

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



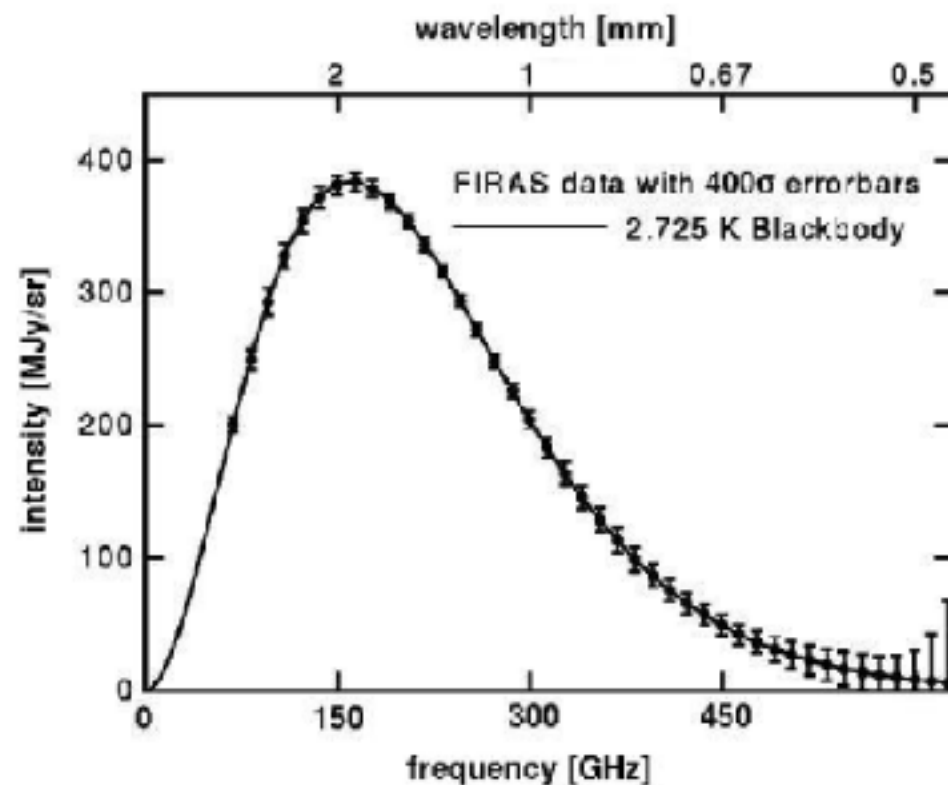
最終散乱面からの
光が届く

時間



宇宙マイクロ波背景放射

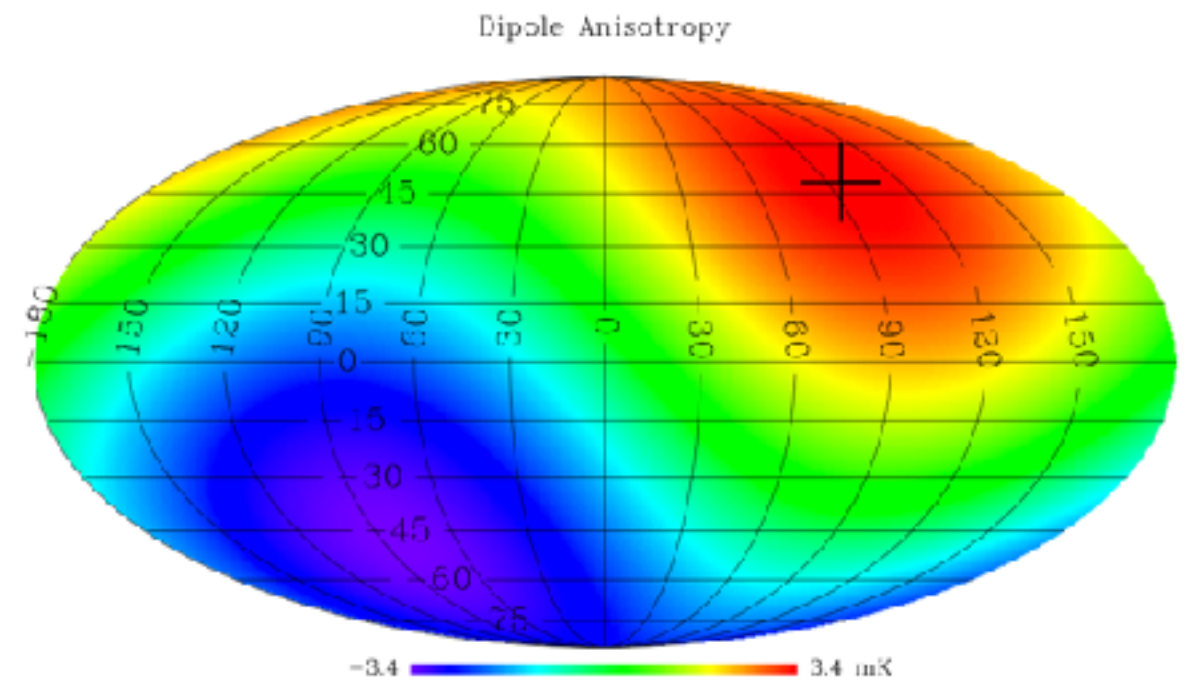
- **Cosmic Microwave Background radiation → CMB**
- どの方向をみても、ほぼ一様に 2.7 K の黒体輻射
- 現在の宇宙では、1 cm³ あたり 410 個の CMB 光子



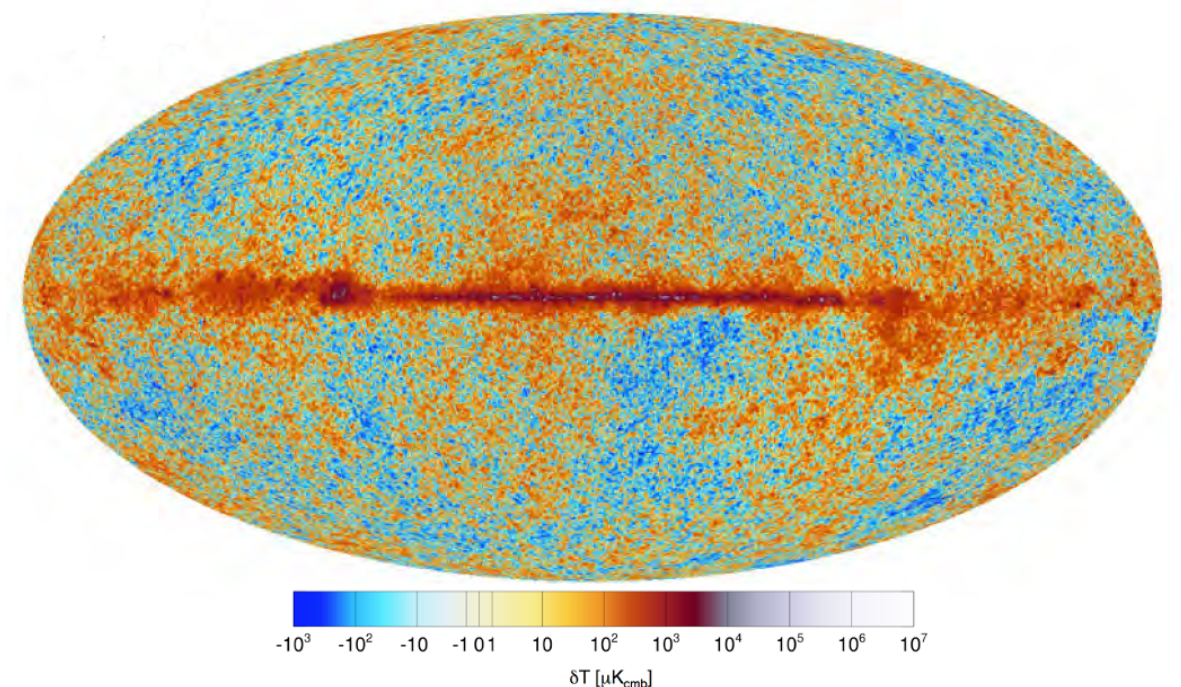
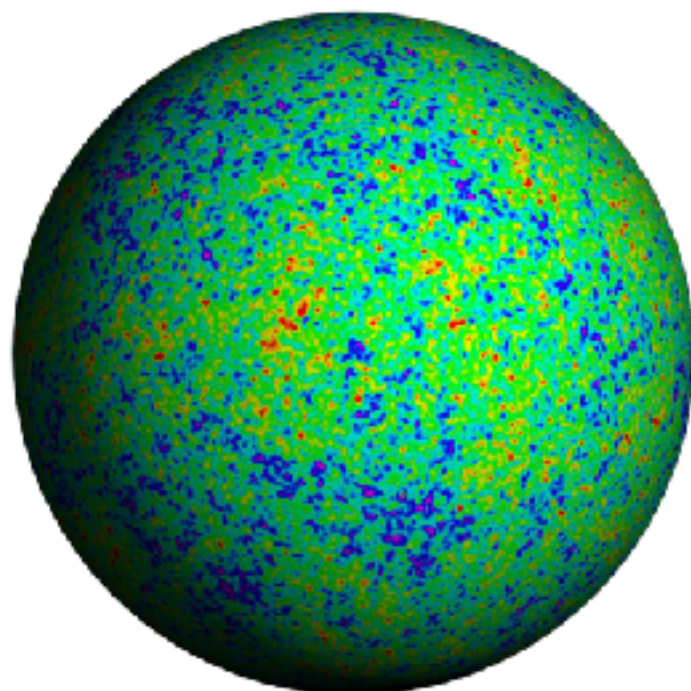
2.725 K の黒体輻射スペクトルと一致

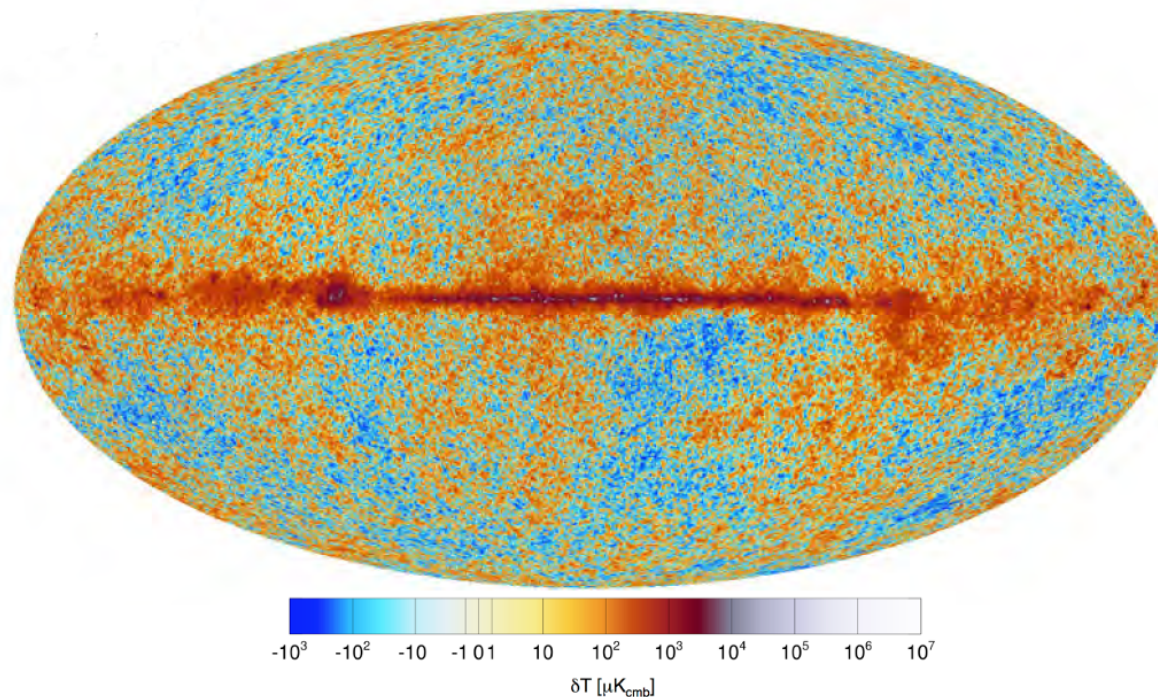
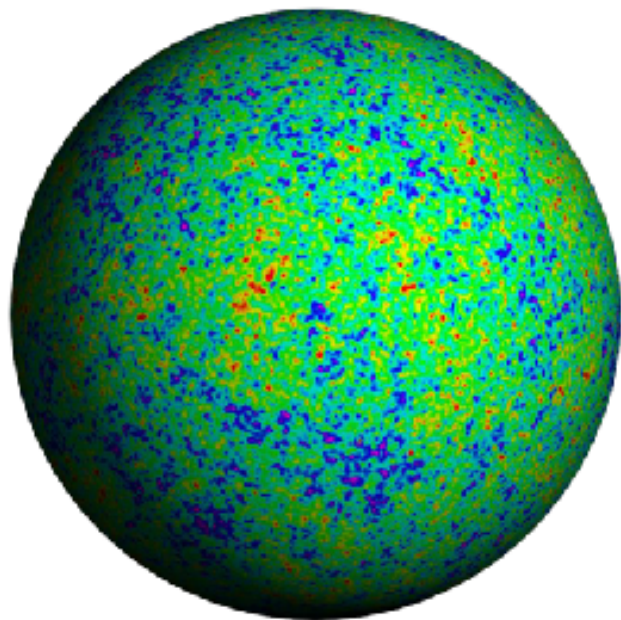
一様からのズレ

- 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)



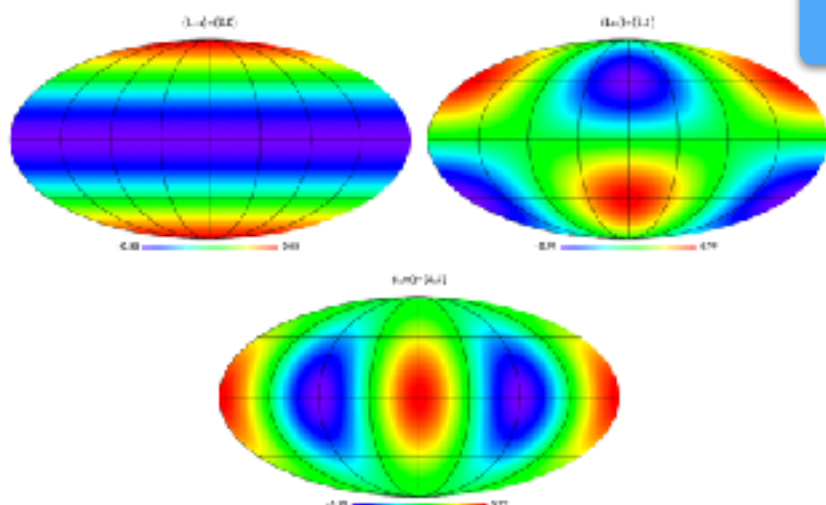


• 球面上のランダムなズレ

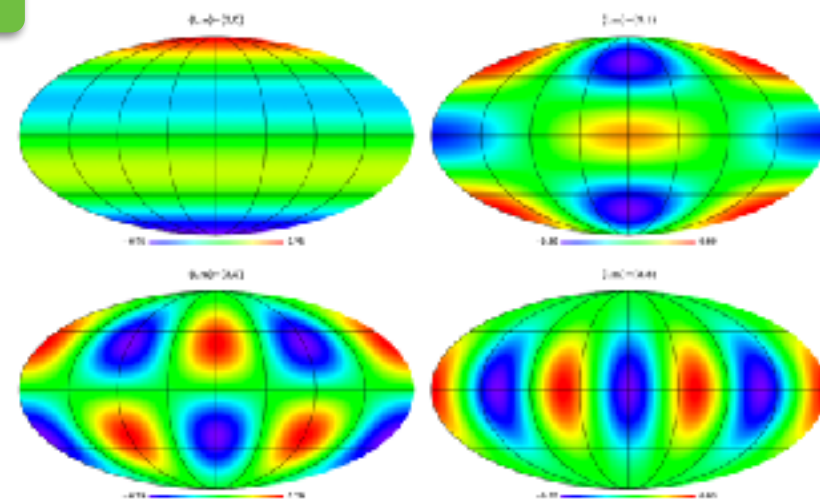
→ 球面調和関数で展開して、統計的に処理

2.7 Kからのズレ

球面調和関数



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



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

$\ell = 2$

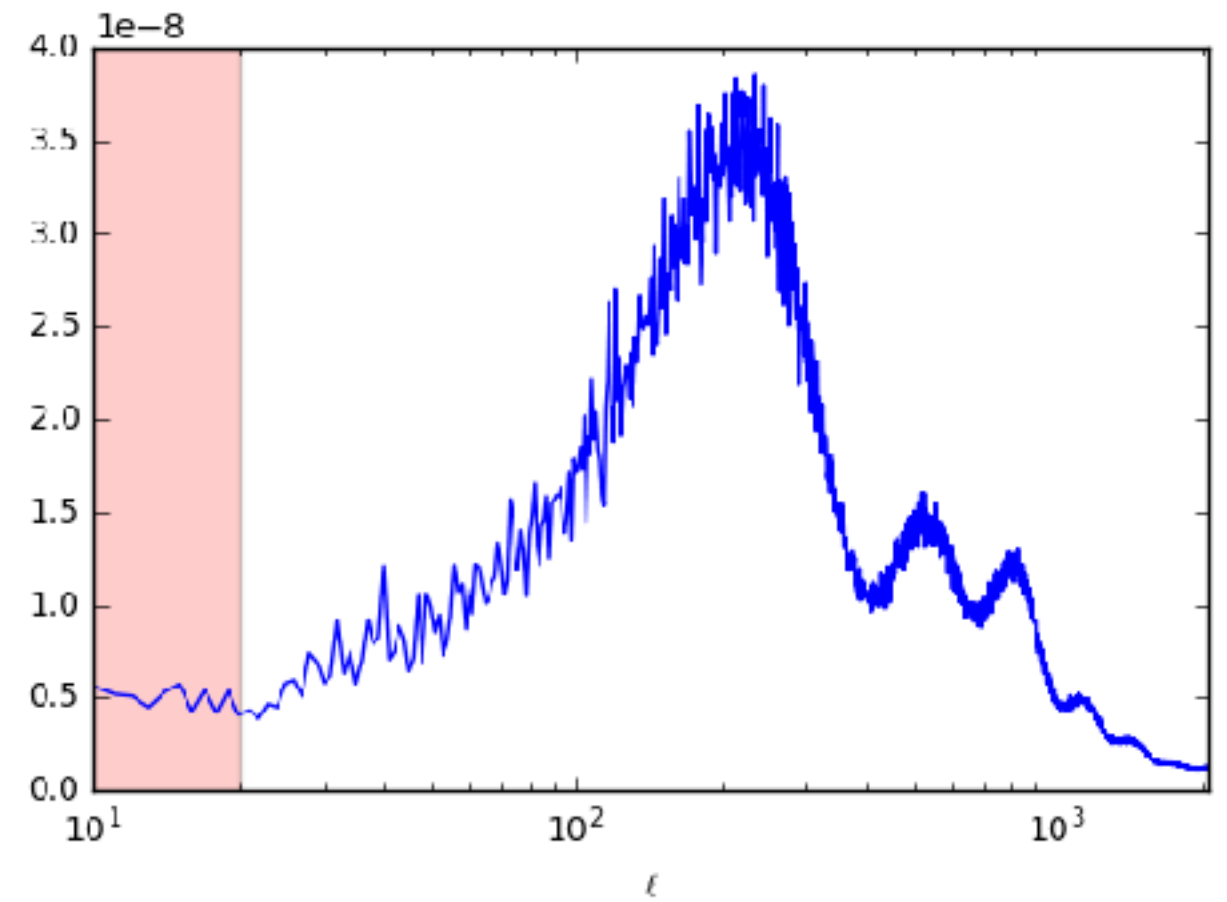
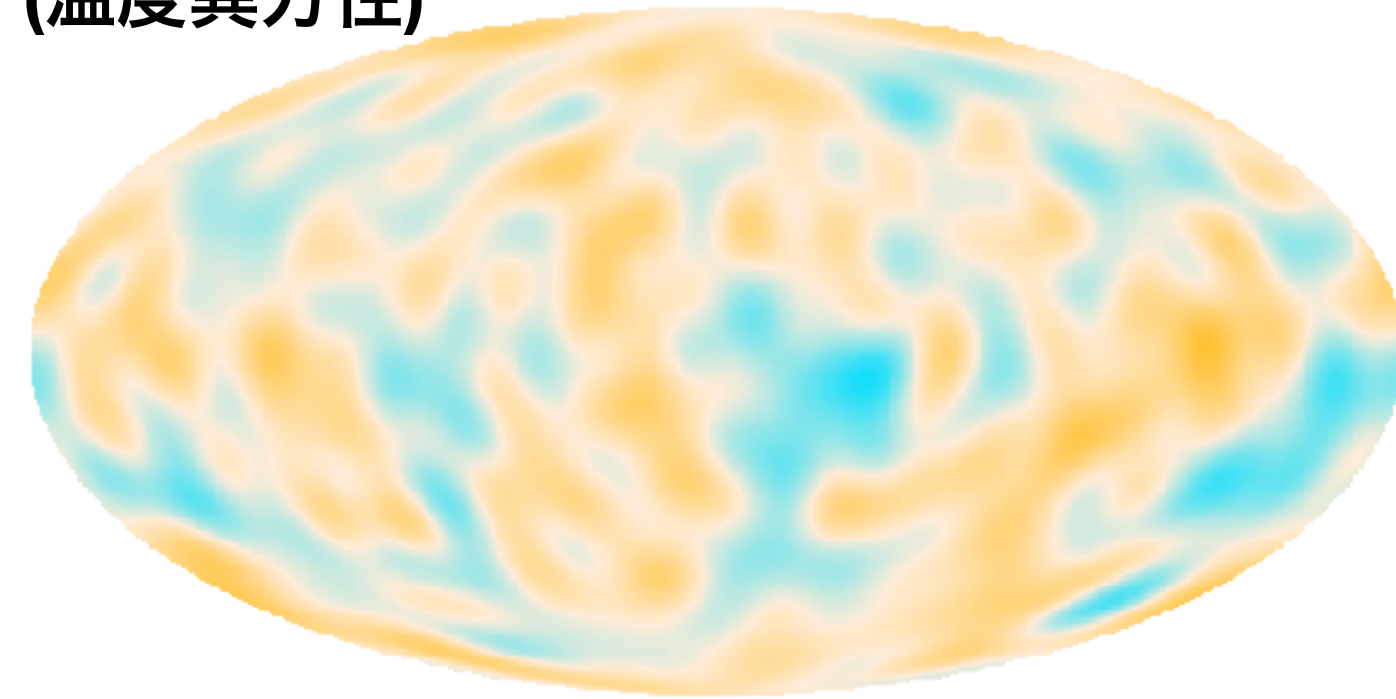
パワースペクトル

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_ℓ を取得

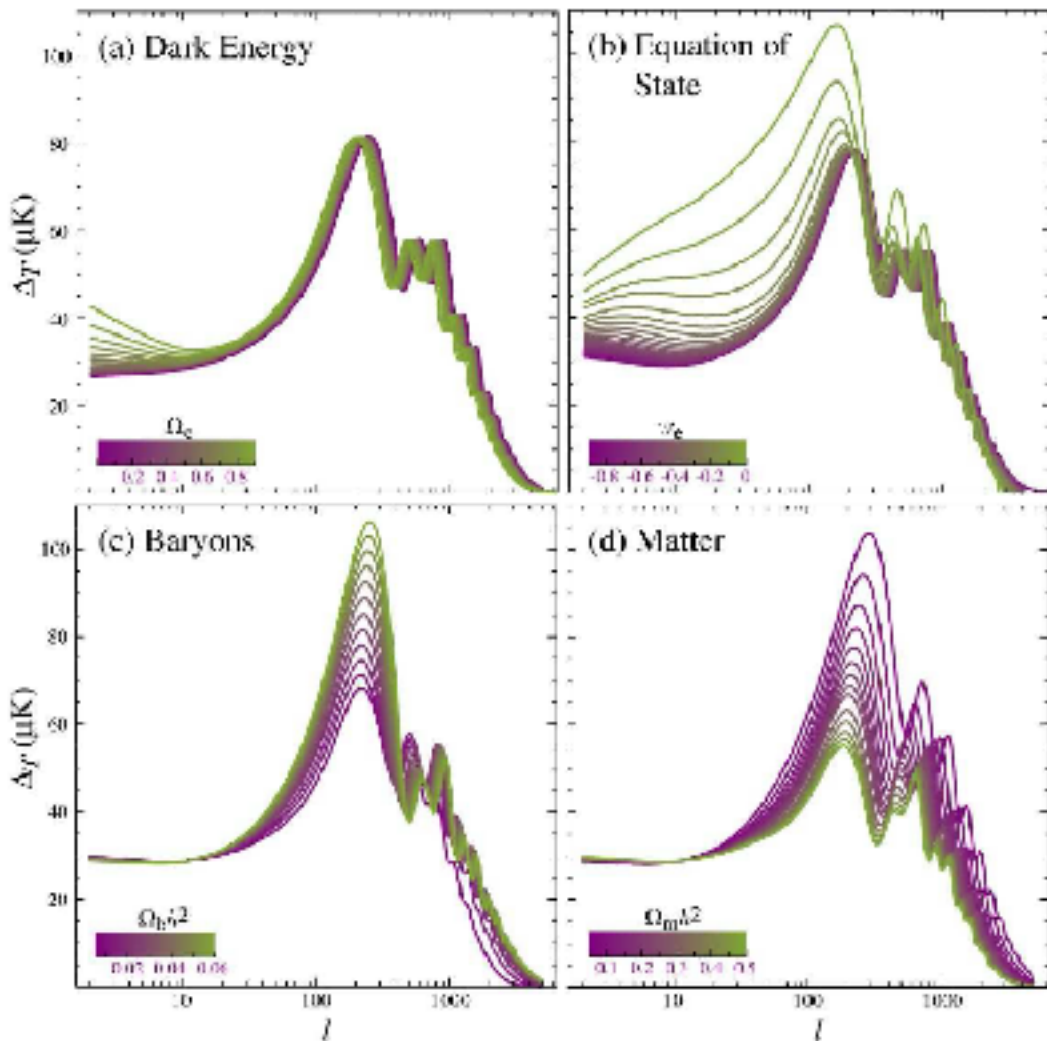
Cosmology

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

宇宙の発展
(+球面射影)

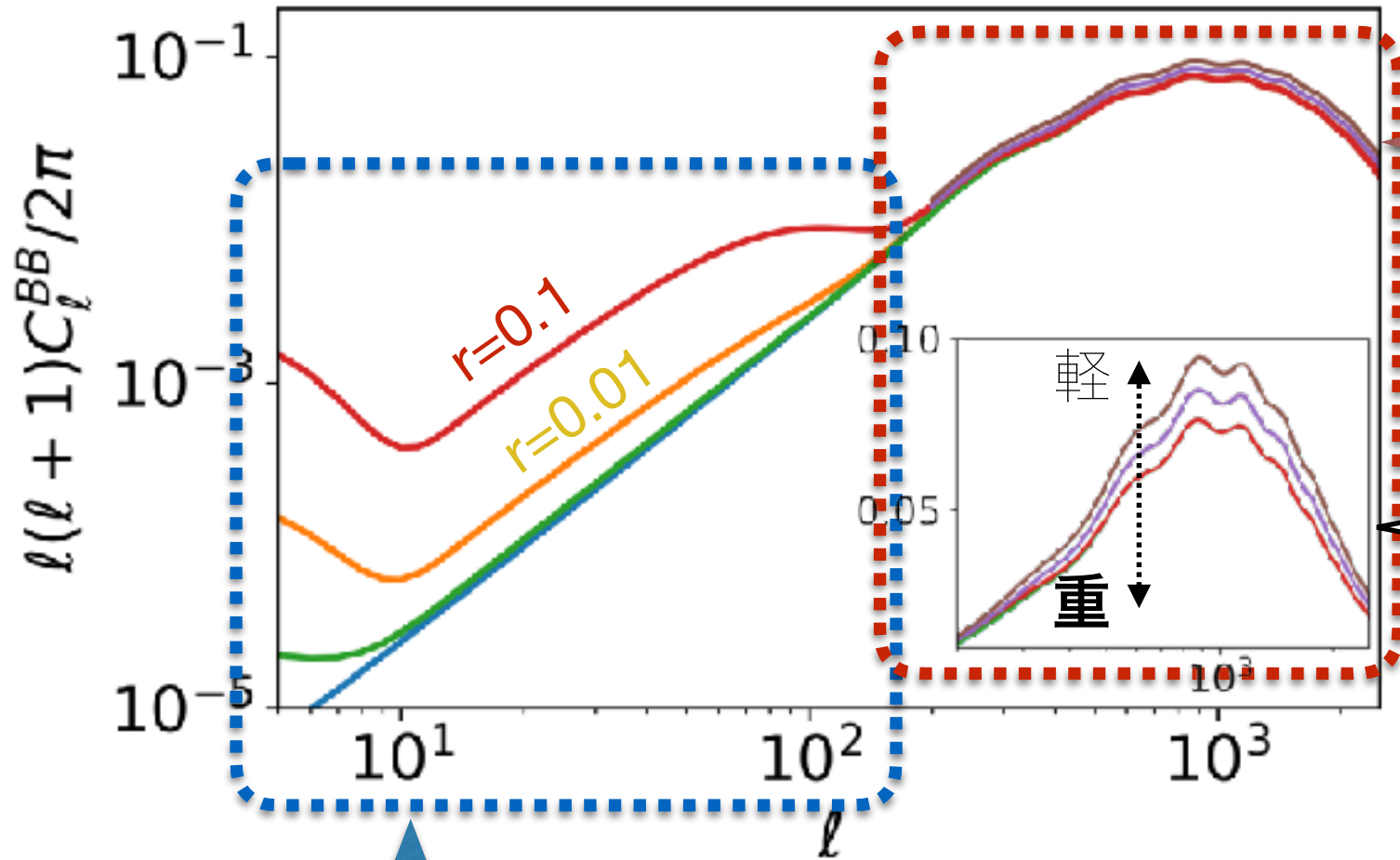
原始ゆらぎ

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)

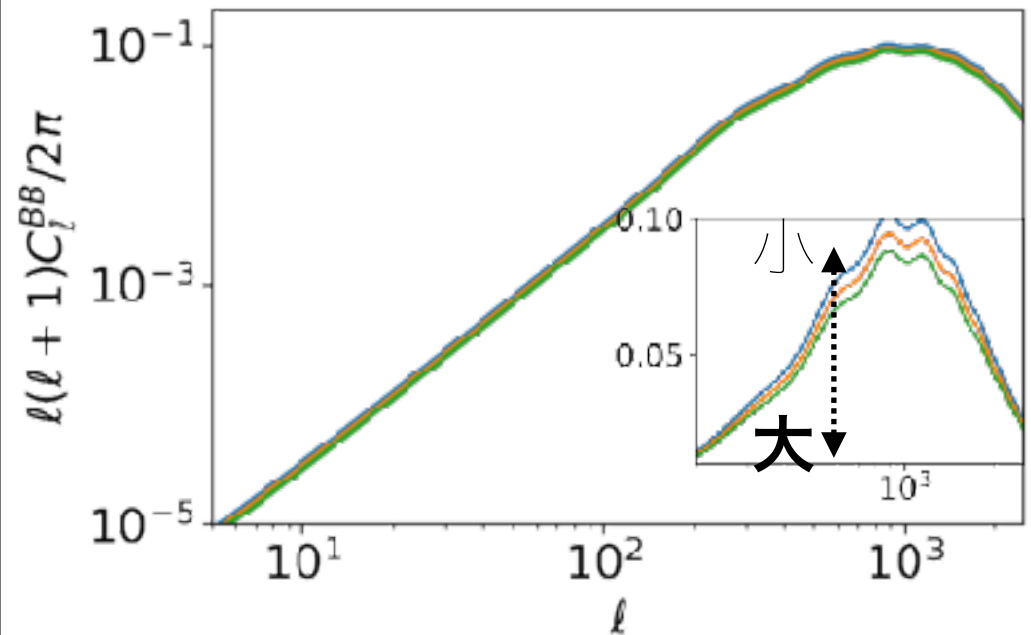
- ・ テンソルゆらぎによって生成
- ・ 低い l = 大角度の相関 を見る
ことで測定

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

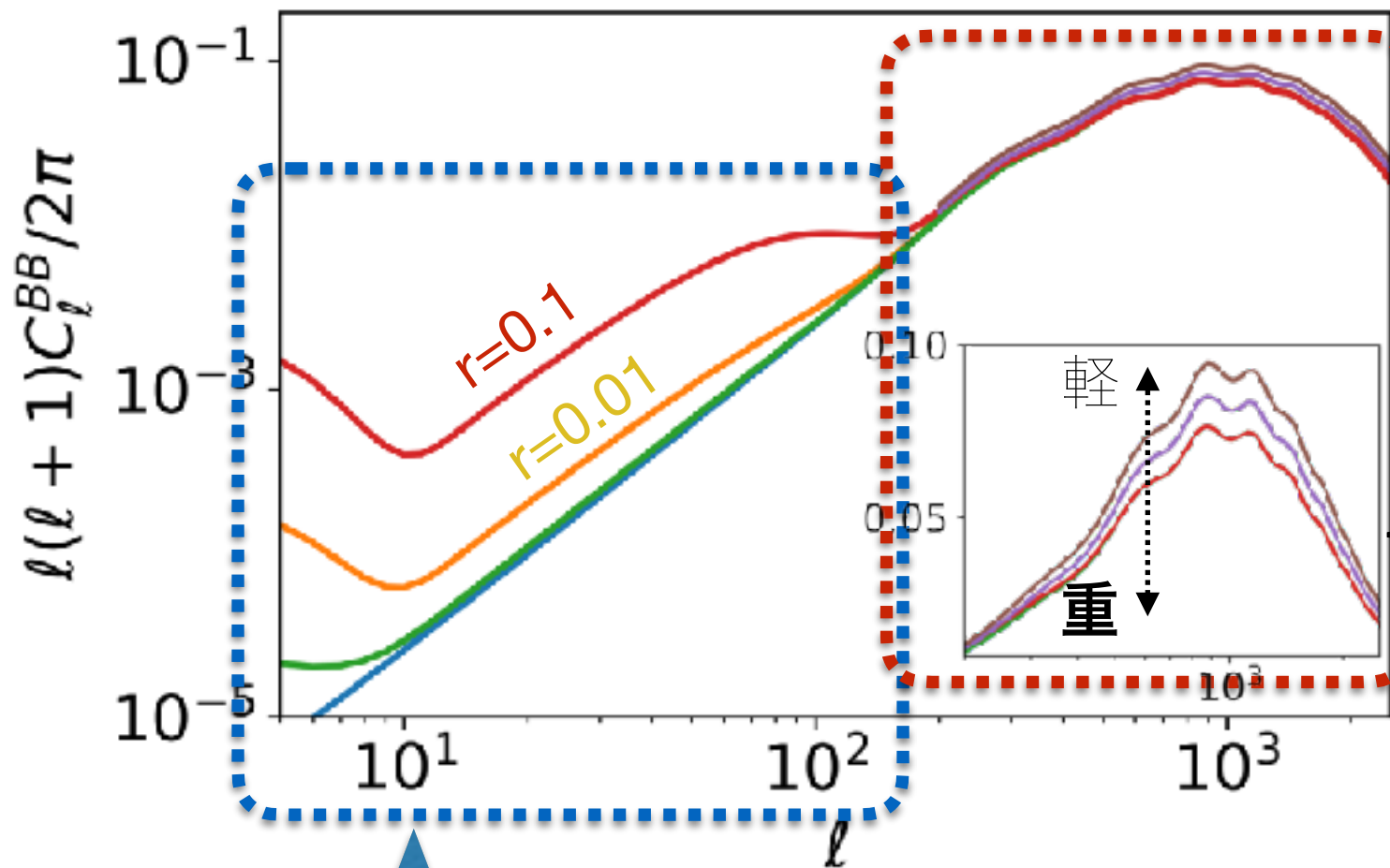
一方で...

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)

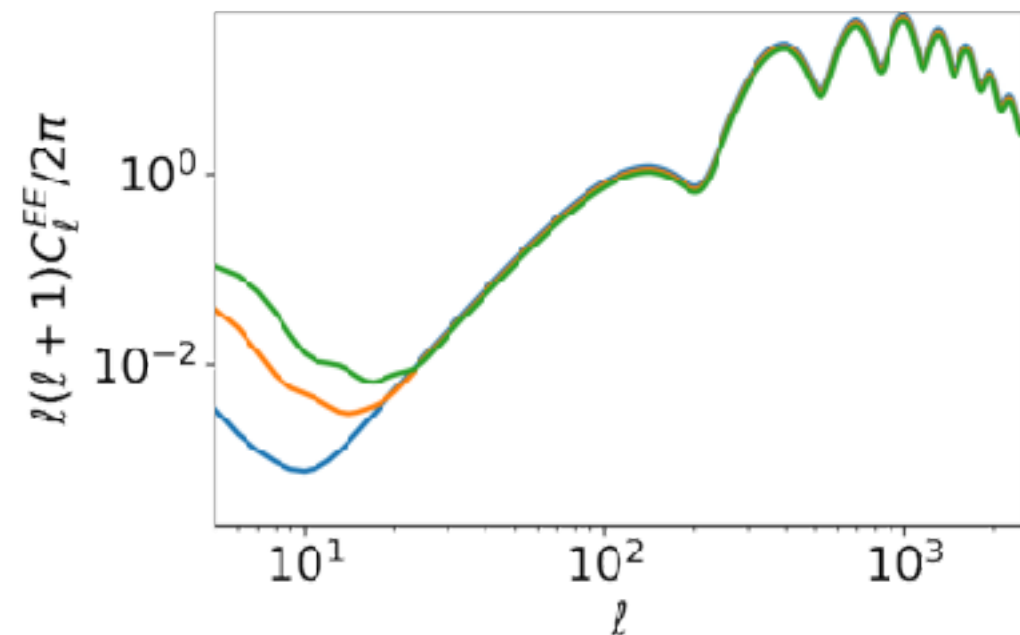


ニュートリノ質量和

- ・ 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



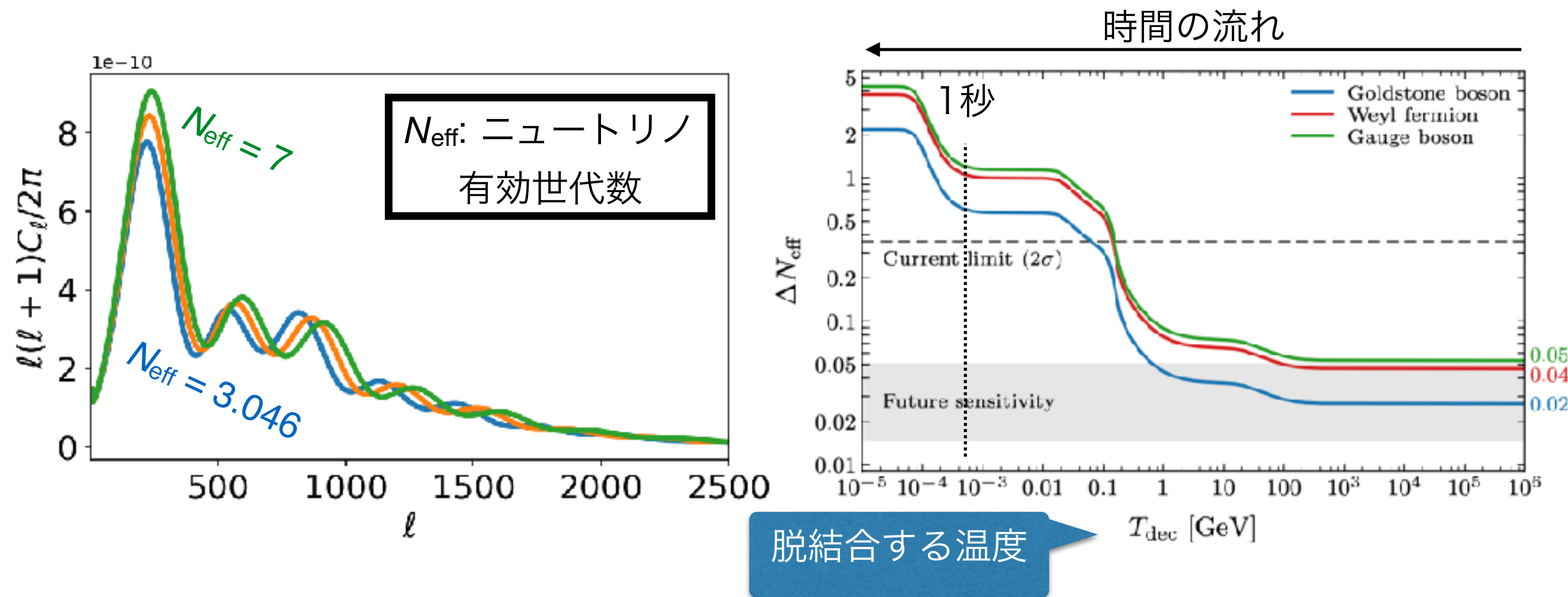
偏光 E モード (偶パリティ成分)



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)

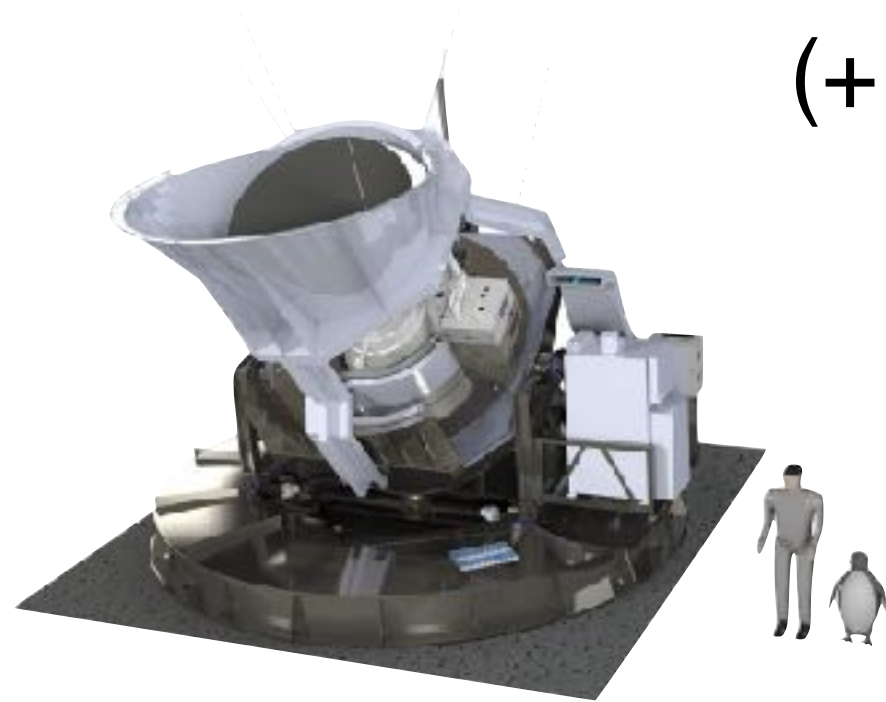
- ・ CMB とは？ （研究の動機）
- ・ **実際のプロジェクト紹介**

- 京大では...

GroundBIRD



Simons Observatory (+ SA)



をやっています。

GroundBIRD

D3 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



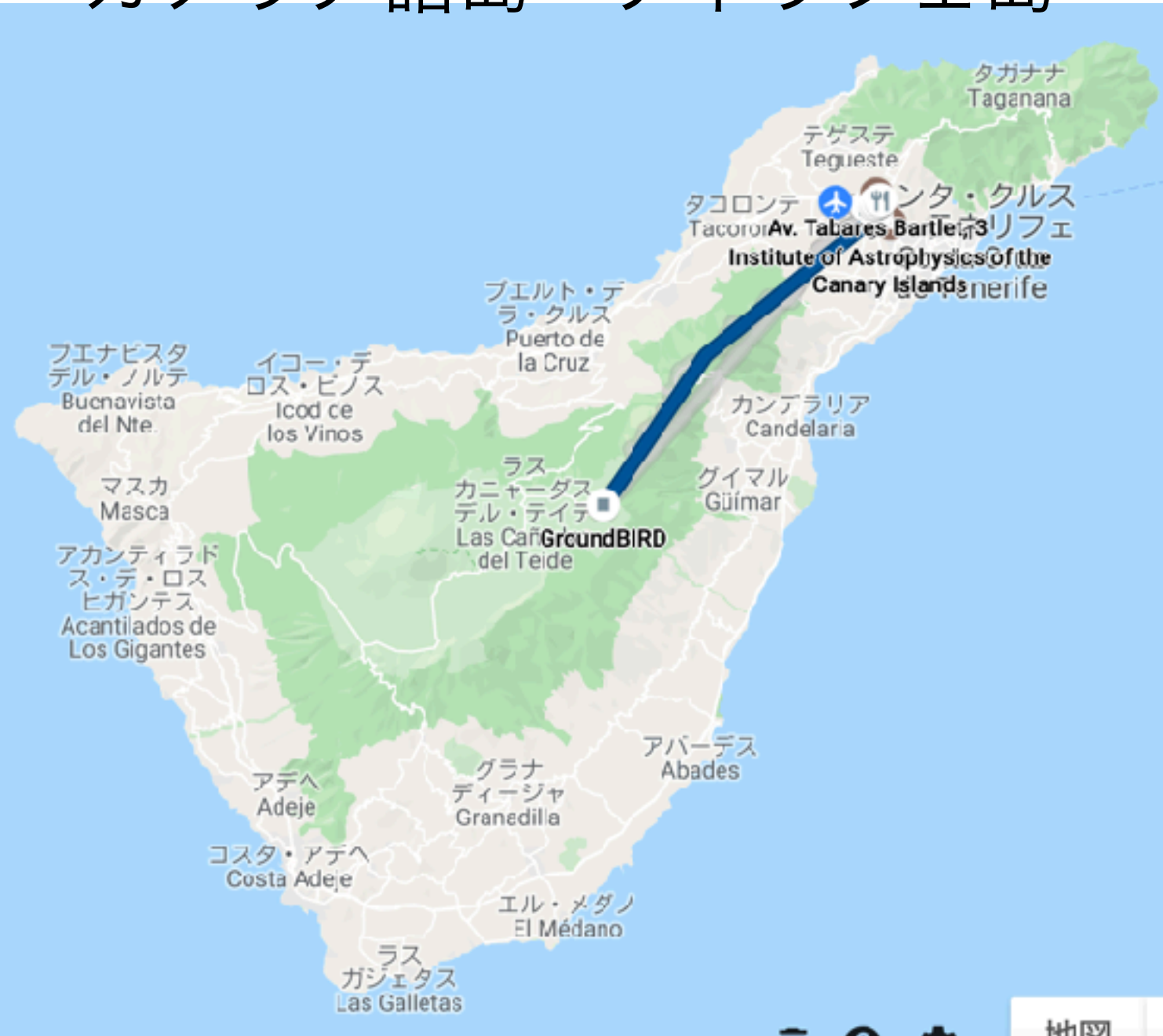


GroundBIRD



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

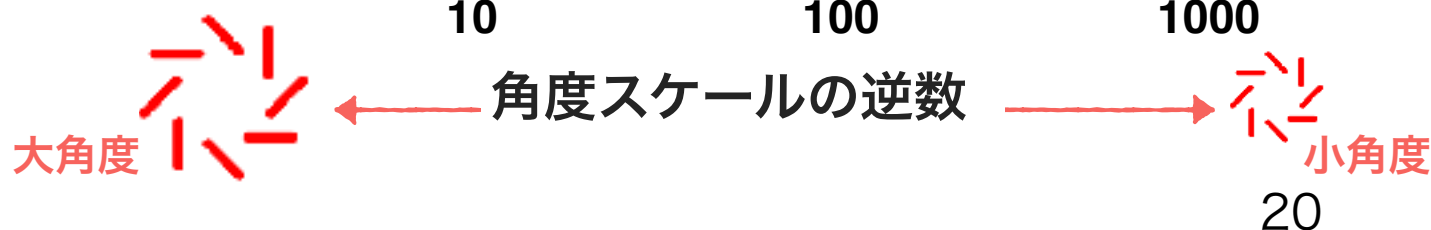
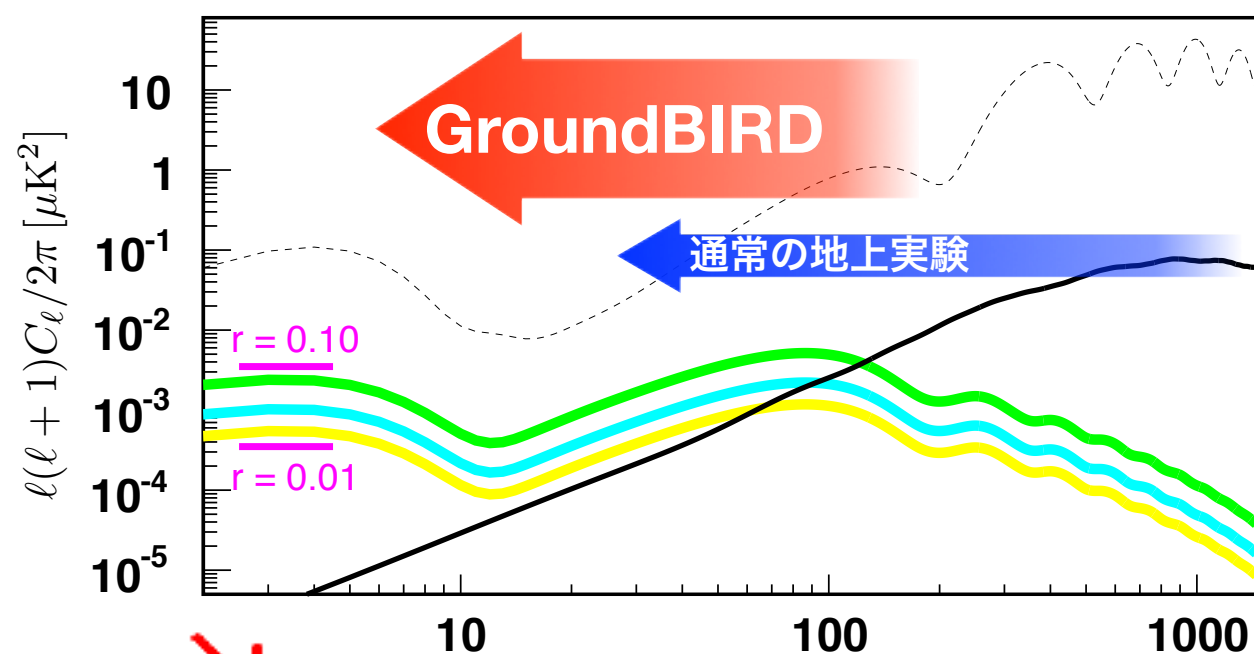


GroundBIRD

小型で高速回転する望遠鏡

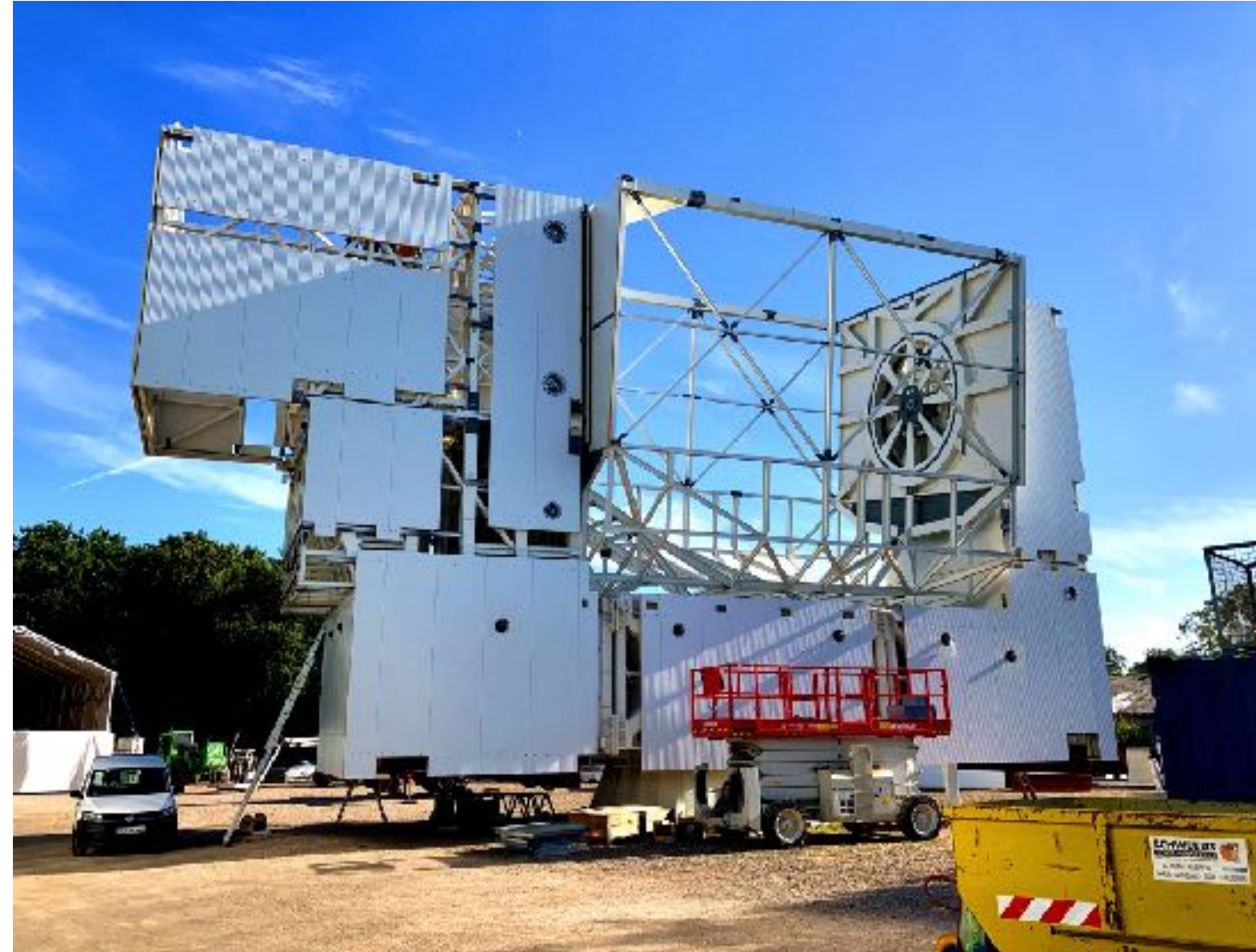
→低い ℓ での高感度観測を目指す

CMBモードパターン信号強度



Simons Observatory

21



PD 清野

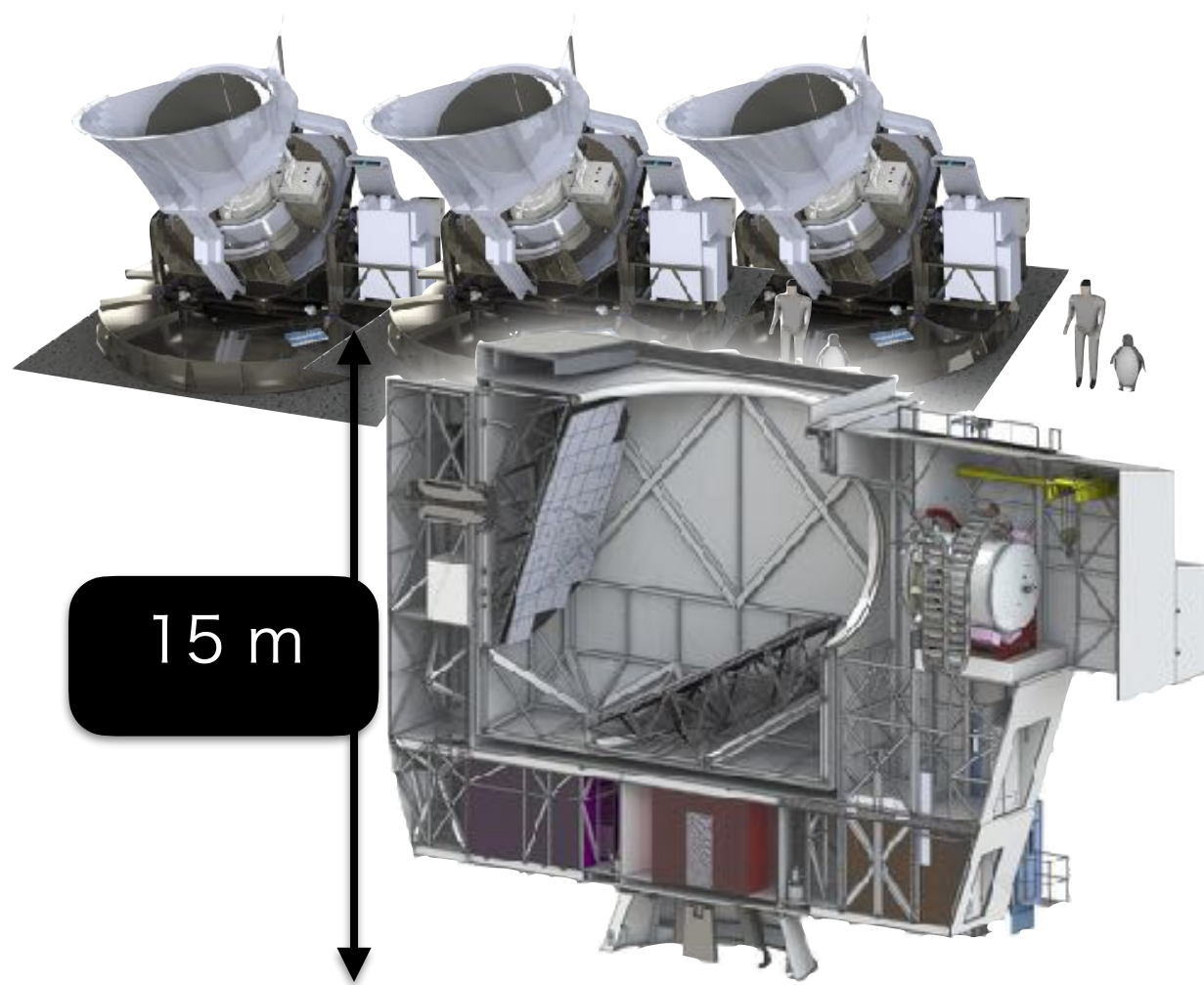


D2 中田



Google Earth

Simons Observatory

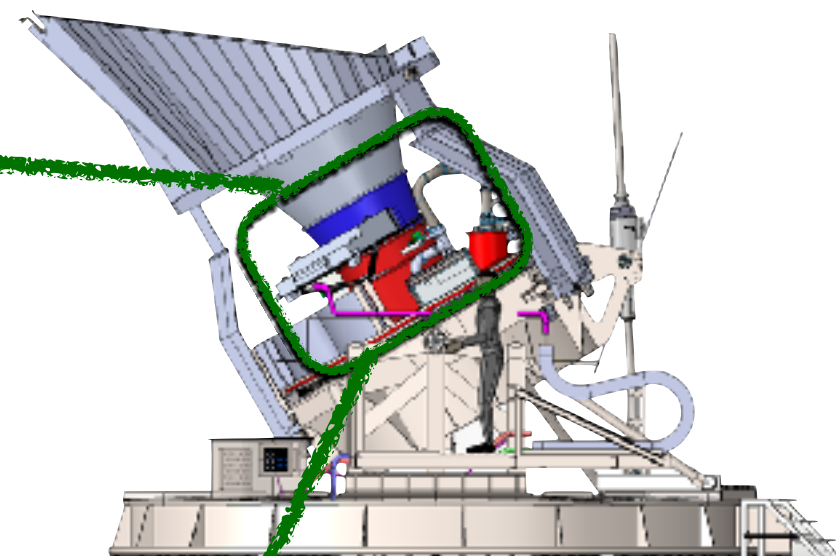
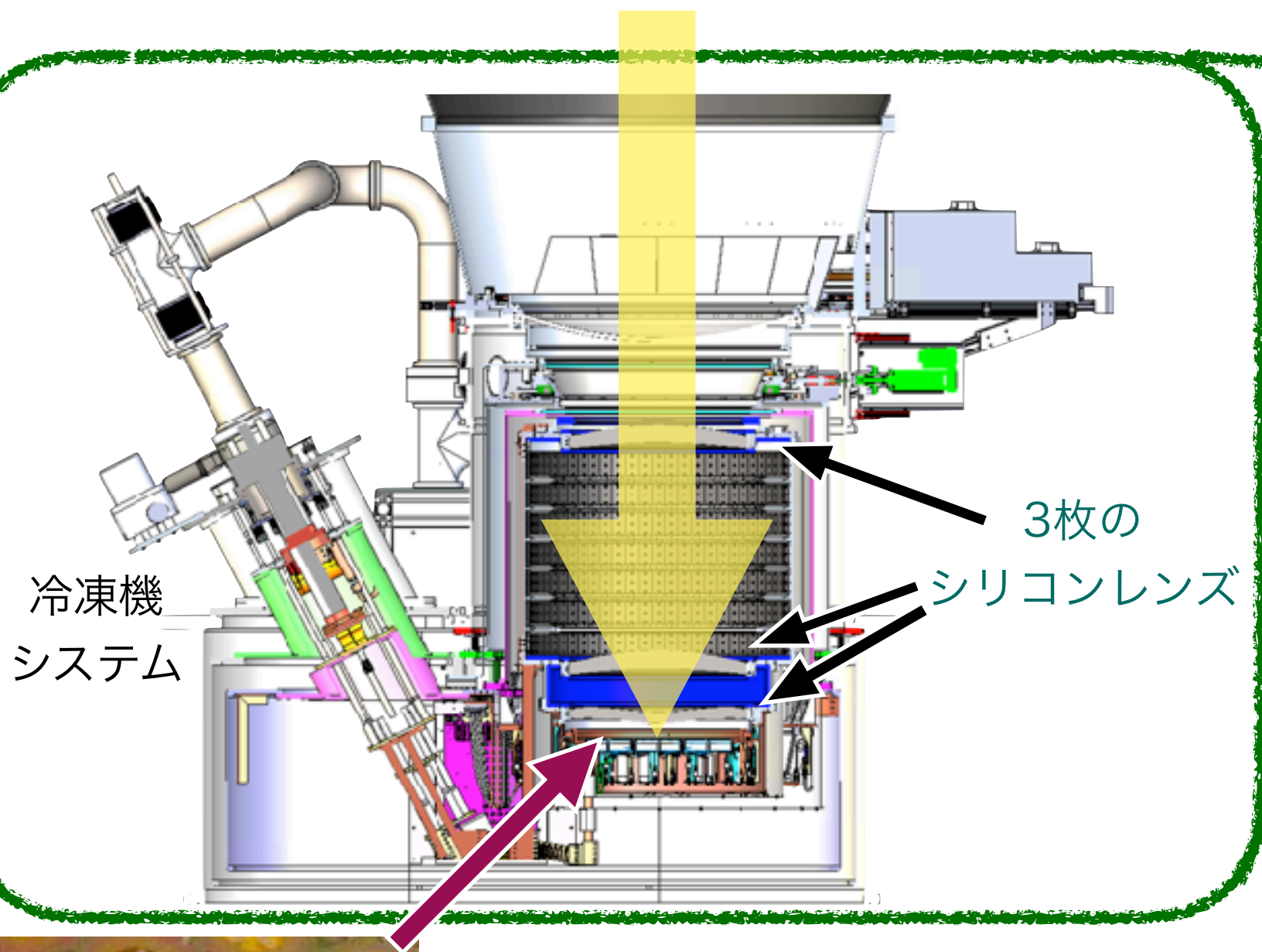


- 小口径望遠鏡 と 大口径望遠鏡 で世界最高感度へ！

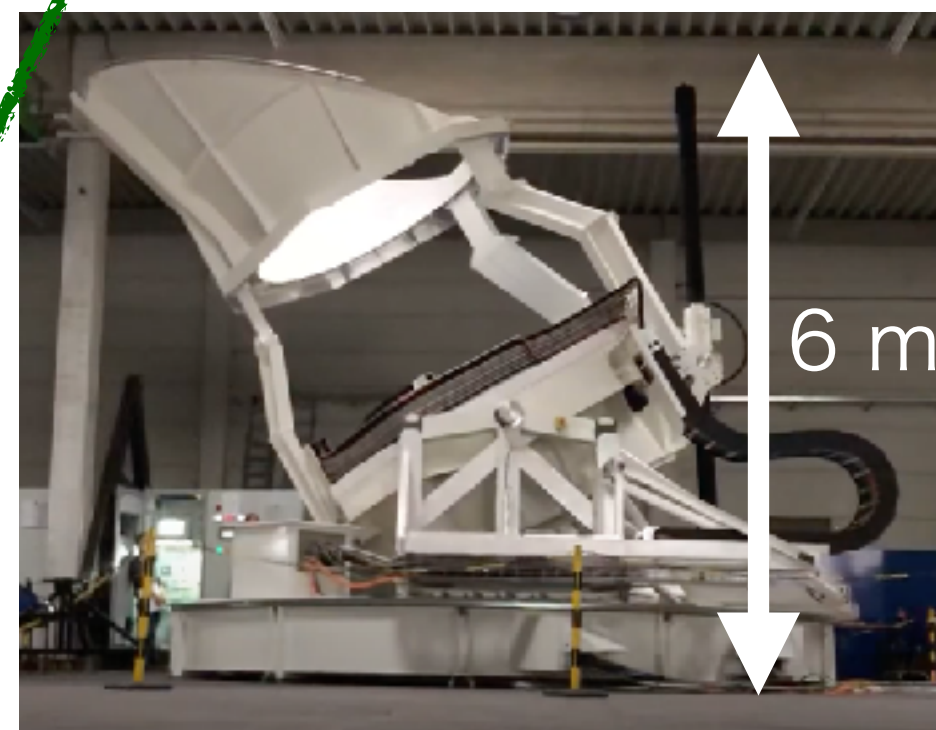
大きいパターン

小さいパターン

小口径望遠鏡 (SAT)

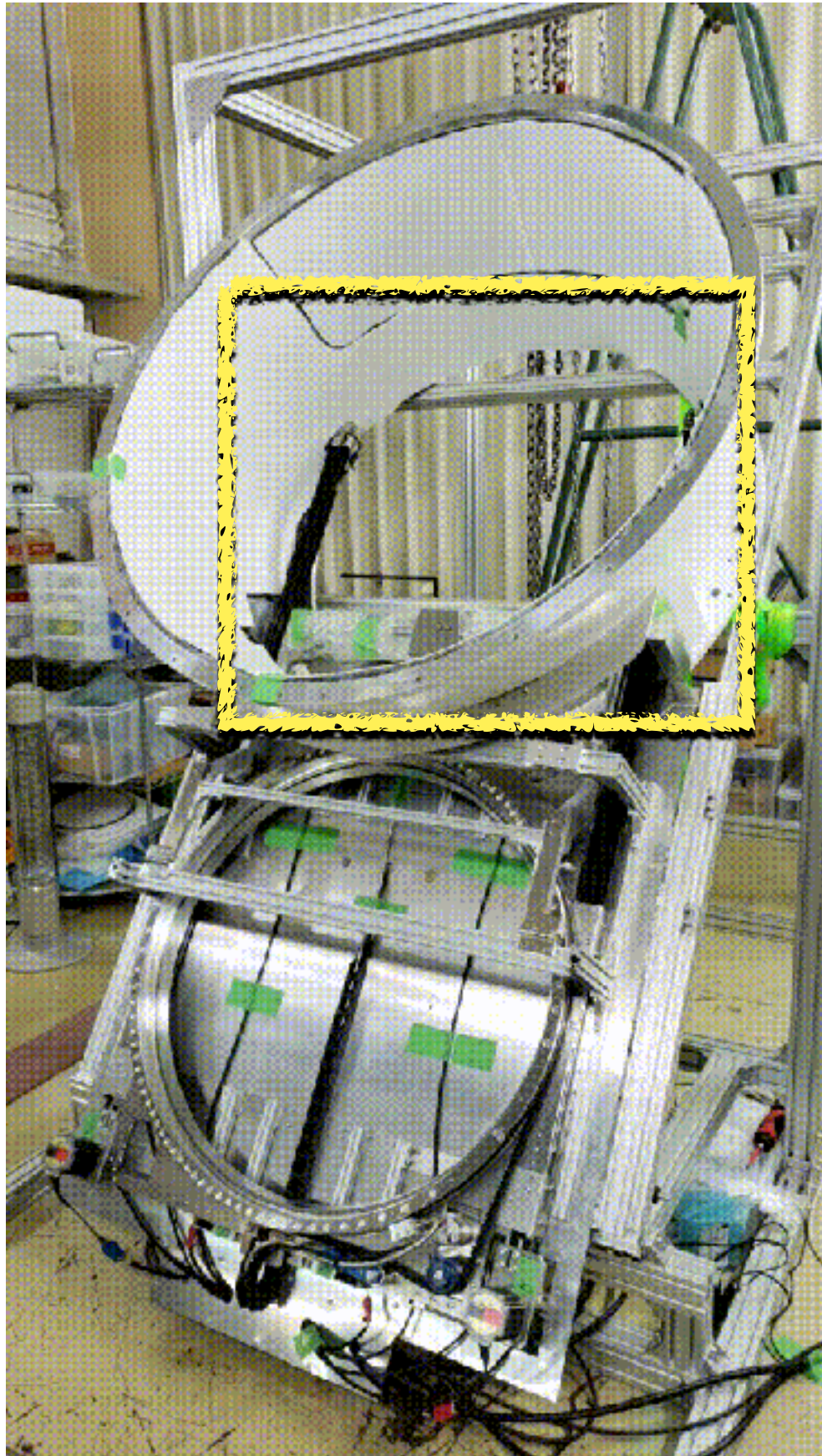


実際の写真



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)

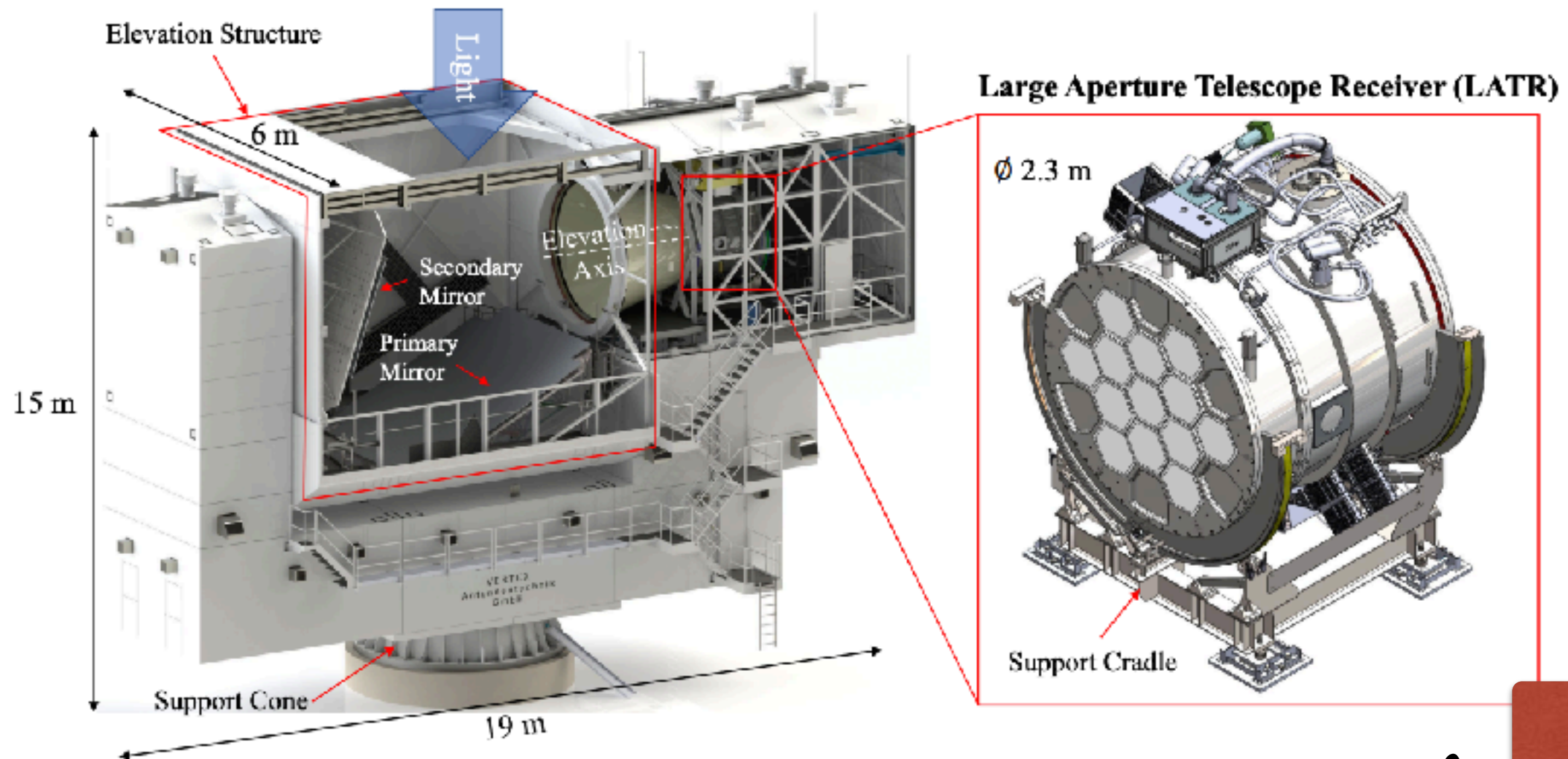


8倍速

25

～ 7分20秒/校正1回

大口径望遠鏡 (LAT)



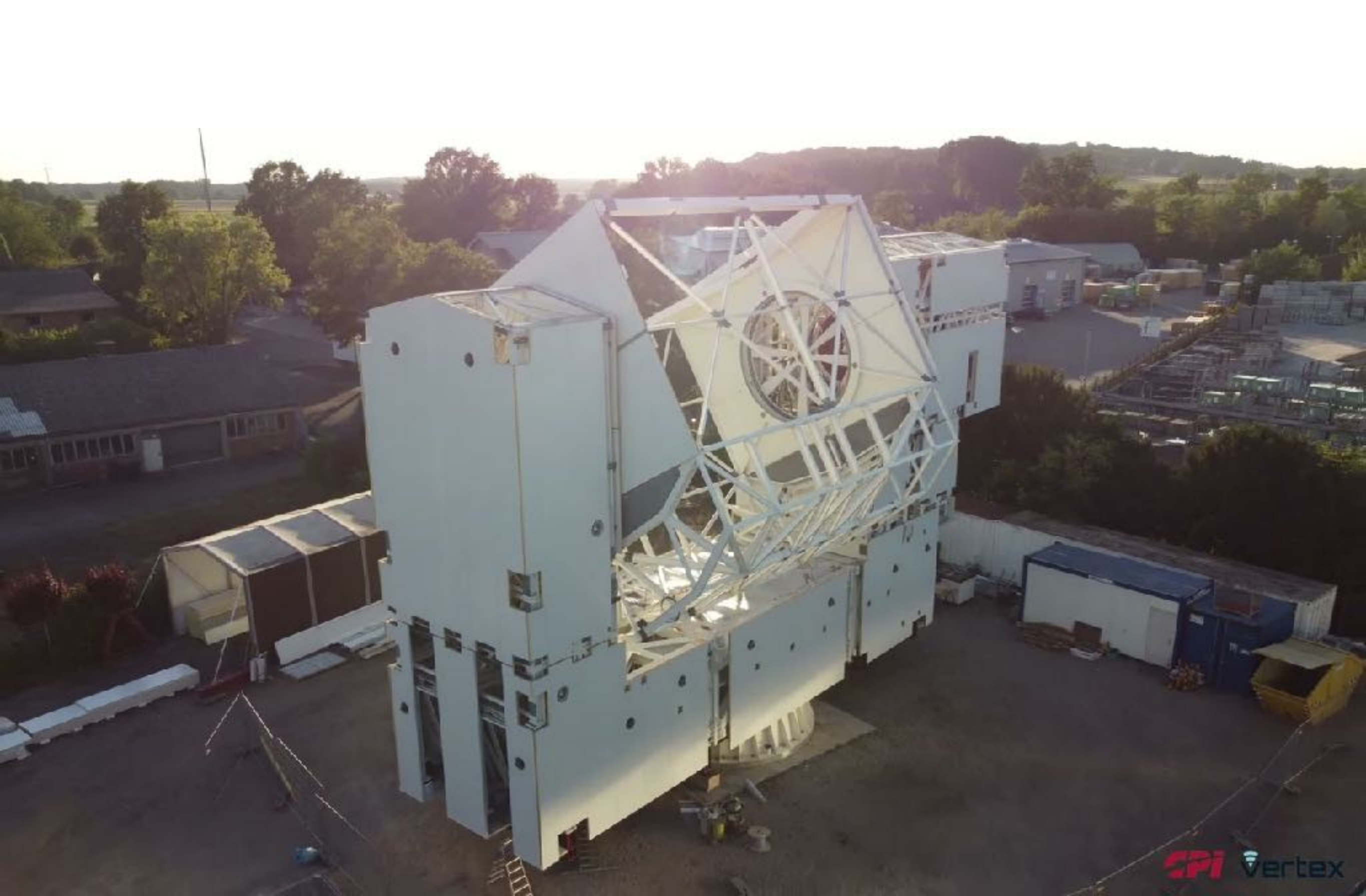
- Σm_V , N_{eff} , galactic science etc...

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

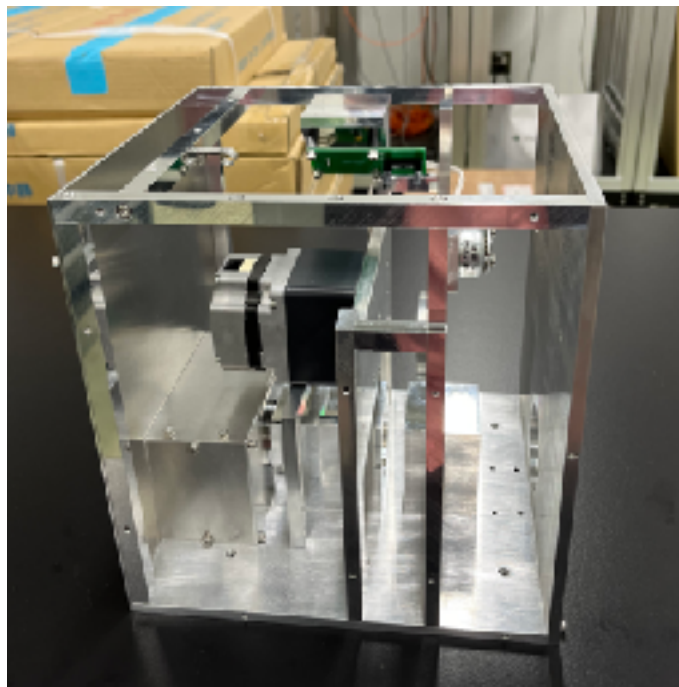
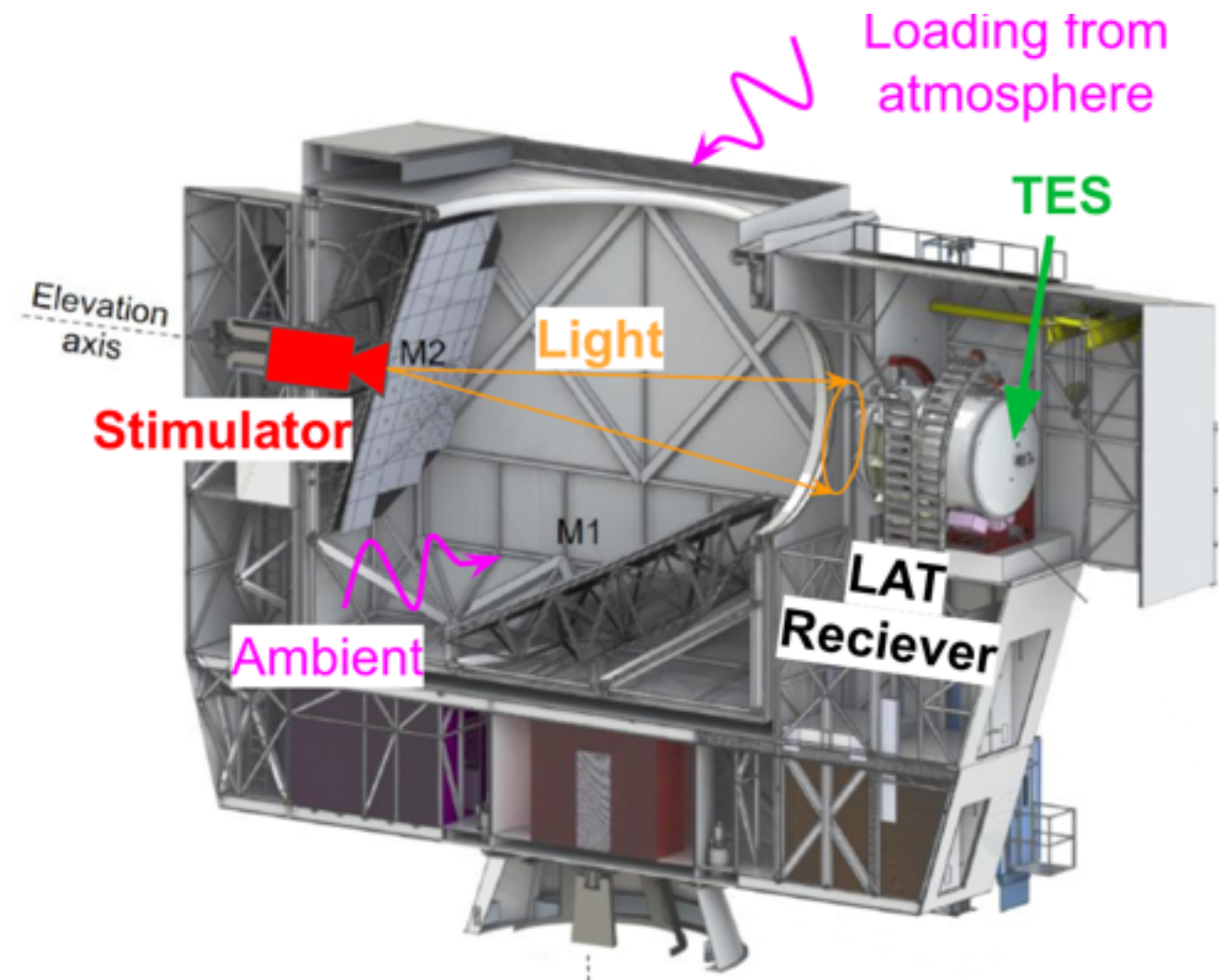
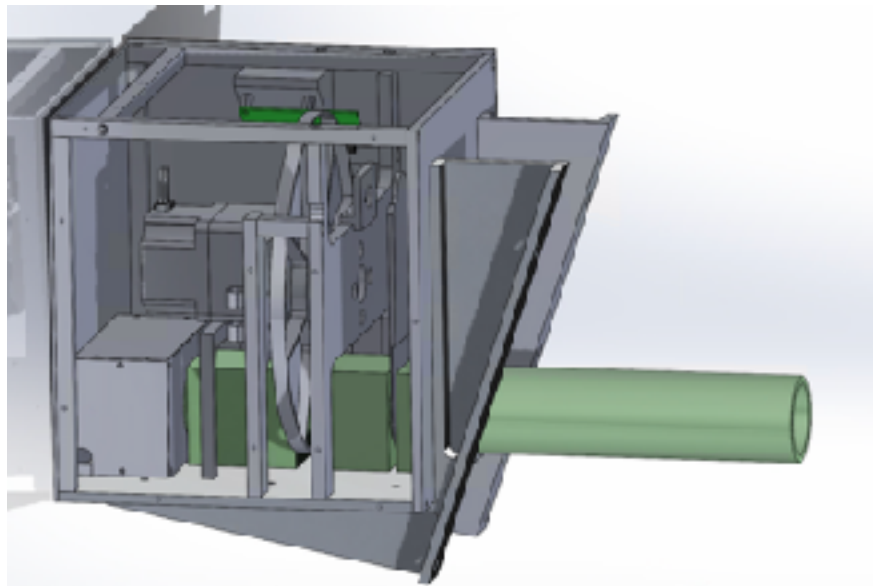
波長

角度分解能

望遠鏡の
デカさ

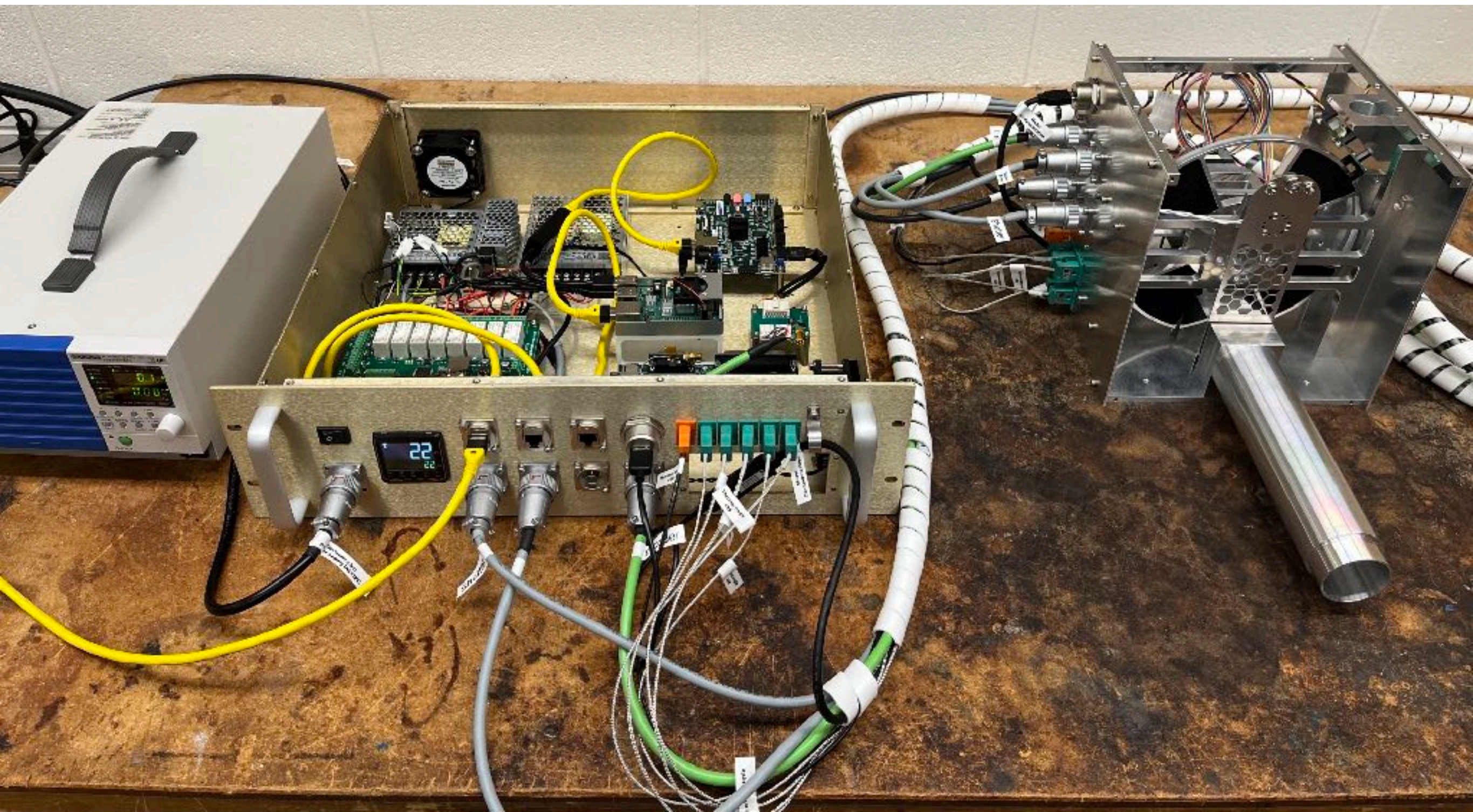


LAT の開発例 (stimulator)



- 人工放射源をつくって検出器を較正

Operationテスト進行中



Operationテスト進行中

手動

Shutter

Chopper

光路のパイプを
覗き込み

Operationテスト進行中

エレキで

Shutter

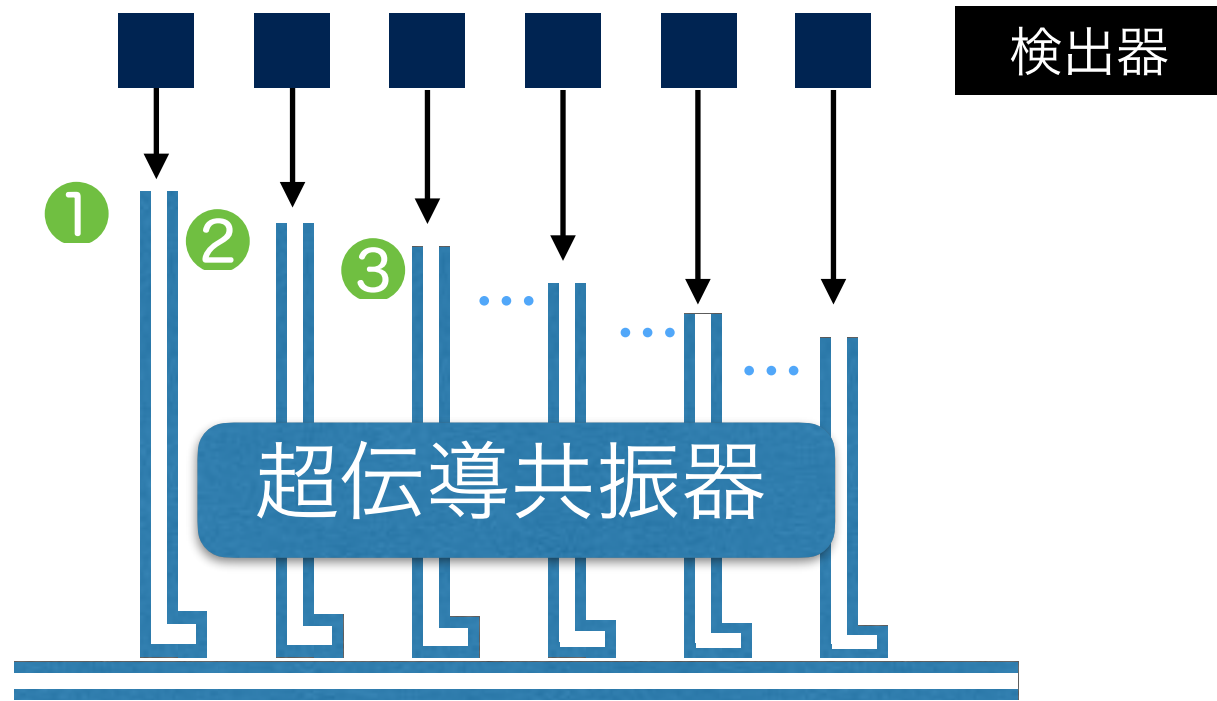
Chopper

光路のパイプを
覗き込み

その他の開発

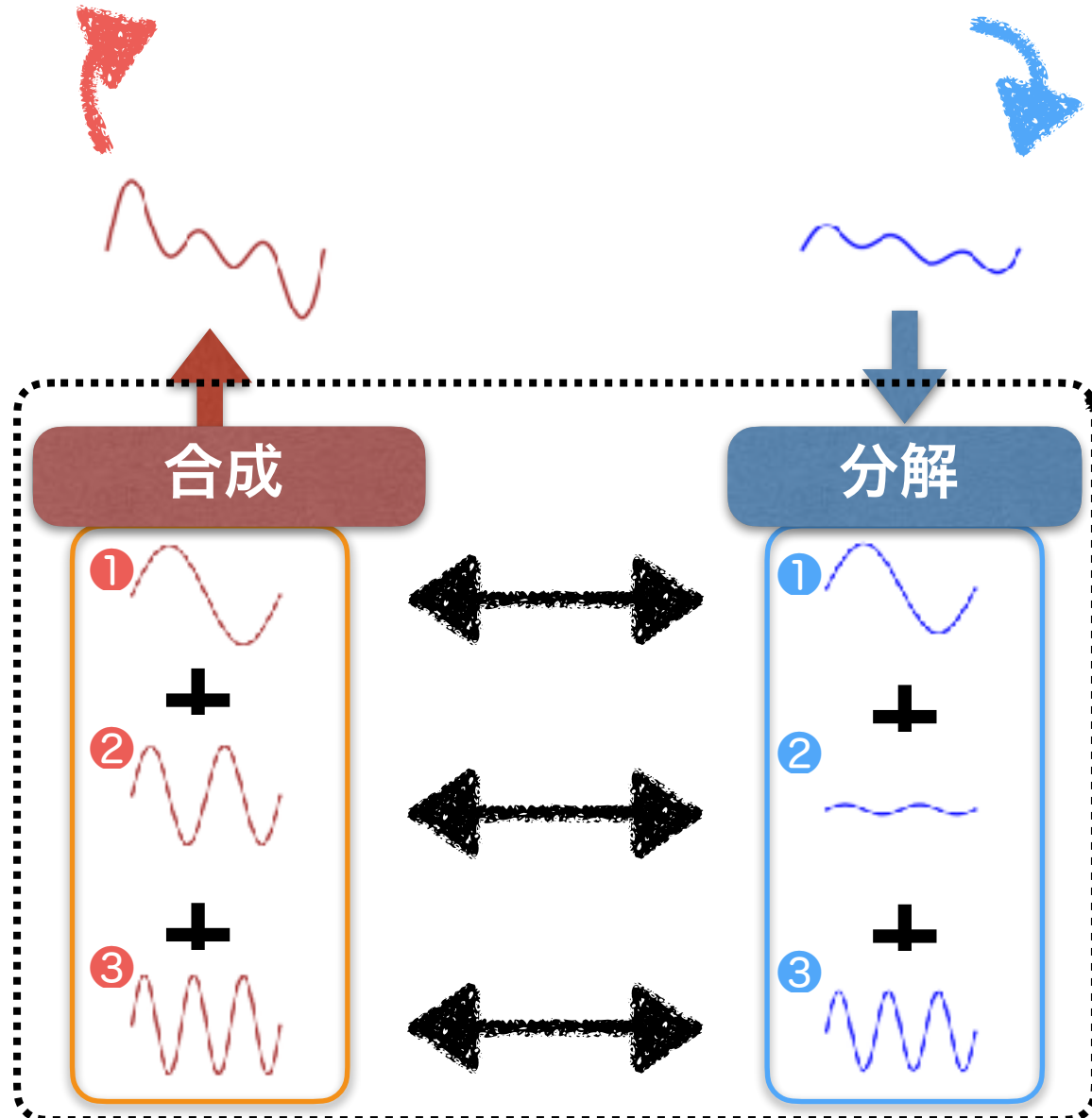
観測プロジェクトにこだわらず、
京都大学で開発しているもの

検出器



超伝導検出器の読み出し

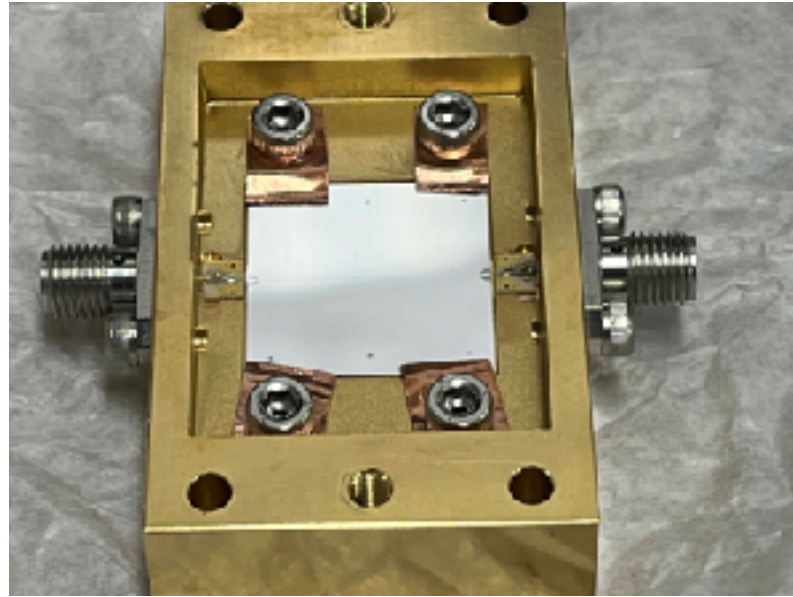
- ケーブル経由の熱流入を抑えるため、 $O(10^3)$ 個の検出器を一本のケーブルで読み出す
- 京大の CMB グループでは、多重化読み出し装置の開発を行っている
 - GroundBIRD 用の読み出し装置
 - 性能向上のための研究



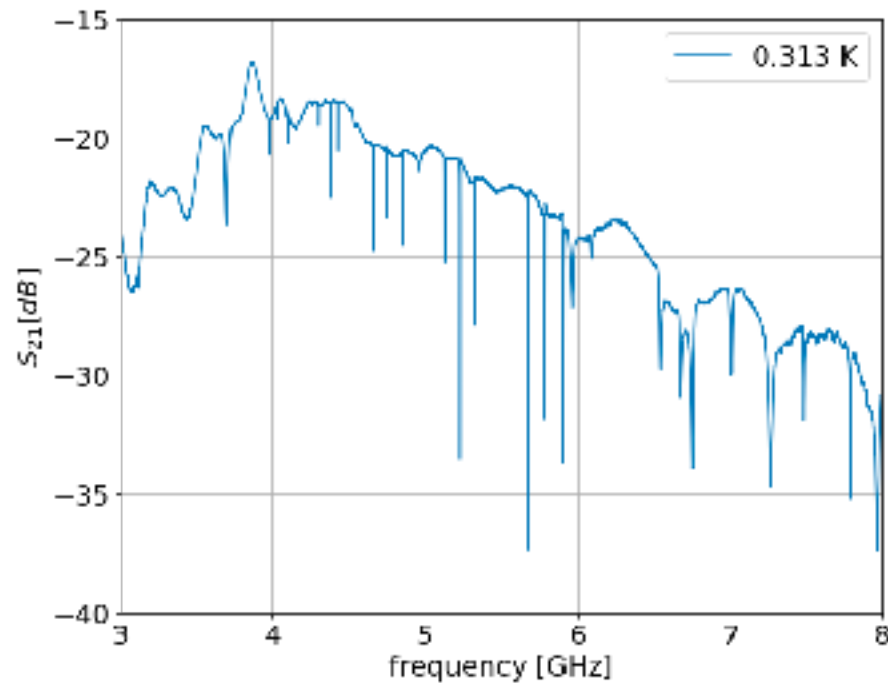
アナログボード



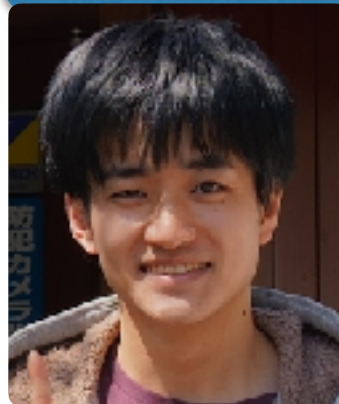
超伝導検出器の製作



- 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 武藤



D3 末野



修士のテーマ

- GroundBIRD :
 - 新しい断熱方法の開発 (テンセグリティ)
 - 恒星を用いたキャリブレーション手法開発
など
- Simons Observatory
 - チリでの望遠鏡立ち上げ
 - 4 台目の SAT 開発 (← 日本が主導！)
 - データ取得の解析パイプライン開発
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

テンセグリティ構造

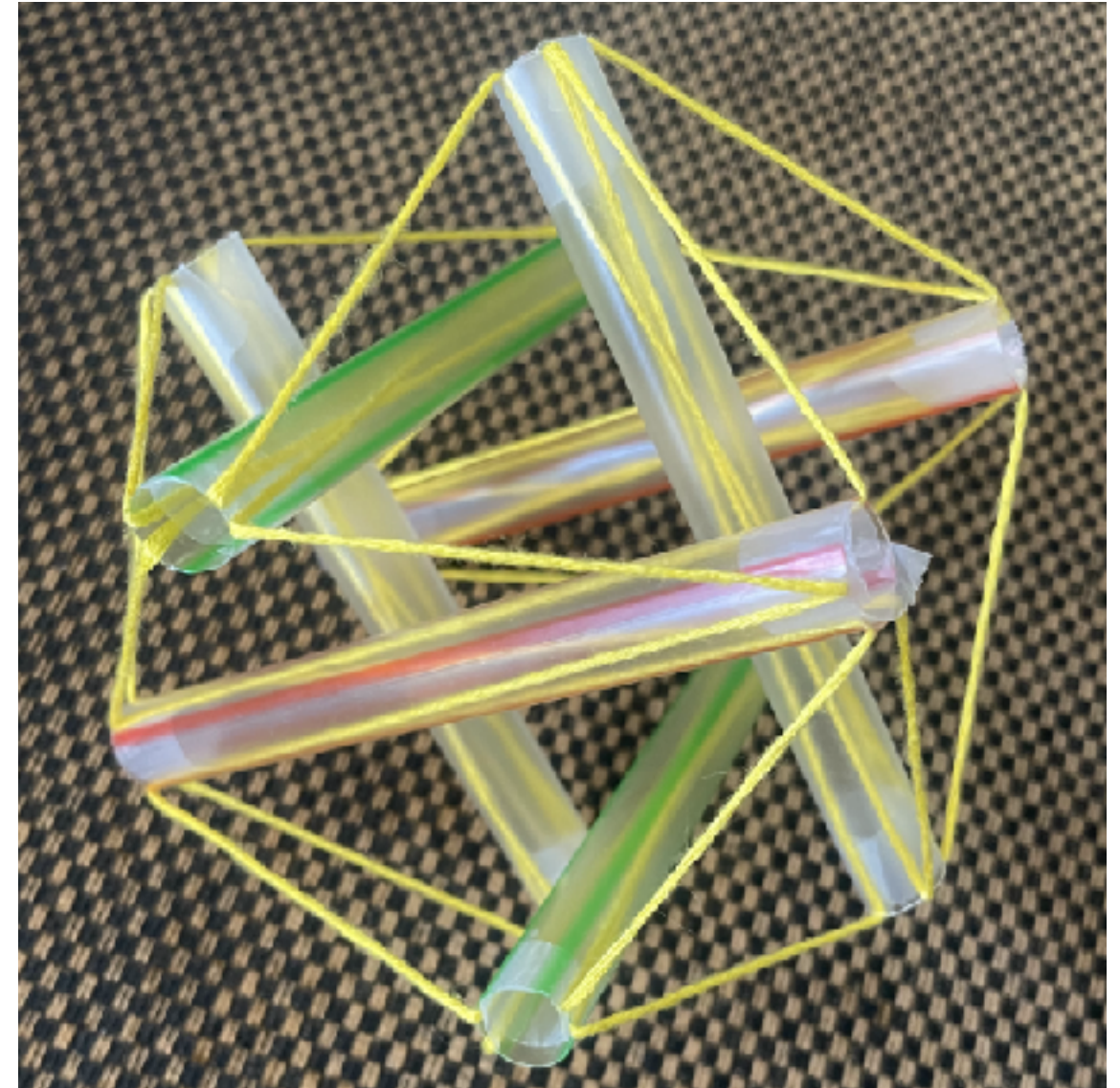
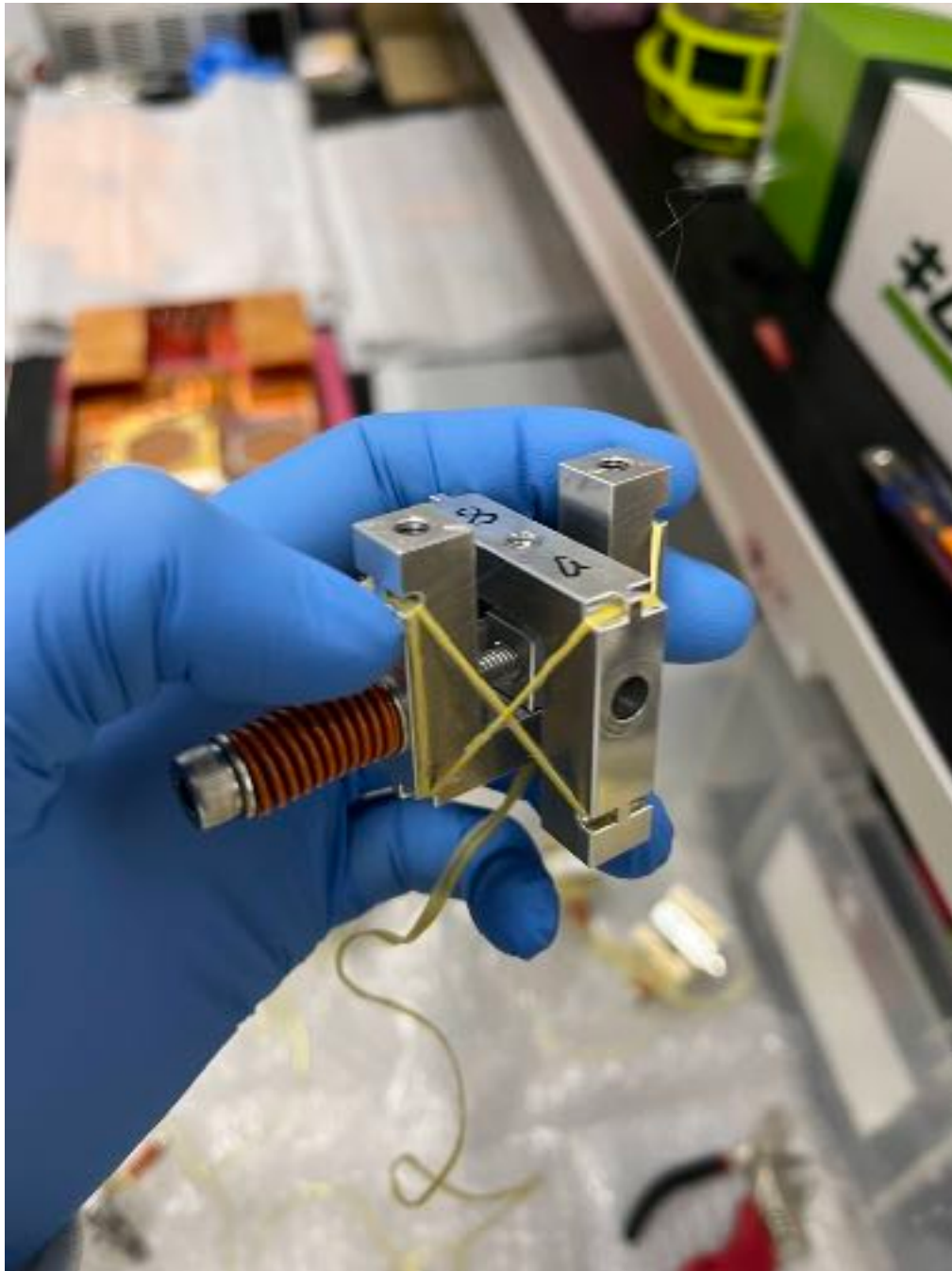


Photo by [QuarterNotes](#) / [CC BY-SA 4.0](#)

ミーティング情報

- 京都CMBグループ
 - 水曜 15:00 ~、ゼミ 9:00 ~
 - ミーティング、ゼミは対面 / zoom ハイブリッド
- GroundBIRD
 - 金曜 17:00~ (夏時間) 18:00~ (普段)
- Simons Observatory
 - SO-Japan 火曜 12:00~ (analysis 11:30~)
 - 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 D3 302 号室 GB、超伝導
 - 中田 D2 304 号室 SO
 - 武藤 M2 303 号室 超伝導
 - 竹内 M2 306 号室 リードアウト

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