

A night sky with a bright star in the upper left, surrounded by a blue lens flare. The background shows a dark, rocky mountain landscape under a starry sky. In the foreground, a large telescope is visible on a rocky slope.

# POLARBEAR-2

## 光学系の開発

高取沙悠理  
総合研究大学院大学(KEK)

# POLARBEAR collaboration



## 国際コラボレーション実験

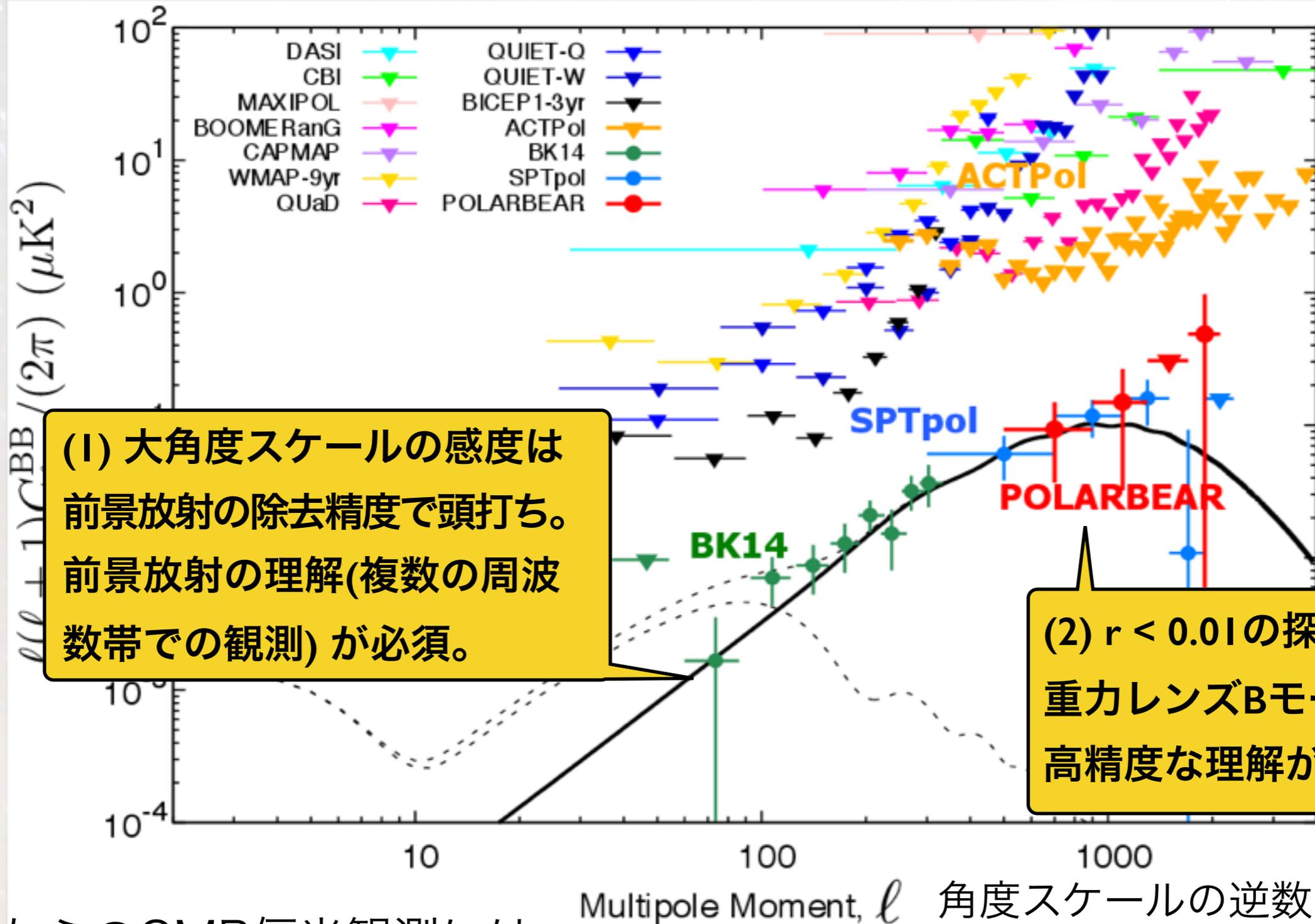


# Index

- ・ 宇宙マイクロ波背景放射(CMB)偏光Bモード  
探索の現状
- ・ 地上観測実験 POLARBEAR-2
- ・ POLARBEAR-2 光学系の開発
- ・ まとめ

# 偏光Bモード探索の現状

偏光Bモードのパワースペクトル



(1) 大角度スケールの感度は前景放射の除去精度で頭打ち。前景放射の理解(複数の周波数帯での観測)が必須。

(2)  $r < 0.01$ の探索には、重力レンズBモードの高精度な理解が必須。

これからのCMB偏光観測には、

多周波数 + 高感度 + 高角度分解能な実験が必要。 → **POLARBEAR-2実験**

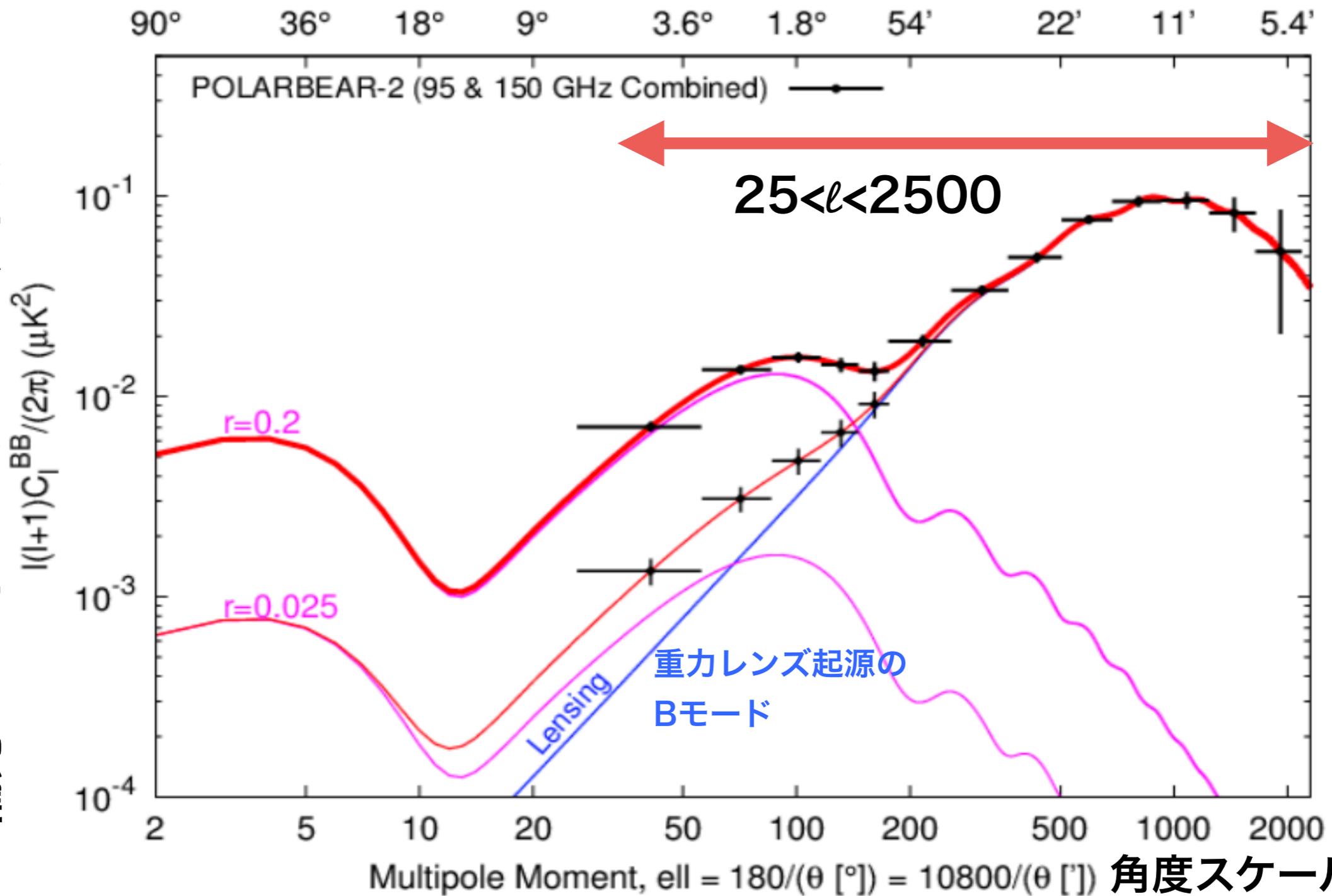
# POLARBEAR-2 実験

- ・ 地上のCMB偏光実験  
(標高5200m、チリアタカマ高地)
- ・ 大型の望遠鏡(主鏡3.5m)を用いて  
広い角度スケール( $25 < l < 2500$ )を  
カバー
  - 原始重力波Bモードと重力レンズ  
Bモードに感度を持つ
- ・ 複数周波数帯(95GHz, 150GHz)  
での観測



# POLARBEAR-2 実験の目標

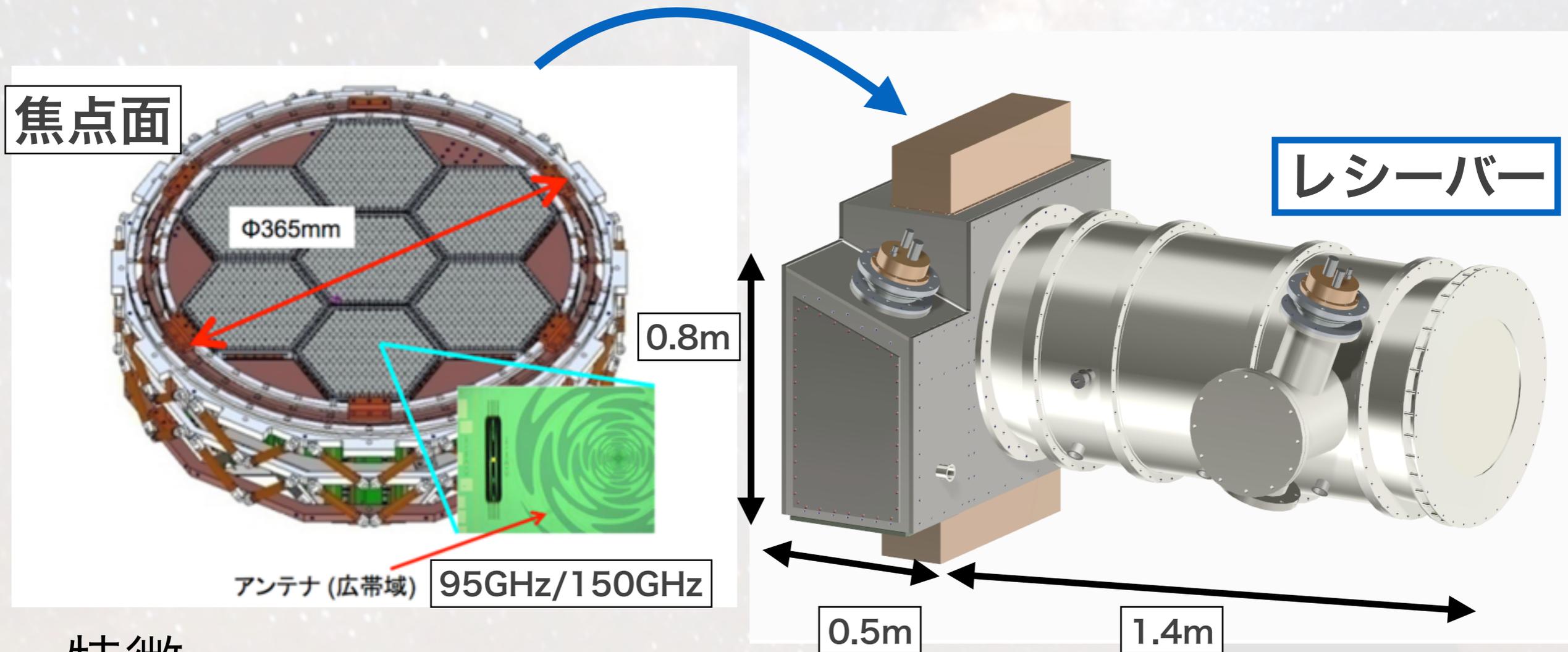
偏光Bモードのパワースペクトル



インフレーションモデルに対しては  $r \sim 0.01$  まで探索  
 ニュートリノ質量和に対しては  $\sim 0.1 \text{ eV}$  まで探索

宇宙論の進展に  
 寄与できる。

# POLARBEAR-2 レシーバーの特徴

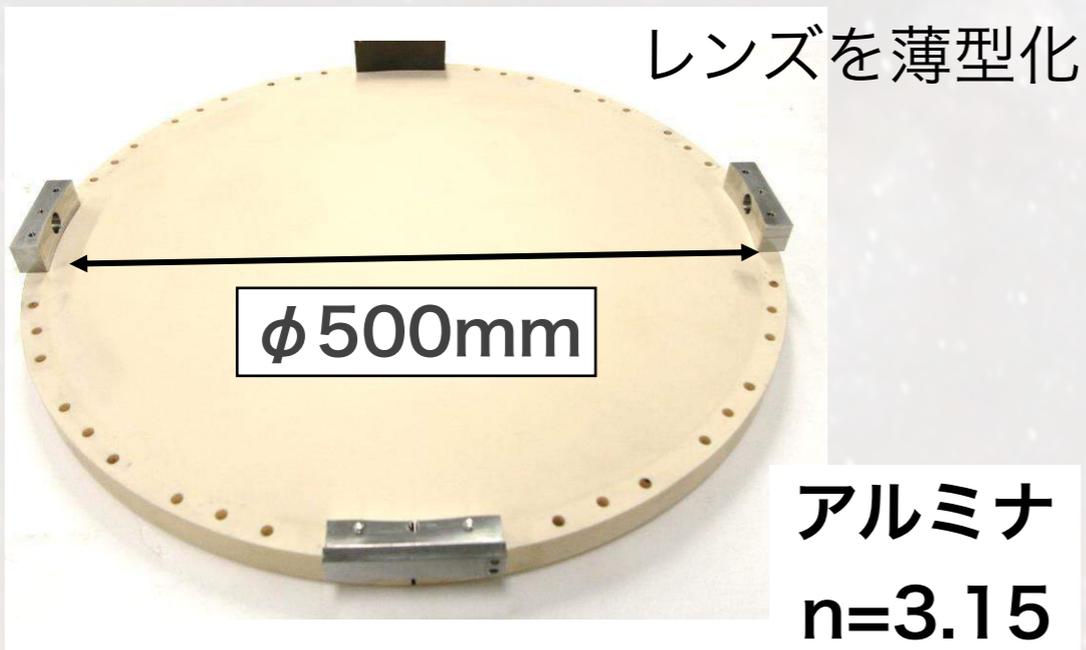


## 特徴

- 7588個の超伝導検出器を搭載した焦点面（単一では世界最大級）
- 2波長同時読み出し（前景放射の分離能力の向上）
- 大型低温光学系を実現  
（光学素子を4Kに冷却--> 焦点面への熱負荷や熱雑音を抑える）

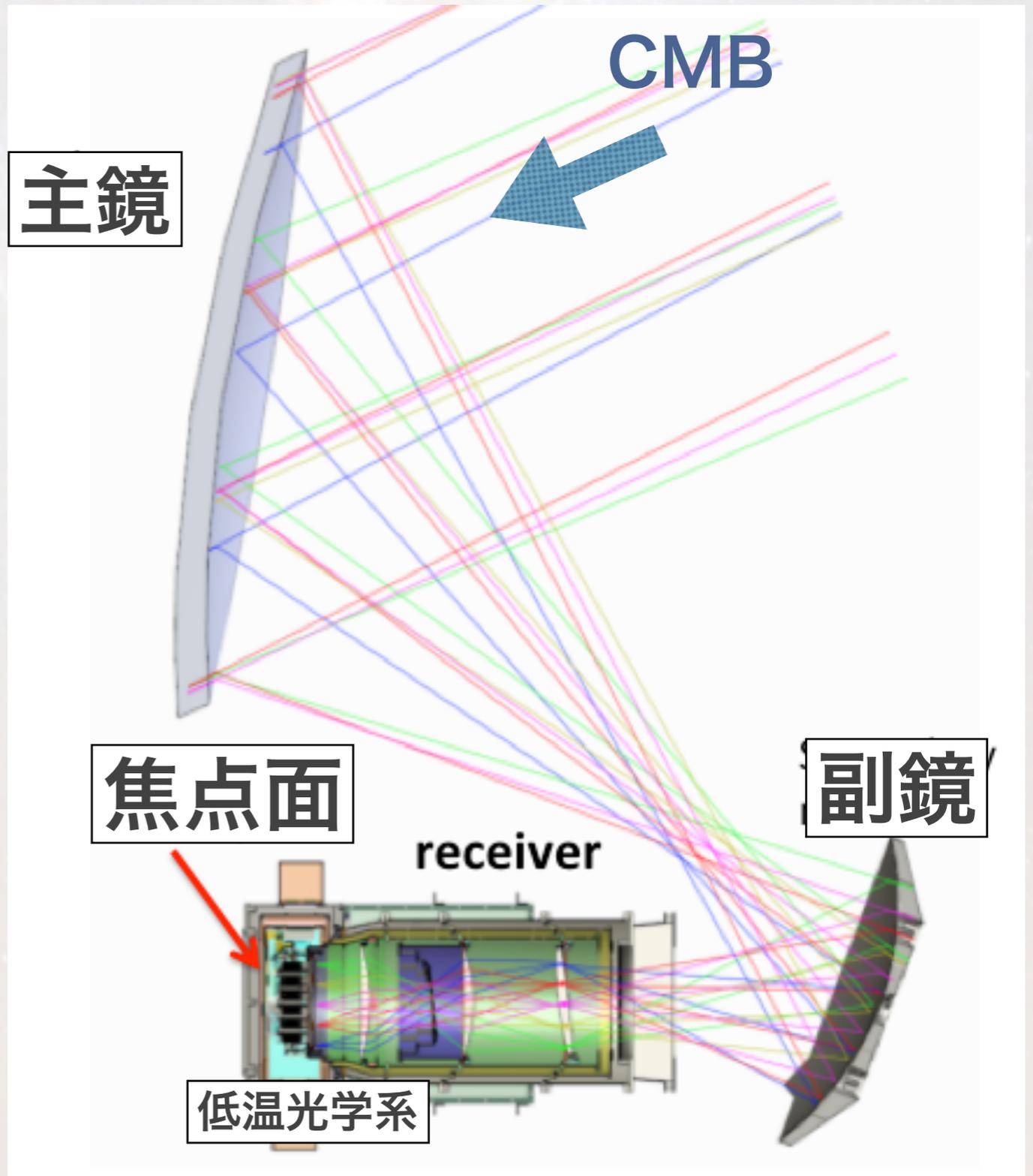
# アルミナレンズによる大型光学系の実現

望遠鏡の大きさはそのまま  
焦点面(光学系)を大きくする  
には？



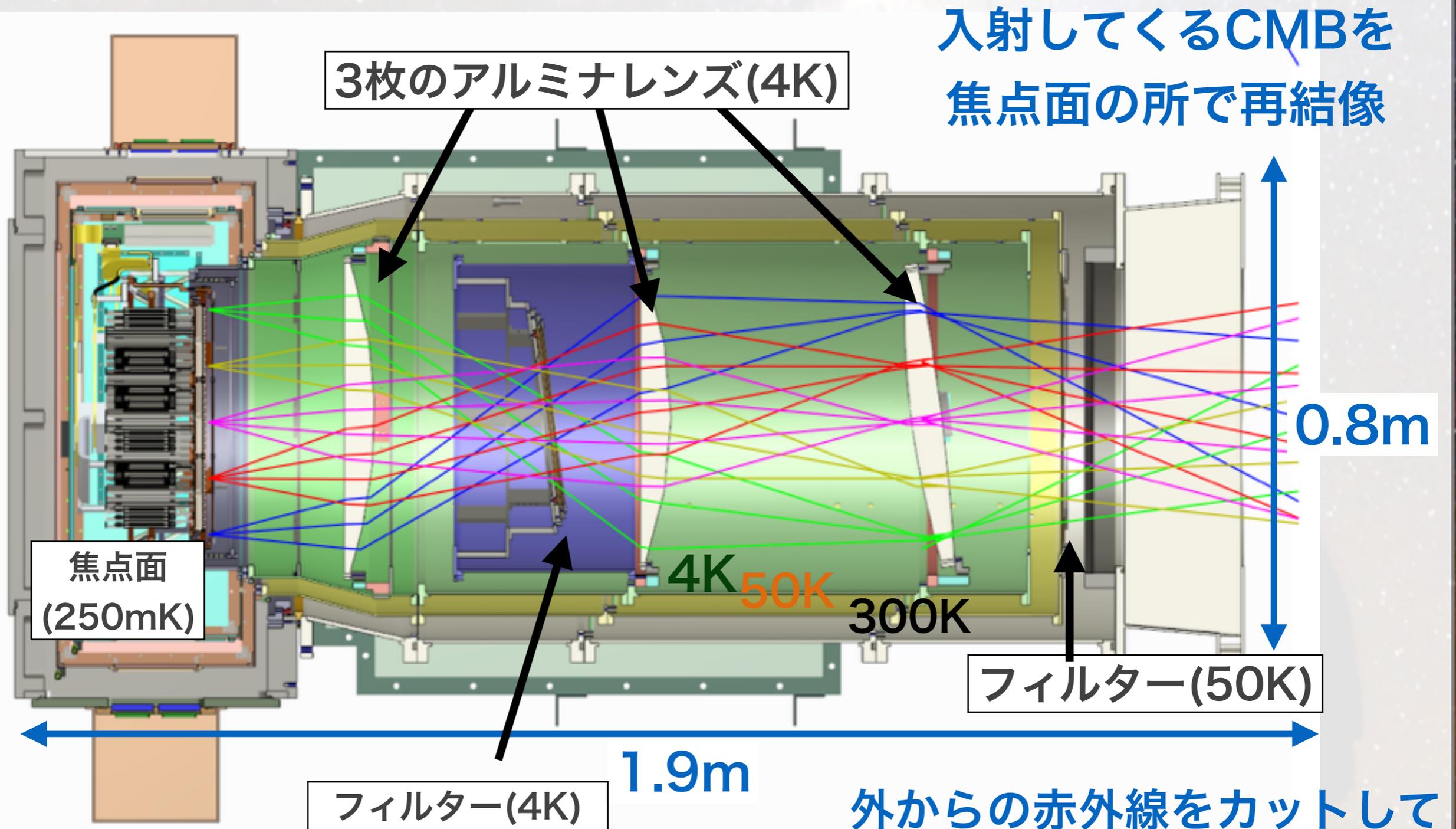
POLARBEAR-1  
ポリエチレン  $n=1.5$

屈折率の大きい  
アルミナレンズを使用し  
大型光学系を実現できる



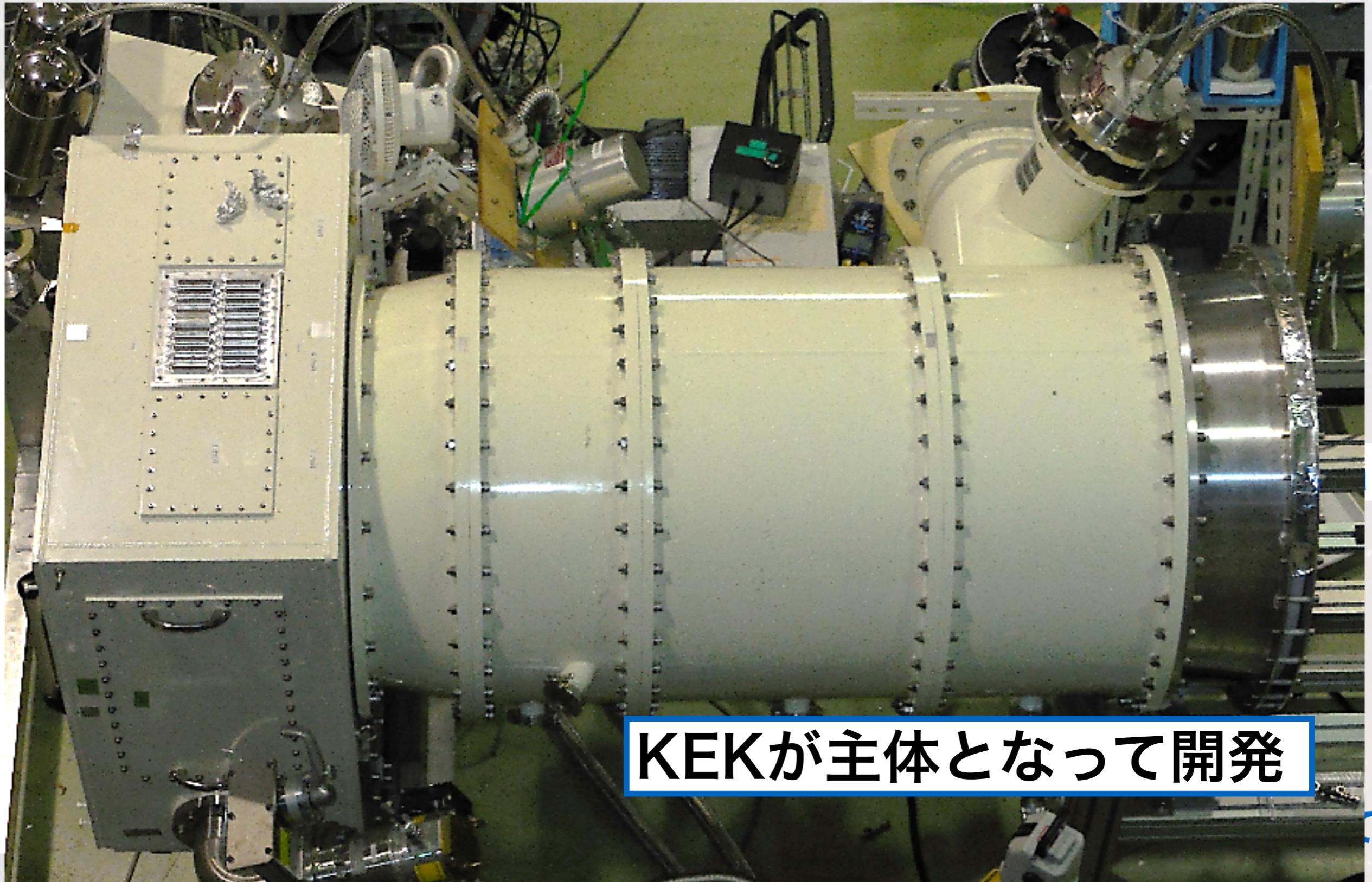
# POLARBEAR-2レシーバー

アルミナレンズを使用し大型光学系を実現



外からの赤外線をカットして  
焦点面を250mKに保つ。

# POLARBEAR-2レシーバー

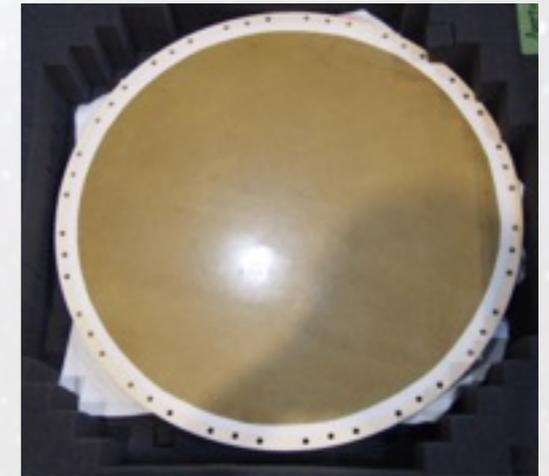


KEKが主体となって開発

焦点面を250mKに保つ。

# アルミナレンズを使用した大型低温光学系の2大要求

## (1)アルミナレンズの弱点である表面反射を防止

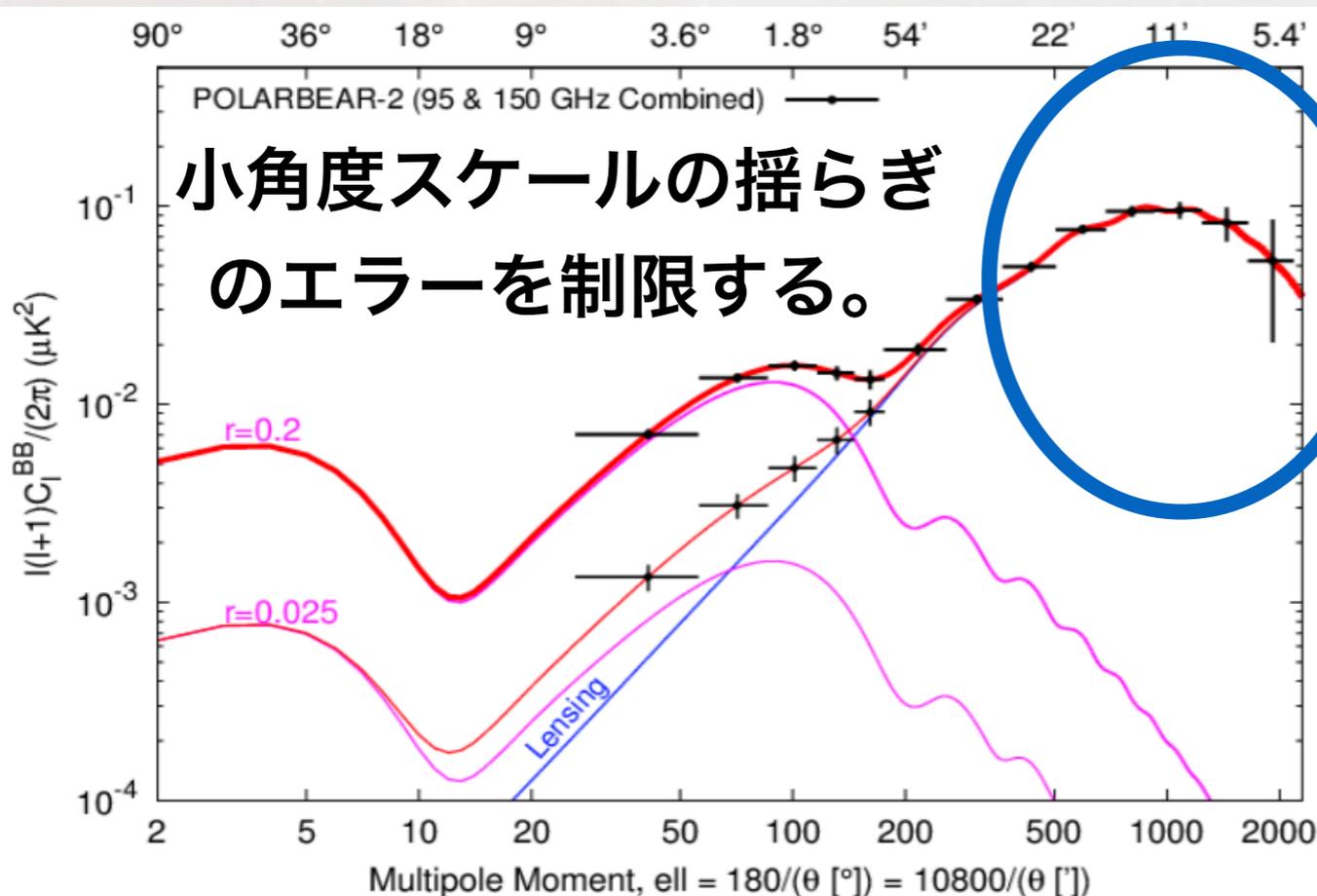


→井上

大型の2層反射防止膜を開発。  
観測帯域の2波長で反射の抑制に成功。

## (2)大型レンズのアライメント

→高取(本講演)



全ての焦点面で光がきれいに収束しないと望遠鏡の角度分解能が落ちてしまう。

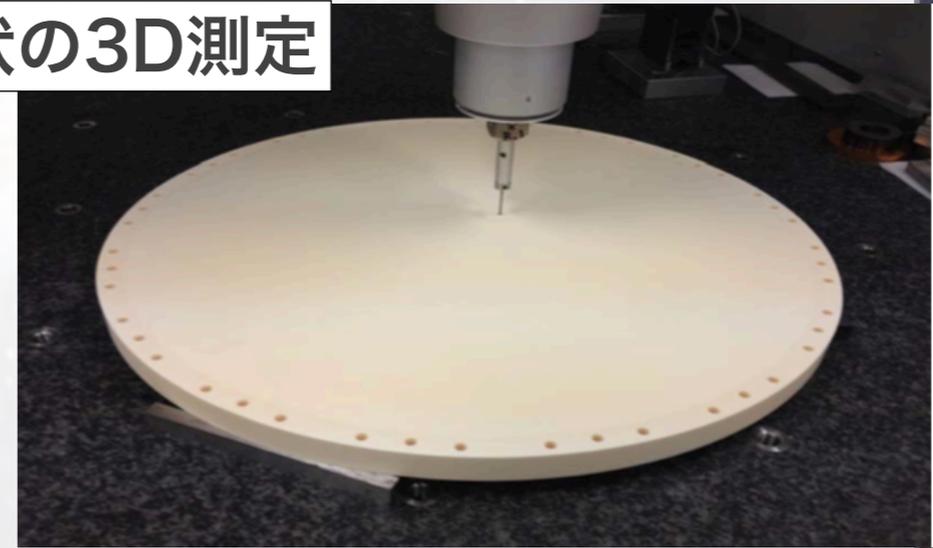
十分な角度分解能で測定を行う為には、光学系のアライメントが重要。

# 光学シミュレーション

## 製造エラー

各レンズ、フィルターの  
屈折率・形状の実測値とその不定性を考慮

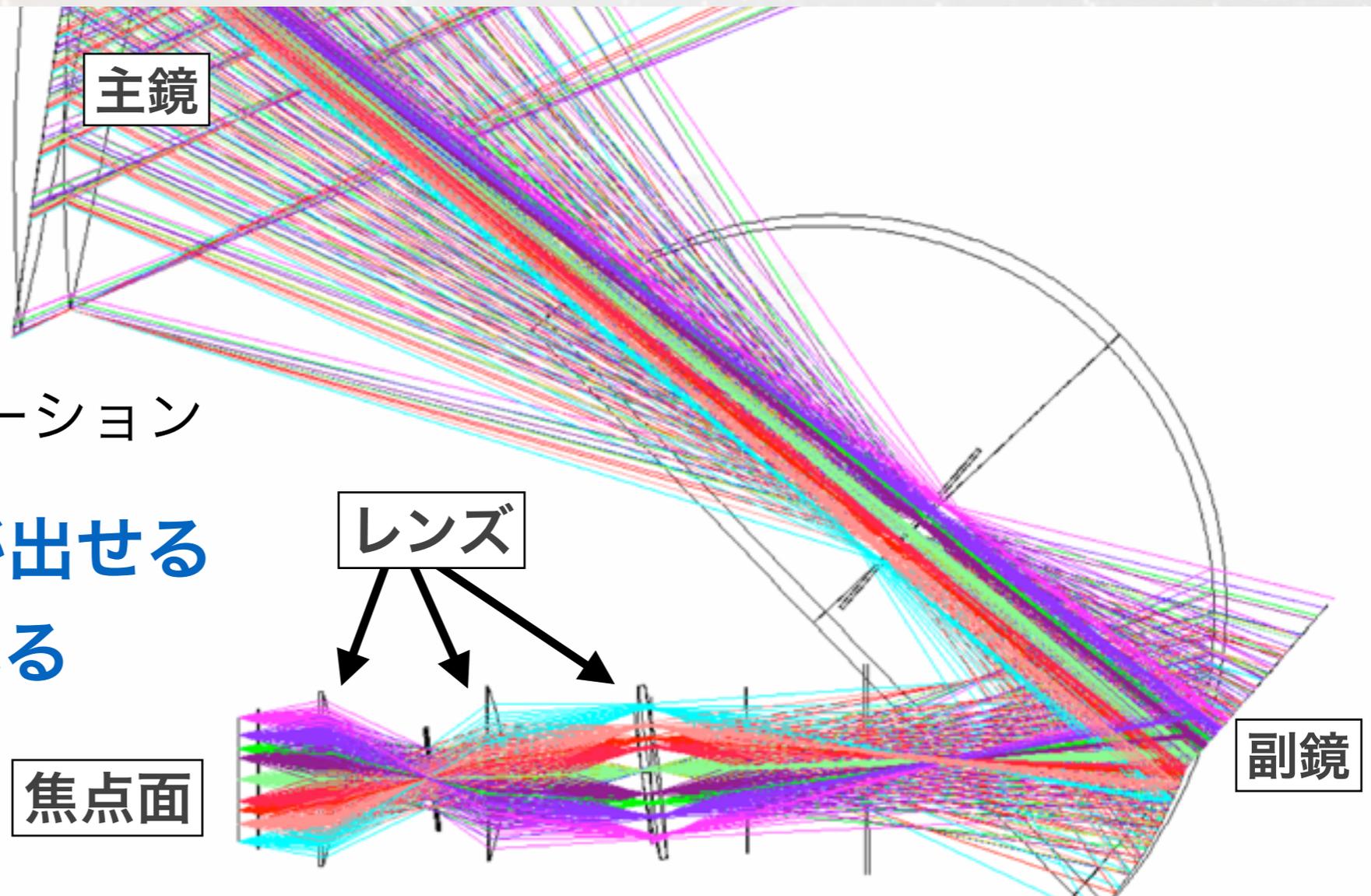
レンズ形状の3D測定



## アライメント エラー

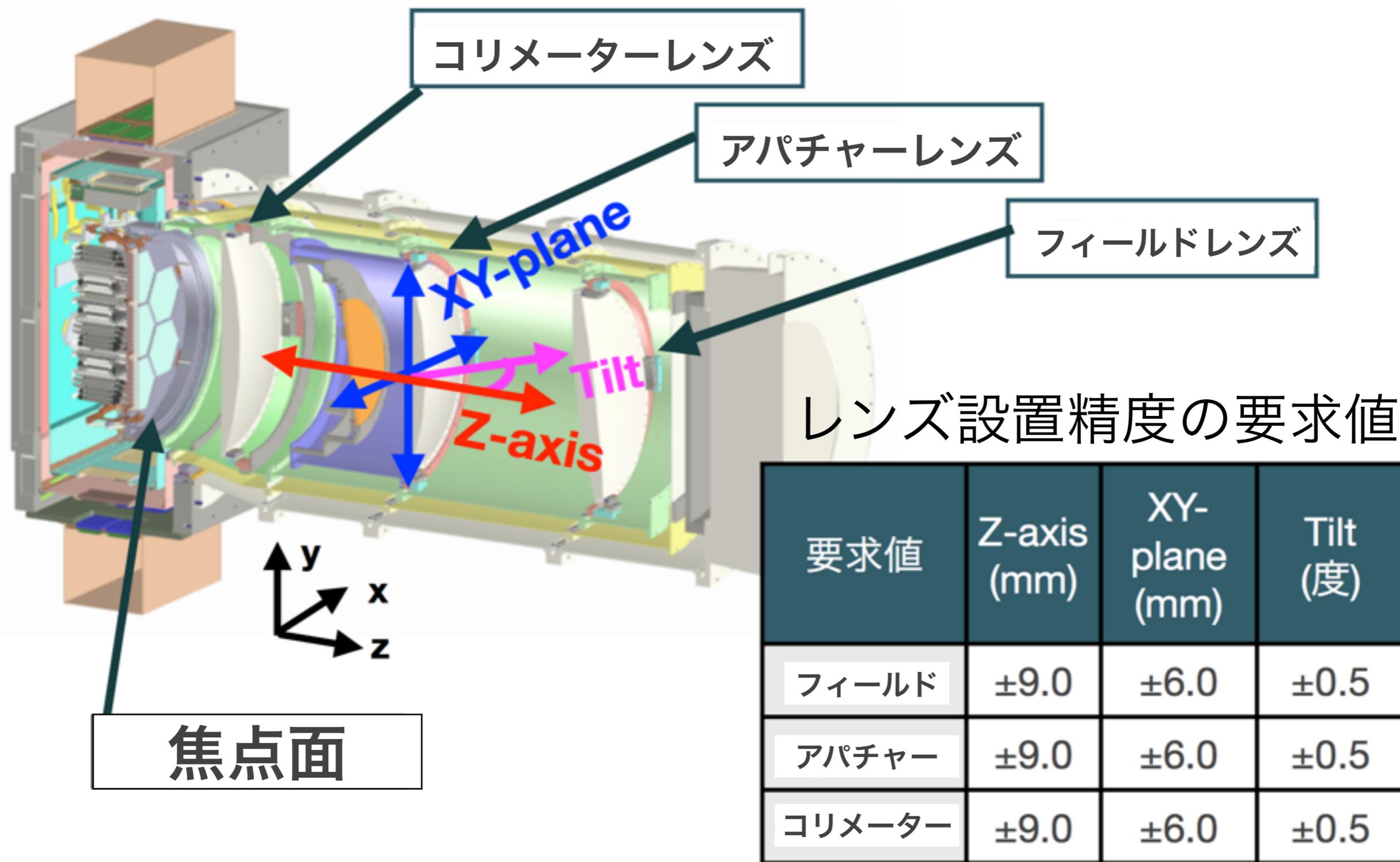
ZEMAXを使用し、  
モンテカルロシミュレーション

十分な角度分解能が出せる  
各レンズの要求される  
設置精度を求める。



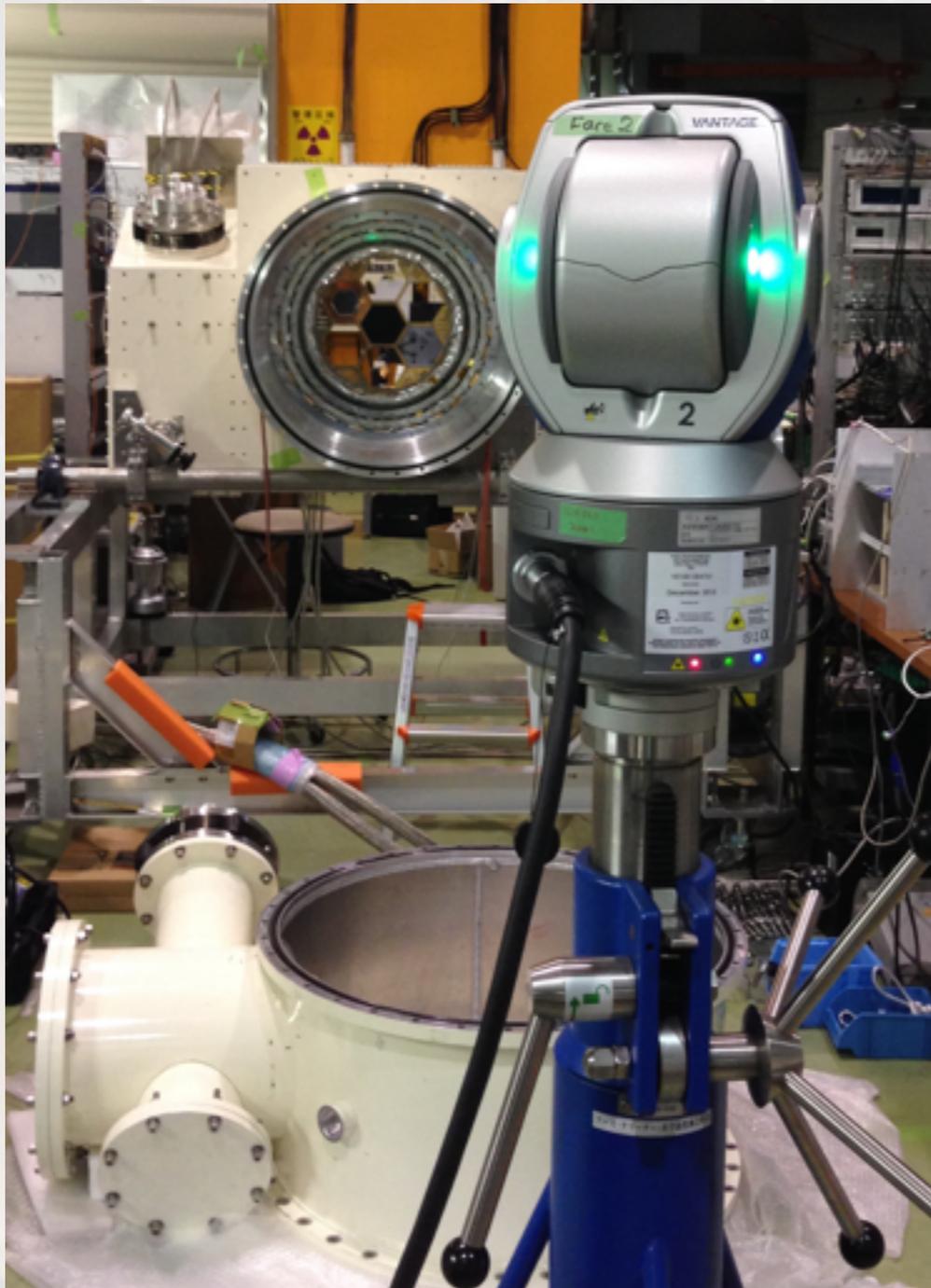
# アライメント測定の実験装置

位置、傾きに対しての設置精度の要求値を求める

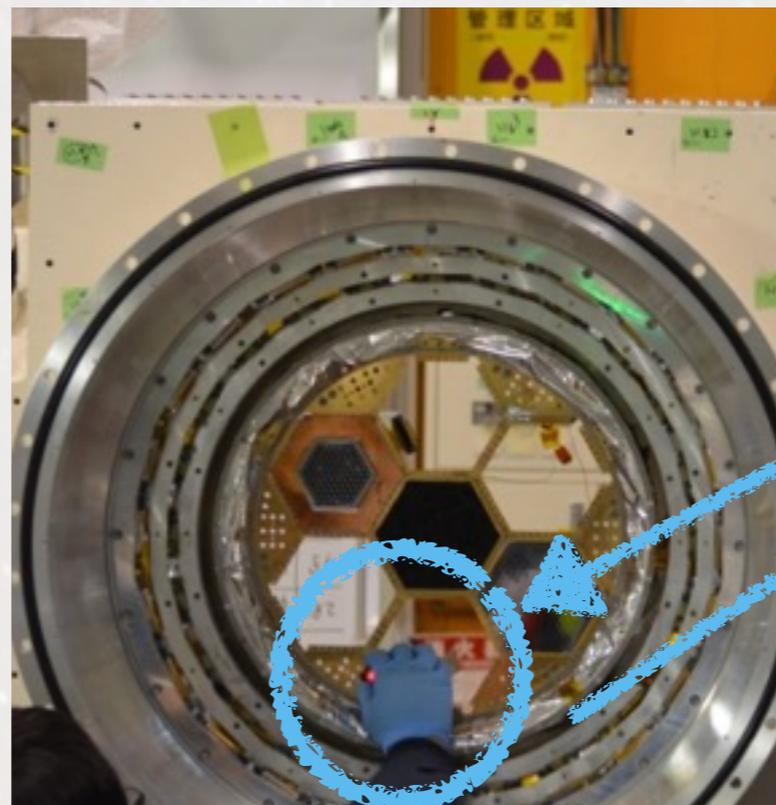


# レンズの位置測定

加速器のアライメントに  
使用している三次元精密測定器を  
CMB測定器に応用



およそ $20\mu\text{m}$ の測定精度



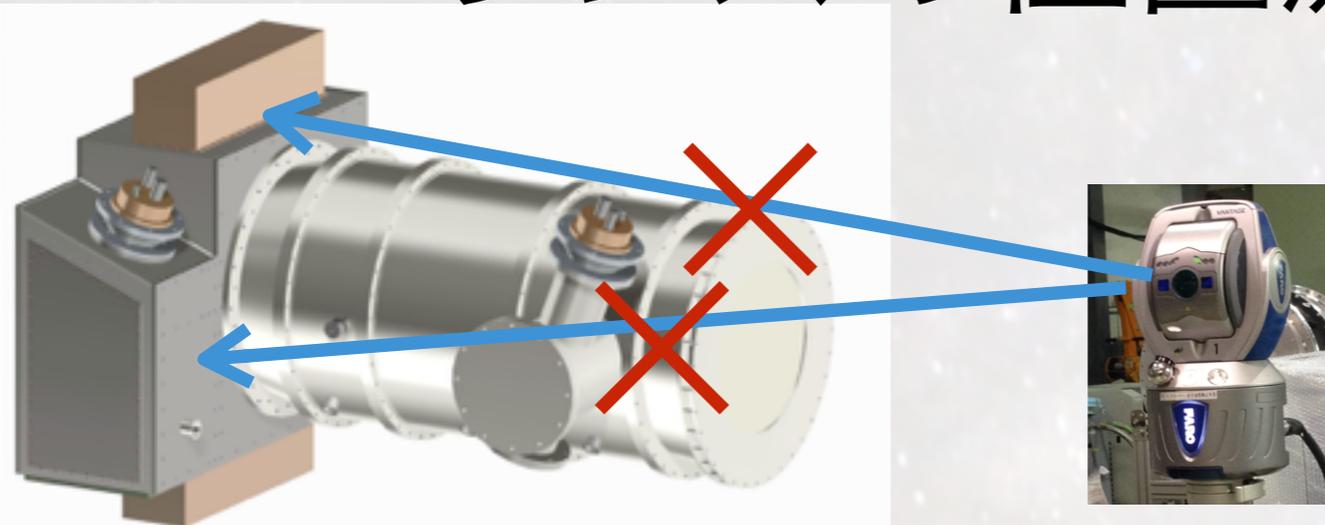
反射球



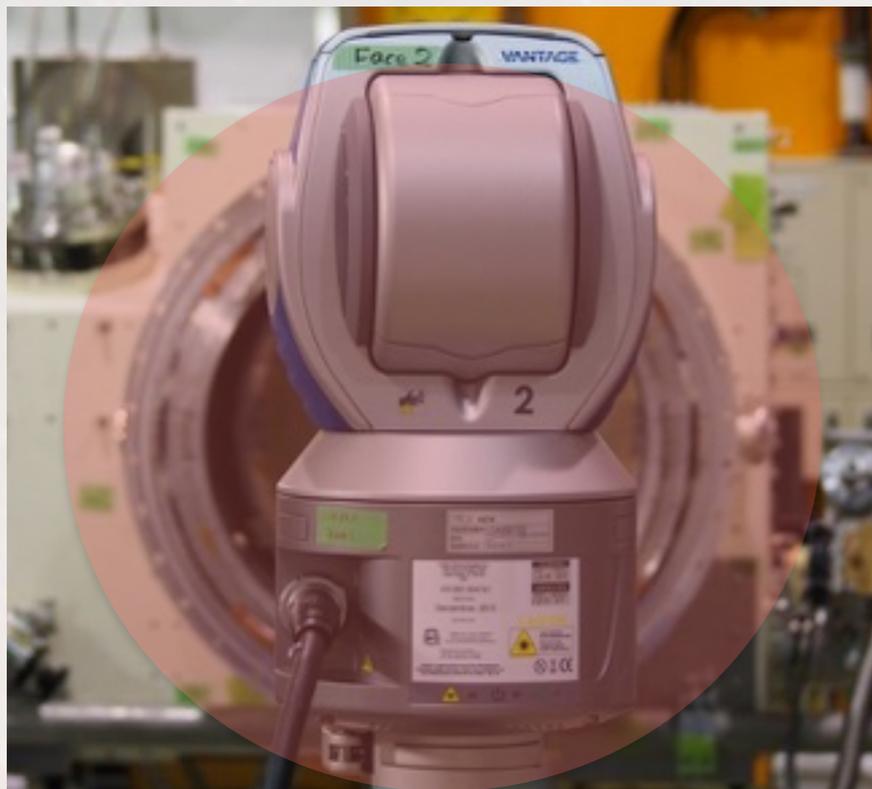
レーザートラッカー

位置と傾きを同時に高い精度で測定

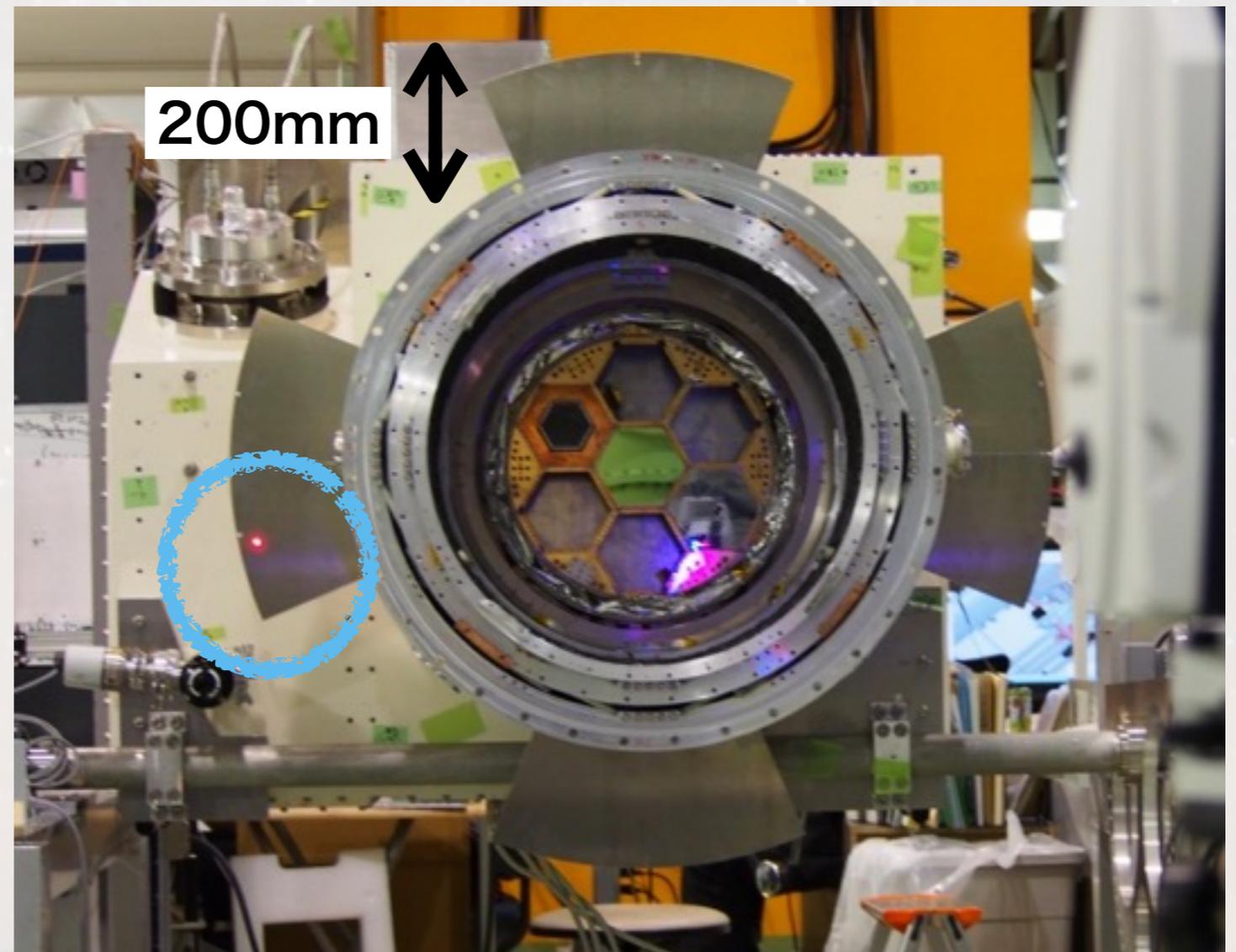
# レンズの位置測定その2



張り出たレシーバー部分に  
基準面が遮られてしまう  
問題がおきた。

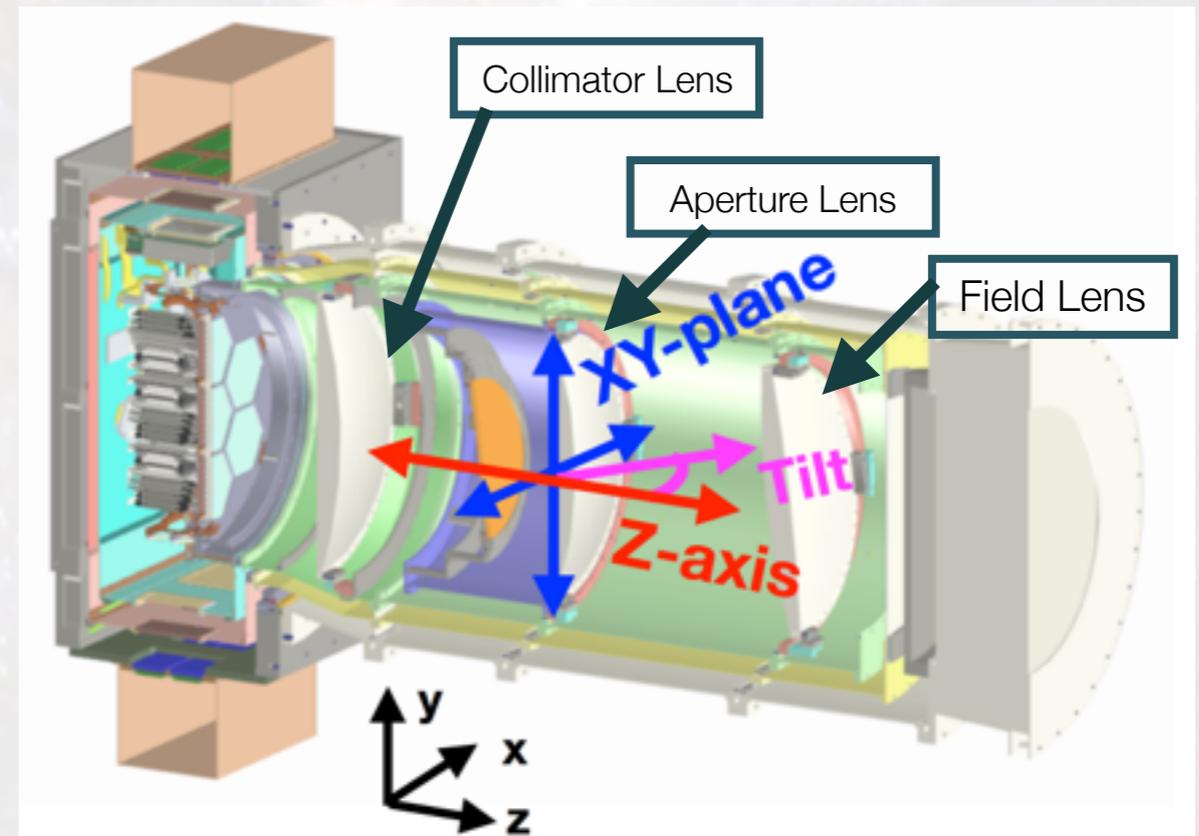


実験室内で測定するために  
耳をつけ補助基準面を作成



# 測定結果

要求値	Z-axis (mm)	XY-plane (mm)	傾き (度)
フィールド	$\pm 9.0$	$\pm 6.0$	$\pm 0.5$
アパチャー	$\pm 9.0$	$\pm 6.0$	$\pm 0.5$
コリメーター	$\pm 9.0$	$\pm 6.0$	$\pm 0.5$



結果	Z-axis (mm)	X-axis (mm)	Y-axis (mm)	傾き (度)
フィールド	$-2.6 \pm 0.2$	$-2.5 \pm 0.2$	$4.4 \pm 0.2$	$0.1 \pm 0.1$
アパチャー	$-0.5 \pm 0.2$	$-1.3 \pm 0.2$	$-0.5 \pm 0.2$	$0.1 \pm 0.1$
コリメーター	$1.5 \pm 0.2$	$0.3 \pm 0.2$	$0.3 \pm 0.2$	$0.4 \pm 0.1$

レンズの位置が許容範囲に入っていることを今回確認した

# まとめ

- ・ 現在、KEKが主体となってPOLARBEAR-2レシーバーの開発を行っている。
- ・ POLARBEAR-2の大型低温光学系の構築をおこなった。
- ・ アライメント評価を行い、十分な角度分解能を満たすことを確認した。

2017年初頭の観測開始を  
目指して準備中

今週、望遠鏡（本体）がヨーロッパからチリに到着。これからサイトへ輸送。

