

QUIET実験

田島治 (KEK IPNS)

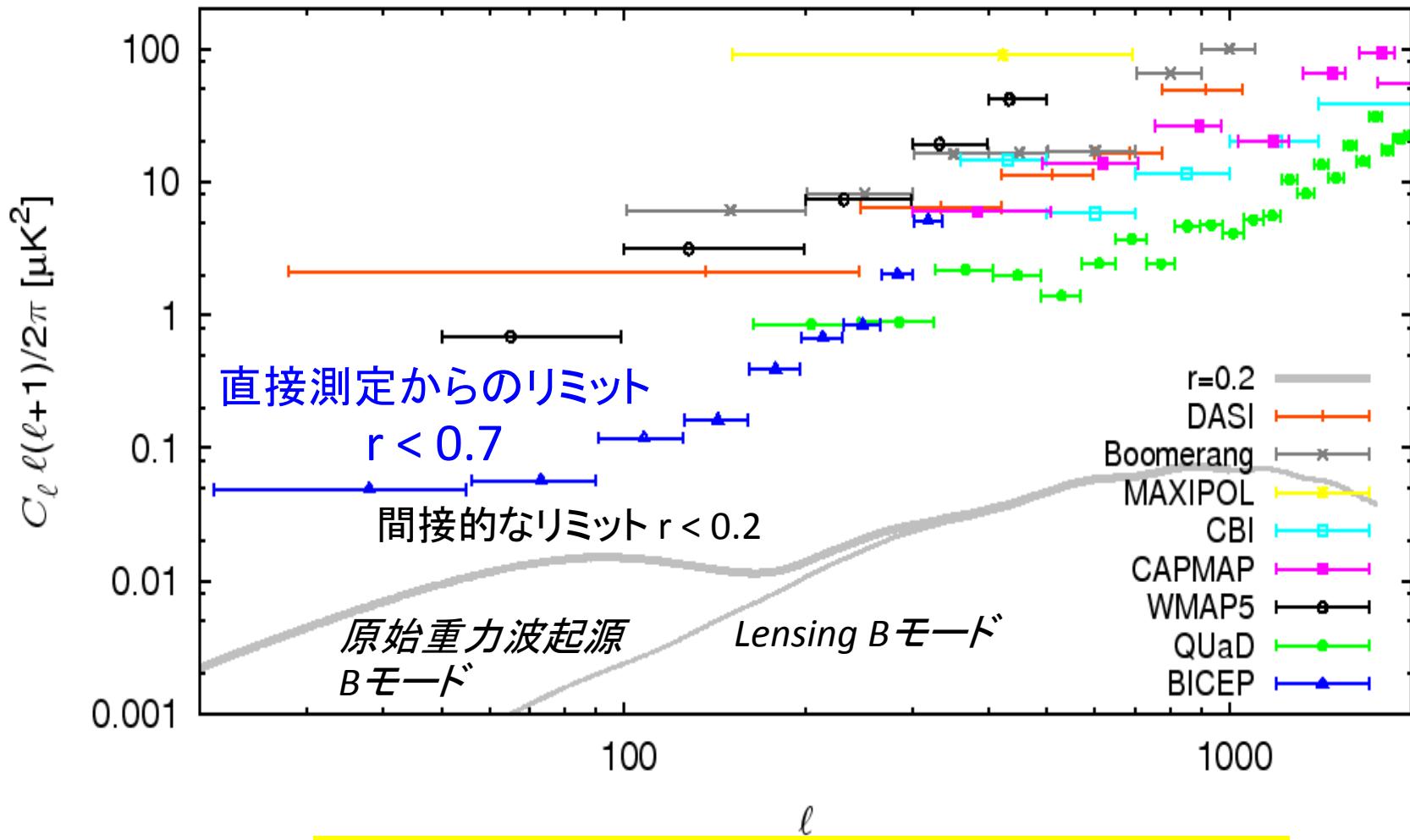
QUIET collaboration

Physics Motivation

世界で最初にBモード偏光を捕えたい！

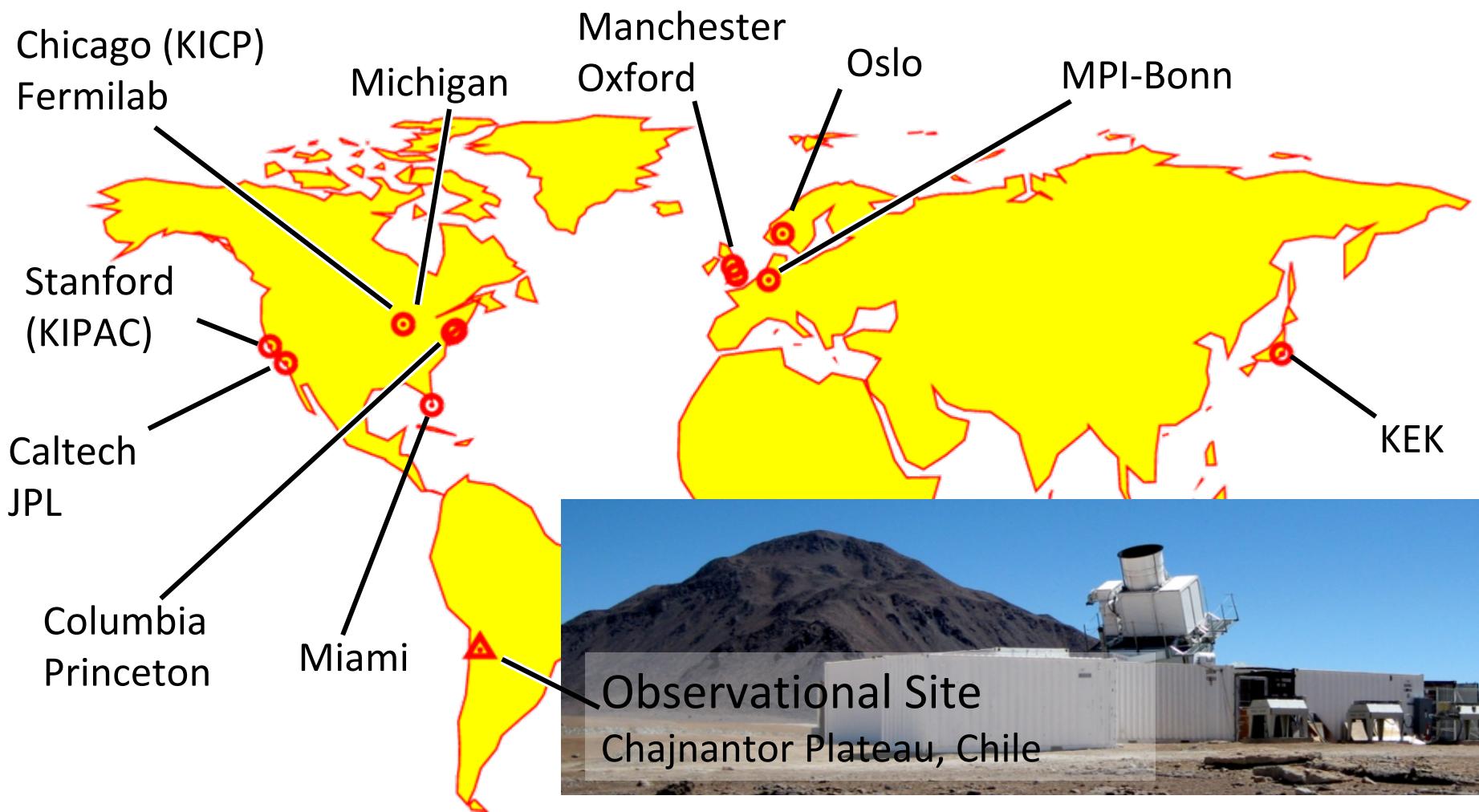
原始重力波起源の

様々な実験の現状



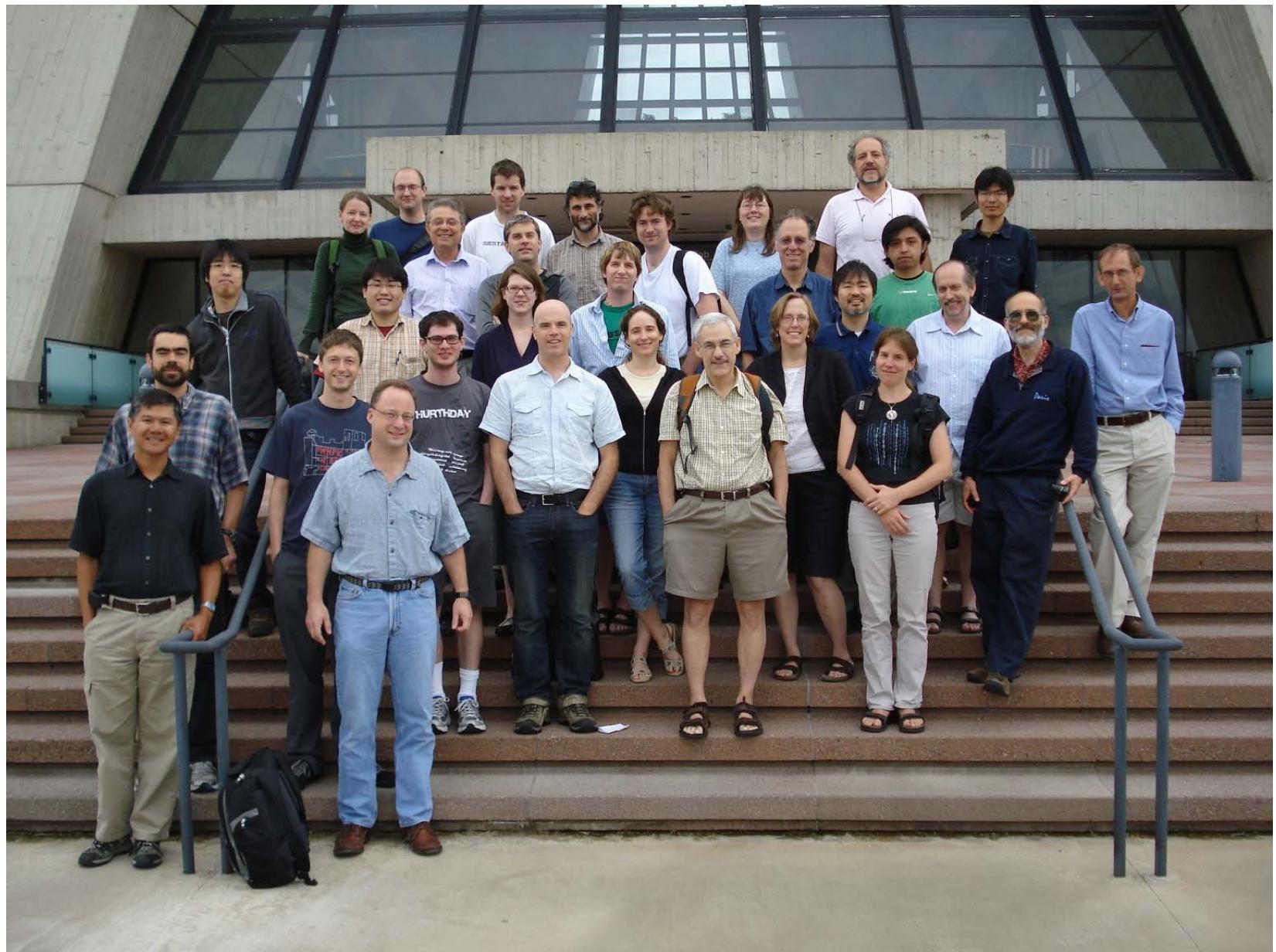
直接測定リミットをガンガン削っていって、
やがて最初に発見するのがQUIET実験

QUIETコラボレーション

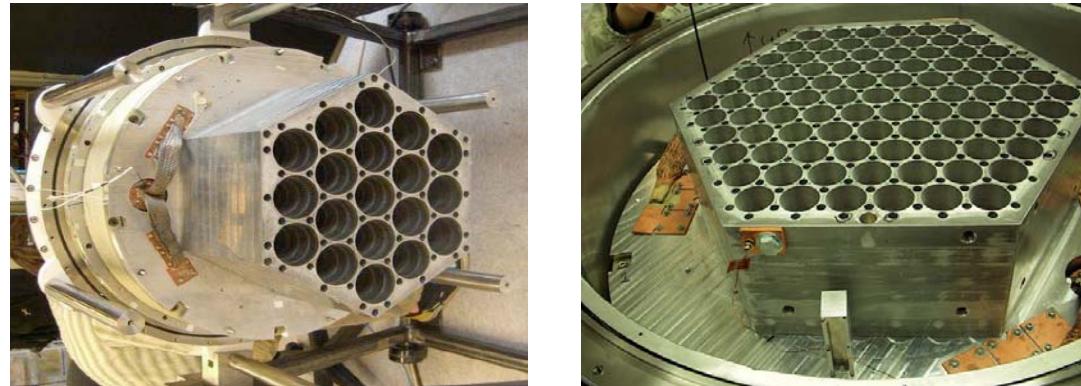


5 countries, 14 institutes, ~35 scientists

Collaboration meeting at Fermilab, June 2009



おおまかな歴史



現在

開発



KEK参加

Q-bandでの観測



2008, 10月

Q-band (40GHz)
観測開始

Q-band解析

W-bandでの観測



2009, 8月

W-band (90GHz)
観測開始

Phase-II

2010

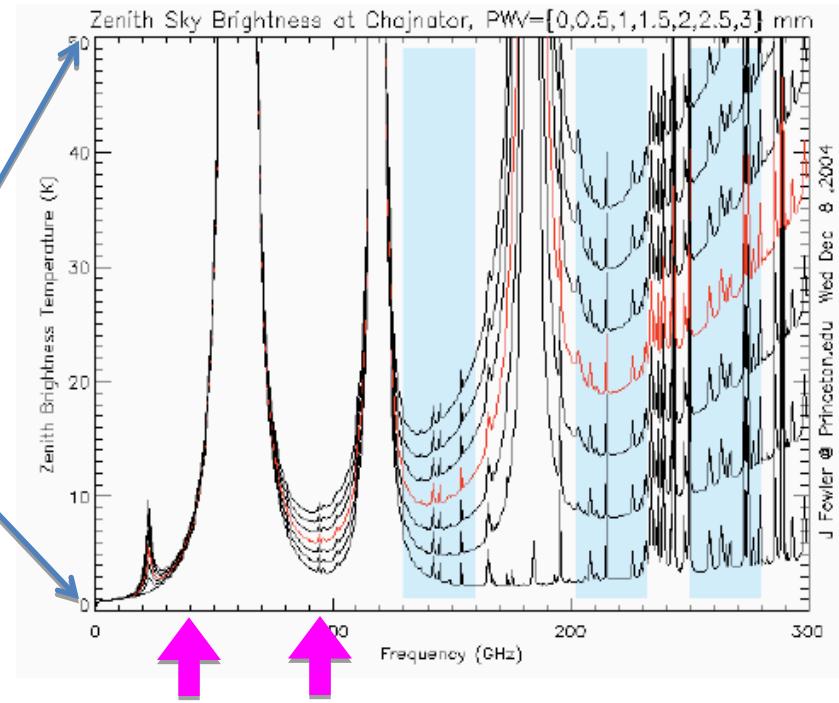
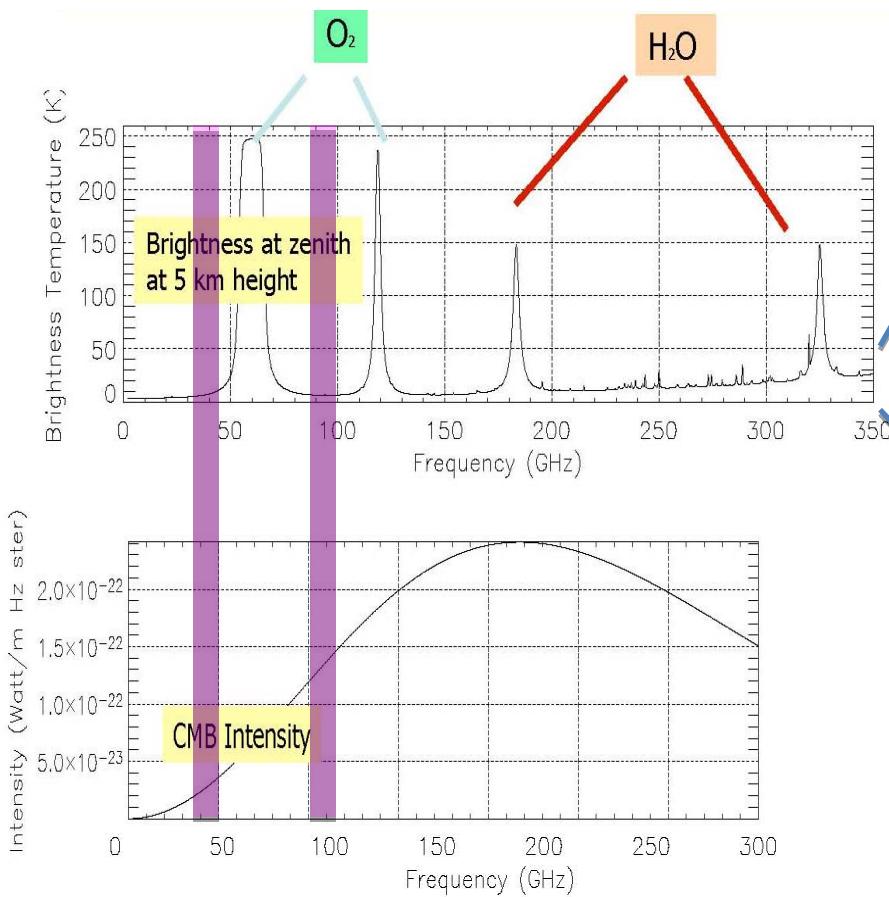
観測サイト

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

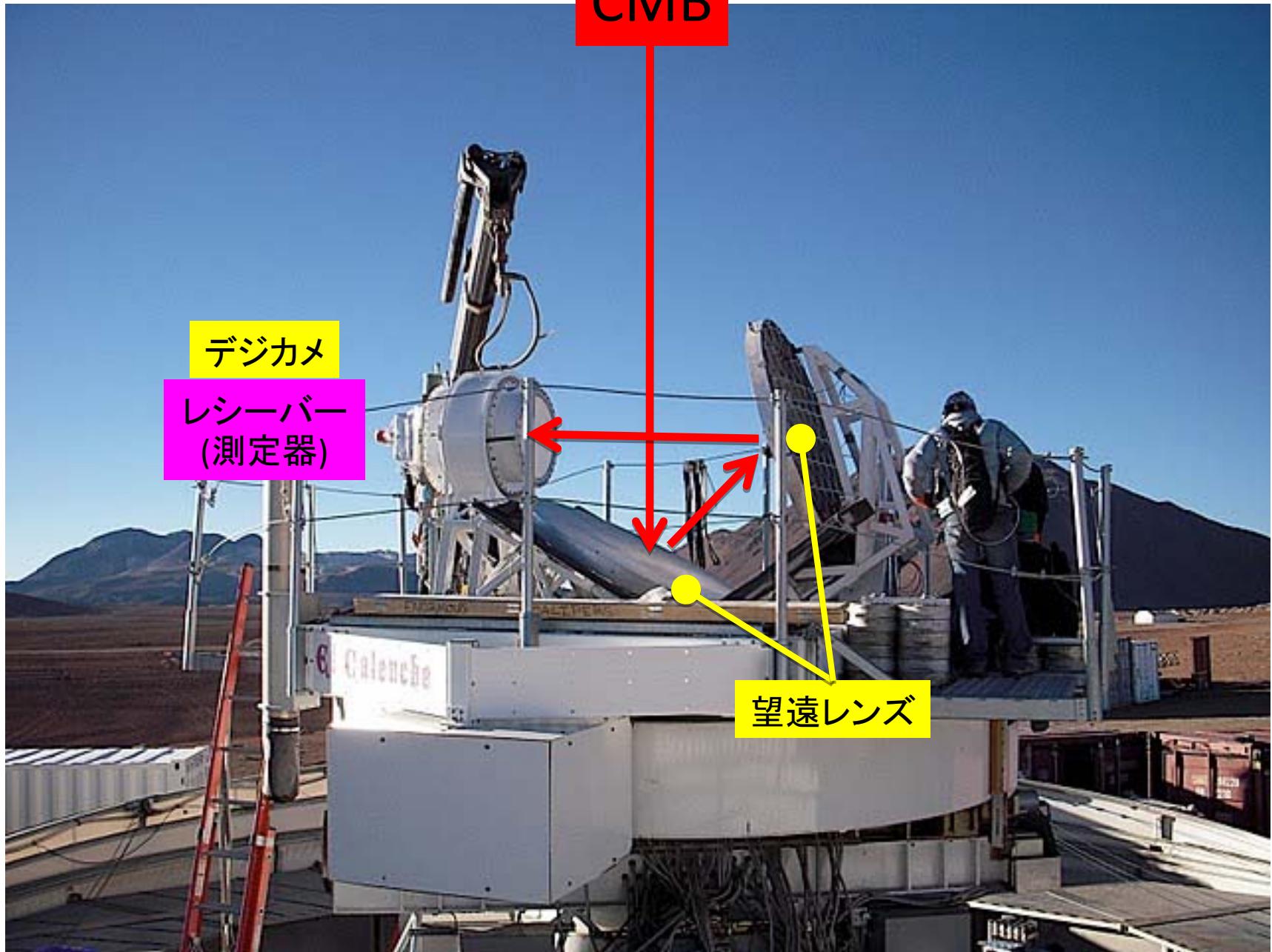


CMB

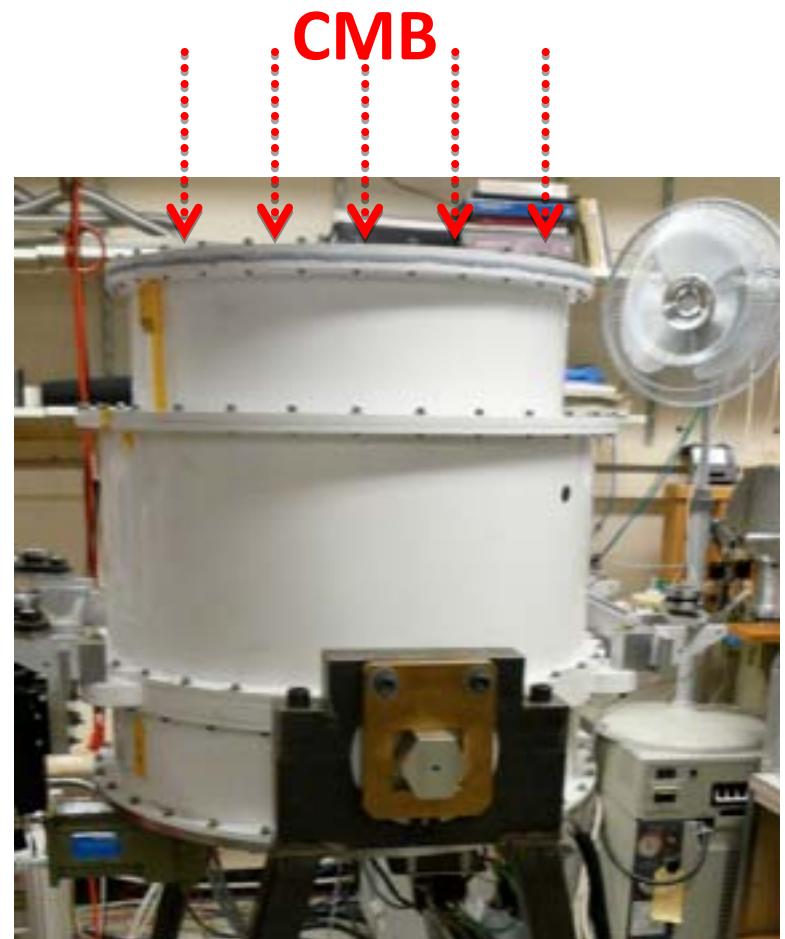
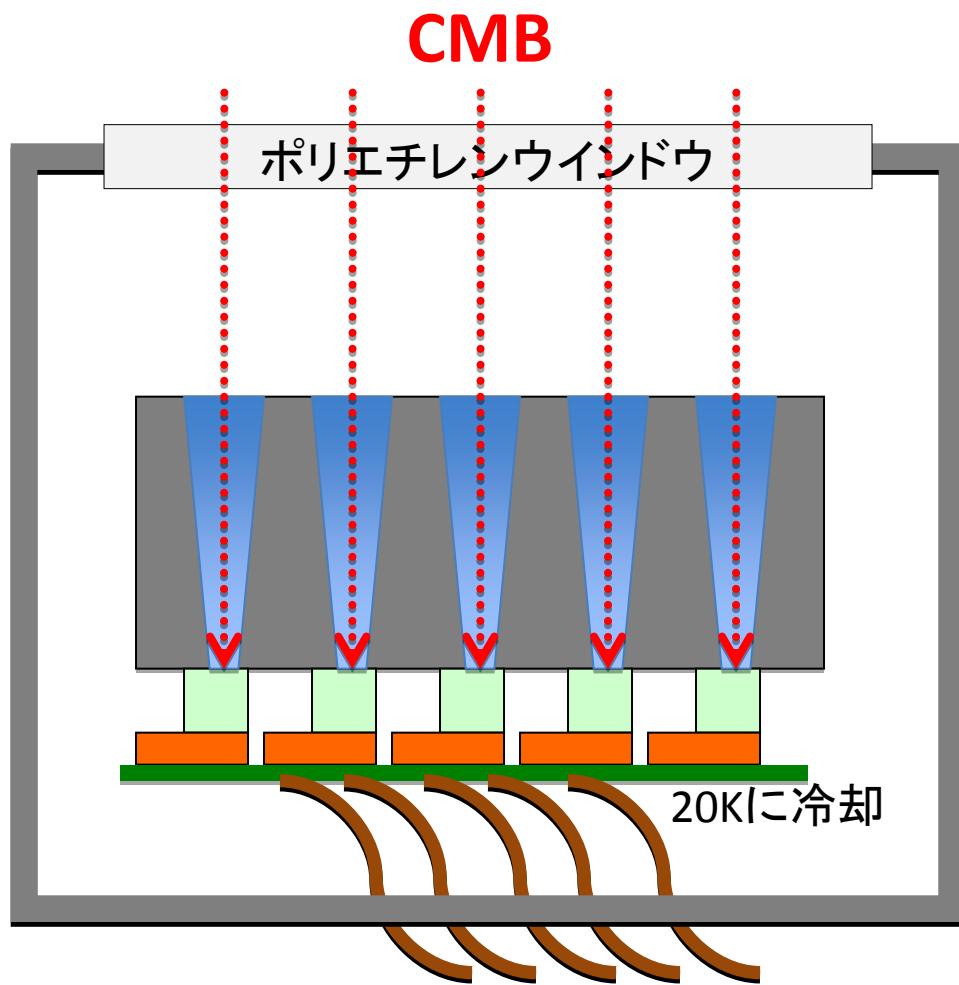
デジカメ

レシーバー
(測定器)

望遠レンズ

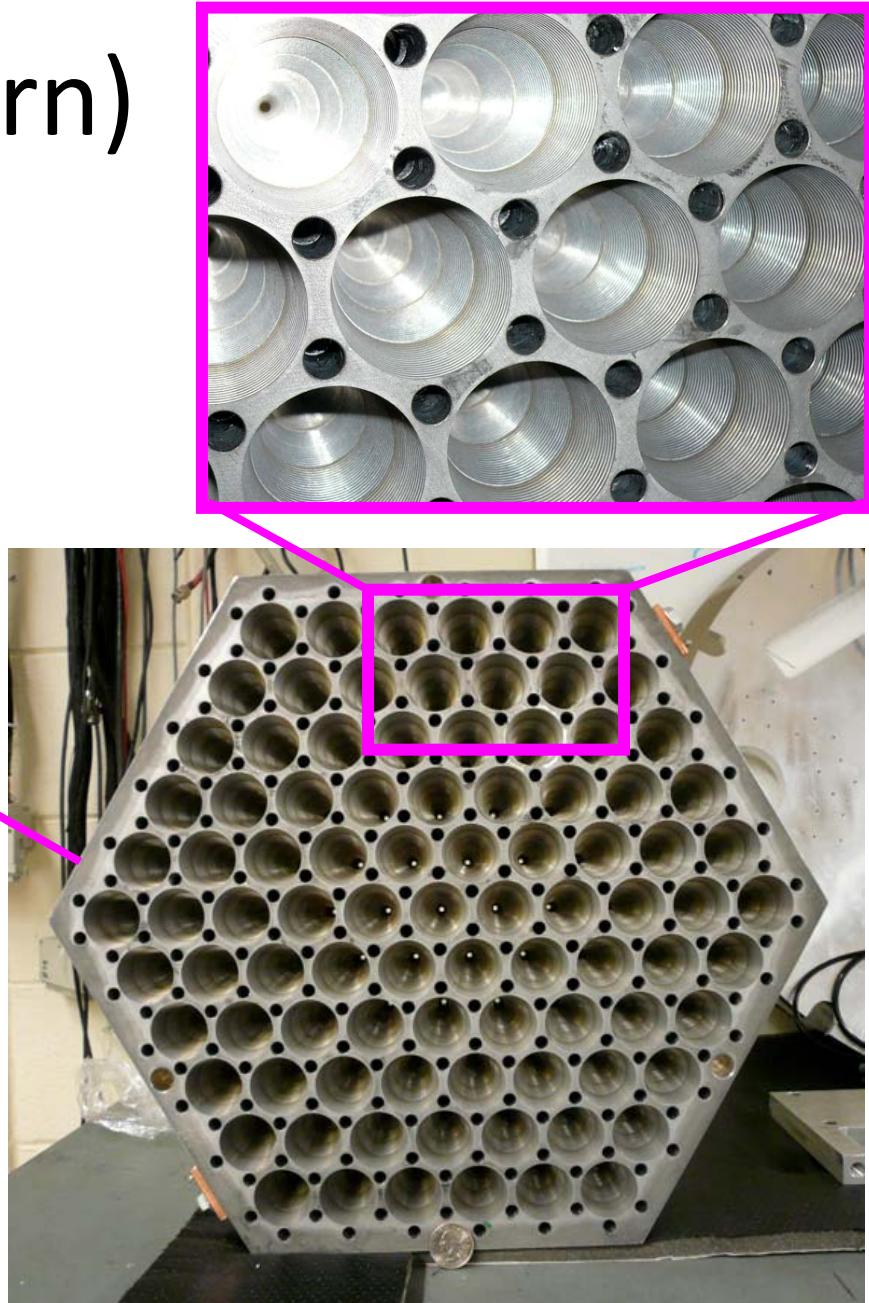
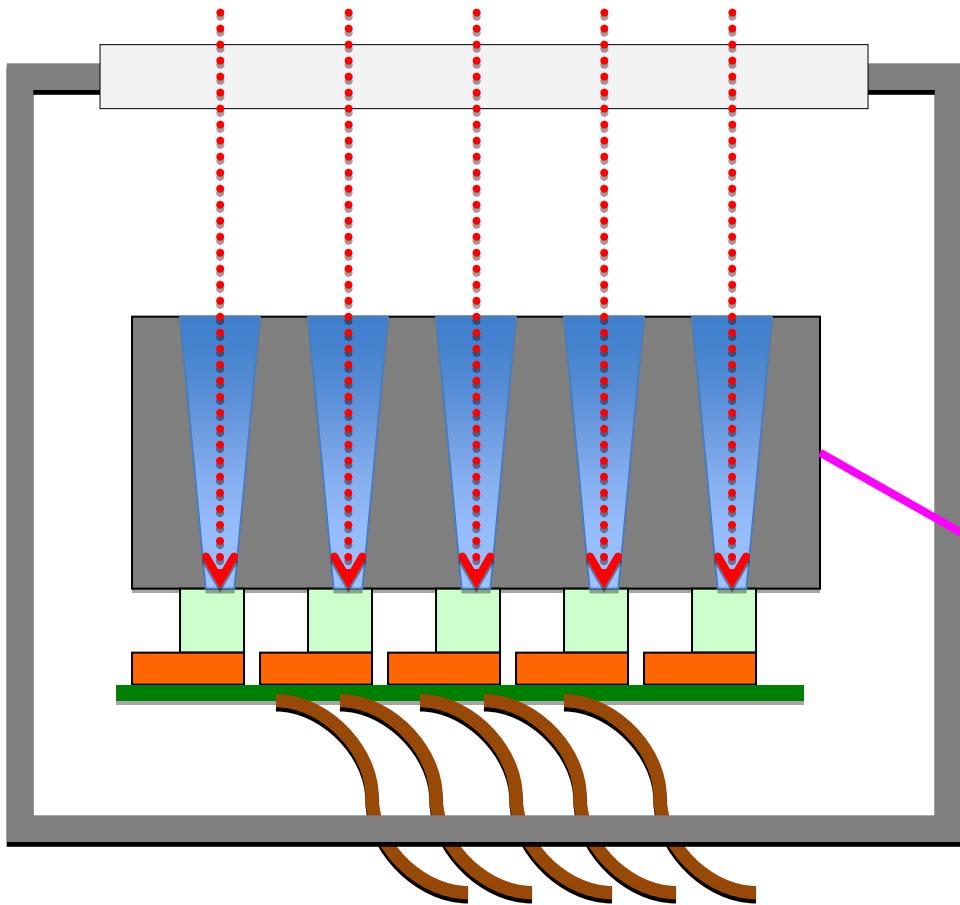


QUIET Receiver

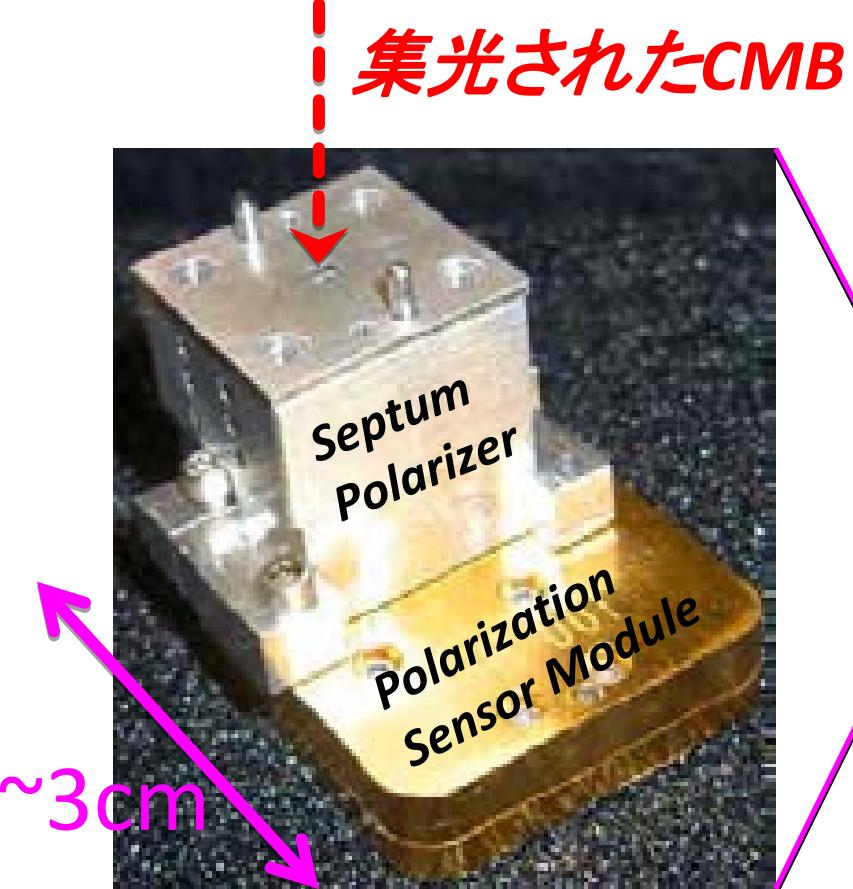


Platelet Array (horn)

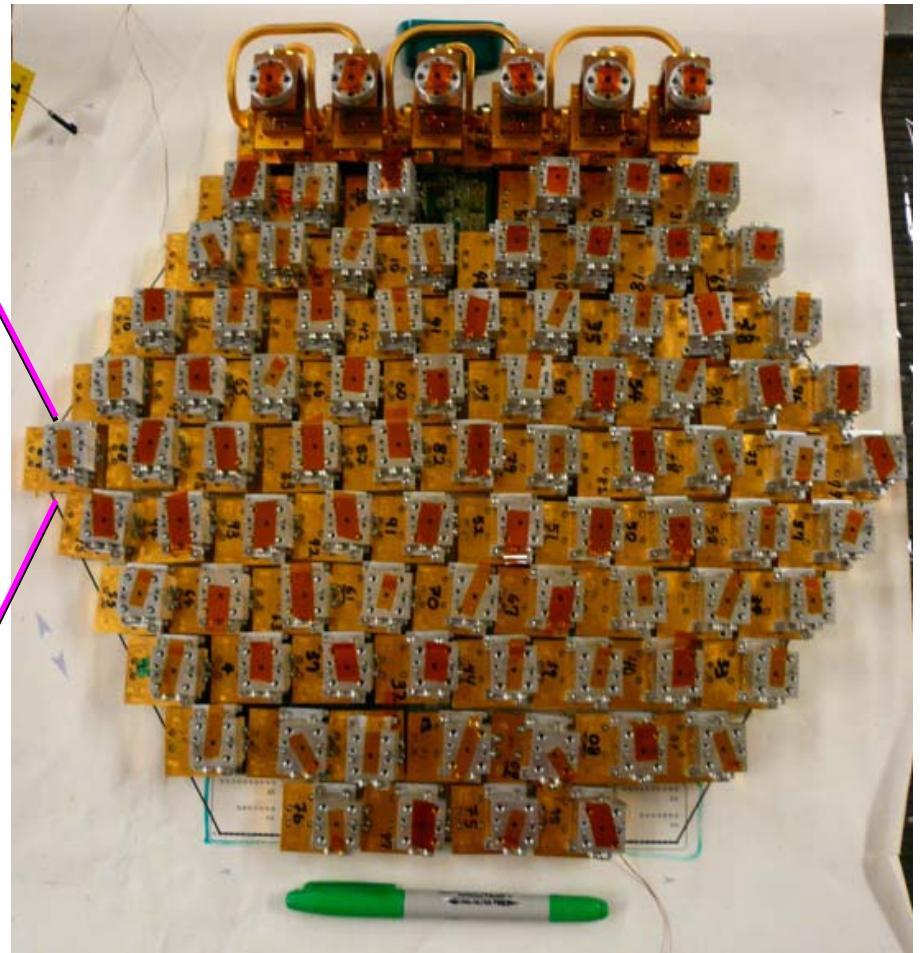
CMB



検出器 Septum Polarizer & Polarization Module



90画素偏光検出器

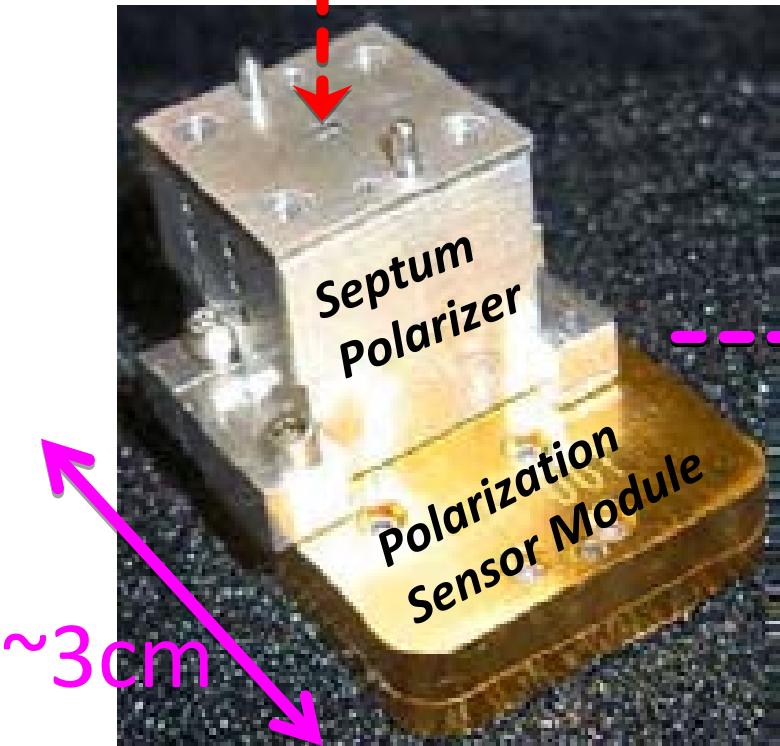


CMB偏光のシグナルは、 とても、とても、とても....小さい

- QUIETを例に比較
 - Eモード偏光シグナル ~0.00002 mV
 - HEMTアンプの1/fノイズ($f_{knee} \sim 1\text{kHz}$) ~1 mV
 - HEMTアンプのwhite noise ~0.01 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

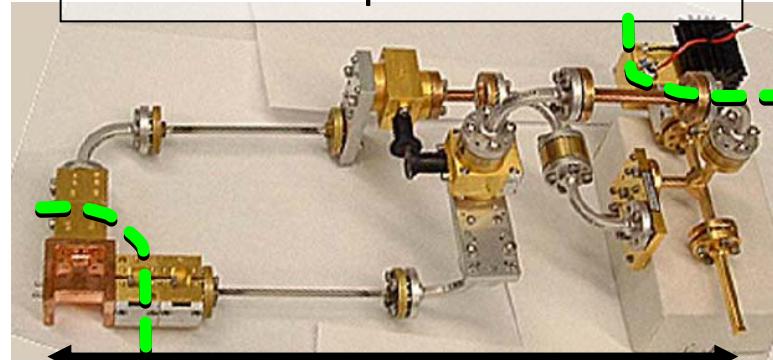


基本原理は成熟しているが、
最新の検出器！！

ここまで、電波の世界

この先、電気回路の世界

c.f. CAPMAP polarimeter



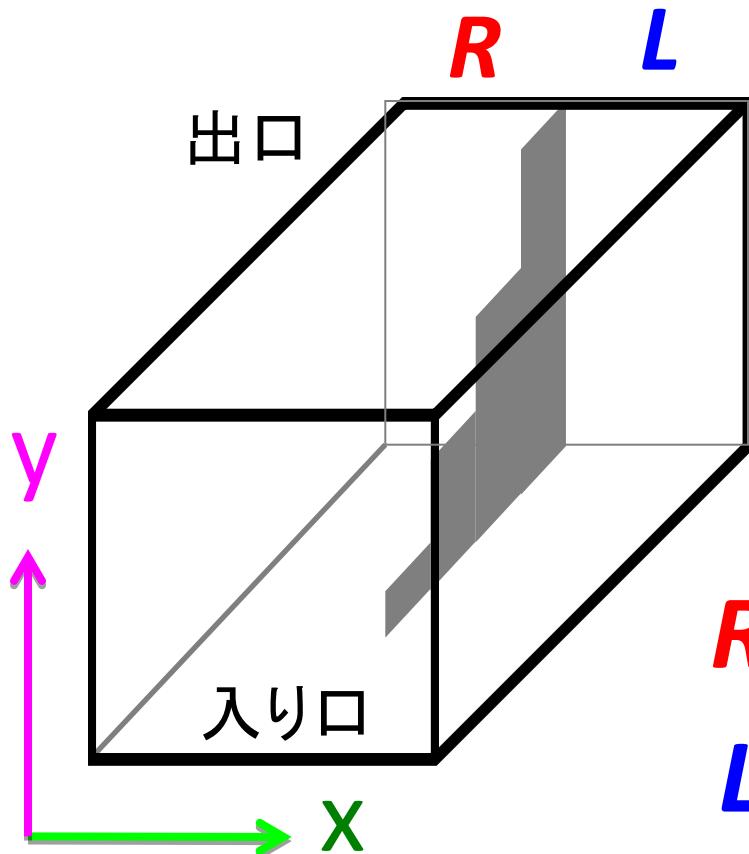
7~8年前の実験と比べて1/10サイズの検出器を開発
→検出器の数(統計)が容易に増やせる
こういった原理検証を行なったこともQUIET phase1の大きな成果

~30cm

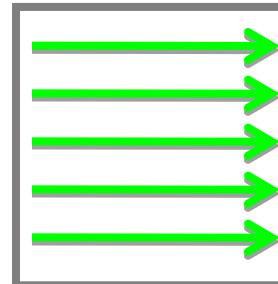
まだ、電波の世界

Septum Polarizer (OMT)

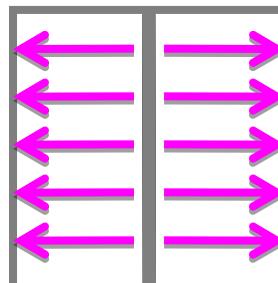
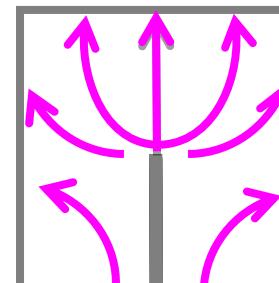
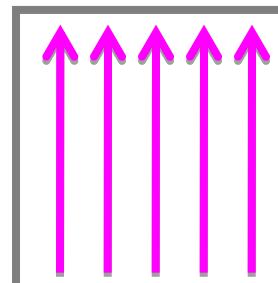
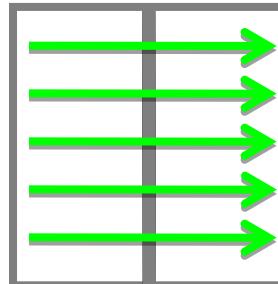
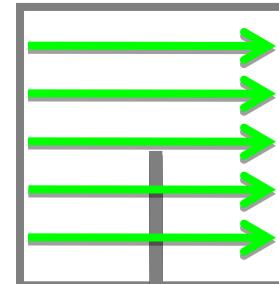
- 電場の縦成分を横方向に変える
- 2つの出口で横に変わるphaseが逆
- 横向きの電界を持った電磁波 L, R が2つの出口からでてくる



入り口

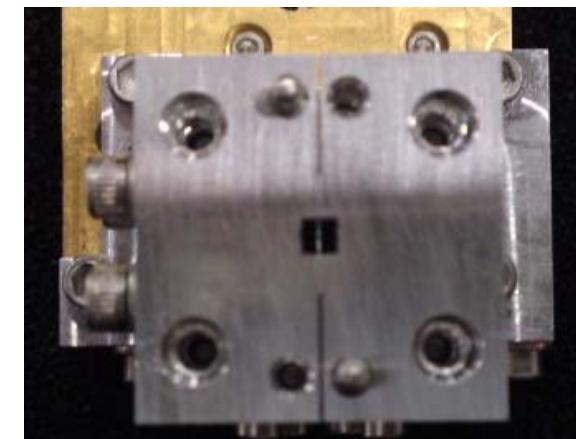


出口



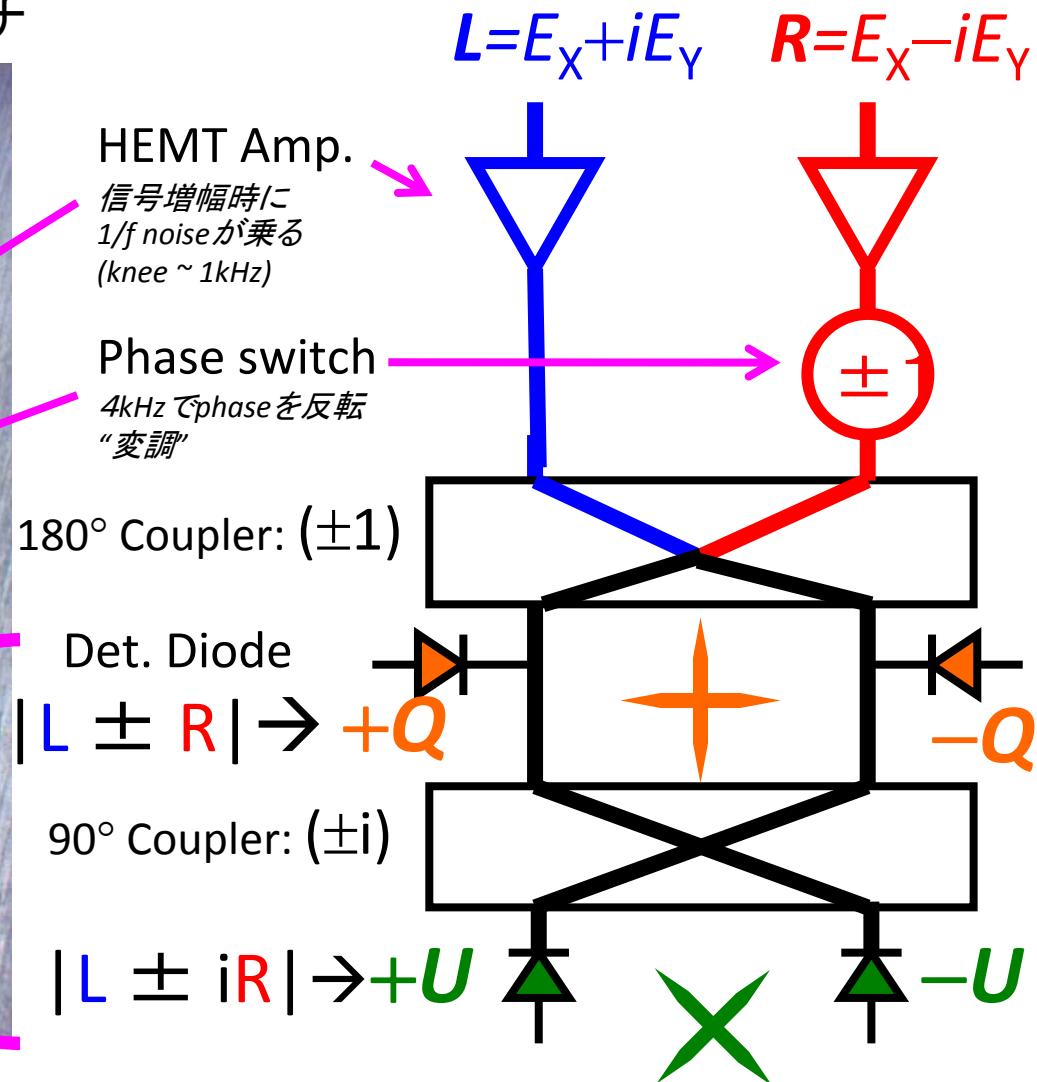
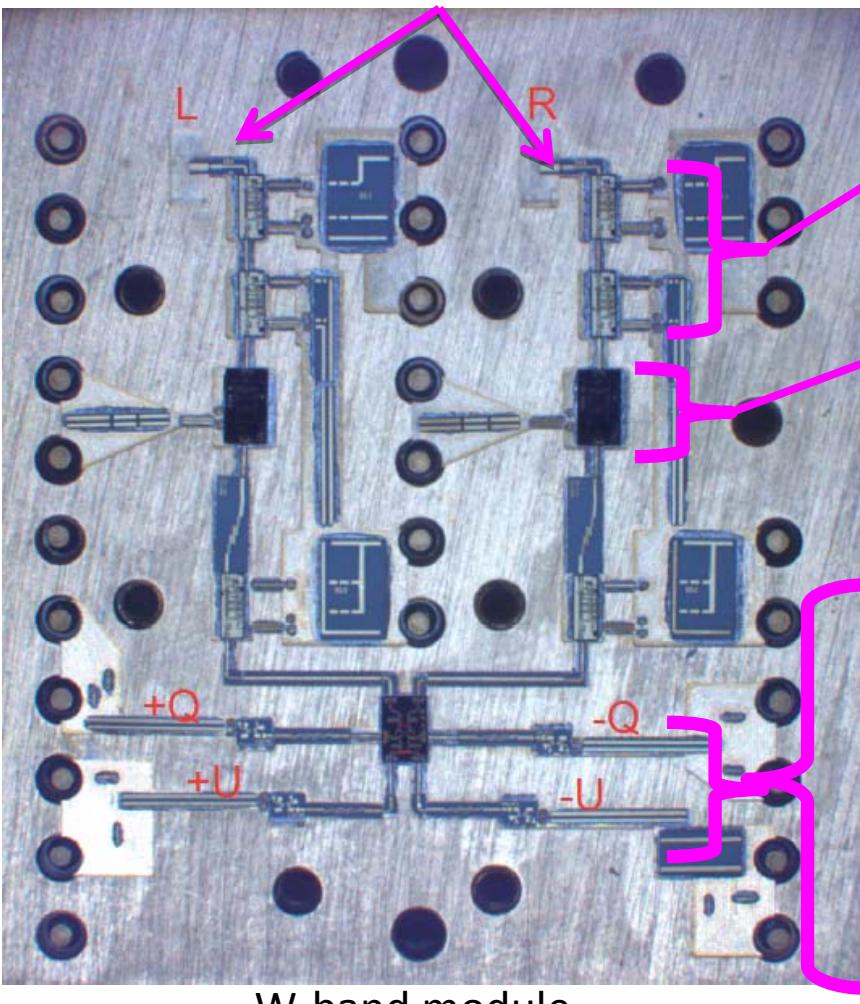
$$R = E_X - iE_Y$$

$$L = E_X + iE_Y$$



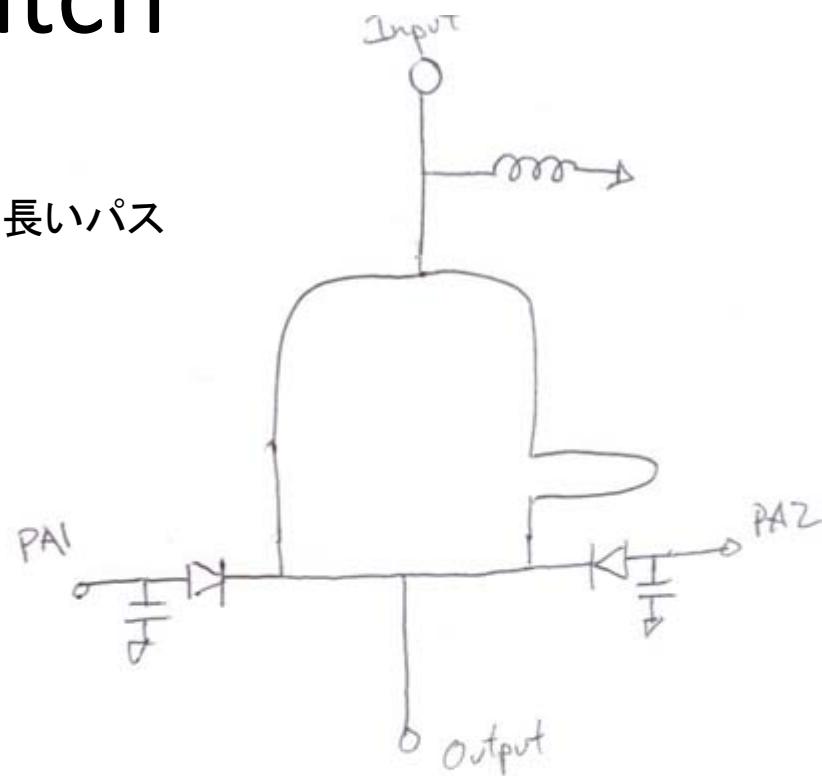
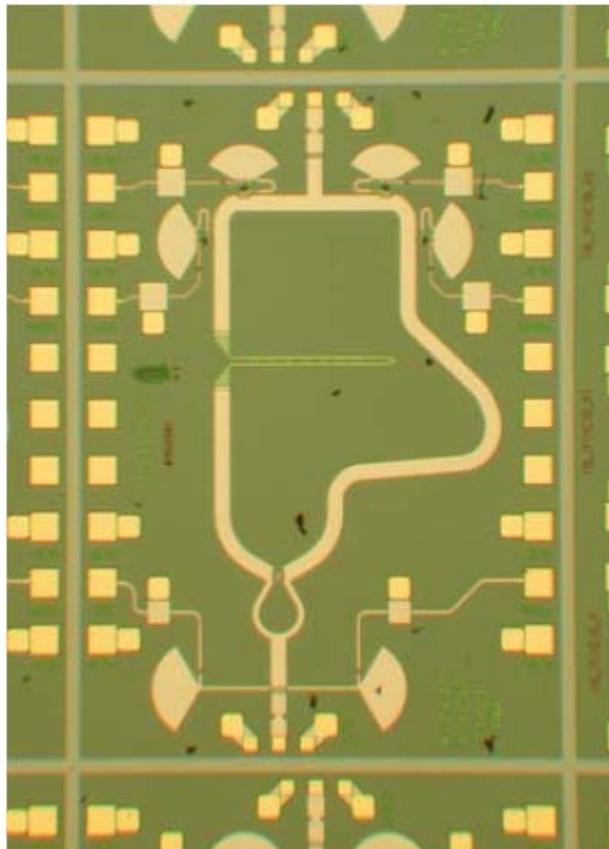
Polarization Module

電磁波(L, R)をピックアップするアンテナ

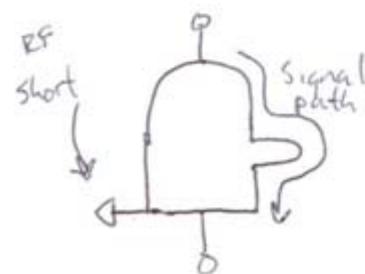


Phase Switch

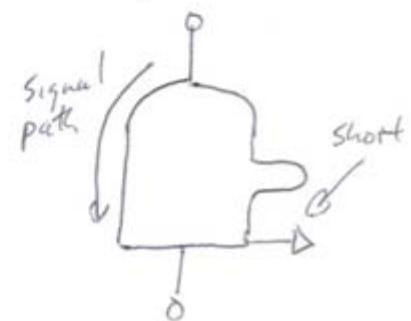
- 信号の流れるパスを切り替える
一方が短いパス、もう一方が半位相分長いパス



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



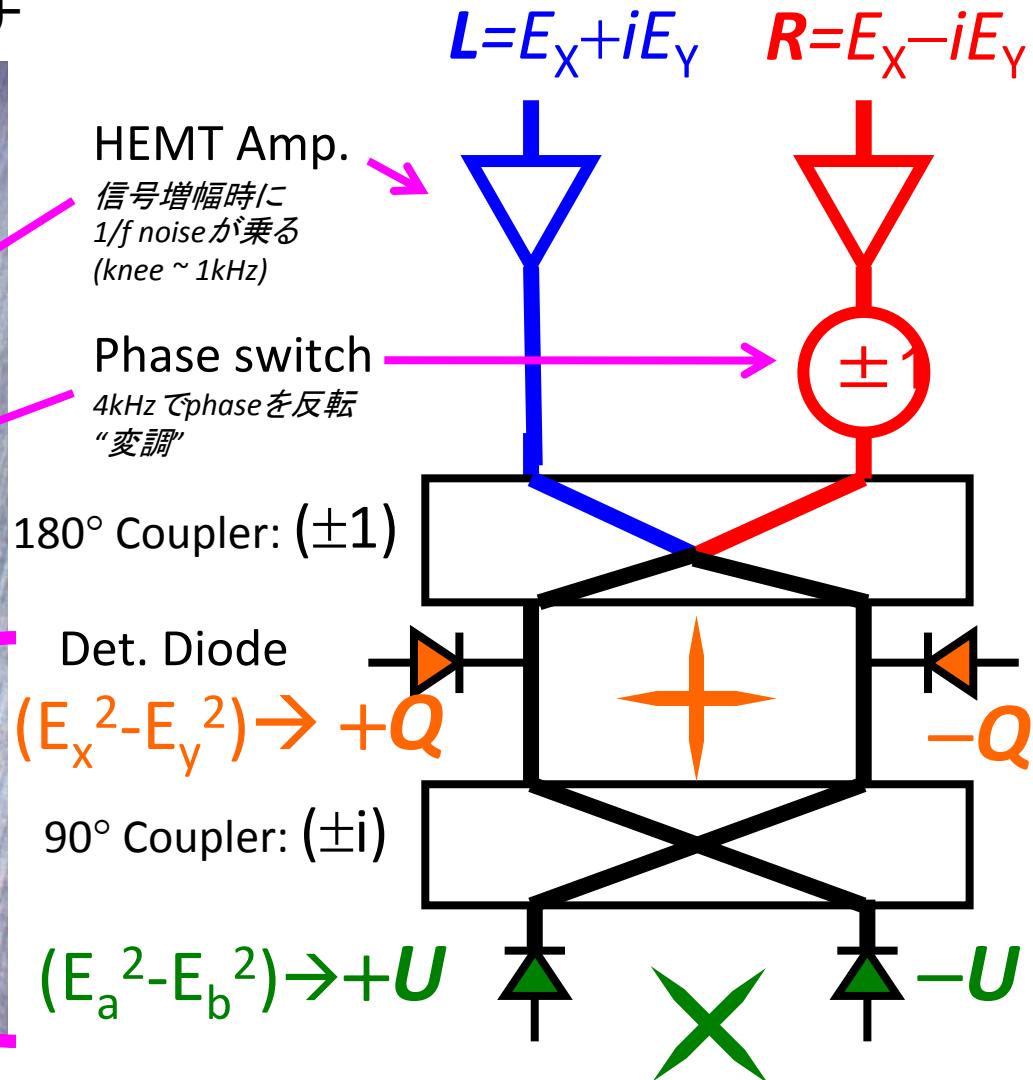
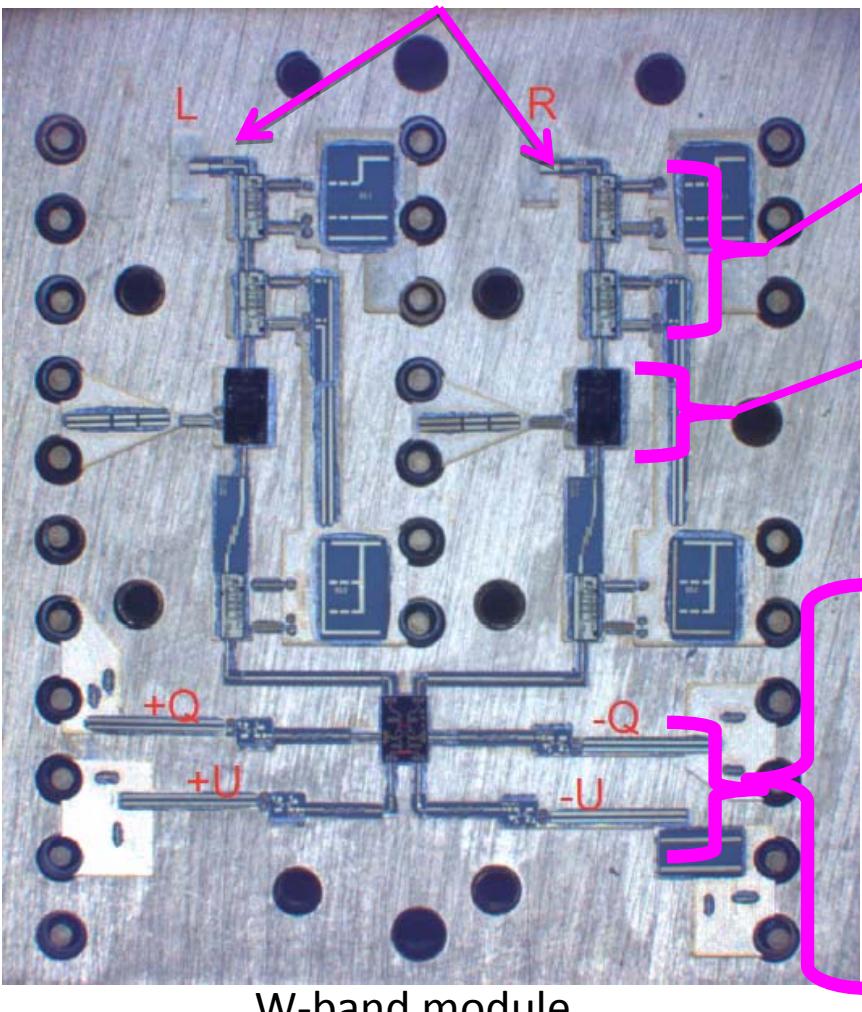
When $PA2 = +0.6V, \sim 1mA$
Equivalent circuit is:



これから電子回路の世界

Polarization Module

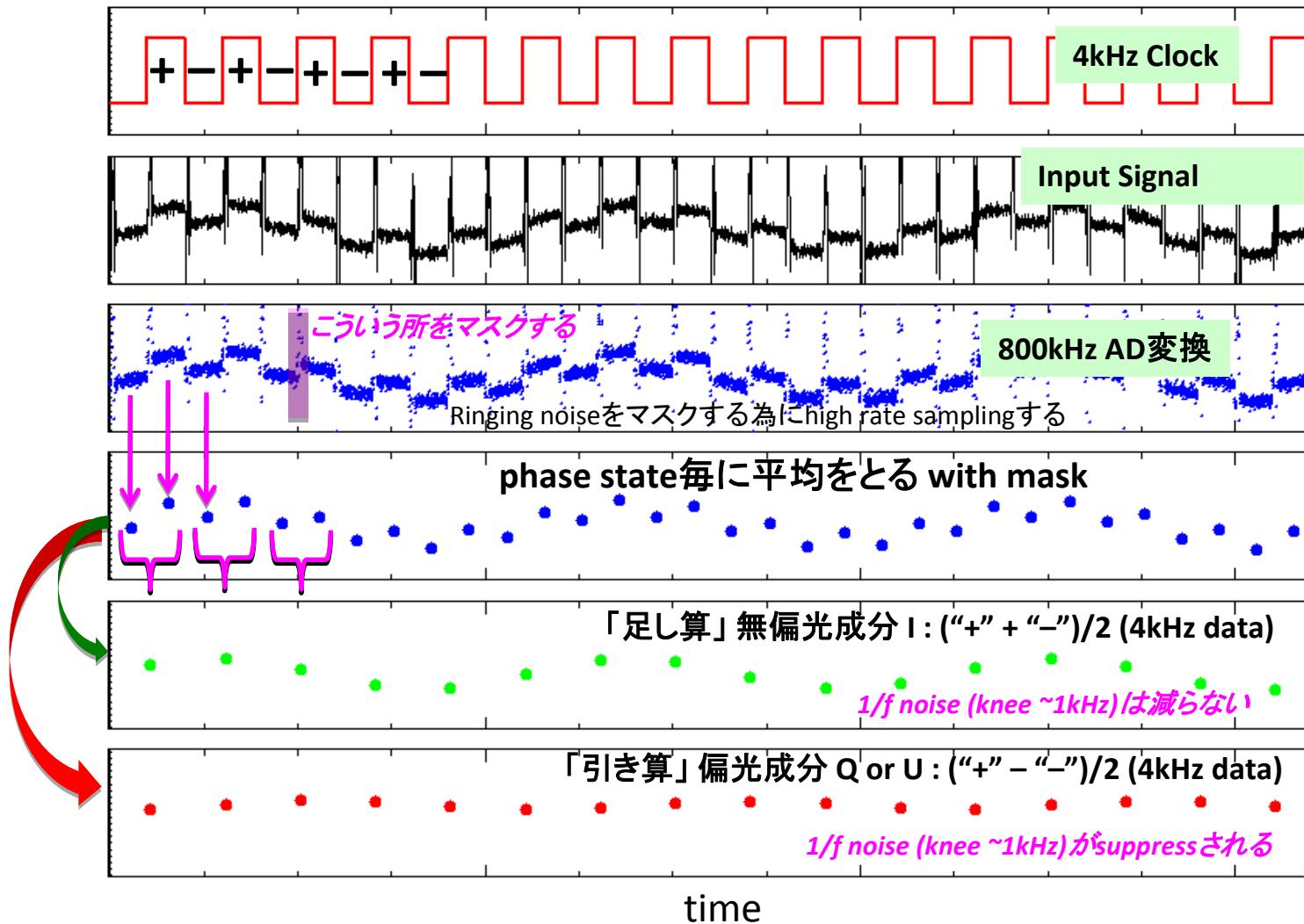
電磁波(L, R)をピックアップするアンテナ



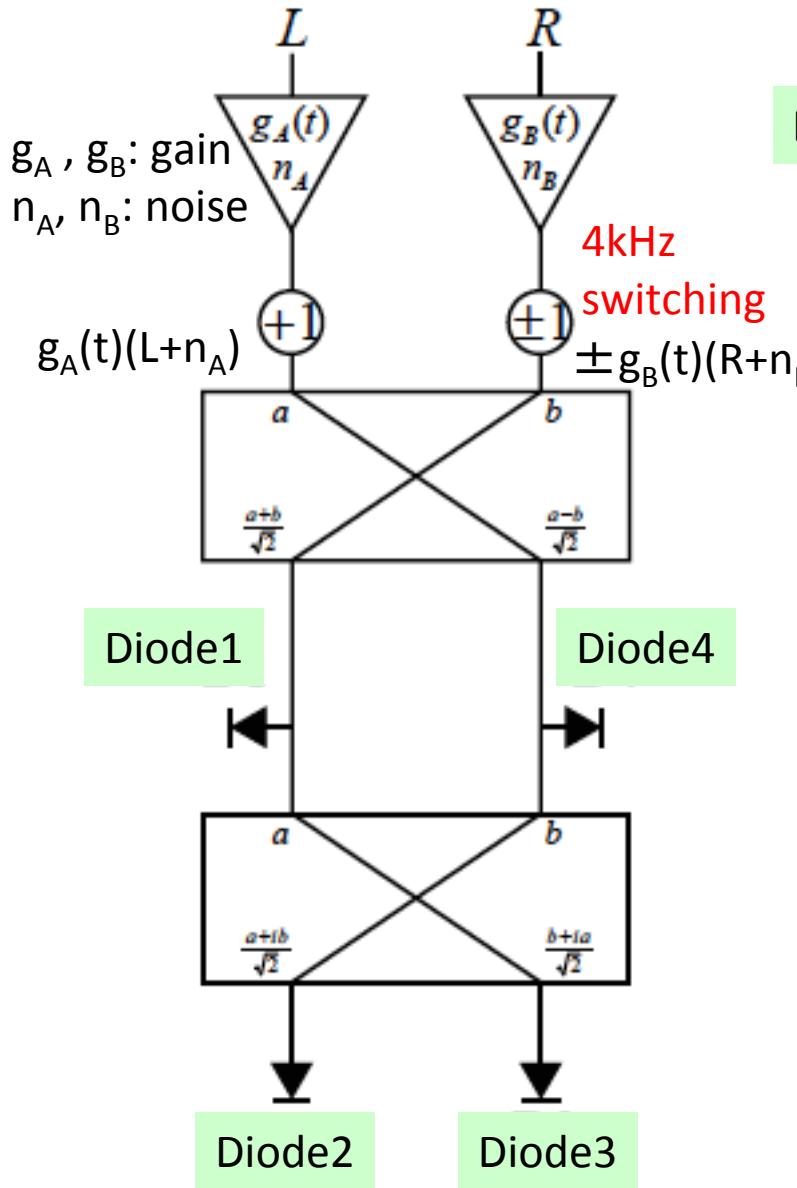
実際の測定では、diode信号を読み出して、
phase statusを考慮しながら、onlineで復調(“引き算”)する

出力信号の復調

Toy-simulation



数式で書いてみる



Diode1の出力 v_k(+,±) がどうなるか？

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

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

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

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

$$= g_A g_B Q$$

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

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

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

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

「足し算」

「引き算」

「足し算平均」

「引き算平均」

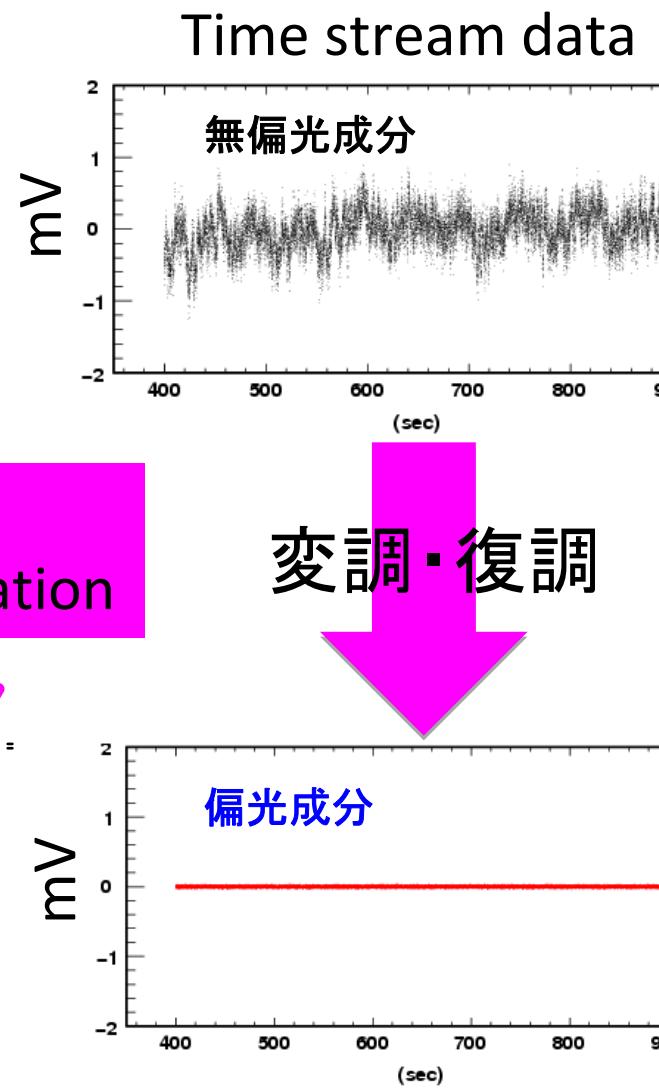
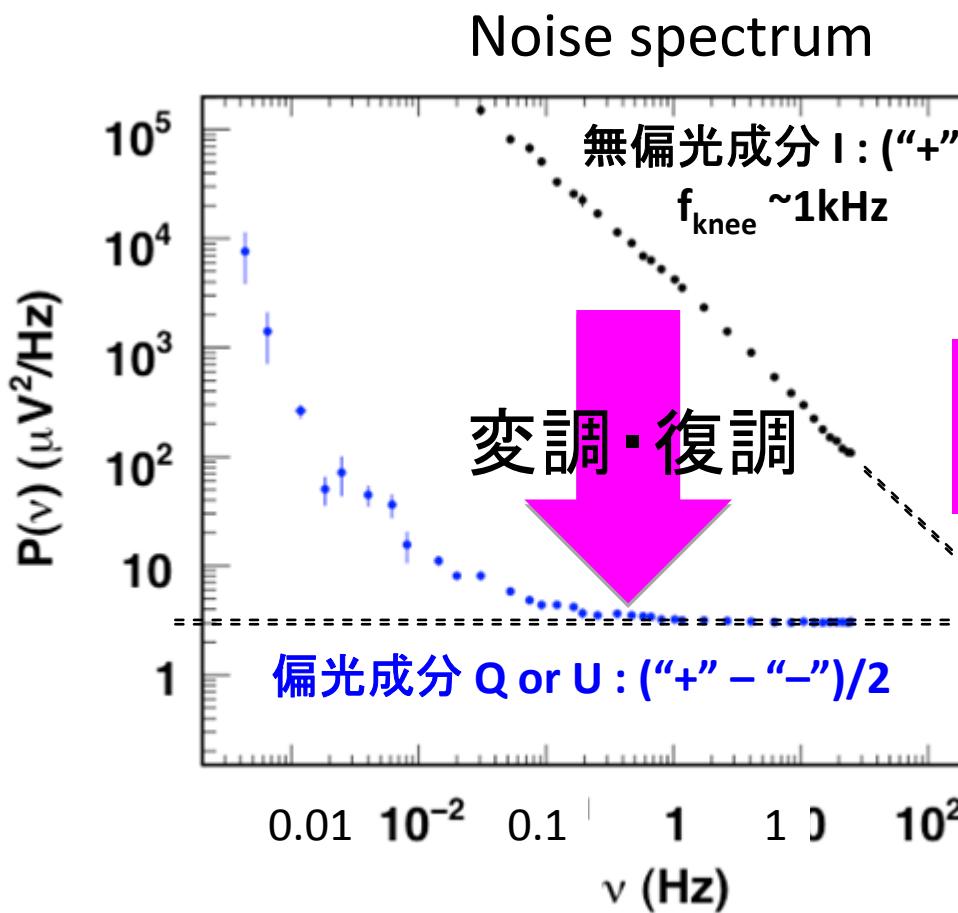
無偏光成分
偏光成分



: 1/f noise (knee ~1kHz)

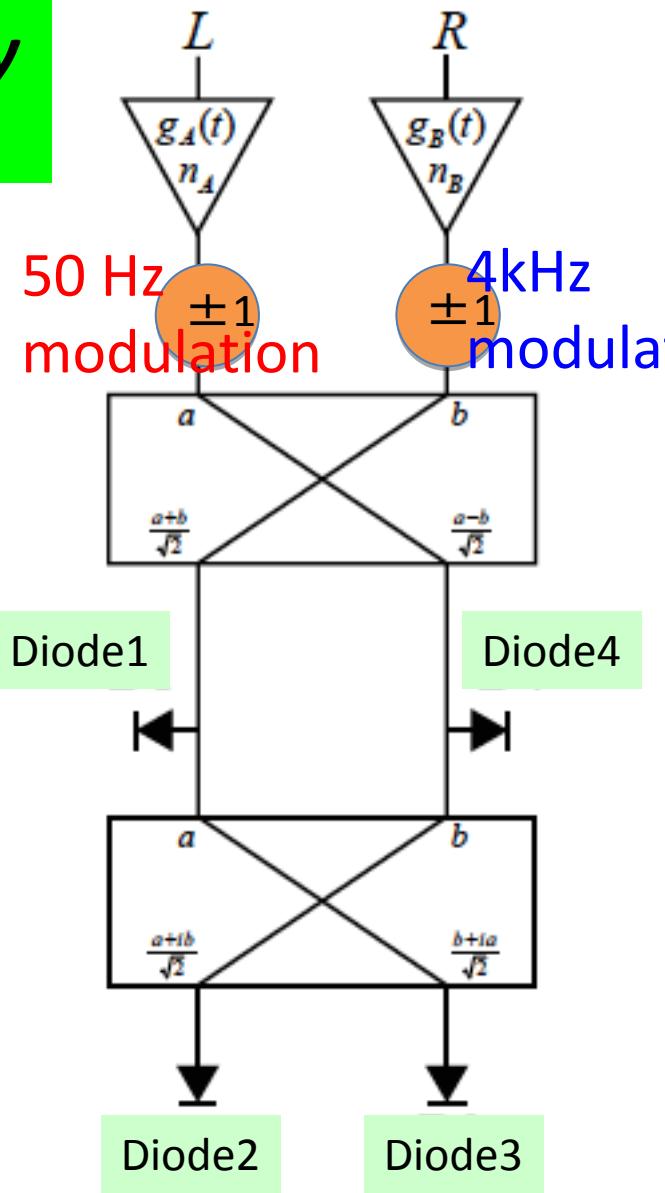
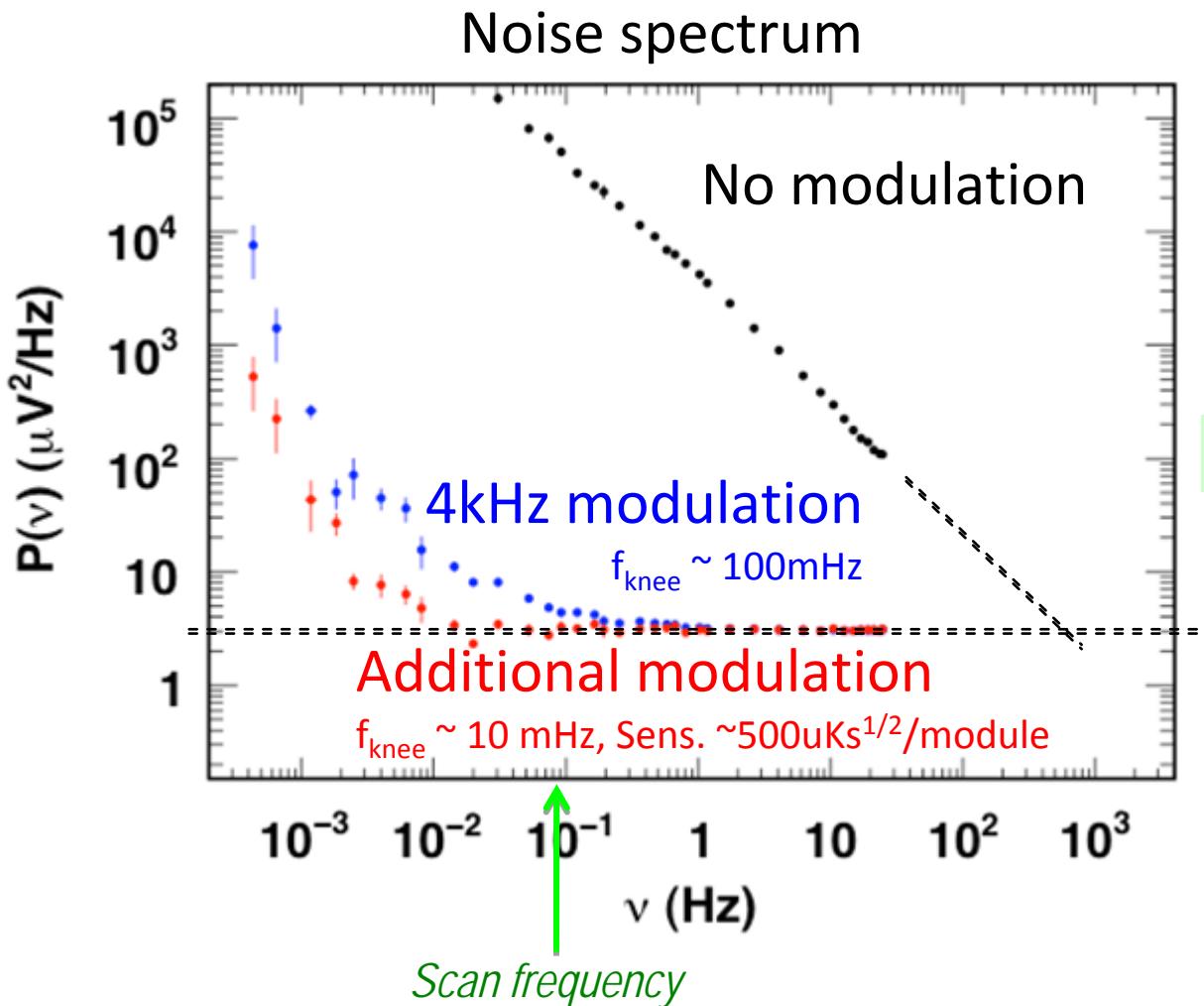
1/f noise のtermが「引き算」で落ちる(demodulation)

変調・復調のインパクト(実データ)

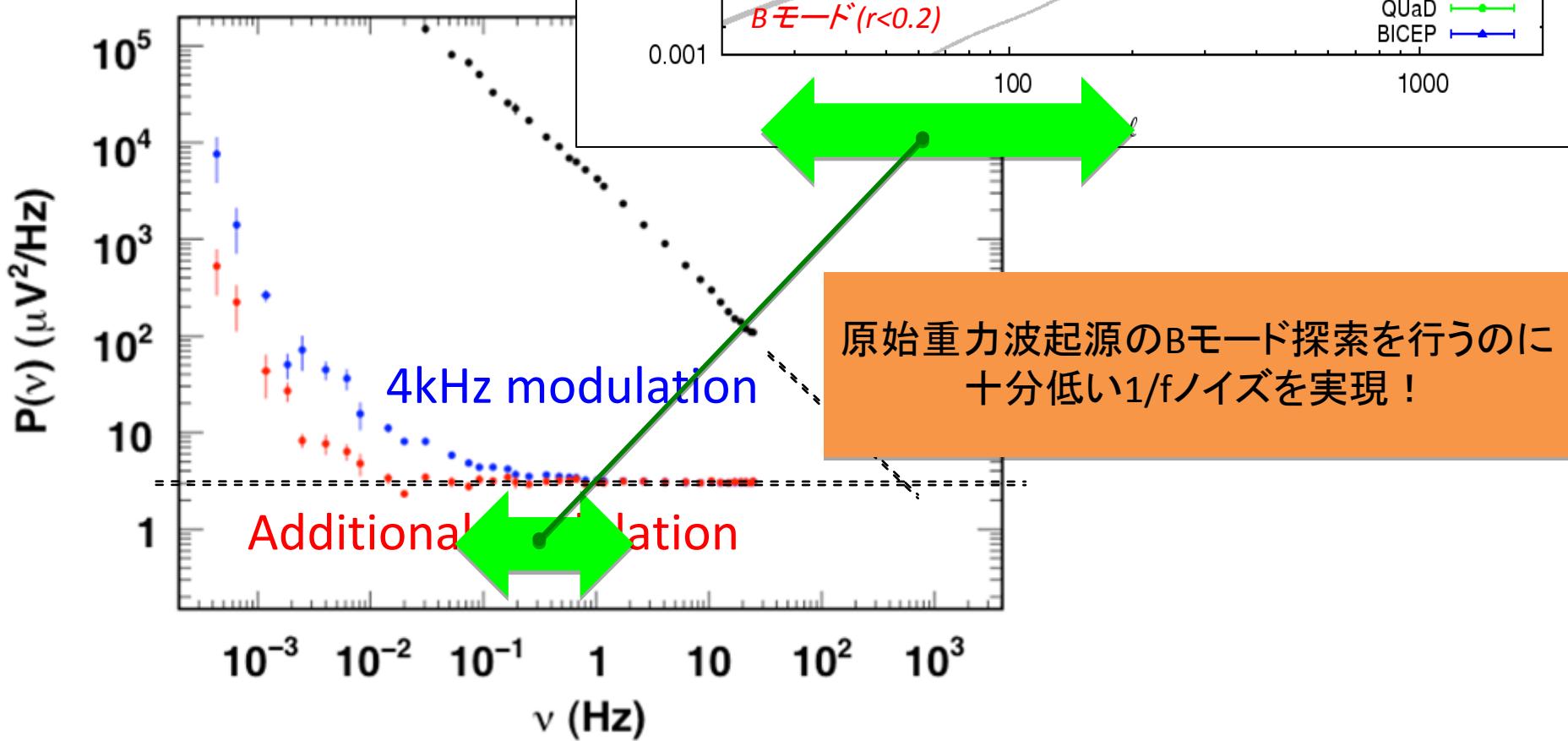


さらに反対側も変調して、もうひと押し！

W-band Real Data under Chilean Sky
 $f_{knee} \ll \text{Scan frequency} !!$



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



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

Details → M. Nagai's Poster

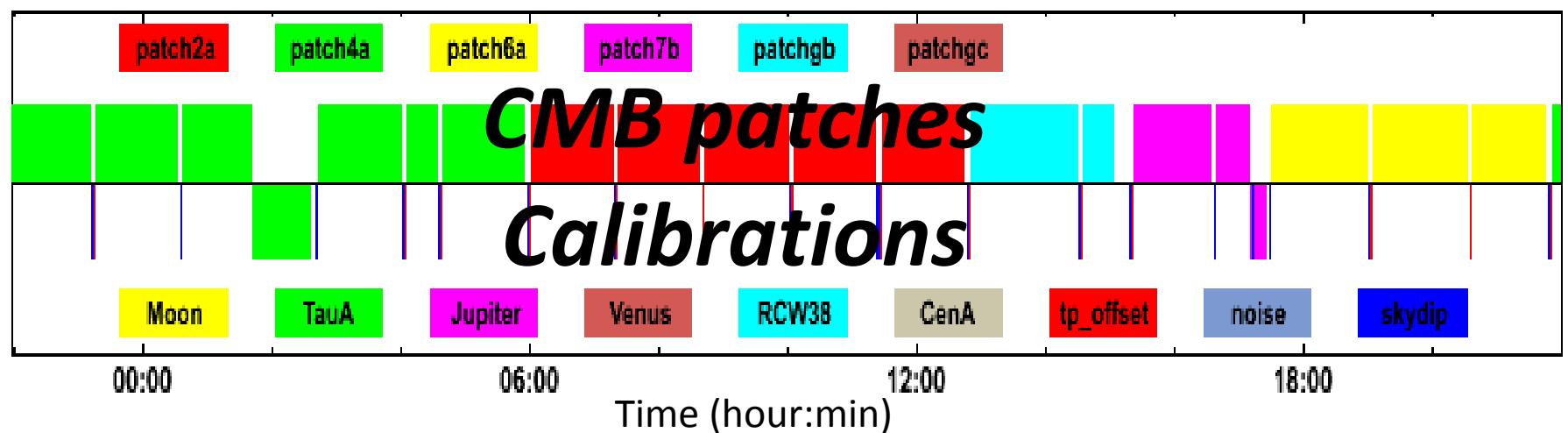
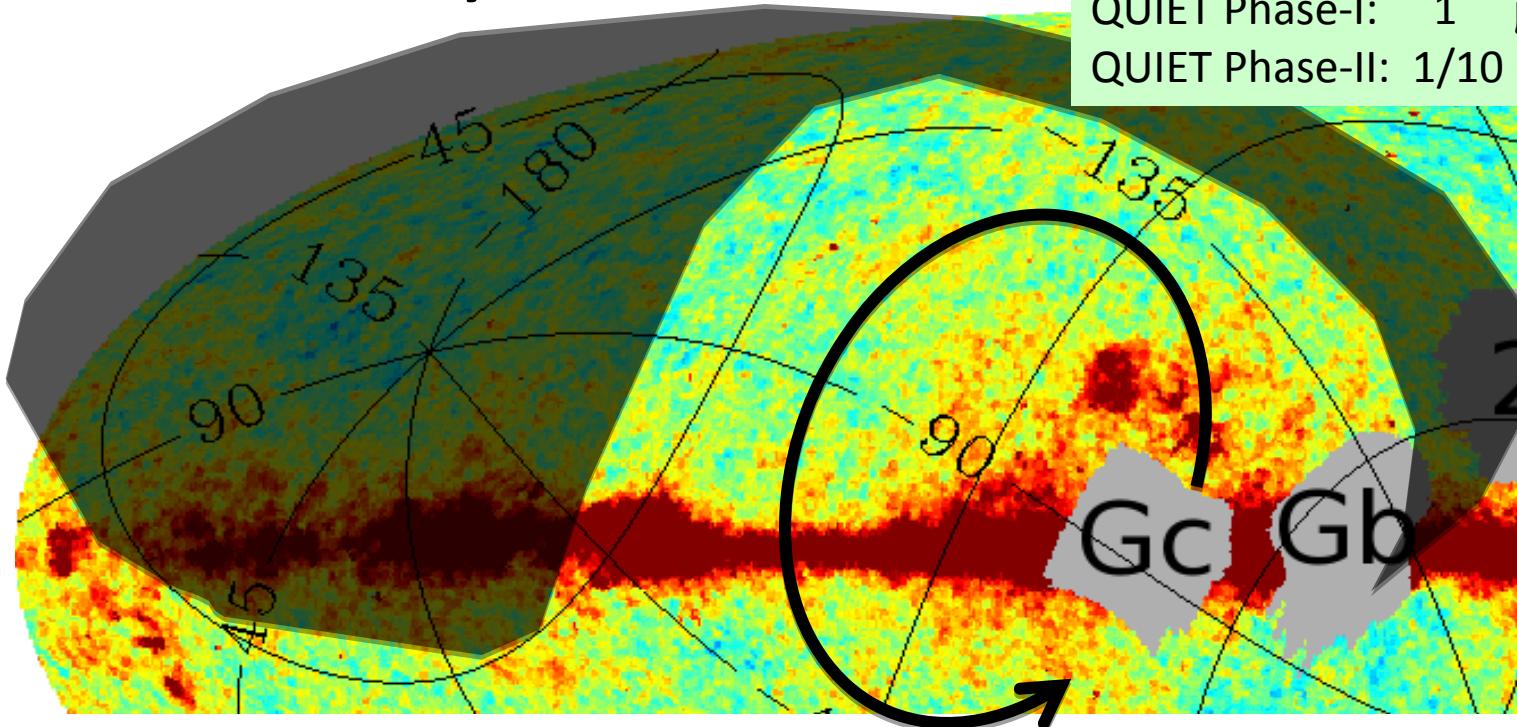
Daily Observation

Map precision on 1x1 degree pixel:

Planck: 1 μK (100 GHz)

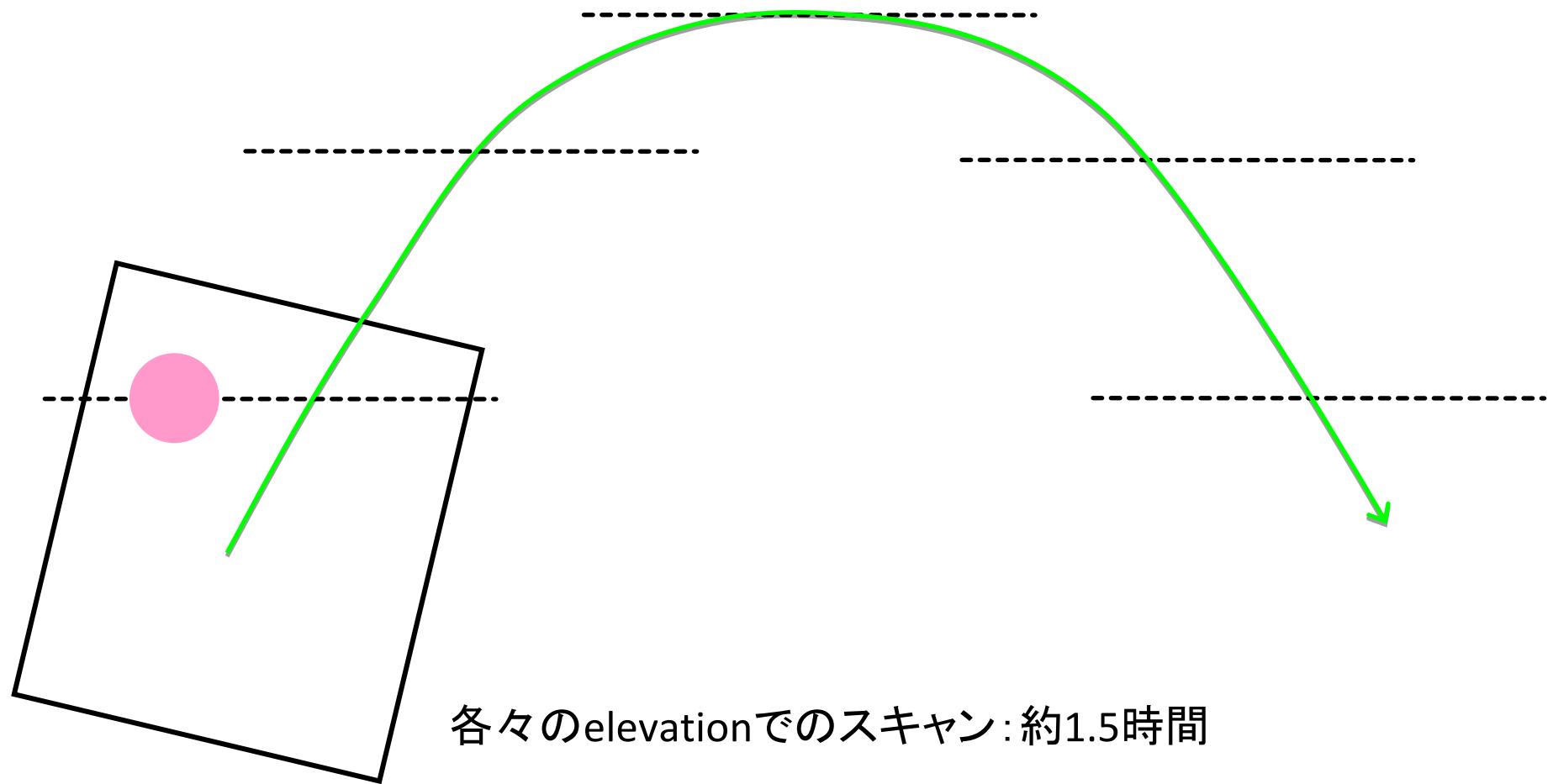
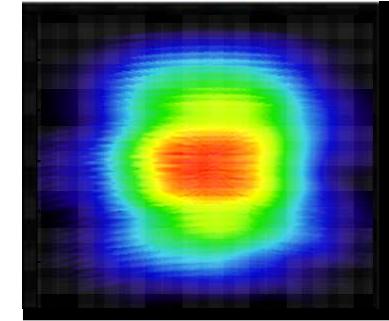
QUIET Phase-I: 1 μK (40GHz)

QUIET Phase-II: 1/10 μK (90GHz)



QUIETのスキャン方法

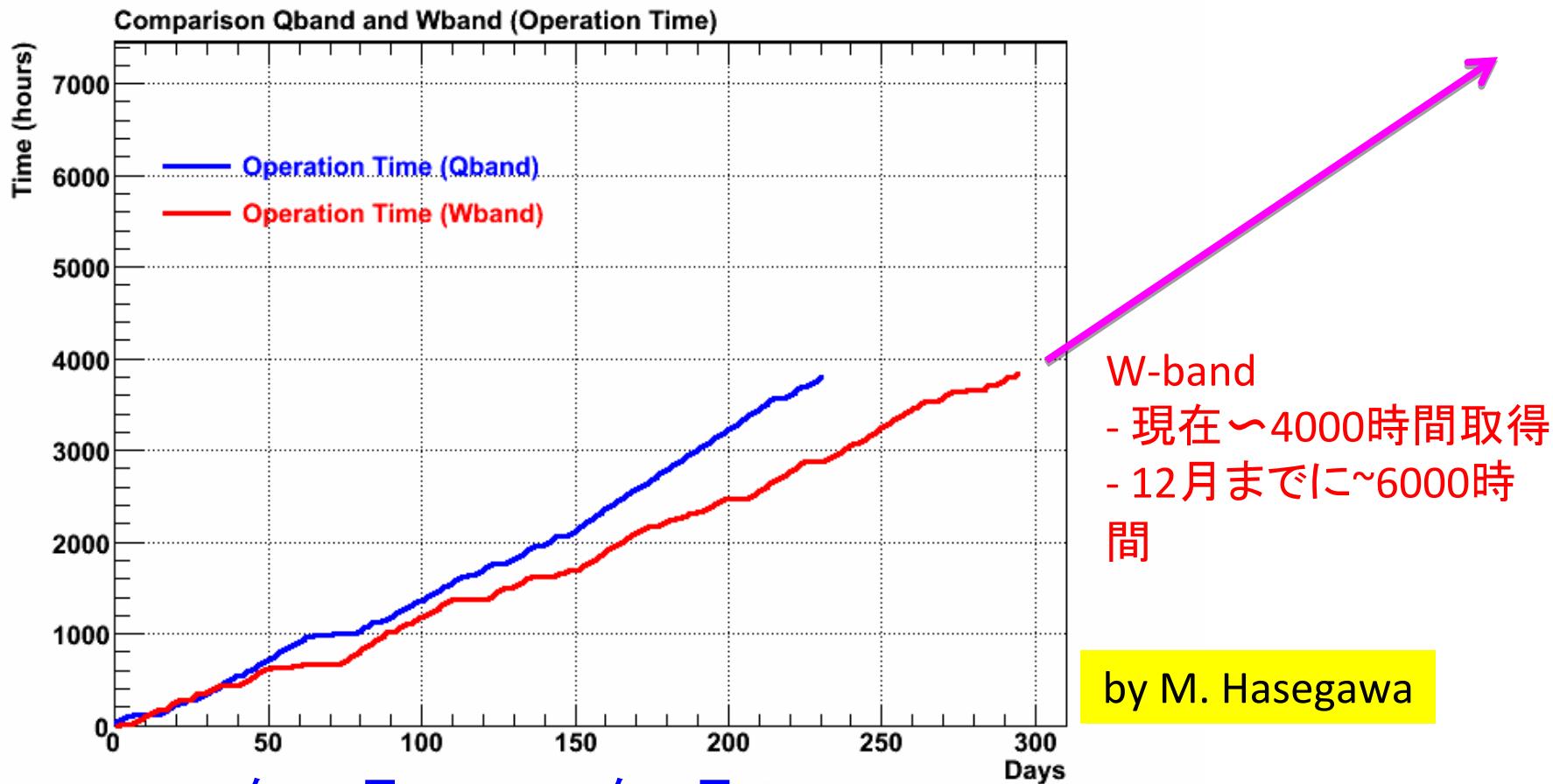
限られた領域を重点的に「深く」観測



実際の観測の様子



これまでに取得したデータ



Q-band 2008年10月～2009年6月 (~4000hours)

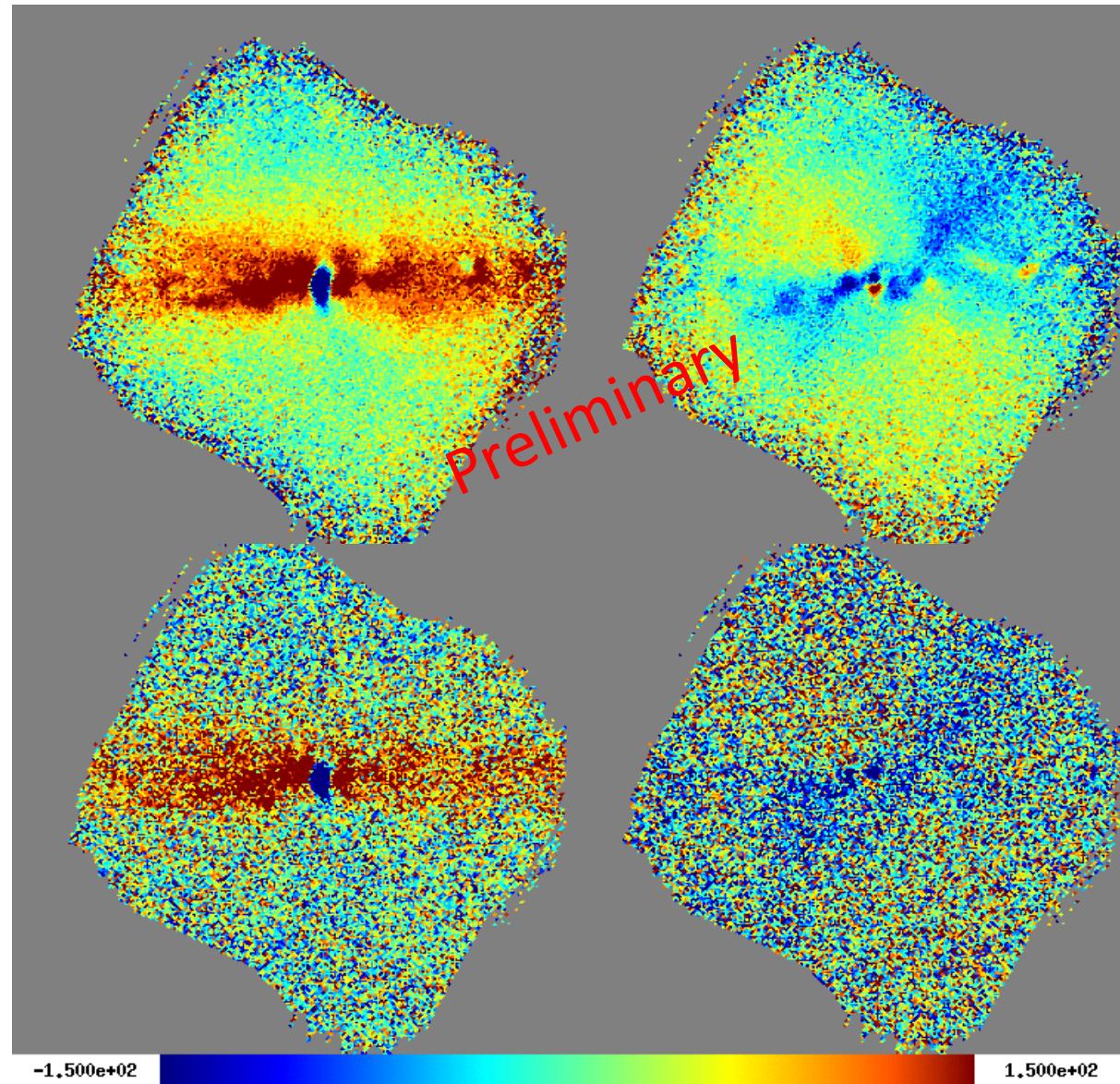
W-band 2009年8月～

WMAPよりも高感度

10年以上新しいテクノロジーですから...

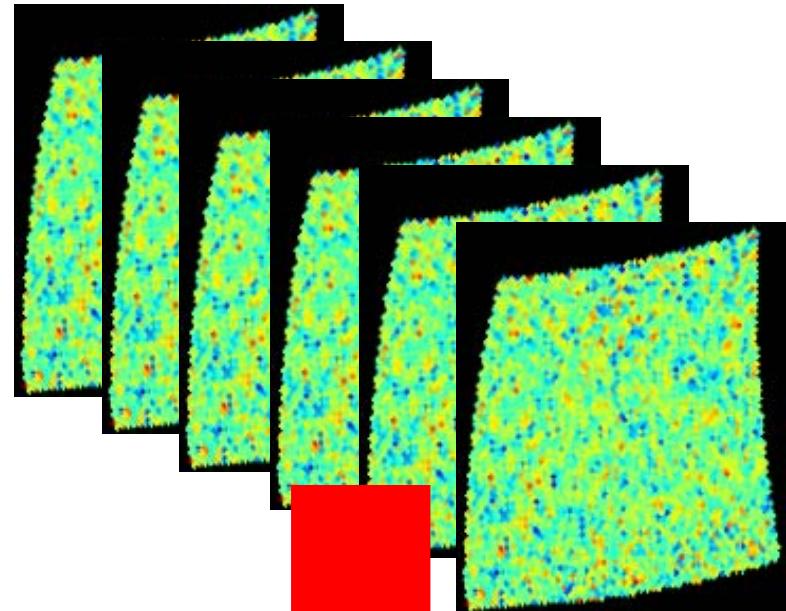
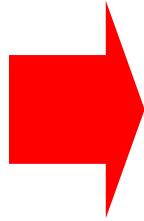
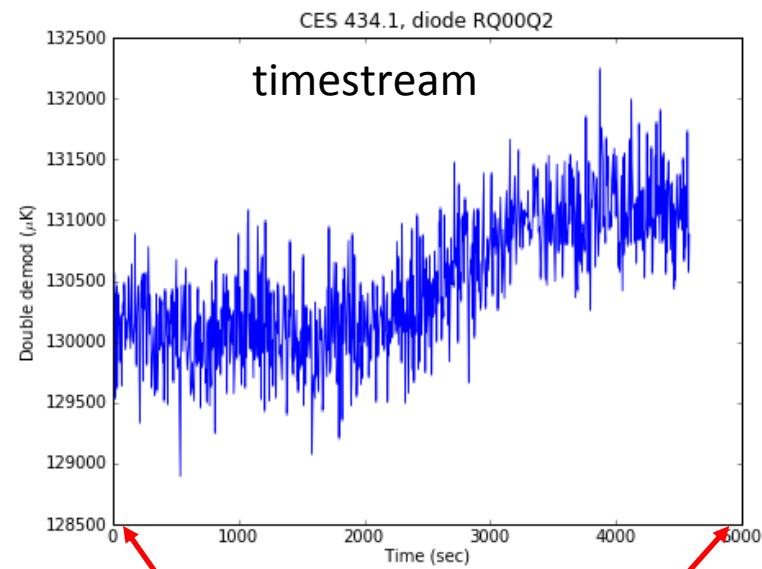
Galaxy (Q-band)
systematic effects
not considered yet

WMAP 5-year

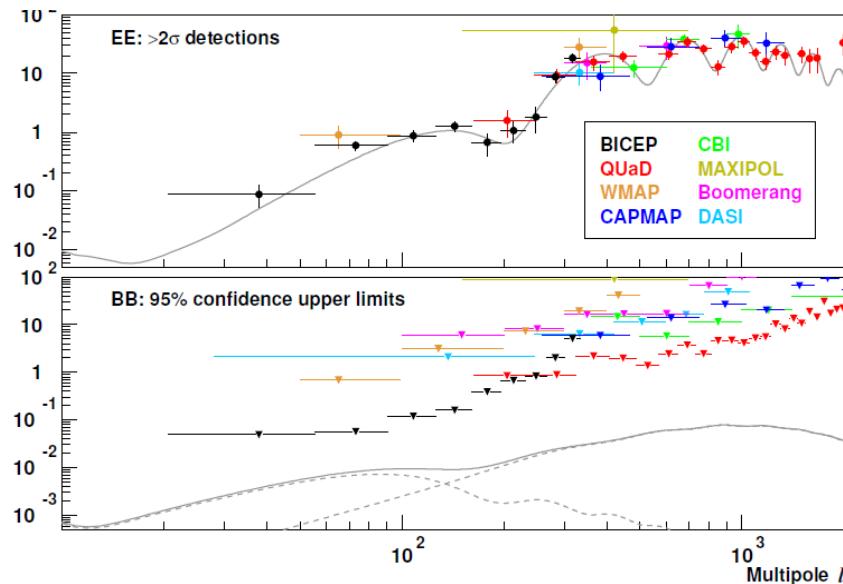


データ解析の概要

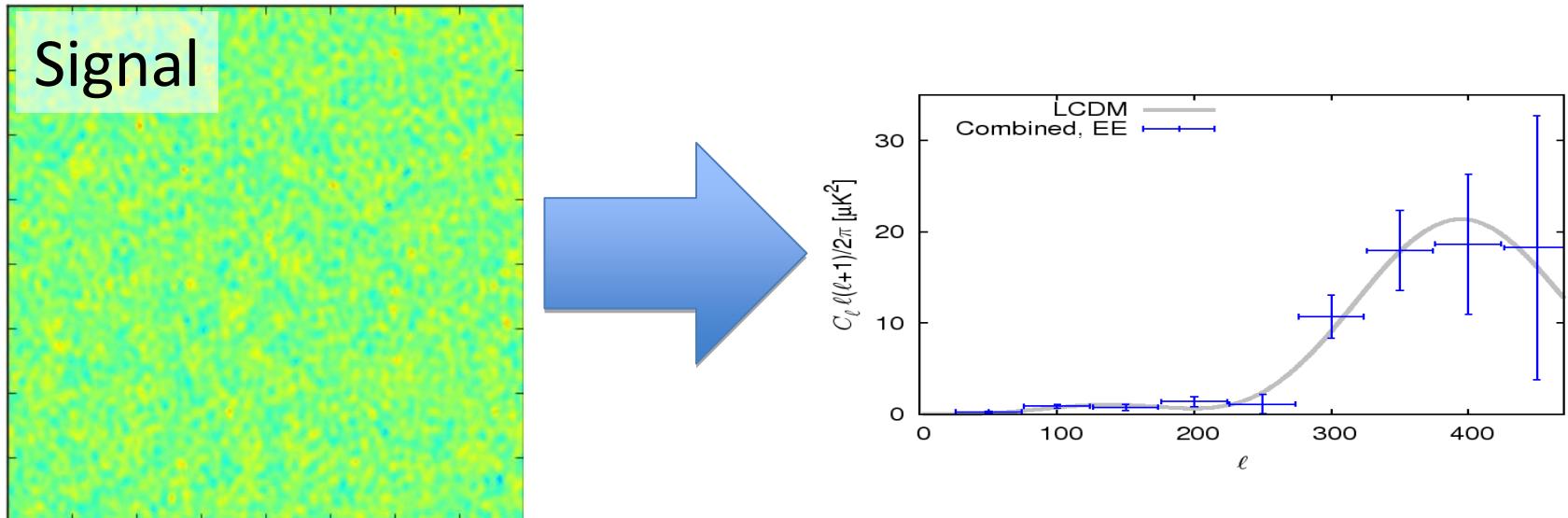
データ解析の概要



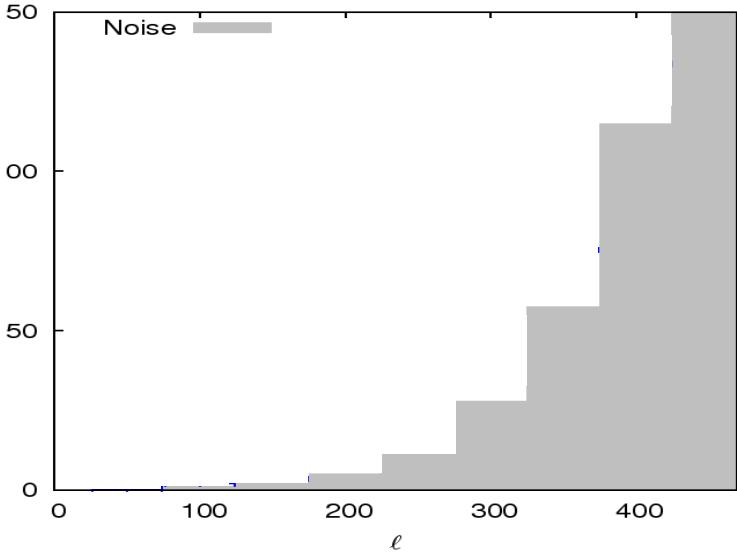
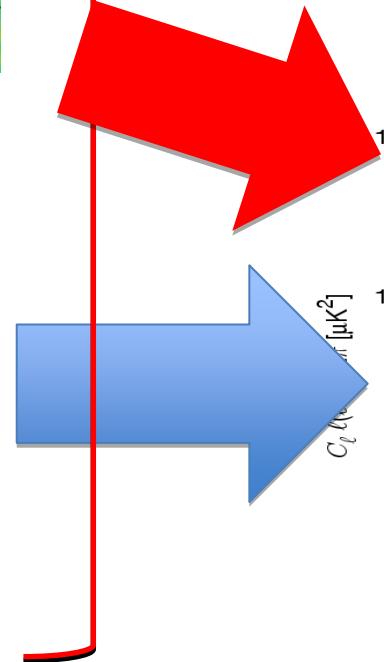
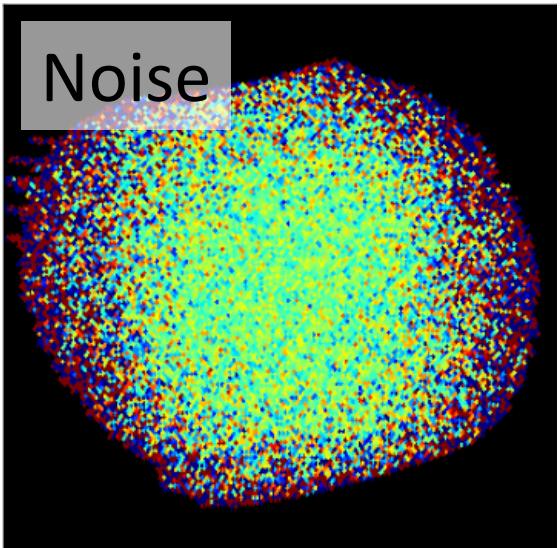
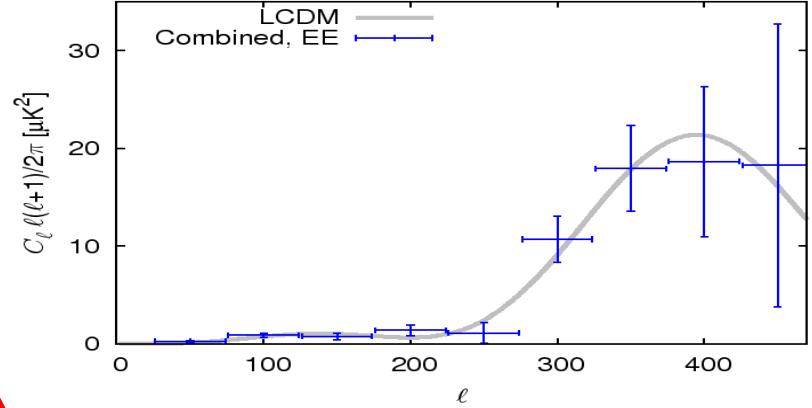
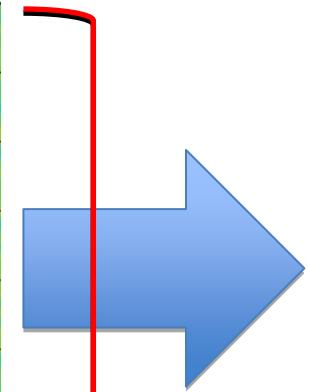
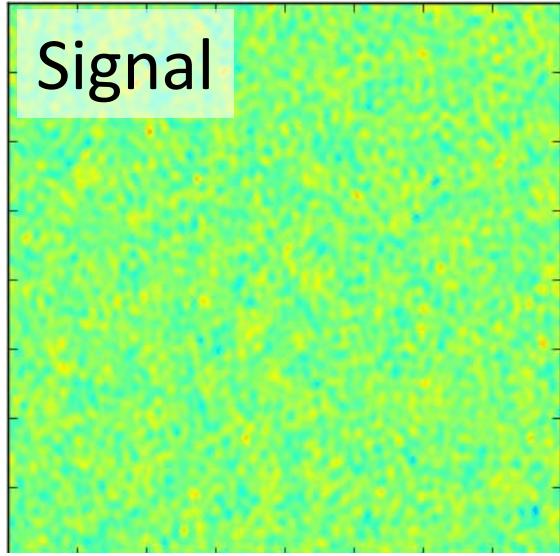
power spectrum



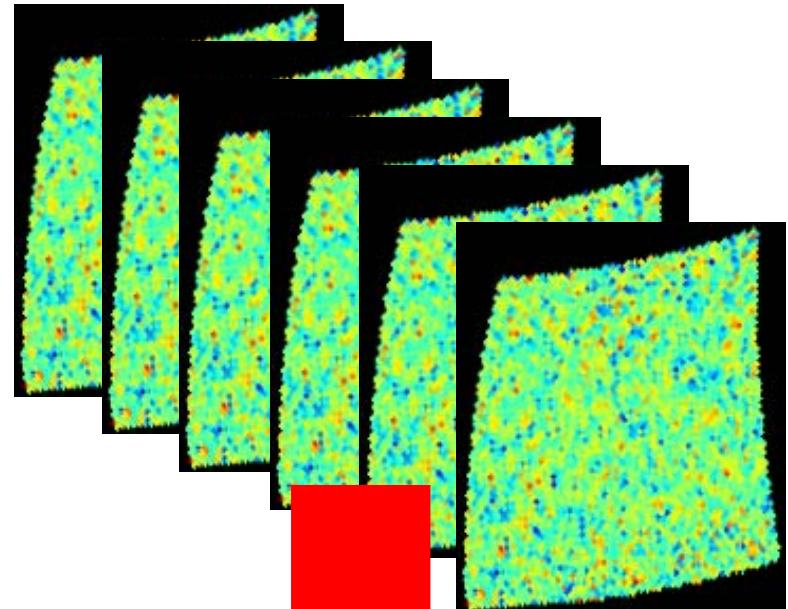
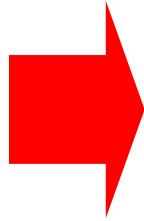
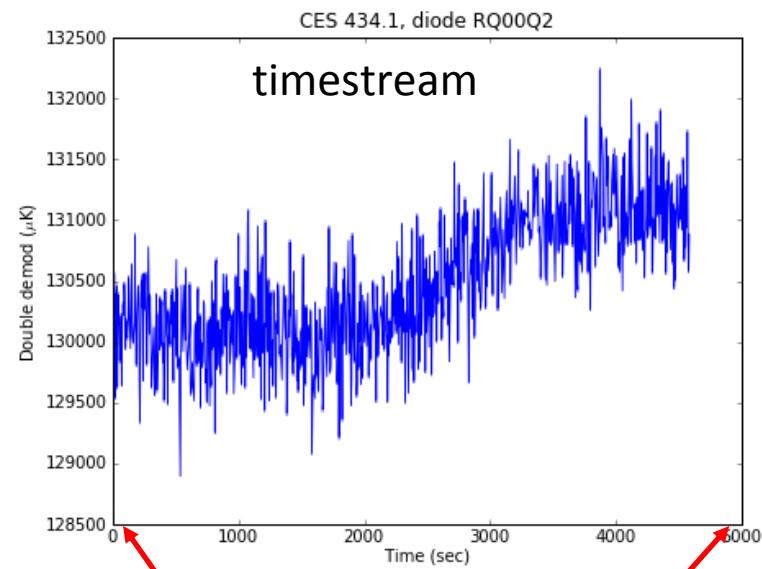
データの理解が重要！



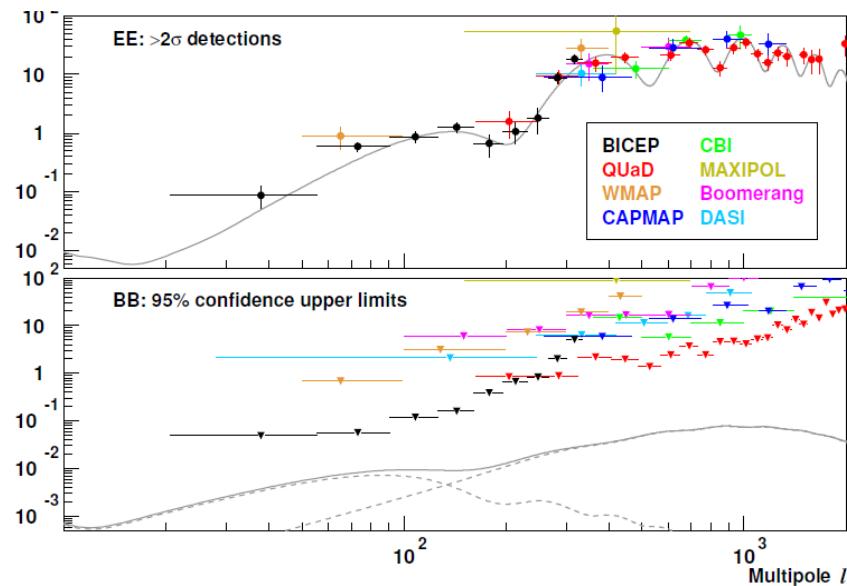
データの理解が重要！



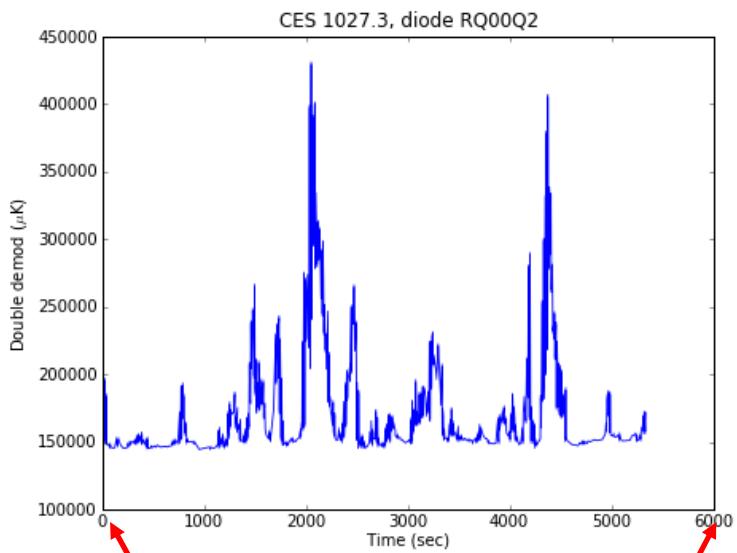
データ解析の概要



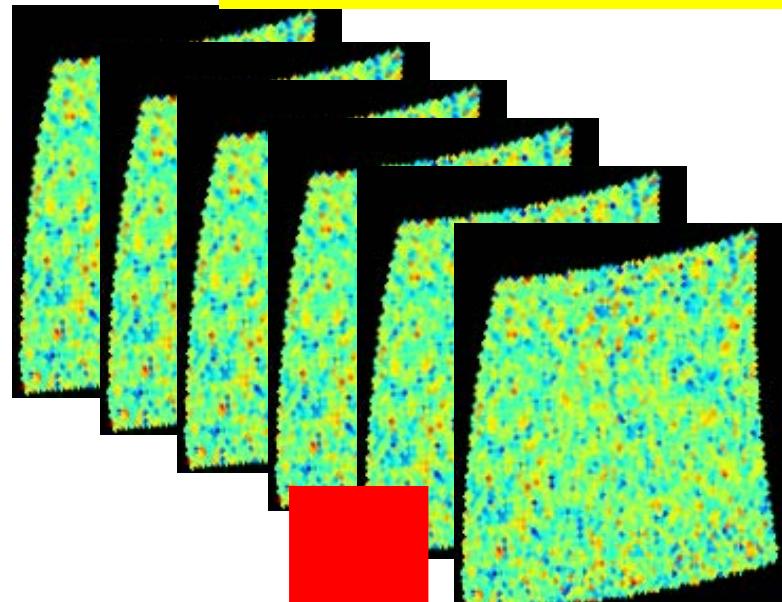
power spectrum



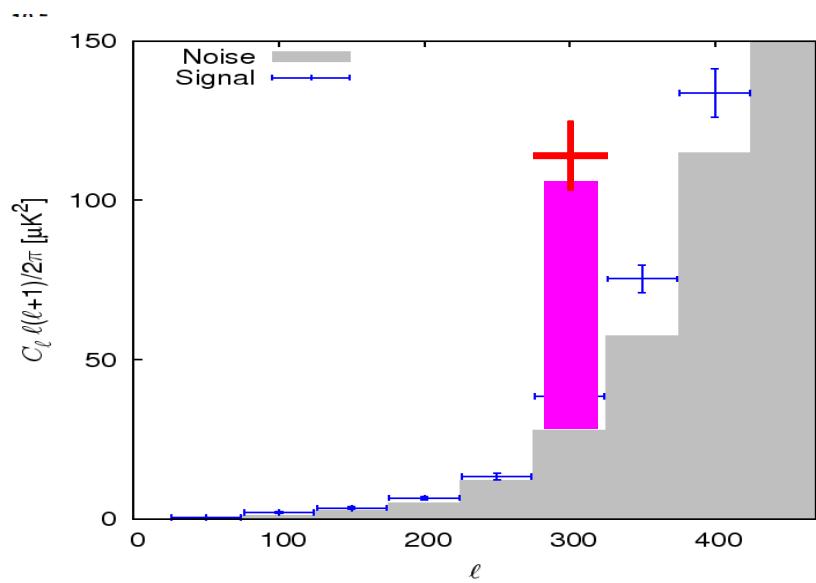
影響を見積もることも出来ない
データはカットする, e.g. 悪天候



Data Selection Details
→ Y. Chinone's Poster

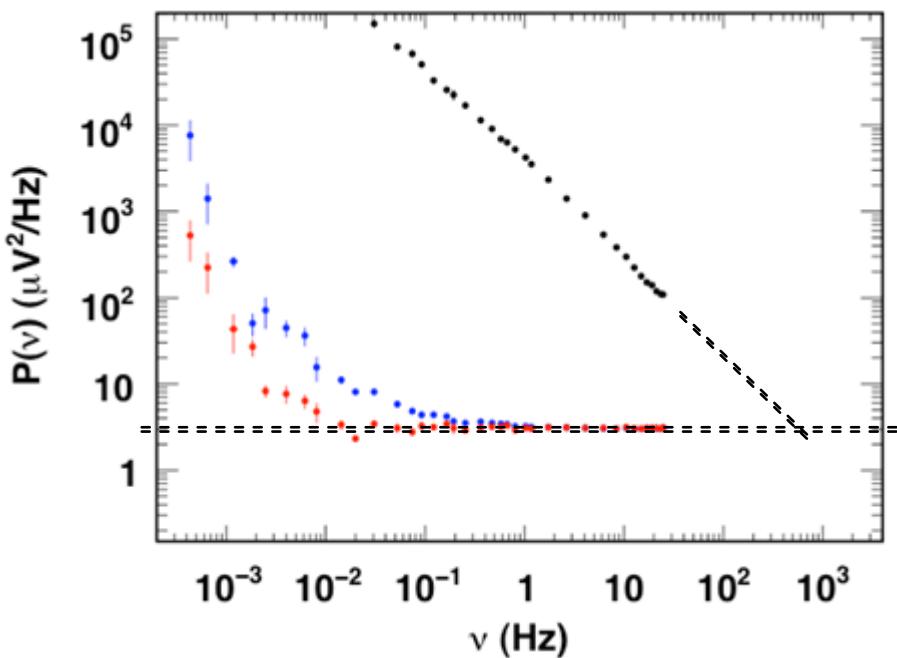


power spectrum



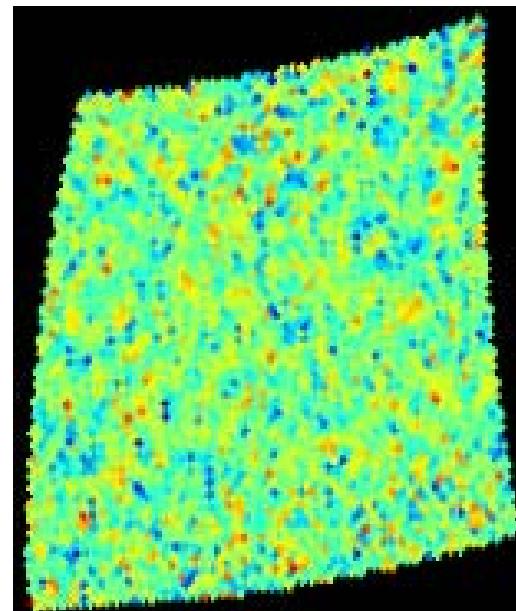
ノイズの特性をしみじみ吟味

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



ノイズスペクトルに異常はないか？

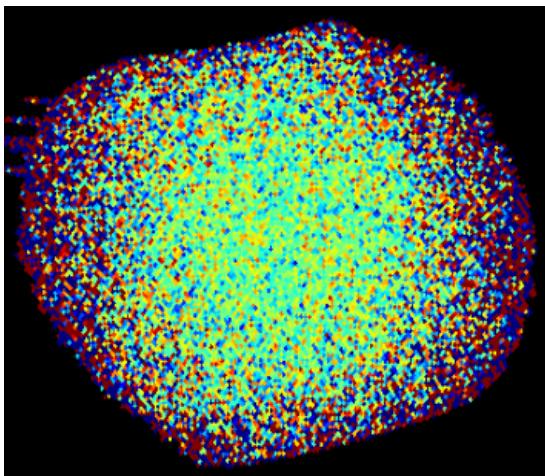
マップはきれいなノイズか？
(1.5時間のスキャンでシグナルは見えない)



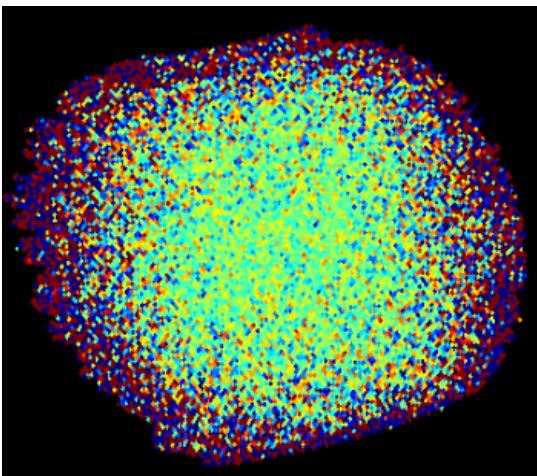
クリーンなデータセットは何重もの泥臭い解析の末に得られる！

Null Test: データの理解が出来ていることのチェック

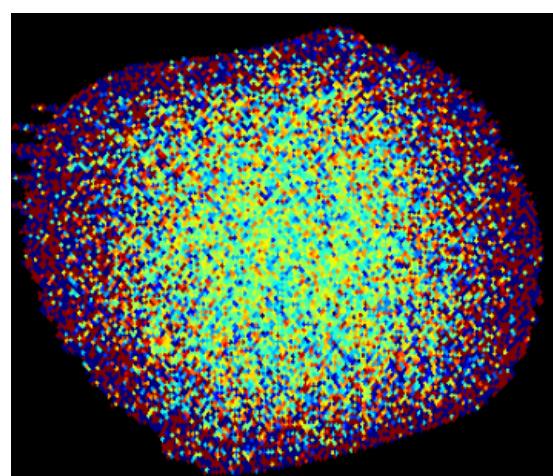
理解しているならば、引き算した結果はNullになるはず



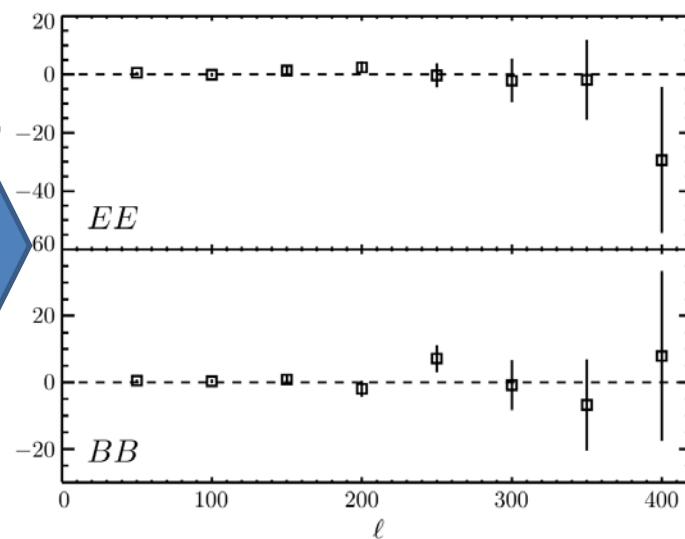
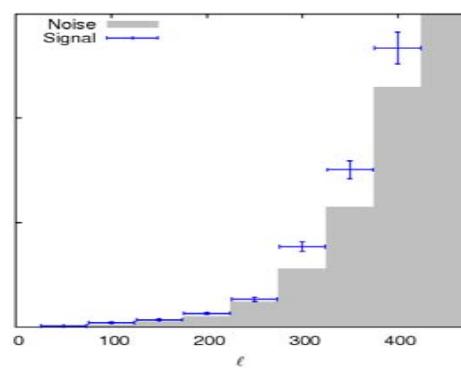
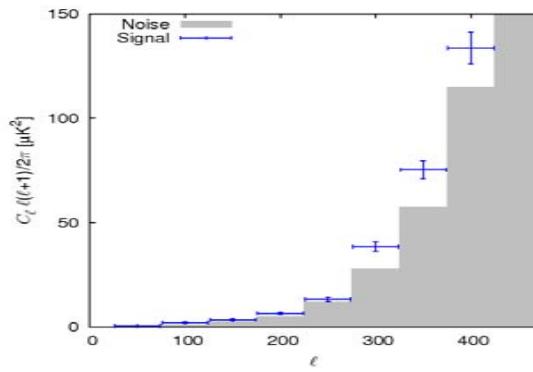
$(S + N_1)$



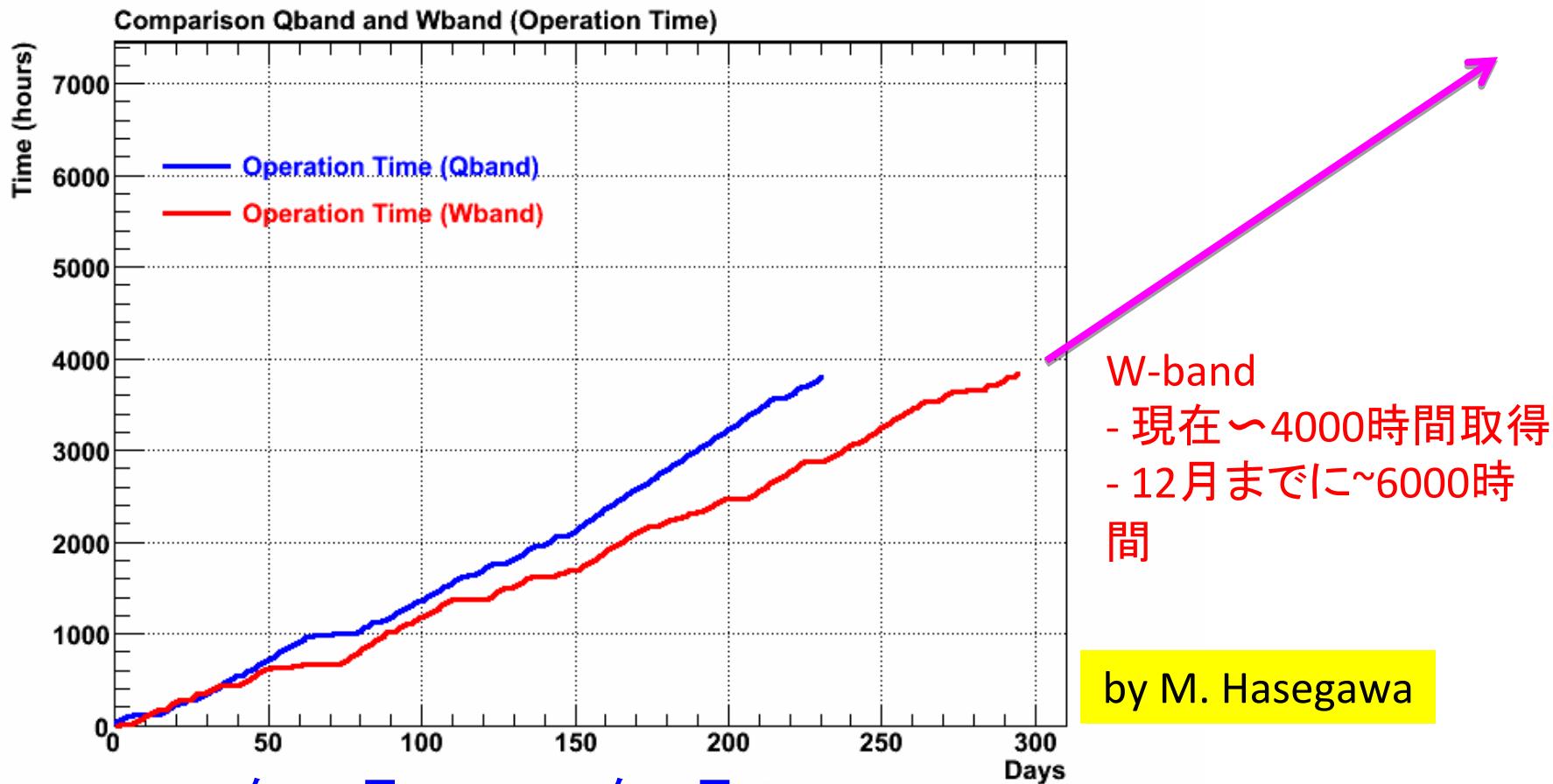
$(S + N_2)$



$(N_1 - N_2)$



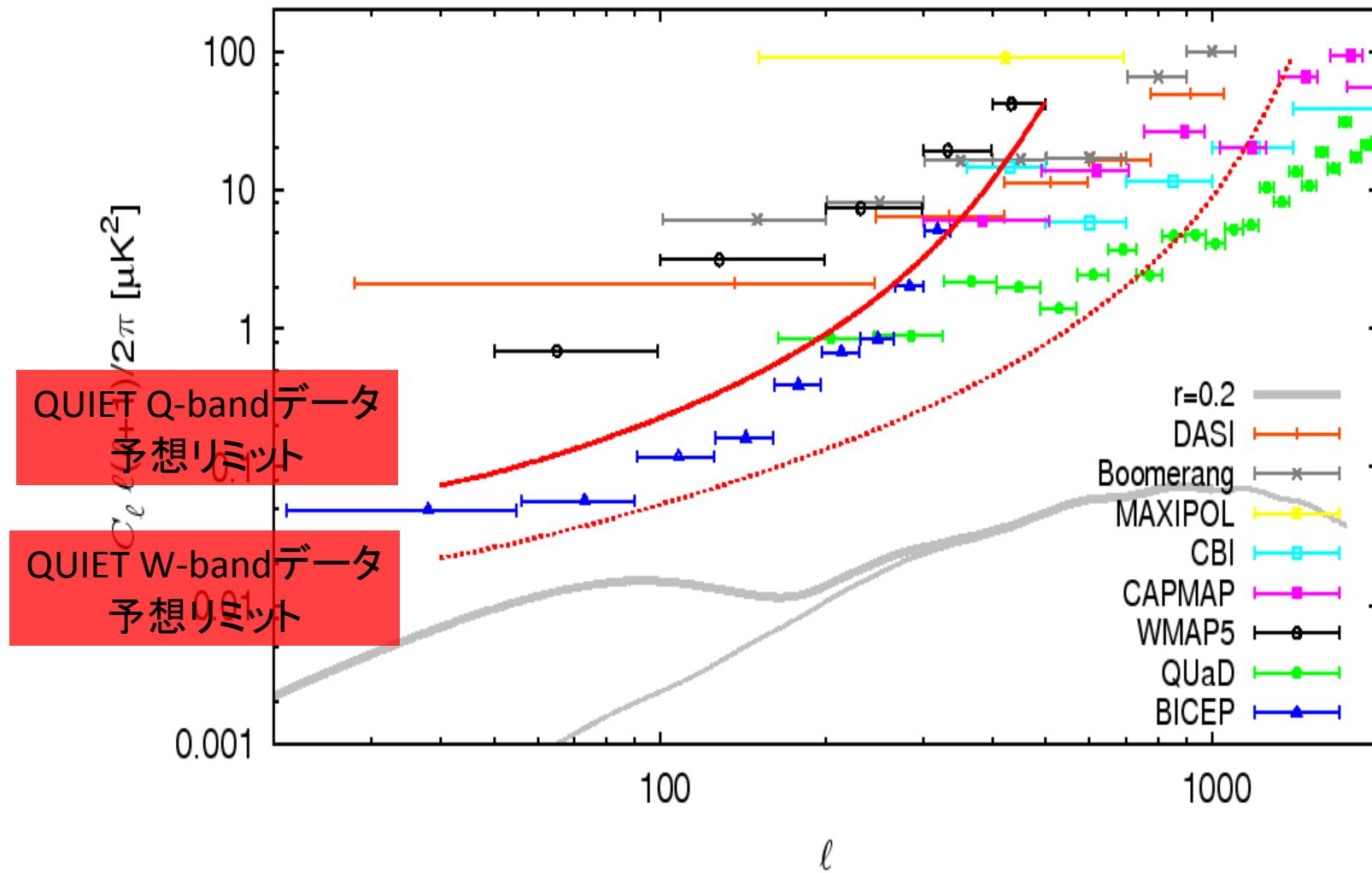
これまでに取得したデータ



Q-band 2008年10月～2009年6月 (~4000hours)

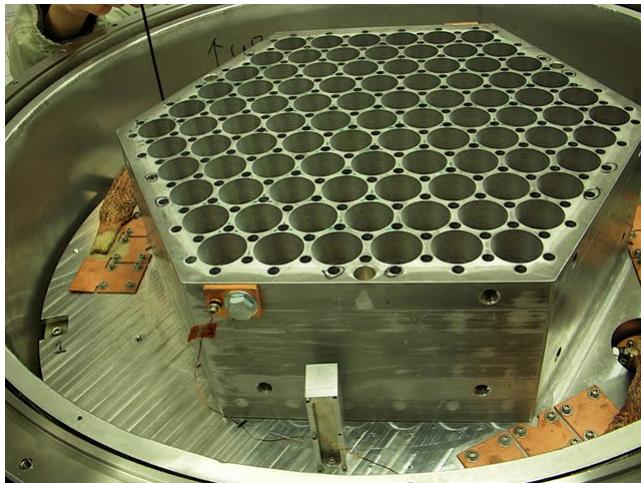
W-band 2009年8月～

探索感度 QUIET phase1 & phase2

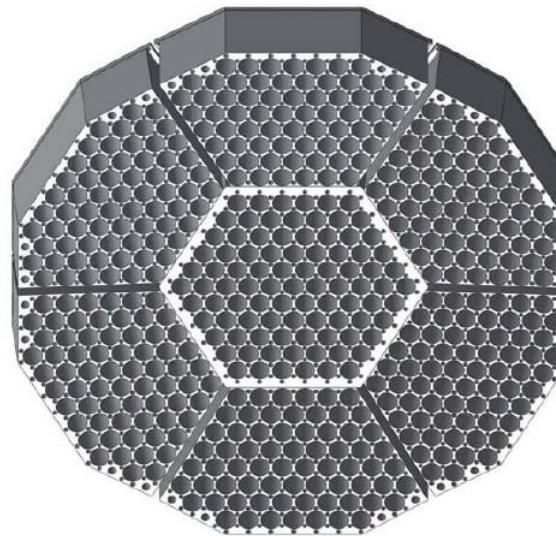
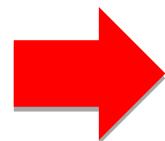


QUIET Phase-II (x16 scale up!)

Key Technologies were established in Phase-I !!



Phase-I W-band
91-element array

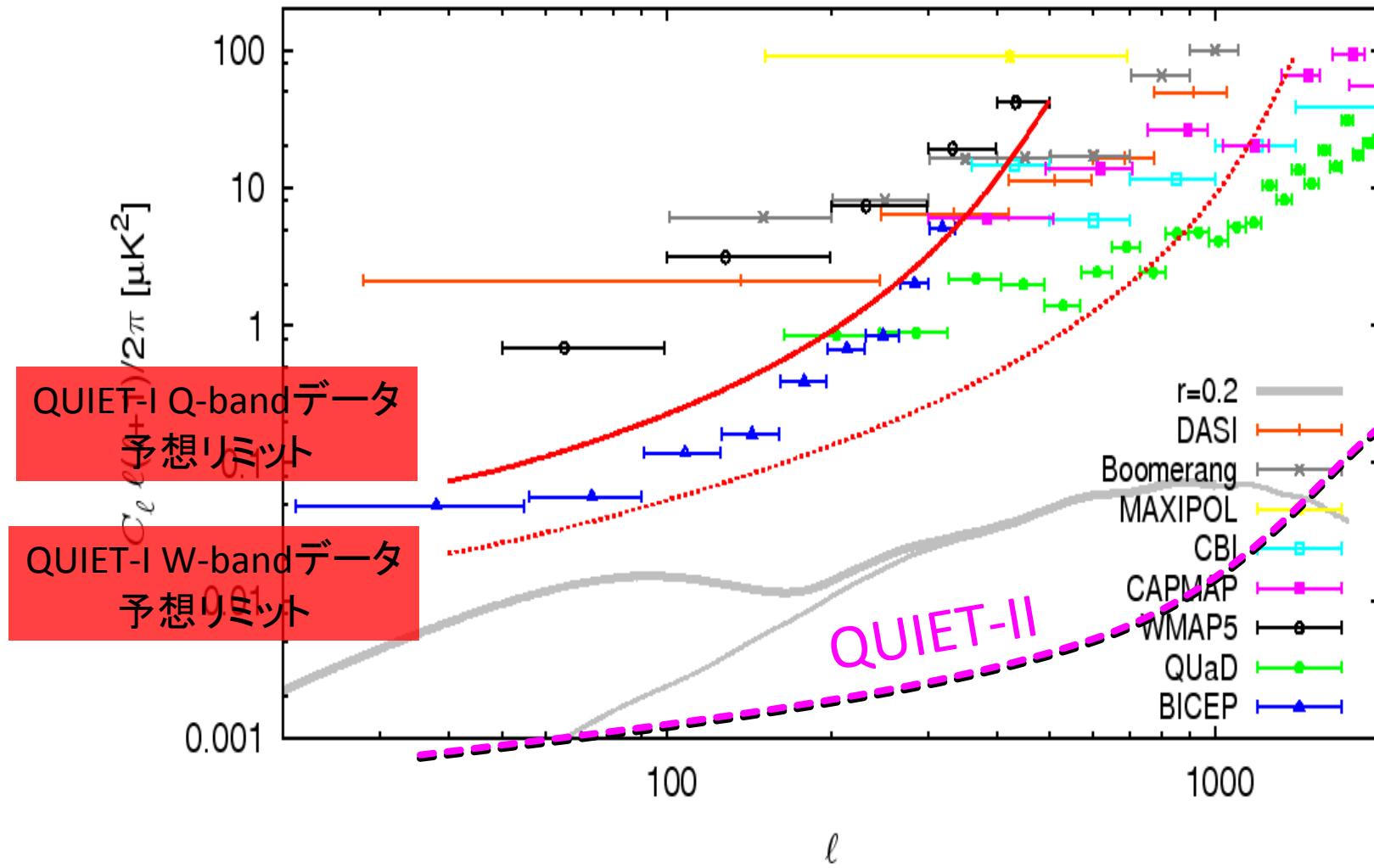


499-element
array (x3)



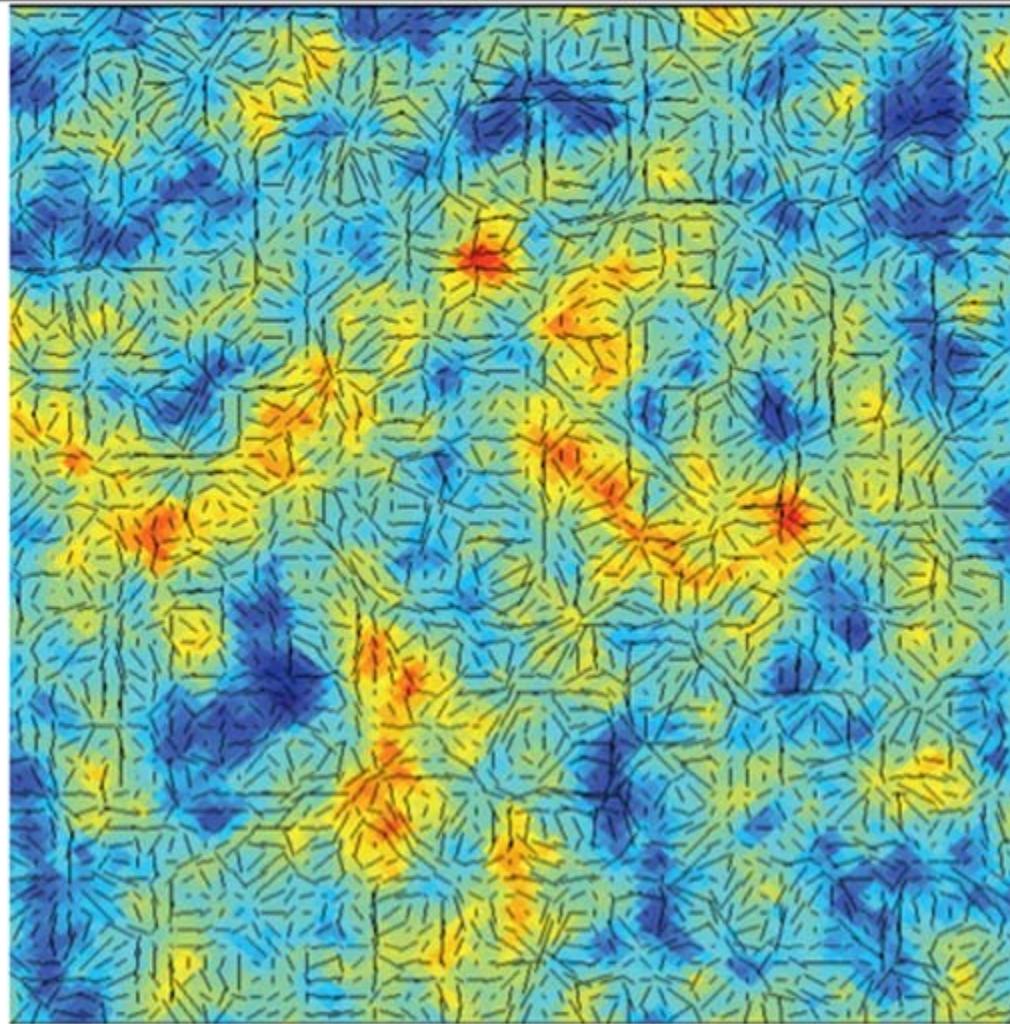
Details about DAQ Scalability → K. Ishidohiro's Poster

探索感度 QUIET phase-I & phase-II



Simulated sky with T/S=0.2

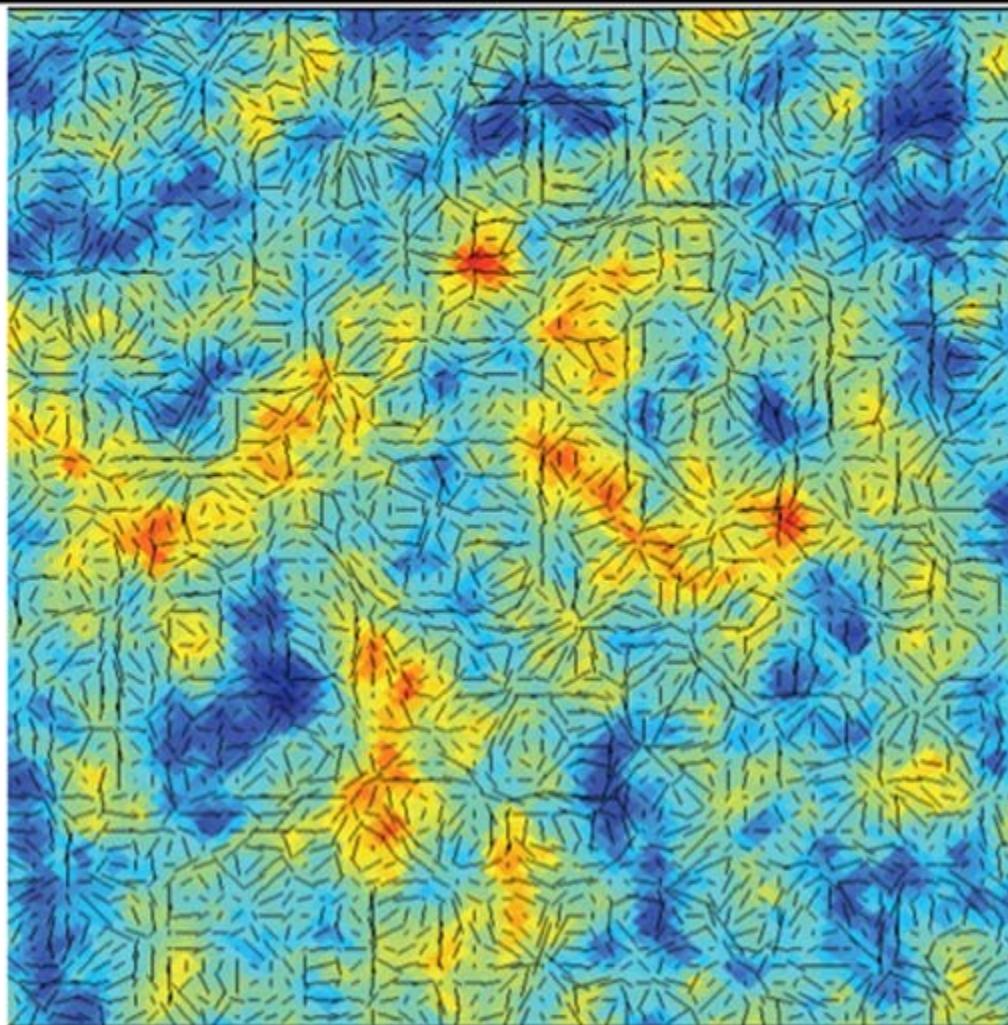
10 deg by 10 deg field



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

Simulated sky with T/S=0.0

10 deg by 10 deg field



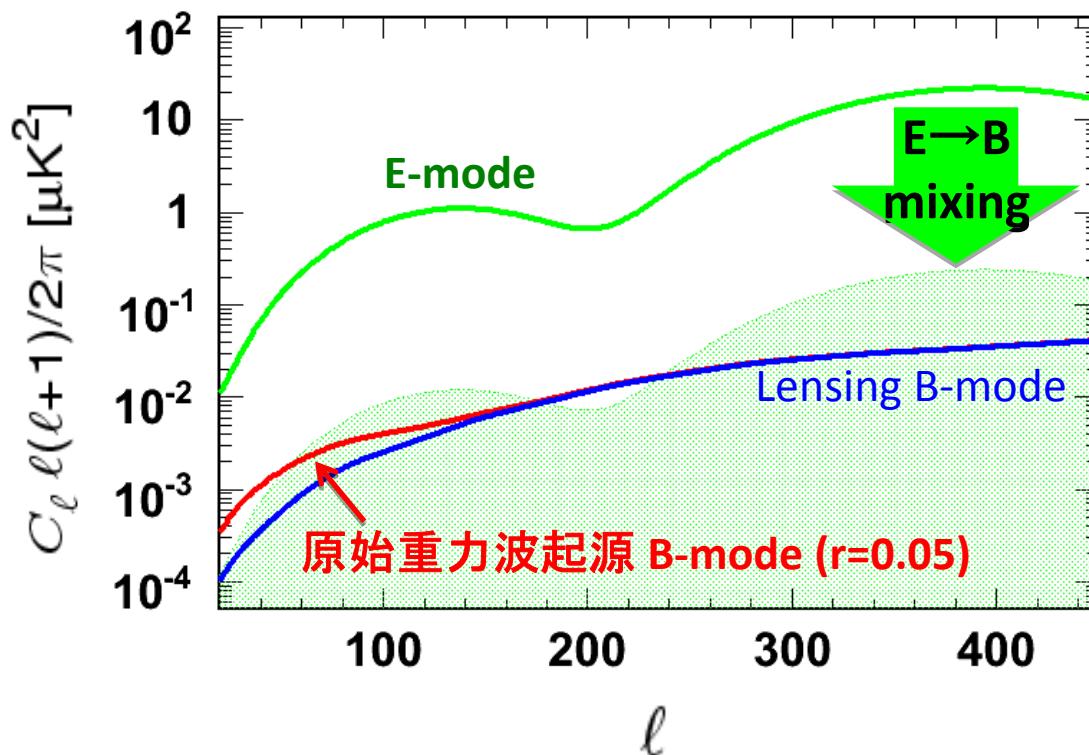
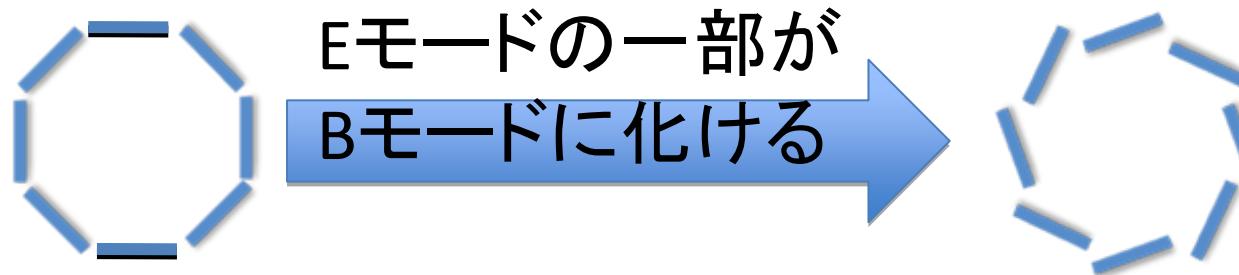
Bモード無しのsimulation map

検出感度の向上だけでなく

- 装置の較正
- 系統誤差の理解

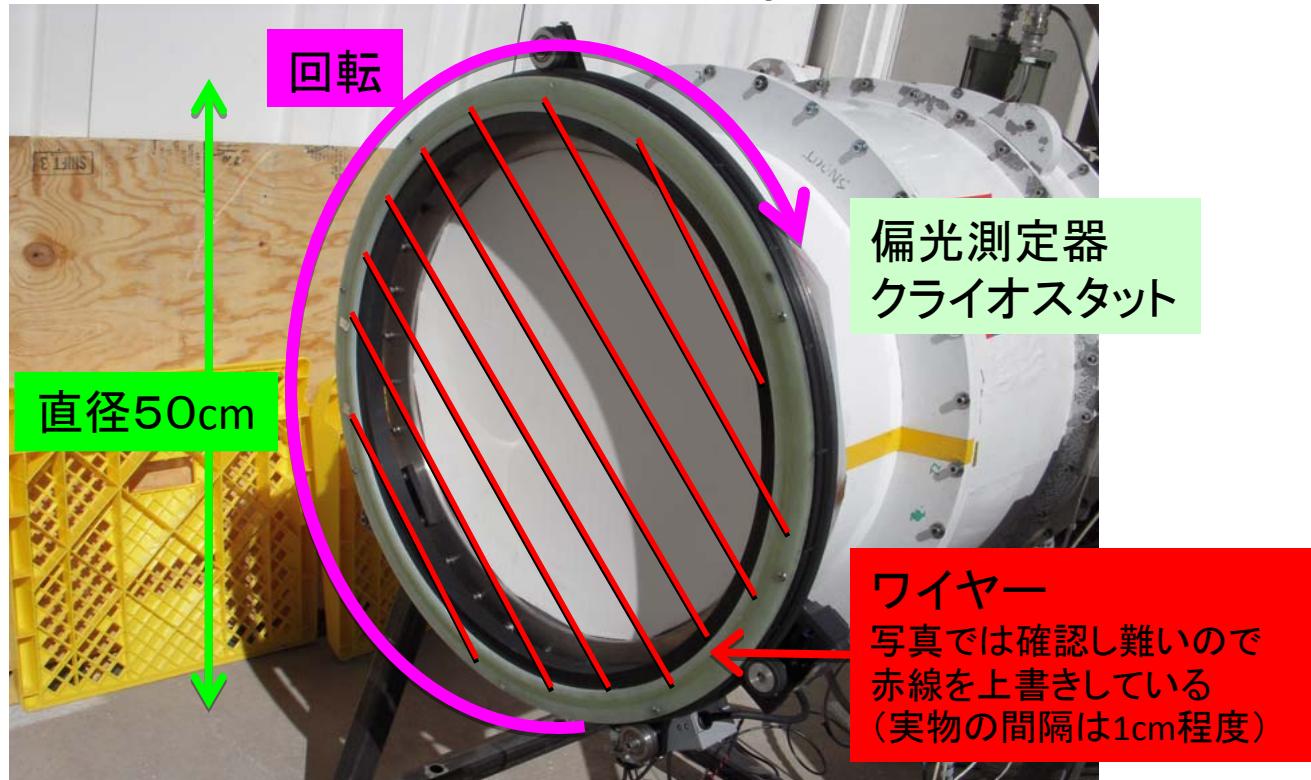
が重要!!

例えば偏光角度の較正をミスると…



偏光角度の較正精度が現在と同程度(2~3°)だと、全くお話にならない。
→ 較正精度0.5°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° (30sec data)

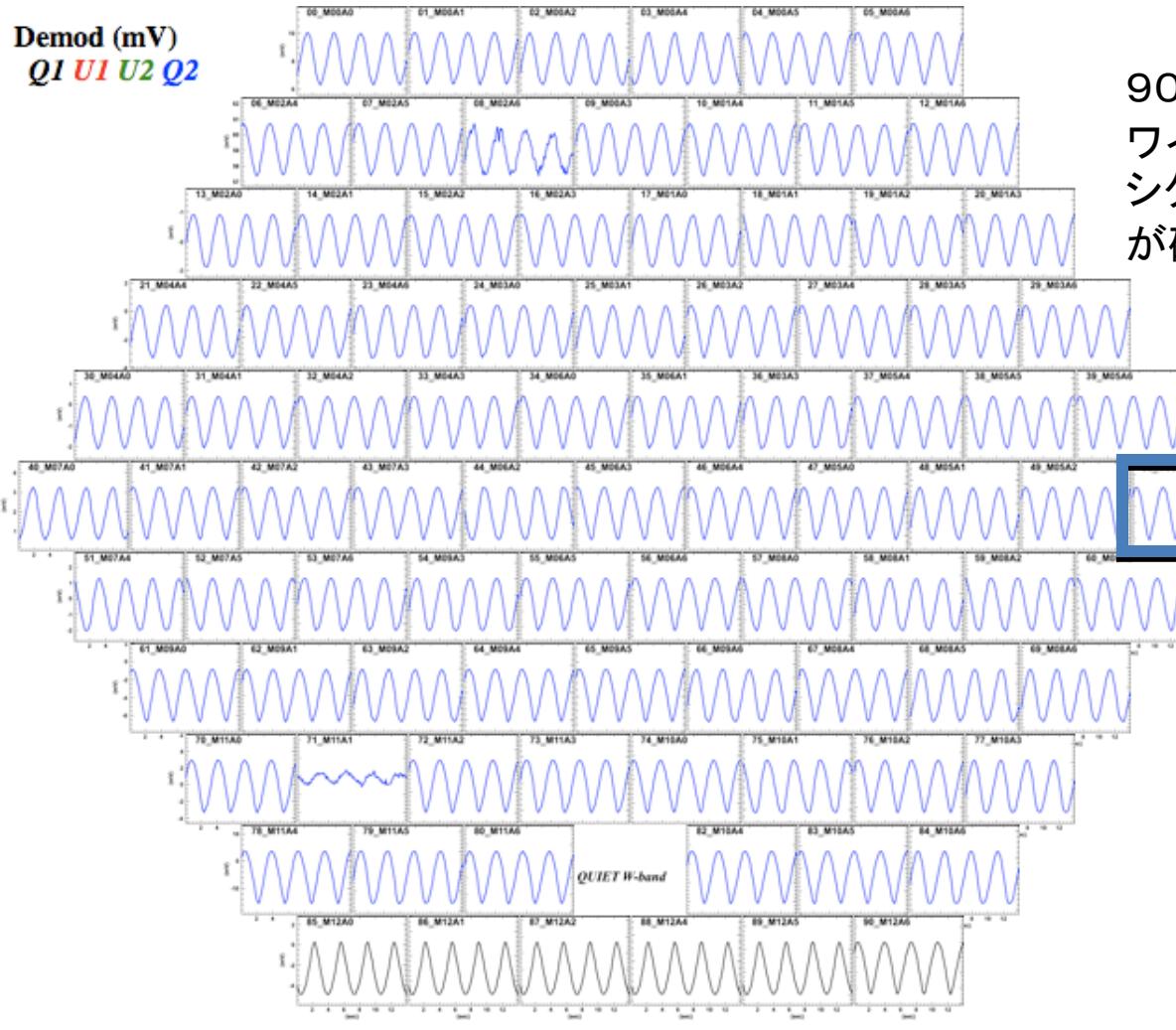


Commissioning photo at the site (June, 2009)

W-bandコミッショニングで大活躍！

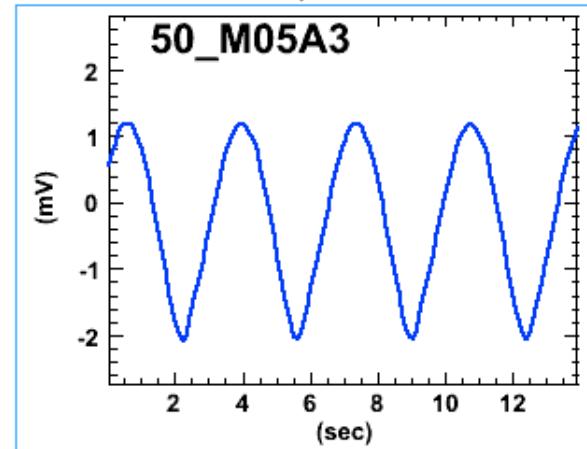
試作ワイヤーグリッドによる偏光シグナル

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



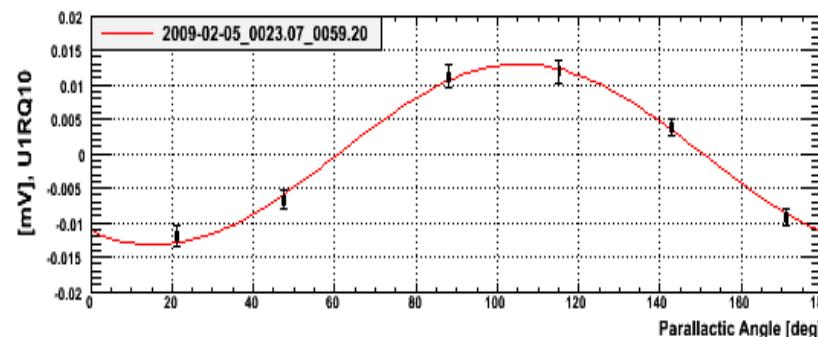
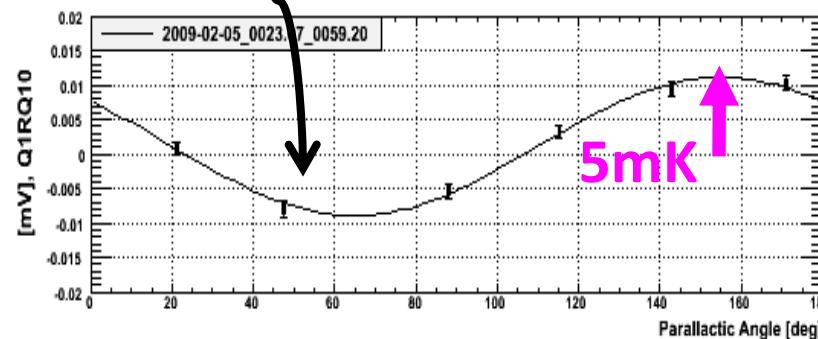
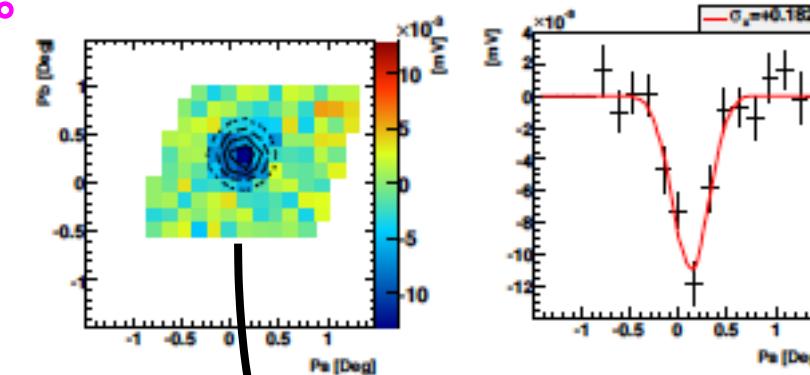
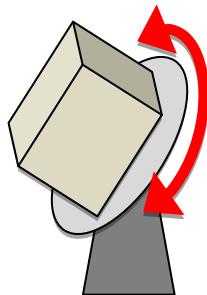
TauAを使って1つの検出器を 空の座標系での絶対角度を高精度(0.1°)で較正

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



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
 - 間接的なりミットよりも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”