

# 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)

物理学第二教室 高エネルギー物理学研究室  
鈴木 惇也

- **CMB とは？**      **(研究の動機)**
- 実際のプロジェクト紹介

混沌として  
光が通らない

# 宇宙の進化



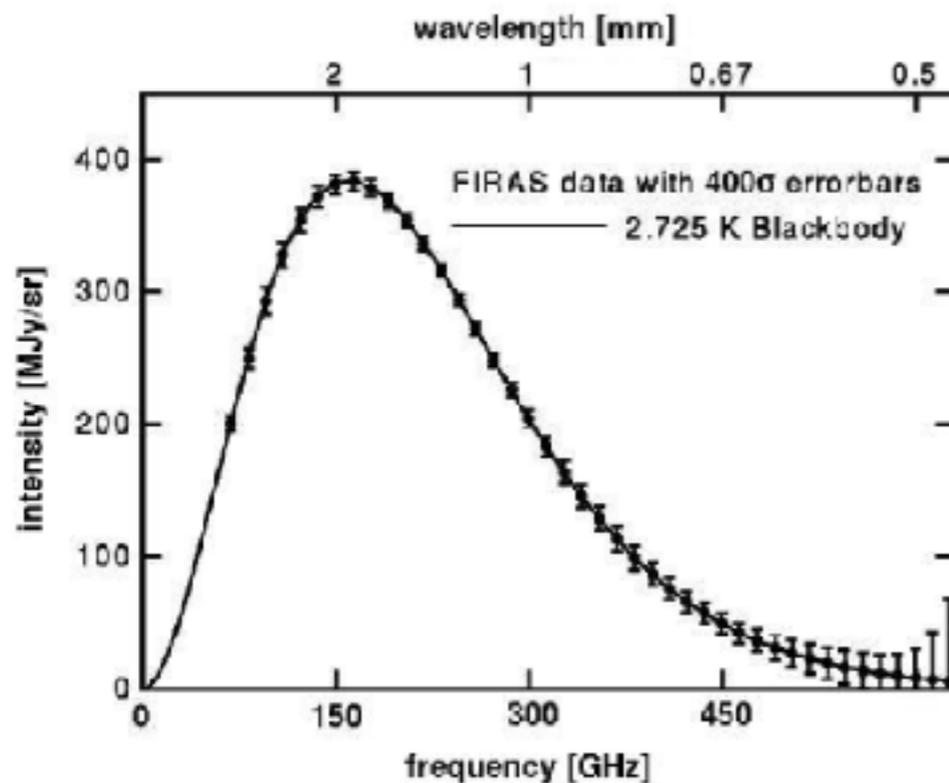
最終散乱面からの  
光が届く

時間



# 宇宙マイクロ波背景放射

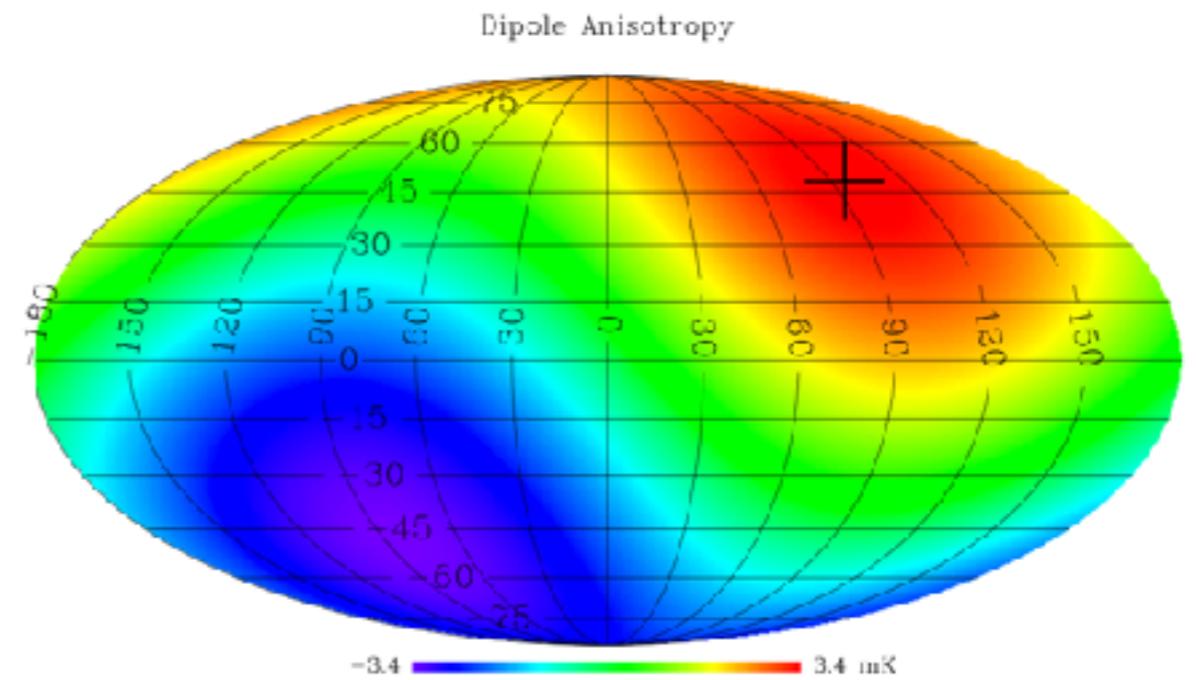
- **Cosmic Microwave Background radiation → CMB**
- どの方向をみても、ほぼ一様に 2.7 K の黒体輻射
- 現在の宇宙では、1 cm<sup>3</sup> あたり 410 個の CMB 光子



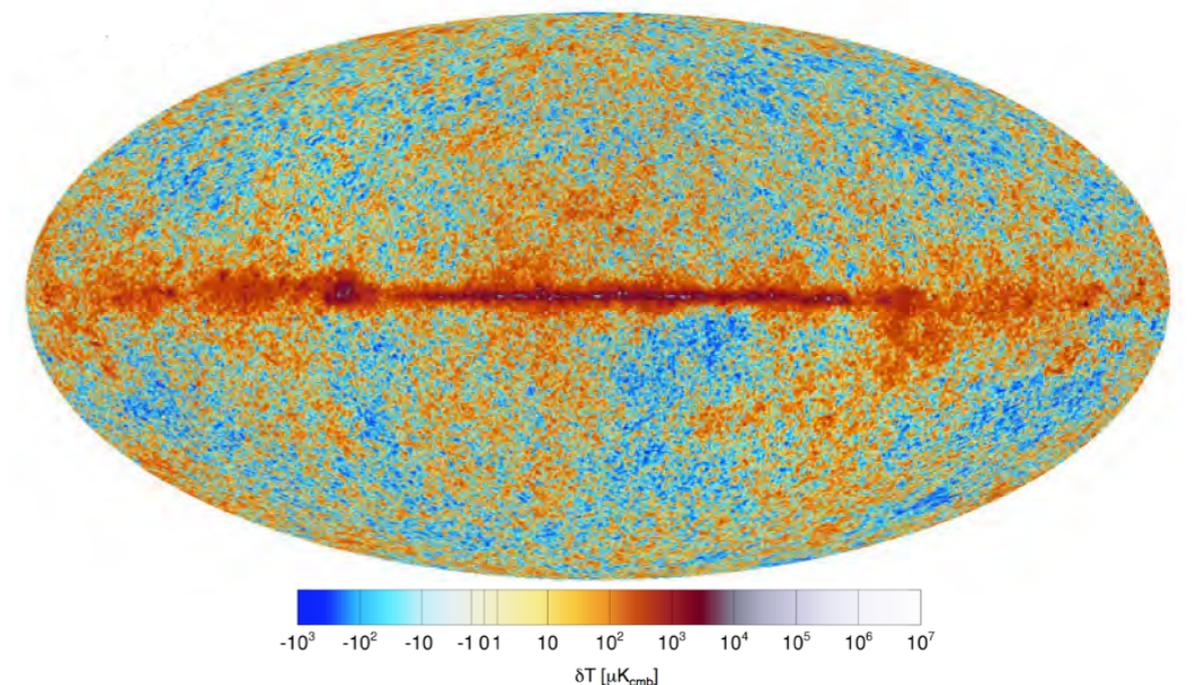
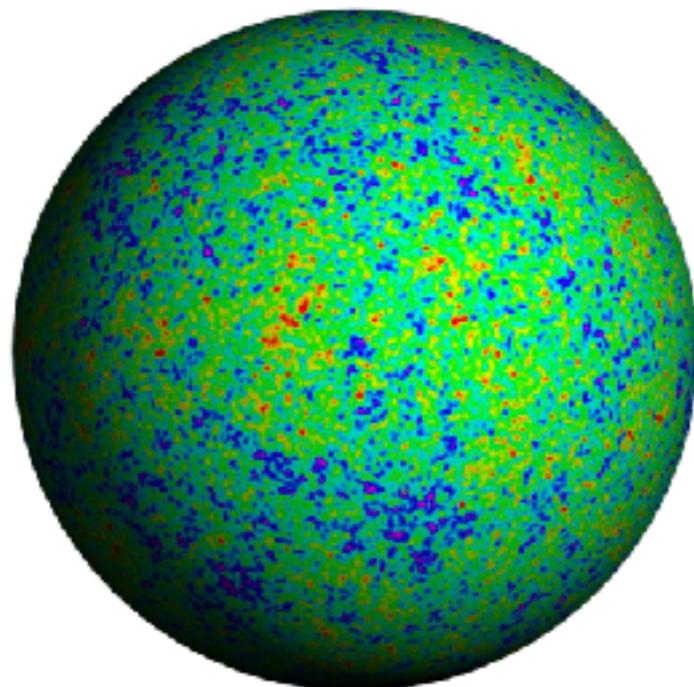
**2.725 K** の黒体輻射スペクトルと一致

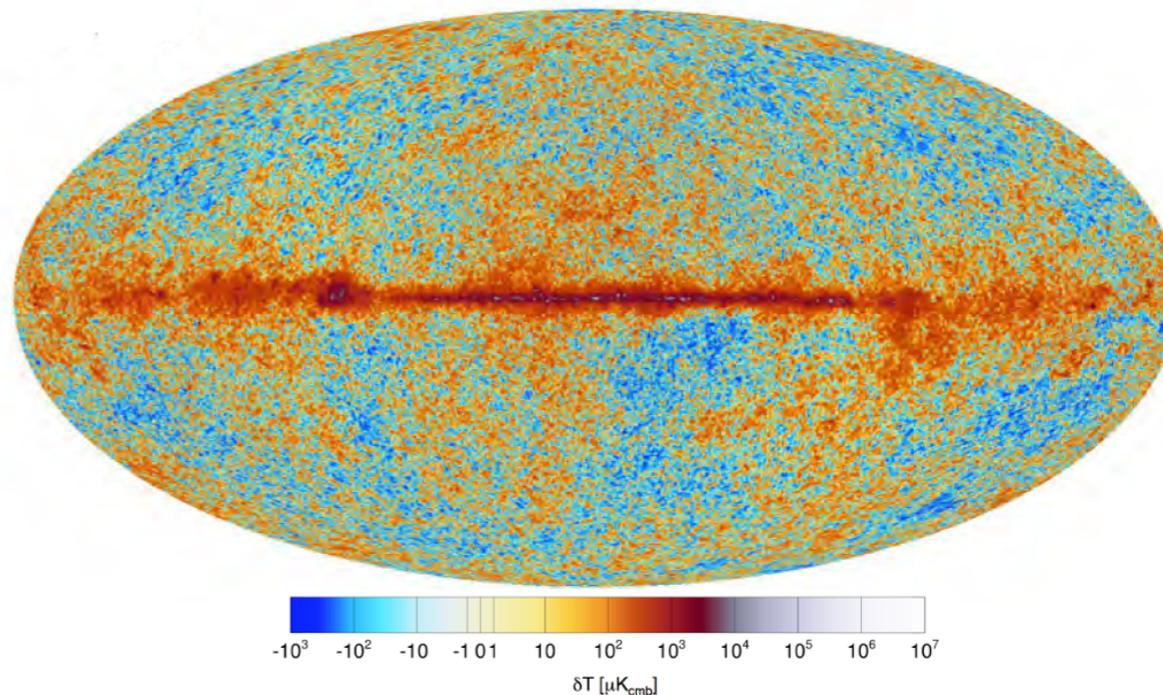
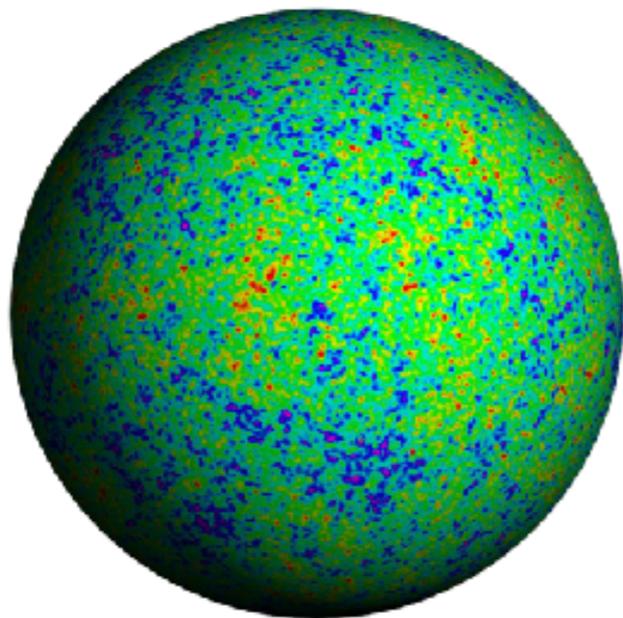
# 一様からのズレ

- 地球の運動に起因したズレ  $\Rightarrow \sim 10^{-3}$  K
- 晴れ上がりの時の重力ポテンシャルの凸凹  $\Rightarrow \sim 10^{-4}$  K



(モルワイデ図法で表示)



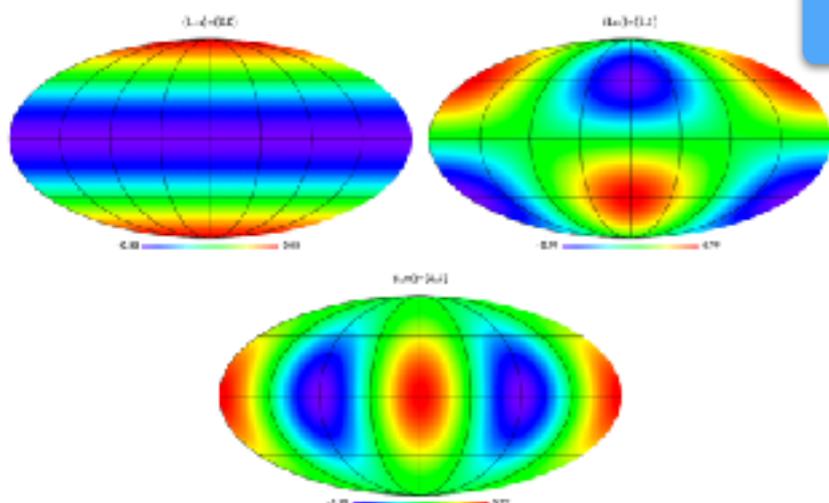


• 球面上のランダムなズレ

→ 球面調和関数で展開して、統計的に処理

2.7 Kからのズレ

球面調和関数



$\ell = 2$

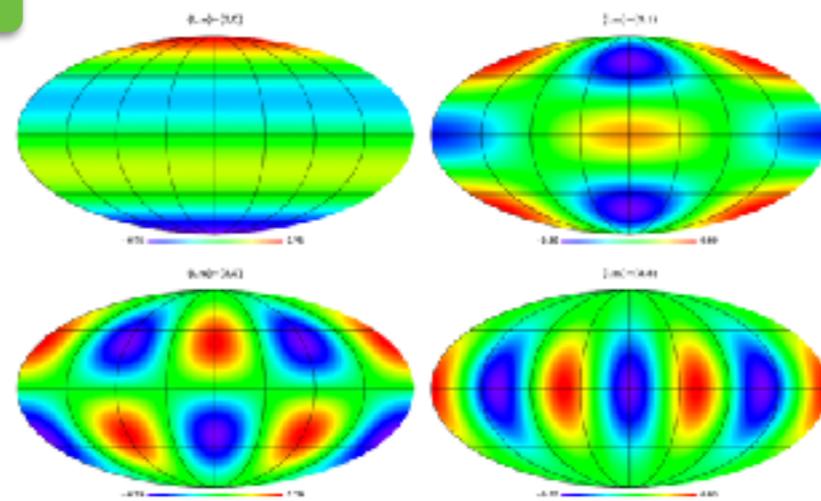
$$\Delta T(\hat{n}) = \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_{\ell}^m(\hat{n})$$

$$C_{\ell} \equiv \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} a_{\ell m}^*$$

パワースペクトル

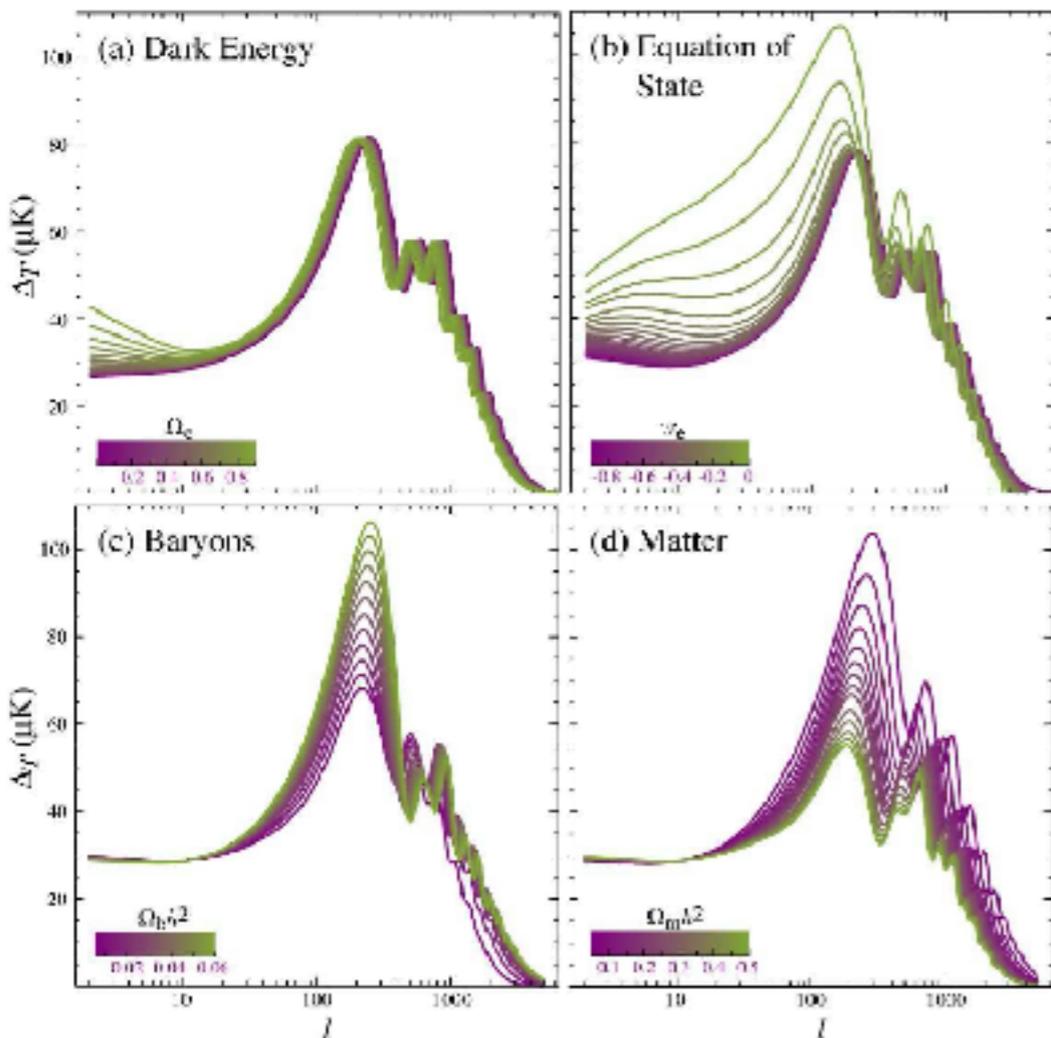
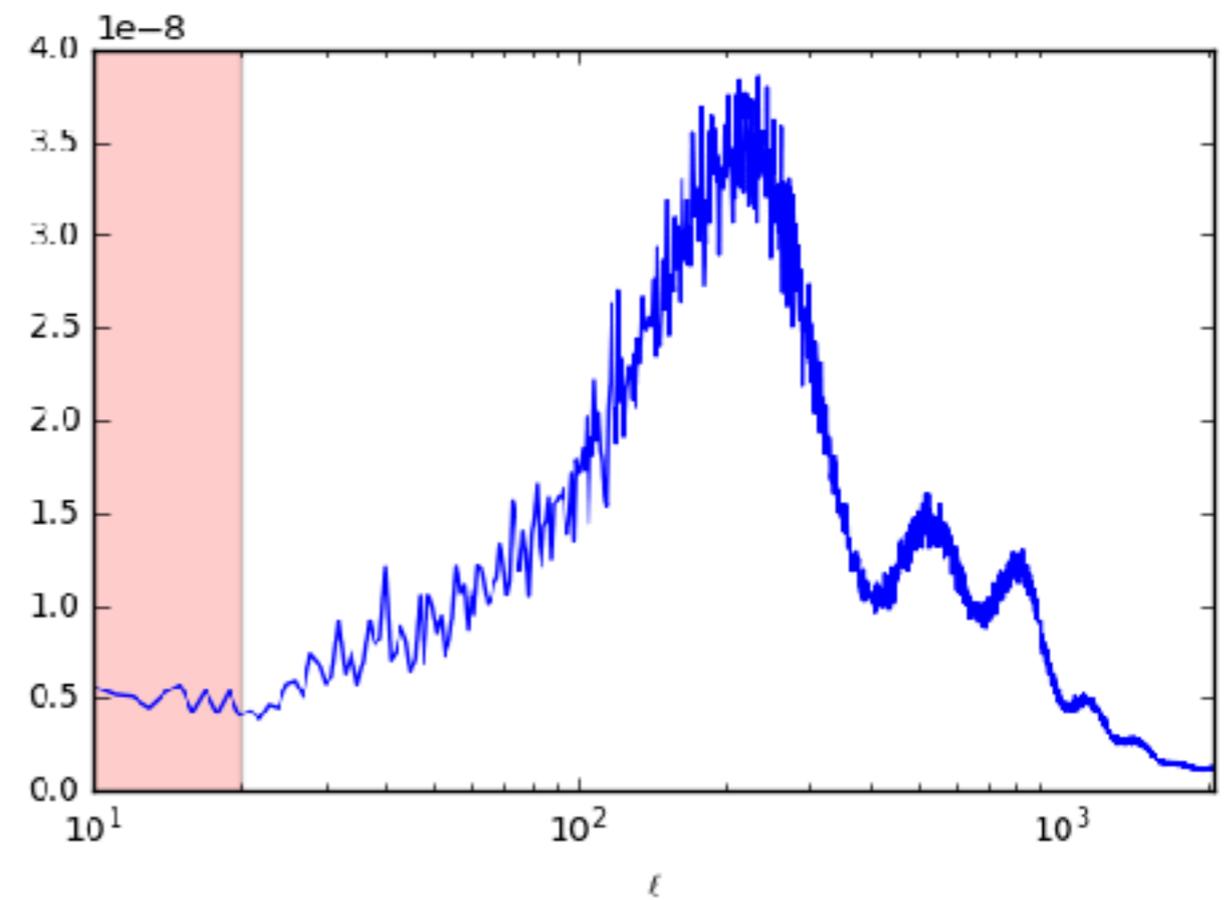
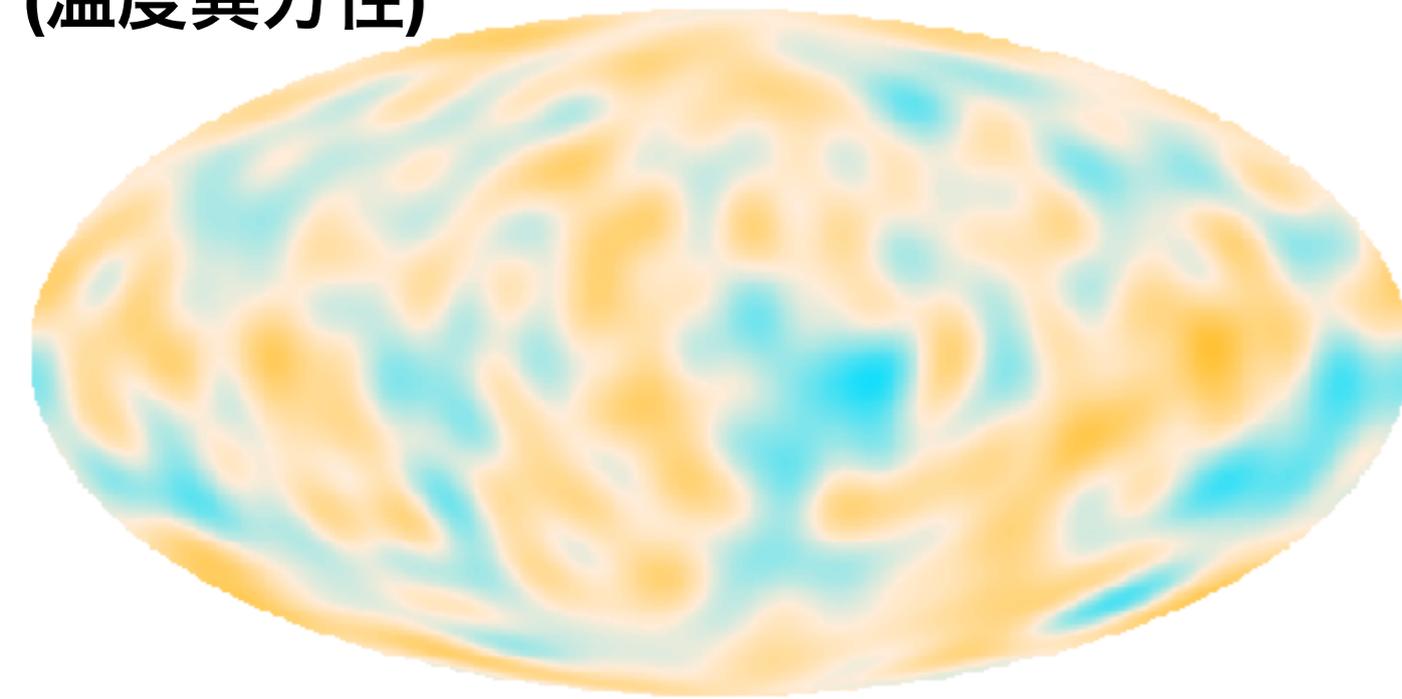
6

展開係数の平均



$\ell = 3$

(温度異方性)



実験的にパワースペクトル  $C_\ell$  を取得

Cosmology

$$C_\ell \propto \int d \ln k T_\ell^2(k) P_\zeta(k)$$

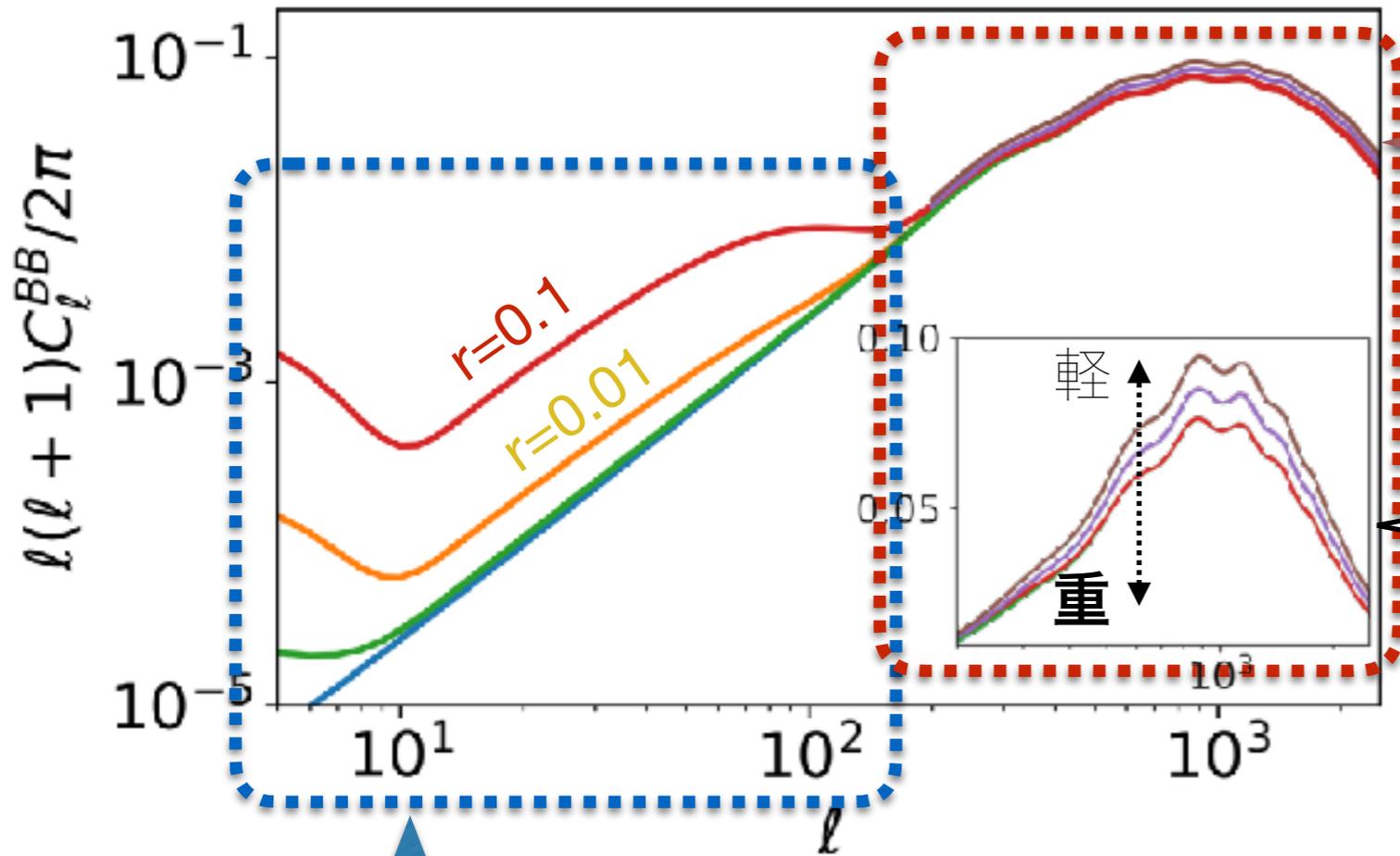
宇宙の発展  
(+球面射影)

原始ゆらぎ

宇宙論パラメータの推定

# 見つけたいものの①

偏光  $B$  モード (奇パリティ成分) 



インフレーション由来の信号  
(原始重力波  $B$  モード)

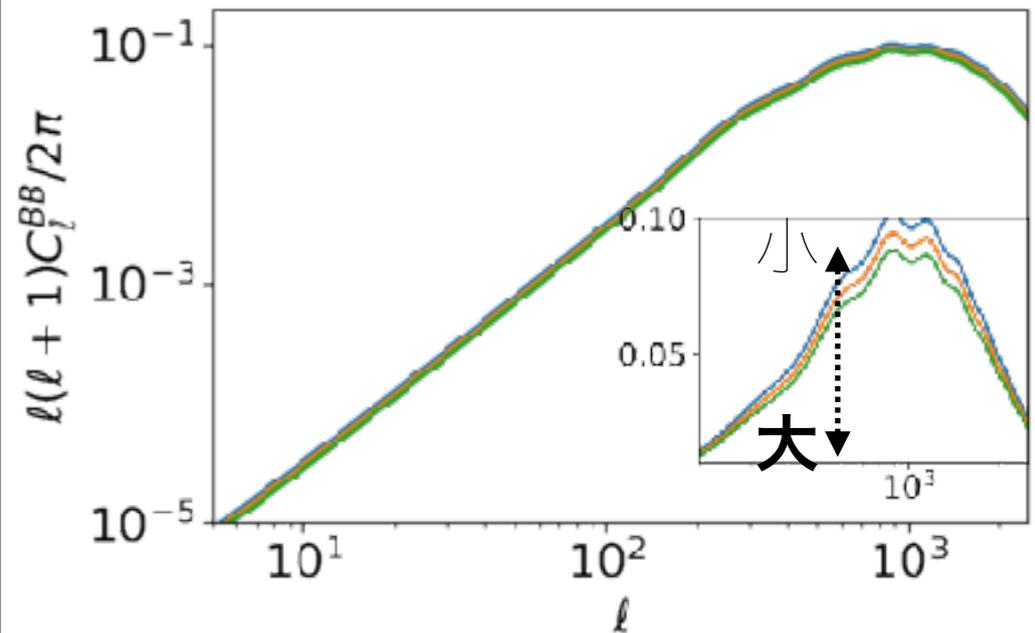
- ・ テンソルゆらぎによって生成
- ・ 低い  $l$  = 大角度の相関 を見る  
ことで測定

ニュートリノ質量和

- ・ ニュートリノの影響で成長が遅れる
- ・ 高い  $l$  = 小角度の相関で測定

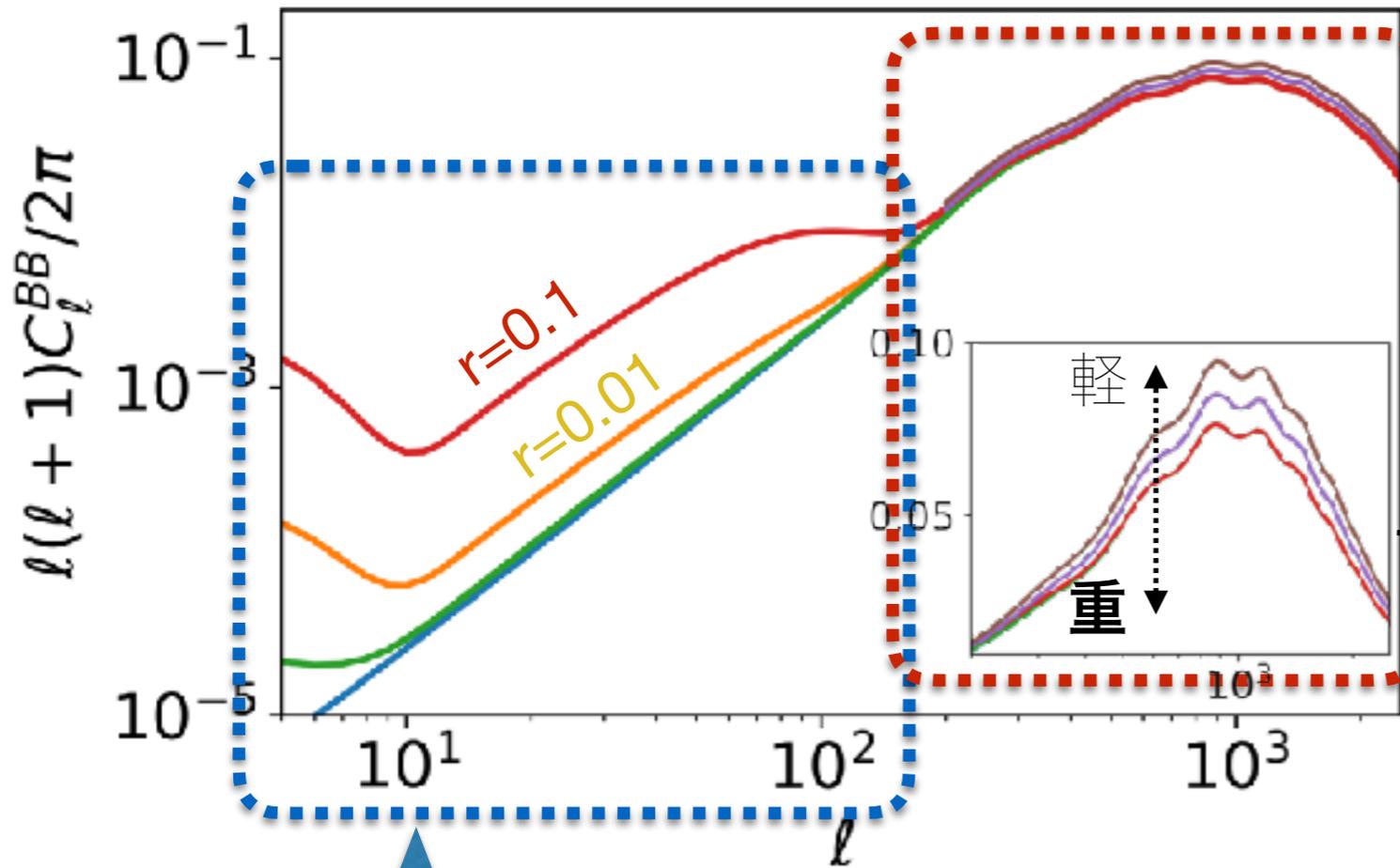
一方で...

再電離の影響



# 見つけたいもの ①

偏光  $B$  モード (奇パリティ成分)

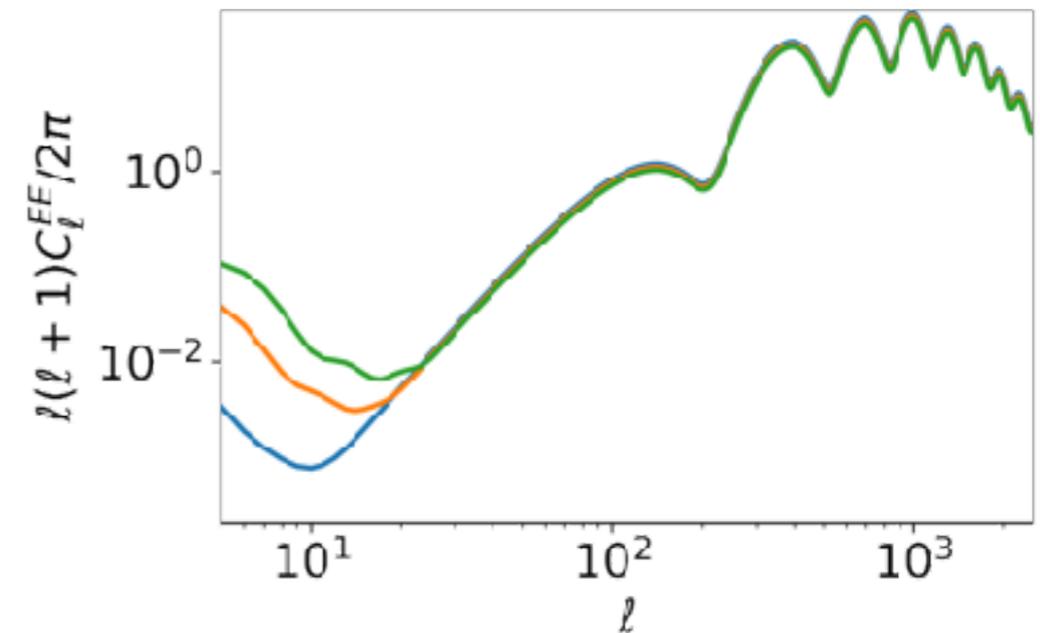


ニュートリノ質量和

- ・ ニュートリノの影響で成長が遅れる
- ・ 高い  $l$  = 小角度の相関で測定

一方で...

再電離の影響



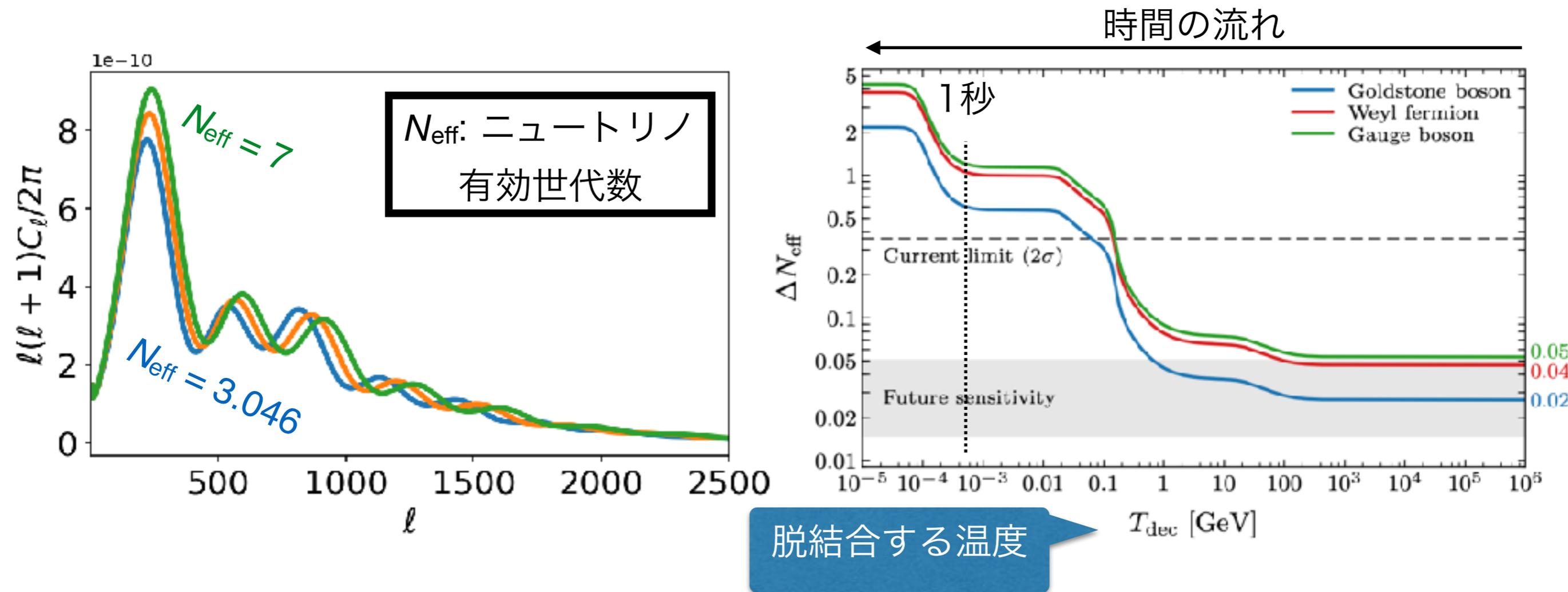
偏光  $E$  モード (偶パリティ成分)



インフレーション由来の信号  
(原始重力波  $B$  モード)

- ・ テンソルゆらぎによって生成
- ・ 低い  $l$  = 大角度の相関 を見る  
ことで測定

# 見つけたいものの②



- ニュートリノより弱く SM に結合する粒子の探索
- 宇宙の観測 (極大) → 素粒子の研究 (極小)

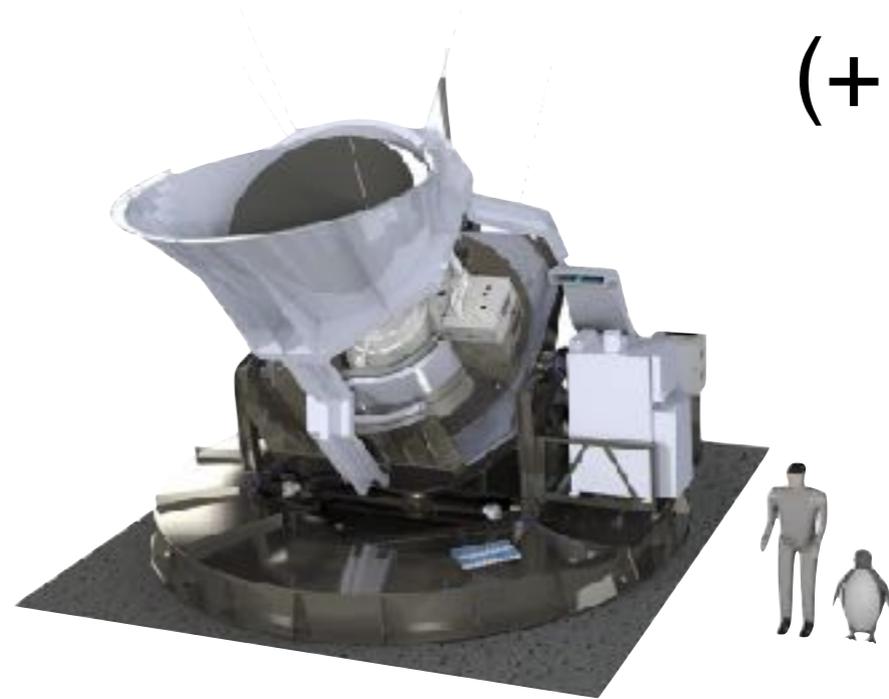
- ・ CMB とは？ （研究の動機）
- ・ **実際のプロジェクト紹介**

- 京大では...

## GroundBIRD



## Simons Observatory (+ SA)



をやっています。

# GroundBIRD

M2 武市



D2 末野



# GroundBIRD

日本で開発された望遠鏡  
スペイン・テネリフェ島で観測





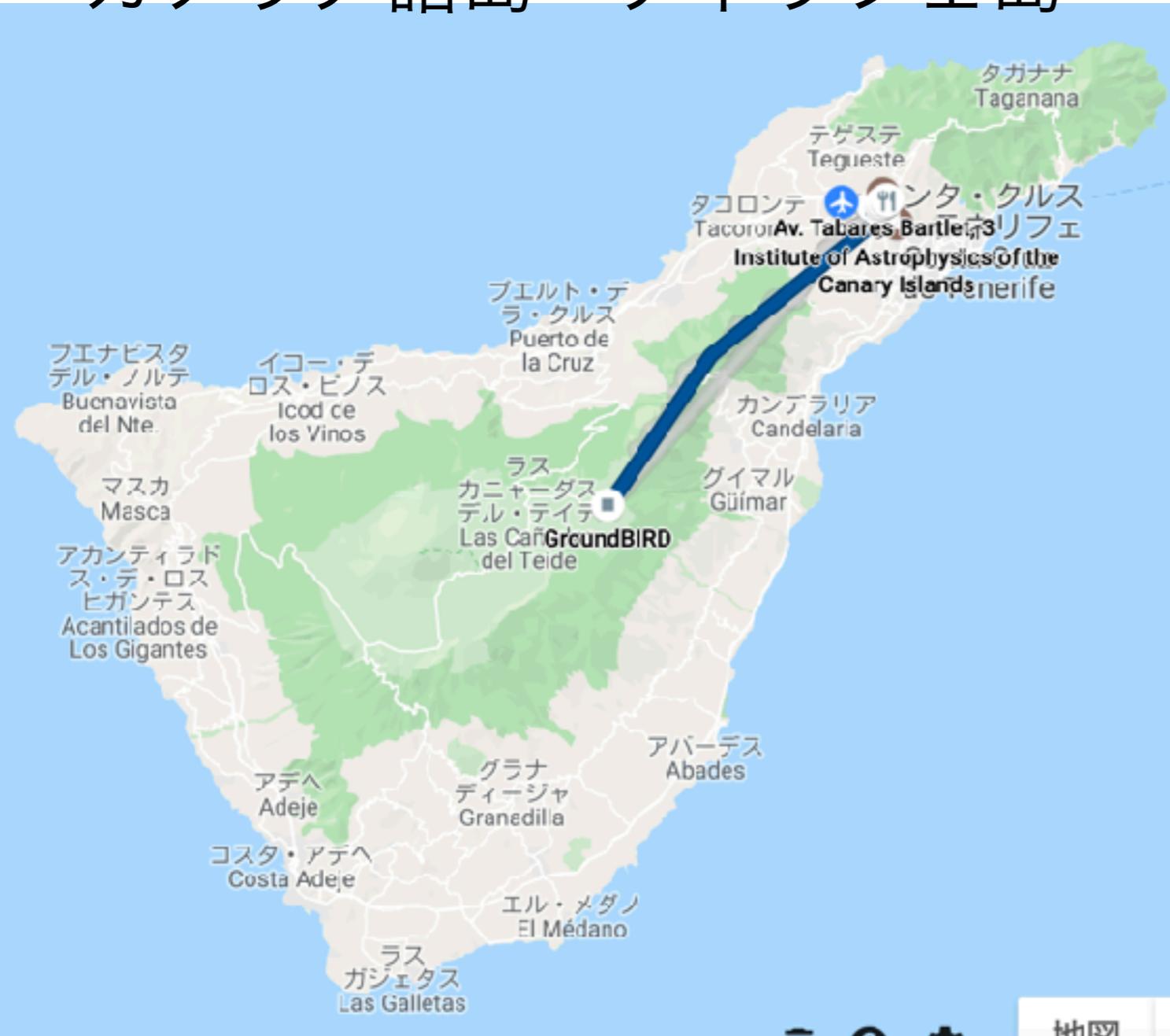
サンタ・クルス  
デ・テネリフェ  
Santa Cruz  
de Tenerife

# GroundBIRD



# 観測

## カナリア諸島・テネリフェ島



- 島の北東部に本部
- そこから ~ 30 km くらい山道を行き、観測所に到達



半年以上いたので髪がめちゃくちゃ



魚が豊富にとれる



リゾート地にもなっている



世界遺産のまち

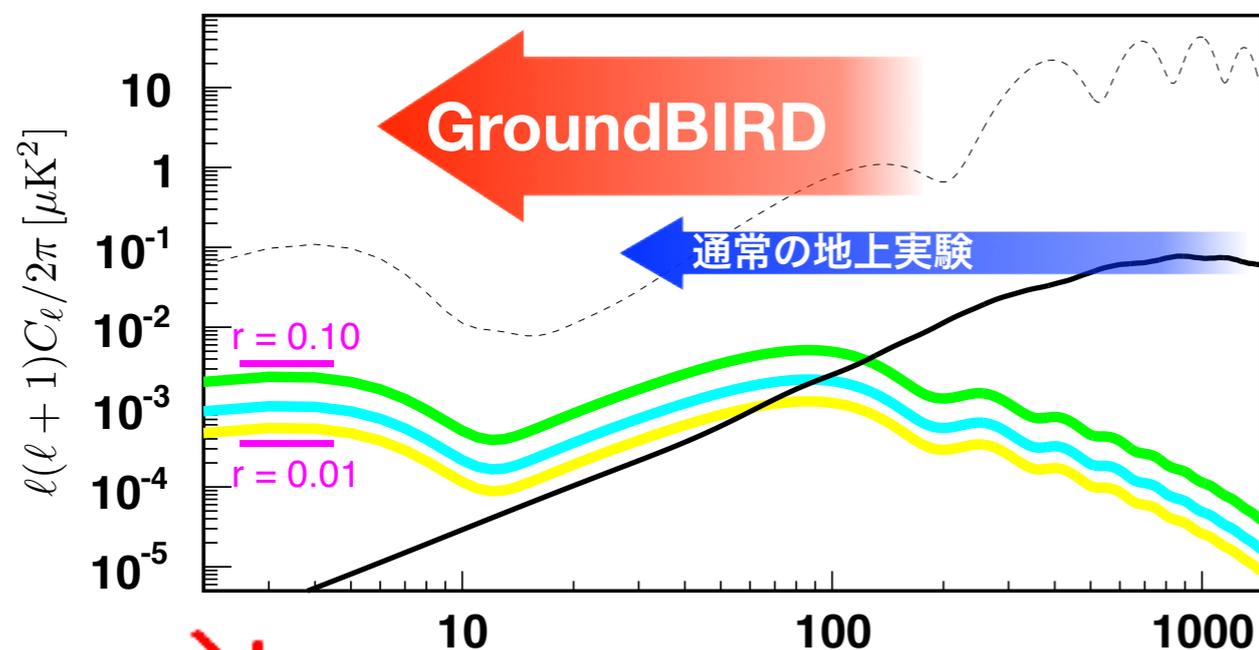


# GroundBIRD

小型で高速回転する望遠鏡

→低い  $\ell$  での高感度観測を目指す

CMBモードパターン信号強度



大角度 ← 角度スケールの逆数 → 小角度

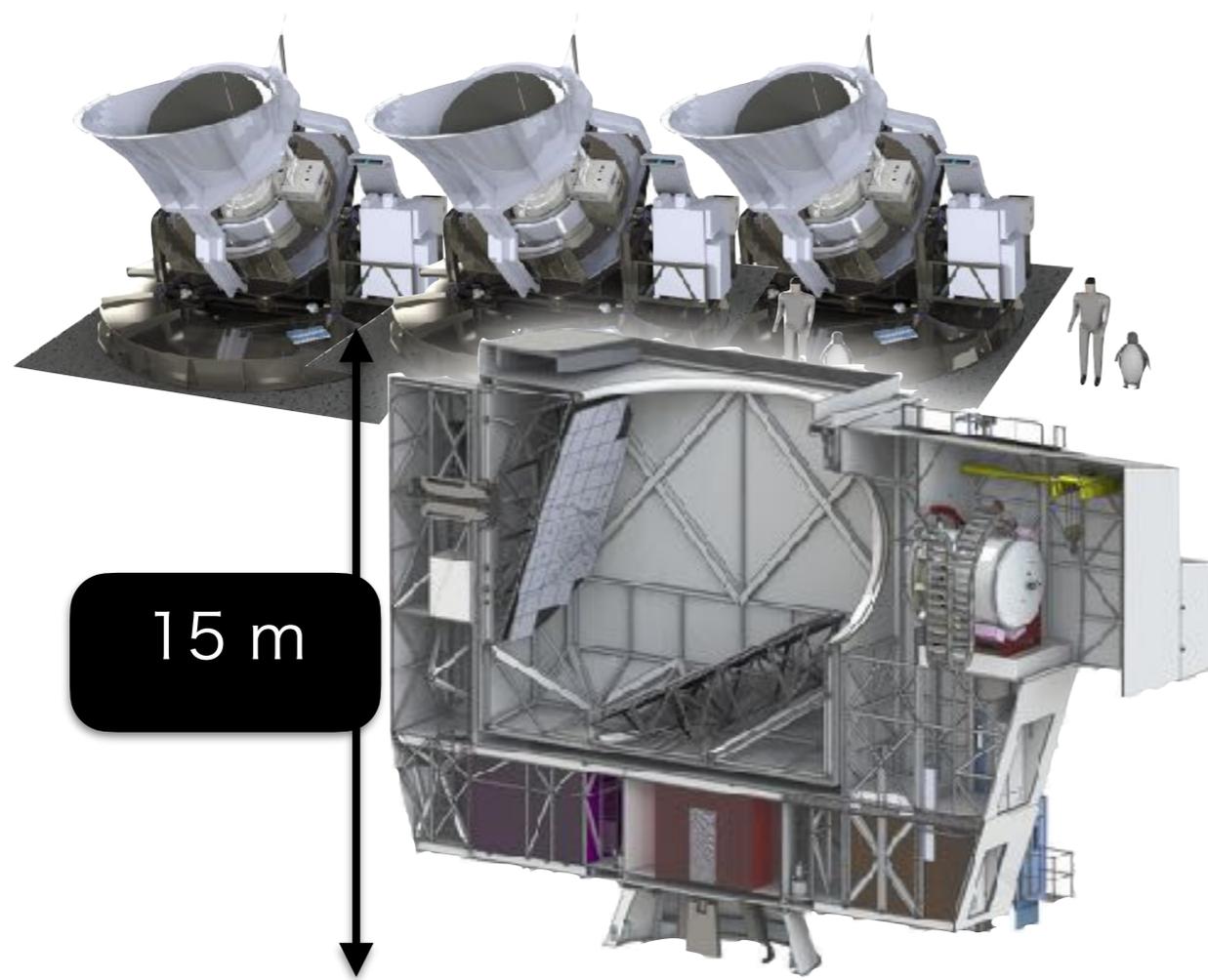


# Simons Observatory





# Simons Observatory

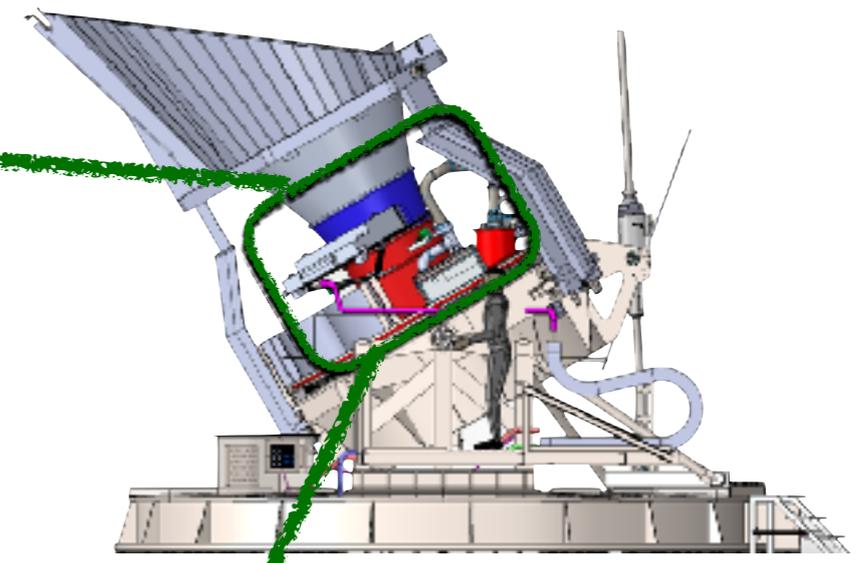
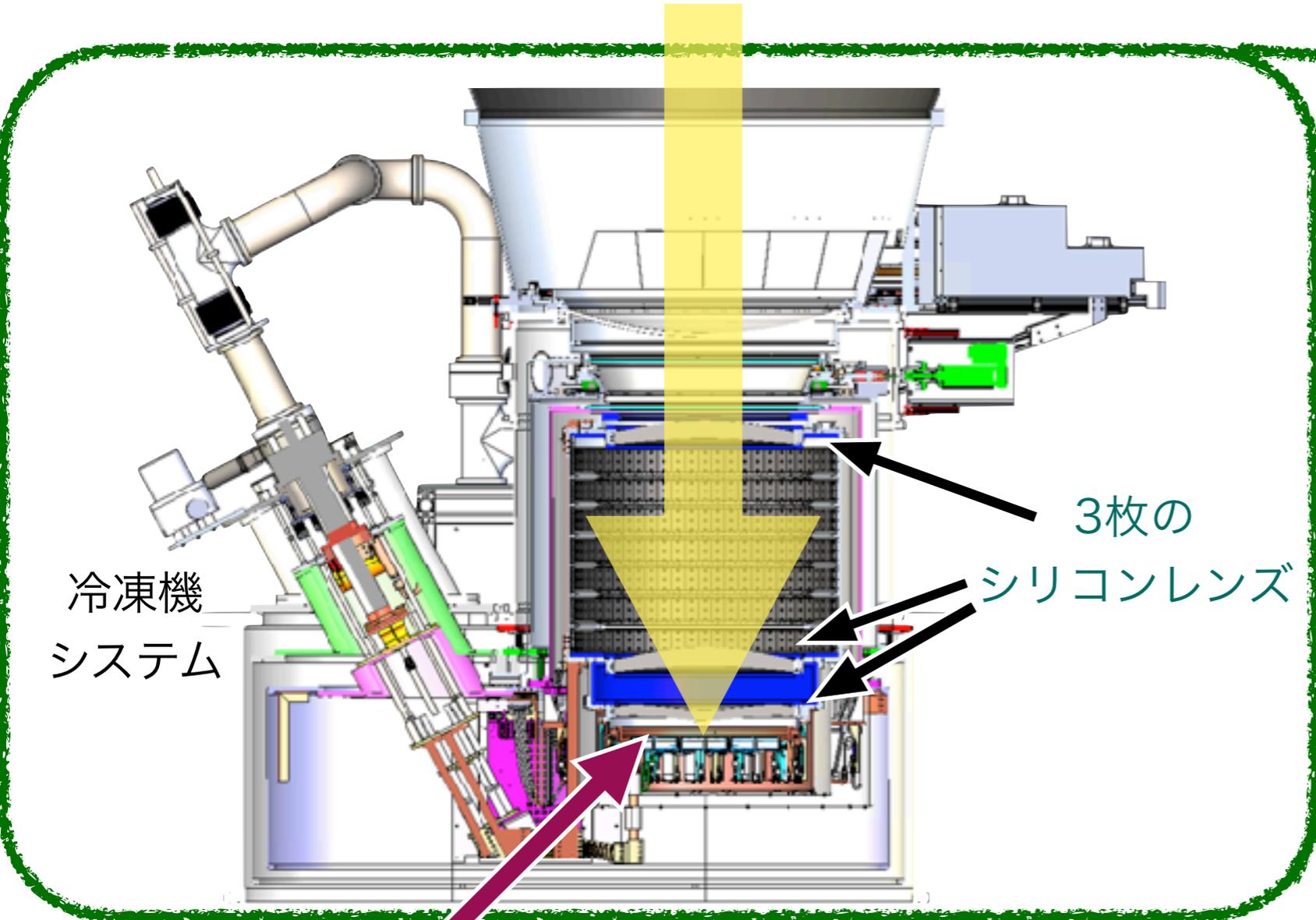


- 小口径望遠鏡 と 大口径望遠鏡 で世界最高感度へ！

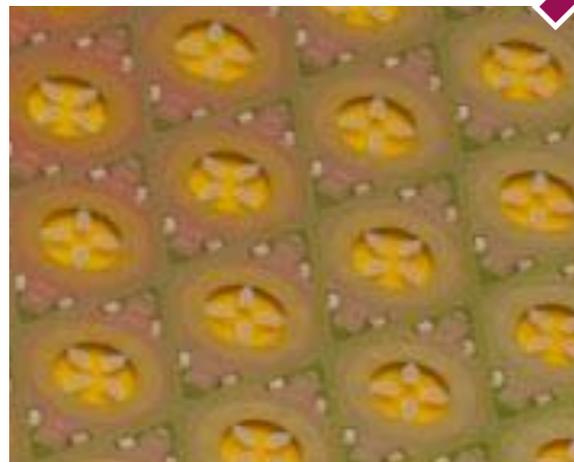
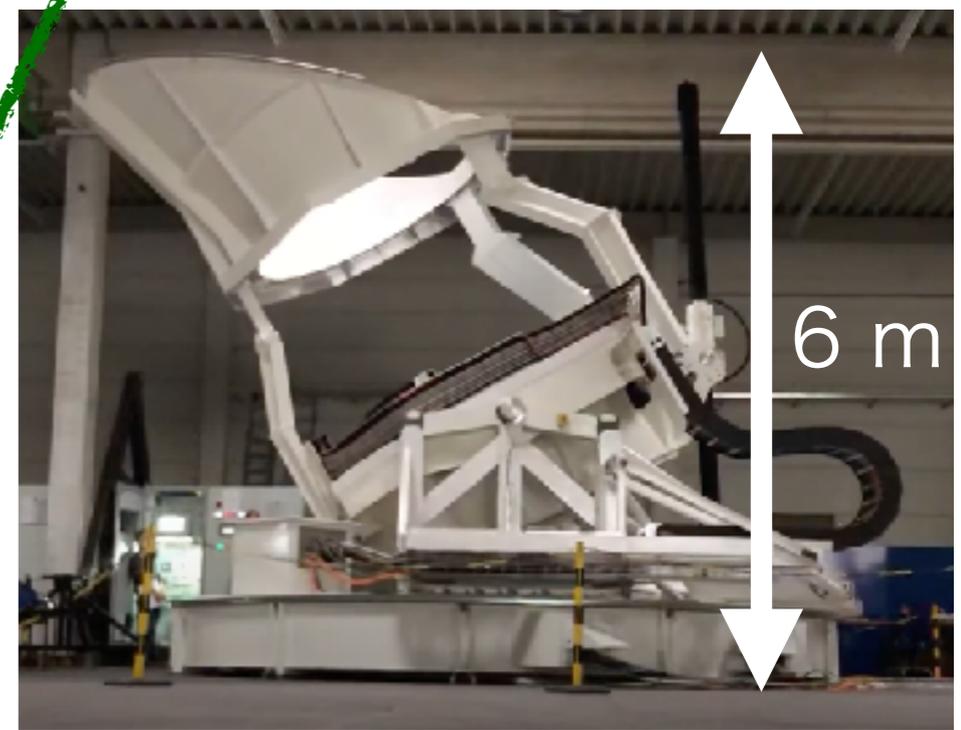
大きいパターン

小さいパターン

# 小口径望遠鏡 (SAT)



実際の写真



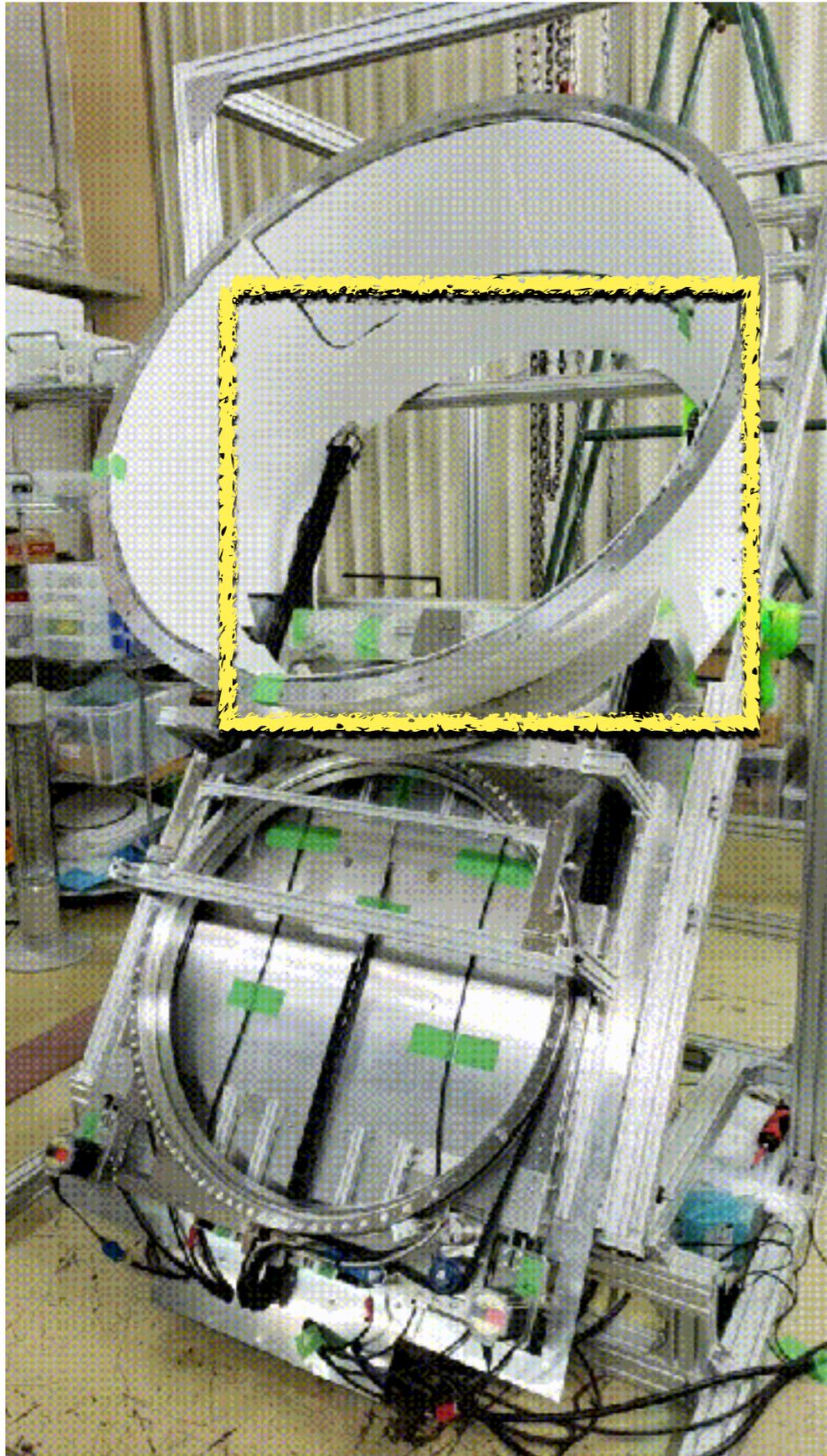
1万個の超伝導検出器  
TESとそのアンテナ

# SAT の開発例 (校正装置 wiregrid)



D1 中田

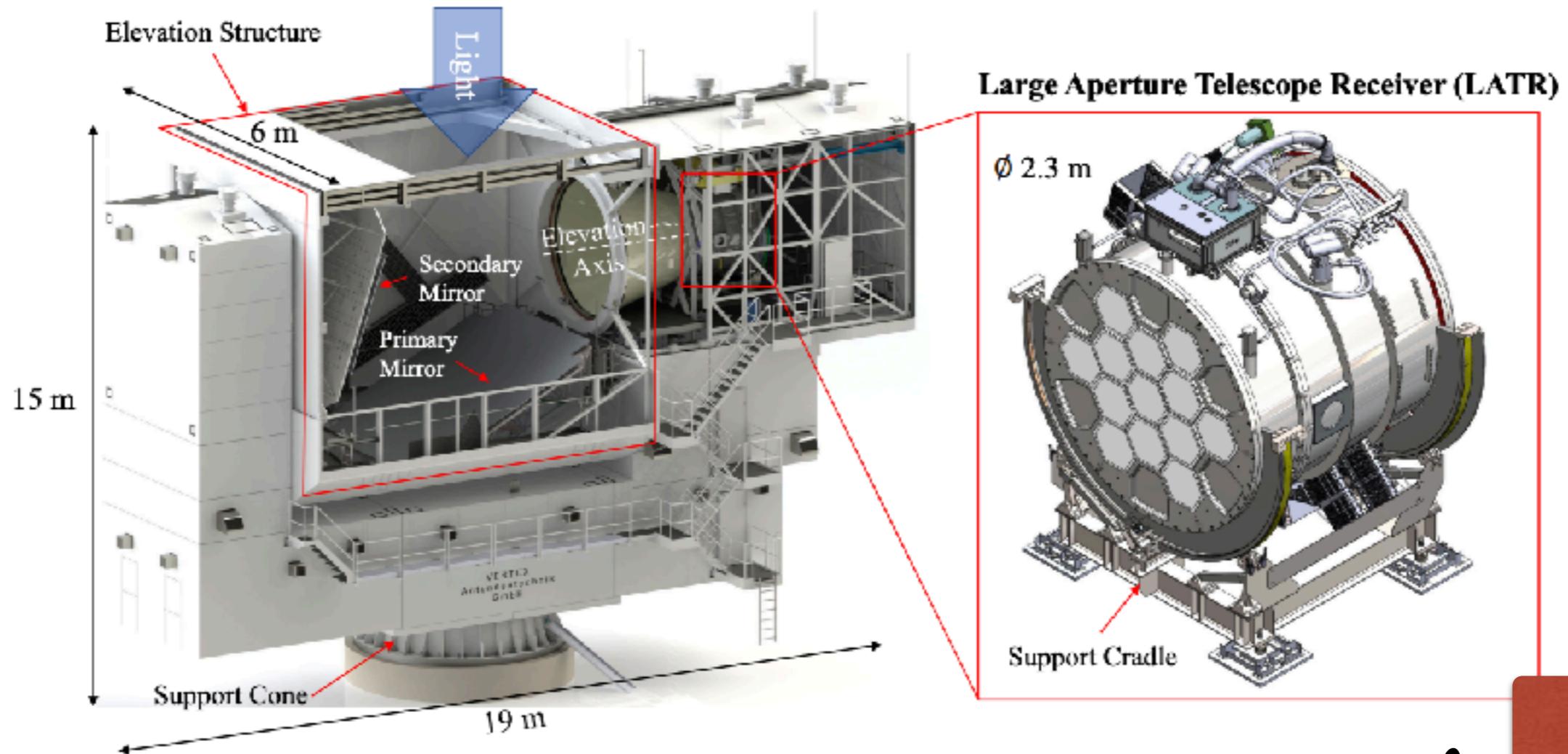
8 倍速



25

~ 7分20秒/校正1回

# 大口径望遠鏡 (LAT)



- $\Sigma m_V$ ,  $N_{\text{eff}}$ , galactic science etc...

$$\theta \sim \frac{\lambda}{D}$$

波長

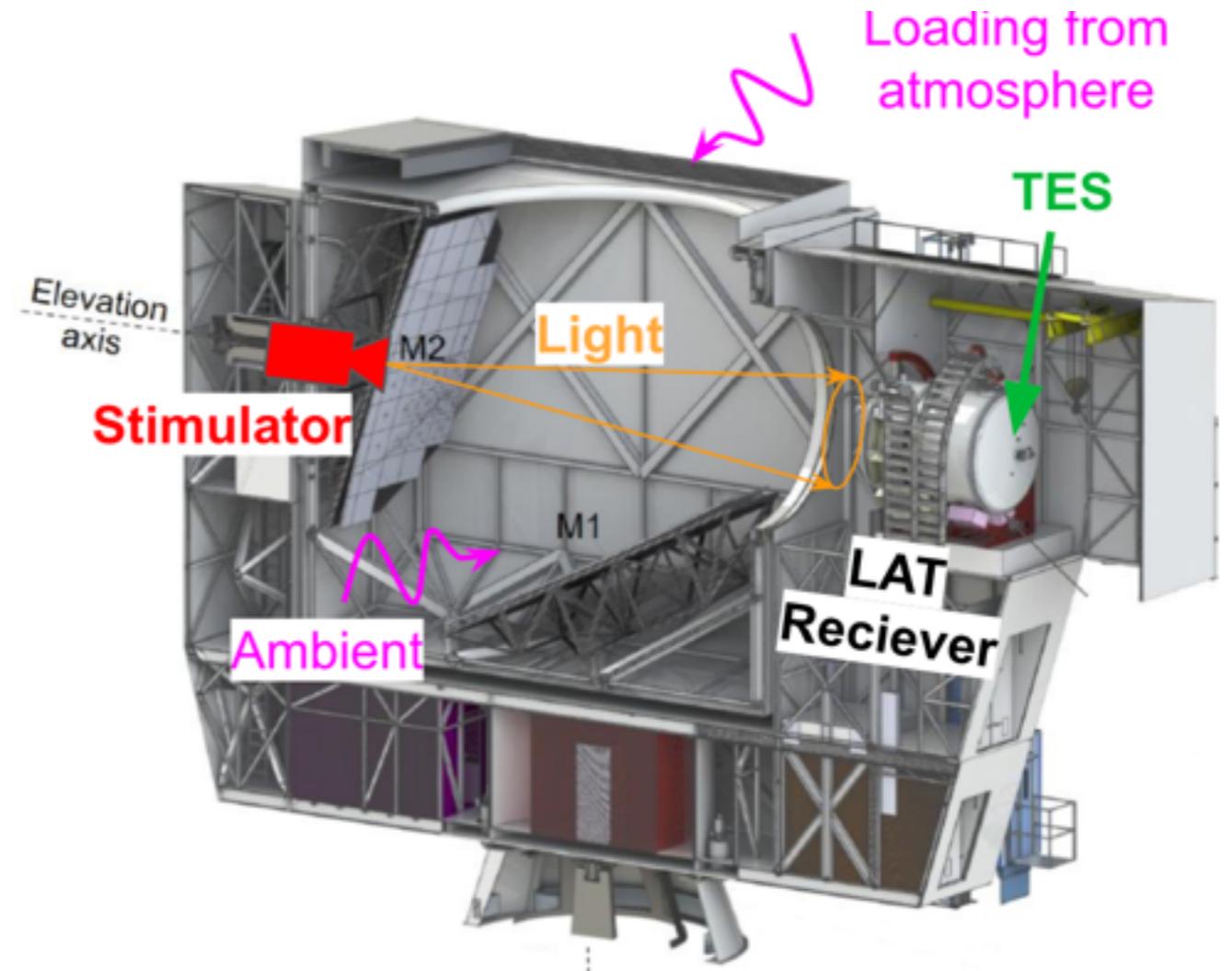
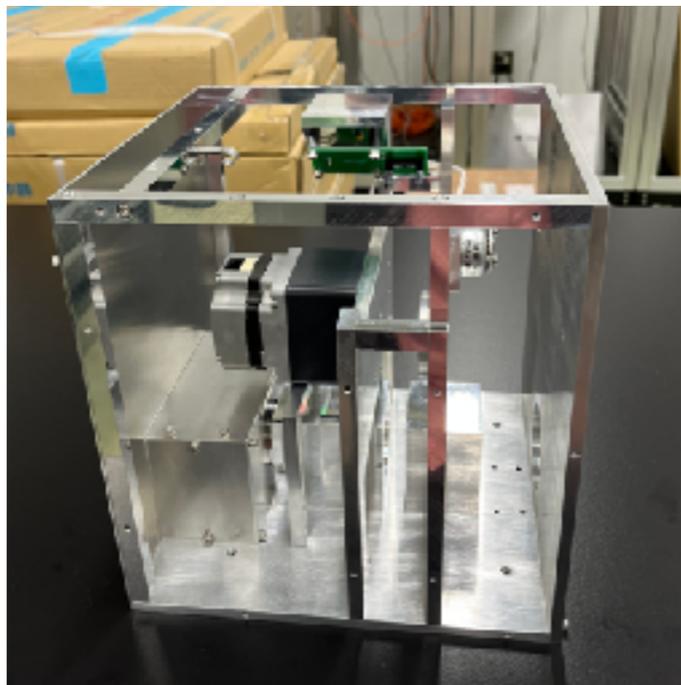
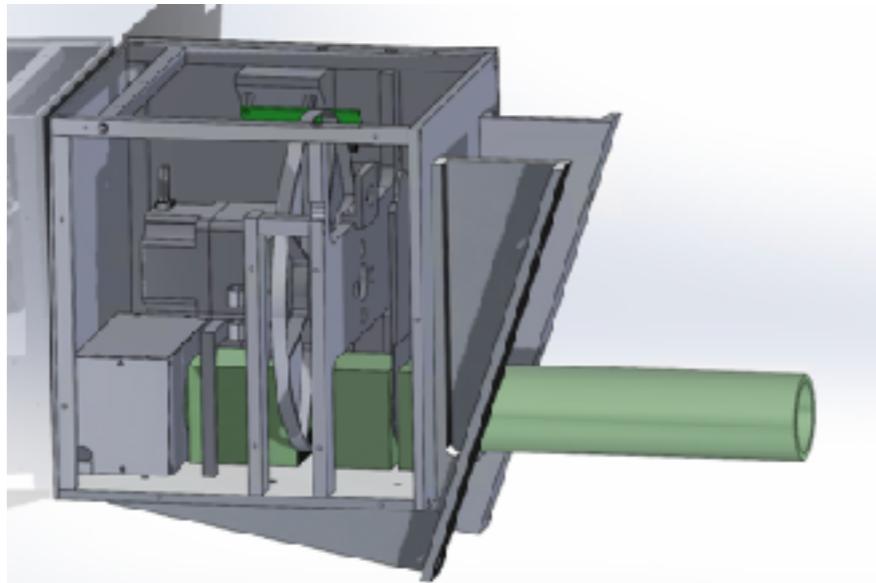
角度分解能

望遠鏡の  
デカさ

# LAT の開発例 (stimulator)



PD 清野

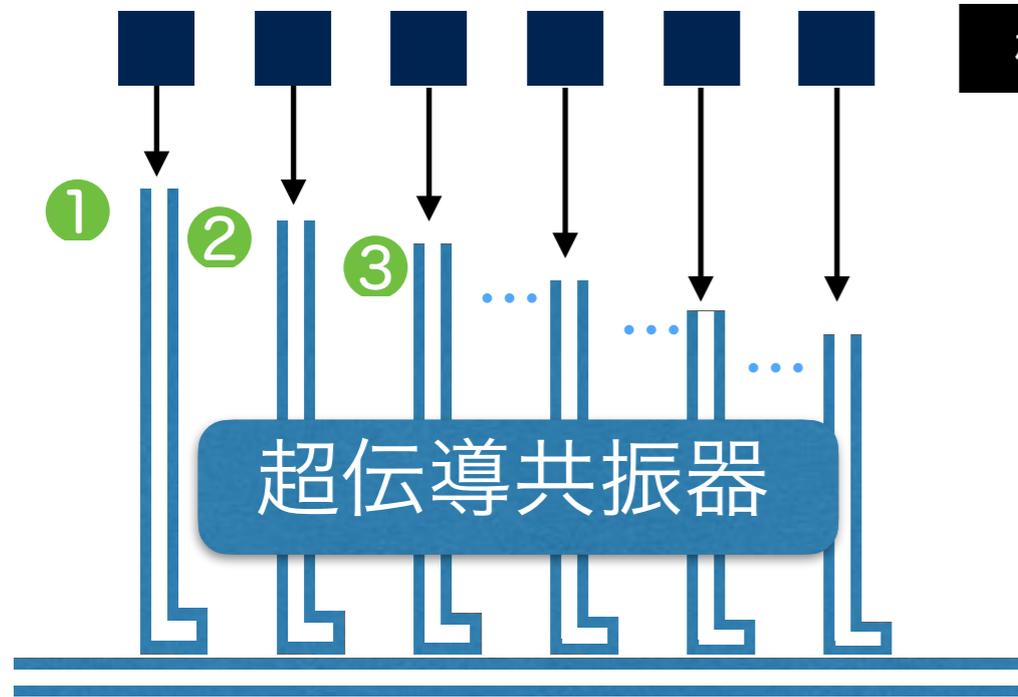


- 人工放射源をつくって検出器を較正

# その他の開発

観測プロジェクトにこだわらず、  
京都大学で開発しているもの

検出器

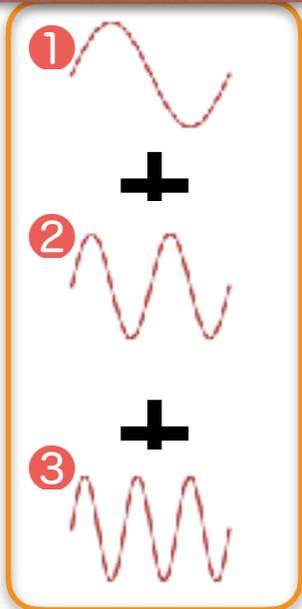


超伝導共振器

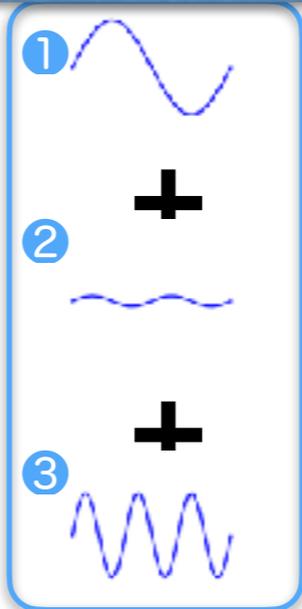
# 超伝導検出器の読み出し

- ケーブル経由の熱流入を抑えるため、 $O(10^3)$  個の検出器を一本のケーブルで読み出す
- 京大の CMB グループでは、多重化読み出し装置の開発を行っている
  - GroundBIRD 用の読み出し装置
  - 性能向上のための研究

合成



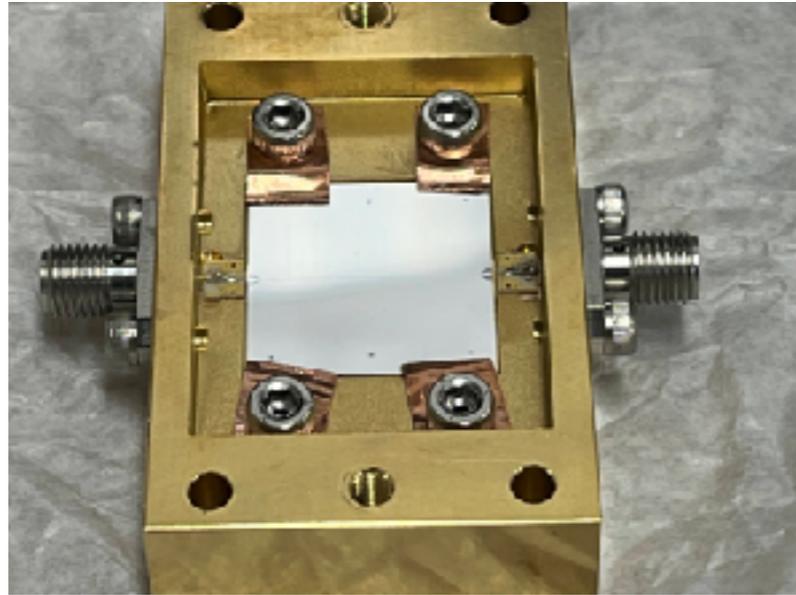
分解



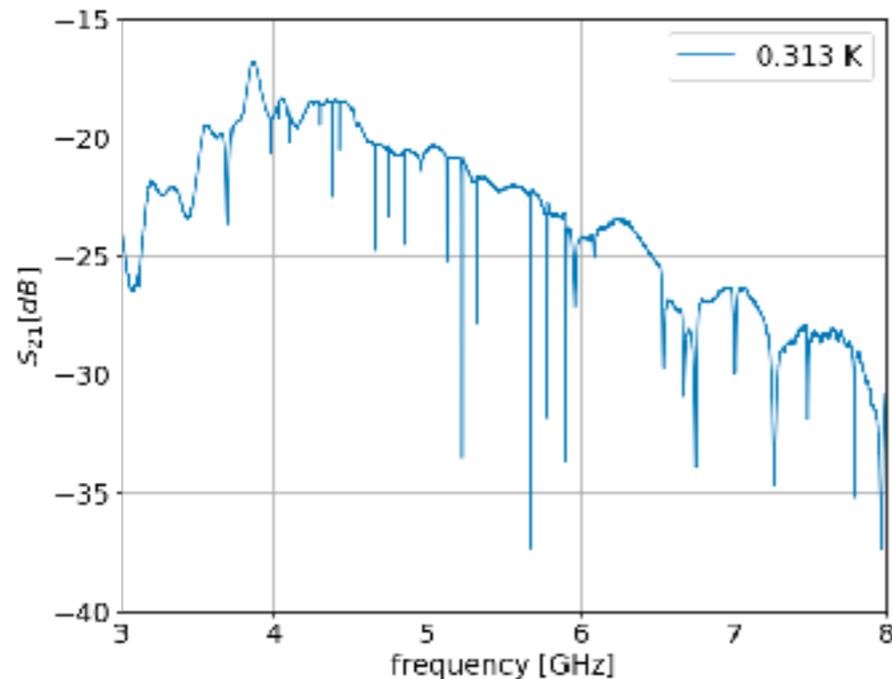
アナログボード



# 超伝導検出器の製作



- 超伝導検出器を自分達で作ることを始めた
- 分光計で大気放射の影響を抑えるアイデア
- 大アレイ化



M2 武市



D2 末野



# 修士のテーマ

- GroundBIRD や Simons Observatory に参画して開発に関わる
  - GroundBIRD : 校正手法・検出器開発 など
  - Simons Observatory: stimulator 開発 など
- 実験グループとは関係なく研究
  - 超伝導読み出し・検出器の開発 など

# ミーティング情報

- 京都CMBグループ
  - 水曜 15:30 ~、その後宇宙論ゼミ
  - ミーティングは zoom、ゼミは対面
- GroundBIRD
  - 金曜 17:00~ (夏時間) 18:00~ (普段)
- Simons Observatory
  - SO-Japan 火曜 12:00~ (analysis 11:00~)
  - SAT 水曜 7:00~ (夏時間) SAT WBS 火曜 7:00~ (夏時間)
  - and more...

# Contact

- 教授: 田島 303 号室
- 助教: 鈴木 306 号室 GB、SO
- 助教: 安達 302 号室 SA、SO
- 学生:
  - 末野 D2 302 号室 GB、超伝導
  - 中田 D1 304 号室 SO
  - 武市 M2 303 号室 GB、超伝導

終わり

# 宇宙マイクロ波背景放射

- 自由電子と光子の散乱 → 熱平衡

$$n_T(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2 d\nu}{\exp(h\nu/k_B T) - 1} \quad (\text{黒体放射のスペクトル})$$

- 4000 K くらいで散乱できなくなる 時刻  $t_L$
- 宇宙膨張

$$n(\nu, t)d\nu = \left(\frac{a(t_L)}{a(t)}\right)^3 n_{T(t_L)} \left(\frac{a(t)}{a(t_L)}\nu\right) d\left(\frac{a(t)}{a(t_L)}\nu\right)$$

$$= \frac{8\pi\nu^2 d\nu}{\exp(h\nu/k_B T(t)) - 1}$$

黒体放射の形をたもつ

$$T(t) = \frac{a(t_L)}{a(t)} T(t_L)$$

温度が下がる