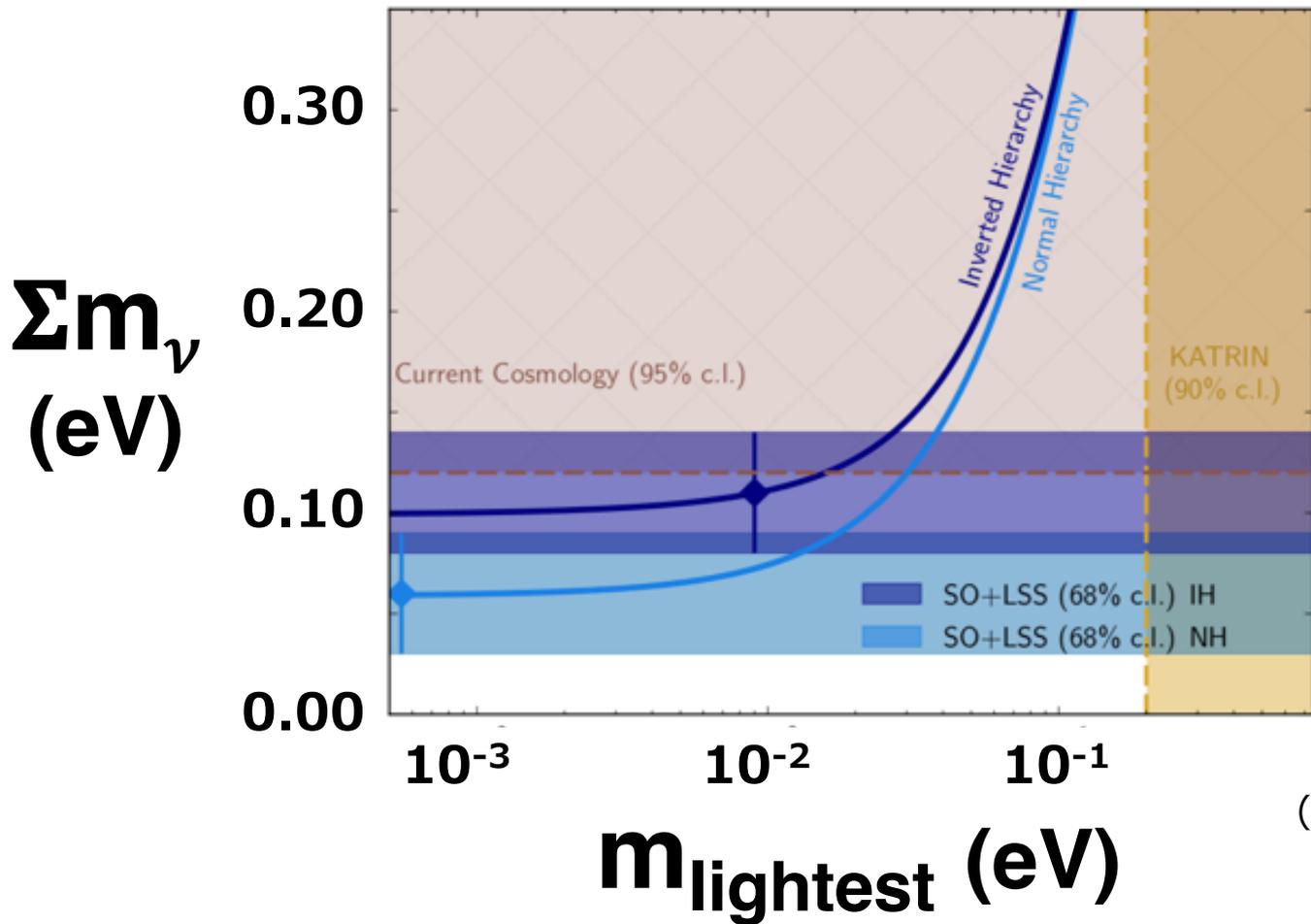


$V_{\text{inf.}}(\phi)$

**GUT-scale**

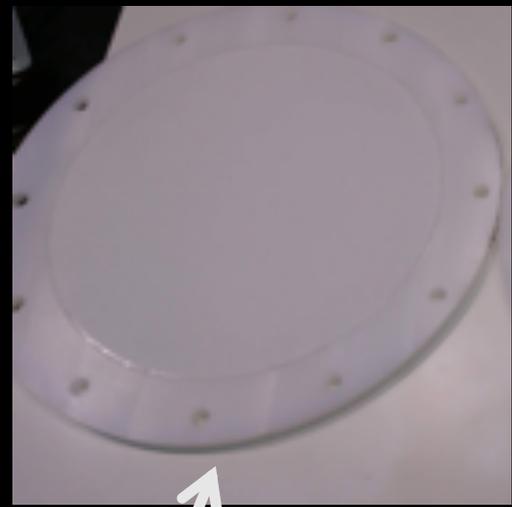
インフレーションをゆっくり停止する  
 “ブレーキの弱さ”みたいな量  
 ( $n_s=1 \Leftrightarrow$  停止できないインフレーション)

# ニュートリノ質量の絶対値

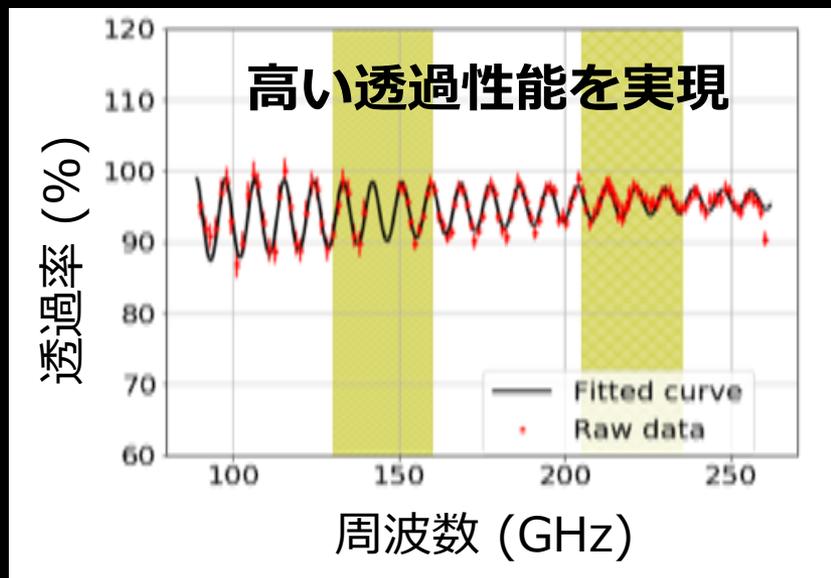
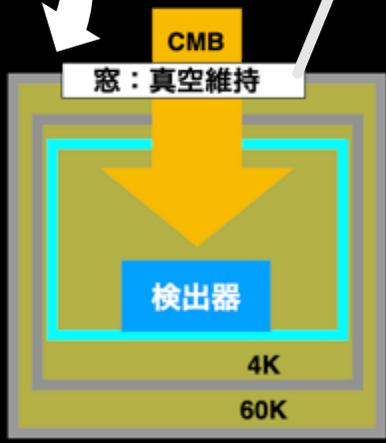


$\Sigma m_\nu$  の下限 0.06 eV

# これまでの修論：受信機マド



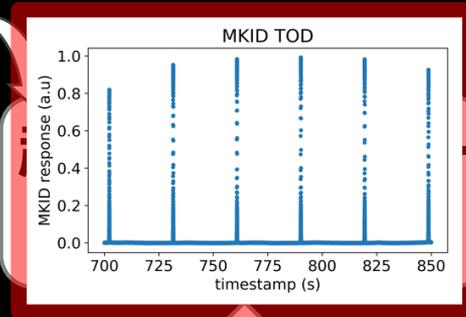
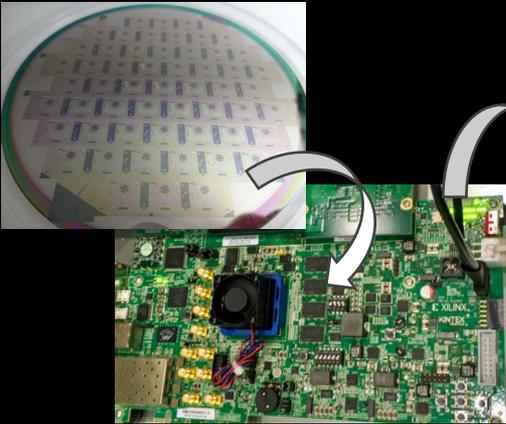
小峯くん  
FY2018



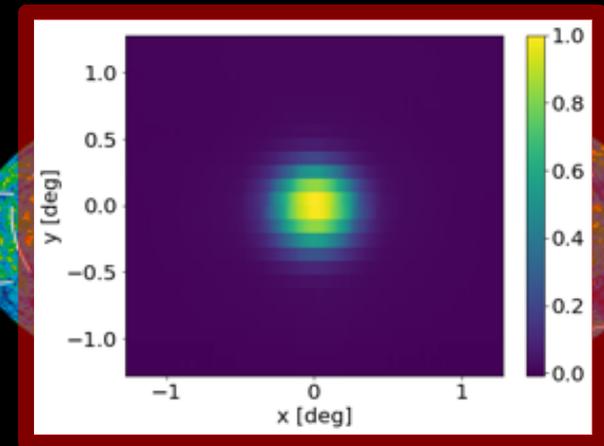
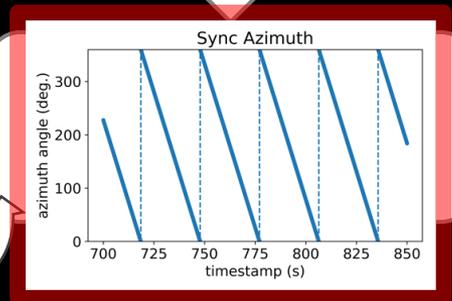
# これまでの修論

祝 優秀修士  
論文賞

富士通の  
池満さん  
FY2019



時刻同期



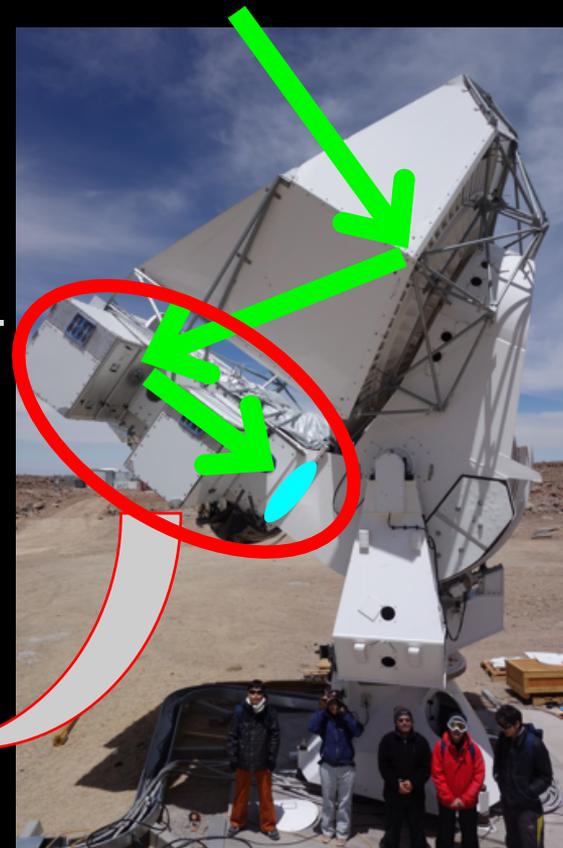
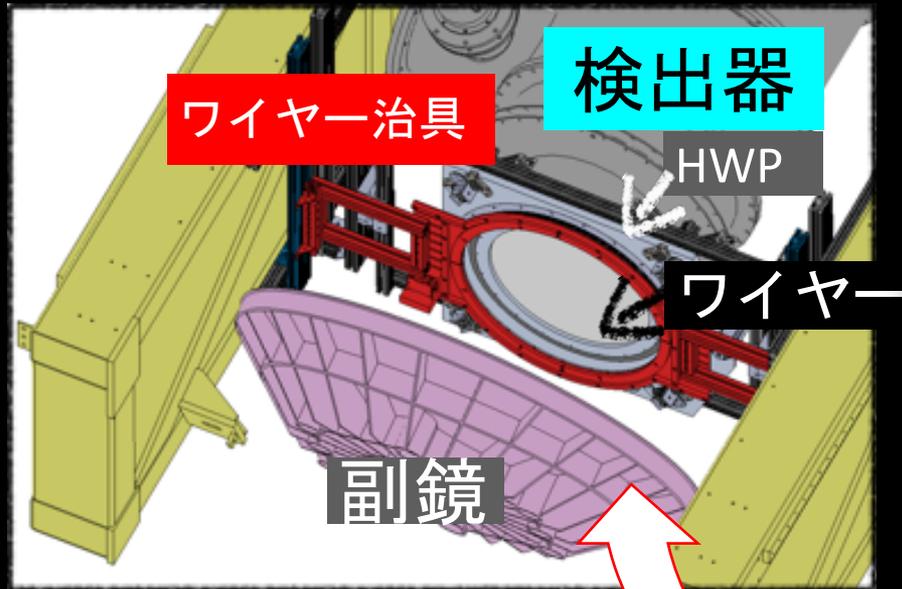
# 望遠鏡とデータ取得システムの同期

# これまでの修論

阿部くん  
FY2019



# 望遠鏡の較正



# これまでの修論

阿部くん  
FY2019



## 望遠鏡の較正



望遠鏡の準備  
がまだ万全で  
なかったため

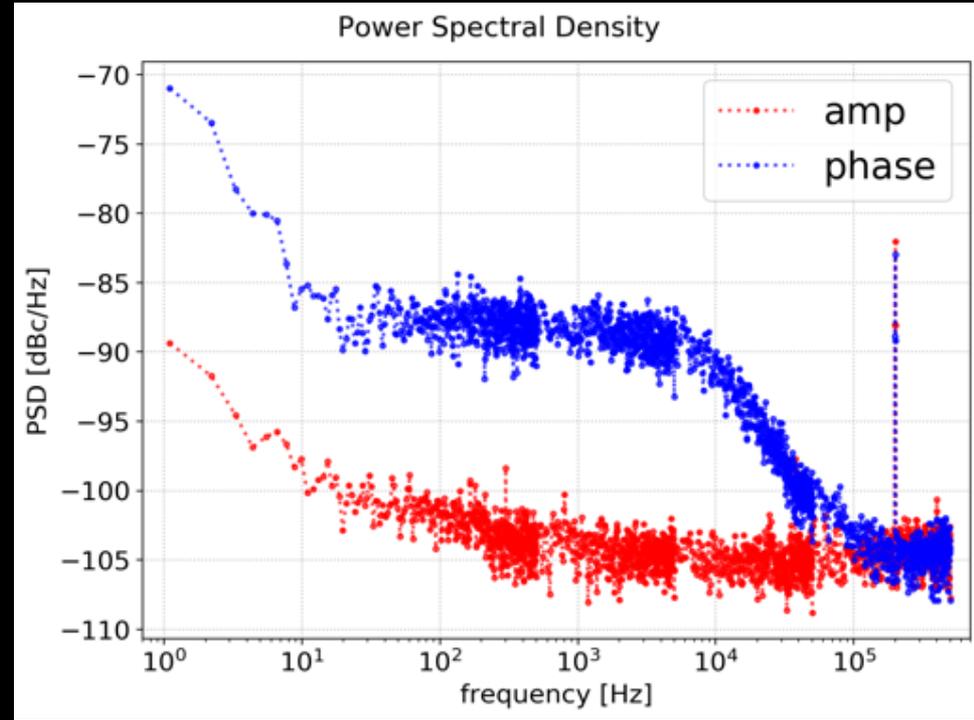
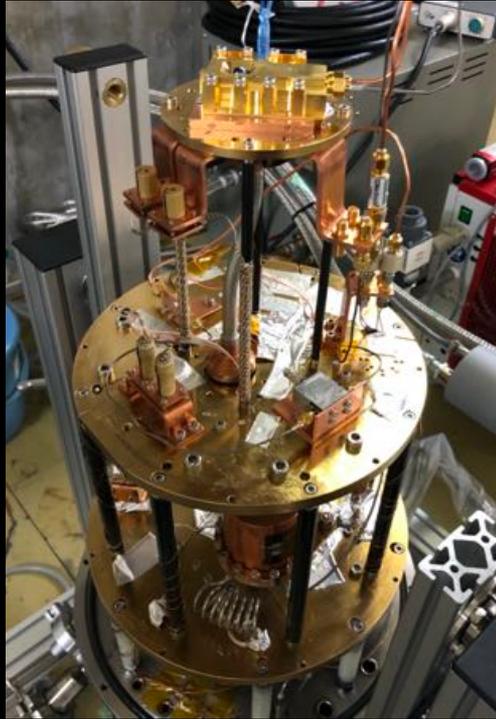


仕方ないから  
手で回して…



検出器出力  
の時間変化  
をみた

# 修論予定 (末野) MKID開発研究



超伝導センサーを

0.3 Kに冷却して

超低ノイズ環境でセンサー特性の評価



センサーのアップグレード  
観測データ解析へフィードバック

超伝導センサーの性能を引き出す！

# 修論予定 (大塚) 3Dプリンタ黒体



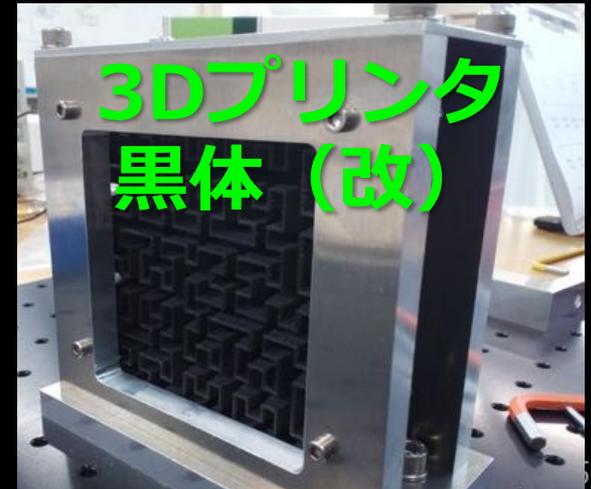
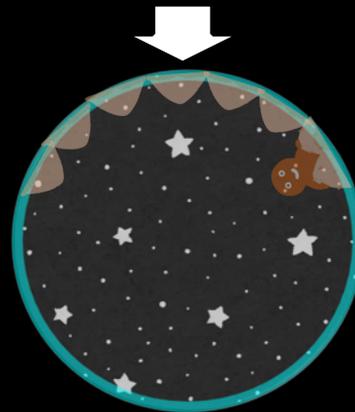
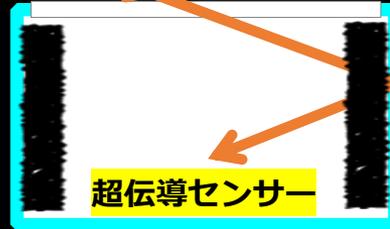
大塚くんの写真がないので、安達くんの写真



ゴースト放射  
(地面熱放射など)

受信機

内壁を極低温に冷却 (~1K)



# 参考

- 毎週水曜14:00 KUCMBミーティング&ゼミ
- 高エネルギーニュース  
<http://www.jahep.org/hepnews/2019/19-4-1-groundbird.pdf>
- そのうちココに市民講座での講演ビデオが公開される  
<https://ocw.kyoto-u.ac.jp/ja/opencourse/306/video>
- 時間があれば、安達くんが“DOSUE-RR”の勧誘をしたいらしい
- 10年前の第1回優秀修士論文賞の受賞者は木河くん  
<http://rd.kek.jp/ronbun/award2011.html>