

# 宇宙マイクロ波背景放射実験 POLARBEARの結果と現状

総合研究大学院大学/KEK

井上 優貴

# OUTLINE

第1部 CMB Science

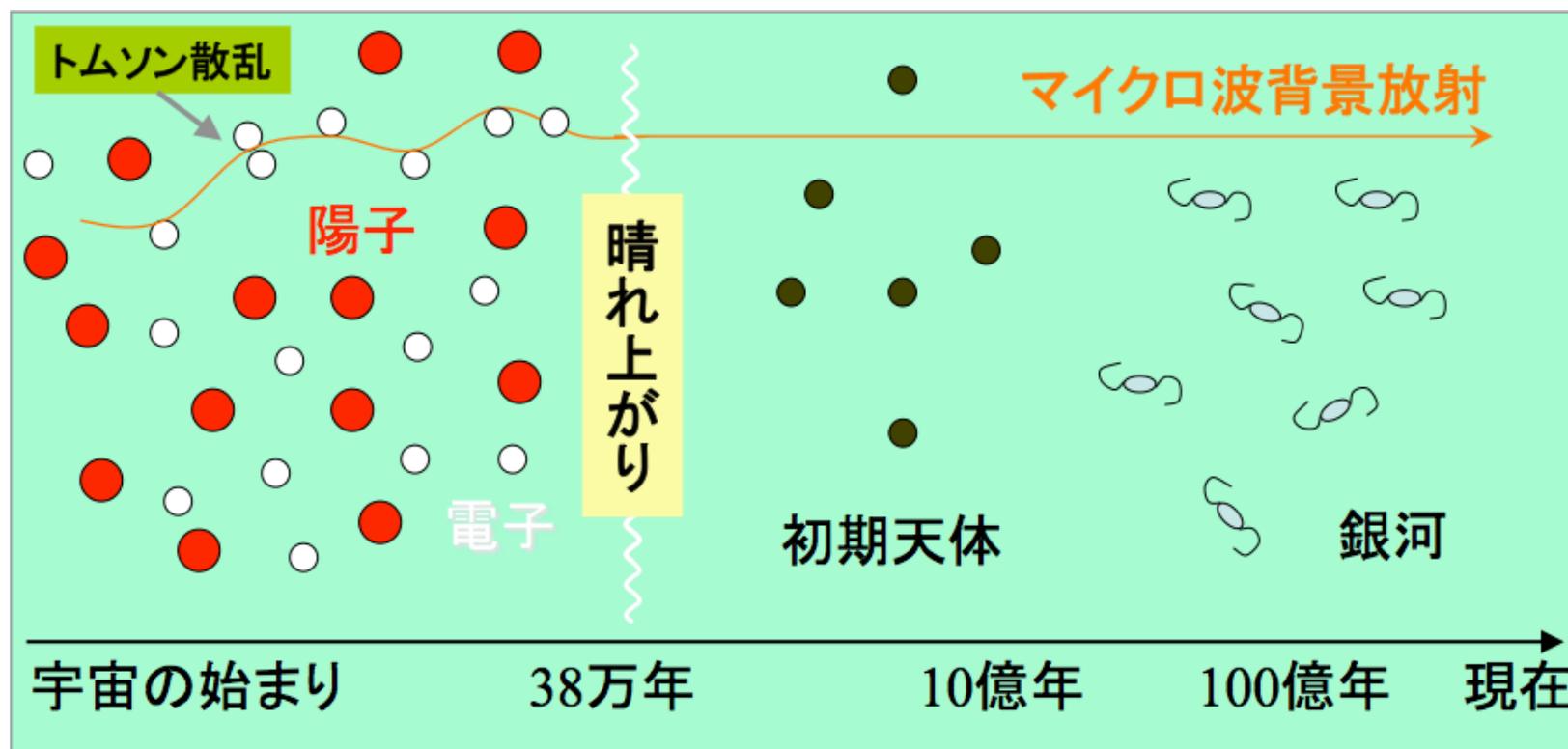
第2部 POLARBEAR-1の結果

第3部 POLARBEAR-2の開発の現状

第4部 重力波長基線共振器を用いた  
弱結合粒子の探索

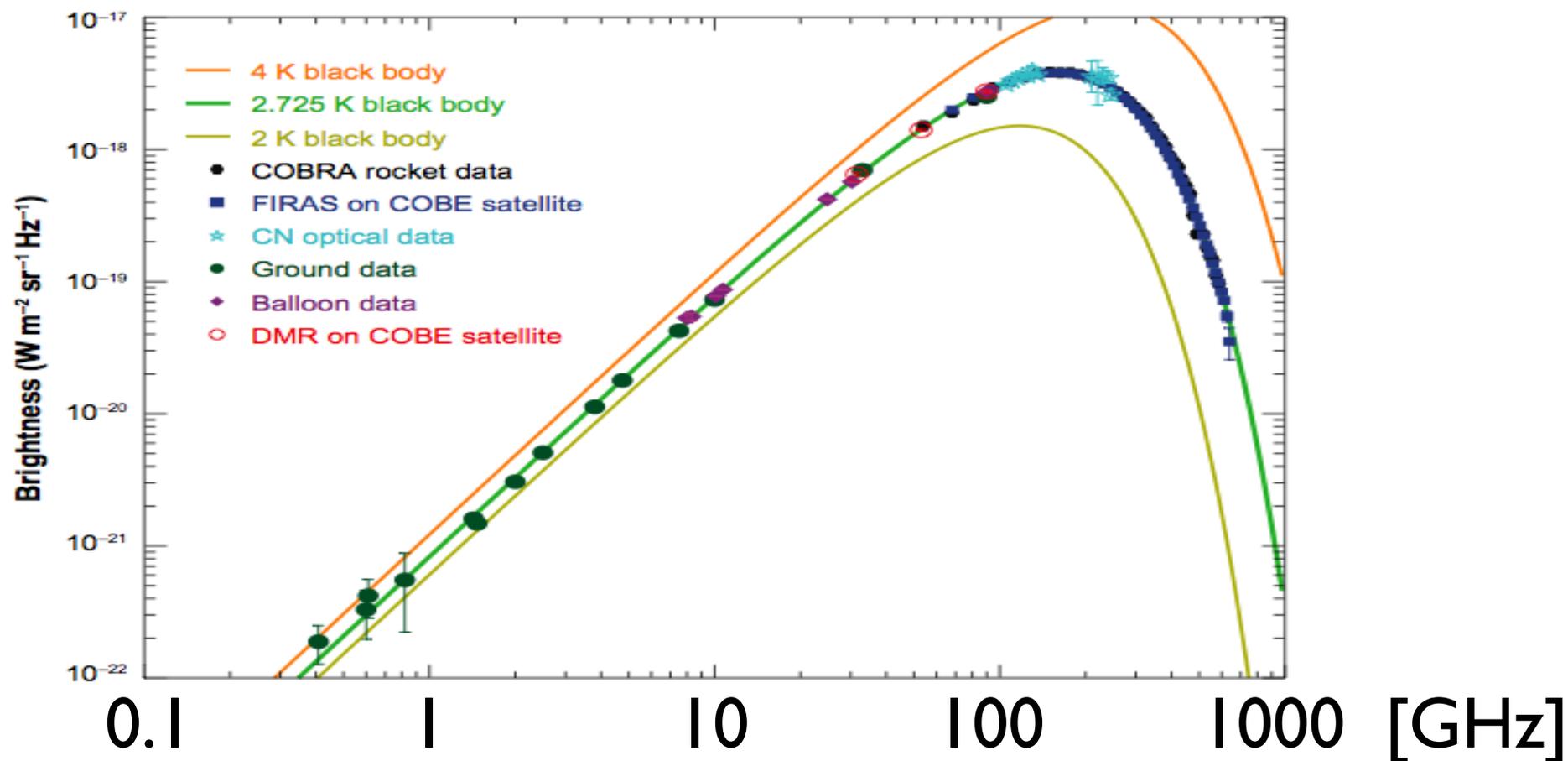
# 第1部 CMB SCIENCE

# 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)



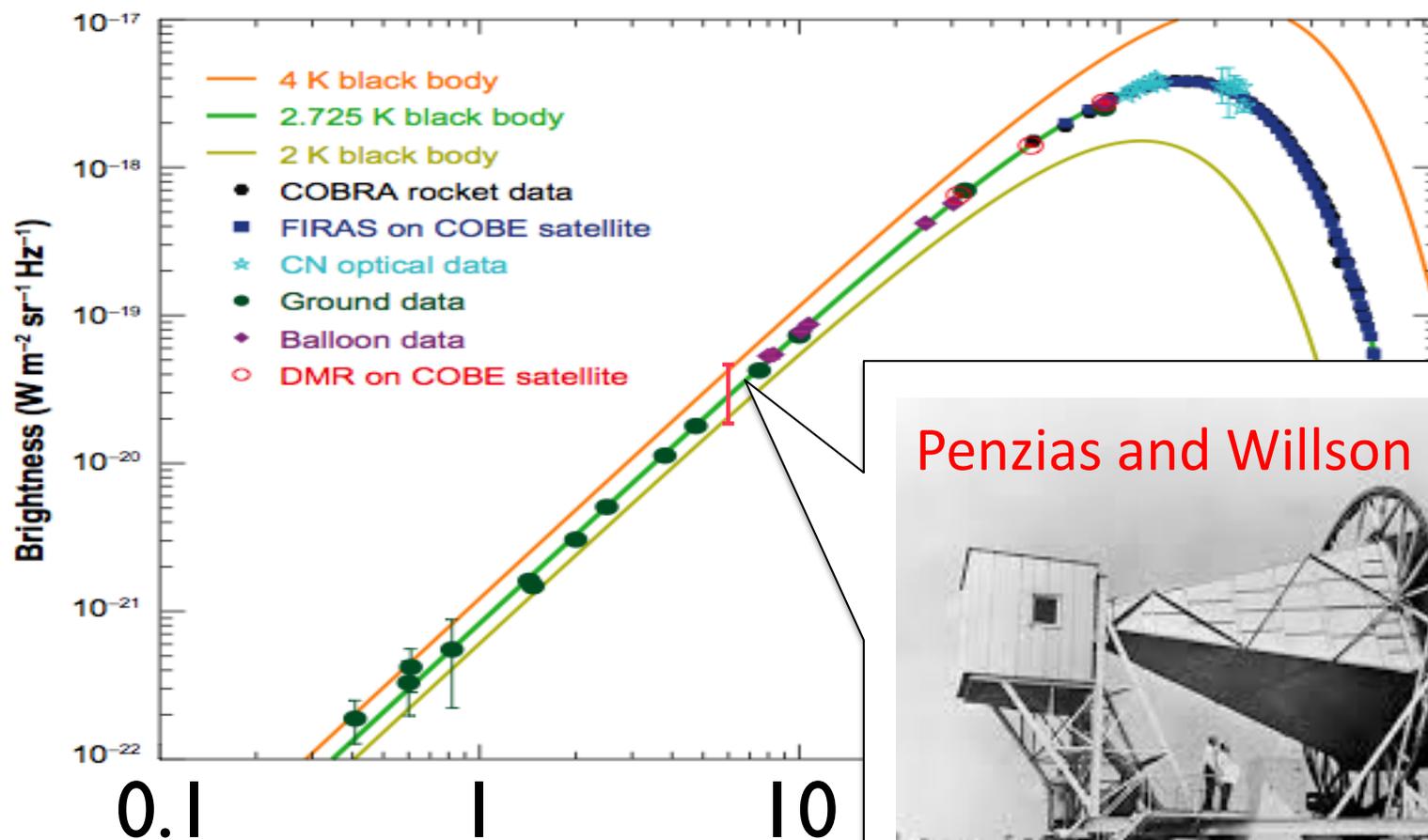
- ビッグバン元素合成期のなごり
- 晴れ上がり時点のスナップショット
  - (約3000Kの黒体放射)

# 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)

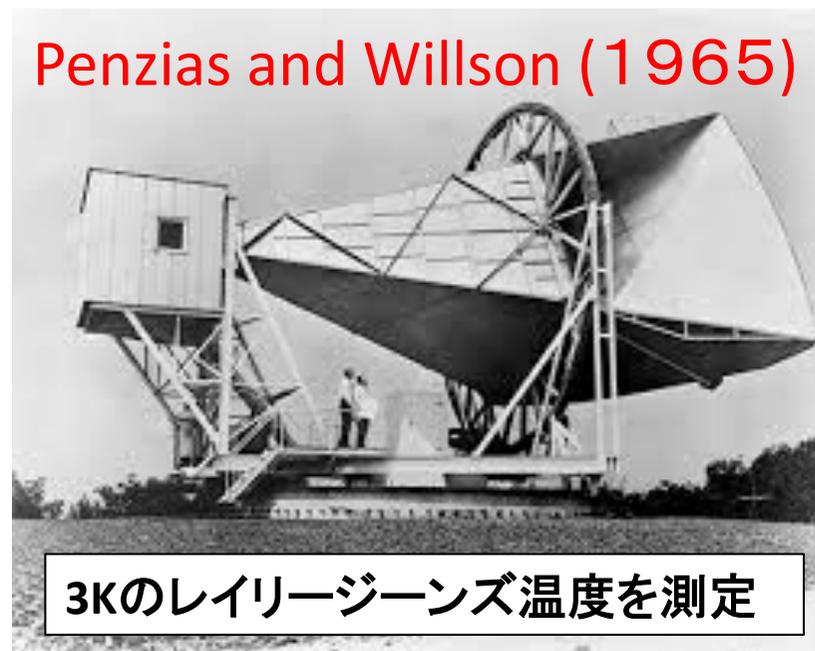


- 晴れ上がり時点のスナップショット
- 現在の温度 = 2.725K (COBE/FIRAS)

# 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)



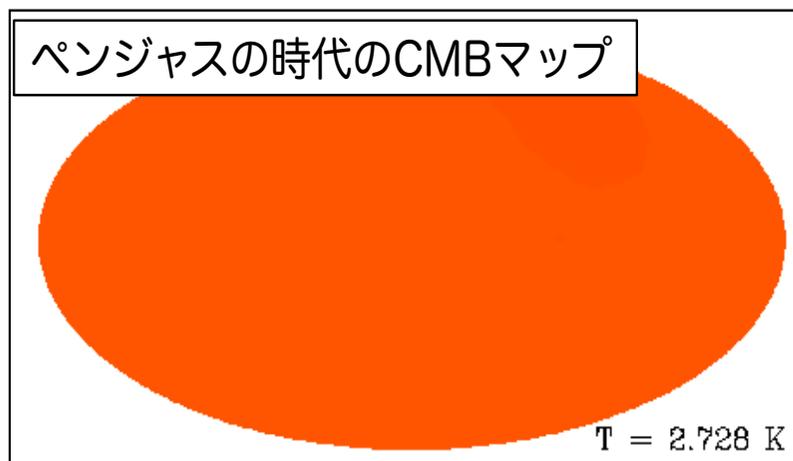
Penzias and Willson (1965)



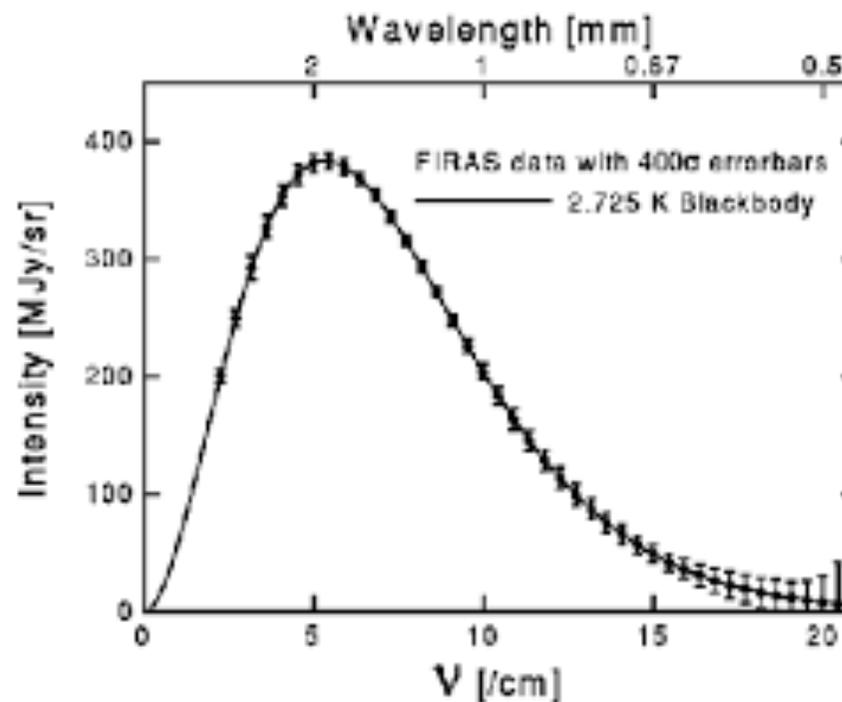
3Kのレイリージーンズ温度を測定

- 晴れ上がり時点のスナップシ
- 現在の温度 = 2.725K (COBE/FIRAS)

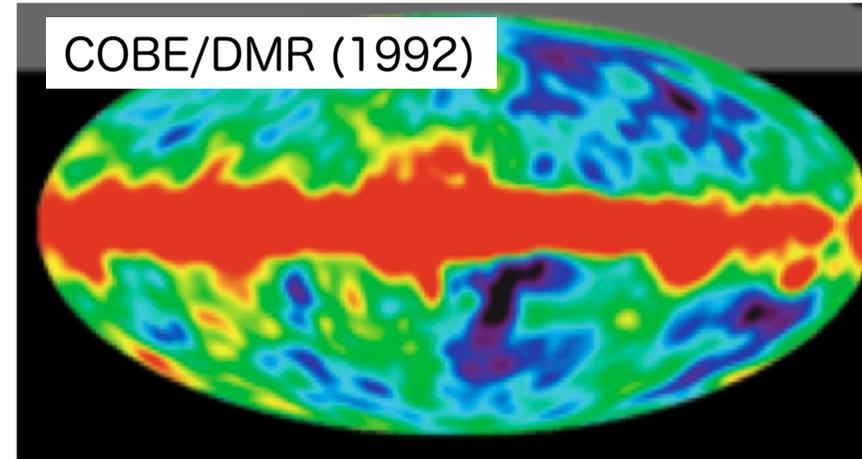
# CMB温度の精密測定



- 晴れ上がり時点のスナップショット
- 現在の温度 = 2.725K (COBE/FIRAS)
- 2.725Kの黒体輻射であることを測定

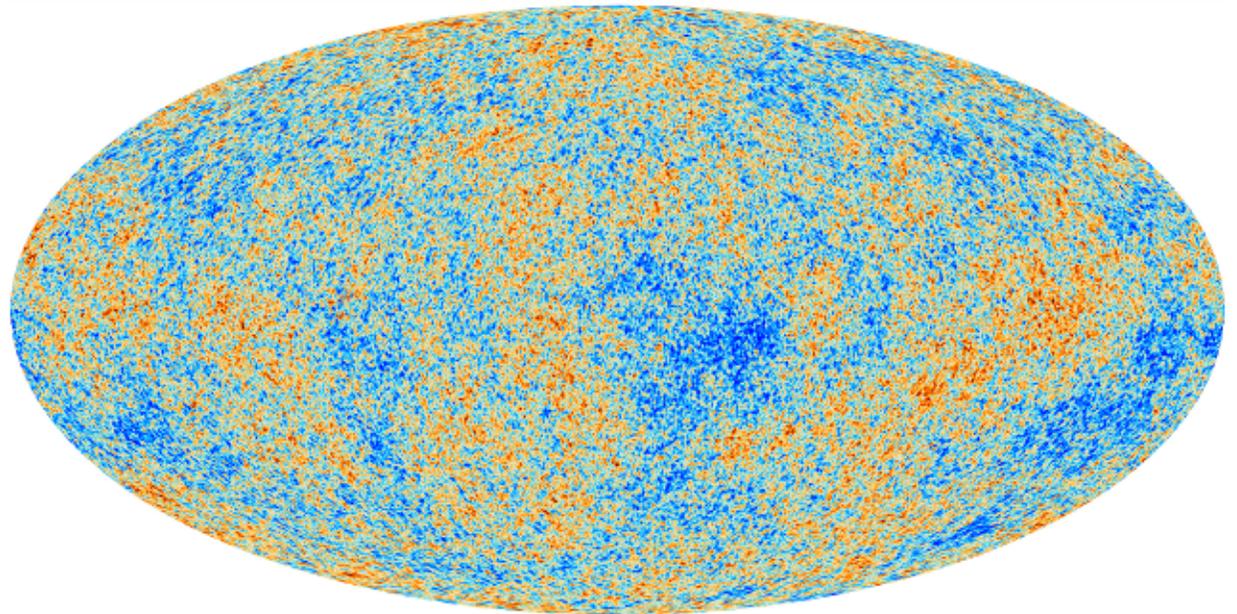
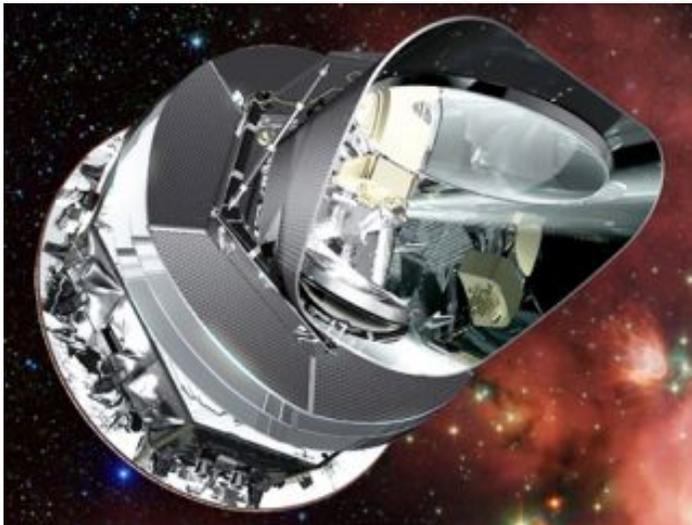


# 揺らぎの測定



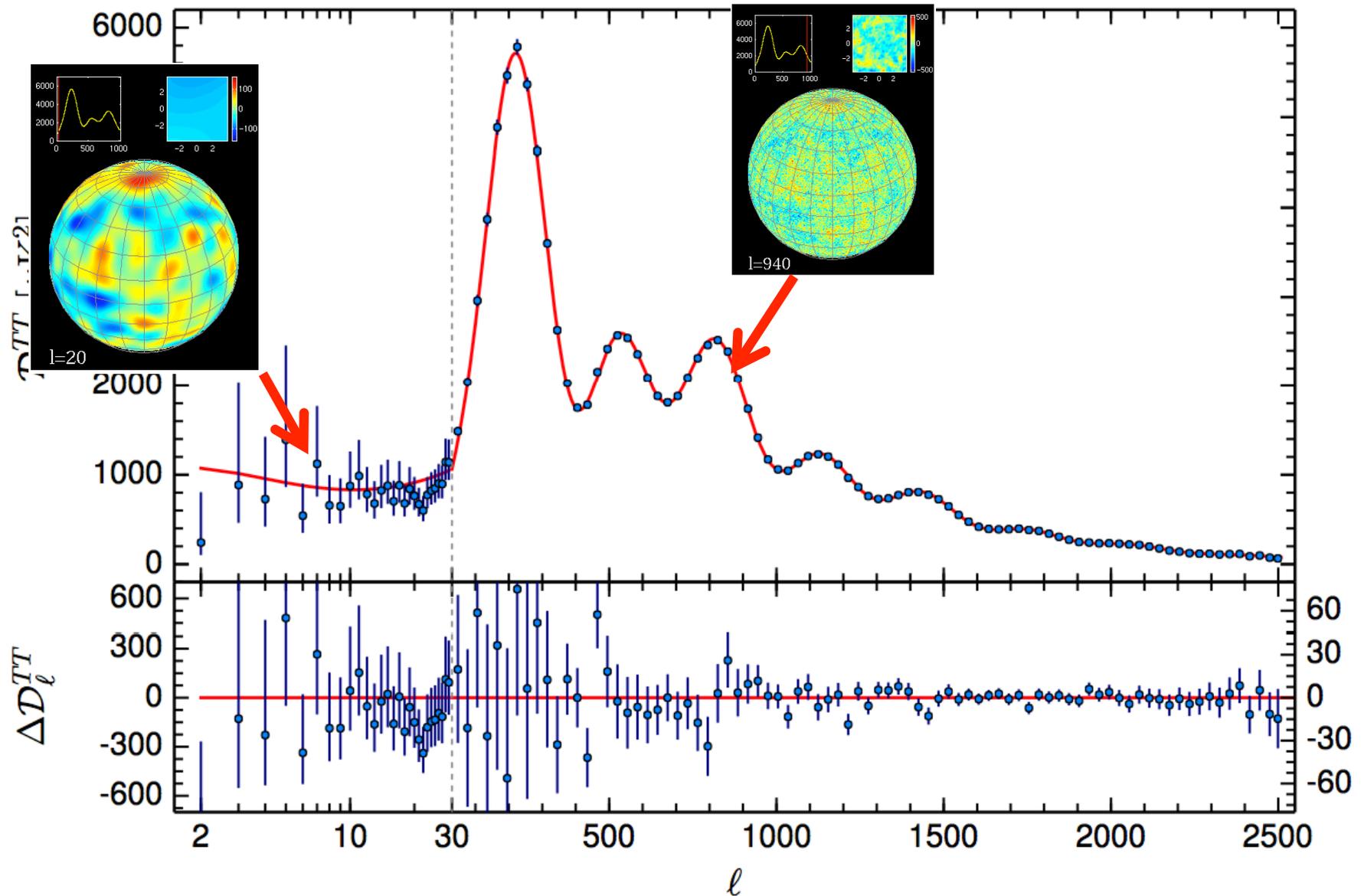
- 晴れ上がり時点のスナップショット
- 現在の温度 = 2.725K (COBE/FIRAS)
- 温度揺らぎ:  $10^{-5}$  (大規模構造=現在の宇宙の種)

# 揺らぎの精密測定(Planck)



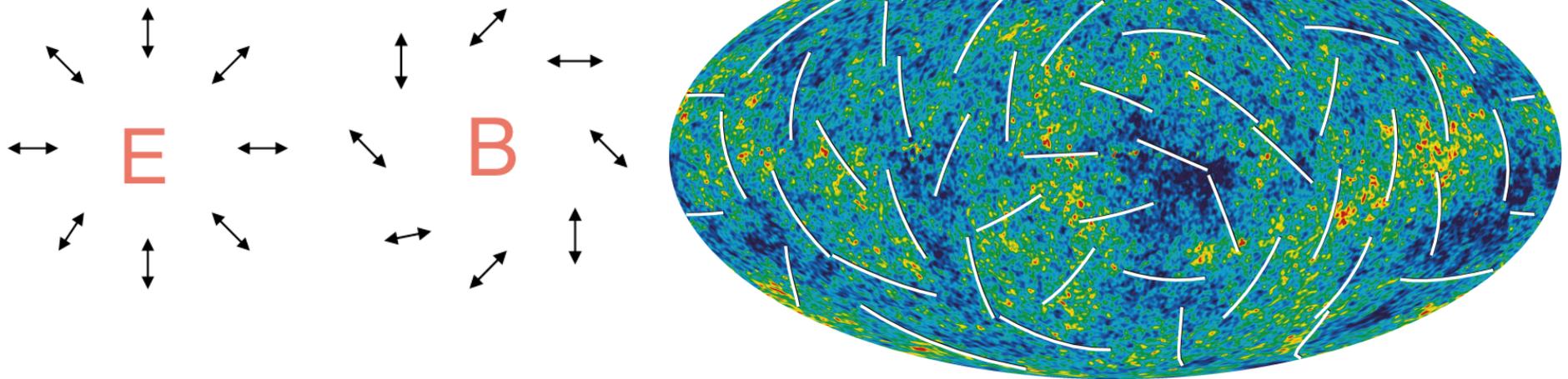
- 宇宙の膨張と共に温度が減少
- 現在の温度 = 2.725K (COBE/FIRAS)
- 温度の異方性 :  $10^{-5}$  (大規模構造=現在の宇宙の種)

# 温度揺らぎのパワースペクトル解析



# CMB偏光

WMAP衛星による偏光マップ



- 晴れ上がり時点のスナップショット
- 現在の温度 = 2.725K (COBE/FIRAS)
- 温度ゆらぎ :  $10^{-5}$  (大規模構造=現在の宇宙の種)
- 直線偏光 (Eモード、Bモード)

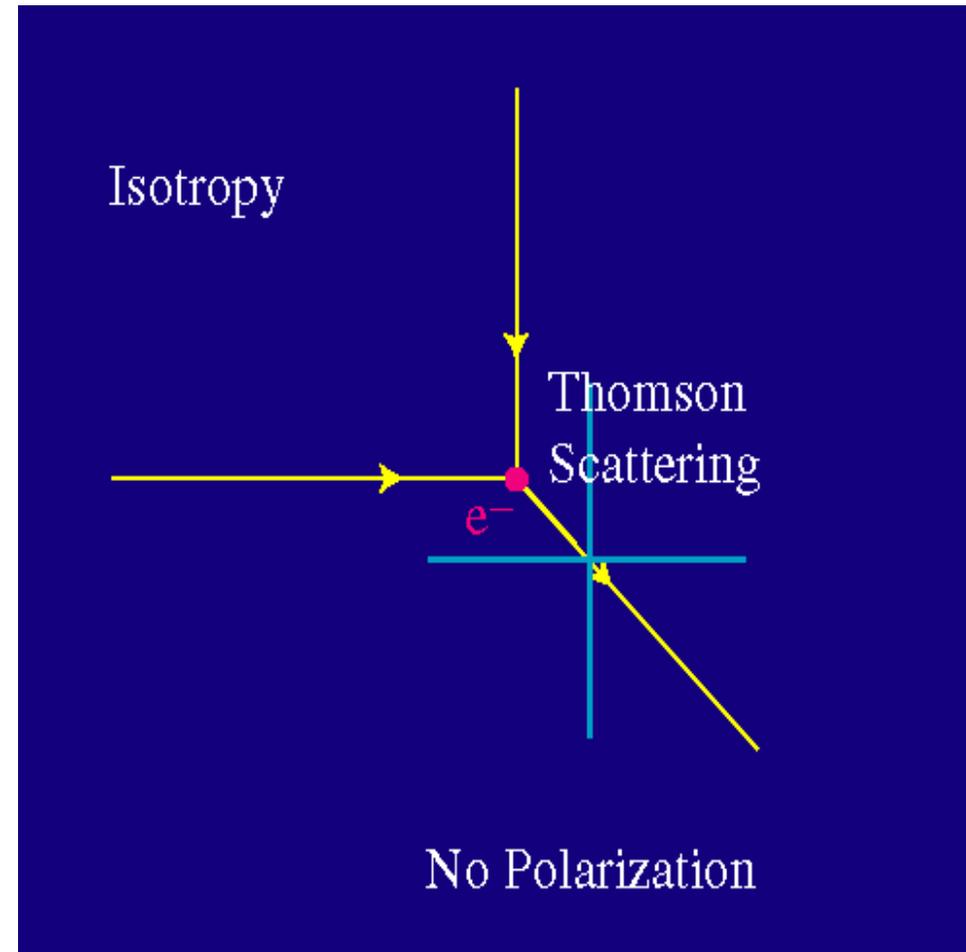
ここ数年のCMB研究の最前線

# CMB偏光について

- CMBは晴れ上がり(直前)の電子との散乱により直線偏光している。

$$\frac{d\sigma_T}{d\Omega} \propto |\hat{\epsilon} \cdot \hat{\epsilon}'|^2$$

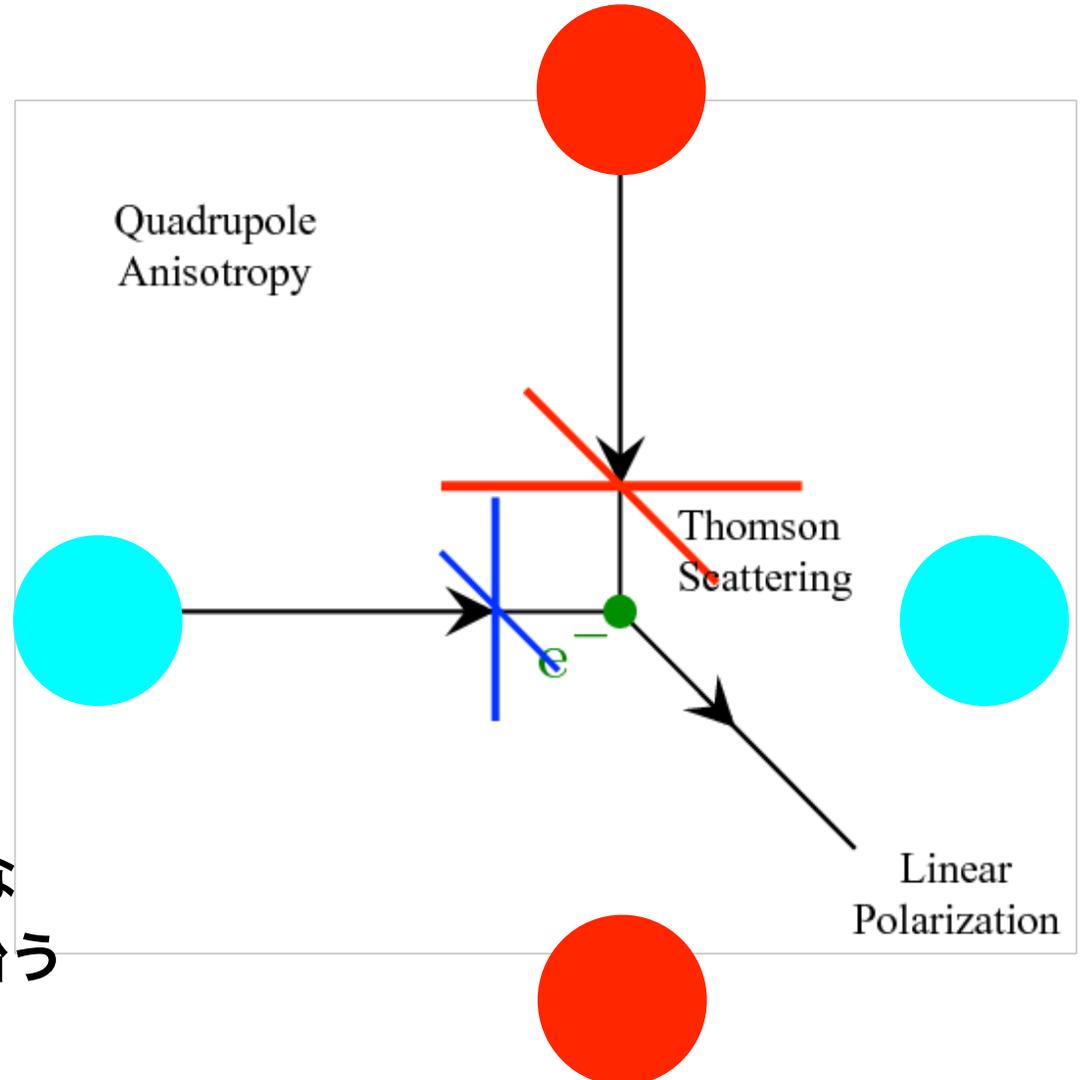
- しかし、どの方向からも同じ温度のCMBが入射して来ると、正味の偏光は0になる。



# CMB偏光について

- (4重極の)温度揺らぎがあると、観測にかかる偏光成分が残る。

偏光の由来は  
トムソン散乱  
+ 温度揺らぎ



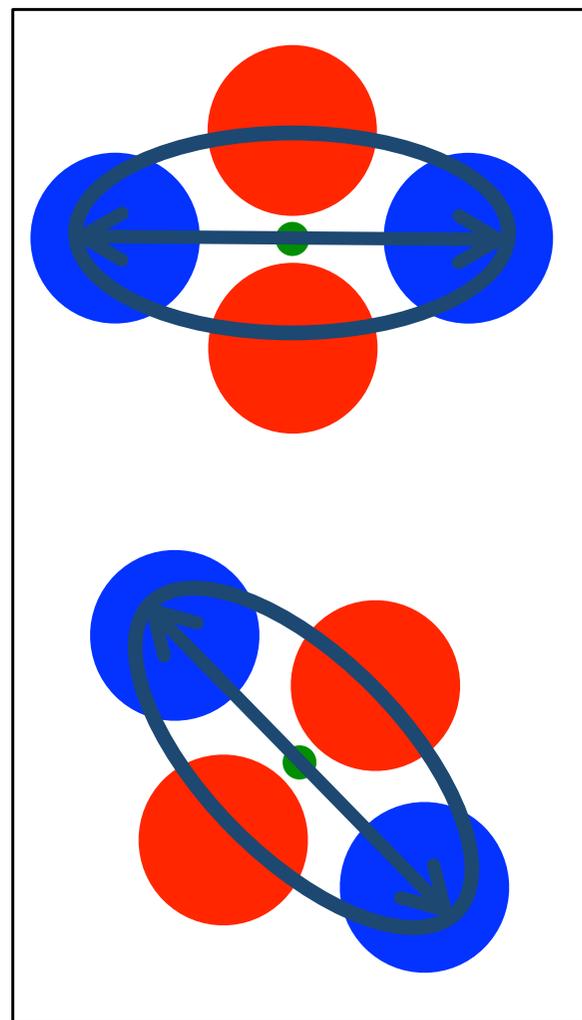
偏光マップを理解するのに便利な  
ルール：偏光の向きは”熱い”に沿う

# 温度揺らぎの起源は？

- 温度揺らぎの起源は、
    - 密度揺らぎ と
    - 原始重力波
  - > 時空 (メトリック)のゆらぎ
    - 空間が伸びる -> 赤方偏移 -> 冷たい
    - 空間が縮む -> 青方偏移 -> 熱い
- 四重極揺らぎを生成

二つの起源は分離可能か？

**YES !**



# 偏光のパターンが違う！

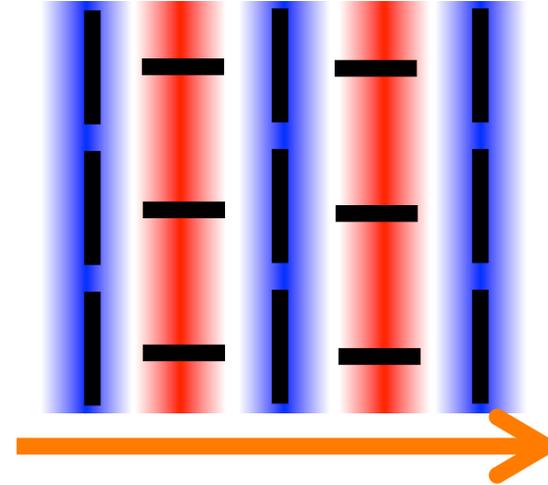
- パターンには2種類ある

## 密度揺らぎの場合

- 偏光の向きがゆらぎの進行方向に対して**垂直**か**平行**。

## 密度揺らぎの場合

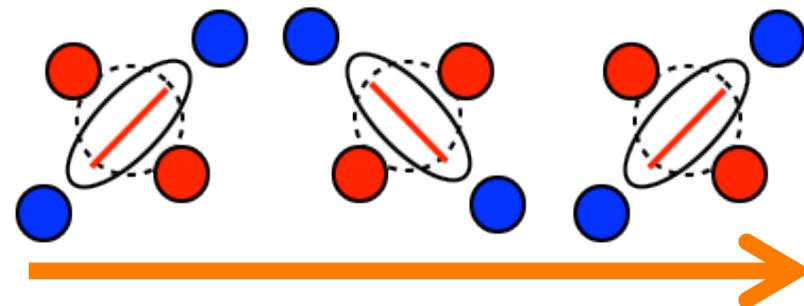
冷 熱 冷 熱 冷



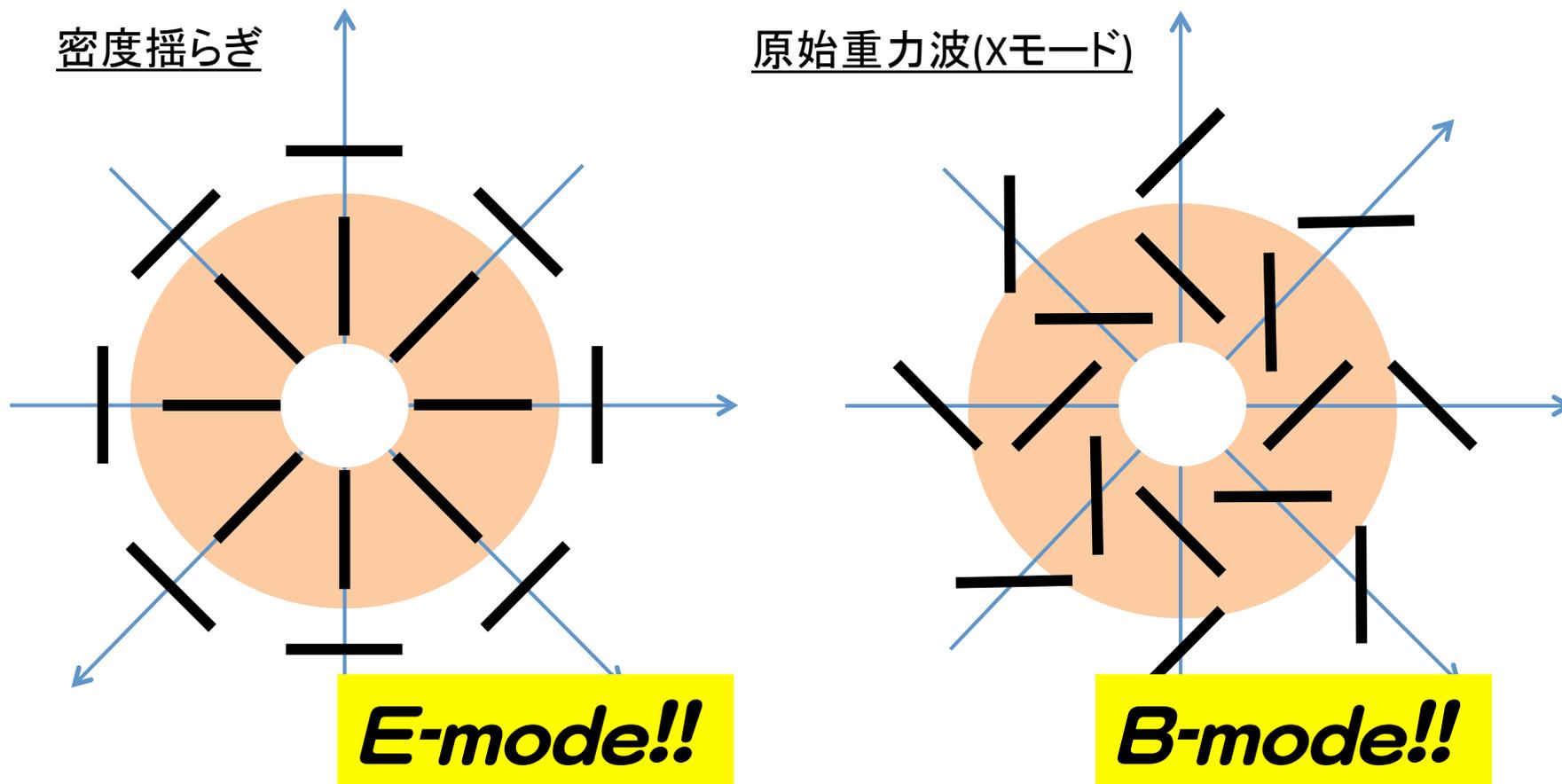
## 重力波(xモード)の場合

- 偏光の向きがゆらぎ(重力波)の進行方向に対して**45度傾いている**。

## 原始重力波の場合



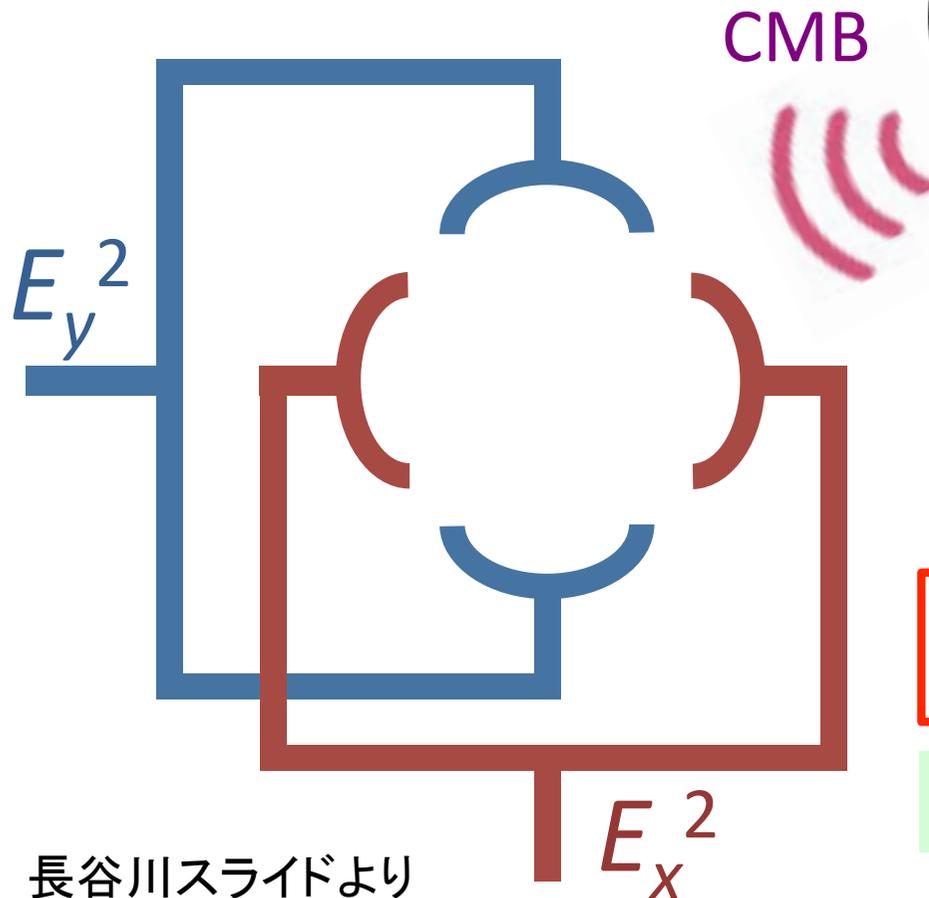
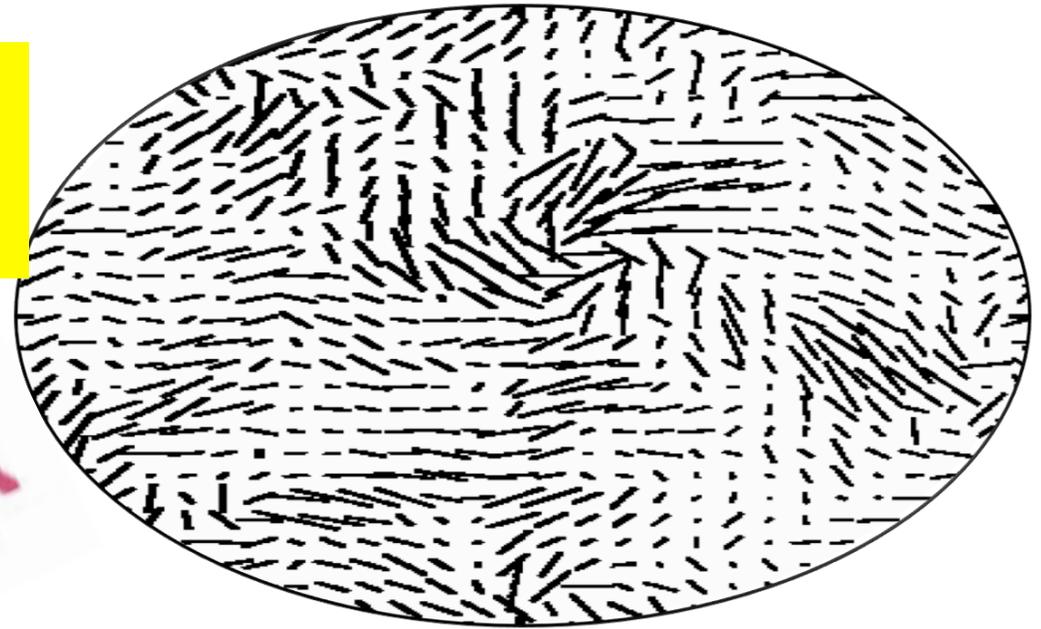
# 様々な方向の揺らぎが重なると



**偏光Bモードを通して原始重力波を検出出来る！**

# CMB偏光実験のアプローチ

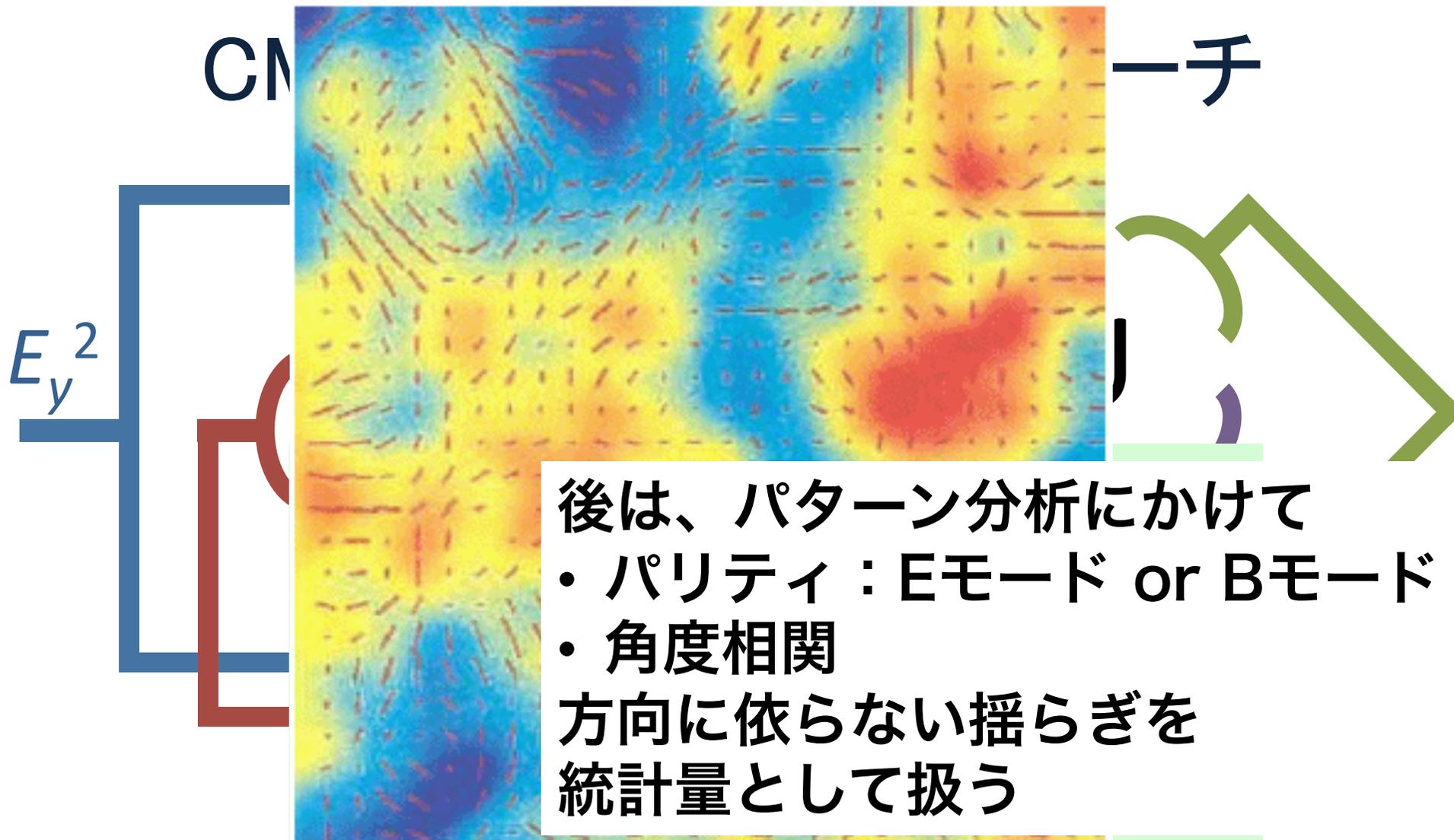
直交したアンテナで  
直線偏光を測定



無偏光成分： $E_x^2 + E_y^2$

偏光成分： $E_x^2 - E_y^2$

これだけじゃ向きはわからない



後は、パターン分析にかけて

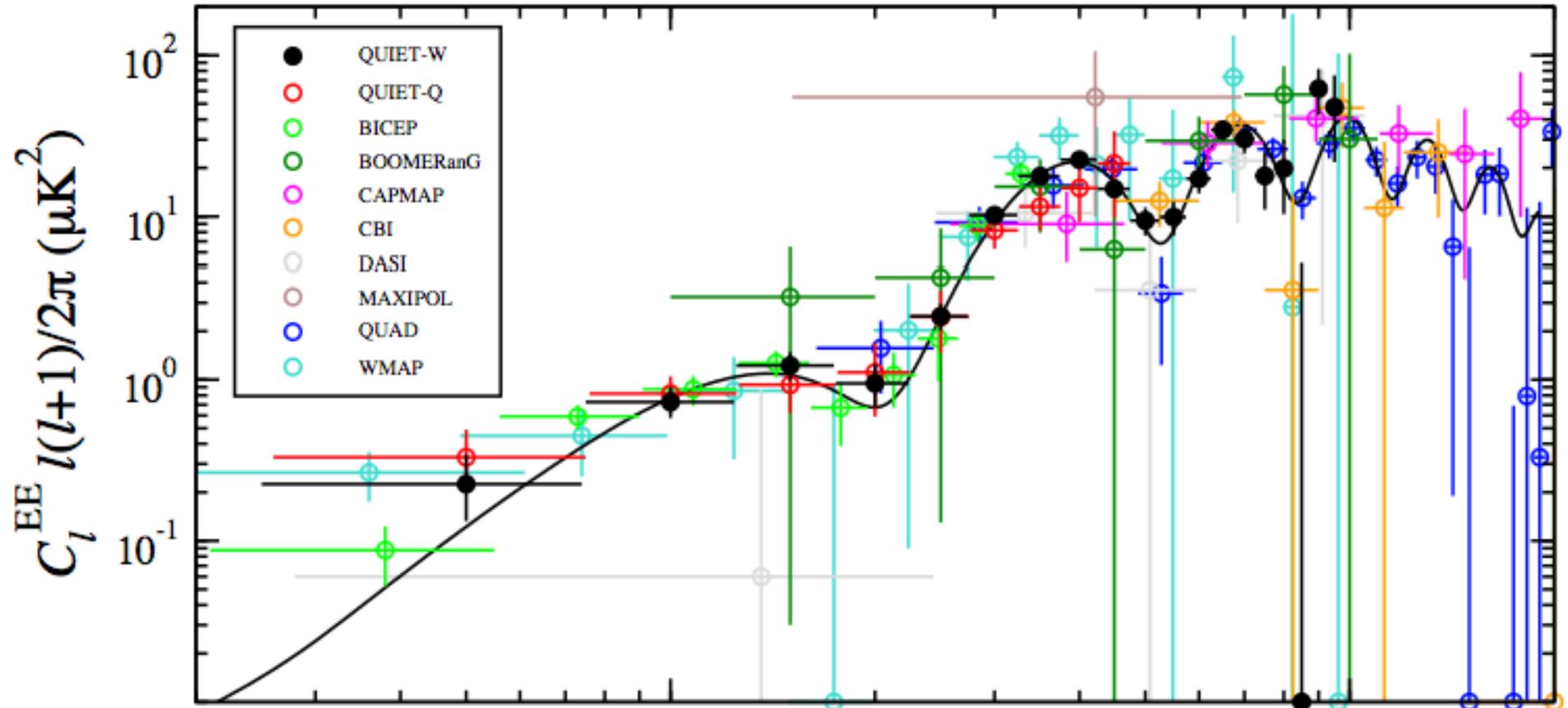
- パリティ：Eモード or Bモード
- 角度相関

方向に依らない揺らぎを統計量として扱う

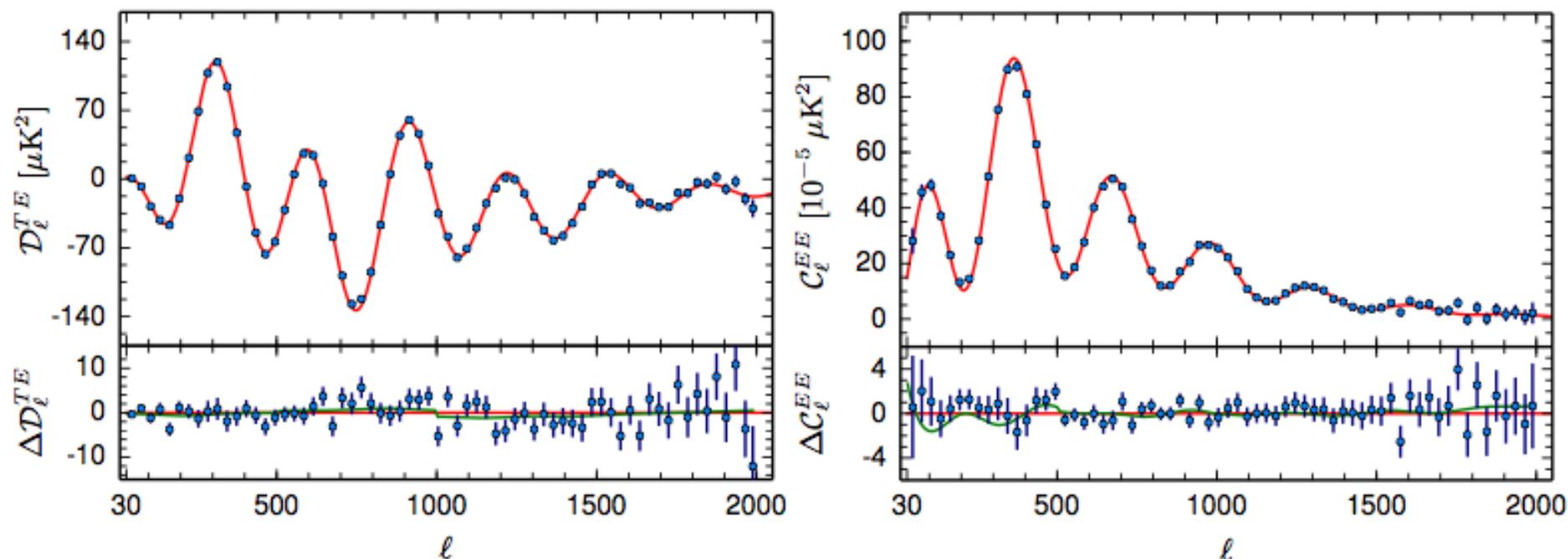
→ 偏光強度分布図ができる。

$$= 2 E_x E_y$$

# E-mode(4年前)



# E-mode偏光観測の現状(Planck)



Planck 2015の進展

初めて、Polarizationの全天Mapの結果が入った解析

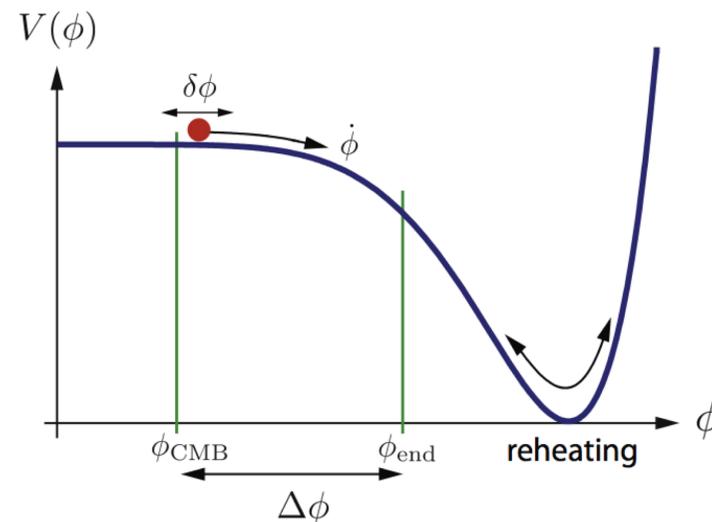
# インフレーションエネルギーの決定

インフレーションポテンシャル( $V$ )が大きい程強い原始重力波を放出 → より明瞭な偏光Bモードを生成

- $B$ モードの明瞭さの度合いを" $r$ "と書くと

$$V^{1/4} = 1.06 \times 10^{16} \times (r/0.01)^{1/4} \text{ GeV}$$

- $r=0.2$  (BICEP2の中心値)  
→  $2 \times 10^{16} \text{ GeV}$



# インフレーションエネルギーの決定

インフレーションポテンシャル( $V$ )が大きい程強い原始重力波を放出 → より明瞭な偏光Bモードを生成

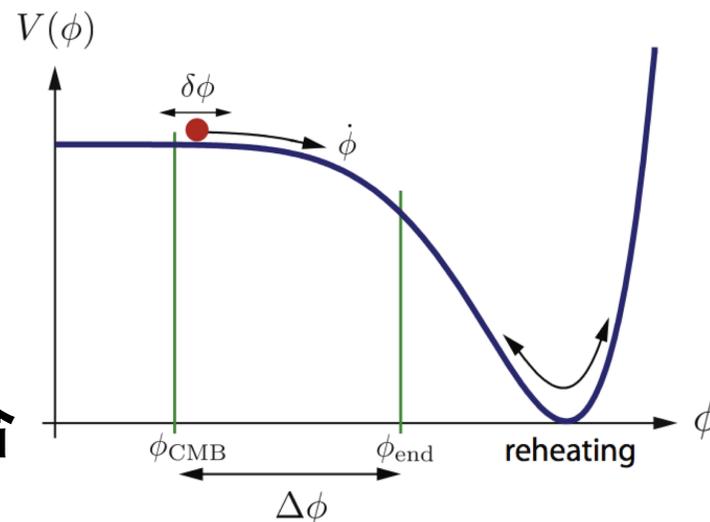
- $B$ モードの明瞭さの度合いを" $r$ "と書くと

$$V^{1/4} = 1.06 \times 10^{16} \times (r/0.01)^{1/4} \text{ GeV}$$

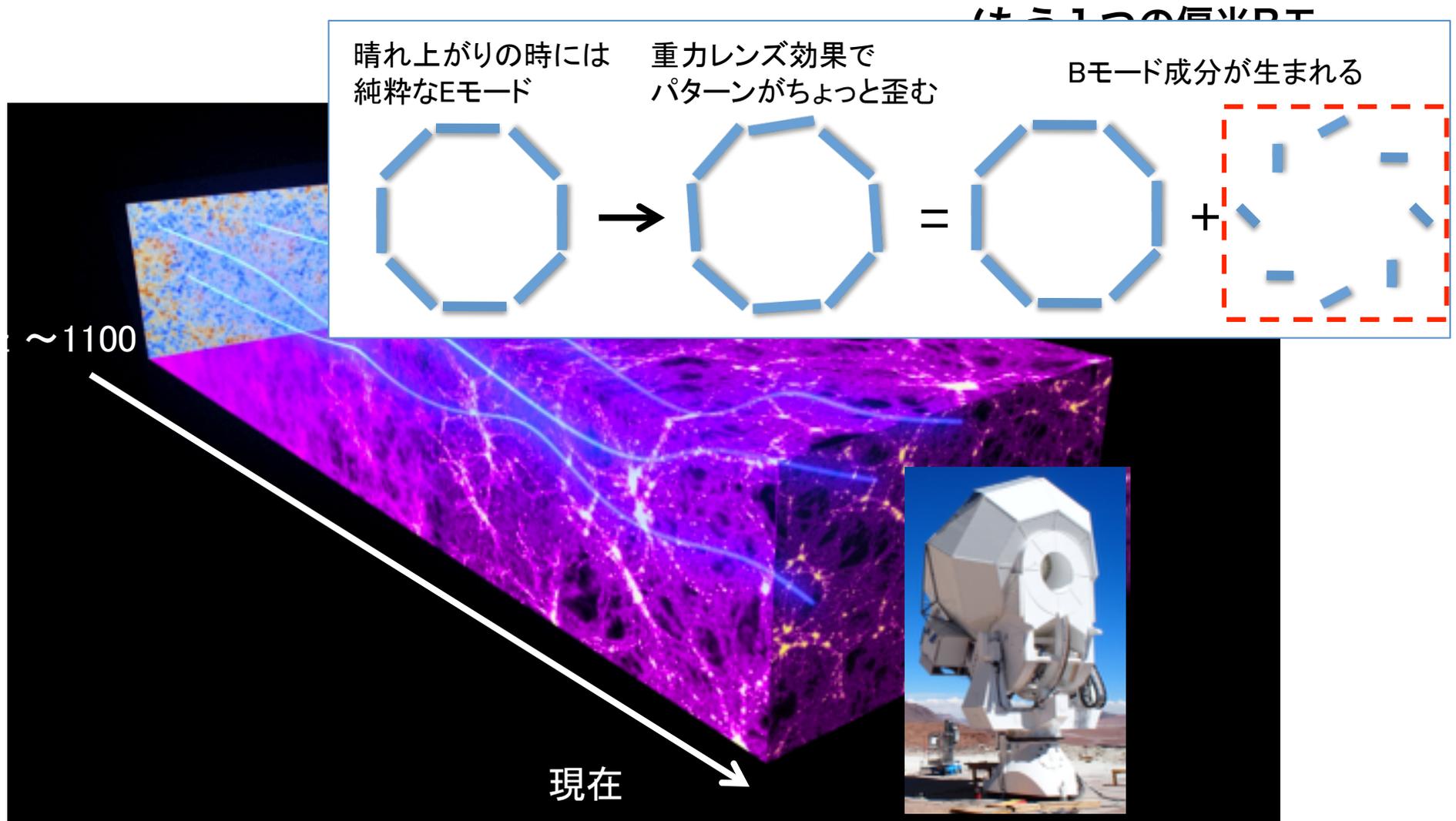
- (もし)  $B$ モードが見つからない場合  
→ エネルギーの上限値を得る

場合によっては我々の宇宙はGUTを経験していないかもしれない...

( $r \sim 0.01$ まで探索出来るとlarge fieldはほぼ棄却可能 by 小玉さん)



# 重力レンズBモード



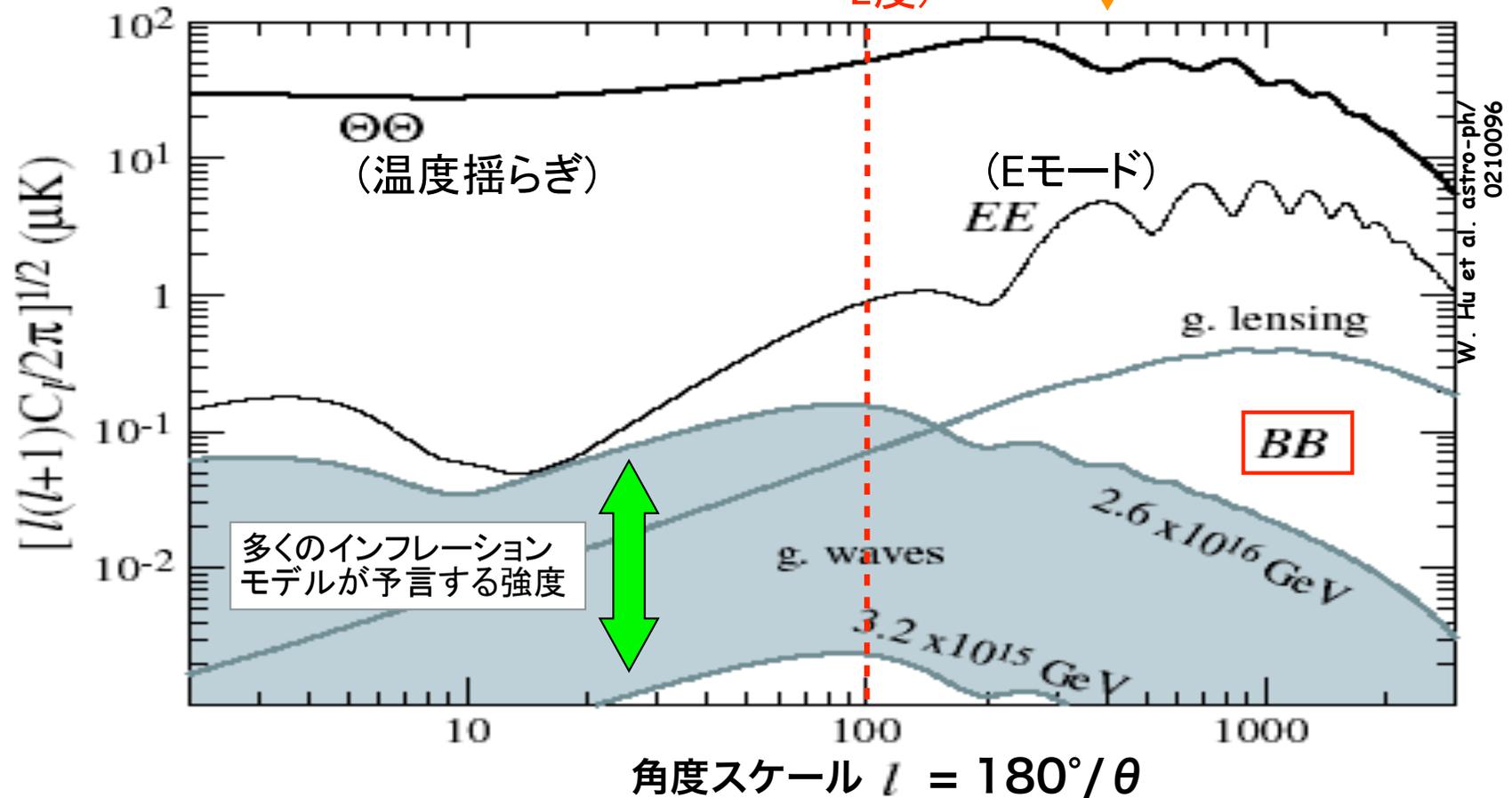
重力レンズ効果によってE-modeから転写したBモード偏光パターンが生成

# Bモードパワースペクトル

月の視直径( $\sim 0.5^\circ$ )

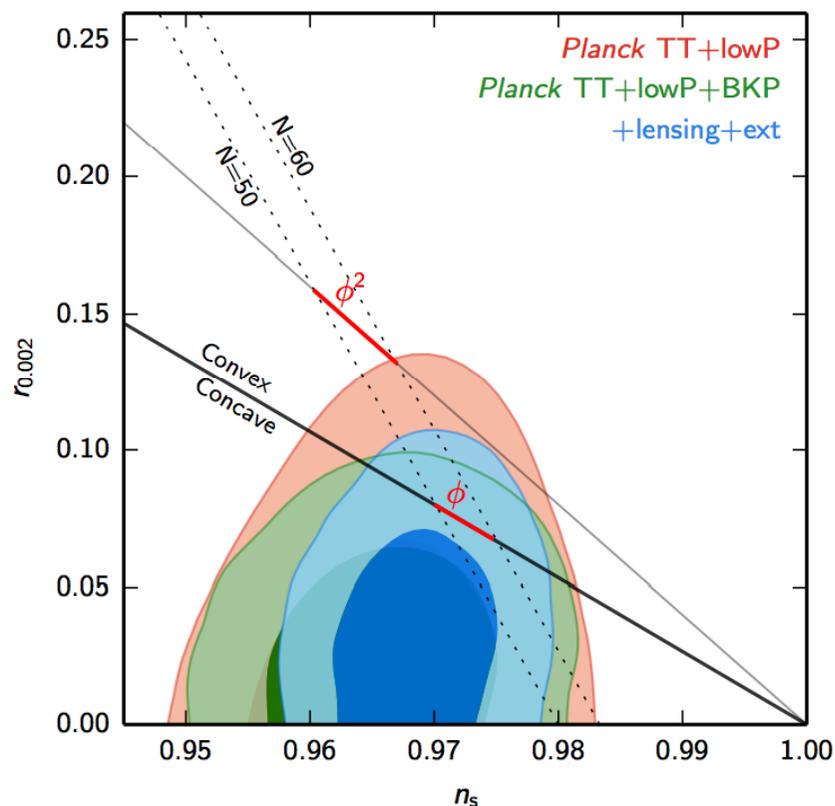
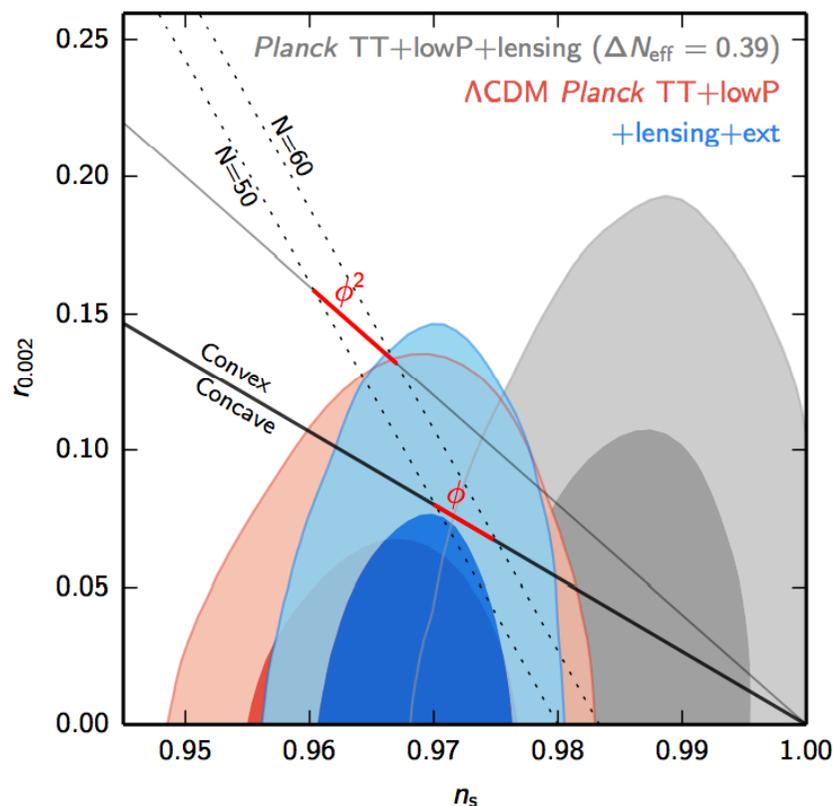
$\sim 2^\circ$ )

偏光パターンの強度



- 偏光Bモードの強度:  $\sim 100\text{nK}$ 以下 (Eモードの $\sim 1/10$ 以下)
- B-mode peak:  $\sim 2^\circ \rightarrow$  地上実験でも十分探索可能。

# Planck result (2015)



$$n_s = 0.9655 \pm 0.0062,$$

*Planck* TT+lowP.

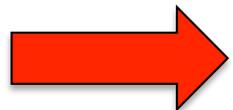
$$r_{0.002} < 0.08, \quad \textit{Planck} \text{ TT+lowP+BKP},$$

偏光+Bモードを考慮に入れた解析結果！

## 第2部 POLARBEAR-1実験の結果

# POLARBEAR project

- Ground-based cosmic microwave background (CMB) polarization experiment in Atacama desert, Chile.
- Measure the odd-parity polarization pattern (B-mode).
- Origins of B-mode are **inflationary gravitational waves** and **gravitational lensing effect**.

 “**Inflation**” and “**Neutrino masses**”

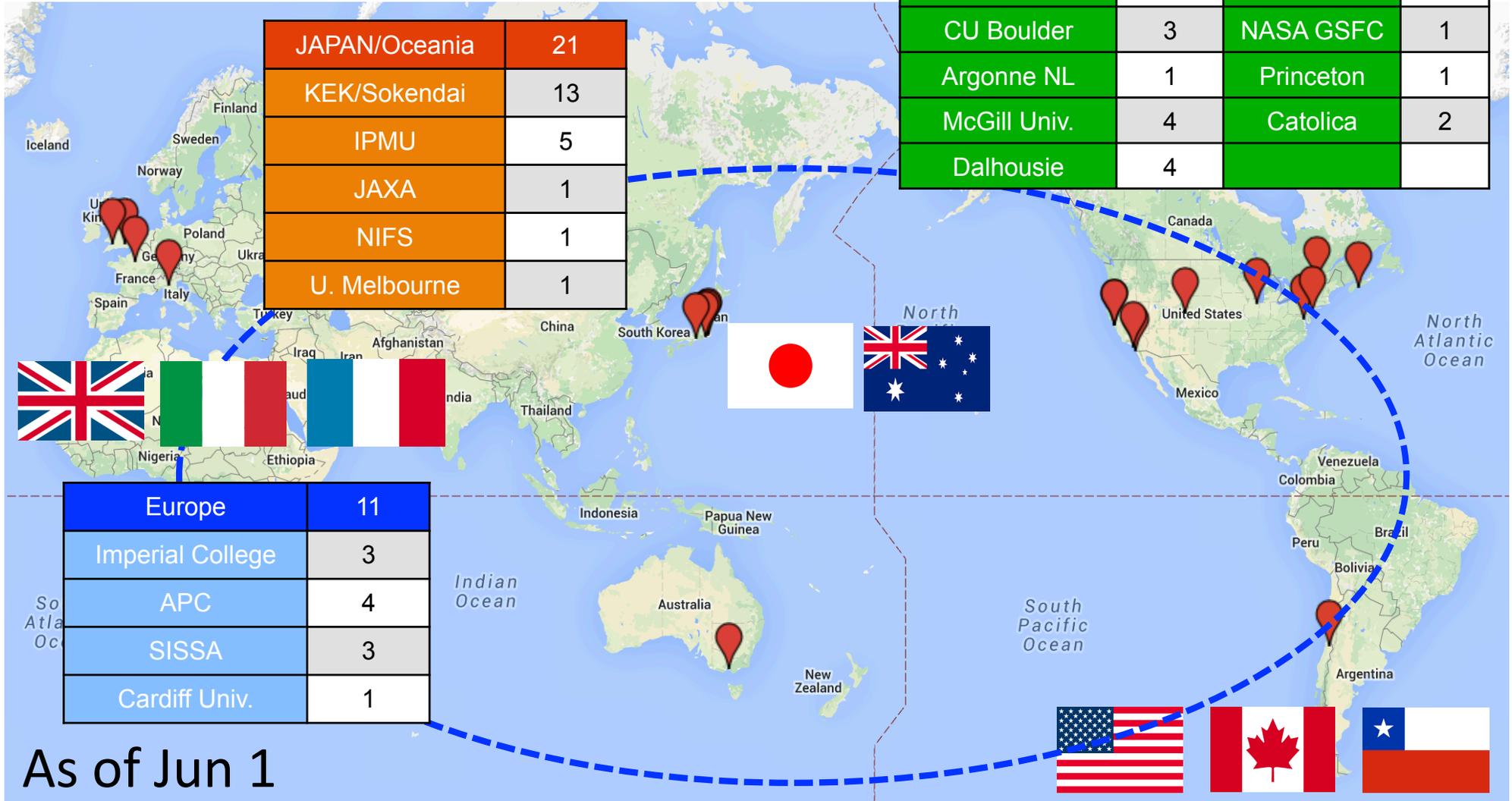
# POLARBEAR Collaboration

Americas	65		
UC Berkeley	22	LBL	5
UC San Diego	21	UC Irvine	1
CU Boulder	3	NASA GSFC	1
Argonne NL	1	Princeton	1
McGill Univ.	4	Catolica	2
Dalhousie	4		

JAPAN/Oceania	21
KEK/Sokendai	13
IPMU	5
JAXA	1
NIFS	1
U. Melbourne	1

Europe	11
Imperial College	3
APC	4
SISSA	3
Cardiff Univ.	1

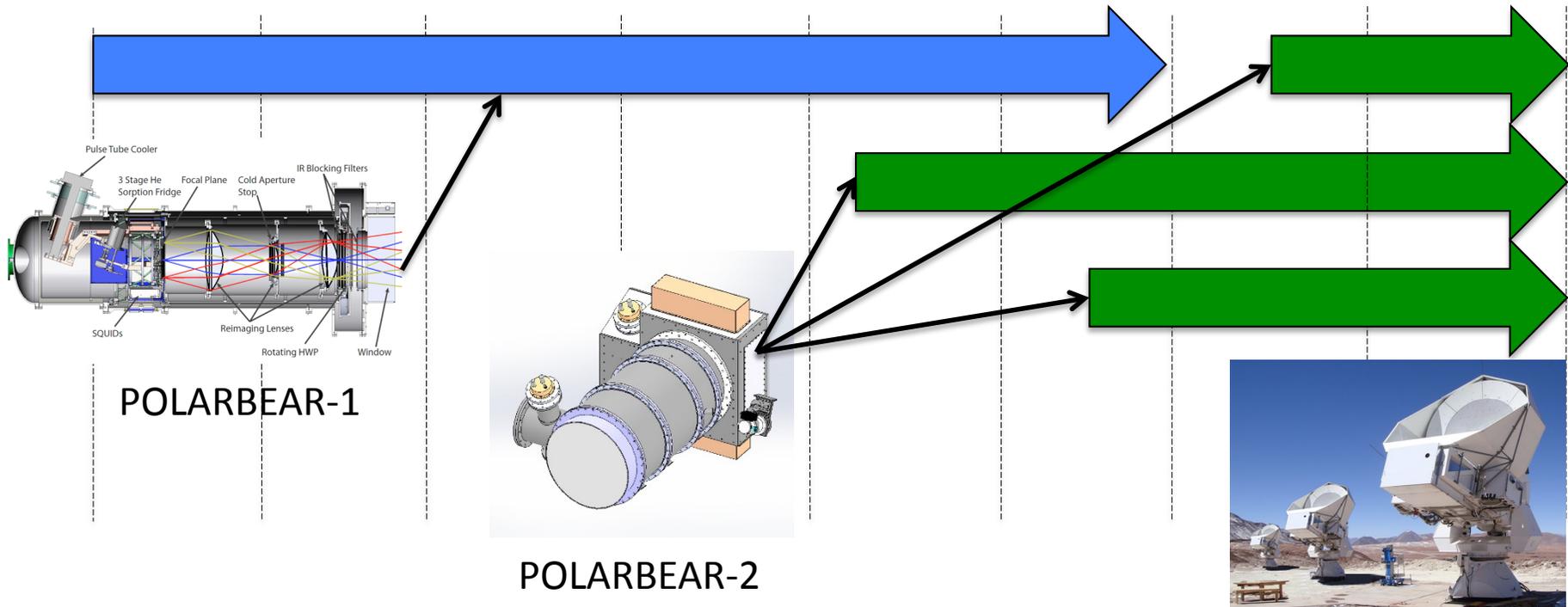
As of Jun 1



8 countries, 20 institutes, 97 researchers

# Timeline of POLARBEAR project

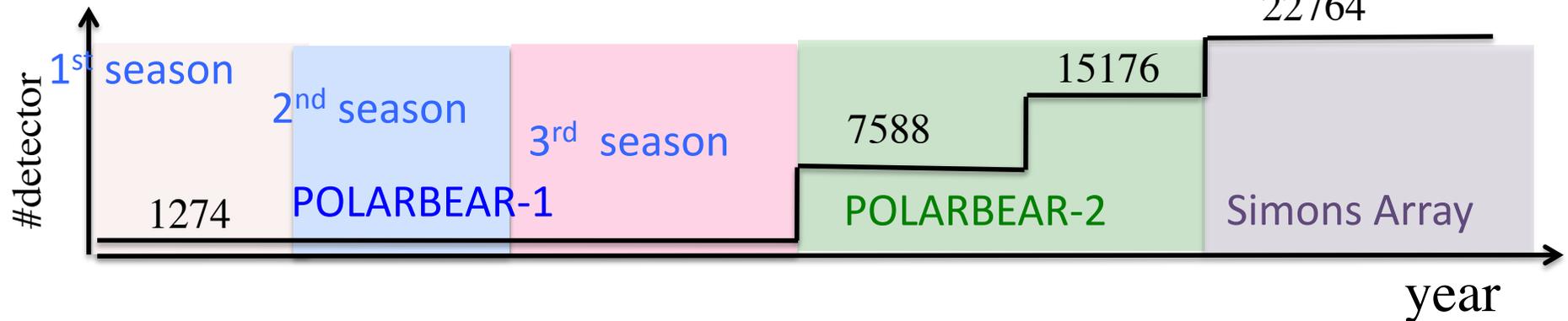
2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020



POLARBEAR-1

POLARBEAR-2

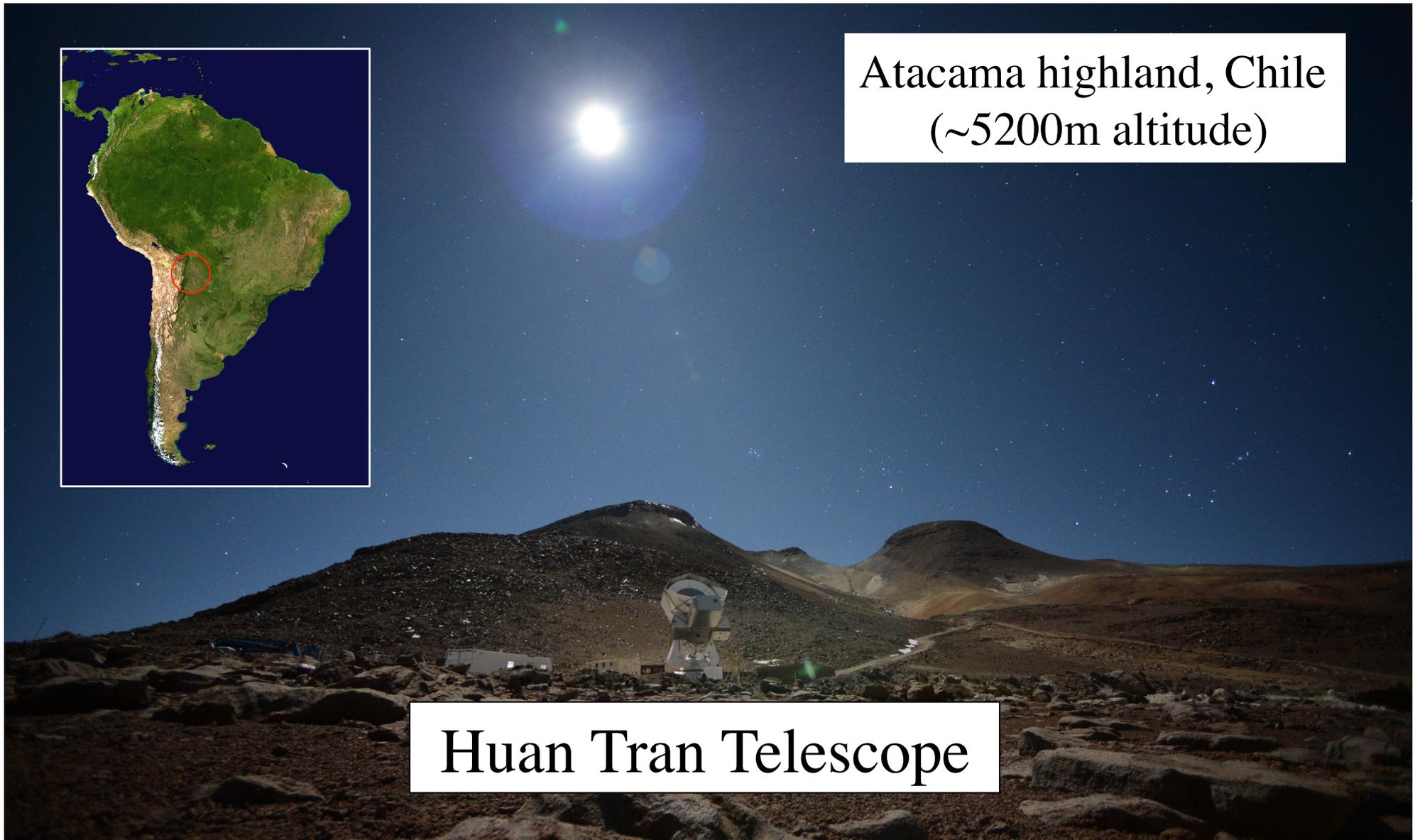
22764



# POLARBEAR site



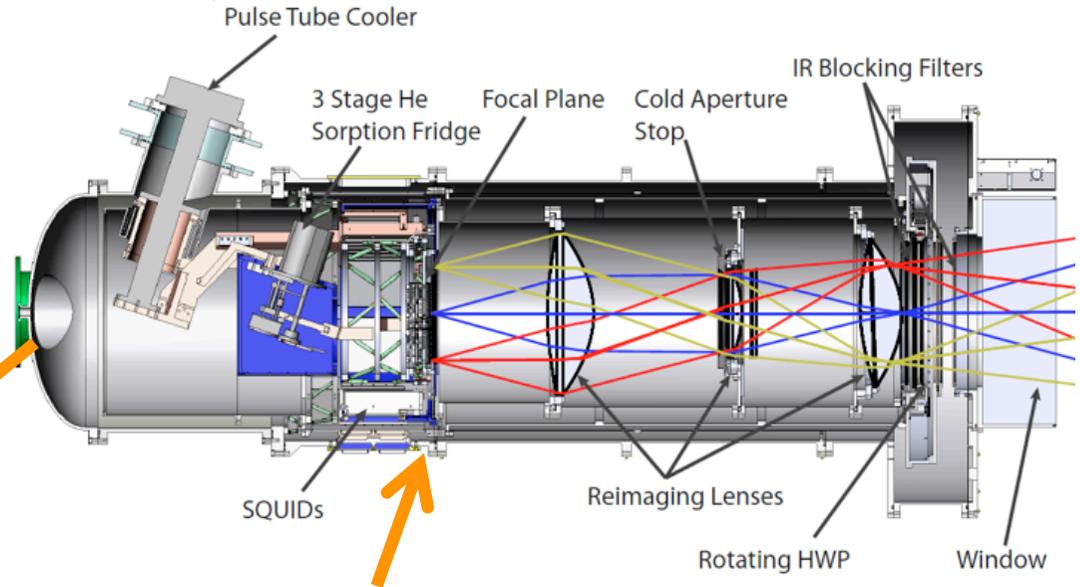
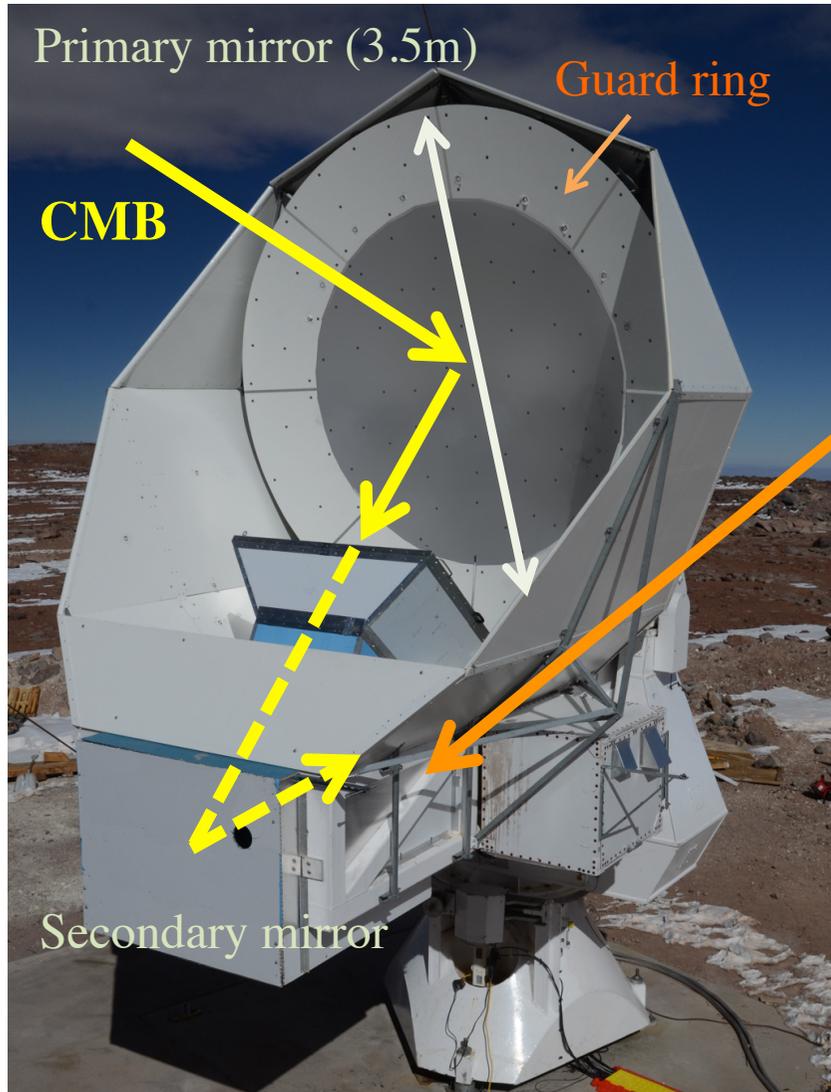
Atacama highland, Chile  
(~5200m altitude)



Huan Tran Telescope

# POLARBEAR-1

## PB-1受信器システム



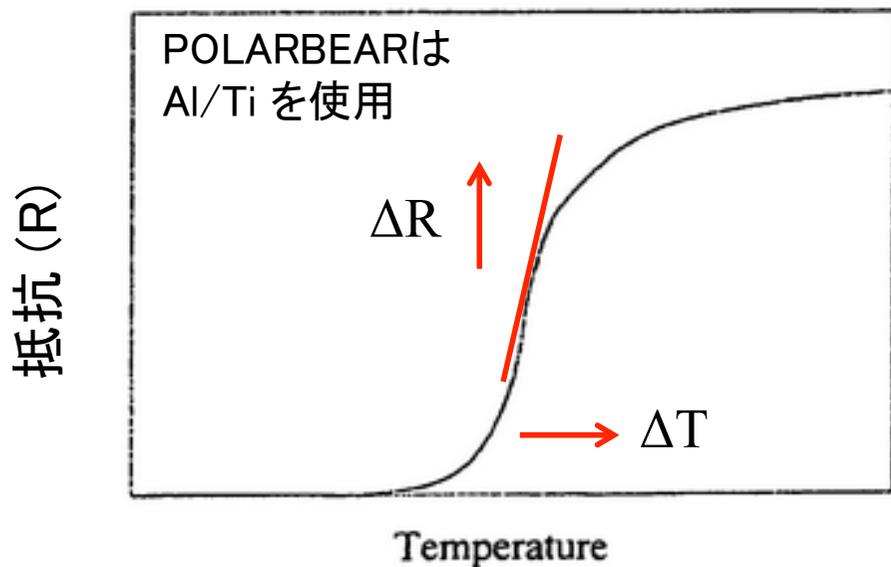
### 焦点面(250mK)

- Off-axis Gregorian-Dragone
- 2.5mの主鏡 + 150GHz検出器
  - 角度分解能: 3.5arcmin (FWHM)
  - $\leftrightarrow \sim 30\text{arcmin}$  (BICEP2)

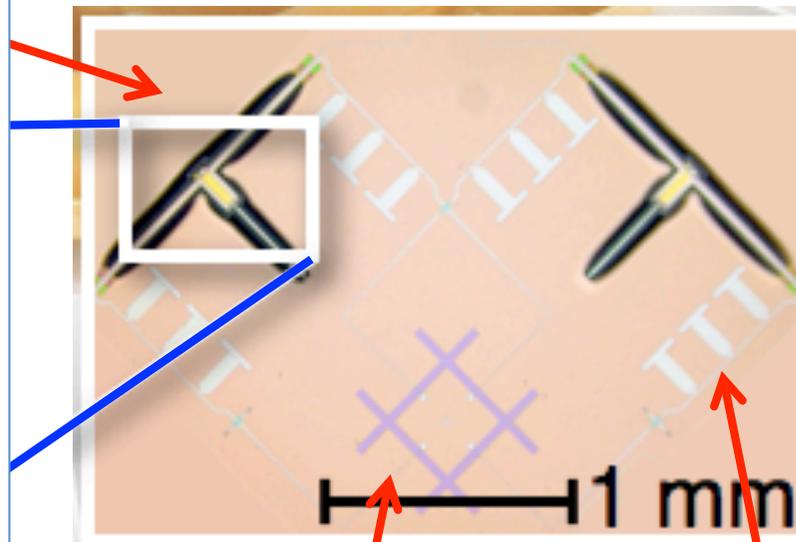
インフレーション, 重力レンズB-mode  
双方に感度がある

# 焦点面検出器

TES ボロメータ  
(transition-edge sensor)



僅かな温度変化(CMBが入ってくる)に対し、抵抗が大きく変化する (低雑音・高感度)



アンテナ(直交二偏波)

マイクロストリップフィルタ  
(150GHz)

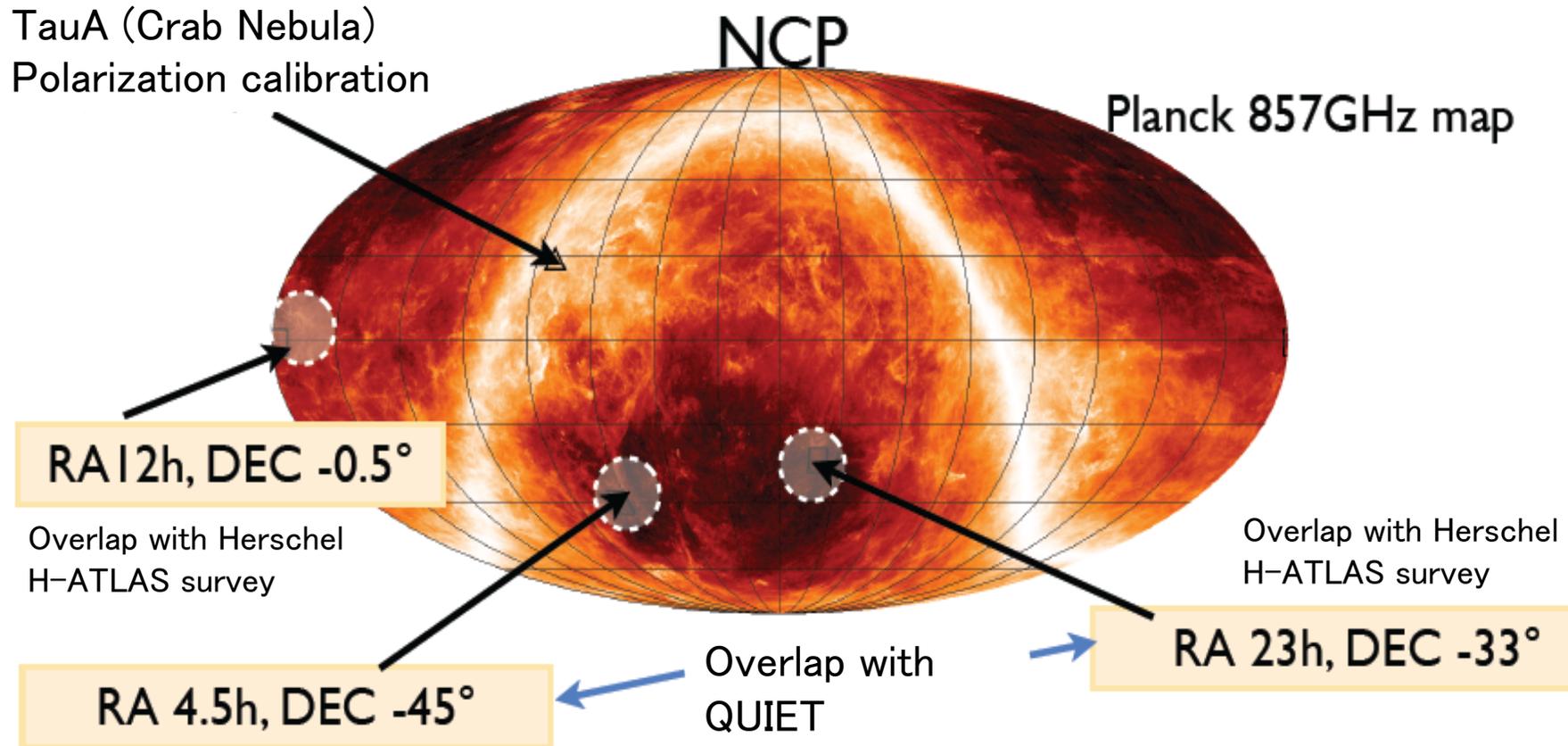
ノイズレベル:  $23 \mu\text{K}\sqrt{s}$   
 $\leftrightarrow 17\text{--}24 \mu\text{K}\sqrt{s}$  (BICEP2)

Wafer module

$$\leftarrow \Delta C_1^{\text{BB}} \propto \text{Noise}^2$$

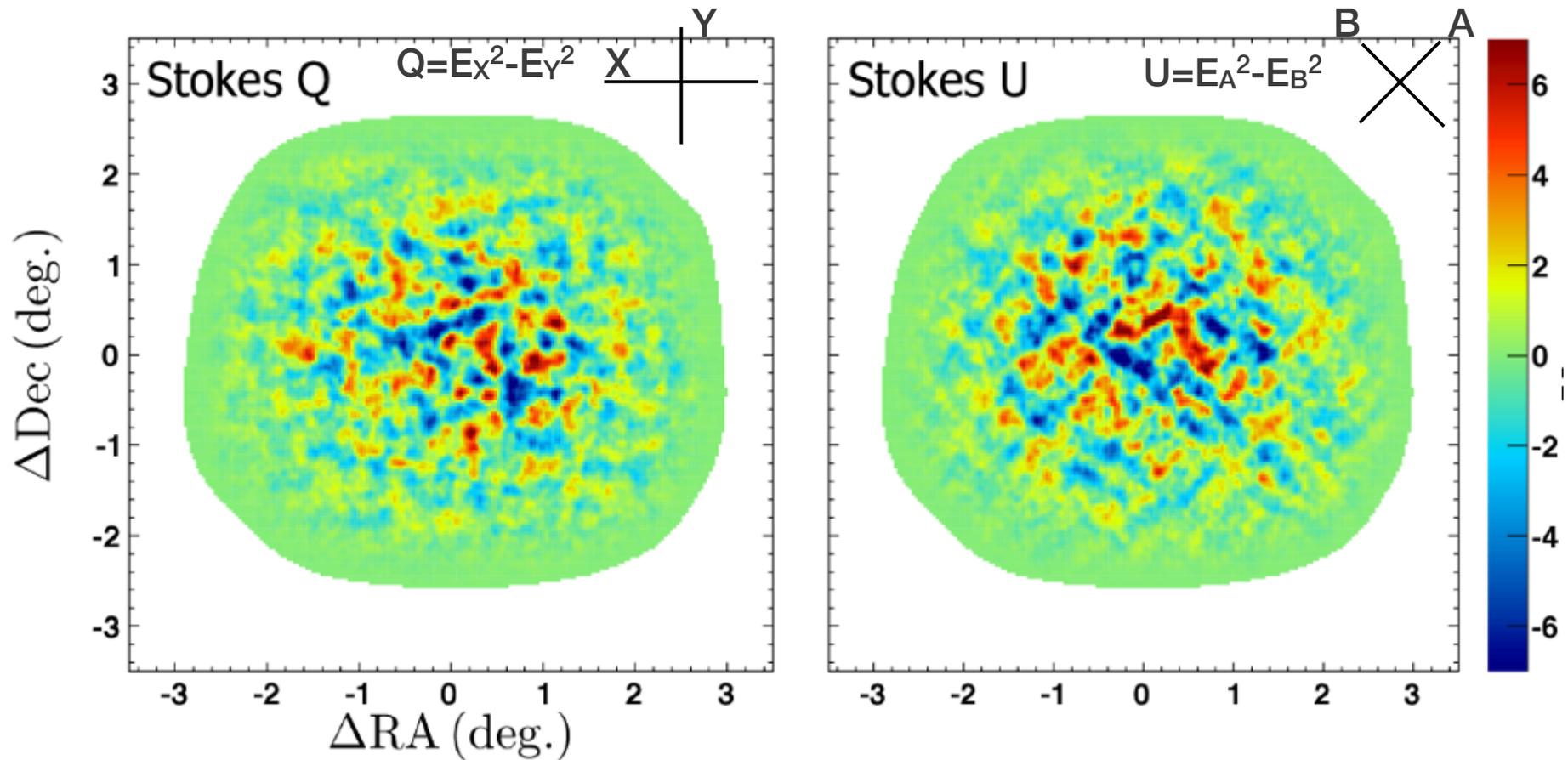
スロットアンテナ

# 初年度の観測領域



- 前景放射の無視できるパッチを観測
- 赤外線観測(Herschel)とのオーバーラップ
- 初年度は小さなパッチ(3deg x 3deg)を集中的に観測(>4000時間)

# 初年度の偏光データ



- CMBの偏光信号をクリアに検出
- ノイズレベル : 5.5uK-arcmin (Planckより10倍深い)

# 観測の系統誤差

2つの検出器の出力の差を見る。

$$\begin{aligned} \text{偏光} : P_A - P_B \\ = g_A E_x^2 - g_B E_y^2 \end{aligned}$$

## 3大系統誤差

### (1) ゲインの不一致

$g_A, g_B$  を1%間違えると強度の1%が偏光に漏れ込む

### (2) 視野(Beam)に関する不一致

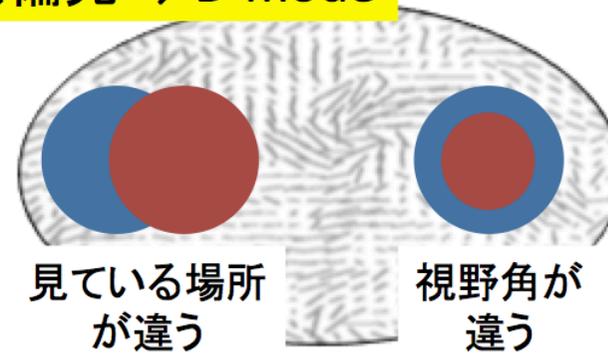
A,Bの見ている所が違っていると(CMBには温度ムラがあるので)偽偏光を生む

### (3) アンテナの方向の較正ミス

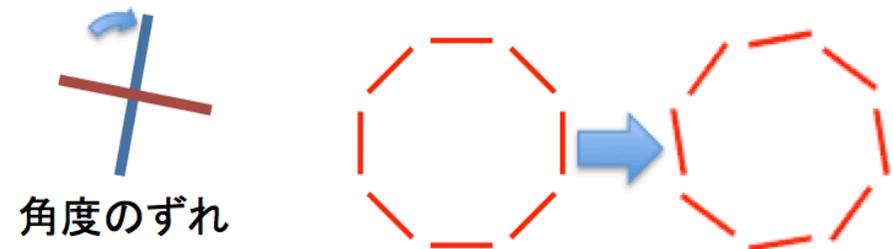
EモードがBモードになだれ込む

無偏光  $\rightarrow$  B-mode

縦と横の引き算で失敗

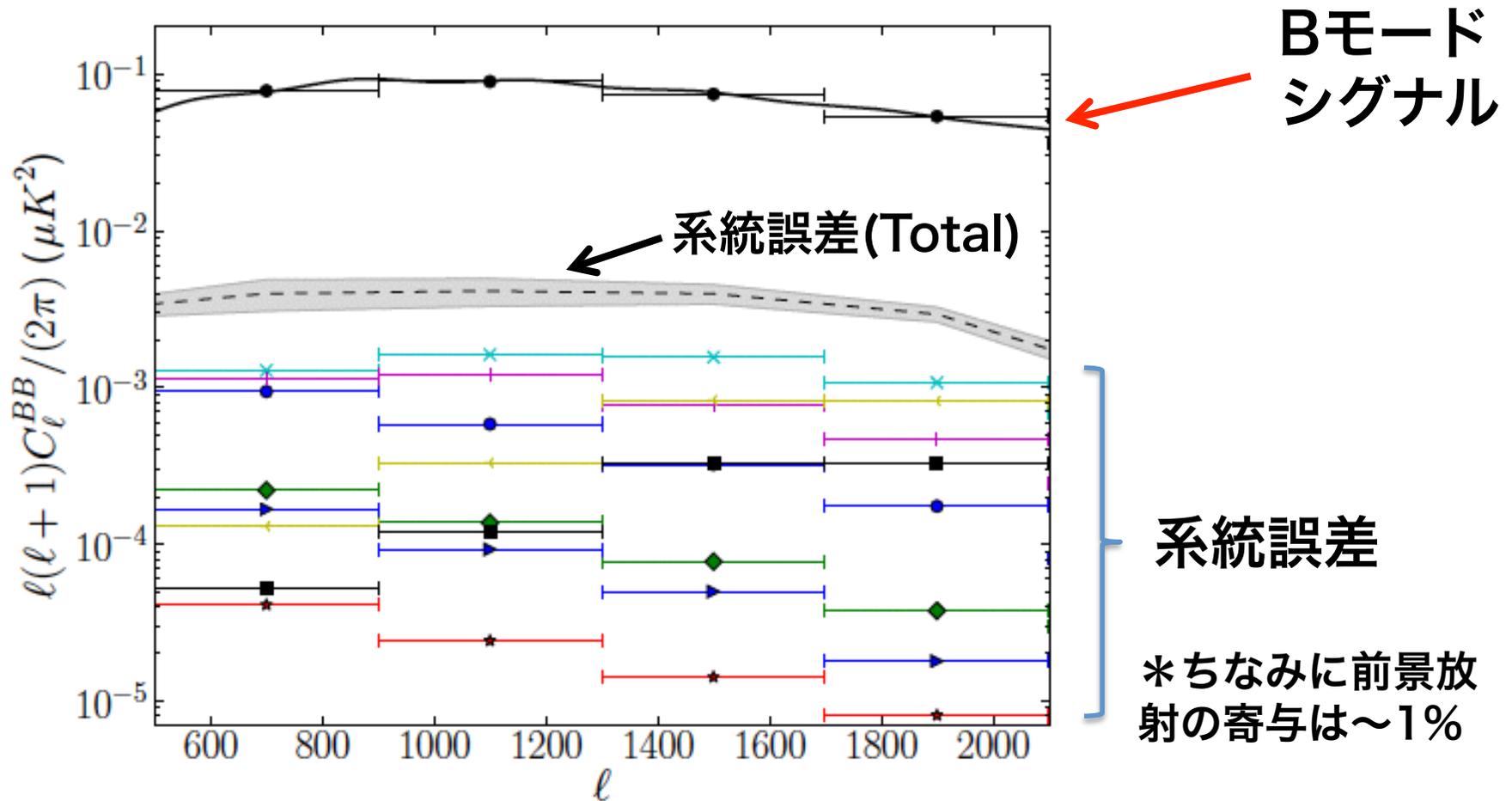


E-mode  $\rightarrow$  B-mode



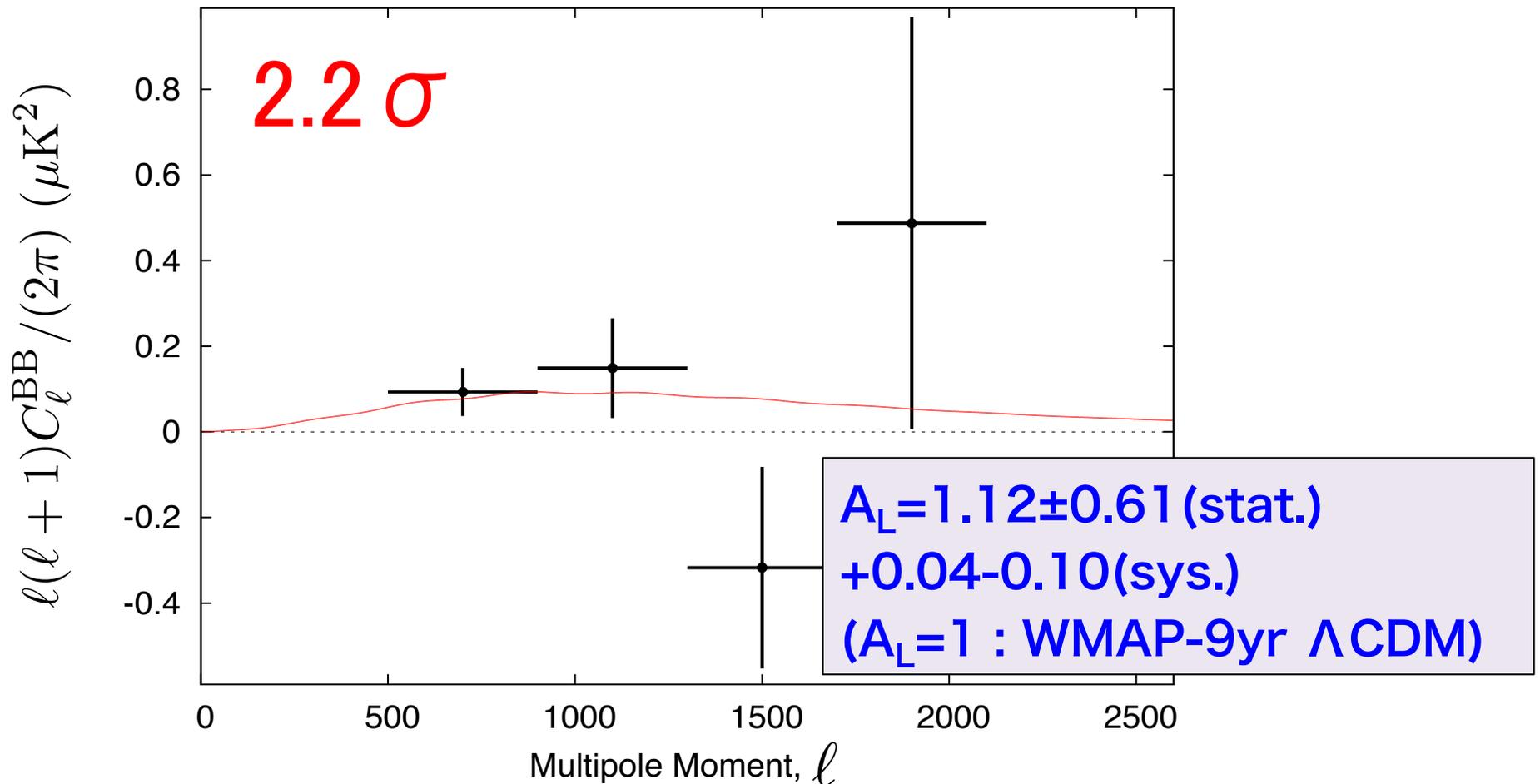
# 観測の系統誤差

## 偏光Bモードに対する系統誤差



系統誤差は信号強度と比べて十分小さい

# 重力レンズBモードスペクトル

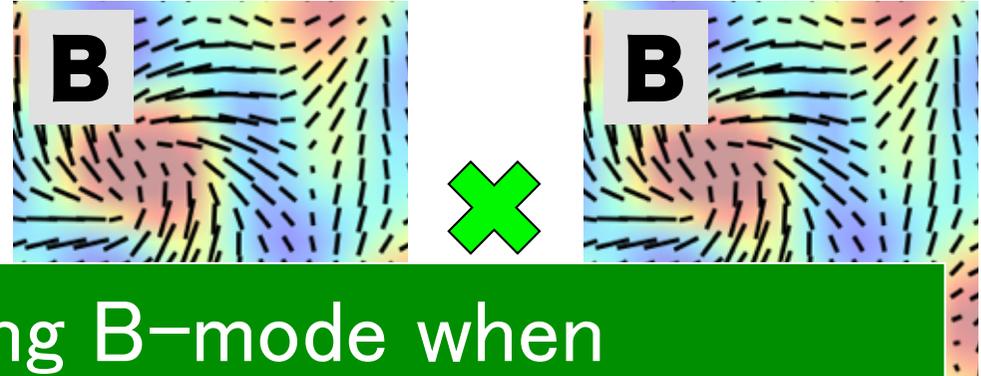


- Null hypothesisを97.5%の信頼度で棄却
- 信号強度は予想とコンシステント

# 重力レンズBモード探索の結果

## (1) Bモードパワースペクトル

“First direct measurement of B-mode power spectrum”



4.7  $\sigma$  evidence for lensing B-mode when combined with  $C_l^{dd}$  measurement.

CMB偏光データを用いた初の重力レンズ偏光Bモードの検出

## (3) 歪み場のパワースペクトル

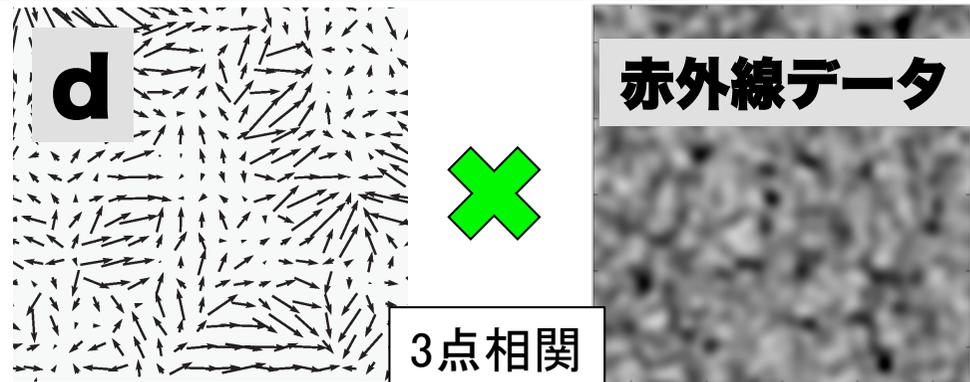
赤外線データとの相互相関解析

arXiv:1312.6645

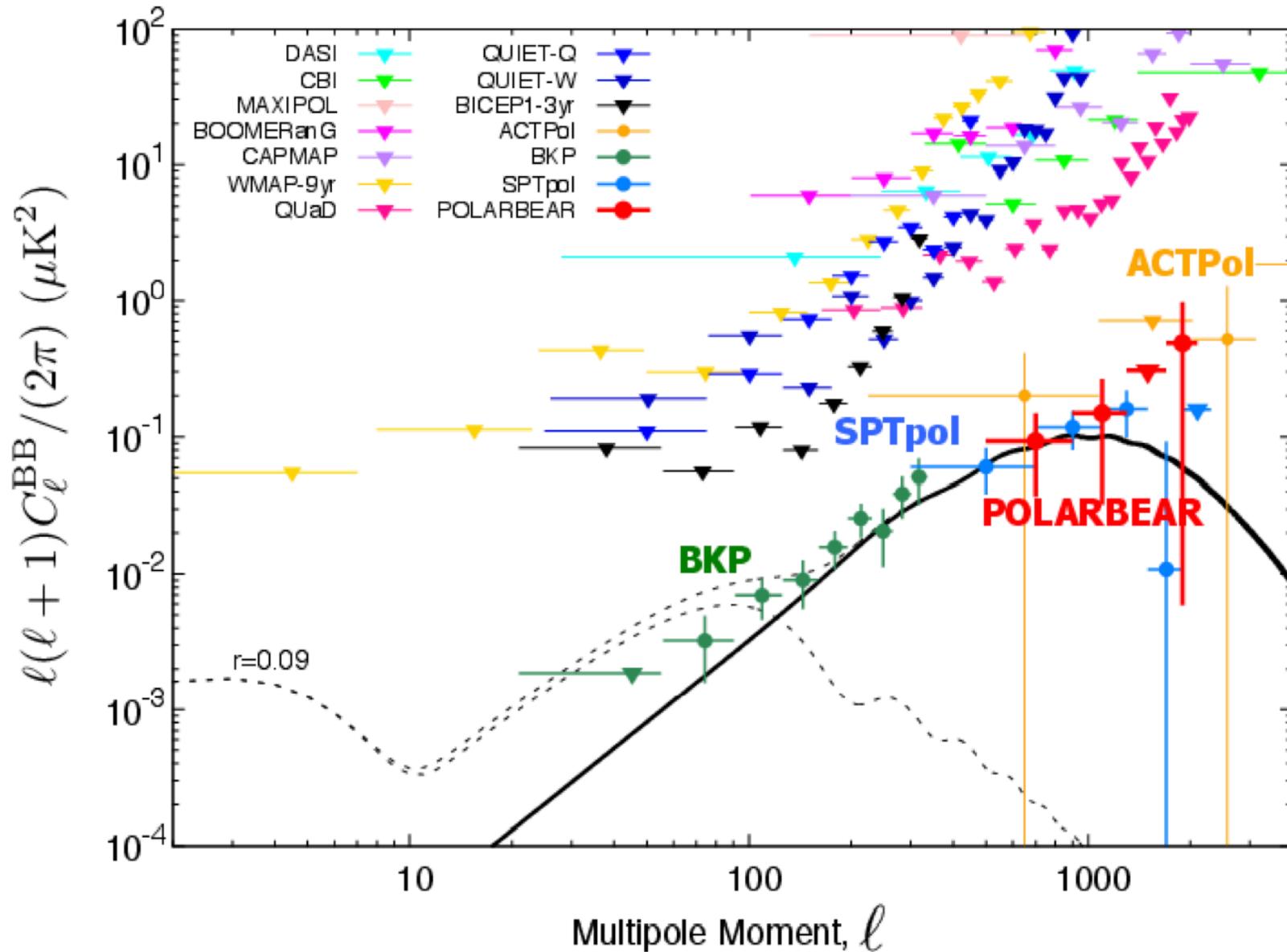
PRL 112,131302

(Editor's suggestion)

長谷川スライドより



# B-mode観測の現状



# 次世代地上CMB偏光実験への要求

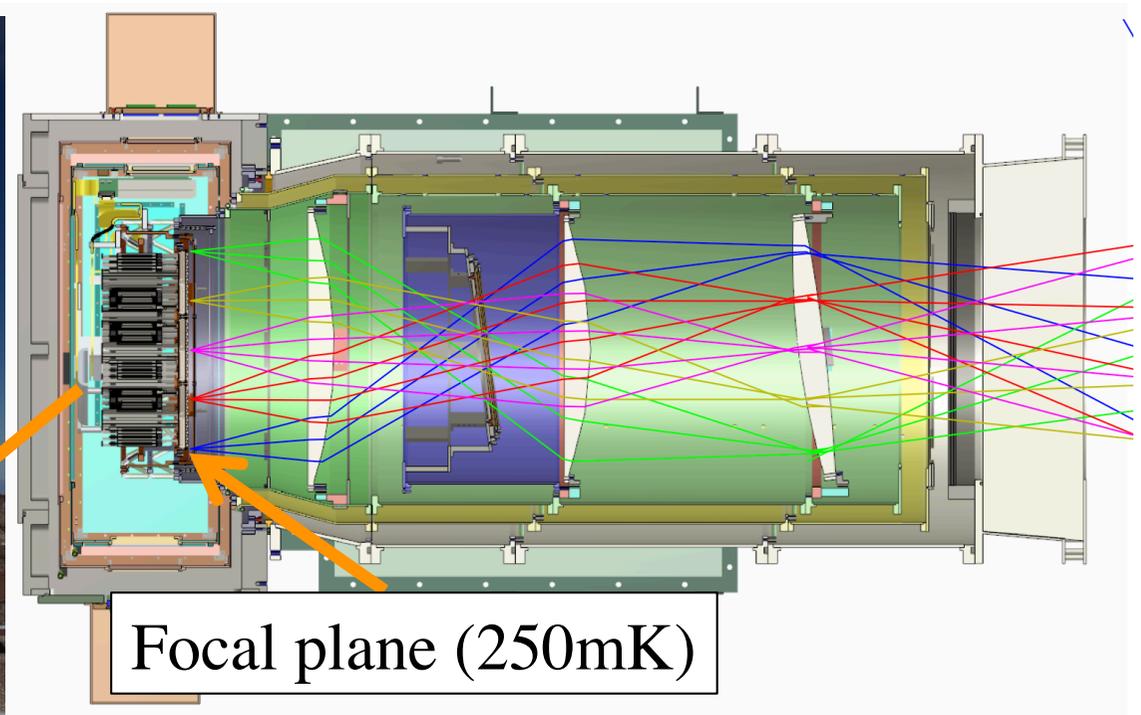
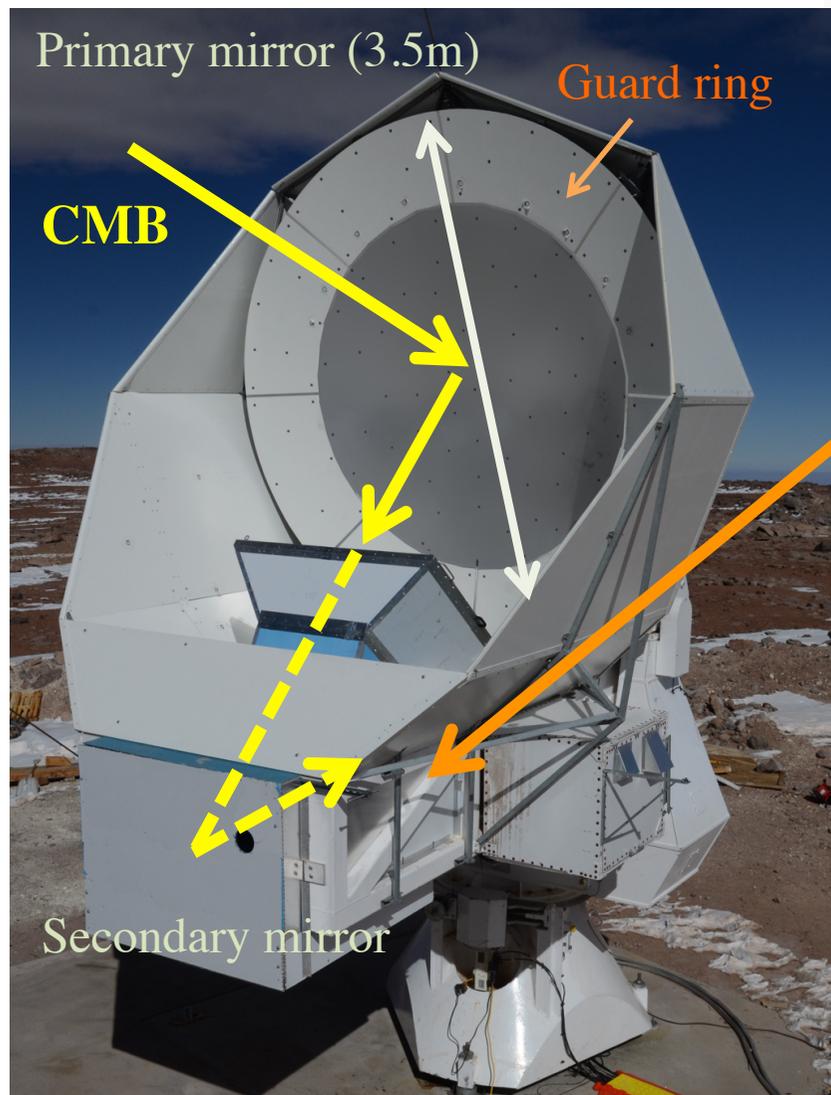
1. 10,000個クラスの検出器アレイを用いた観測
2. 複数周波数帯域による観測
3. より広い角度スケールの観測

Abazajian et al. Astropart.Phys. 63:66-80 (2015)

Abazajian et al. Astropart.Phys. 63:55-65 (2014)

## **第3部 POLARBEAR-2実験の開発と現状**

# POLARBEAR-2実験



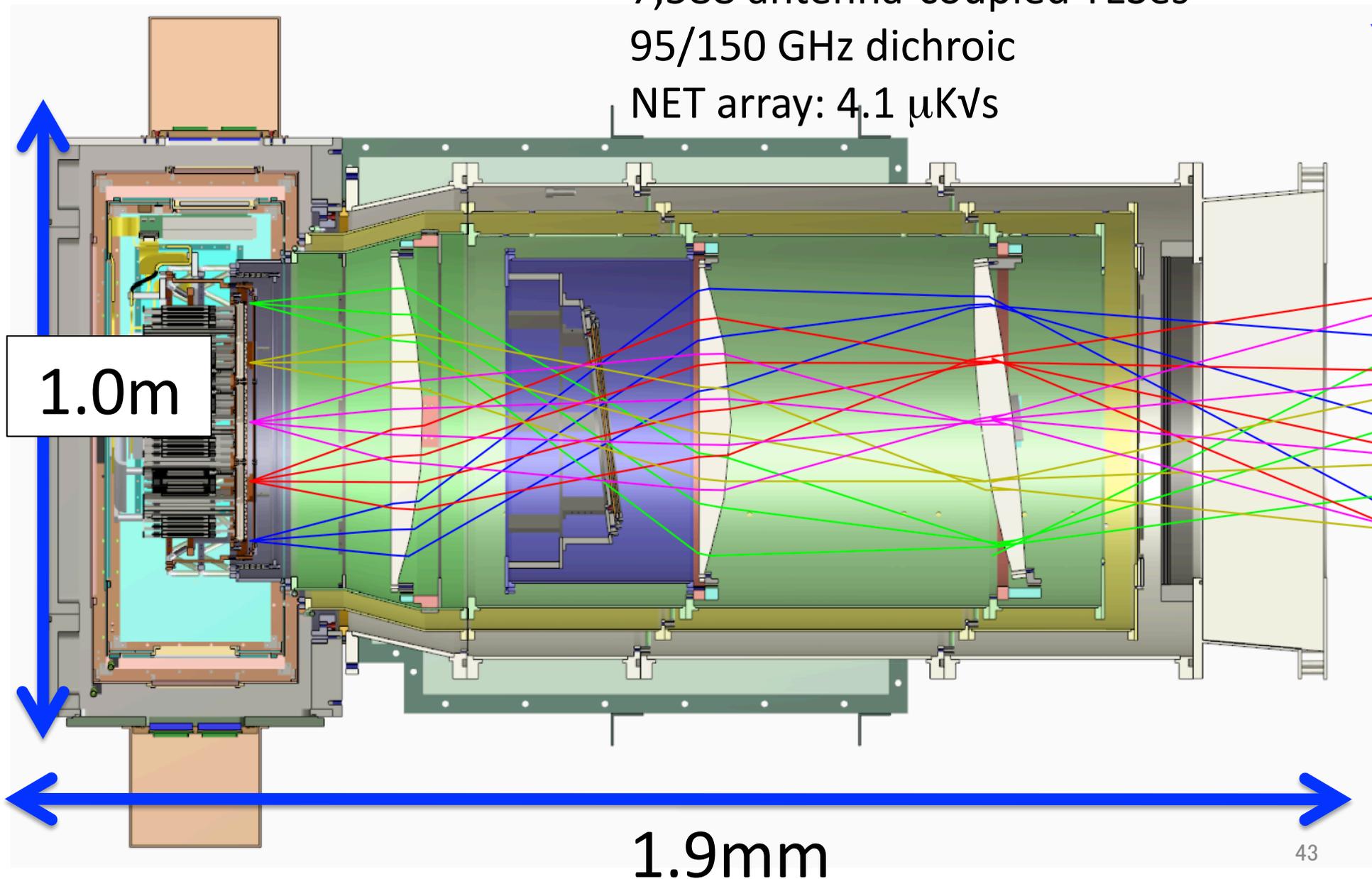
1. 10,000個クラスの検出器アレイを用いた観測
  - →7588個
2. 複数周波数帯域による観測
  - 150/95 GHz
3. より広い角度スケールの観測
  - 全天の7割まで観測可能

# POLARBEAR-2 receiver system

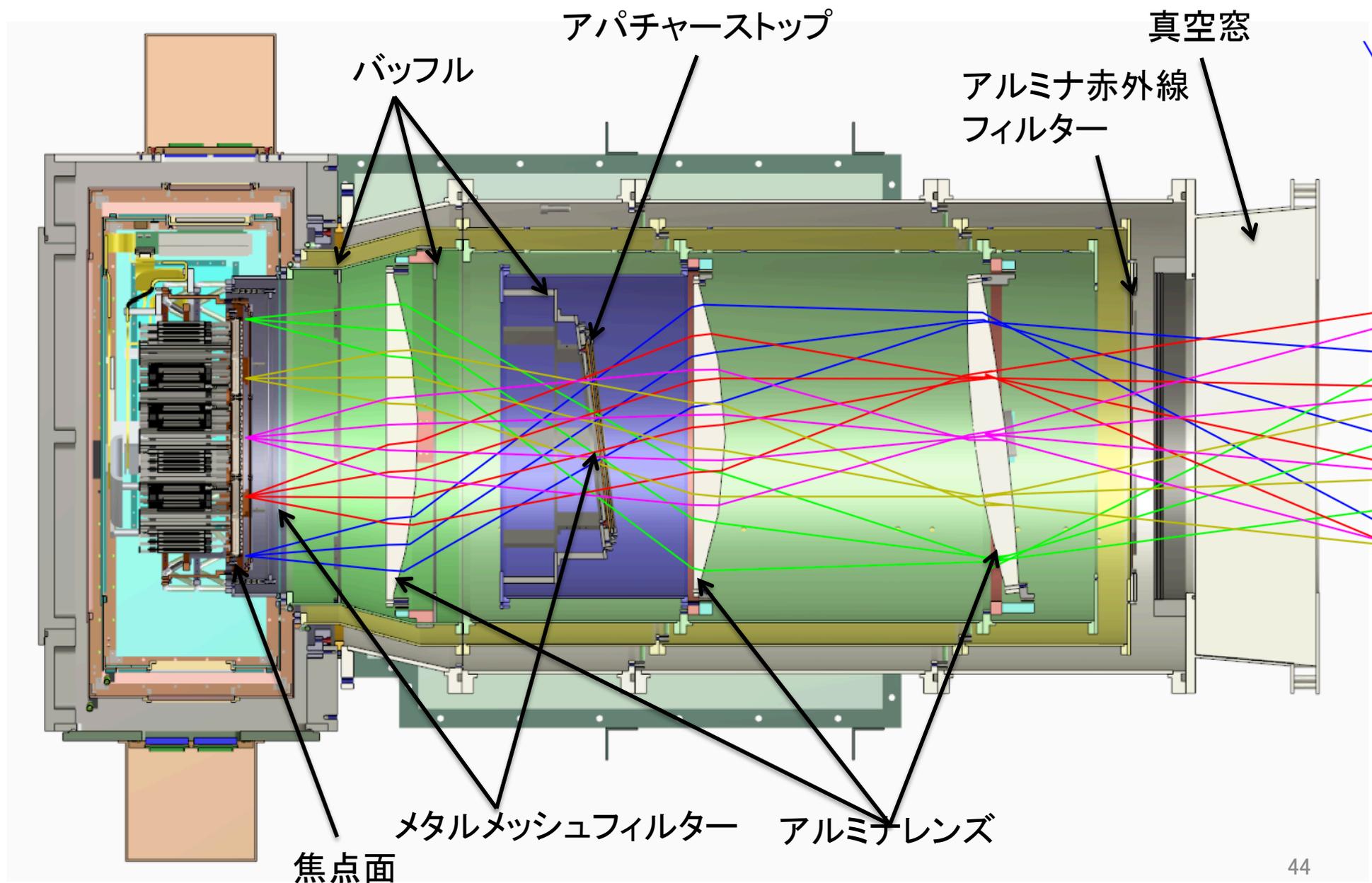
7,588 antenna-coupled TESes

95/150 GHz dichroic

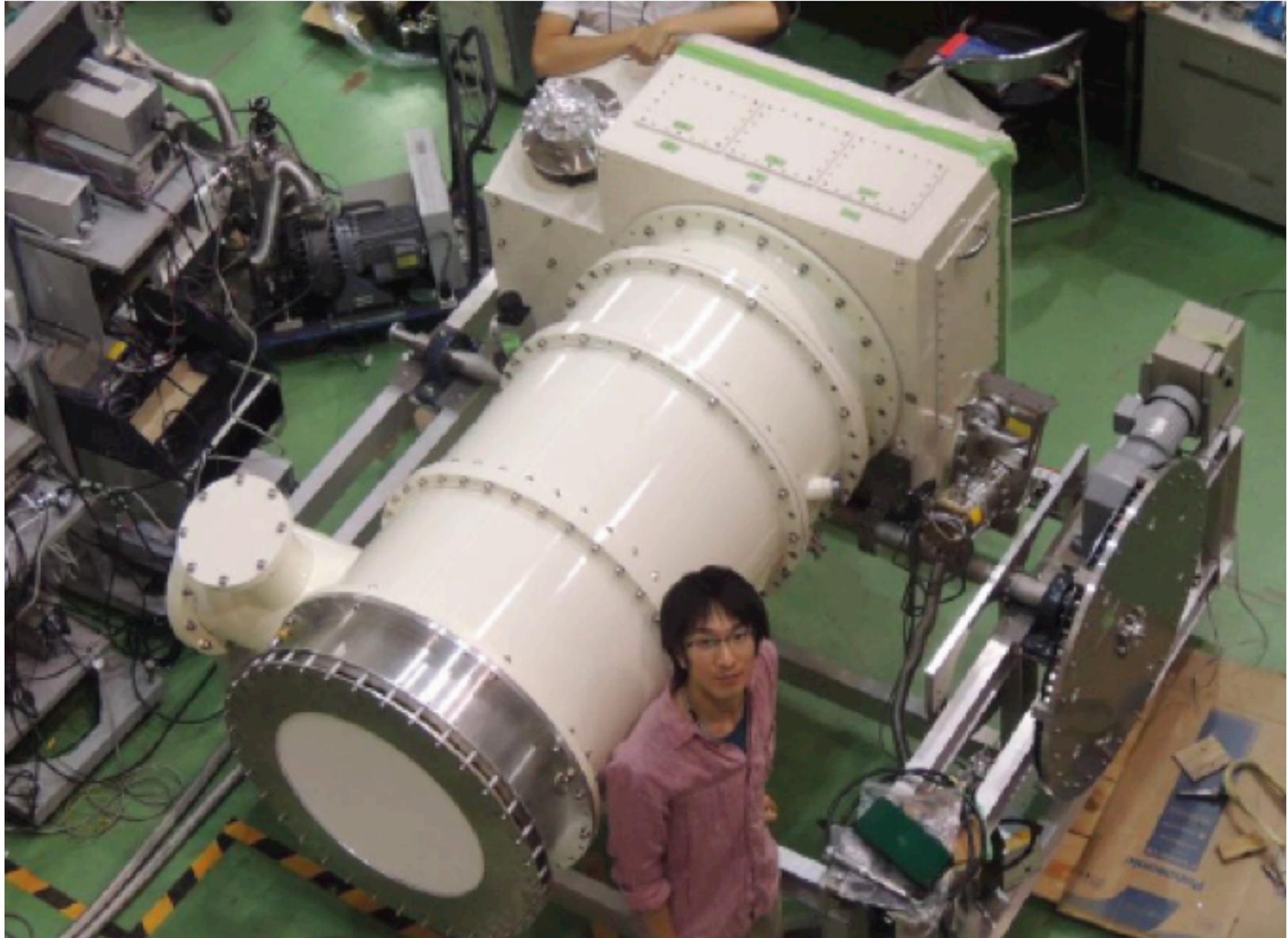
NET array:  $4.1 \mu\text{Kv}$ s



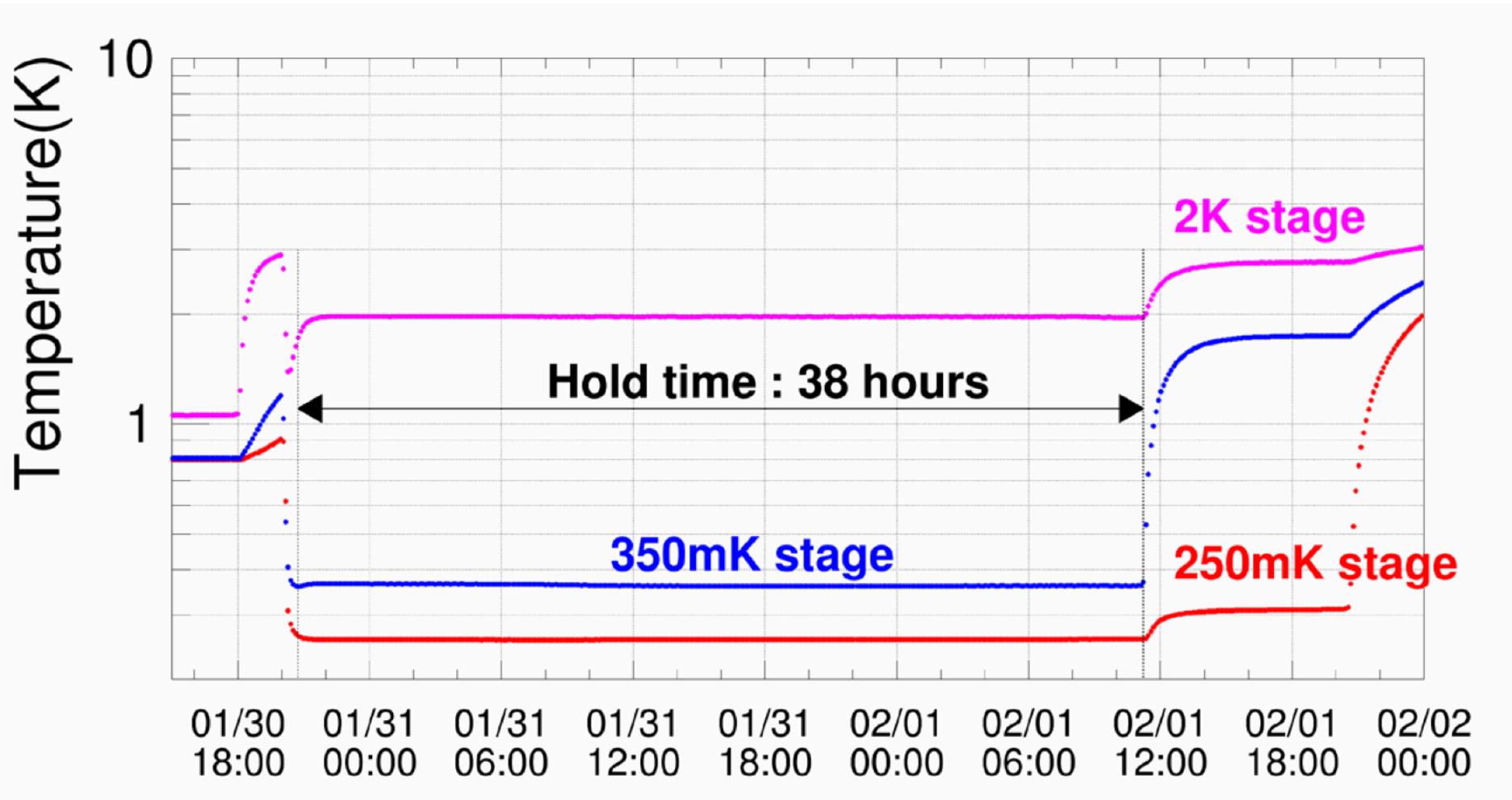
# POLARBEAR-2 receiver system



# Receiver system



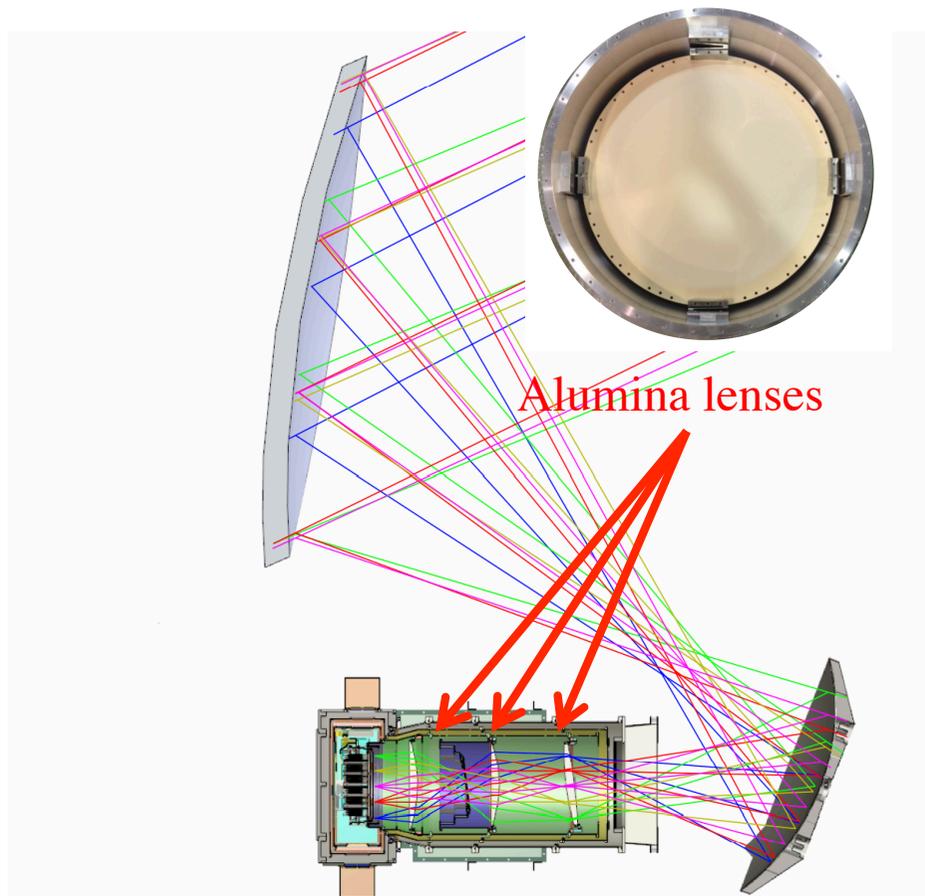
# Measured hold time



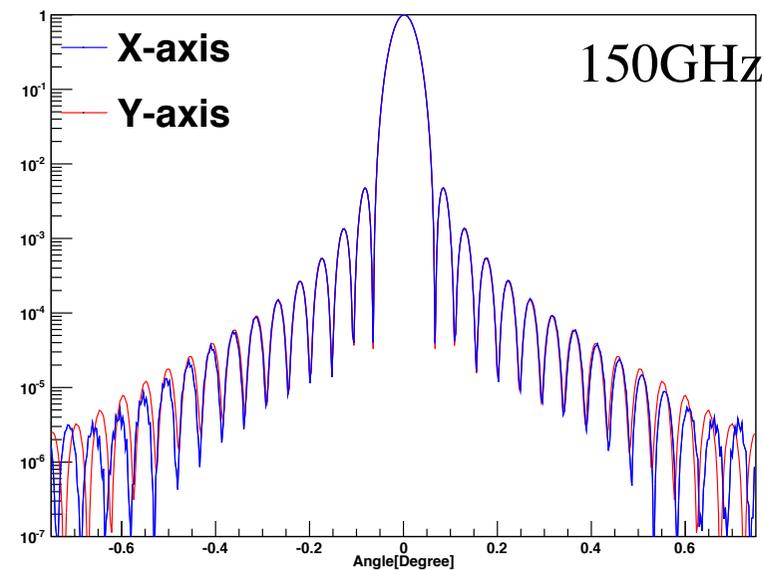
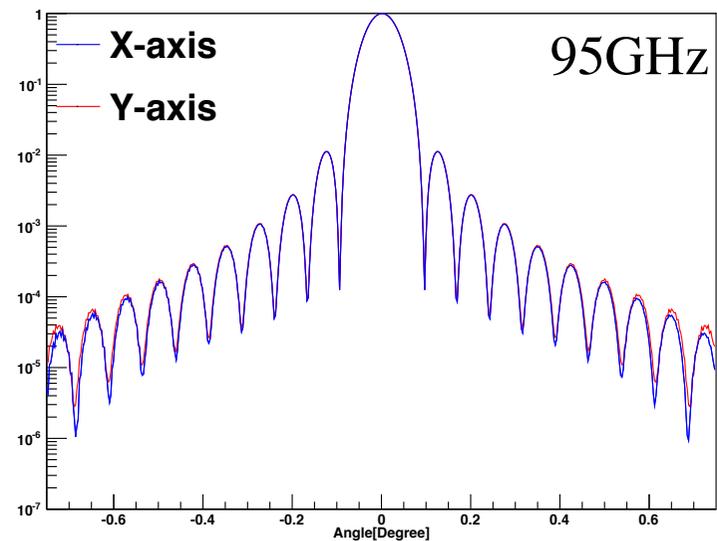
- 38 hours holding time (sufficient for 24 hours cycle observation)
- All thermal requirements for the optics tube are satisfied.

# Alumina Optics

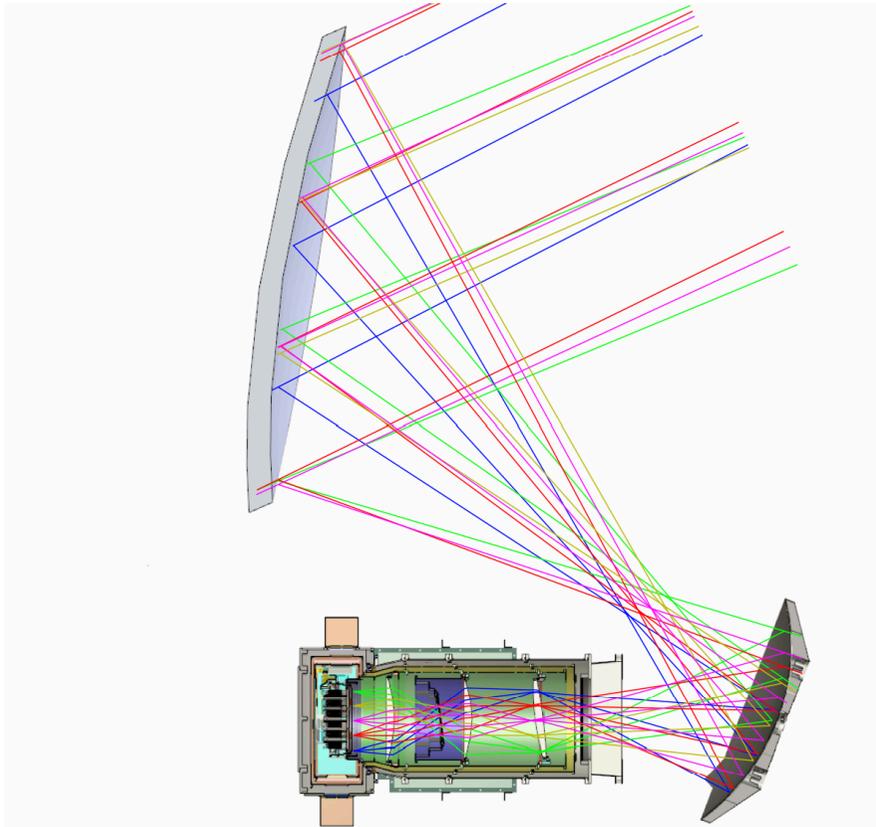
T.Matsumura et al. Proc. SPIE 8452-124.(2012)  
Inoue et al., Proc.of SPIE Vol. 91533A(2014)



- Side lobe:
  - 95GHz: -20dB
  - 150GHz: -25dB
- Strehl ratio: 95%
  - Diffraction limited



# Diffraction-limited optics



FWHM: 3.5 arcmin (150GHz)

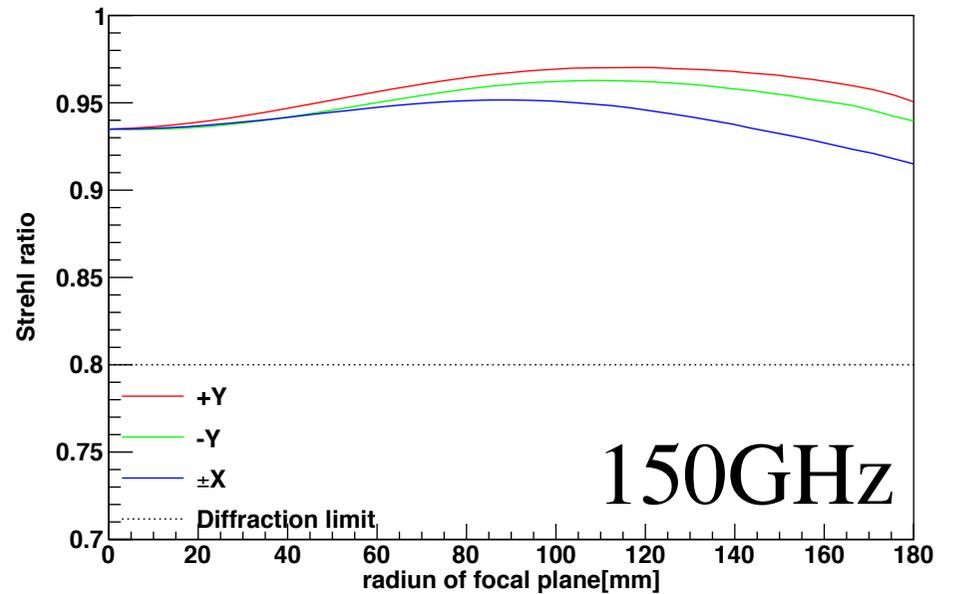
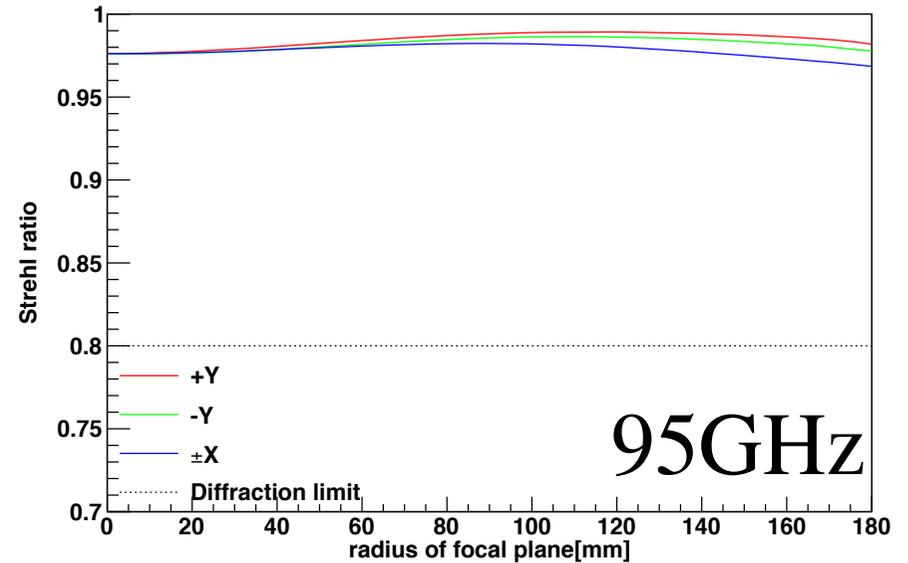
FoV: 4.8degrees

Side lobe:

95GHz: -20dB

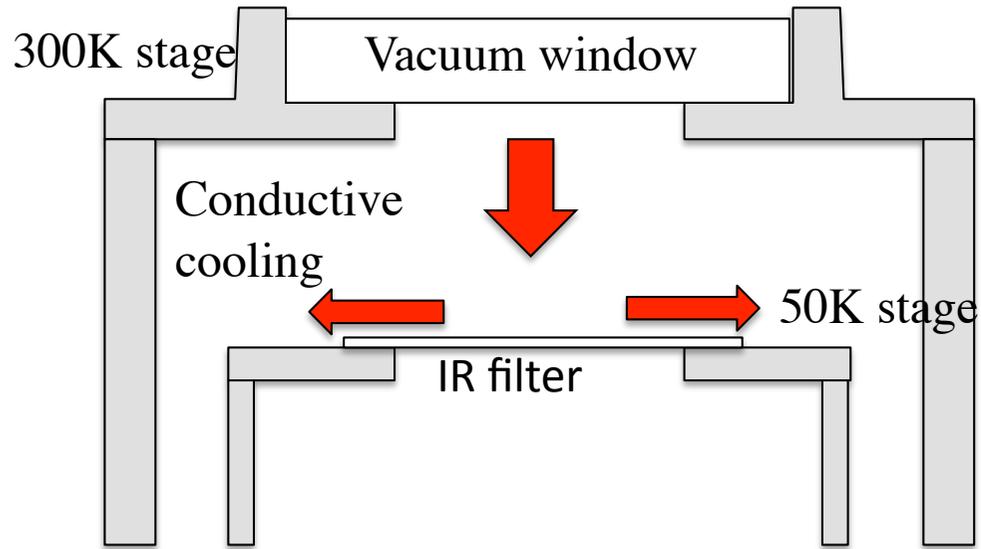
150GHz: -25dB

Strehl ratio: >90% (Diffraction-limited)

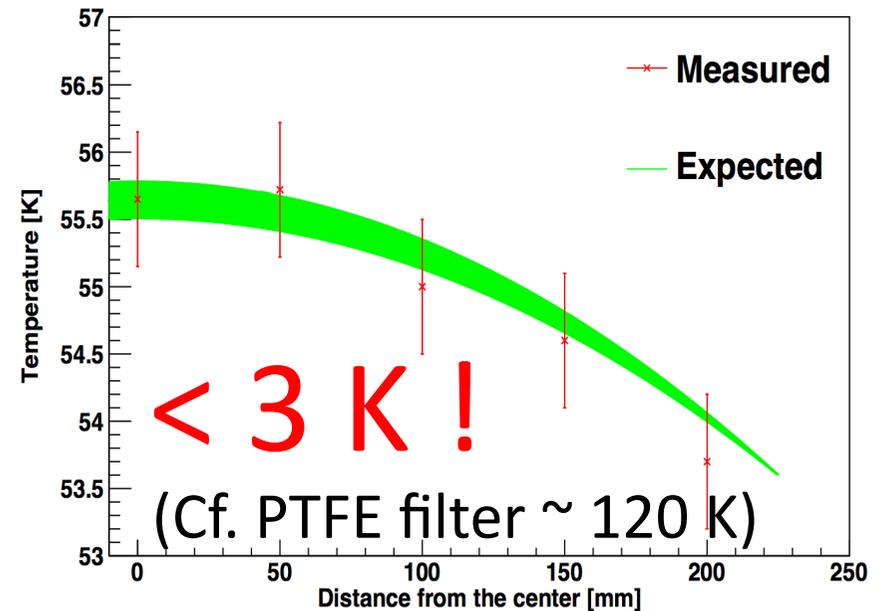
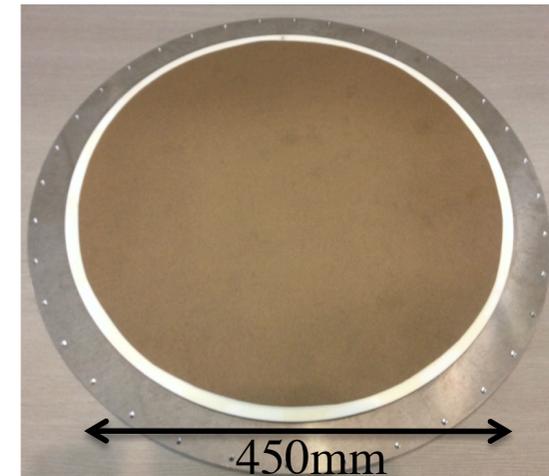


# Alumina IR filter

49



- Absorption type IR filter
- Large diameter and thin:  $\phi 450\text{mm} \times 2\text{mm}$
- Placed on 50K stage
- 2 layer AR coatings
- 3dB cutoff: 650GHz @77K
- High thermal conductivity: 144 W/mK
- Center temperature: 55K ( $\Delta T < 3\text{K}$ )



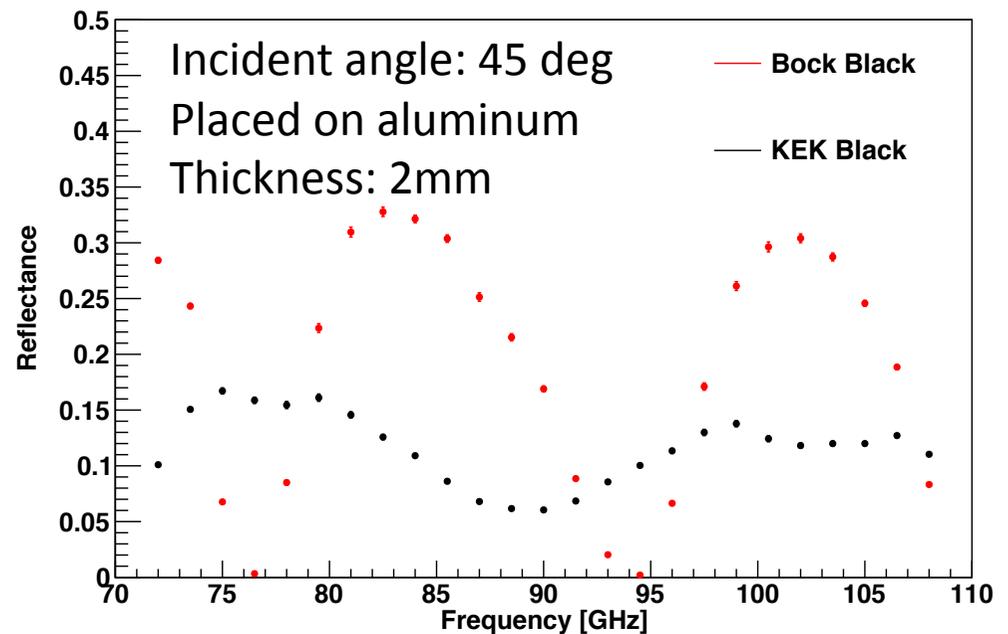
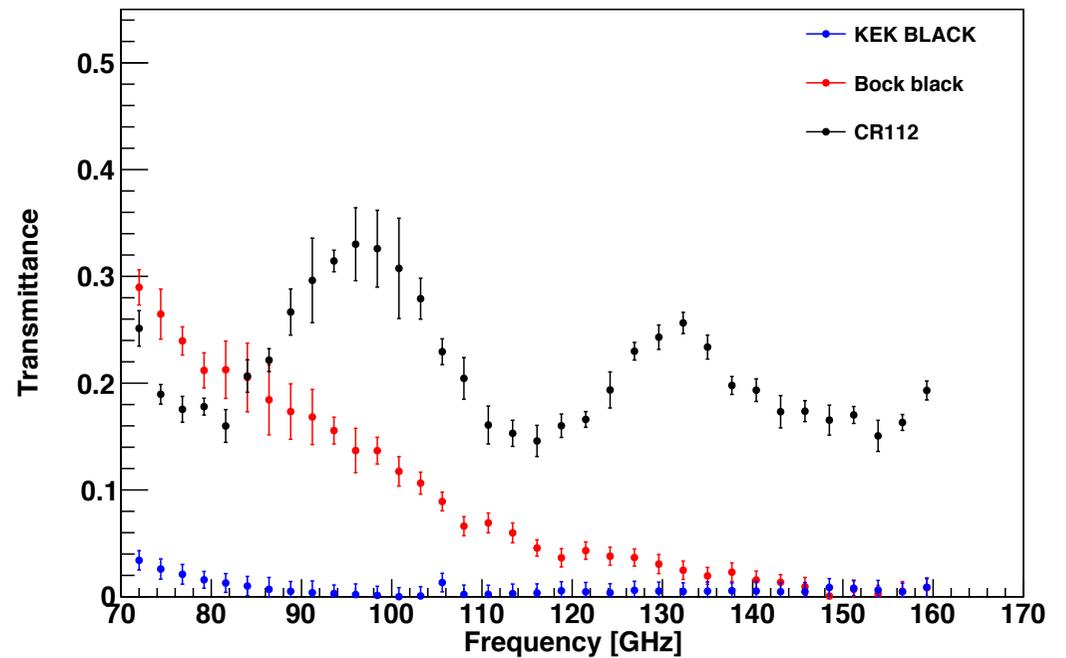
Y. Inoue et al., Appl. Opt. 53, 1727-1733 (2014)

This R&D are first trial and to be standard technology in CMB community.

# KEK Black

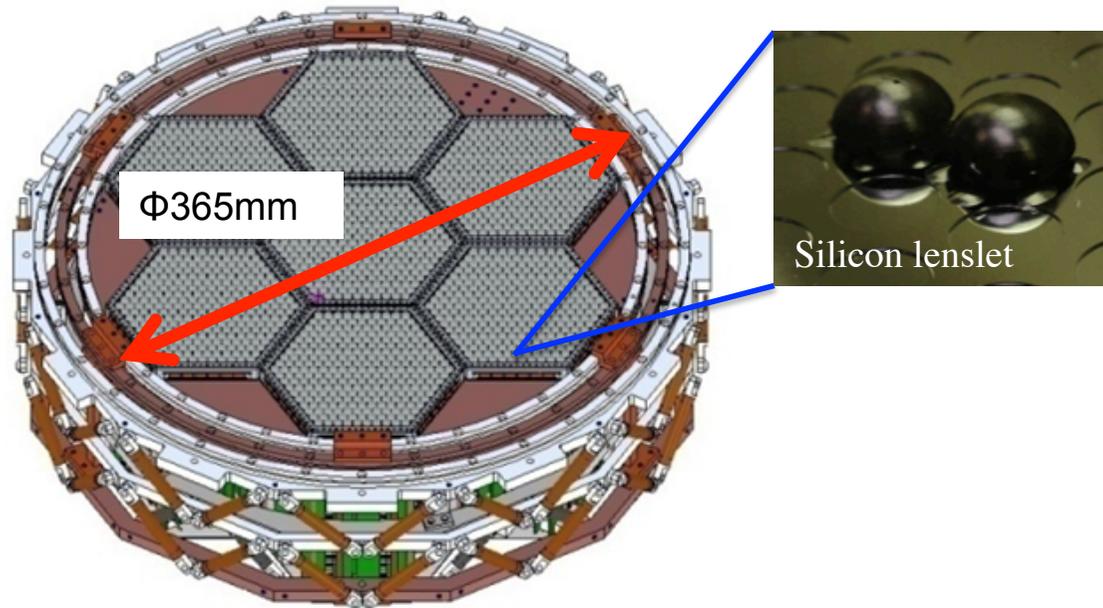


- contain the expanded Polystyrene foam ( $\phi 0.5\text{mm}$ ) and Carbon black
- Absorption with flat bulk sample (4mm): 95 % at 45 degrees incident angle.
- Placed at inner surface of 4K shell to reduce stray light

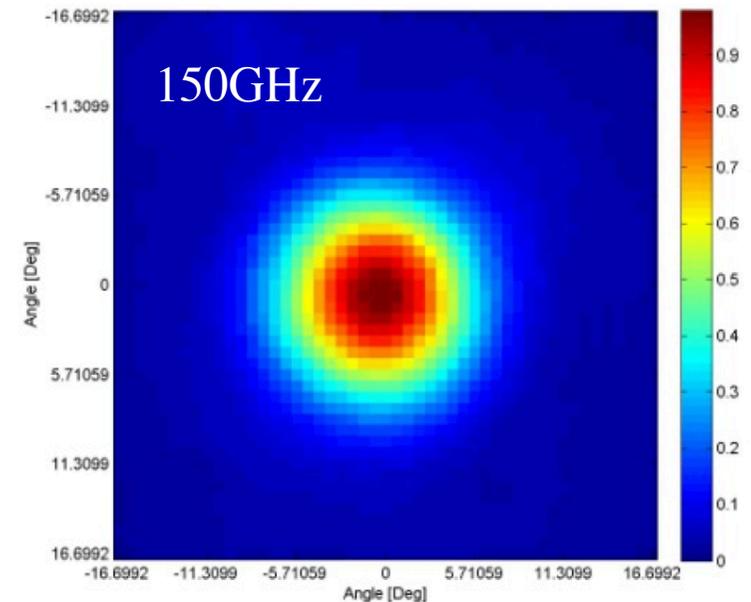
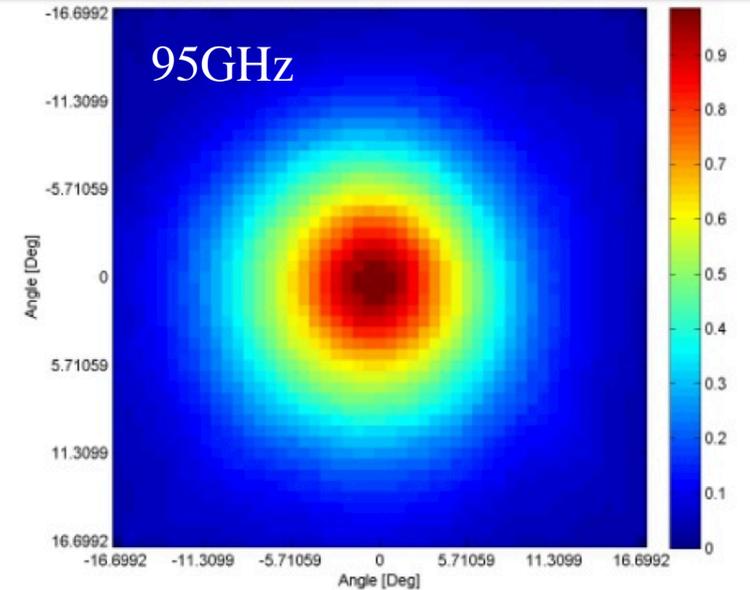


# POLARBEAR-2 focal plane

D .Rosen et al., Applied Optics, Vol. 52, Issue 33, pp. 8102-8105 (2013)

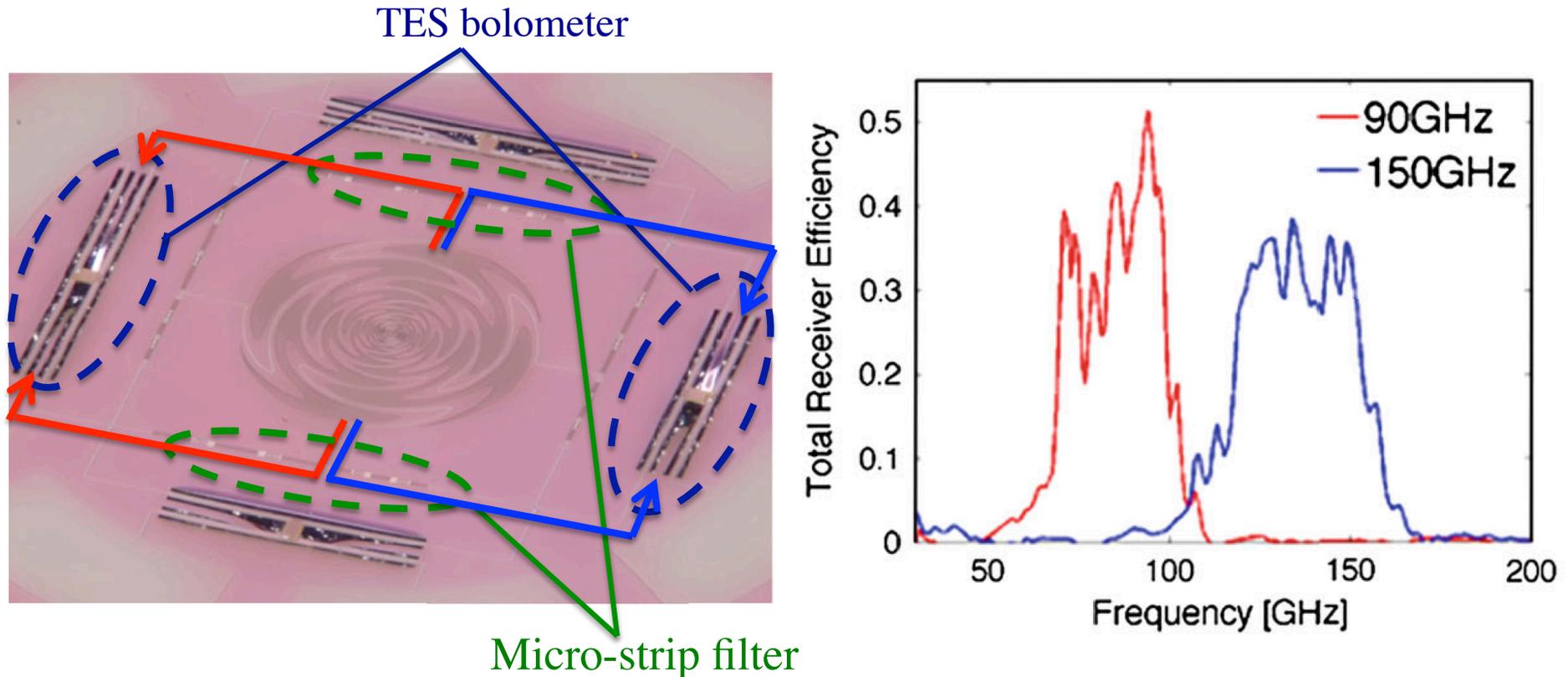


- Placed on 250mK stage
- Large focal plane (  $\phi 365\text{mm}$  )
- 7 wafers(1897 pixels)
- The beam couple to optics with AR coated lenslet
- Beam ellipticity $\sim 1\%$



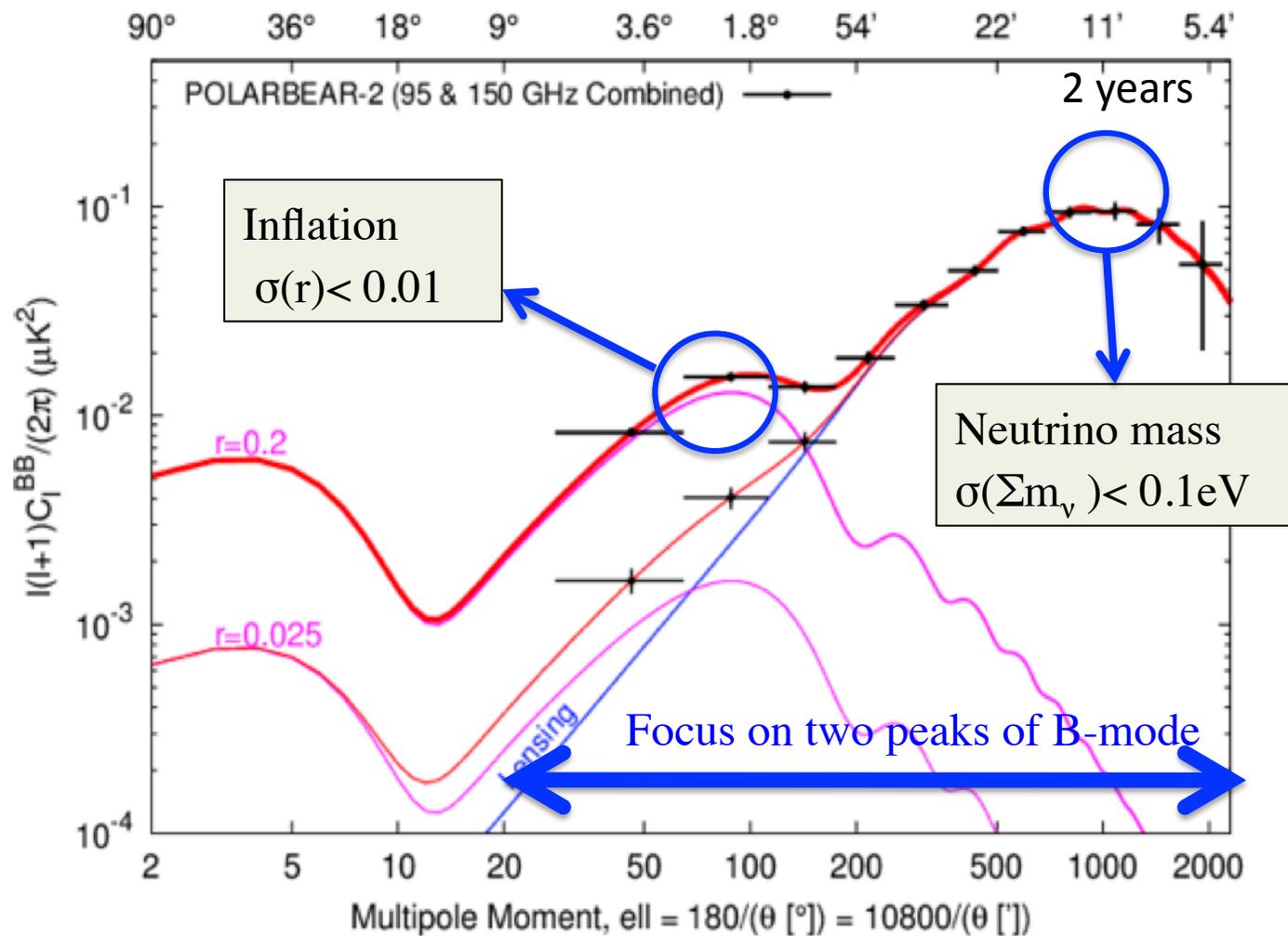
# Detector

A. Suzuki et al., proceedings of the LTD15(2013)



- Sinuous antenna: broadband detection
- Dual polarization
- Micro-strip filter: separate to 150 and 95 GHz
- 7588 superconducting transition edge sensor bolometers

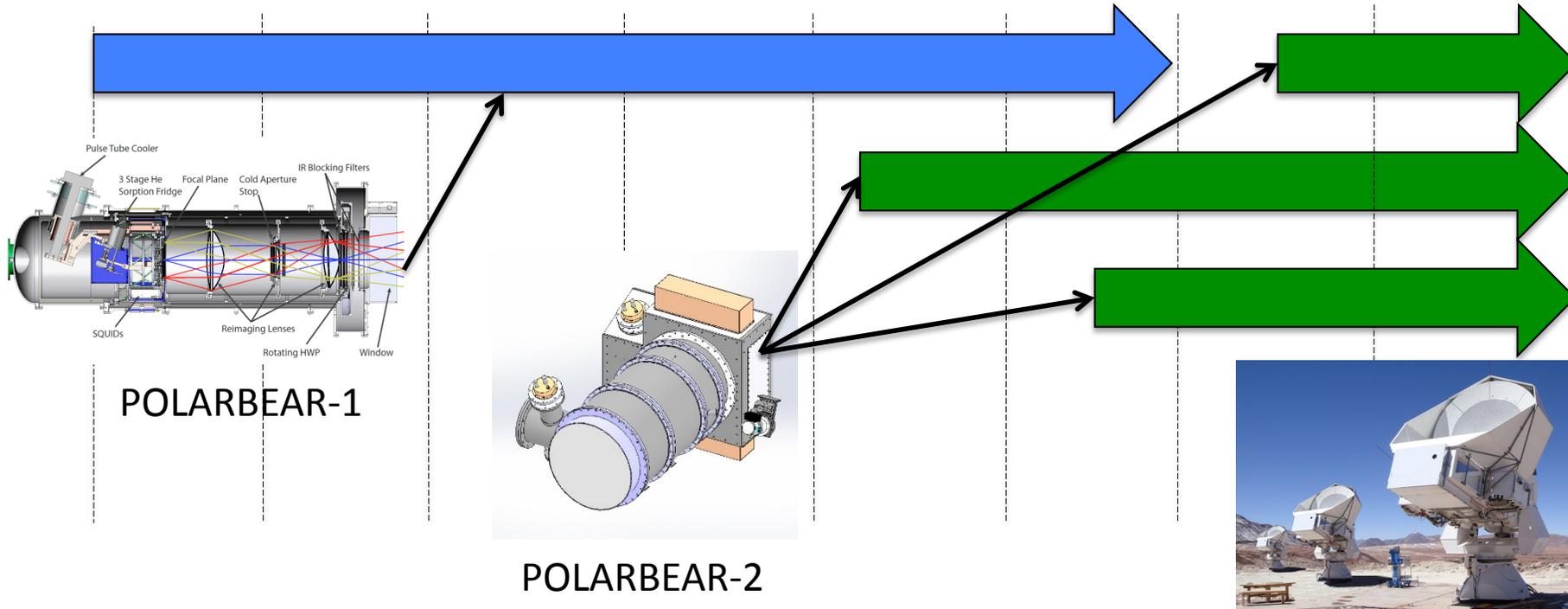
# POLARBEAR-2 Sensitivity



Characterize the B-mode polarization on large and small angular scales.

# Timeline of POLARBEAR project

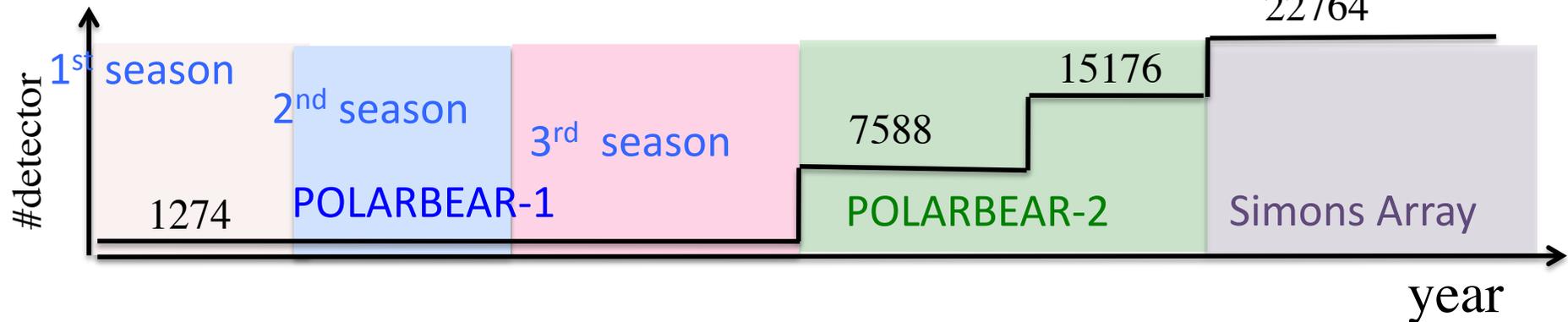
2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020



POLARBEAR-1

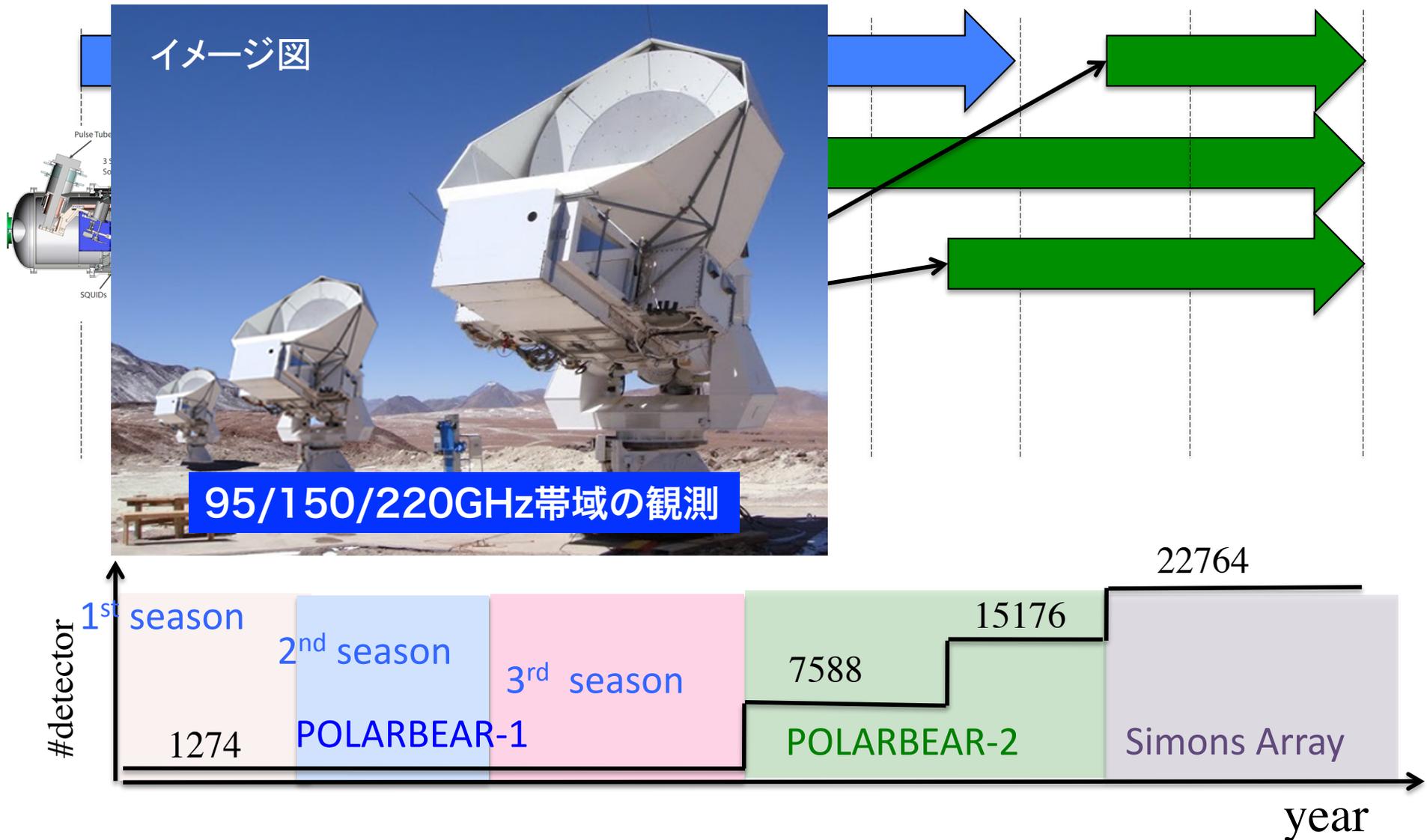
POLARBEAR-2

22764

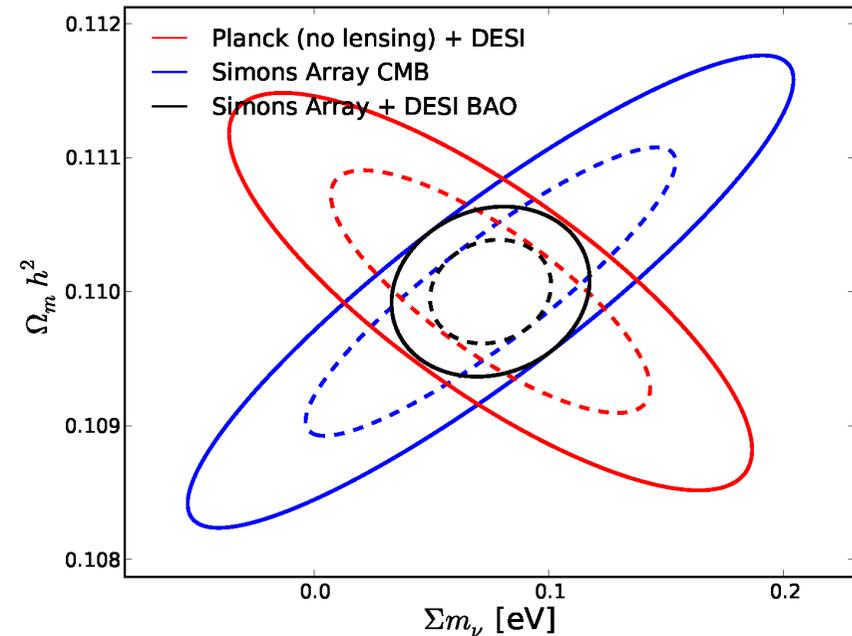
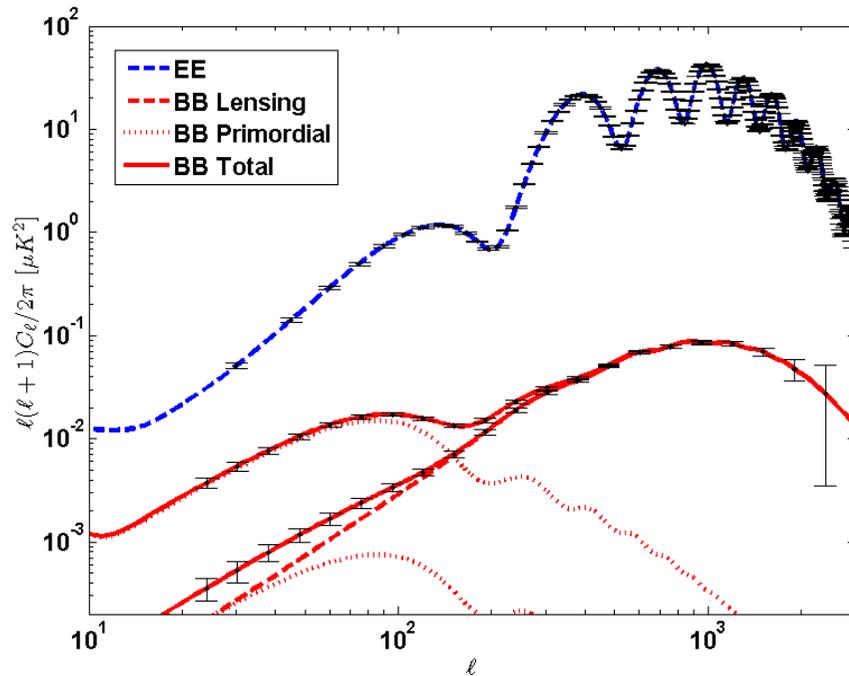


# Timeline of POLARBEAR project

2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020



# 期待される結果



- Eモード/Bモードスペクトルの精密測定
  - $r=0.01$ を $5\sigma$ で検出可能。→ モデルの選別が可能になる
  - ニュートリノ質量和:  $19\text{meV}$  @  $1\sigma$  w/ Planck, DESI

注) 前景放射と系統誤差は考慮されていないので、あくまで最終ゴール

# 1～3部 まとめ

- 偏光Bモードを用いた宇宙論の時代に突入！
  - POLARBEARによる重力レンズBモードの検出。
- 次世代のCMB実験が必要
  - 来年の観測を目指してPOLARBEAR-2を開発中
  - Simons Arrayに向けた量産体制も整いつつ有る

# 4部重力波長基線共振器を用いた 弱結合粒子の探索

Yuki Inoue and Koji Ishidoshiro

# 背景

標準理論外の隠れたU(1)対称性からhidden photonなどの新しいゲージボソンを予言

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} - \frac{1}{4}B^{\mu\nu}B_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\chi F^{\mu\nu}B_{\mu\nu}$$

Hidden photonの質量項

$$\mathcal{L}_{mass} = \frac{1}{2}m_{\gamma'}^2 B^\mu B_\mu$$

は変換  $B^\mu \rightarrow \tilde{B}^\mu - \chi A^\mu$  の元で対角化される。

→ニュートリノ振動のアナロジーから距離z進む間のphoton-hidden photon変換の確率振幅が以下の様に記述される:

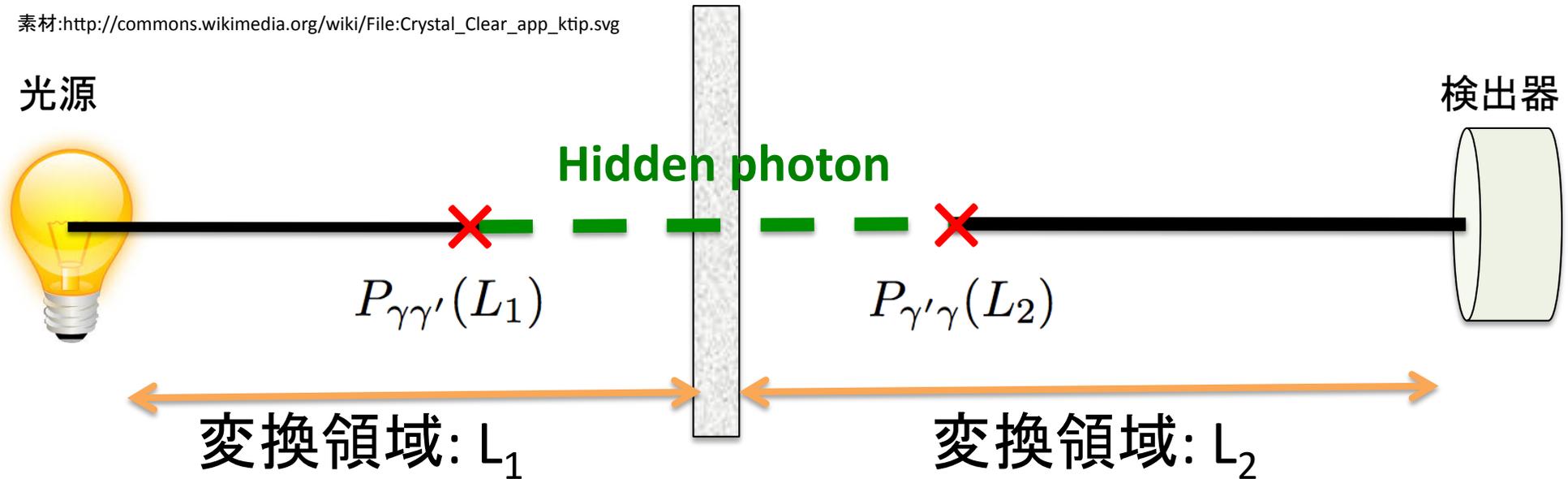
$$P_{\gamma\gamma'}(z) = 4\chi^2 \sin^2 \left( \frac{m_{\gamma'}^2}{4\omega} z \right)$$

Coupling constant      Hidden photon mass  
Photon energy

# LSW実験 (1 photonの場合)

LSW="Light shining through a wall"

素材:[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crystal\\_Clear\\_app\\_ktip.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crystal_Clear_app_ktip.svg)



Hidden photonはphoton以外とcouplingしないので壁を透過出来る

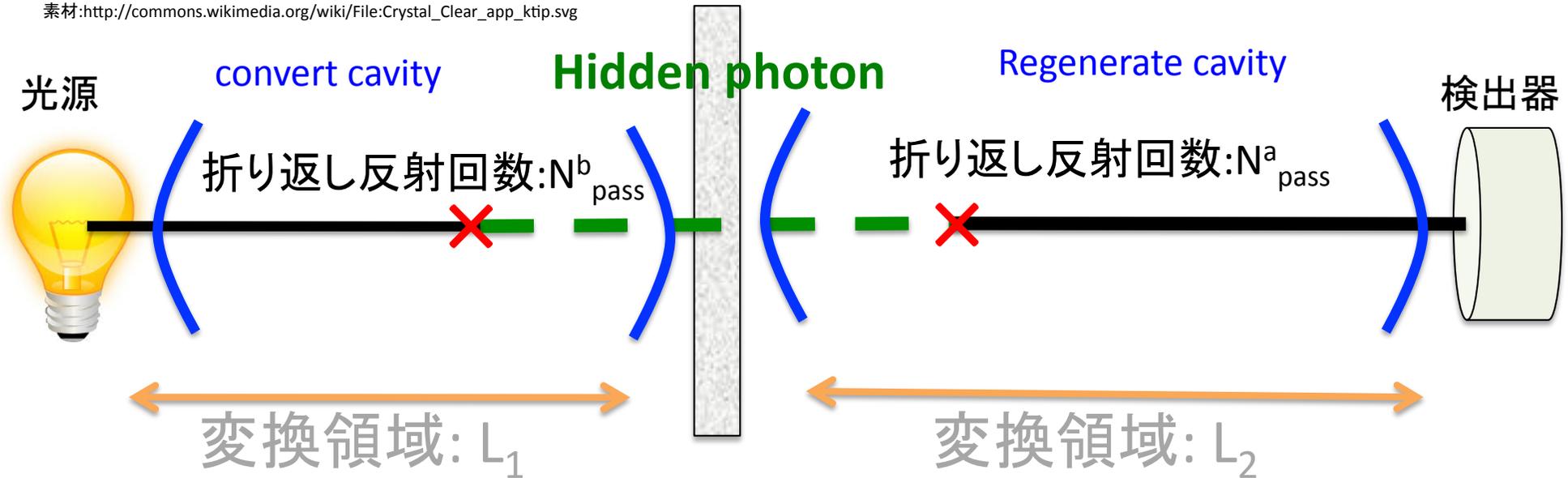
$$P_{trans} = P_{\gamma\gamma'}(L_1)P_{\gamma'\gamma}(L_2)$$

$$= 16\chi^4 \left( \sin^2 \left( \frac{m_{\gamma'}^2}{4\omega} L_1 \right) \sin^2 \left( \frac{m_{\gamma'}^2}{4\omega} L_2 \right) \right)$$

この式から、Lが大きければ大きいほど小さなmassを探索出来る事がわかる<sup>60</sup>

# LSW実験 ( $N_0$ photons + Cavityの場合)

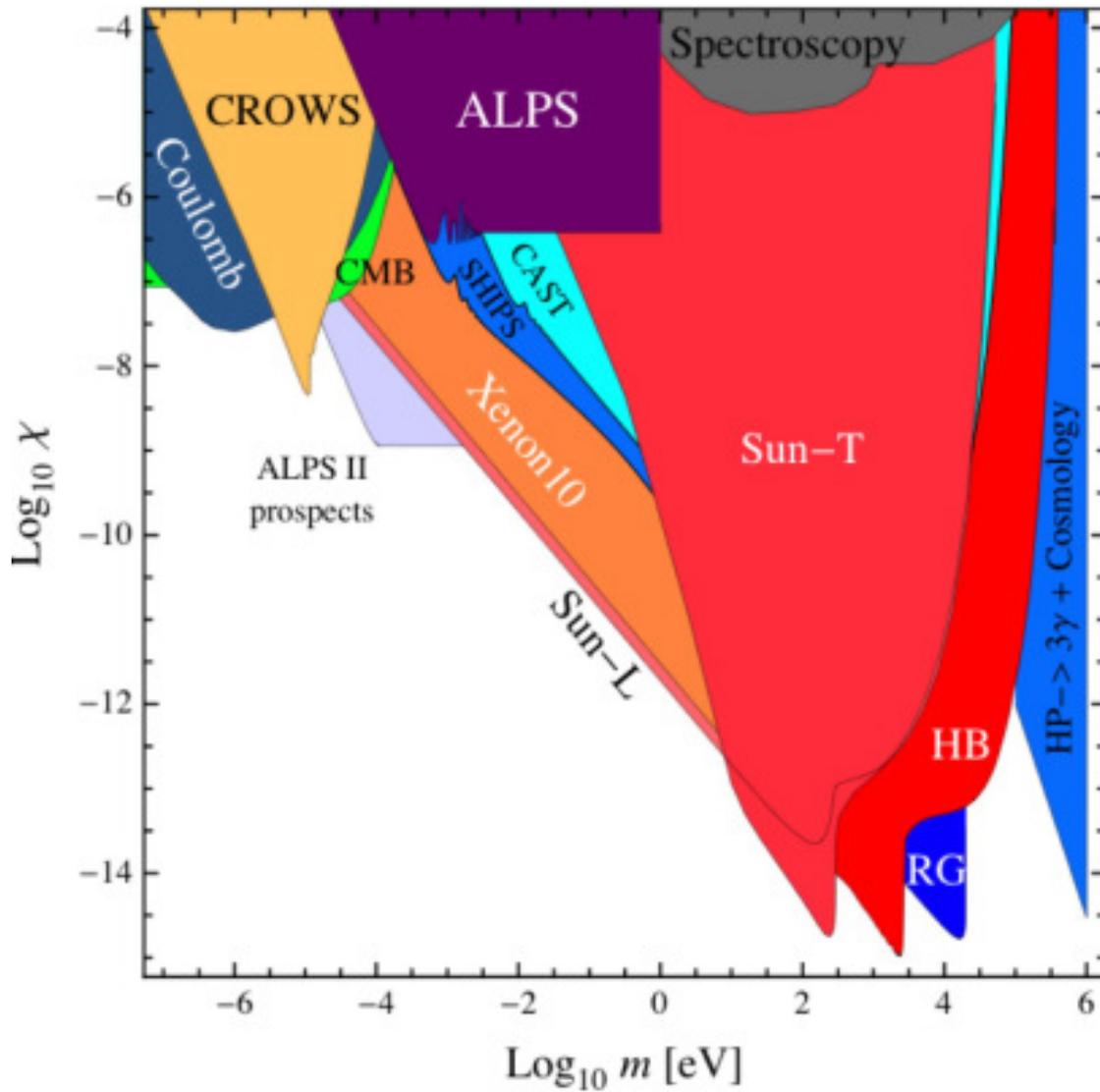
素材:[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crystal\\_Clear\\_app\\_ktip.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crystal_Clear_app_ktip.svg)



$$P_{tot} = \underbrace{\eta}_{\text{Efficiency}} N_0 \left[ \frac{(N_{pass}^b + 1)(N_{pass}^a + 1)}{4} \right] P_{trans}$$

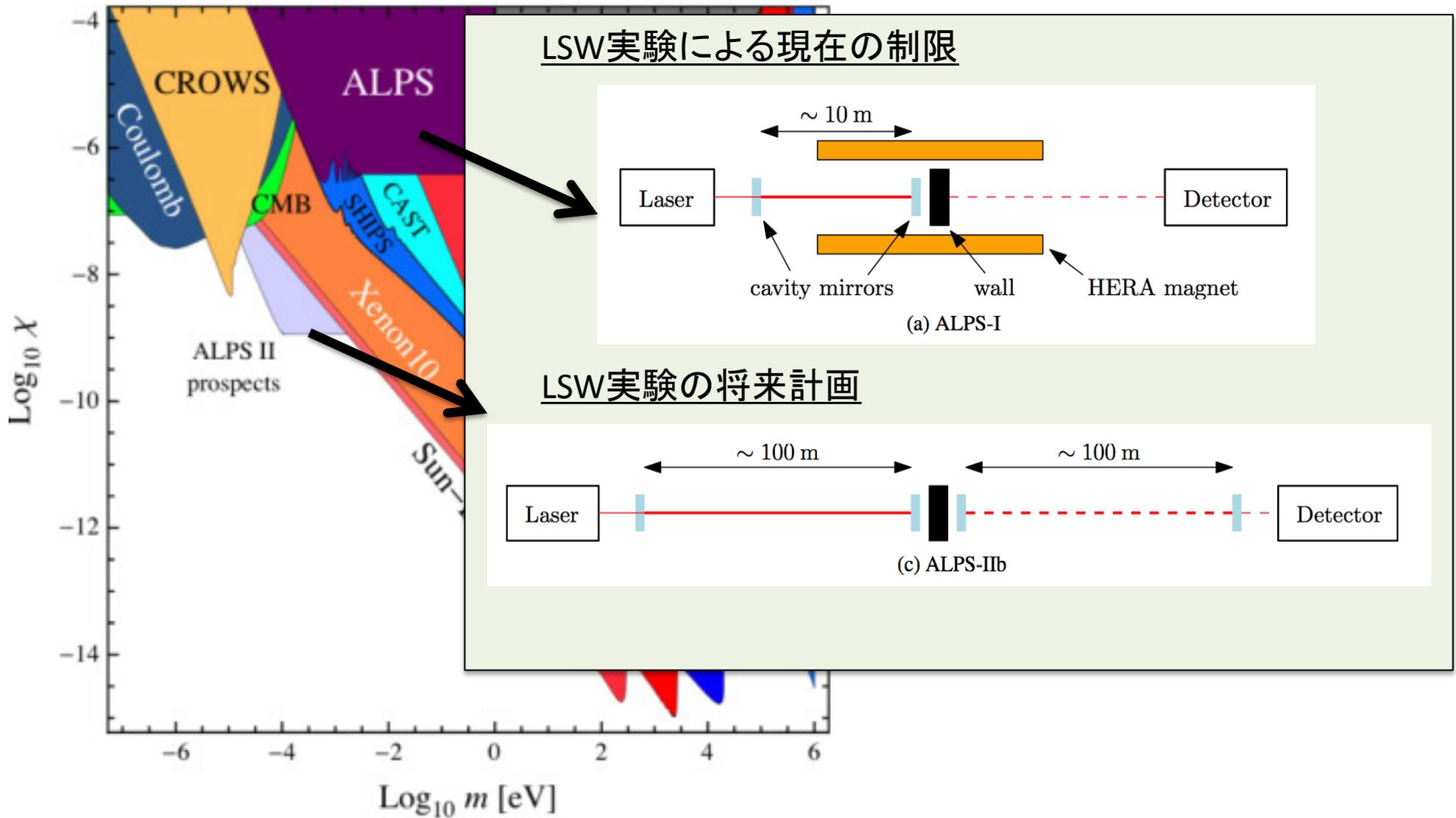
$P_{tot} \propto \chi^4$ 式から、検出器の感度、 $N_0$ , 折り返し反射回数が大きいほど小さな $\chi$ が探索出来る事がわかる

# これまでのLimit



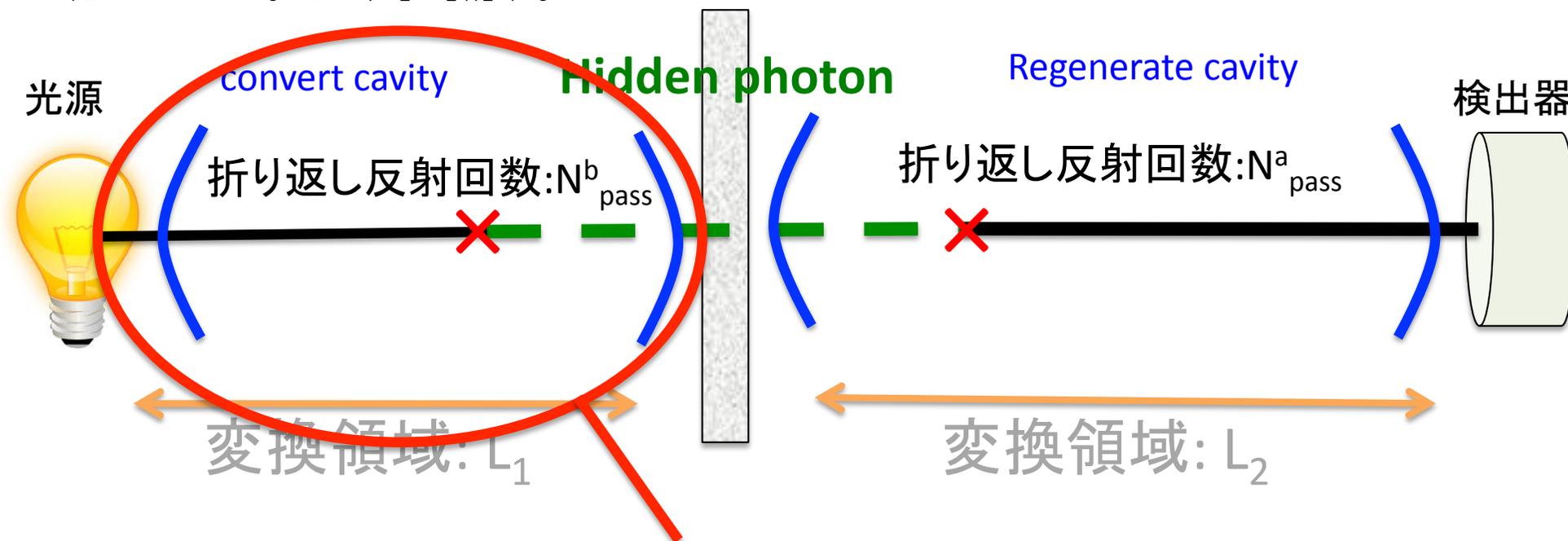
<http://arxiv.org/abs/1501.07292>

# これまでのLimit



# 本研究の着眼点

素材:[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crystal\\_Clear\\_app\\_ktip.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crystal_Clear_app_ktip.svg)



従来の実験が変換領域~100mに対して

“重力波実験のarmのcavityをconvert cavityとして  
利用すればより深いmassが探索出来るはず”

# 共振器スペックの比較

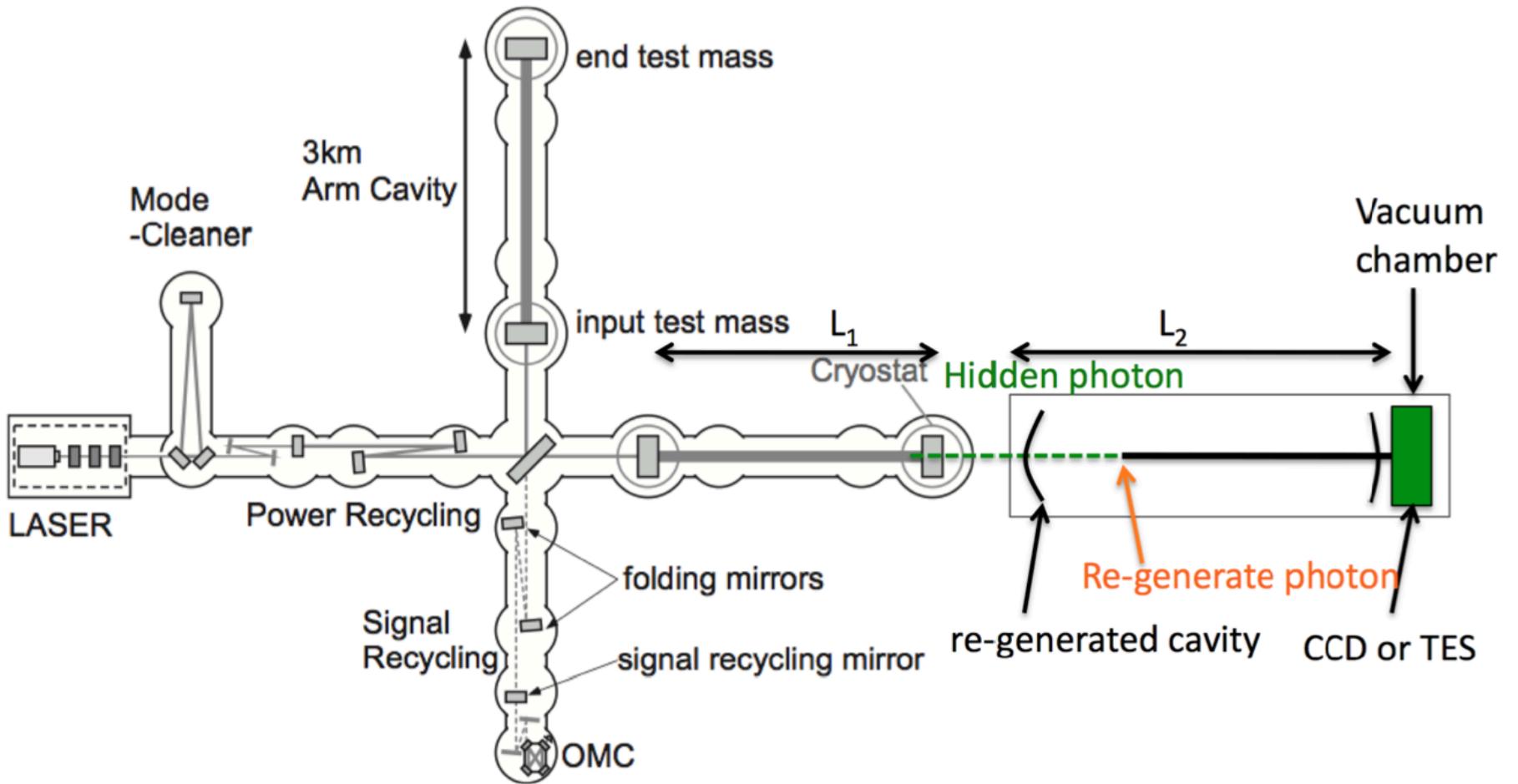
Project	ALPS-IIb	AdvLIGO	KAGRA	ET
Wavelength	1064nm	1064 nm	1064 nm	1064 nm
Power	30 W	5.2 kW	825 W	500 W
Finess	7859	450	1550	-
#reflection	5000	287	987	-
Arm power	150 kW	745 kW	410 kW	10 MW
base line	100 m	4000 m	3000 m	10 km

↑  
LSWを用いたHidden photon  
探索の次世代計画

基線長が長い分massの探索領域が広い  
共振器のパワーも数倍高く $\chi$ の探索も十分可

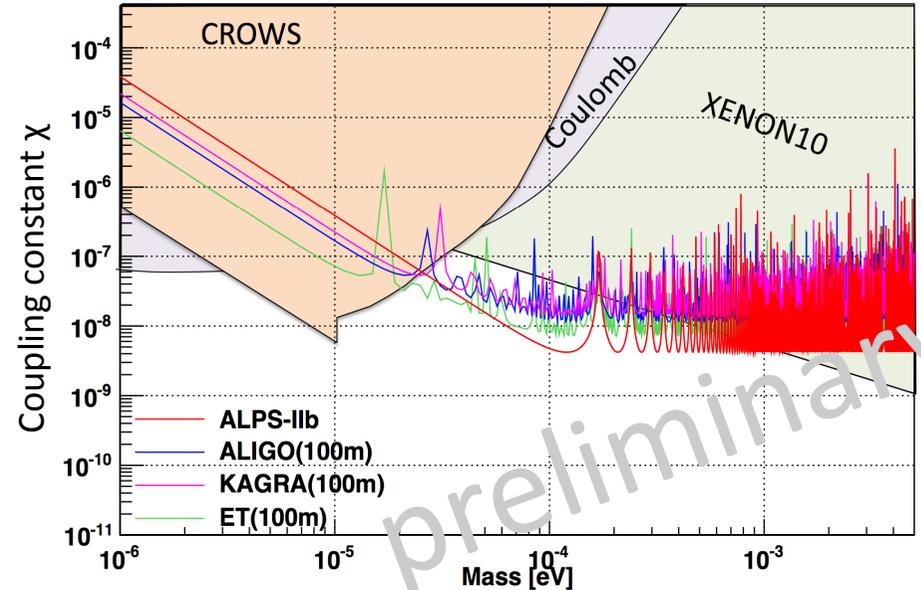
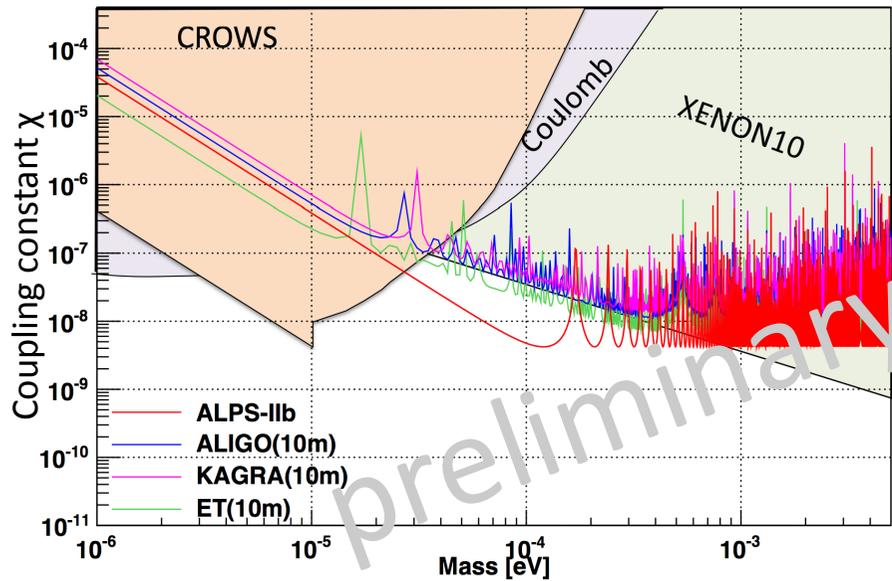
} Hidden photon探索に十分  
耐え得る性能を持つ

# 設置例



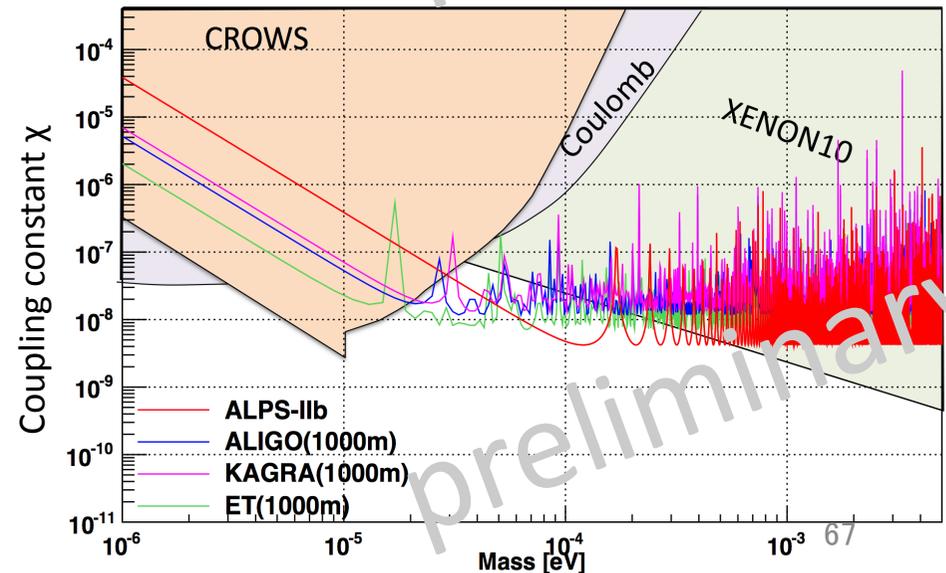
検出器の設置場所は岩盤の外でも可能

# 2 sigma sensitivity curve (Regeneration cavity無し)



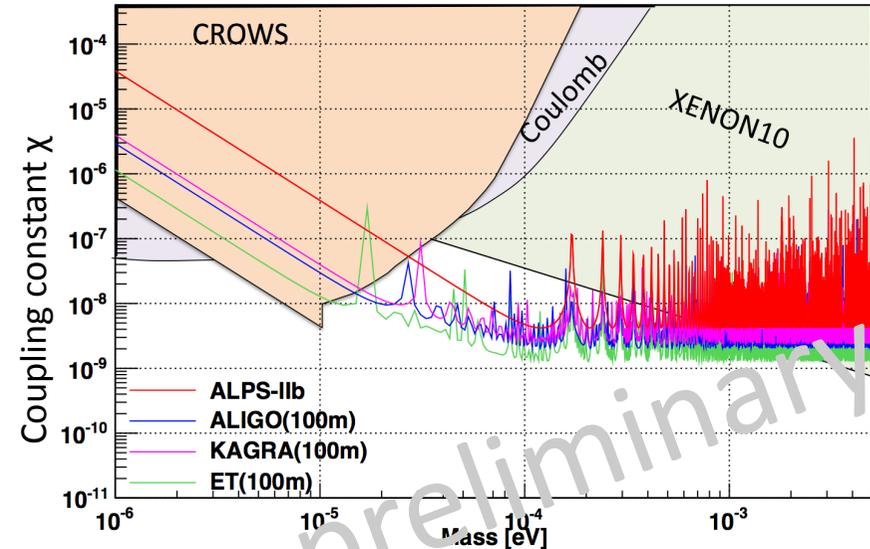
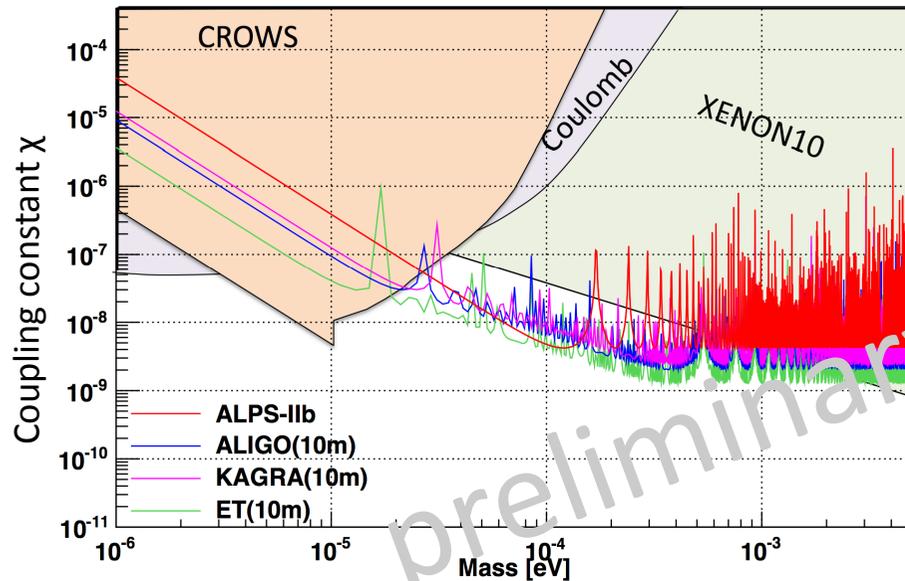
Parameter	TES
Efficiency $QE$	0.75
Detector noise $DC$	$0.000001s^{-1}$

従来実験を超える制限を  
与える事が可能



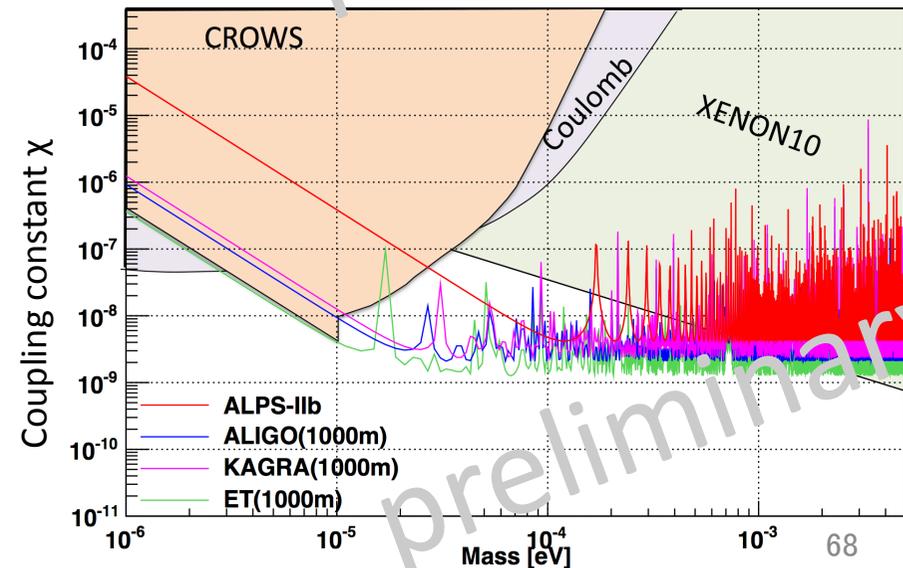
# 2 sigma sensitivity curve

## Regeneration cavity有り(N=1000)



Parameter	TES
Efficiency $QE$	0.75
Detector noise $DC$	$0.000001s^{-1}$

将来計画を超える  
感度が期待出来る



# 4部 まとめ

- LSW実験と呼ばれるHidden photon探索実験が計画されている
- 従来のLSW実験の共振器の代わりに、基線長の長い重力波Cavityを用いる事でより深いmassを探索出来る
- Regeneration cavityを使わなくても従来実験のLimitを超える探索が可能
- Regeneration cavityを用いれば将来計画を超える感度を達成する事が可能