

# QUIET実験

田島治 (KEK IPNS)

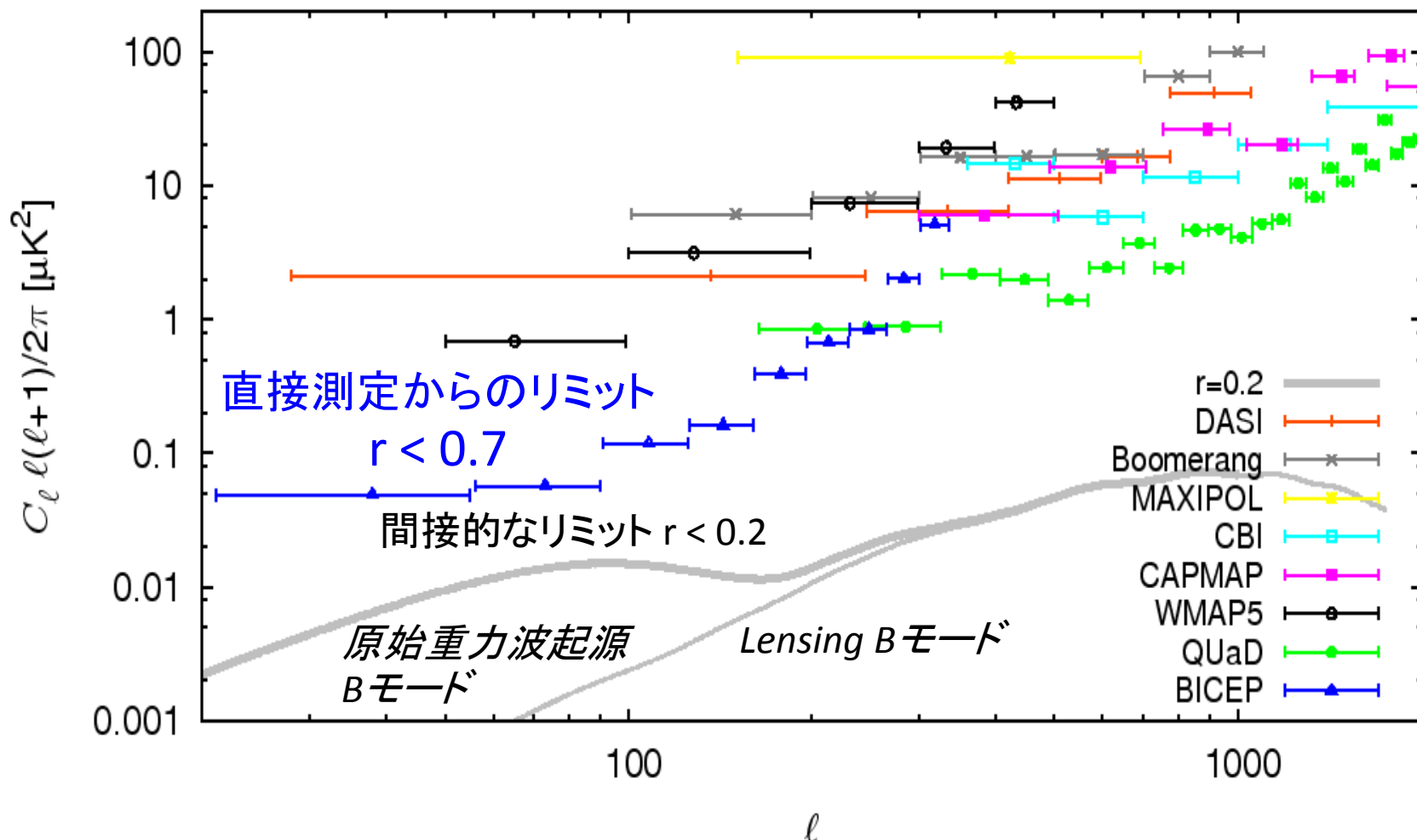
QUIET collaboration

# Physics Motivation

**世界で最初にBモード偏光を捕えたい！**

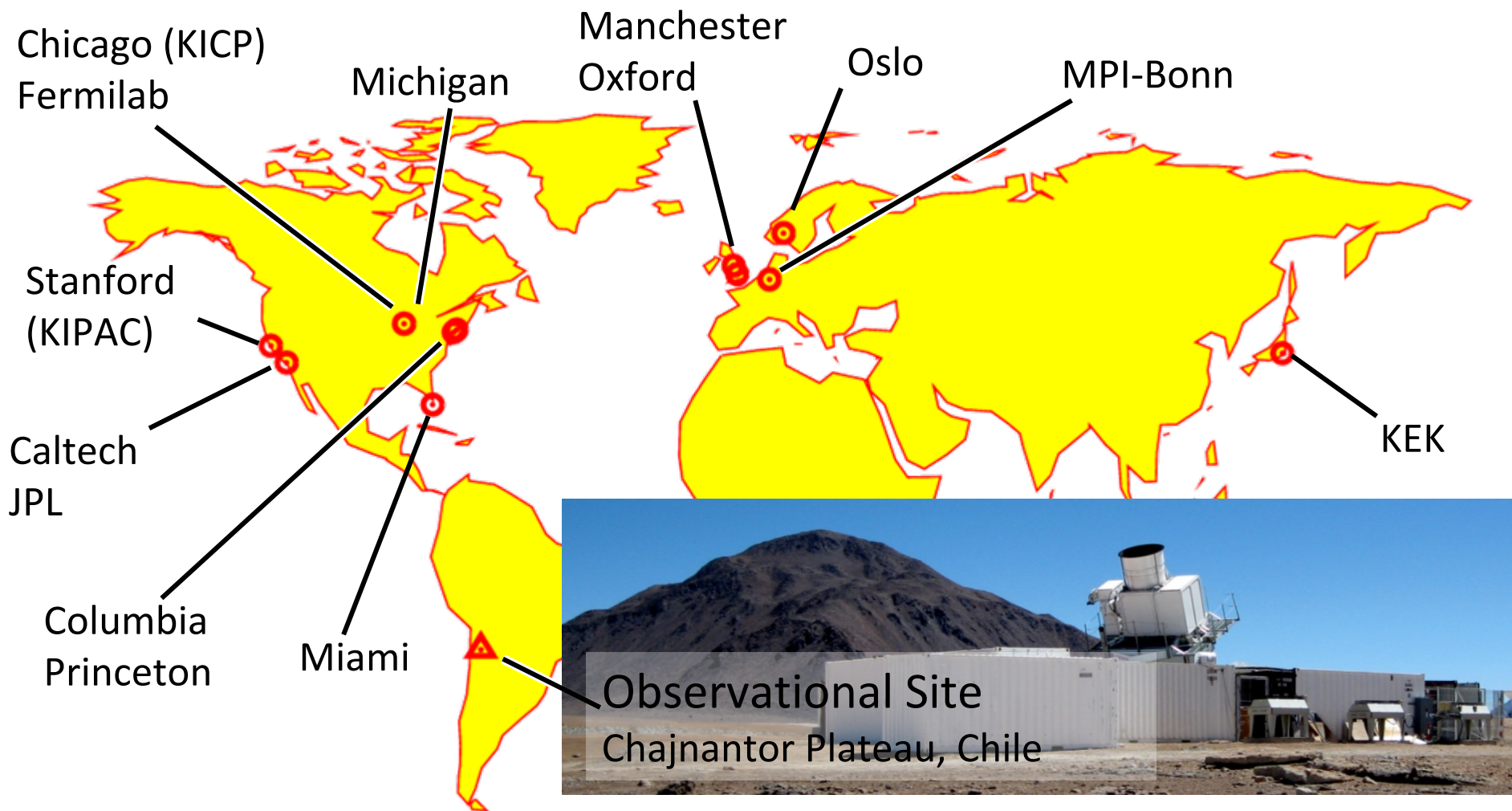
**原始重力波起源の**

# 様々な実験の現状



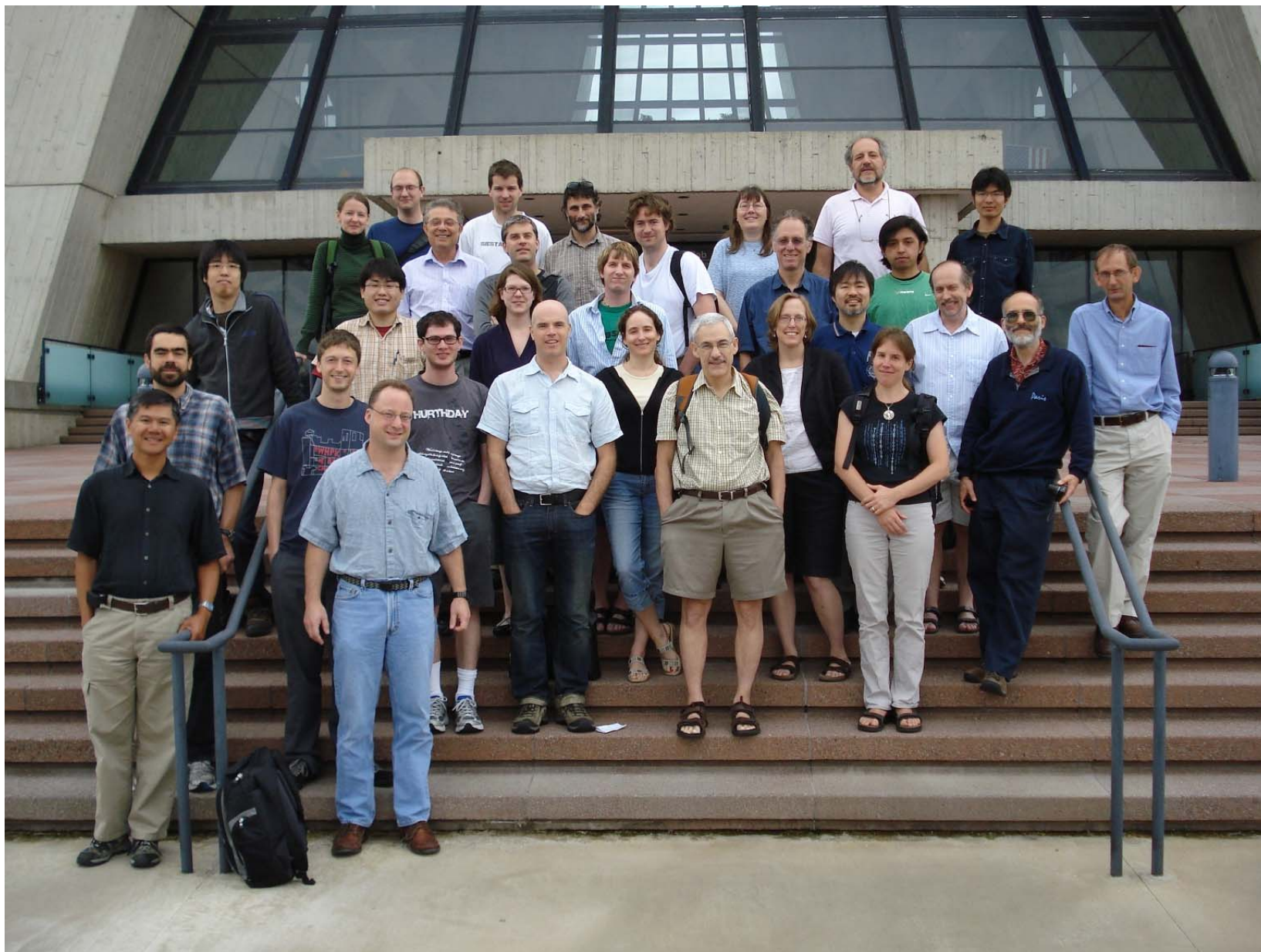
直接測定リミットをガンガン削っていったって、  
やがて最初に発見するのがQUIET実験

# QUIETコラボレーション



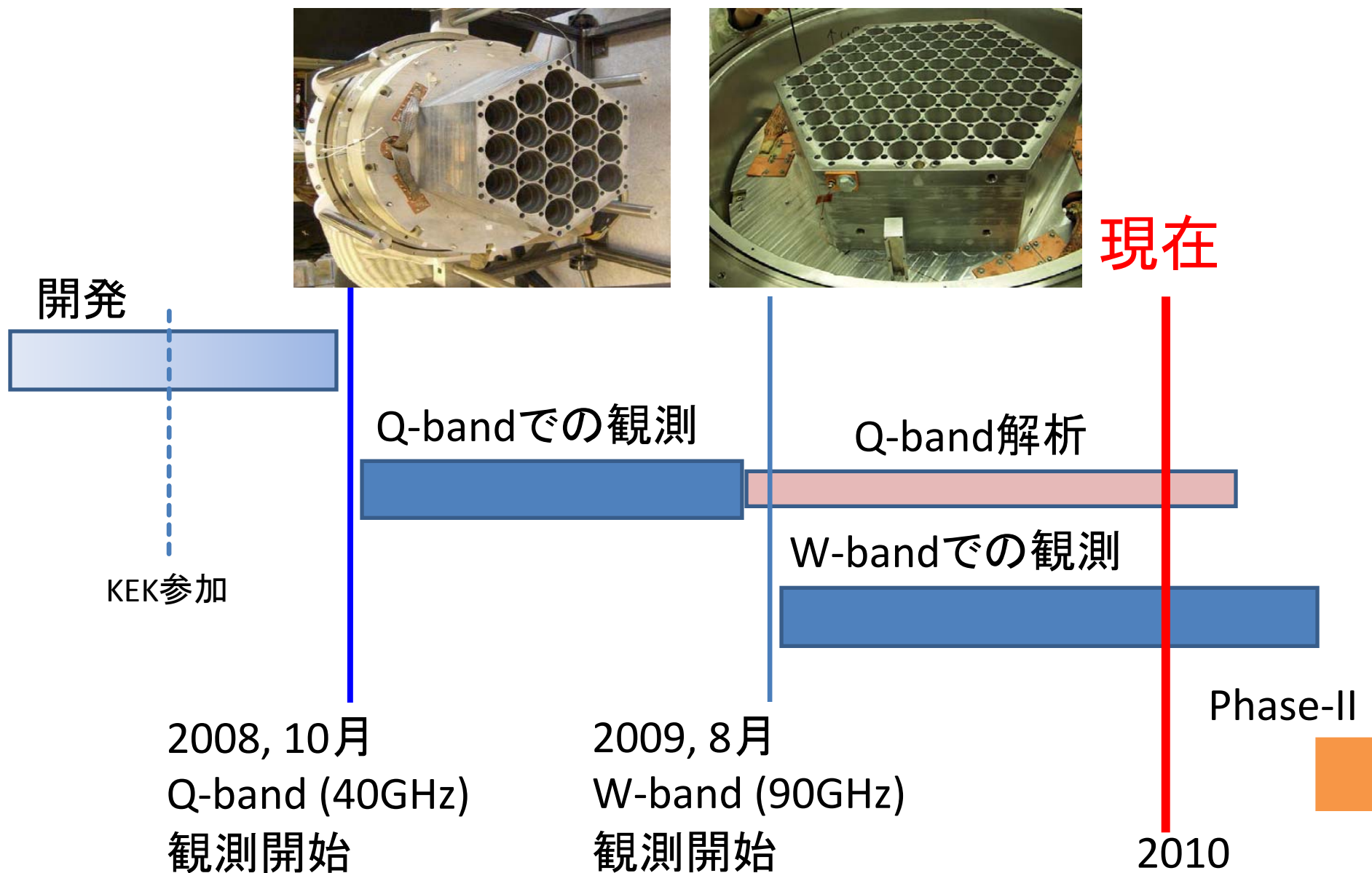
5 countries, 14 institutes, ~35 scientists

# Collaboration meeting at Fermilab, June 2009





# おおまかな歴史



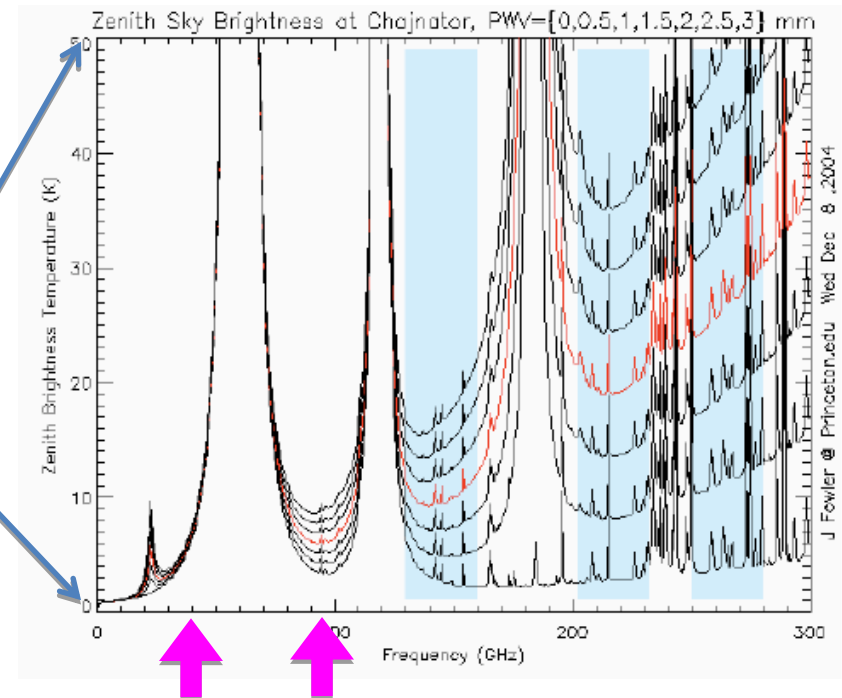
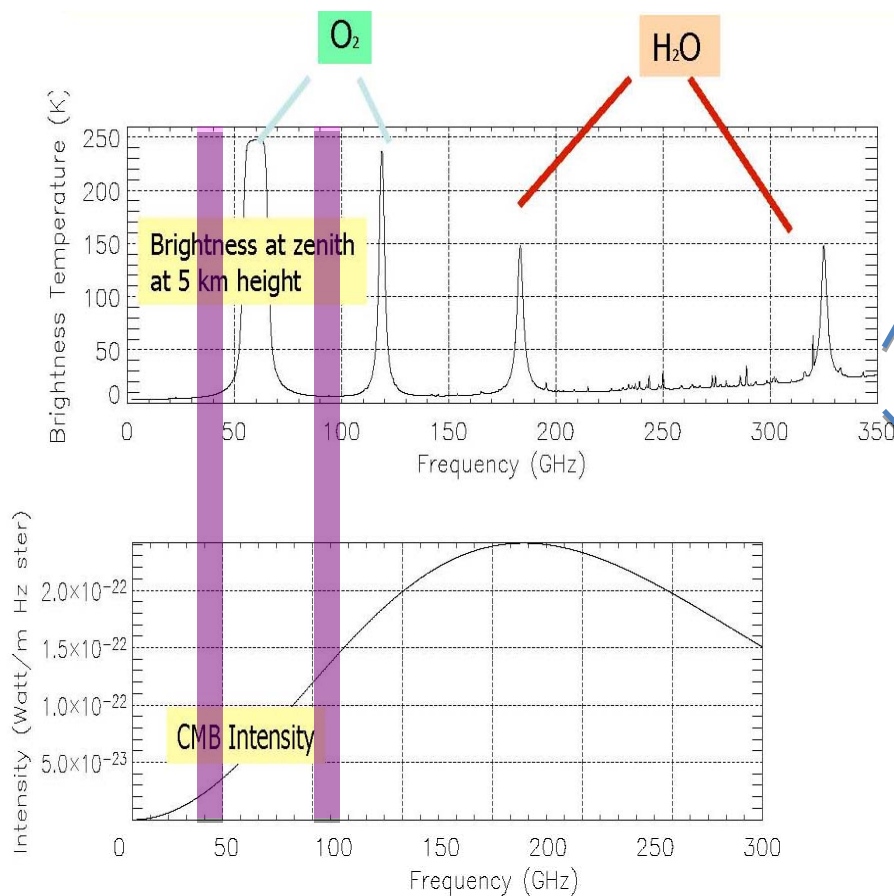
# 観測サイト

ALMAと同じ場所

- チリ, アタカマ高地にあるChajnantor山
  - 5,080 m (酸素濃度は海面レベルの半分)
  - 非常に乾燥した大気
  - San Pedro de Atacama (2,400m) から~1時間, 毎日通勤可
  - 年間を通じて行ける好立地条件！
  - 365日24時間観測可能



# なぜこんなところで観測するかというと



- 大気の輻射熱は周波数依存大
- 酸素、水の吸収線の間をぬって観測
- Tailの寄与があるので、  
空気が薄く、乾燥した場所が良い

Chile Atacamaは地上で最もCMB観測に適した場所！  
QUIETではQ-band(40GHz帯)とW-band(90GHz帯)を観測する



# 観測装置について

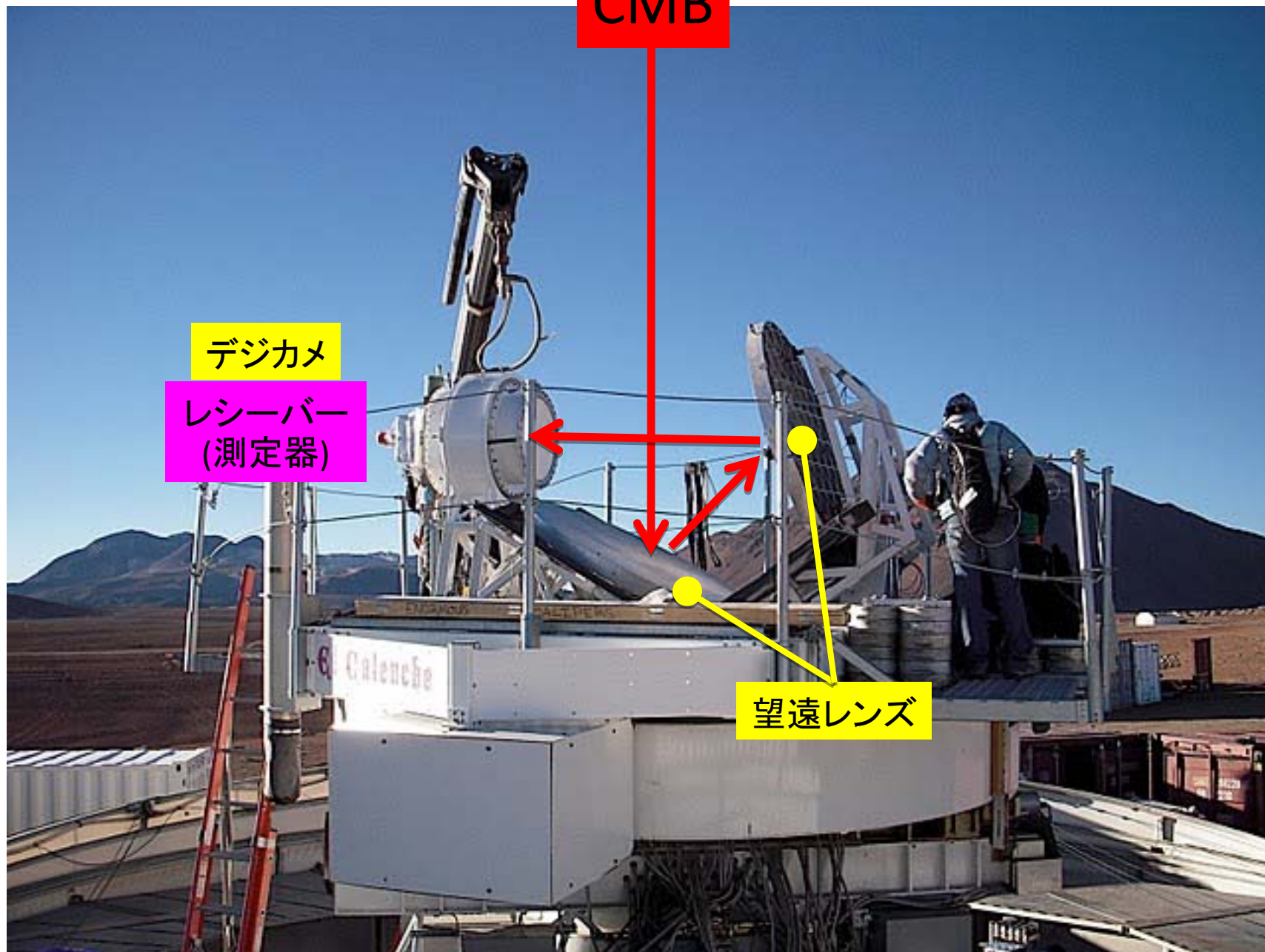


CMB

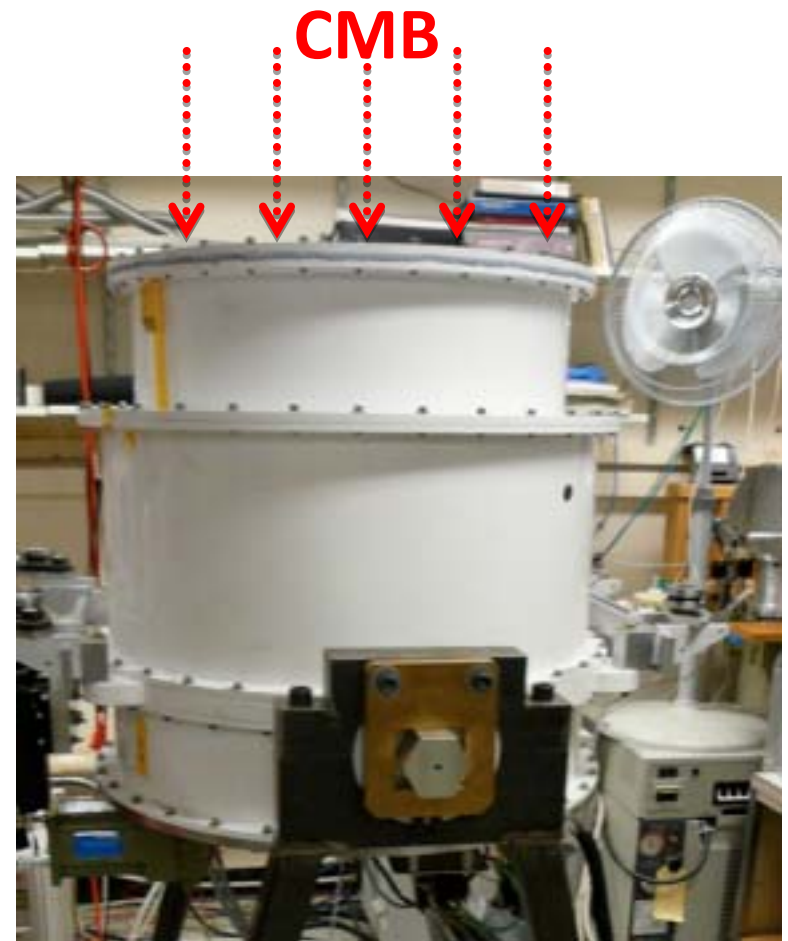
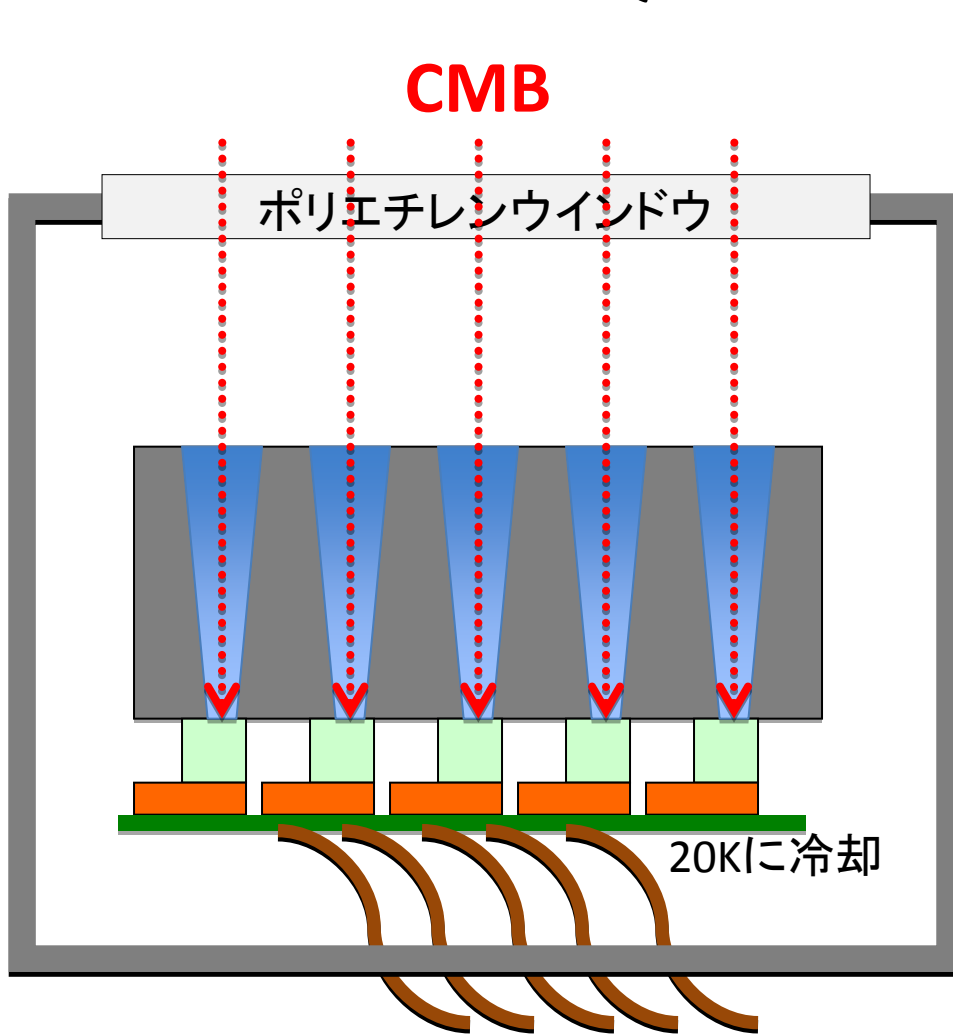
デジカメ

レシーバー  
(測定器)

望遠レンズ



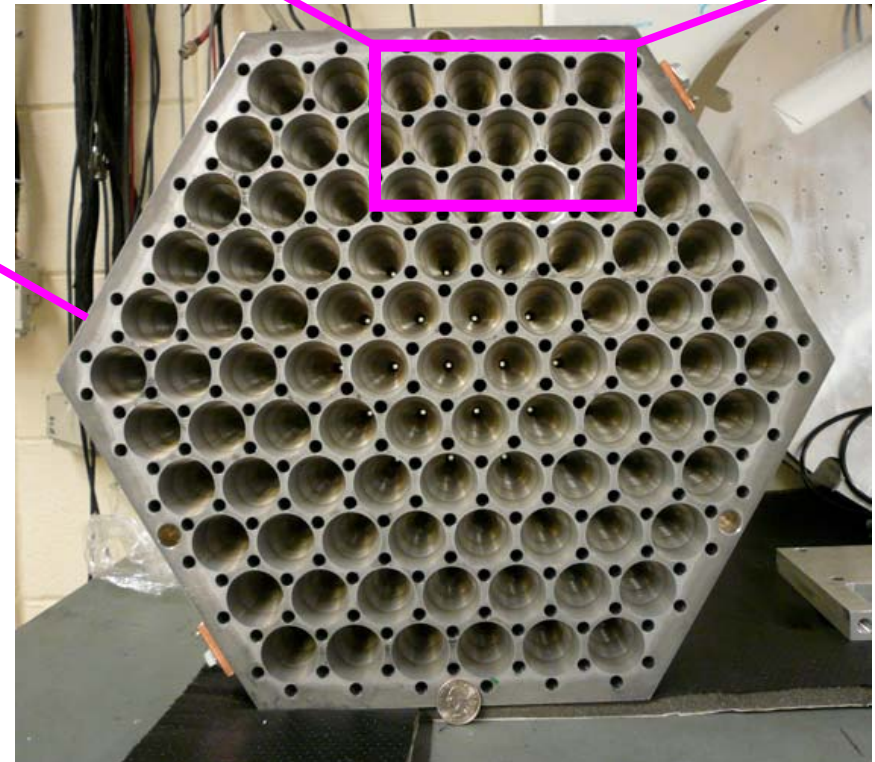
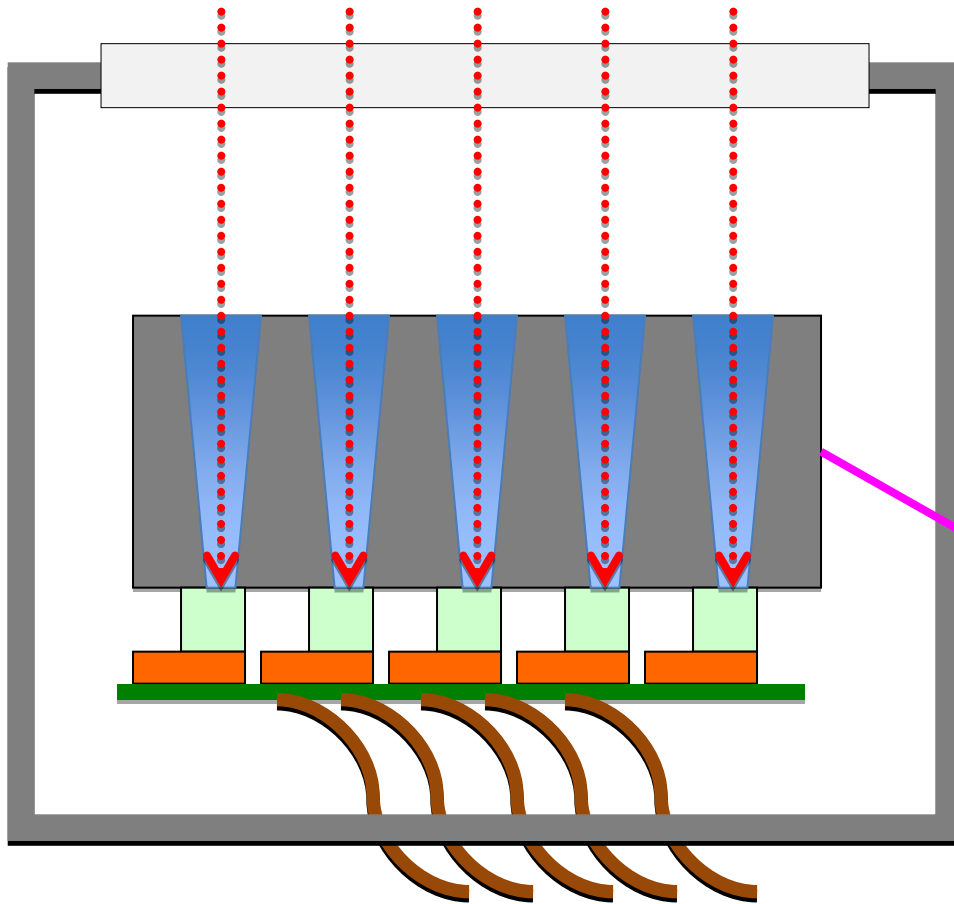
# QUIET Receiver





# Platelet Array (horn)

**CMB**

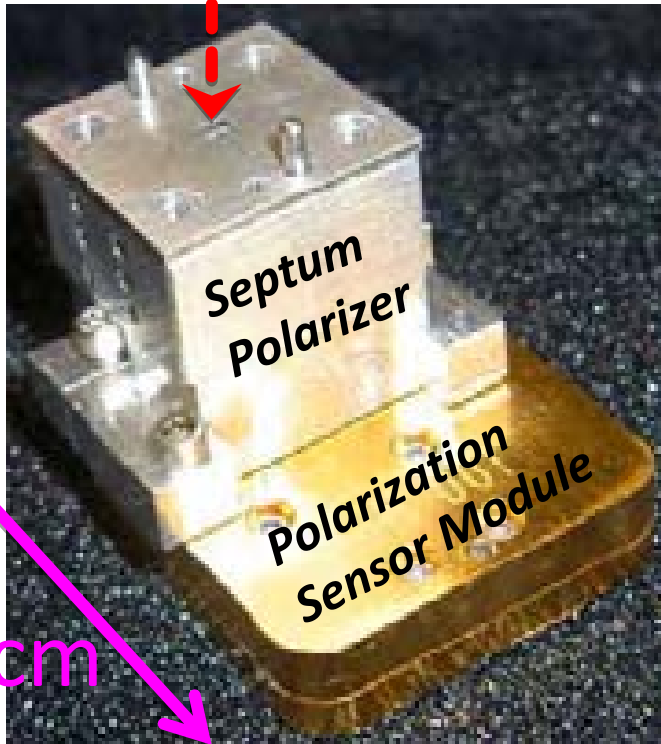


# 検出器

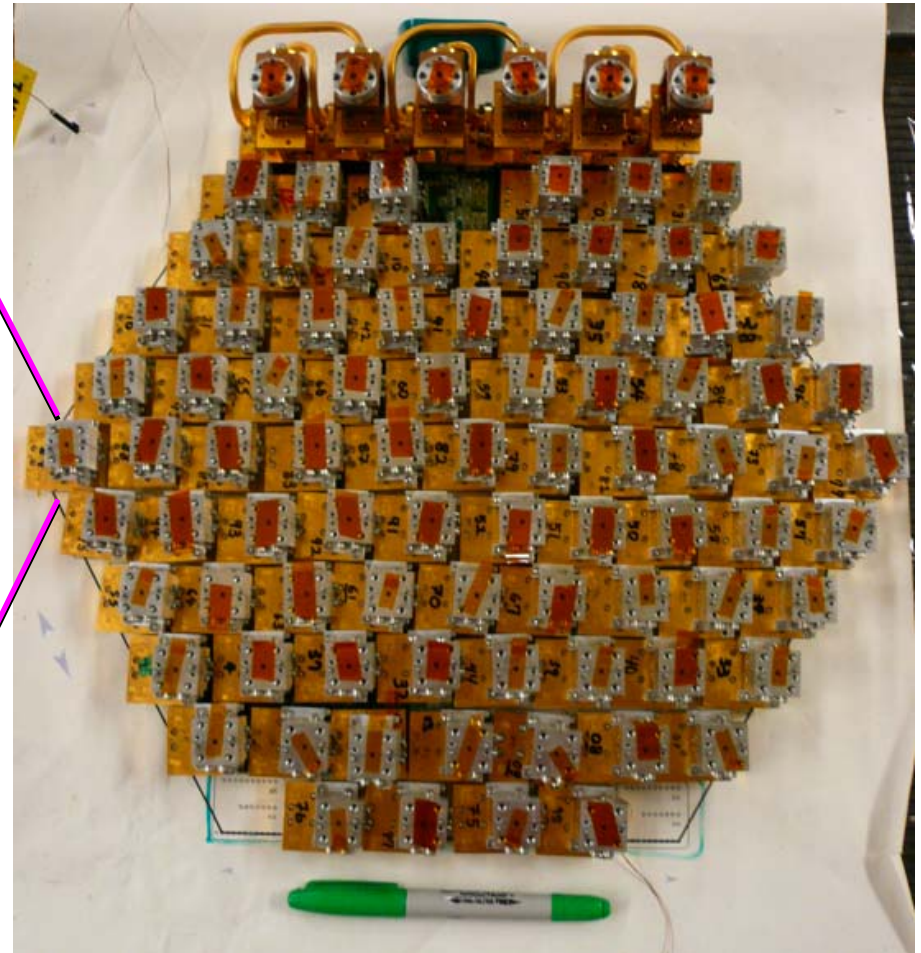
## Septum Polarizer & Polarization Module

### 90画素偏光検出器

集光されたCMB



~3cm





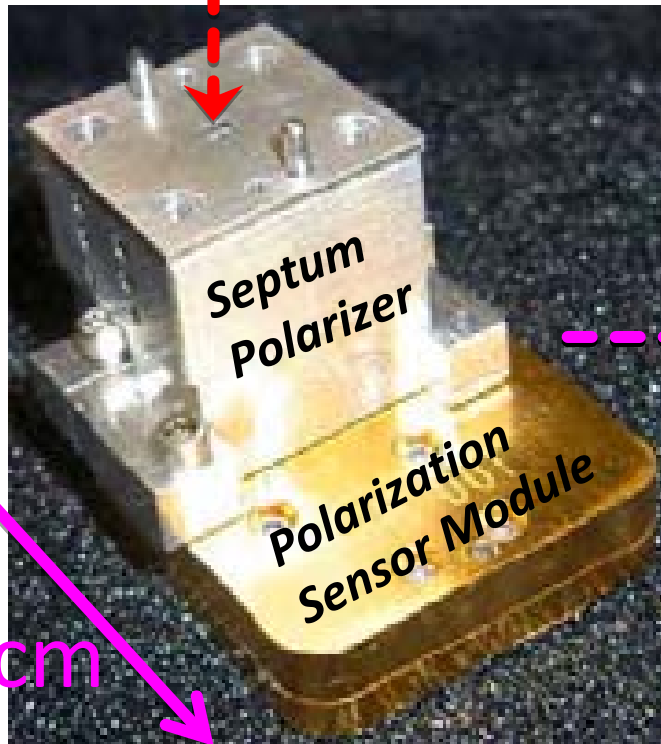
# CMB偏光のシグナルは、 とても、とても、とても....小さい

- QUIETを例に比較
  - Eモード偏光シグナル  $\sim 0.00002 \text{ mV}$
  - HEMTアンプの $1/f$ ノイズ( $f_{\text{knee}} \sim 1 \text{ kHz}$ )  $\sim 1 \text{ mV}$
  - HEMTアンプのwhite noise  $\sim 0.01 \text{ mV}$
- White noiseだけなら露光時間(観測時間)を長くすれば良いが、巨大な $1/f$ ノイズは邪魔  
(もちろんwhite noiseが小さいことも重要)
- ものすご〜〜〜く $1/f$ ノイズの小さい検出器を開発
- $1/f$ ノイズを抑制する工夫が必要 **QUIETの売りはココ!!**

# 検出器

## Septum Polarizer & Polarization Module

集光されたCMB

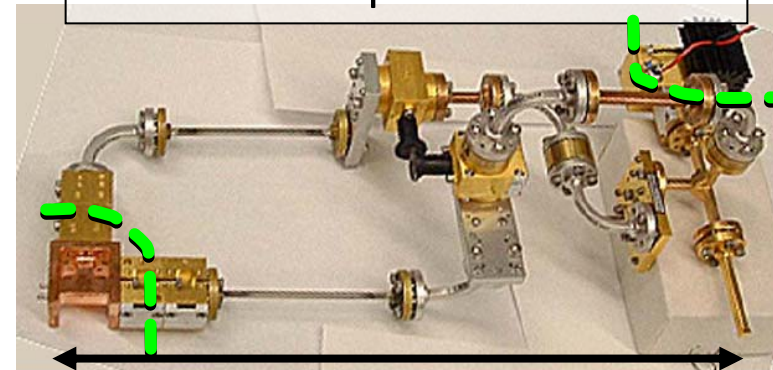


基本原理は成熟しているが、  
最新の検出器！！

ここまで、電波の世界

この先、電気回路の世界

c.f. CAPMAP polarimeter



7~8年前の実験と比べて1/10サイズの検出器を開発  
→検出器の数(統計)が容易に増やせる

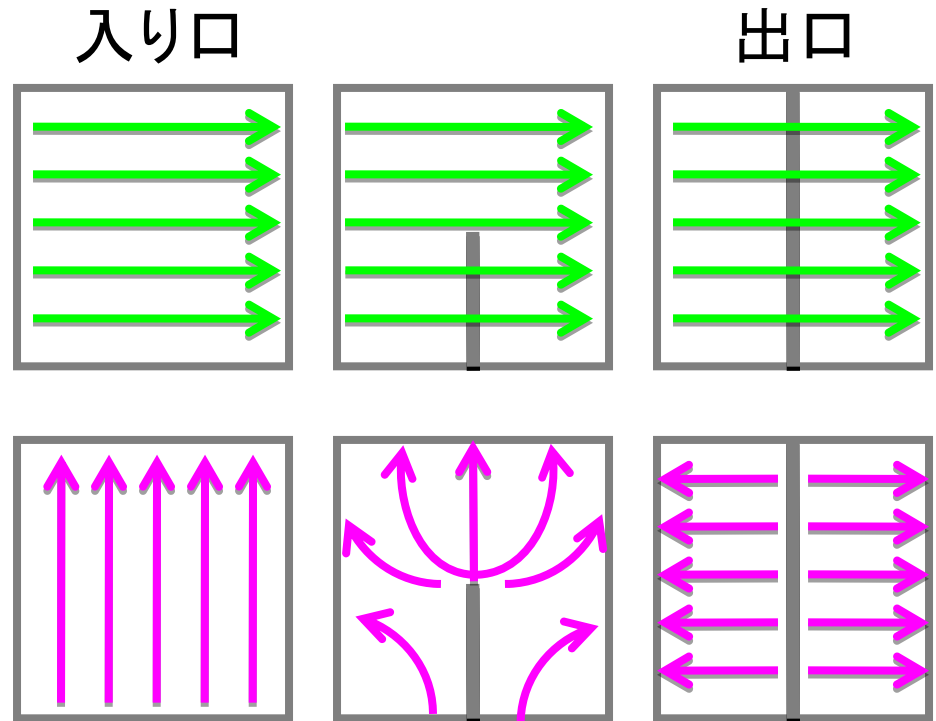
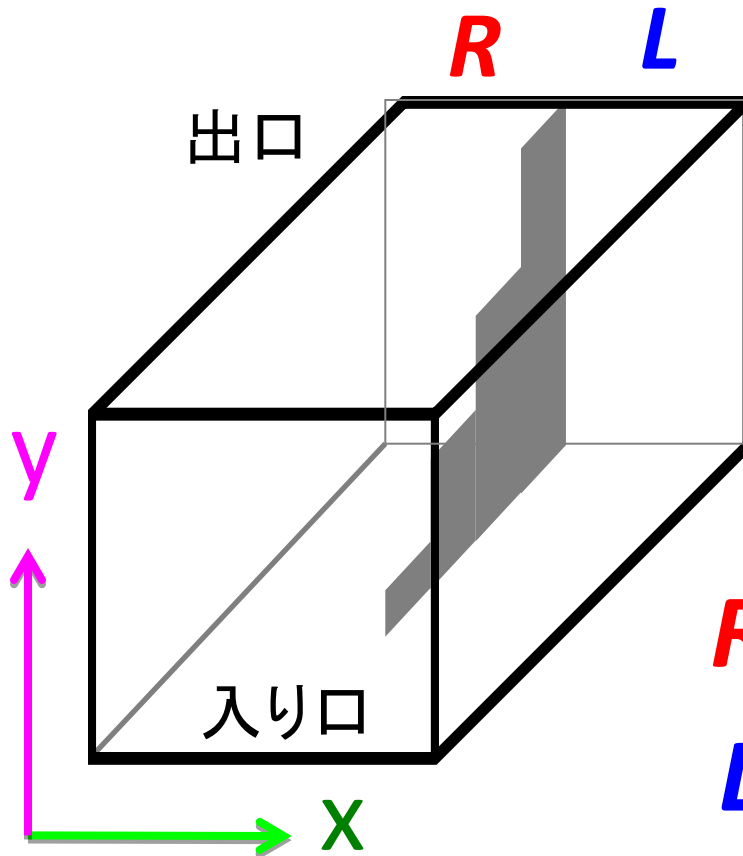
こういった原理検証を行なったこともQUIET phase1の大きな成果

~30cm

まだ、電波の世界

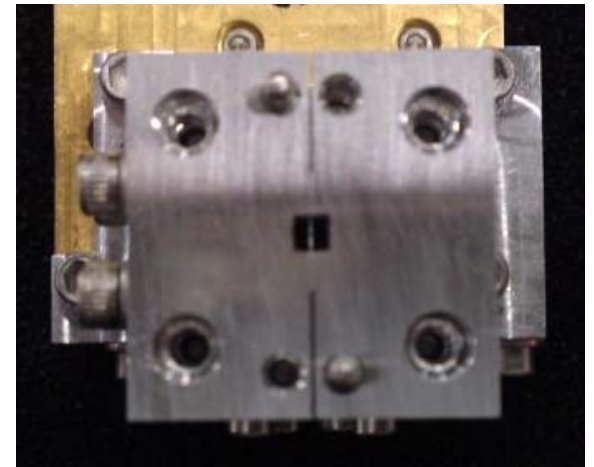
# Septum Polarizer (OMT)

- 電場の縦成分を横方向に変える
- 2つの出口で横に変わるphaseが逆
- 横向きの電界を持った電磁波 L,Rが  
2つの出口からでてくる



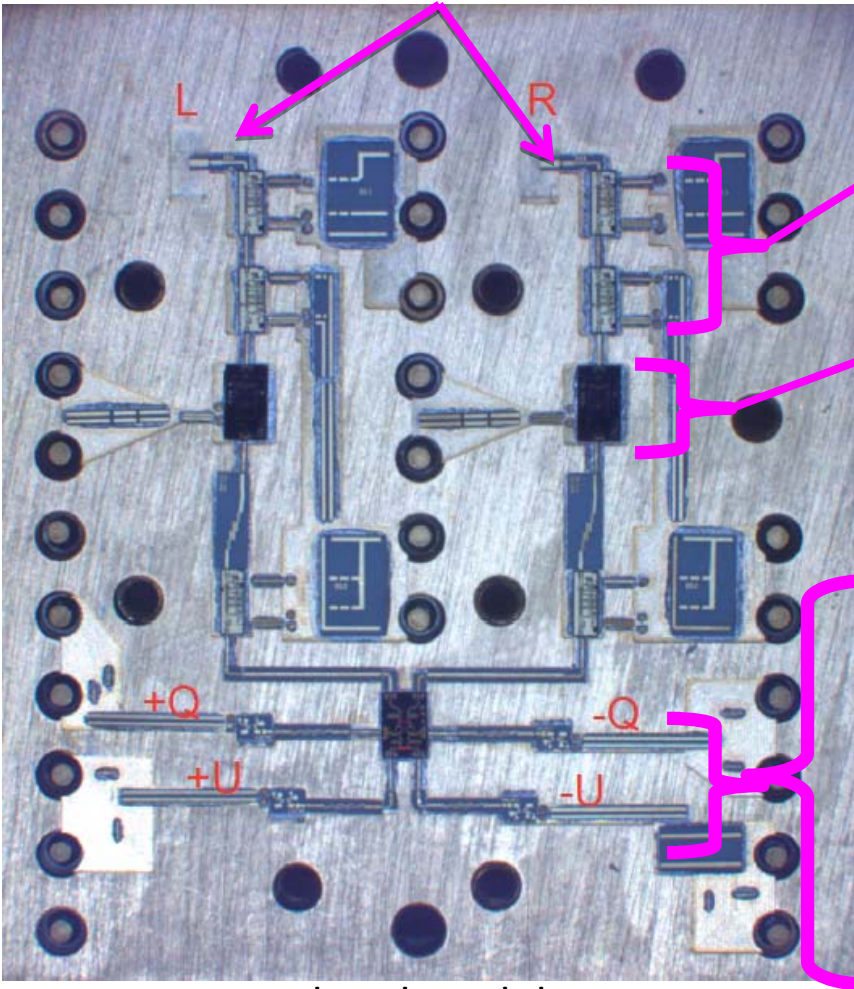
$$R = E_X - iE_Y$$

$$L = E_X + iE_Y$$

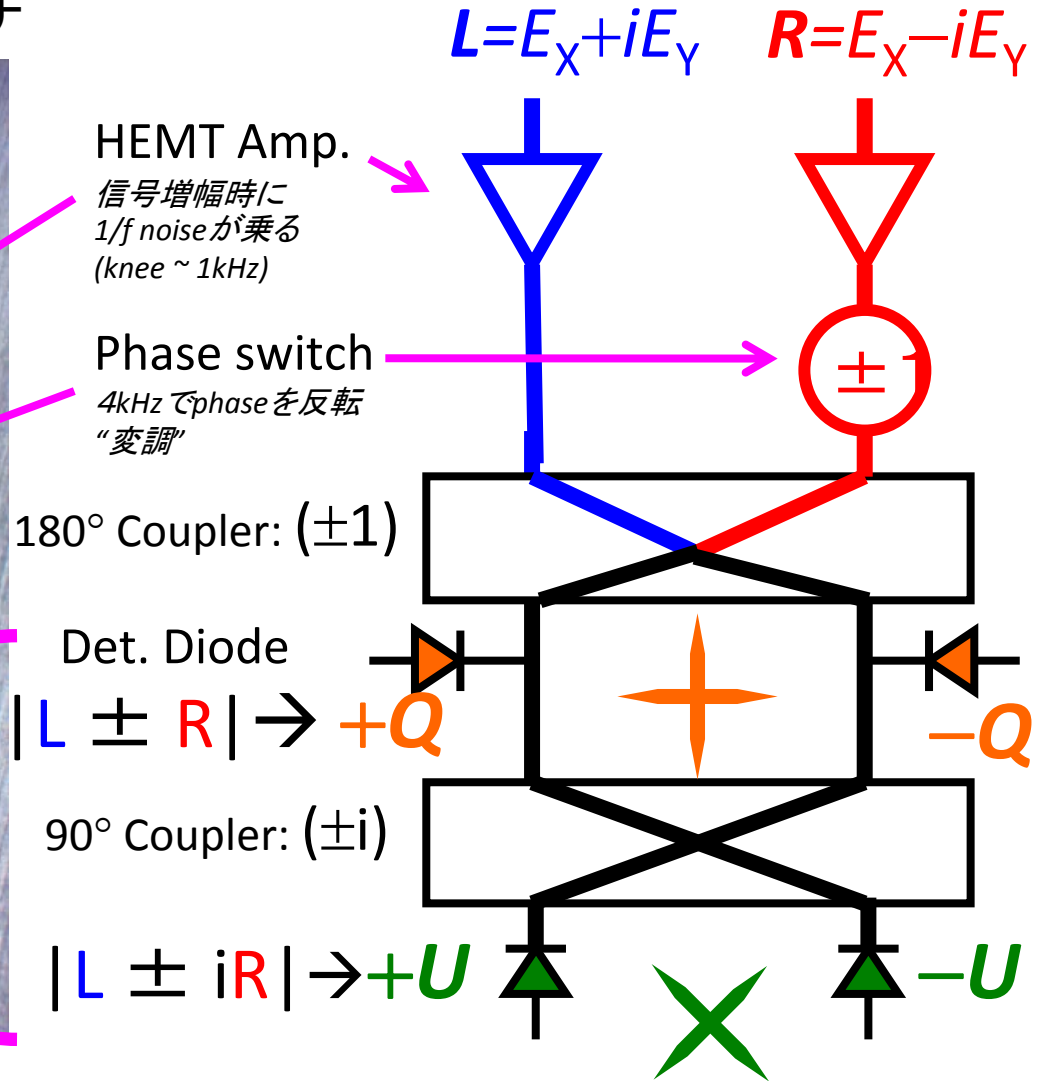


# Polarization Module

電磁波(L, R)をピックアップするアンテナ

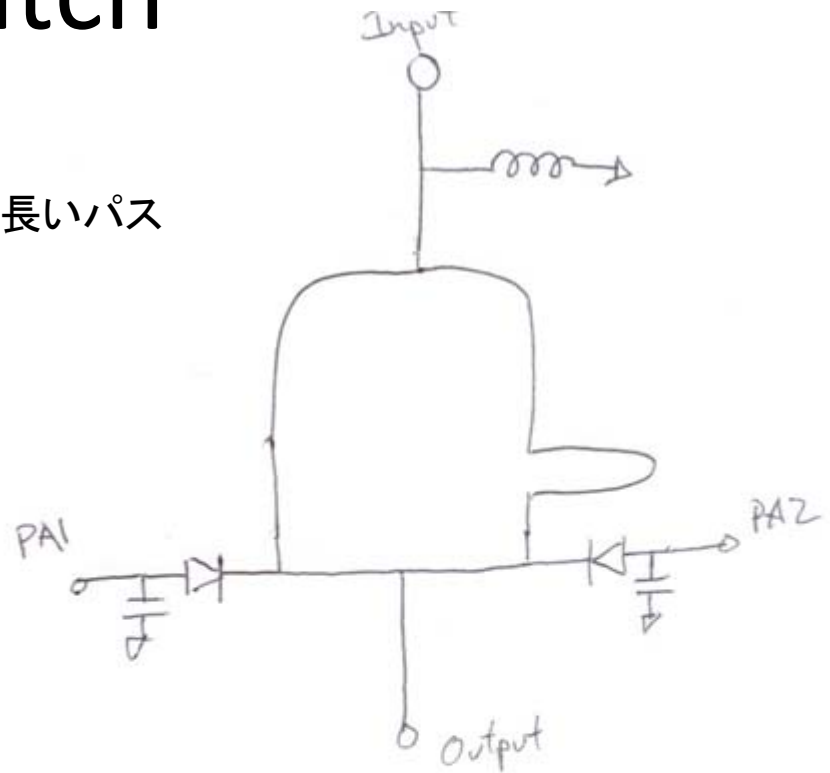
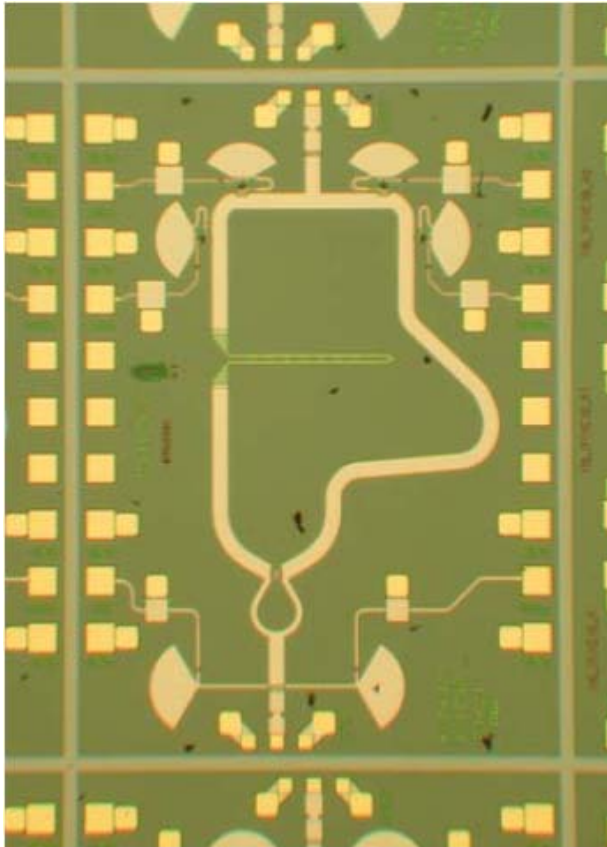


W-band module

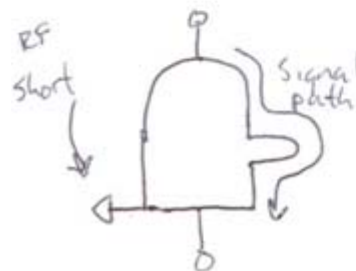


# Phase Switch

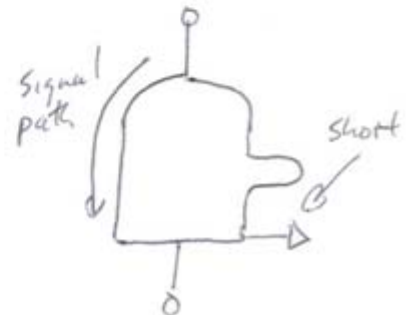
- 信号の流れるパスを切り替える  
一方が短いパス、もう一方が半位相分長いパス



When  $PA1 = +0.6V, \sim 1mA$   
Equivalent circuit is:



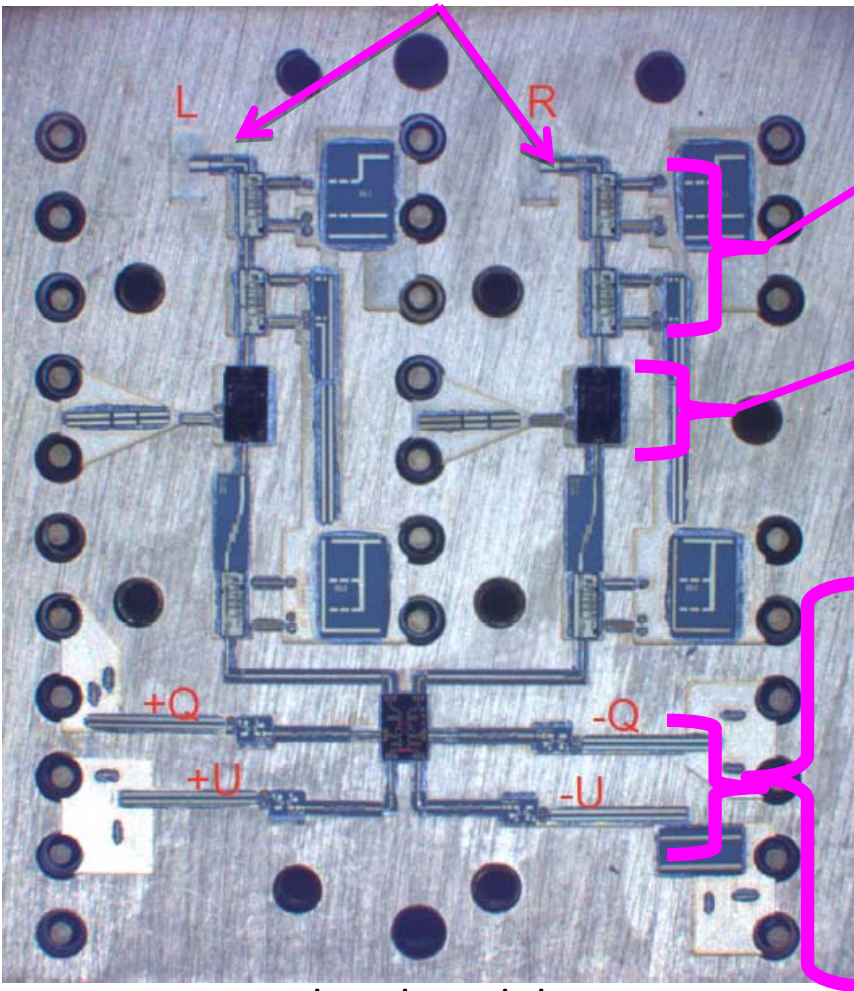
When  $PA2 = +0.6V, \sim 1mA$   
Equiv circuit is :





# Polarization Module

電磁波(L, R)をピックアップするアンテナ



W-band module

HMT Amp.

信号増幅時に  
1/f noiseが乗る  
(knee ~ 1kHz)

Phase switch

4kHzでphaseを反転  
“変調”

180° Coupler: ( $\pm 1$ )

Det. Diode

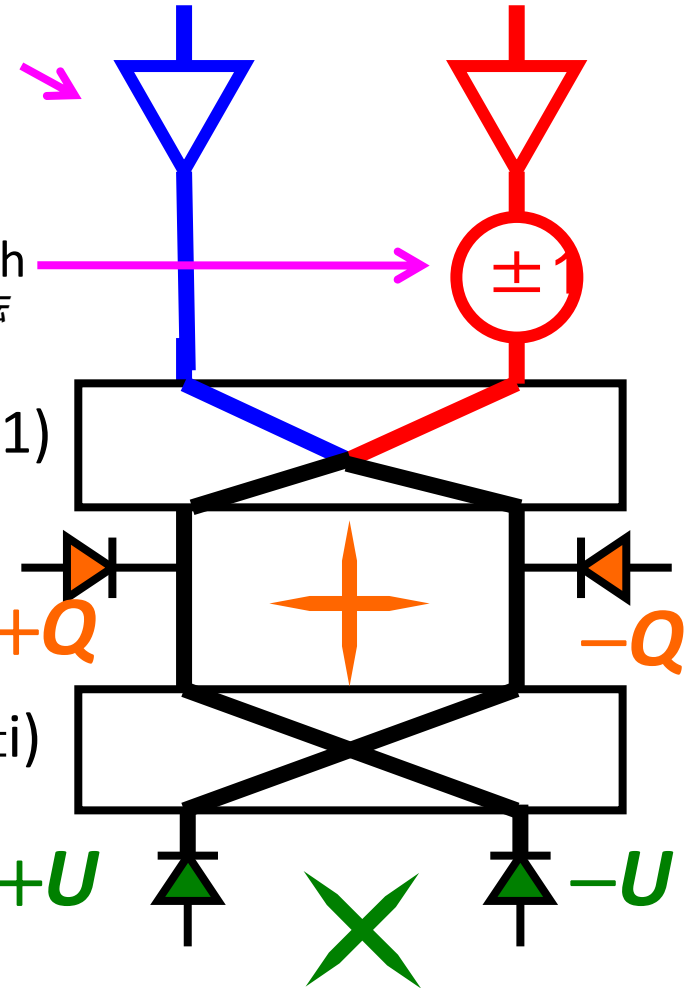
$(E_x^2 - E_y^2) \rightarrow +Q$

90° Coupler: ( $\pm i$ )

$(E_a^2 - E_b^2) \rightarrow +U$

$$L = E_x + iE_y$$

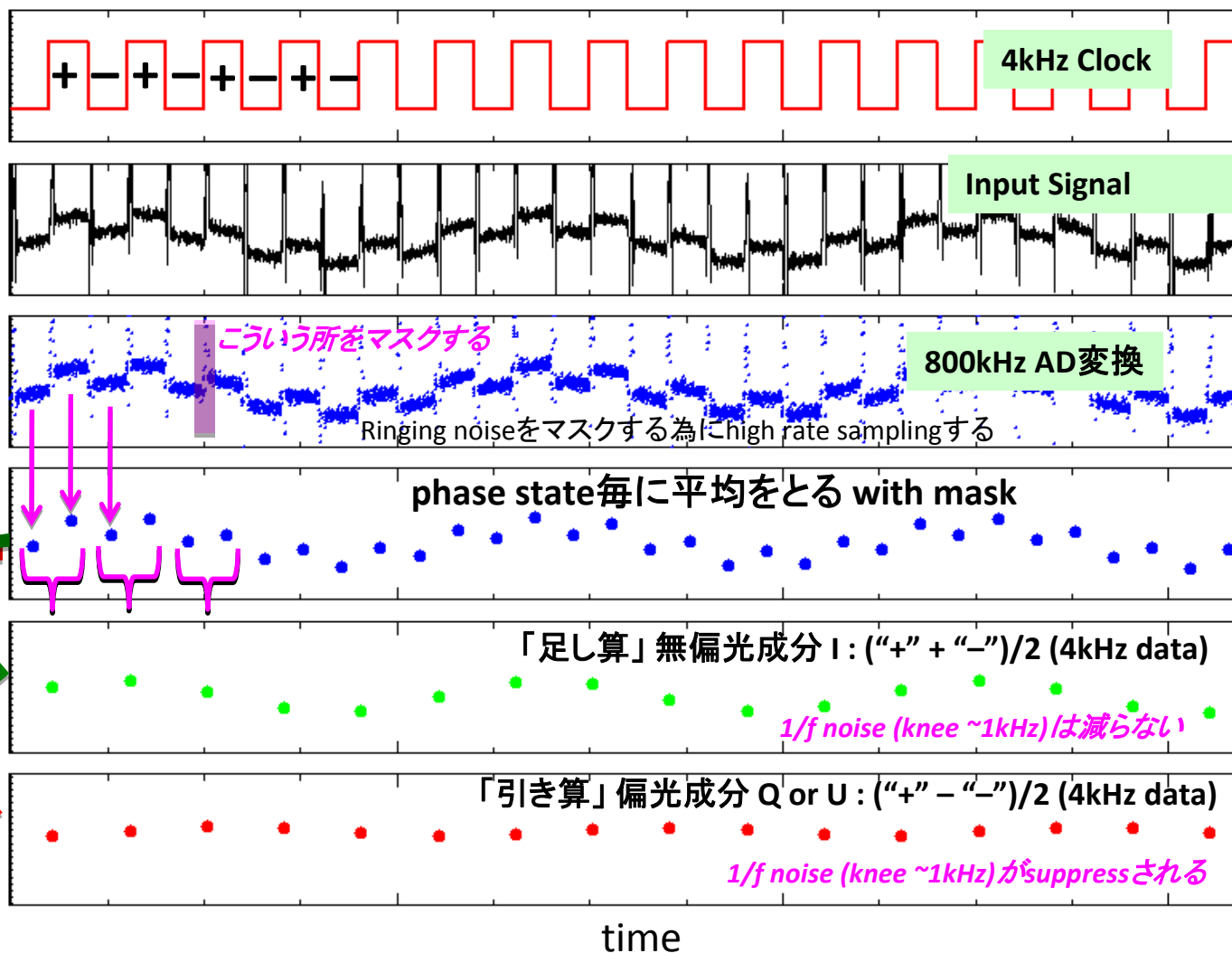
$$R = E_x - iE_y$$



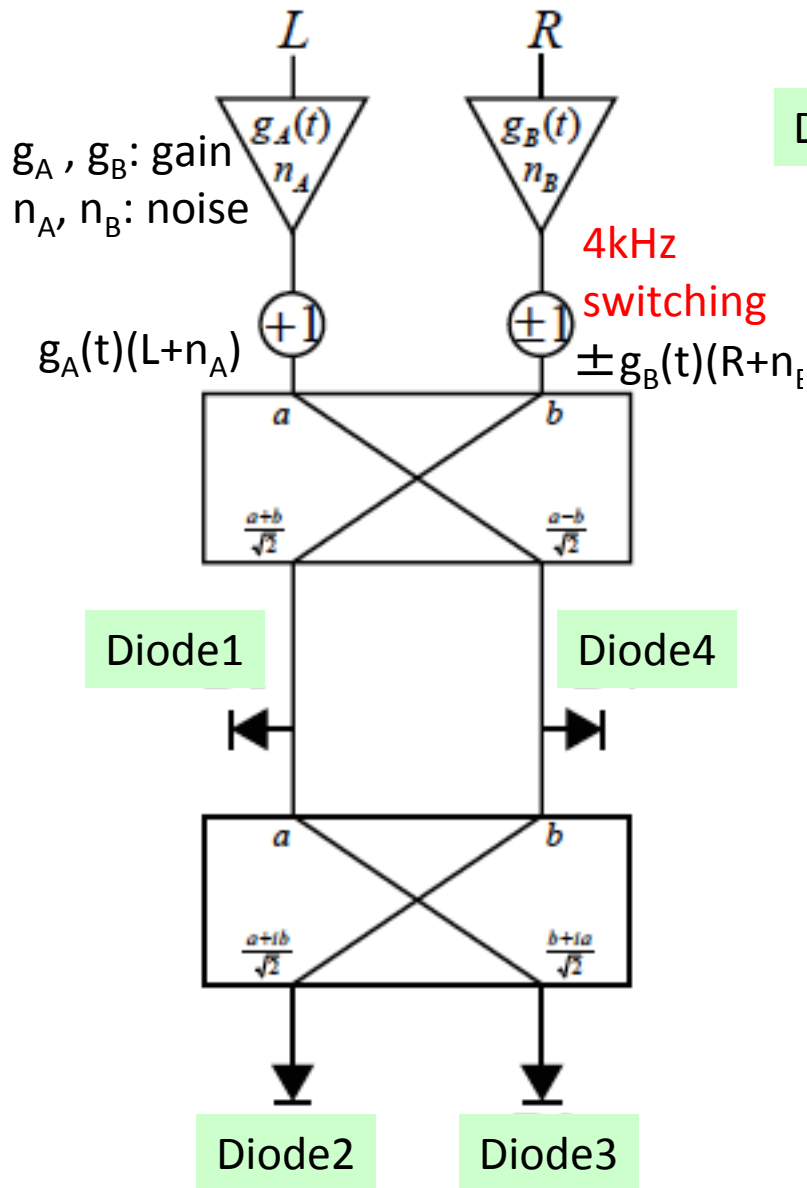
実際の測定では、diode信号を読み出して、  
phase statusを考慮しながら、onlineで復調(“引き算”)する

# 出力信号の復調

Toy-simulation



# 数式で書いてみる



Diode1の出力  $V_k(+, \pm)$  がどうなるか？

$$V_k(+, \pm) = \frac{1}{2}(g_A^2 + g_B^2)I + \boxed{g_A^2 n_A^2 + g_B^2 n_B^2} \pm g_A g_B Q \quad \leftarrow 4\text{kHz data}$$

$$a_l(+, \pm) = \frac{V_k(+, +) + V_{k+1}(+, -)}{2} \quad \leftarrow 2\text{kHz data}$$

「足し算」

$$= \frac{1}{2}(g_A^2 + g_B^2)I + \boxed{g_A^2 n_A^2 + g_B^2 n_B^2}$$

$$d_l(+, \pm) = \frac{V_k(+, +) - V_{k+1}(+, -)}{2} \quad \leftarrow 2\text{kHz data}$$

「引き算」

$$= g_A g_B Q$$

$$A(+, \pm) = \frac{1}{20} \sum a_l(+) \quad \leftarrow 100\text{Hz data}$$

$$= \left\langle \frac{1}{2}(g_A^2 + g_B^2)I \right\rangle + \boxed{\langle g_A^2 n_A^2 + g_B^2 n_B^2 \rangle}$$

「足し算平均」

$$D(+, \pm) = \frac{1}{20} \sum d_l^{2\text{kHz}} \quad \leftarrow 100\text{Hz data}$$

「引き算平均」

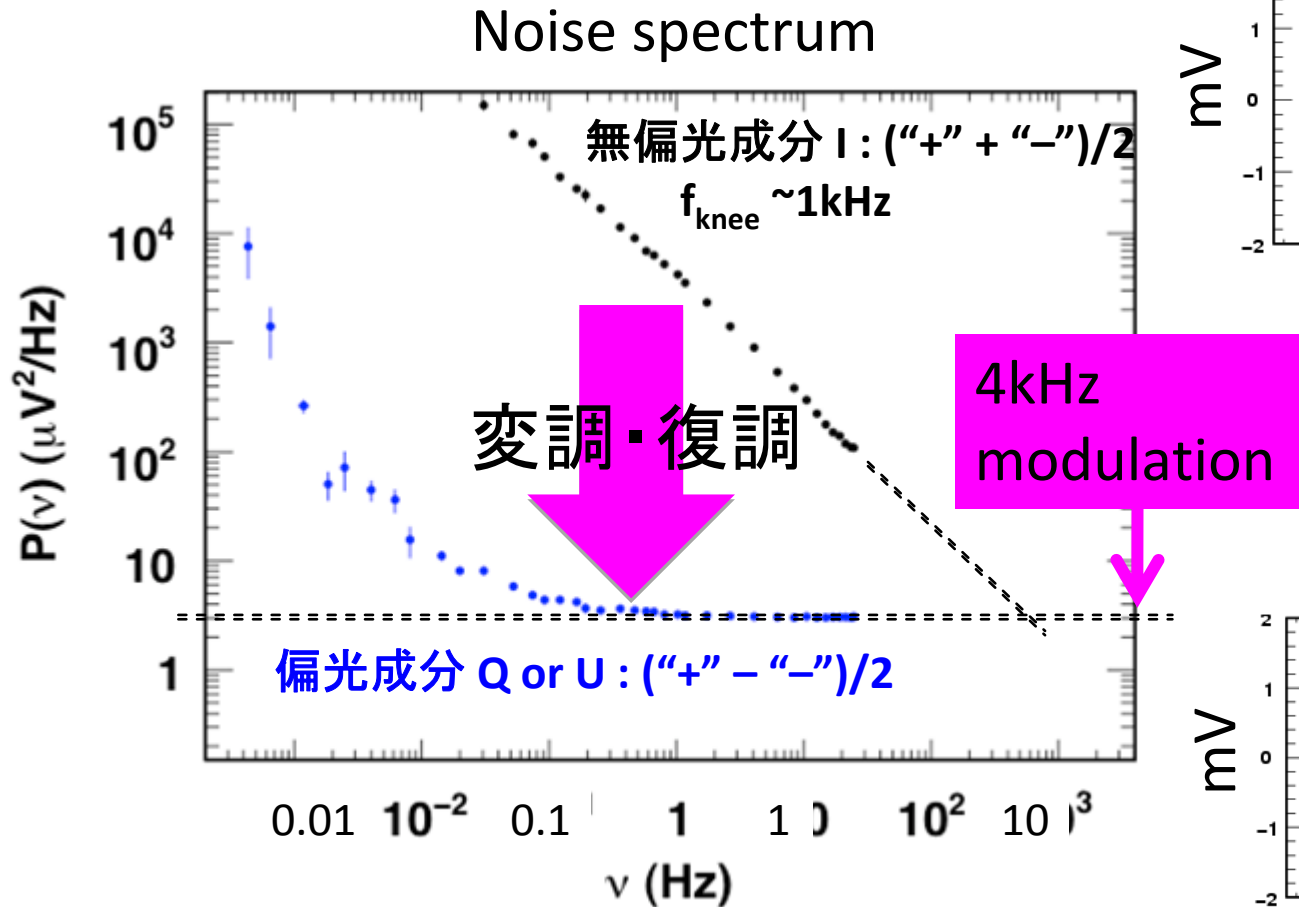
$$= \langle g_A g_B Q \rangle$$

無偏光成分  
 偏光成分

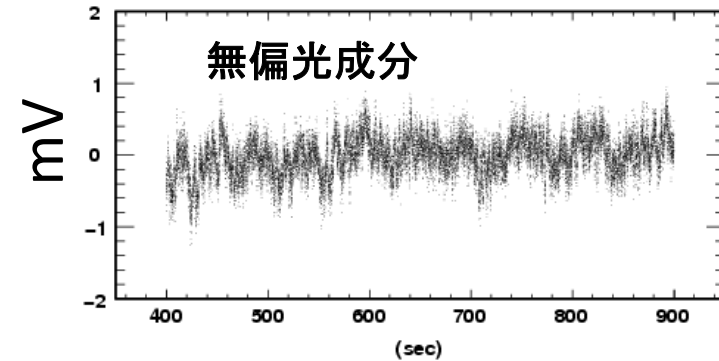
   : 1/f noise (knee ~1kHz)

1/f noise のtermが「引き算」で落ちる(demodulation)

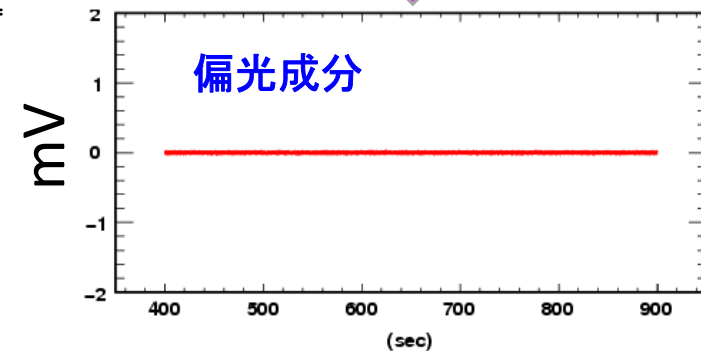
# 変調・復調のインパクト(実データ)



Time stream data



変調・復調

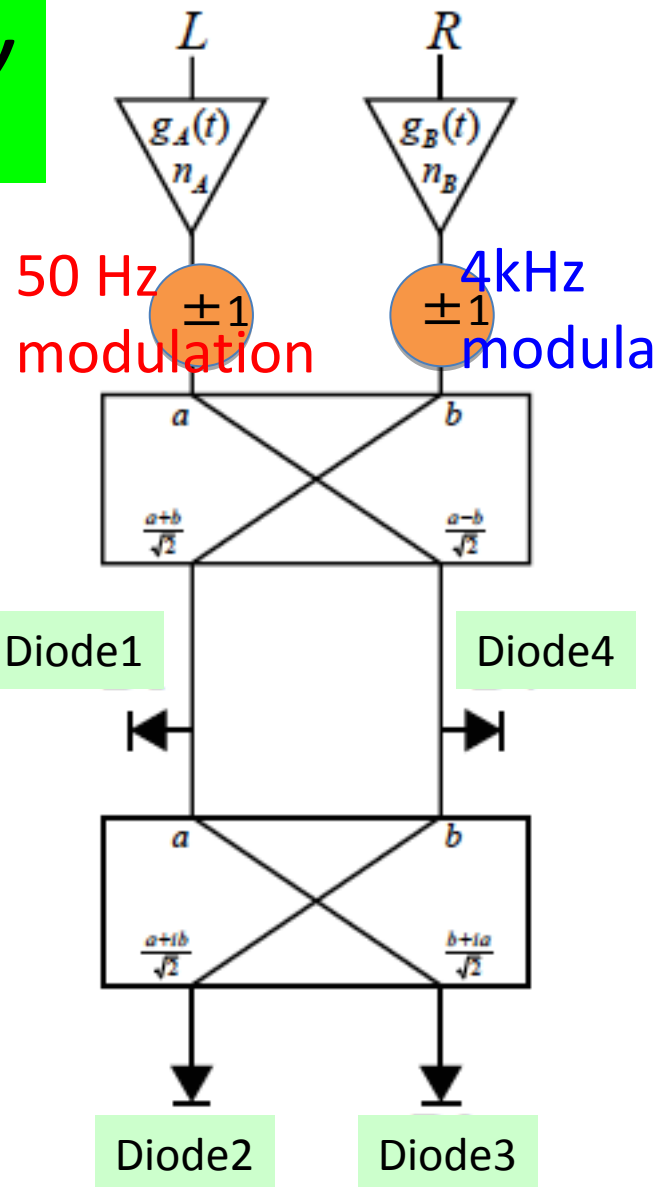
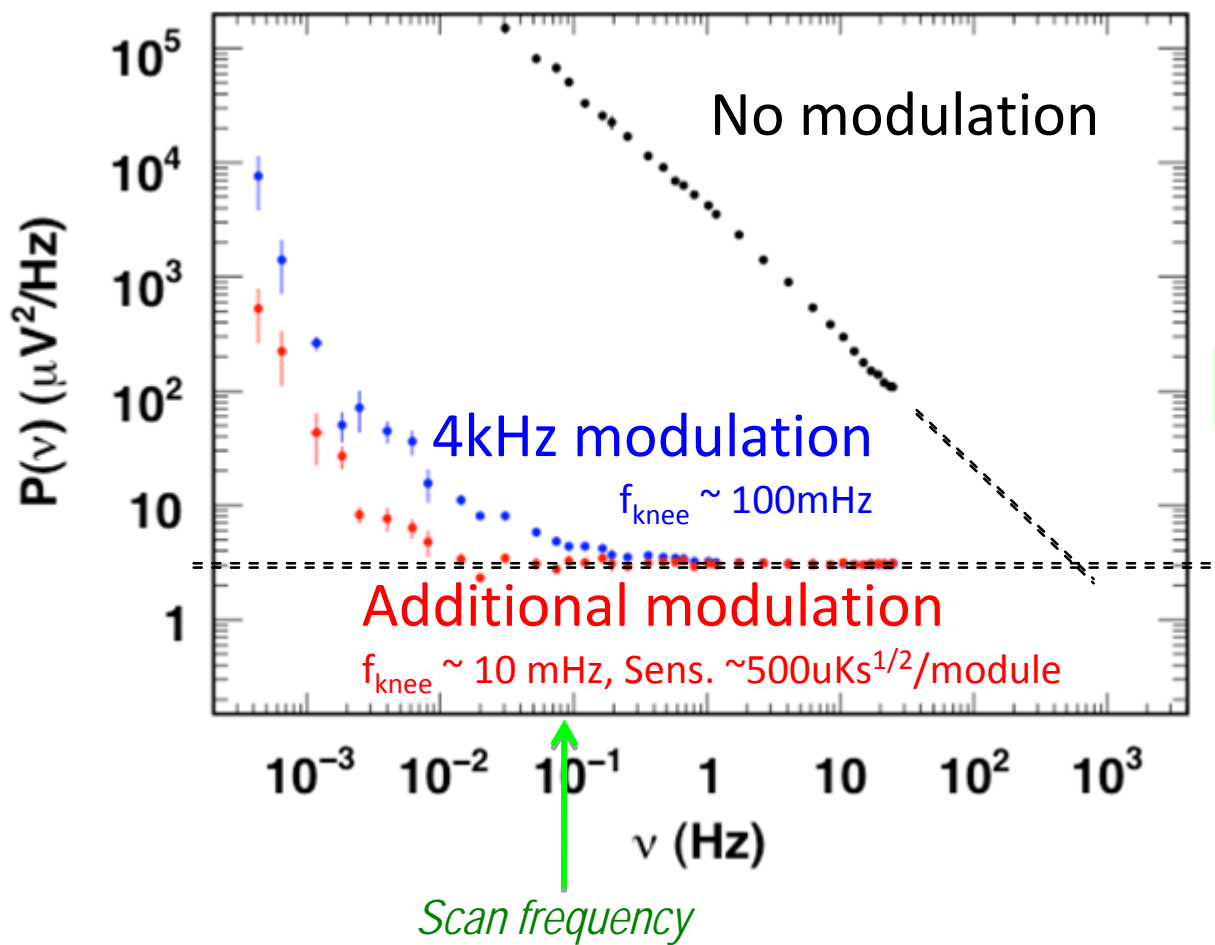


さらに反対側も変調して、もうひと押し！

## *W-band Real Data under Chilean Sky*

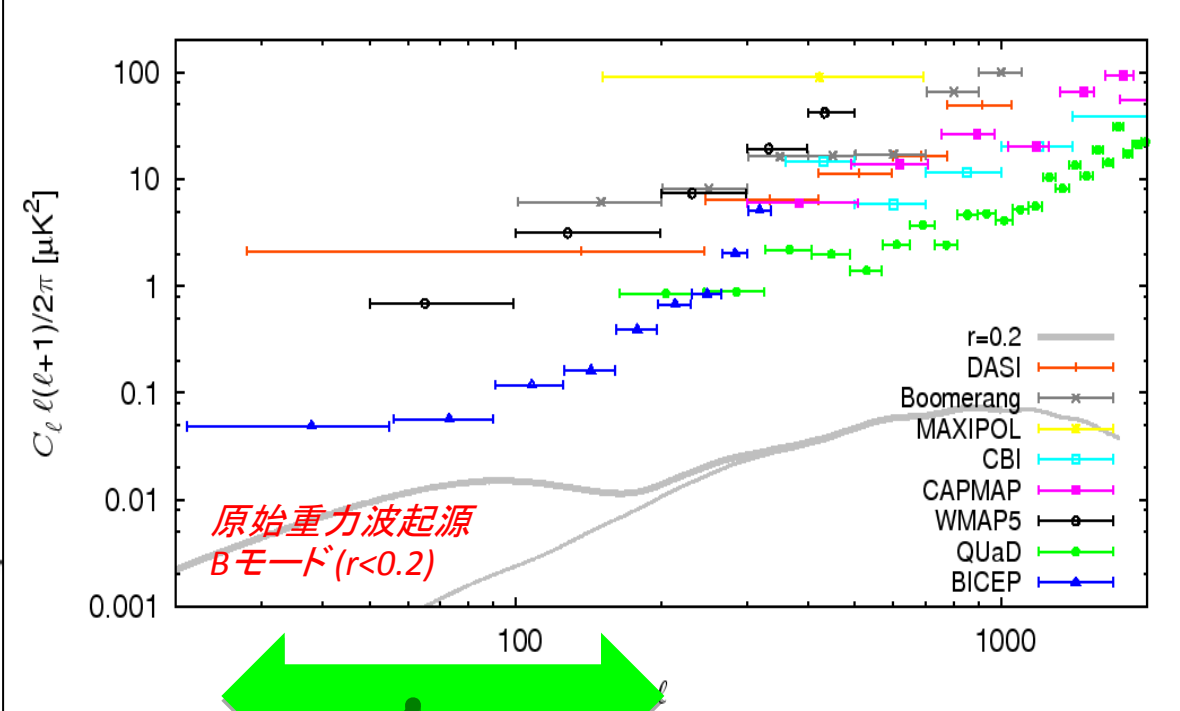
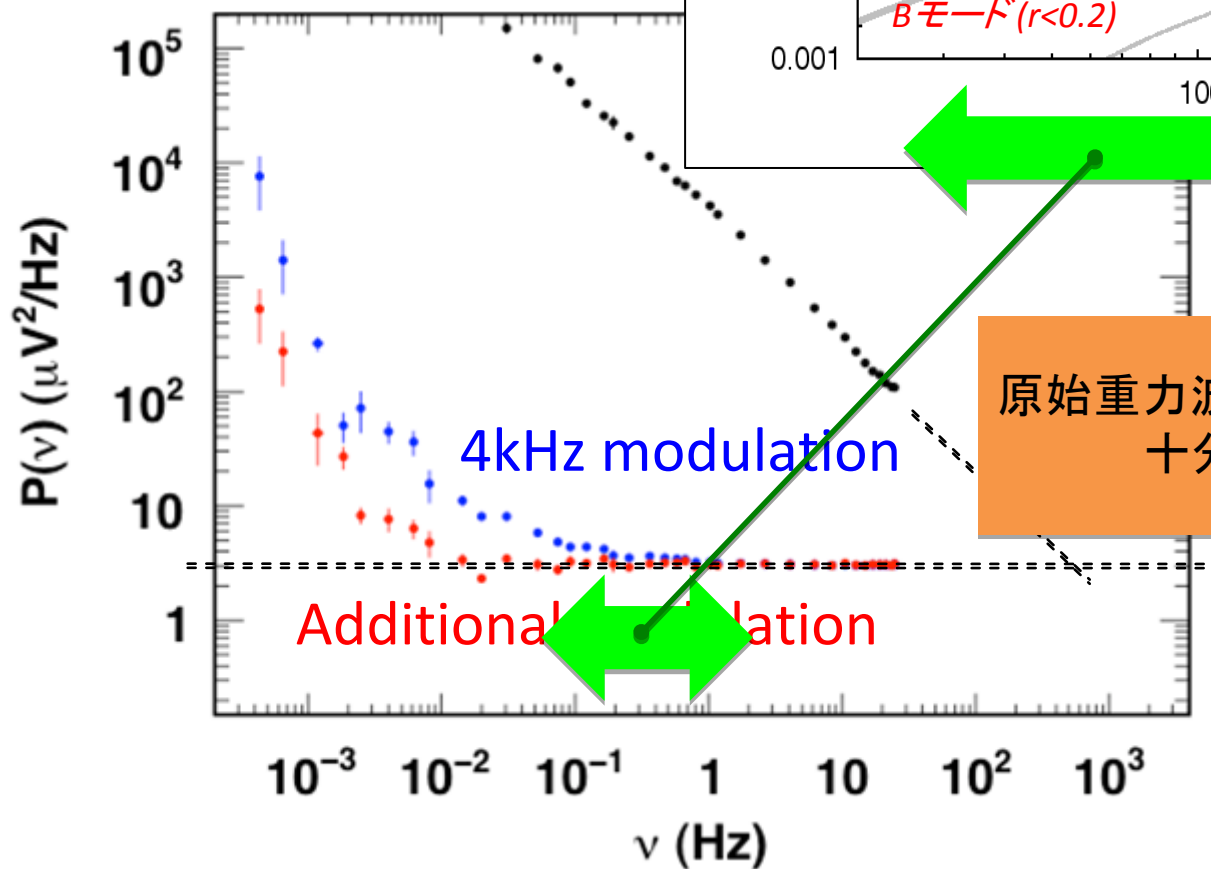
$$f_{knee} \ll \text{Scan frequency} !!$$

Noise spectrum





The  $1/f$  knee is low enough for  
primordial G.W. origin B-modes



原始重力波起源のBモード探索を行うのに  
十分低い $1/f$ ノイズを実現！

## QUIETの検出器は

- 検出器上で変調して、
- Onlineで復調する

→ とても、とても、とても....小さなCMB偏光成分の測定を可能にしている。

# 観測ストラテジー

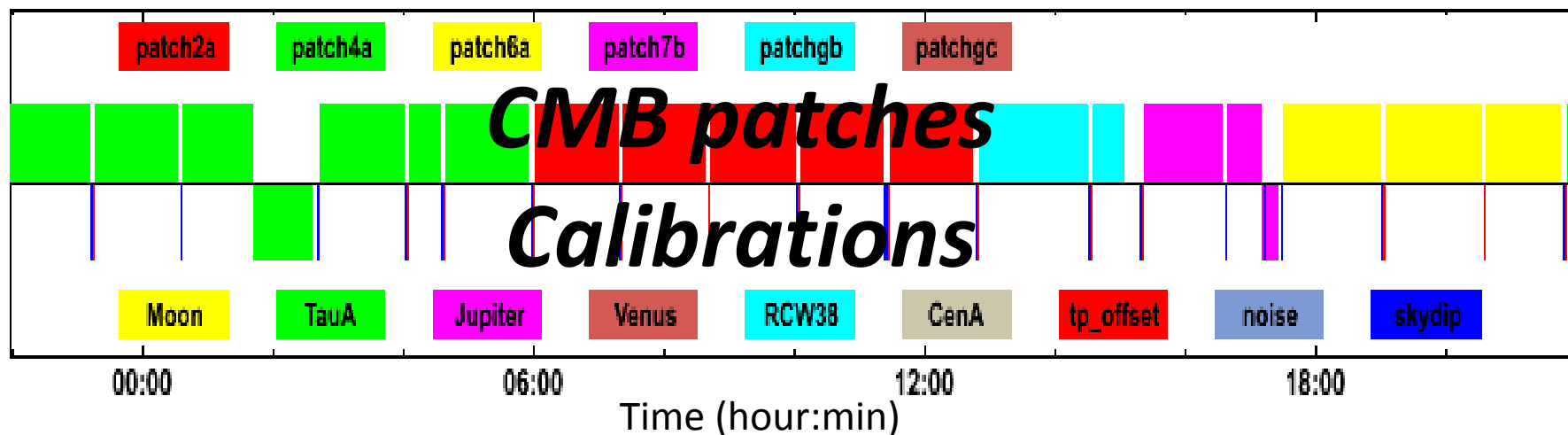
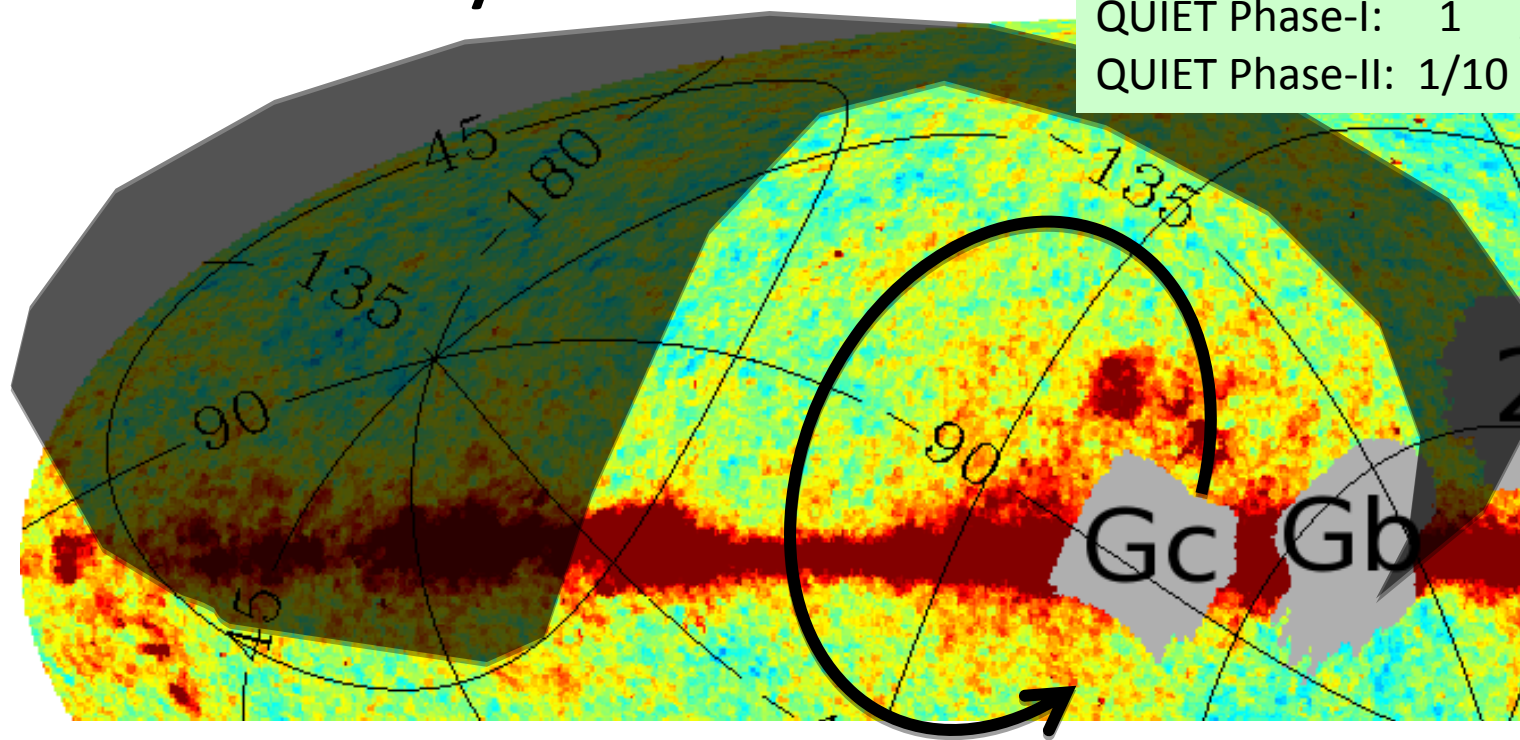
# Daily Observation

Map precision on 1x1 degree pixel:

Planck: 1  $\mu\text{K}$  (100 GHz)

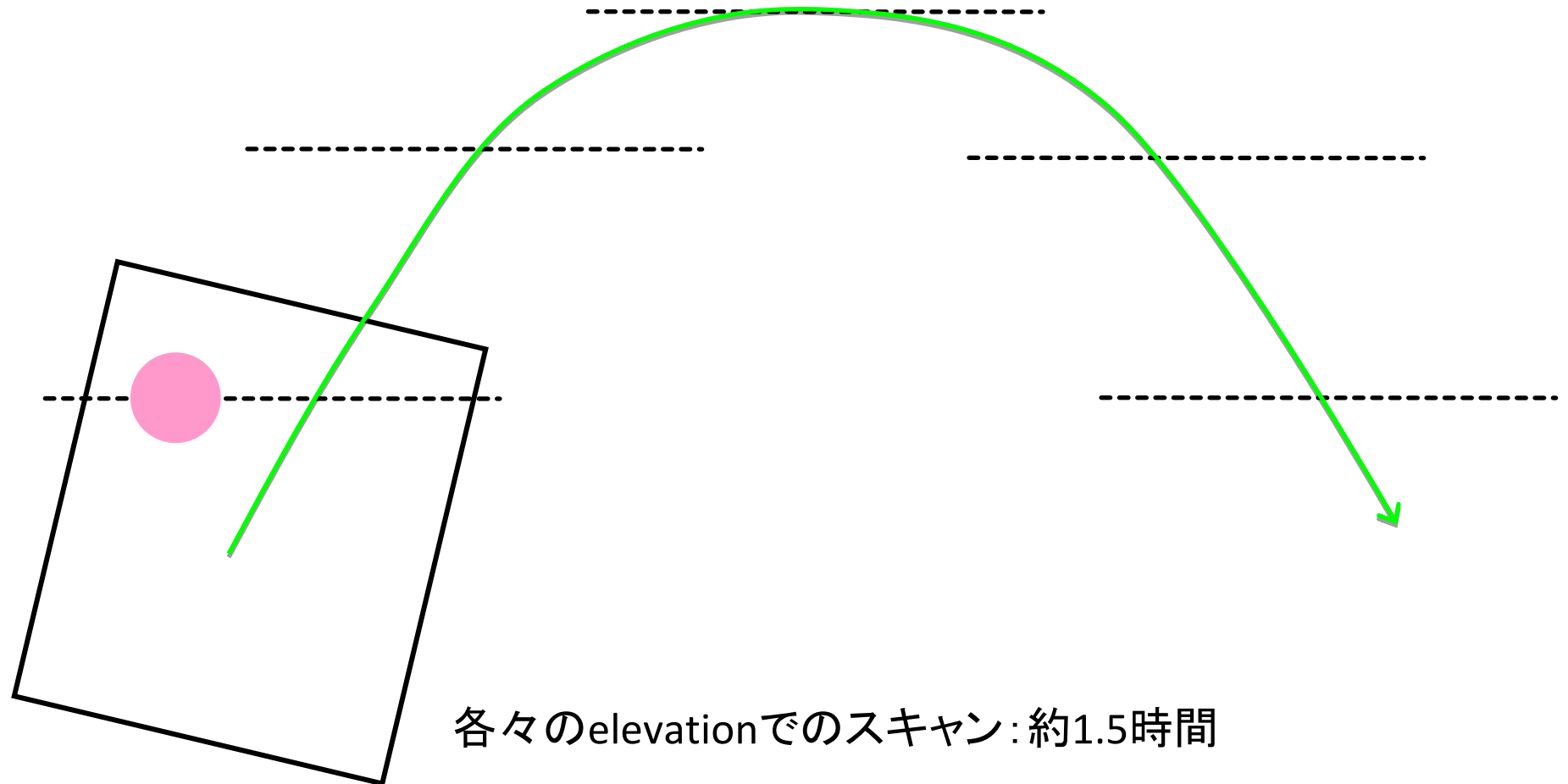
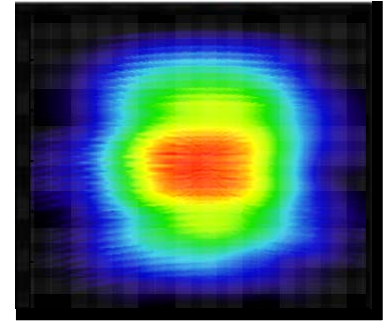
QUIET Phase-I: 1  $\mu\text{K}$  (40GHz)

QUIET Phase-II: 1/10  $\mu\text{K}$  (90GHz)



# QUIETのスキャン方法

限られた領域を重点的に「深く」観測



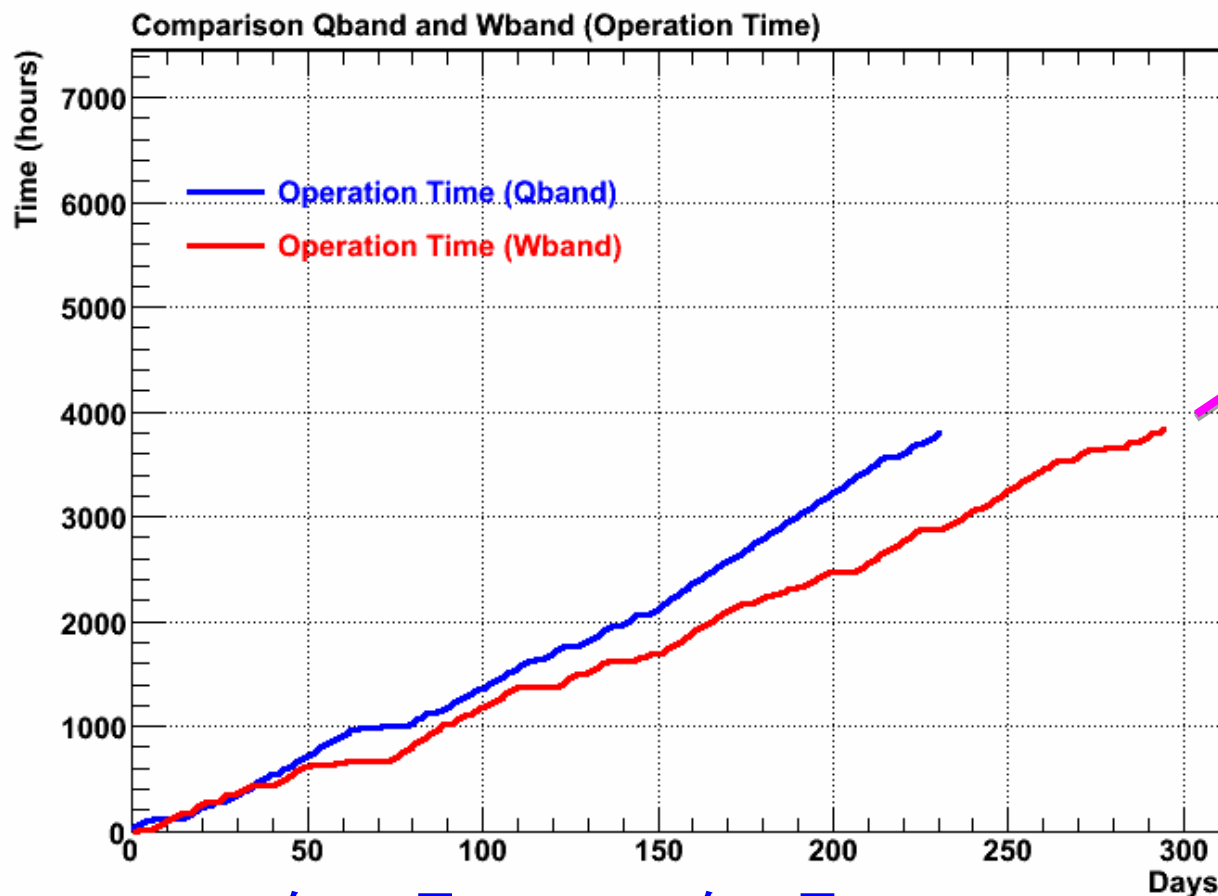
各々のelevationでのスキャン: 約1.5時間



# 実際の観測の様子



# これまでに取得したデータ



W-band

- 現在～4000時間取得
- 12月までに～6000時間

by M. Hasegawa

Q-band 2008年10月 ～ 2009年6月 (～4000hours)

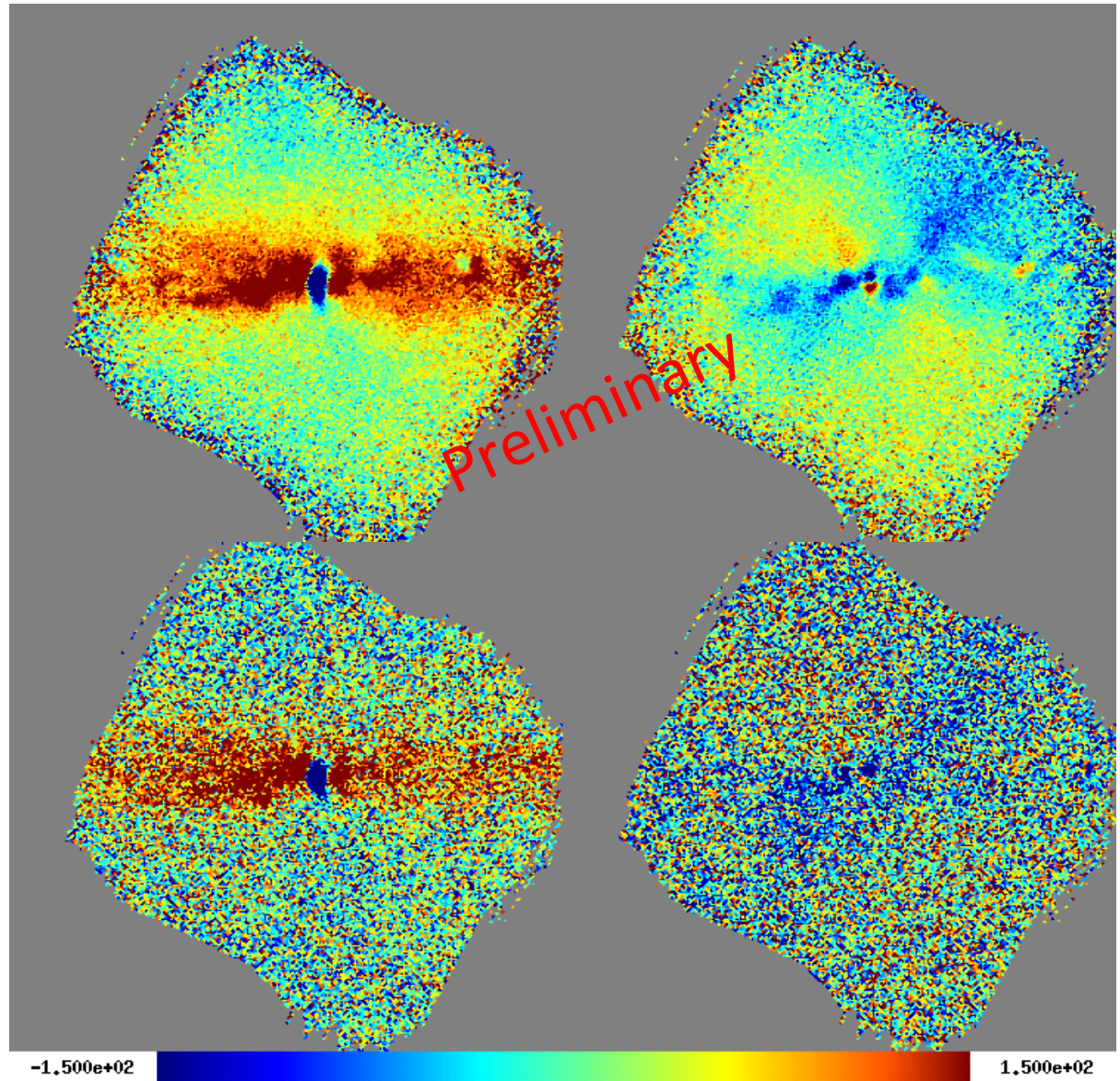
W-band 2009年 8月 ～

# WMAPよりも高感度

10年以上新しいテクノロジーですから...

Galaxy (Q-band)  
systematic effects  
not considered yet

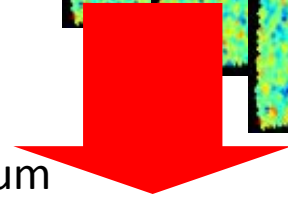
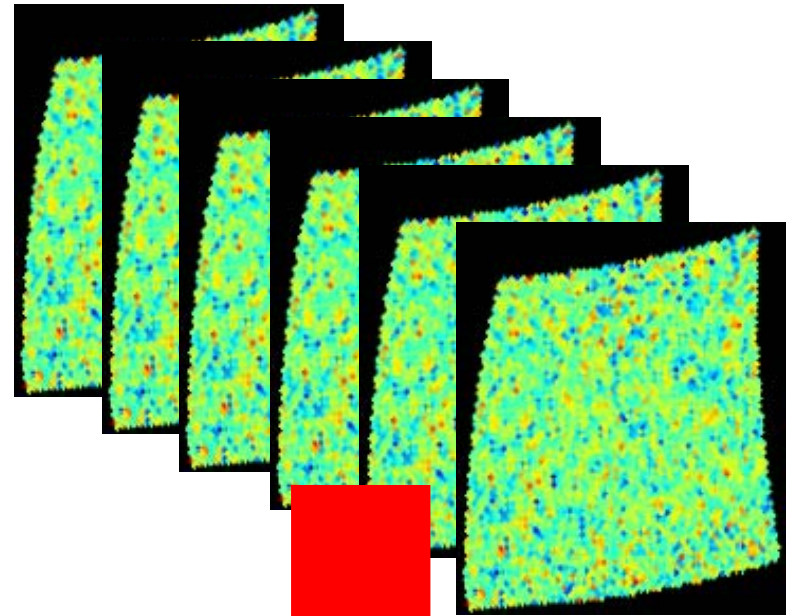
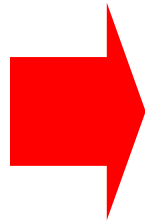
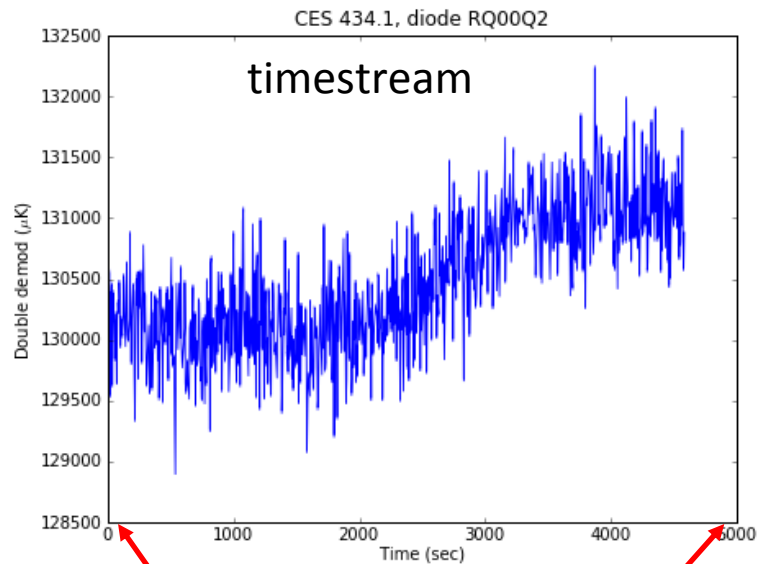
WMAP 5-year



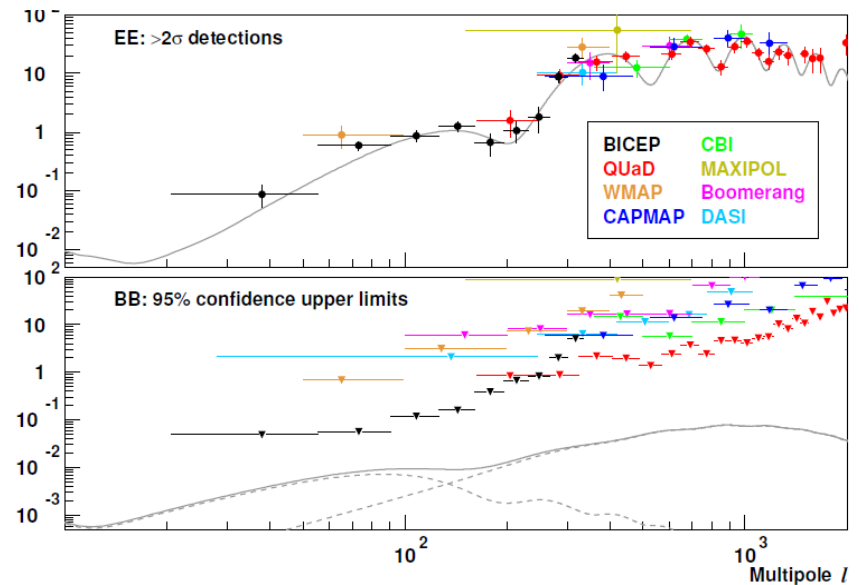
# データ解析の概要



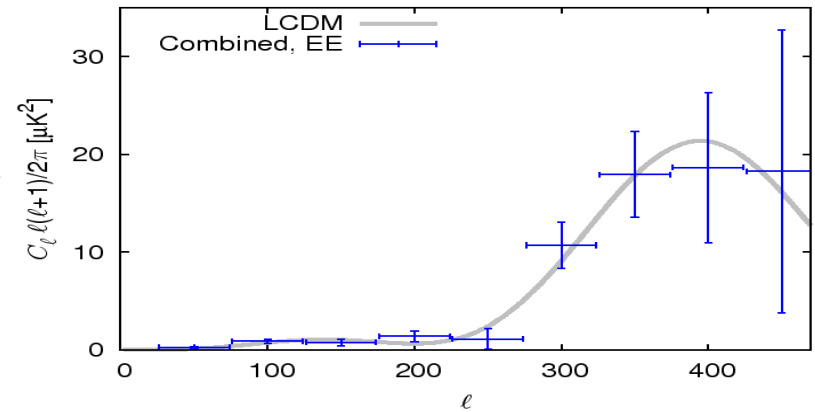
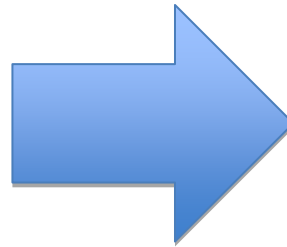
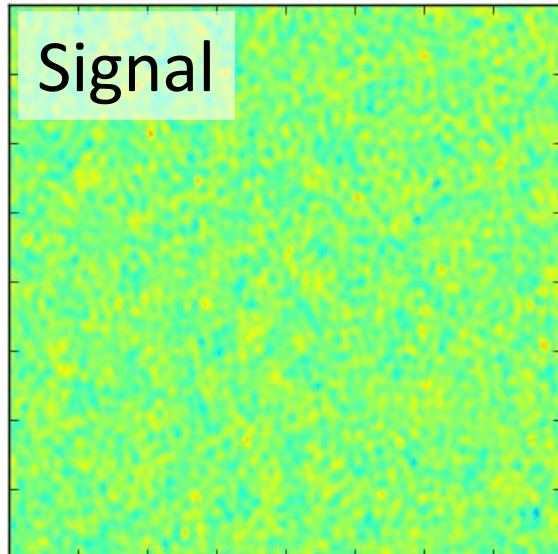
# データ解析の概要



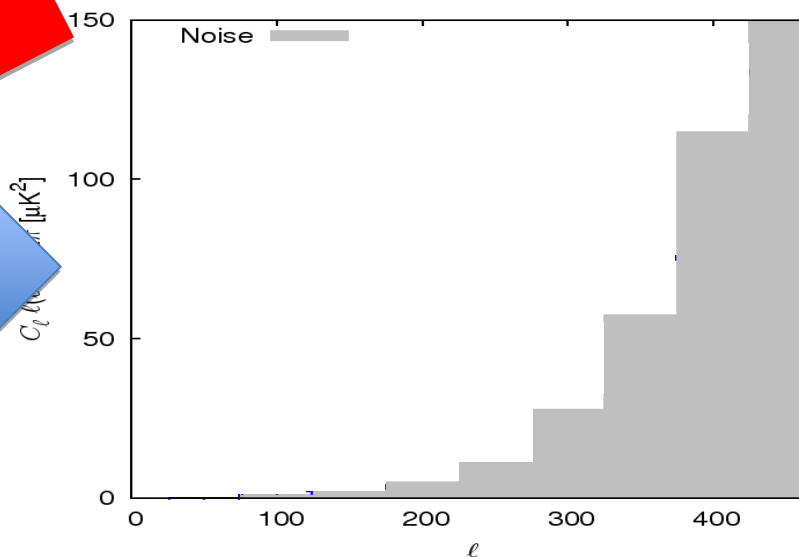
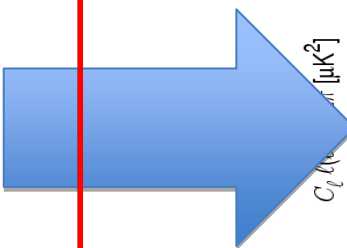
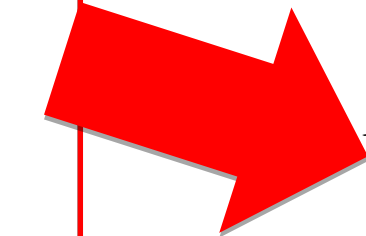
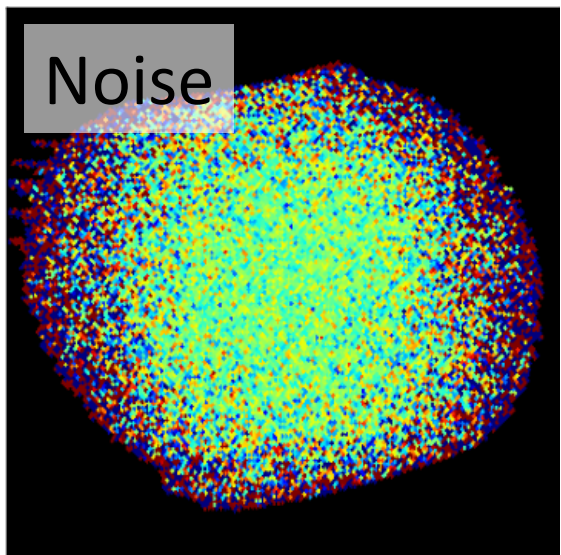
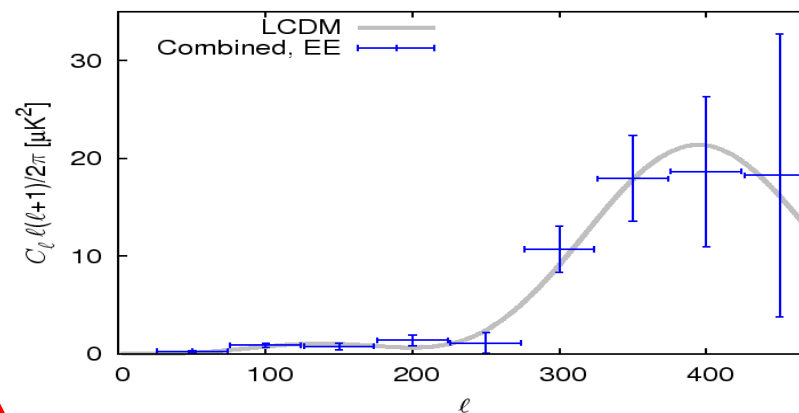
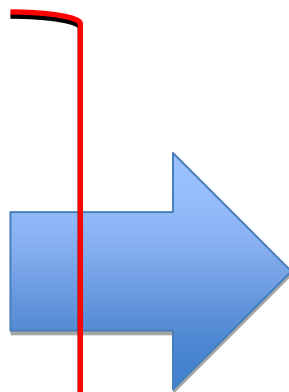
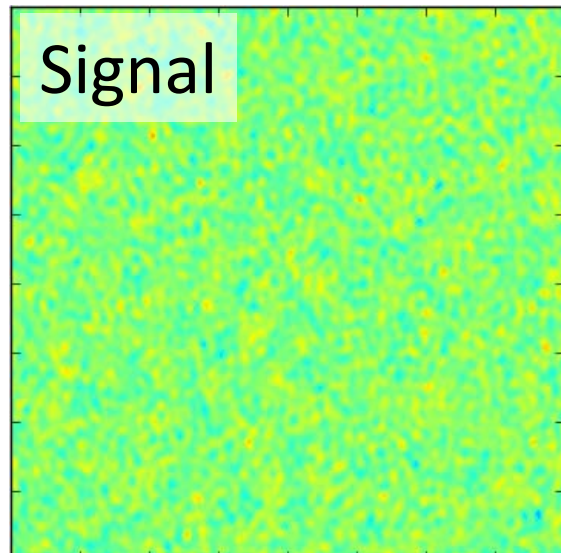
power spectrum



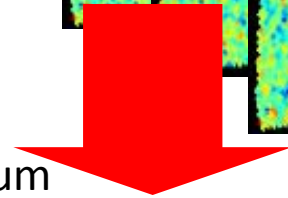
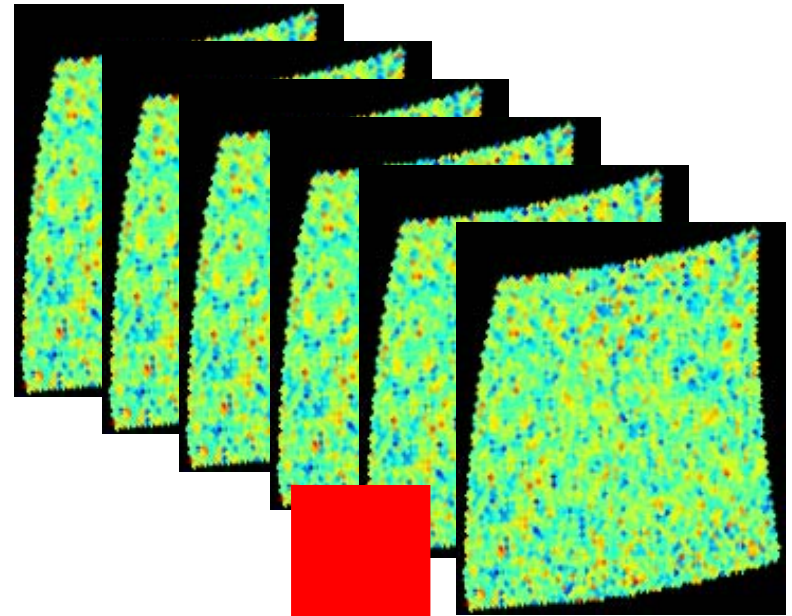
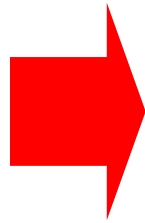
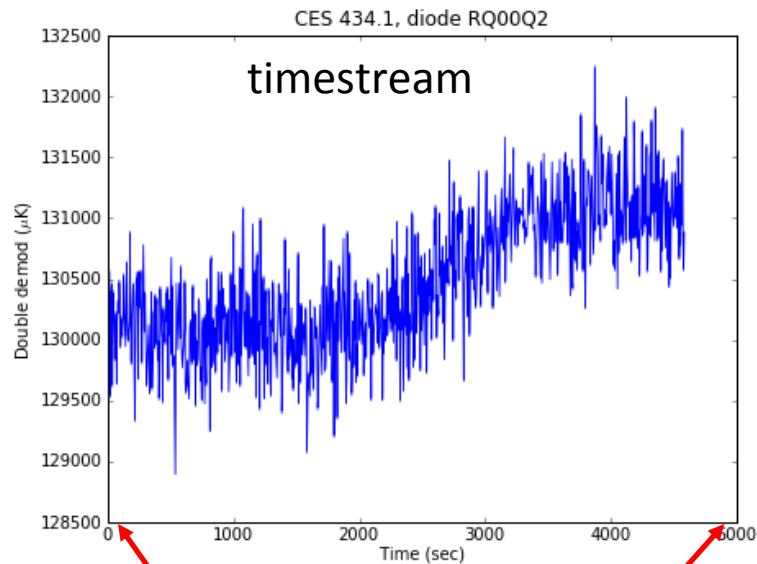
# データの理解が重要！



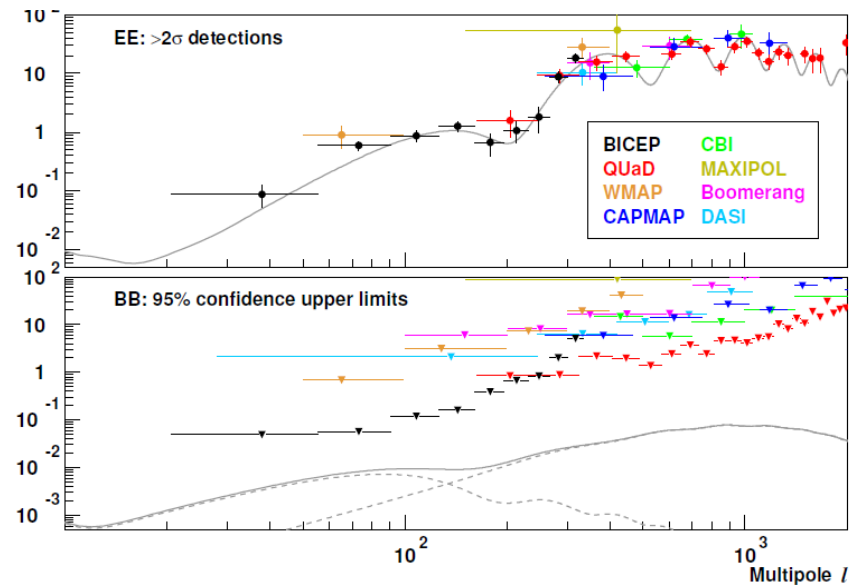
# データの理解が重要！



# データ解析の概要



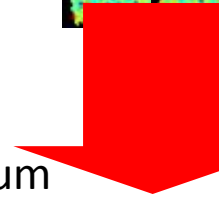
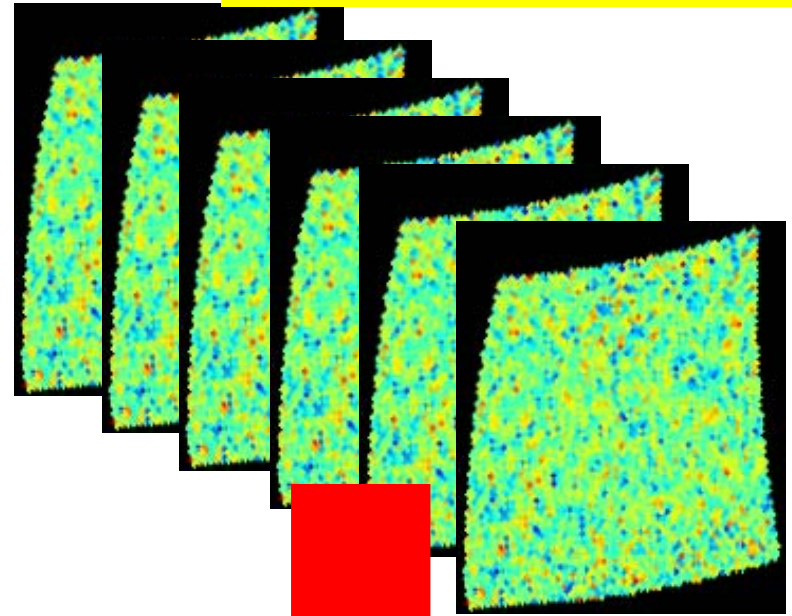
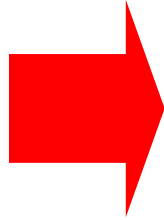
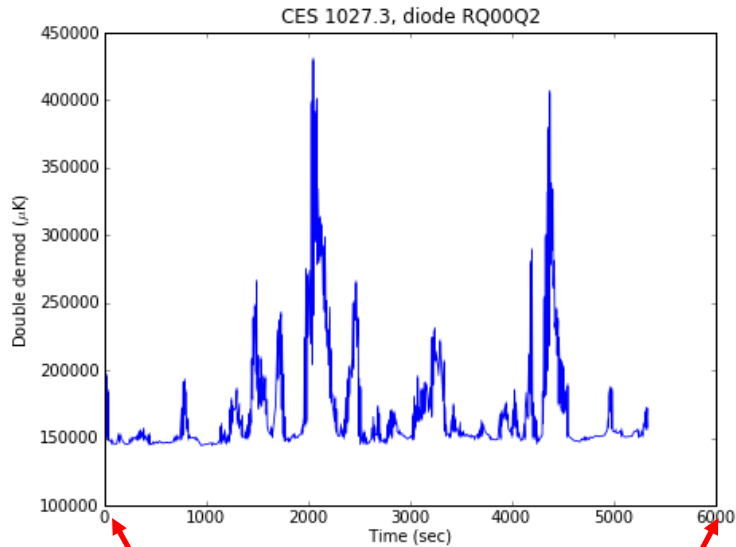
power spectrum



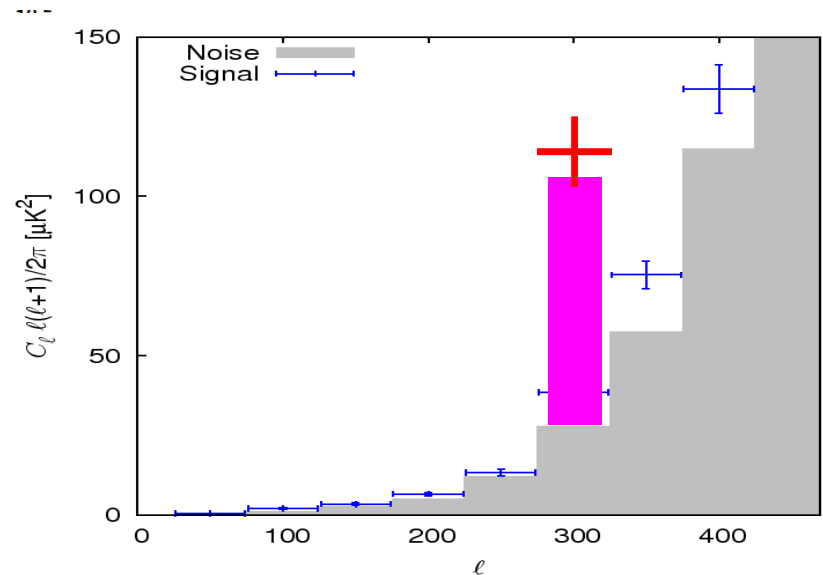


影響を見積もることも出来ない  
データはカットする, e.g. 悪天候

Data Selection Details  
→ Y. Chinone's Poster



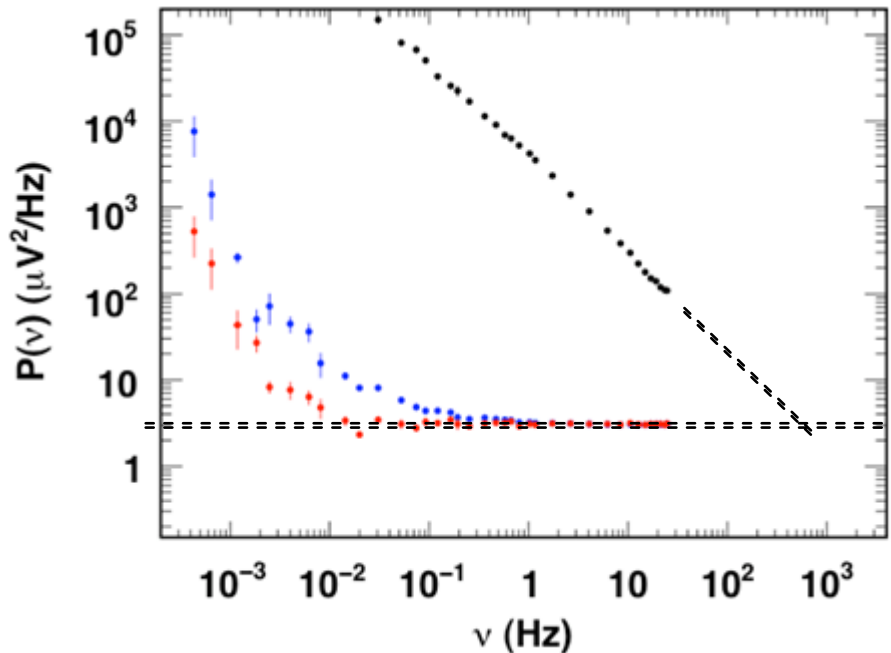
power spectrum





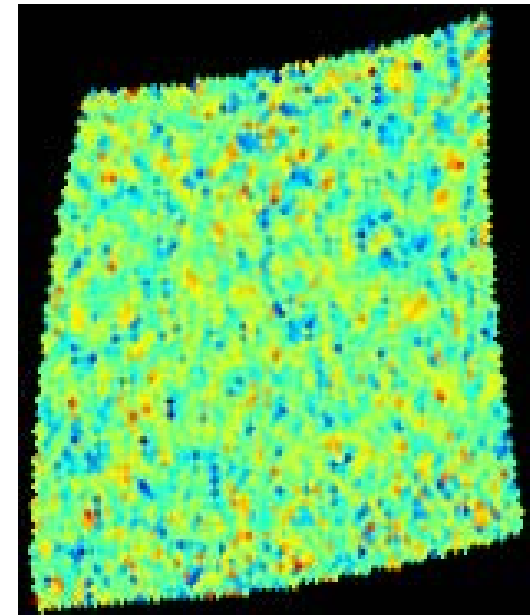
# ノイズの特性をしみじみ吟味

- 個々のスキャン毎 ( $\sim 1.5$  hours)
- チャンネル毎



ノイズスペクトルに異常はないか？

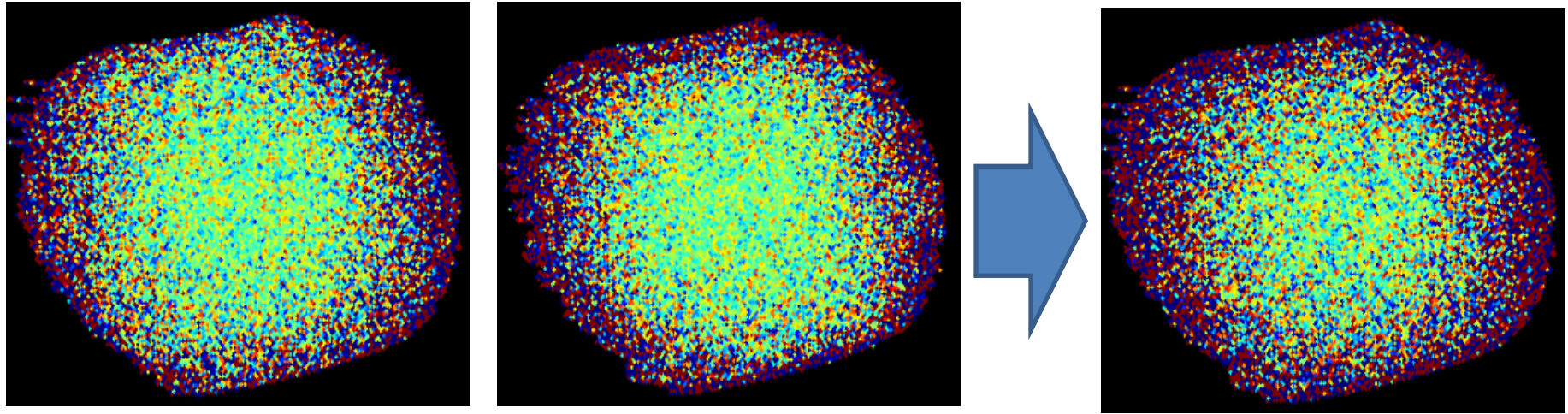
マップはきれいなノイズか？  
(1.5時間のスキャンでシグナルは見えない)



クリーンなデータセットは何重もの  
泥臭い解析の末に得られる！

# Null Test: データの理解が出来ていることのチェック

理解しているならば、引き算した結果はNullになるはず

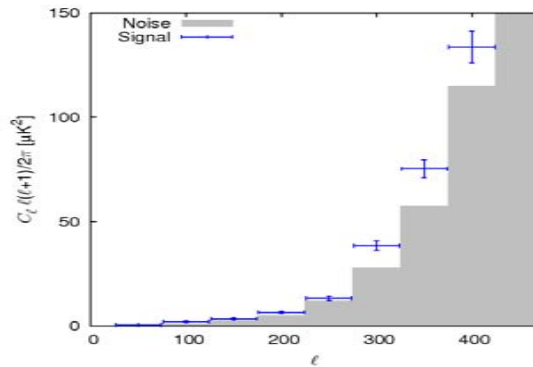


$(S + N_1)$

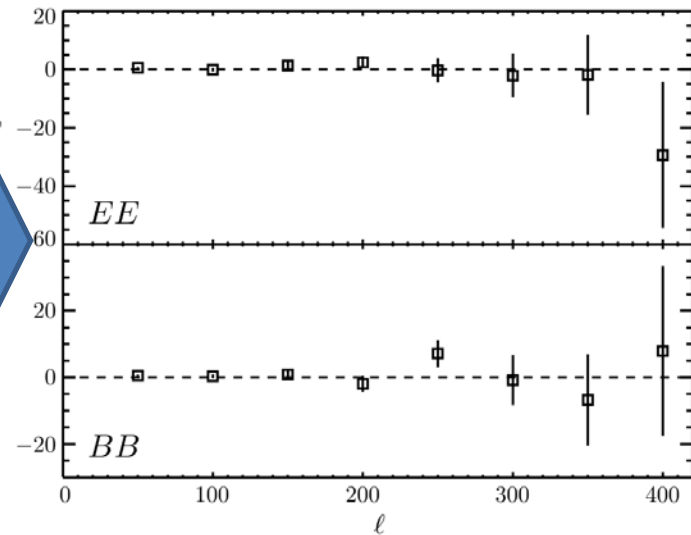
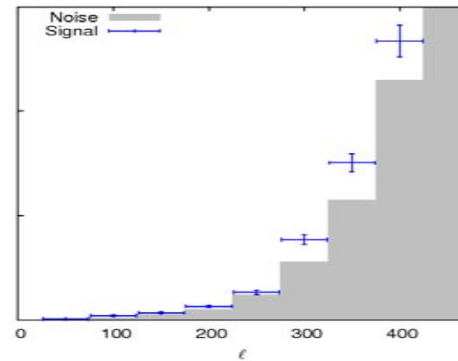
—

$(S + N_2)$

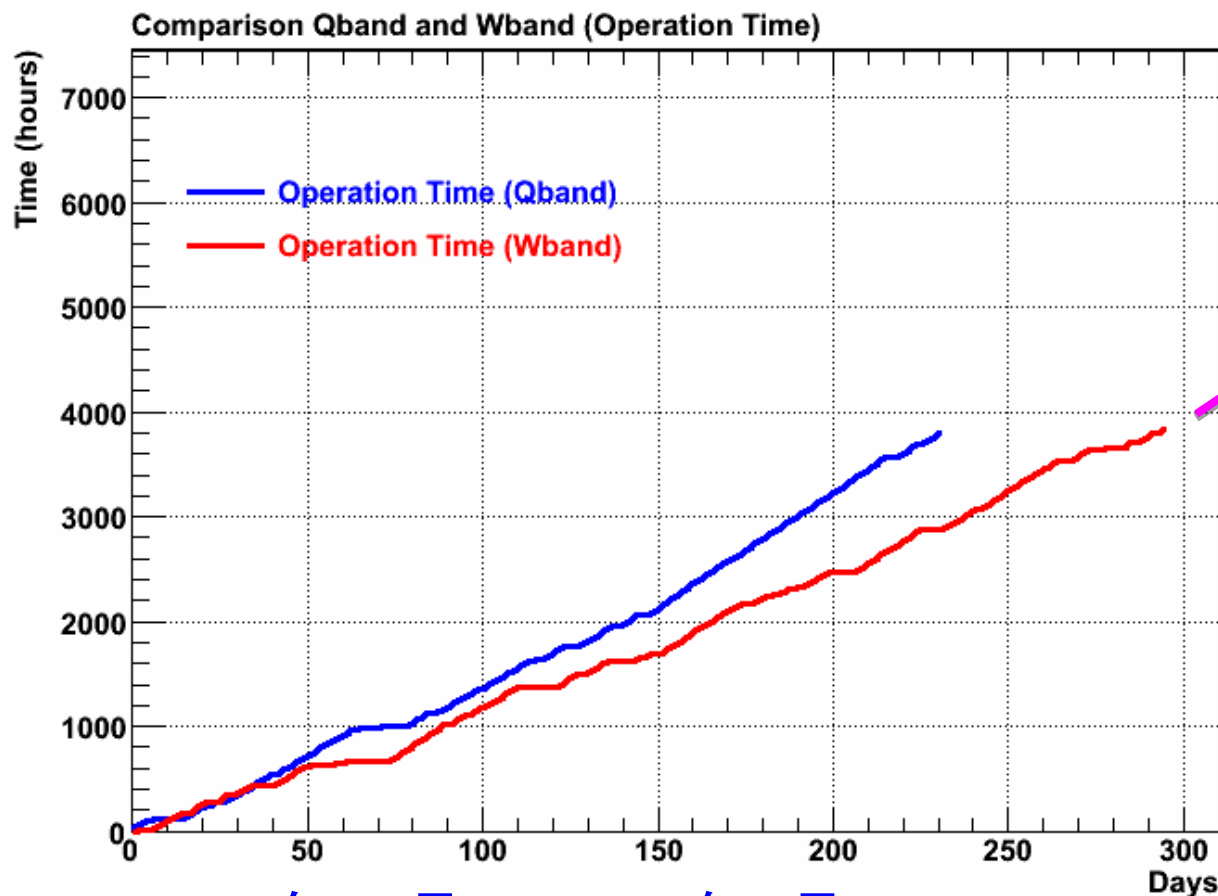
$(N_1 - N_2)$



—



# これまでに取得したデータ



W-band

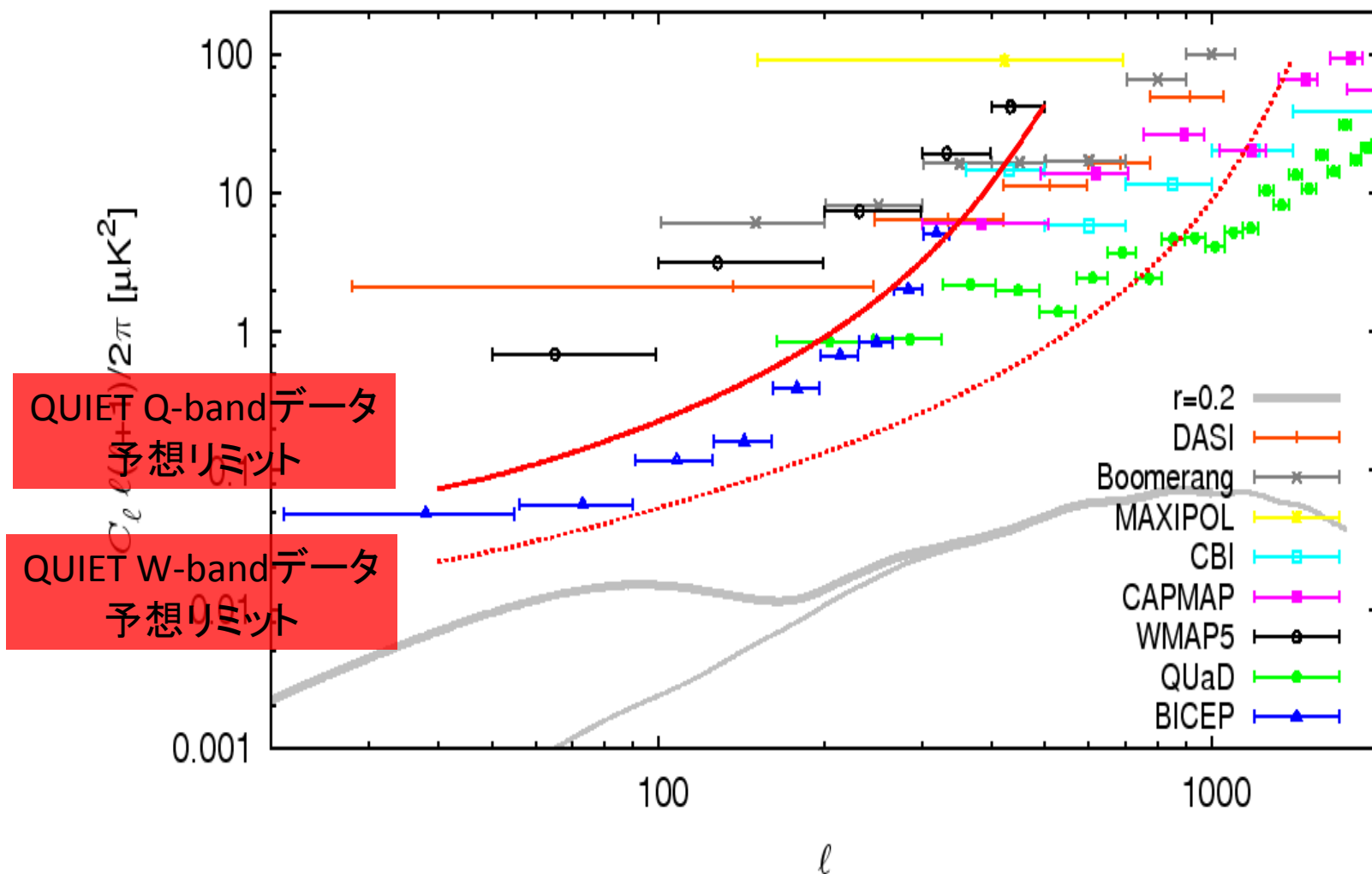
- 現在～4000時間取得
- 12月までに～6000時間

by M. Hasegawa

Q-band 2008年10月 ～ 2009年6月 (～4000hours)

W-band 2009年 8月 ～

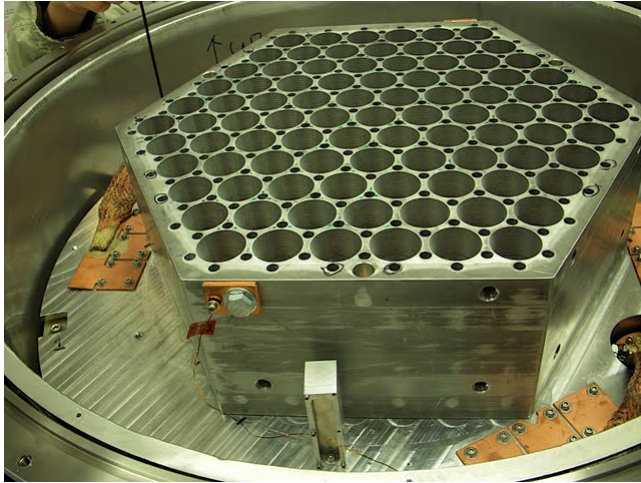
# 探索感度 QUIET phase1 & phase2



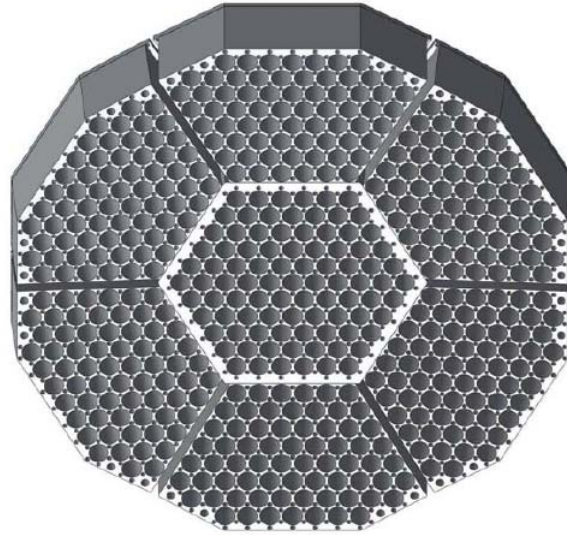


# QUIET Phase-II (x16 scale up!)

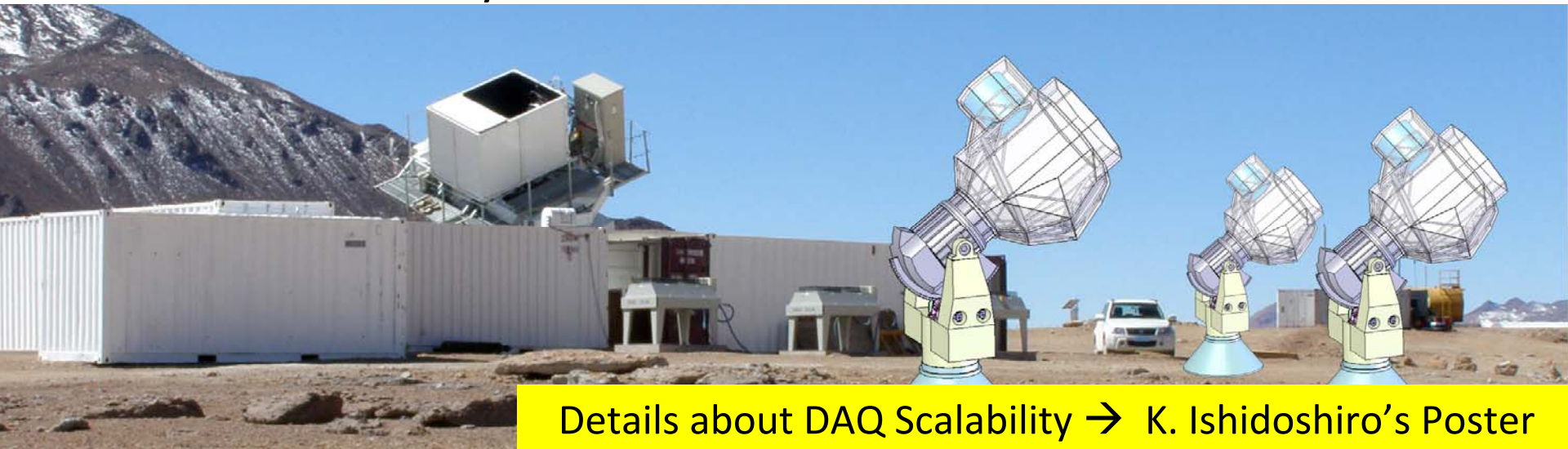
*Key Technologies were established in Phase-I !!*



Phase-I W-band  
91-element array



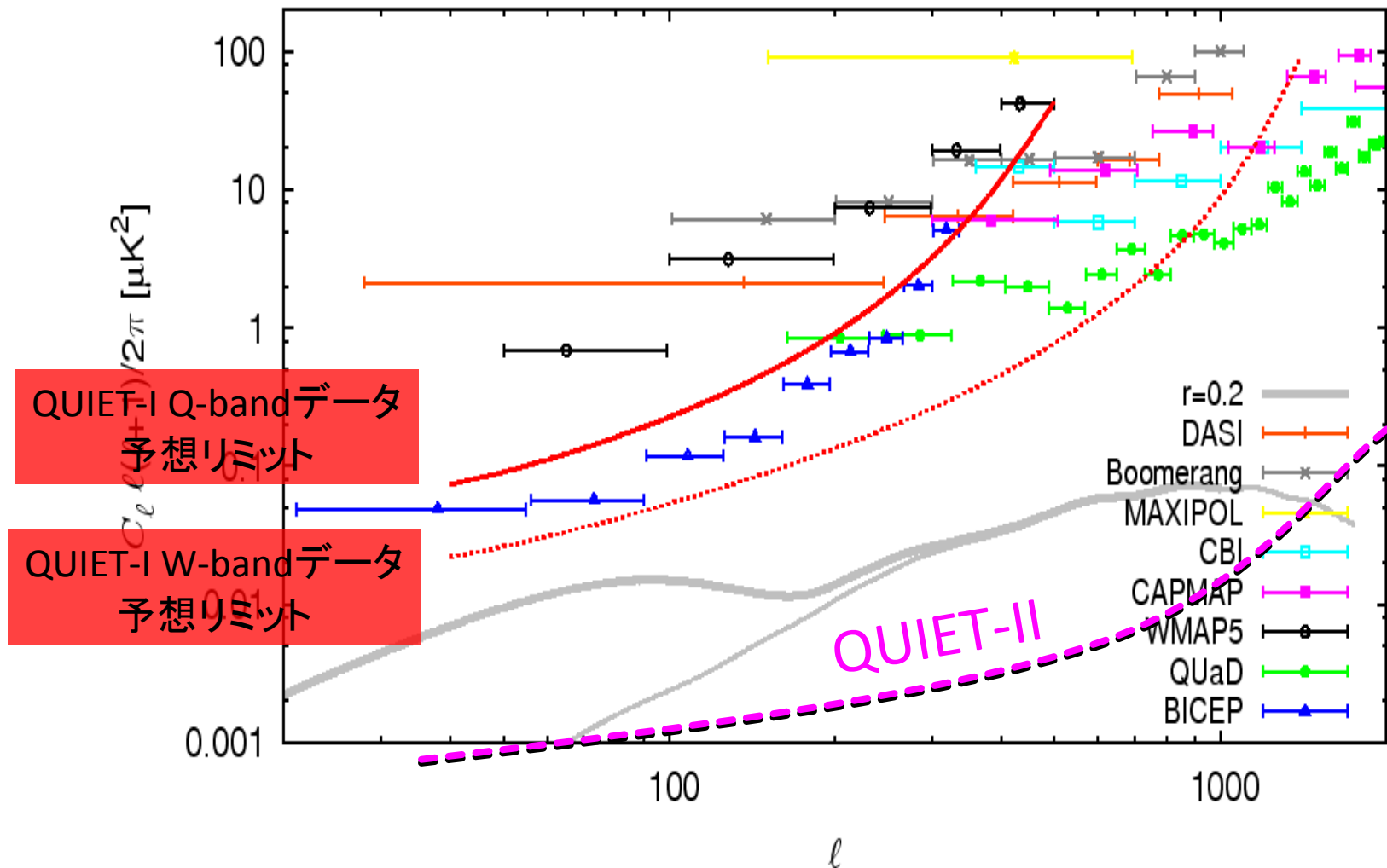
499-element  
array (x3)



Details about DAQ Scalability → K. Ishidoshiro's Poster

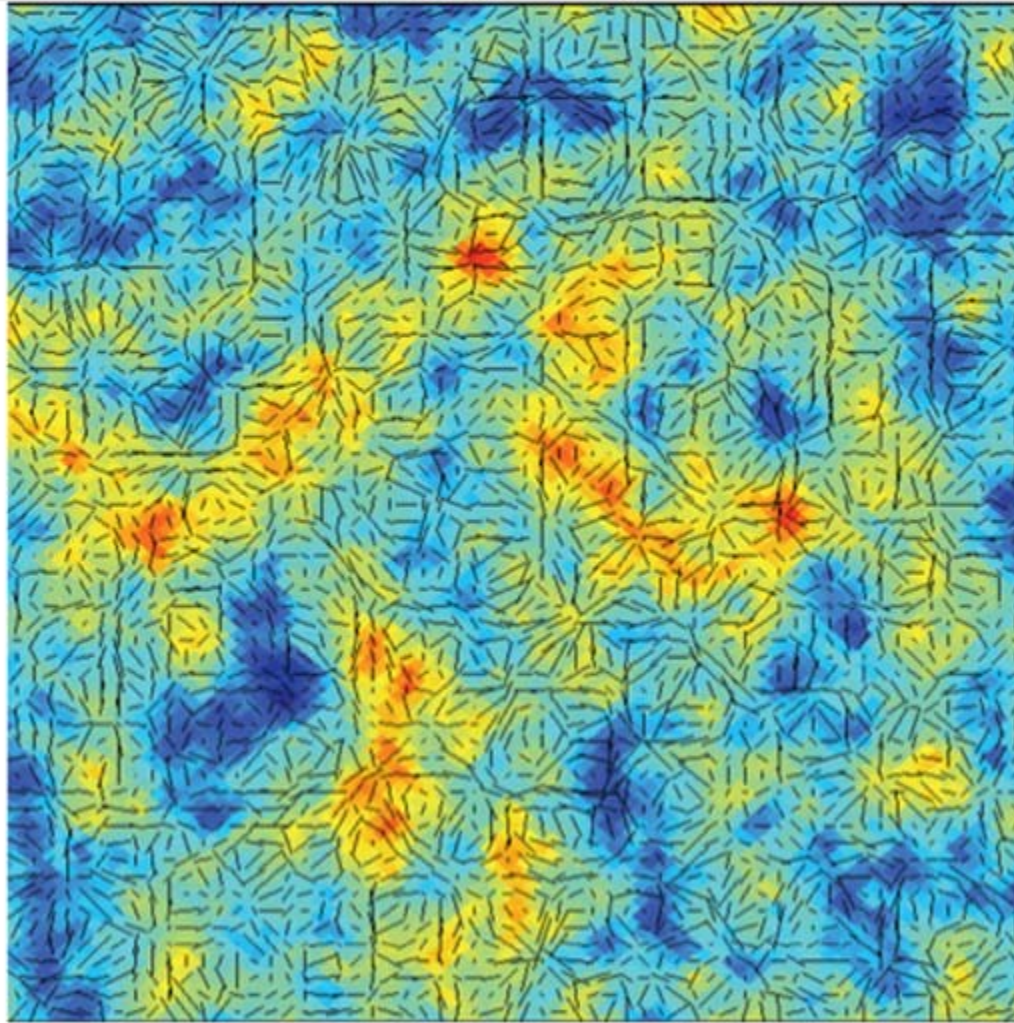


# 探索感度 QUIET phase-I & phase-II



# Simulated sky with $T/S=0.2$

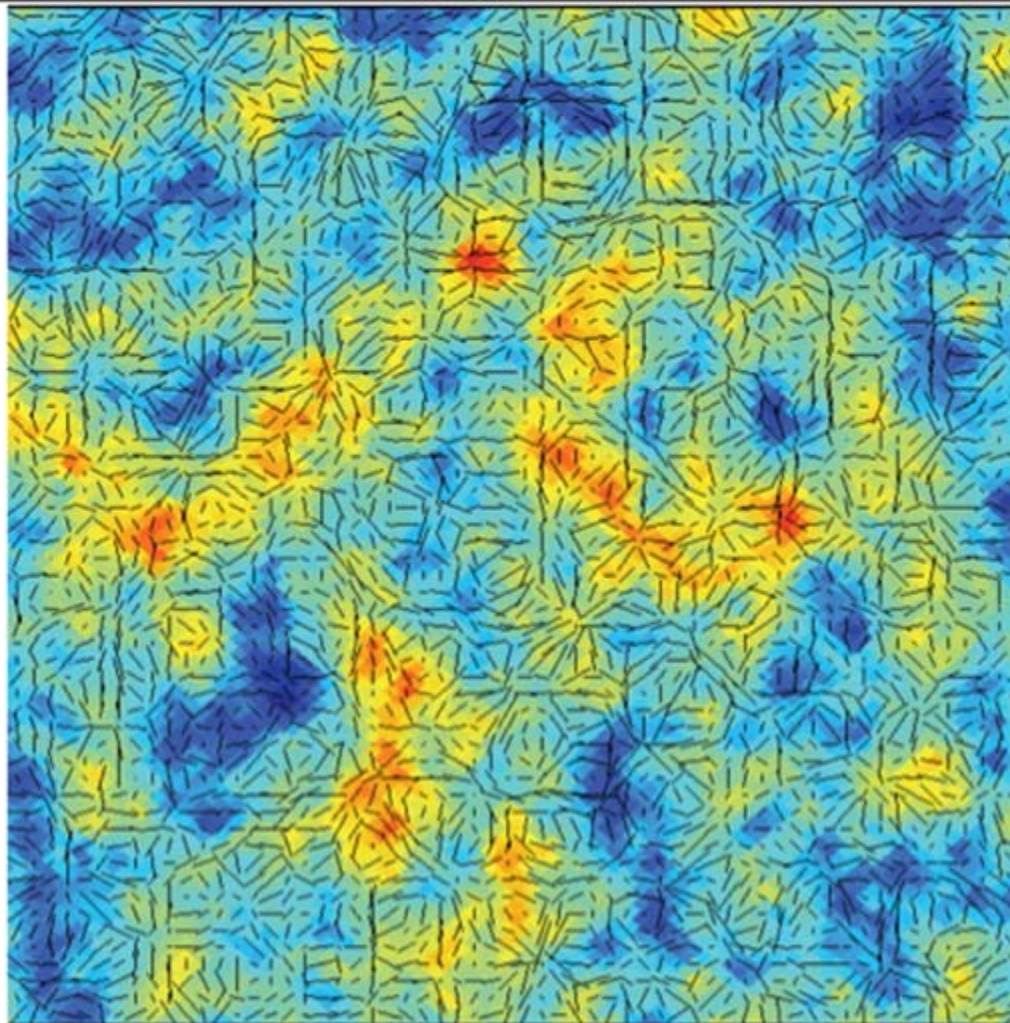
10 deg by 10 deg field



Bモード**有り**のsimulation map (現在の間接的なリミット)

# Simulated sky with $T/S=0.0$

10 deg by 10 deg field



Bモード<sup>無</sup>しのsimulation map

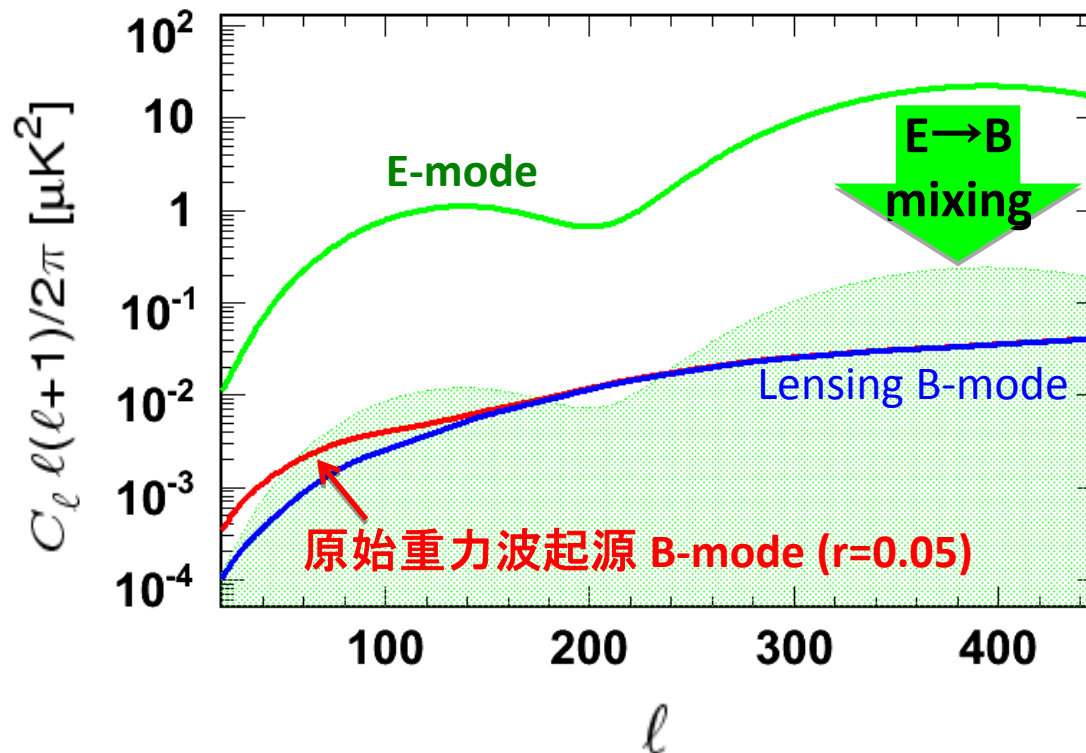
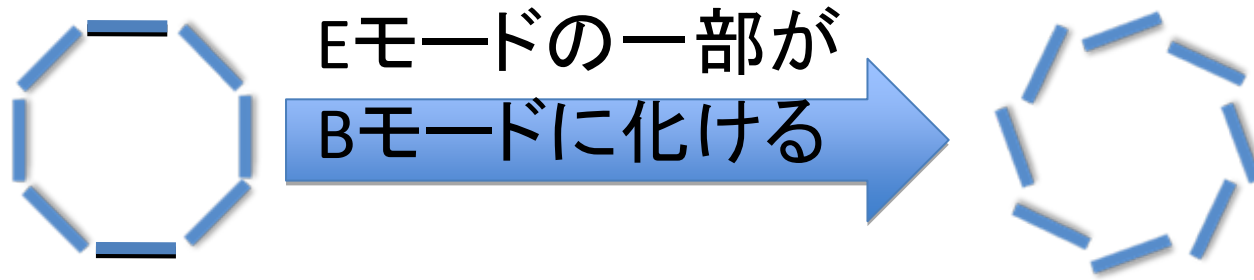
# 検出感度の向上だけでなく

- 装置の較正
- 系統誤差の理解

## が重要!!



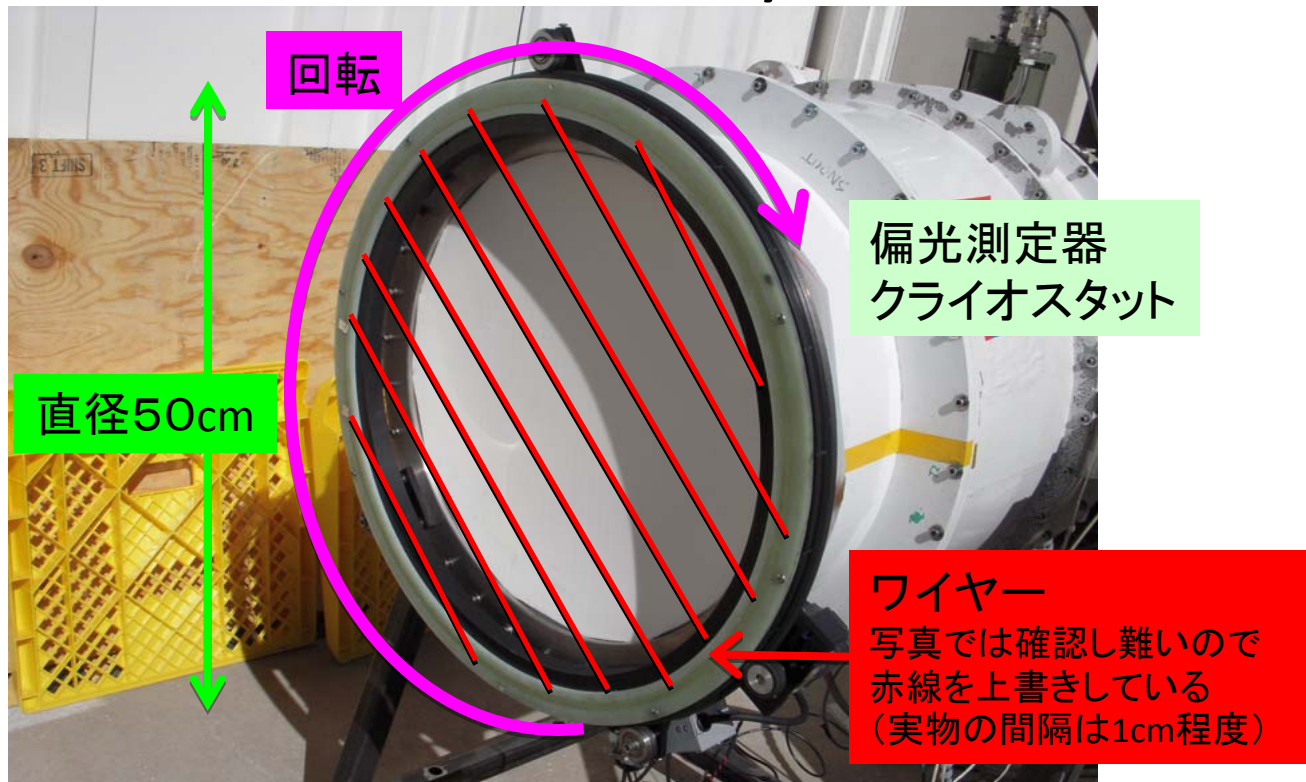
# 例えば偏光角度の較正をミスすると...



偏光角度の較正精度が  
現在と同程度 ( $2 \sim 3^\circ$ ) だと、  
全くお話にならない。  
→ 較正精度  $0.5^\circ$  は達成したい



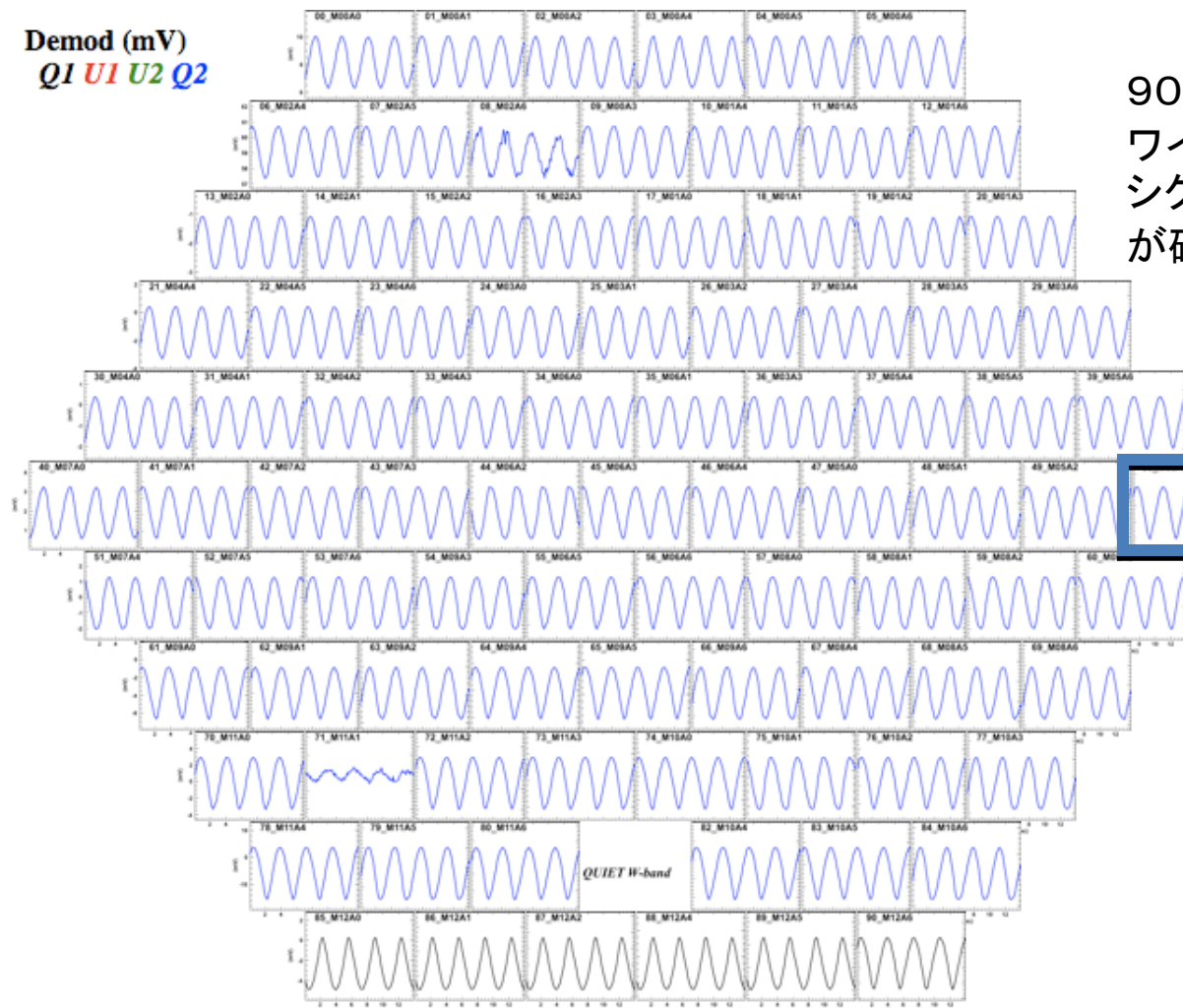
# 検出器間の角度の較正は “疎密な”ワイヤーグリッドで実現！ Accuracy of Angle: $0.1^\circ$ (30sec data)



Commissioning photo at the site (June, 2009)

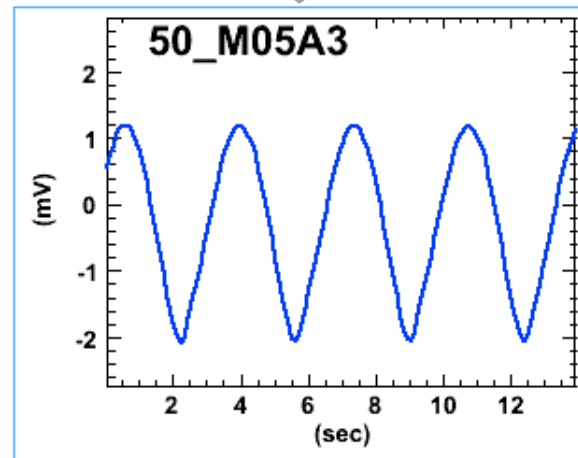
## 試作ワイヤーグリッドによる偏光シグナル

Demod (mV)  
Q1 U1 U2 Q2



90個全てのQUIET-I用偏光測定器で、  
ワイヤーグリッドの回転と共に偏光  
シグナルが回転(sinカーブ)する様子  
が確認された

拡大表示



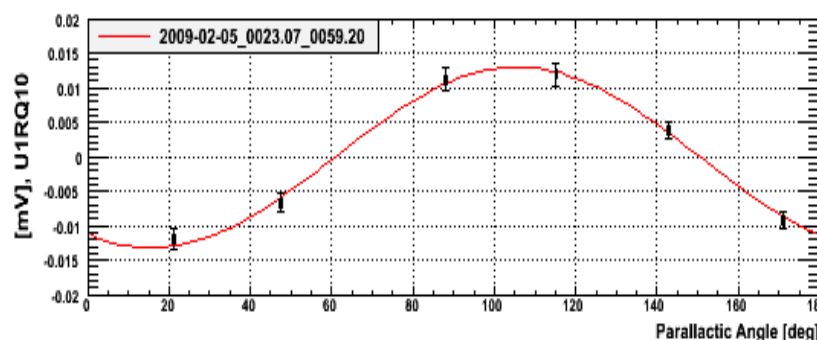
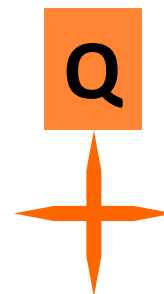
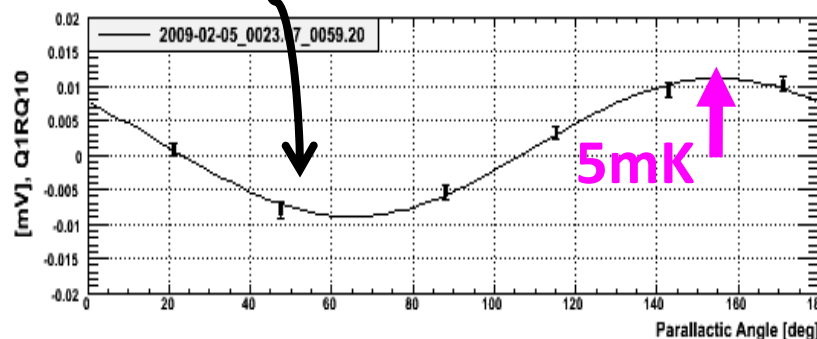
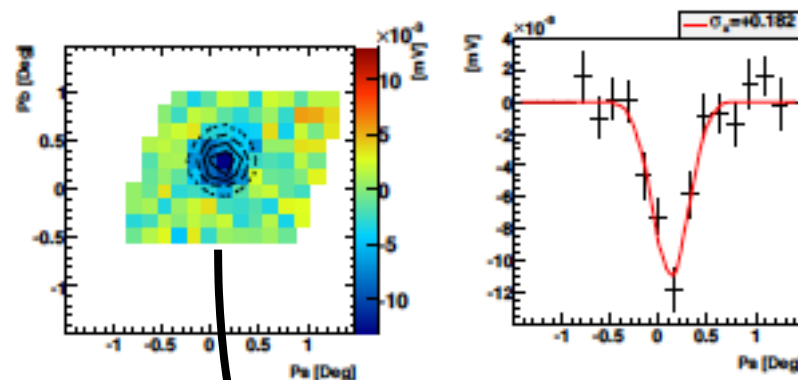
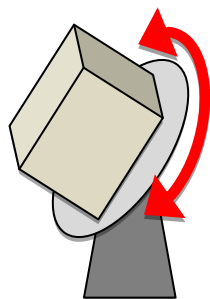
# TauAを使って1つの検出器を 空の座標系での絶対角度を高精度( $0.1^\circ$ )で較正

$$T_{\text{pol.}} = 5\text{mK}, \alpha_{\text{sky}} = 149.9 \pm 0.2^\circ$$



1日に可能な測定時間: 2hours  
一回の測定の精度  $\sim 2^\circ$

TauA



# まとめ

## QUIET実験は

- 地上からCMB偏光を観測
- 原始重力波起源のB-mode
- Phase-I: 世界最高の直接測定リミットを与えるであろう  
しかし、Bモードの発見までは難しい
- Phase-II: Bモードの世界初観測にとどく有力な実験
  - 実験技術はPhase-Iで確立
  - 間接的なリミットよりも10倍の感度  
(メジャーなモデルを網羅できる感度)

Poster:

- ☆ M. Nagai: “QUIET実験の観測ストラテジー”
- ☆ Y. Chinone: “QUIET実験Q-bandデータの解析”
- ☆ M. Hasegawa: “QUIET phase-IIに向けた偏光検出器テストシステムの開発”
- ☆ K. Ishidoshiro: “QUIET phase-II用ADCシステムの開発”