

QUIET実験

田島治

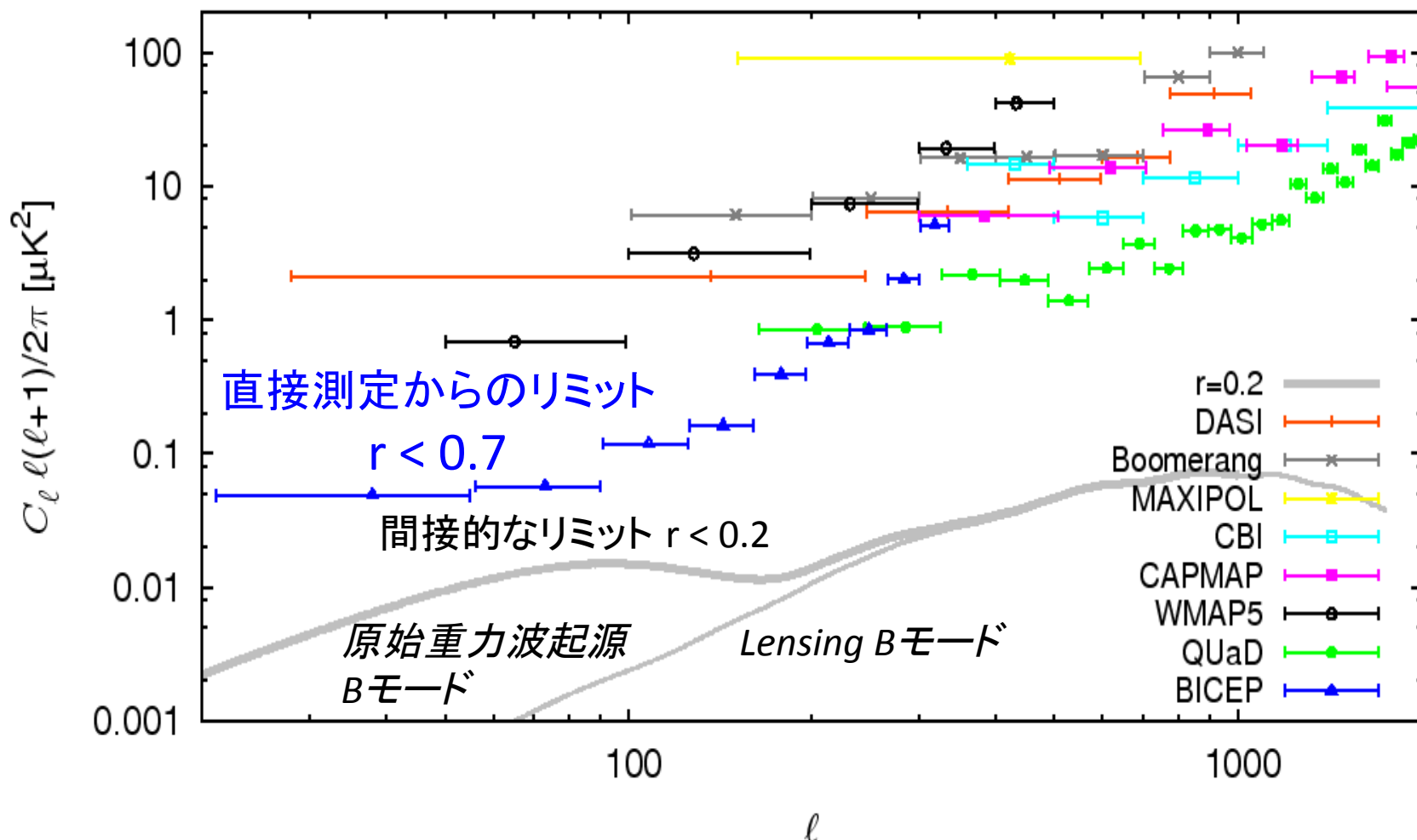
KEK IPNS

Physics Motivation

世界で最初にBモード偏光を捕えたい！

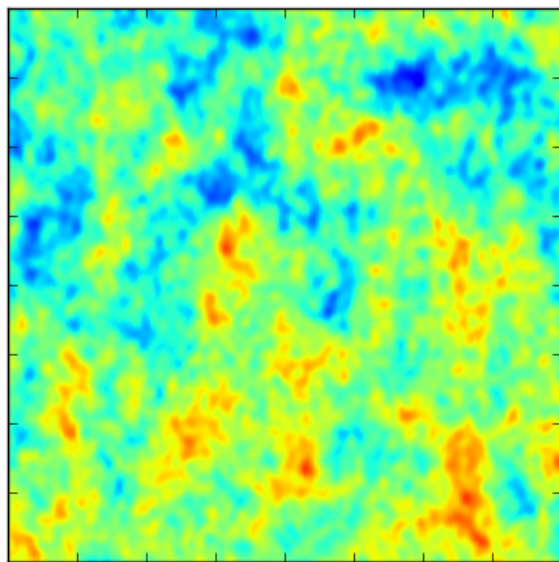
原始重力波起源の

様々な実験の現状

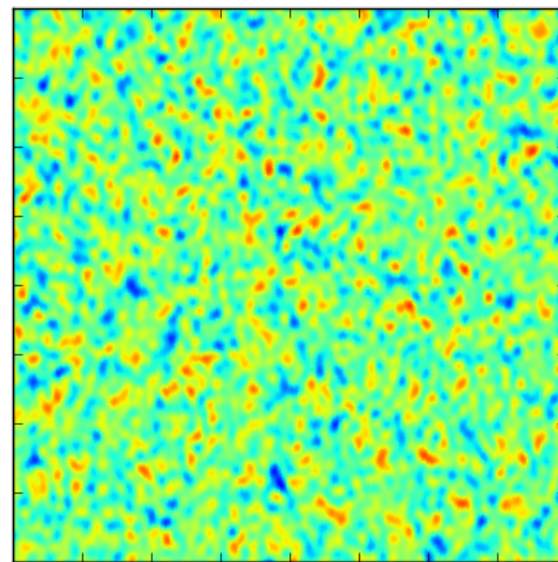


直接測定リミットをガンガン削っていったって、やがて最初に発見するのがQUIET実験

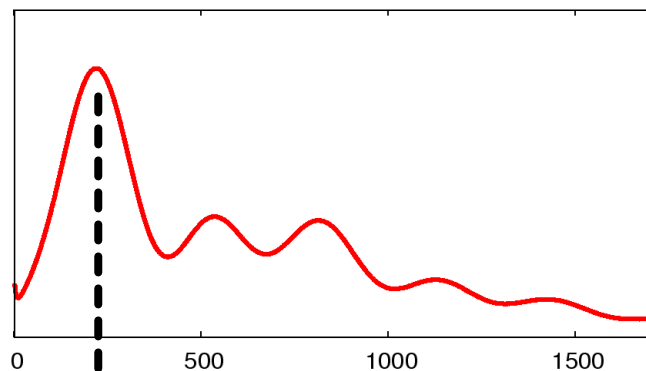
C_ℓ の絵の見方



10°

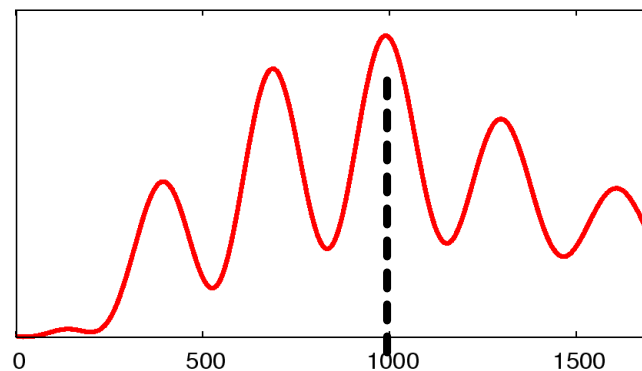


縦軸: $C_\ell \ell(\ell+1)/2\pi$



$l \sim 100 \rightarrow 180/l \sim 2^\circ$

横軸: l

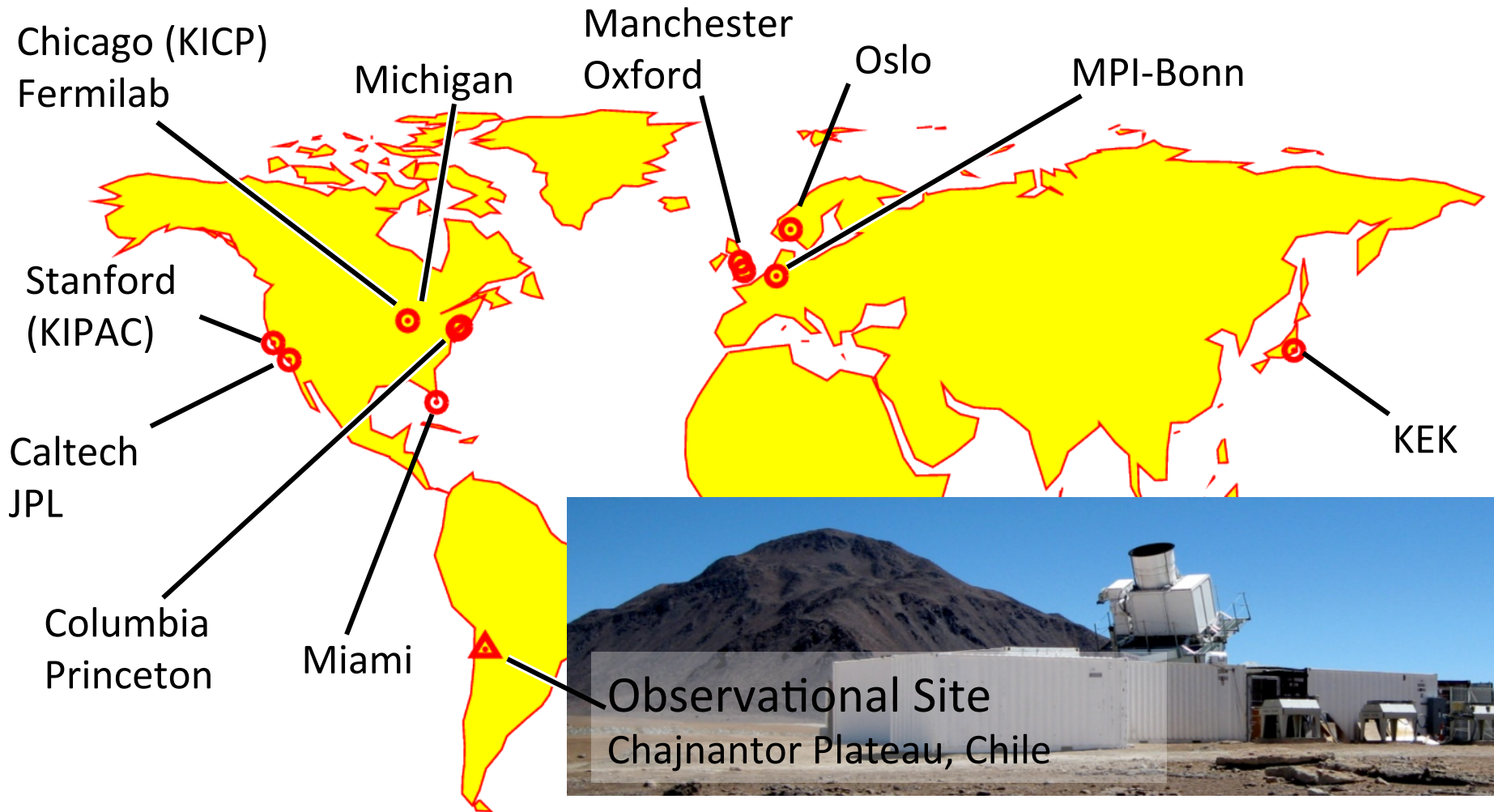


$l \sim 1000 \rightarrow 180/l \sim 0.2^\circ$

QUIET実験とは？

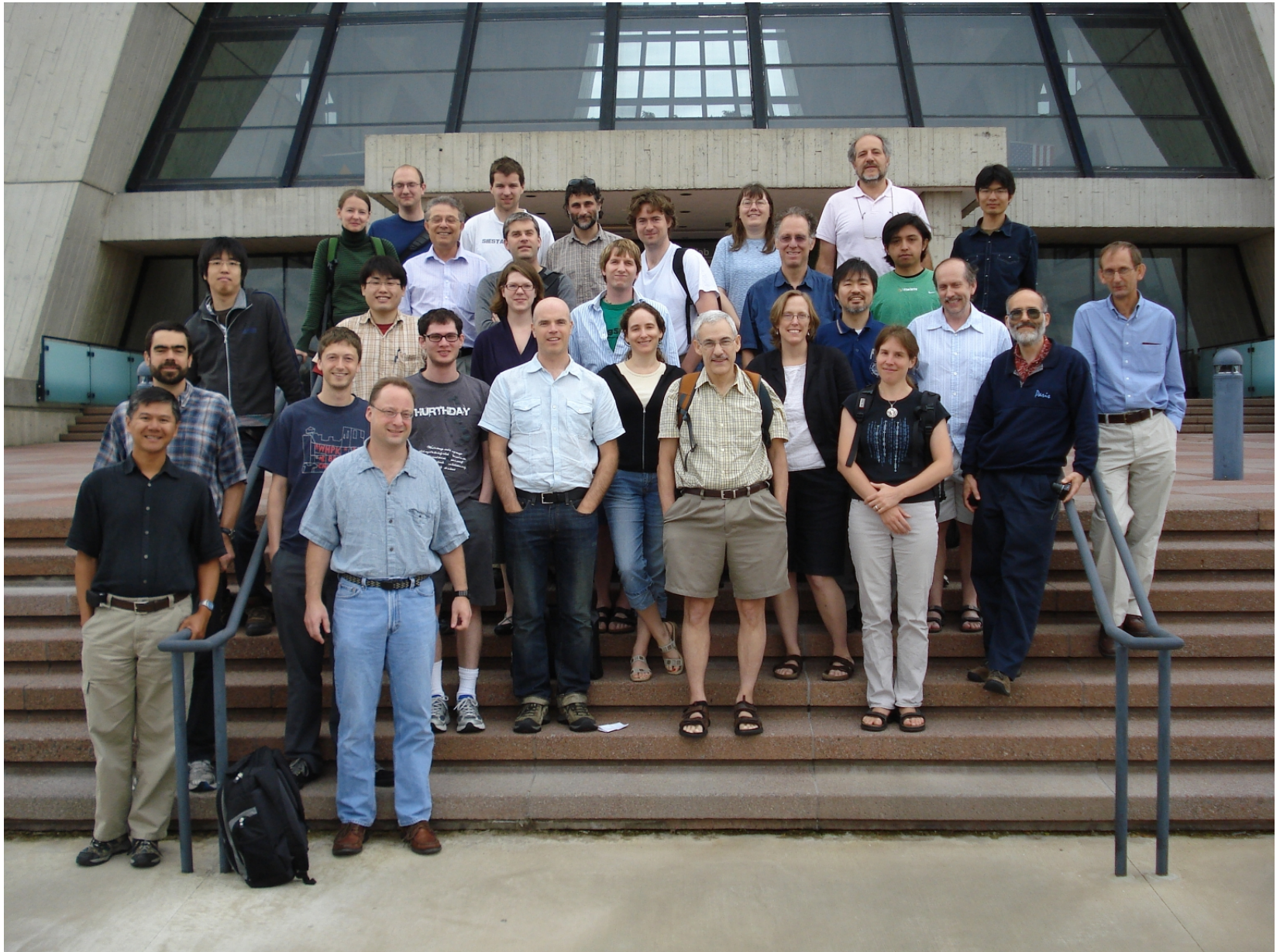
- 地上観測
- CMB偏光測定 無偏光も測定しています
- 原始重力波起源のBモード
角度スケール: $\ell \sim 100$ ($\sim 2^\circ$)
- Phase-I: 現在世界最高感度で観測中！
- Phase-II: NSF審査結果待ち

QUIETコラボレーション

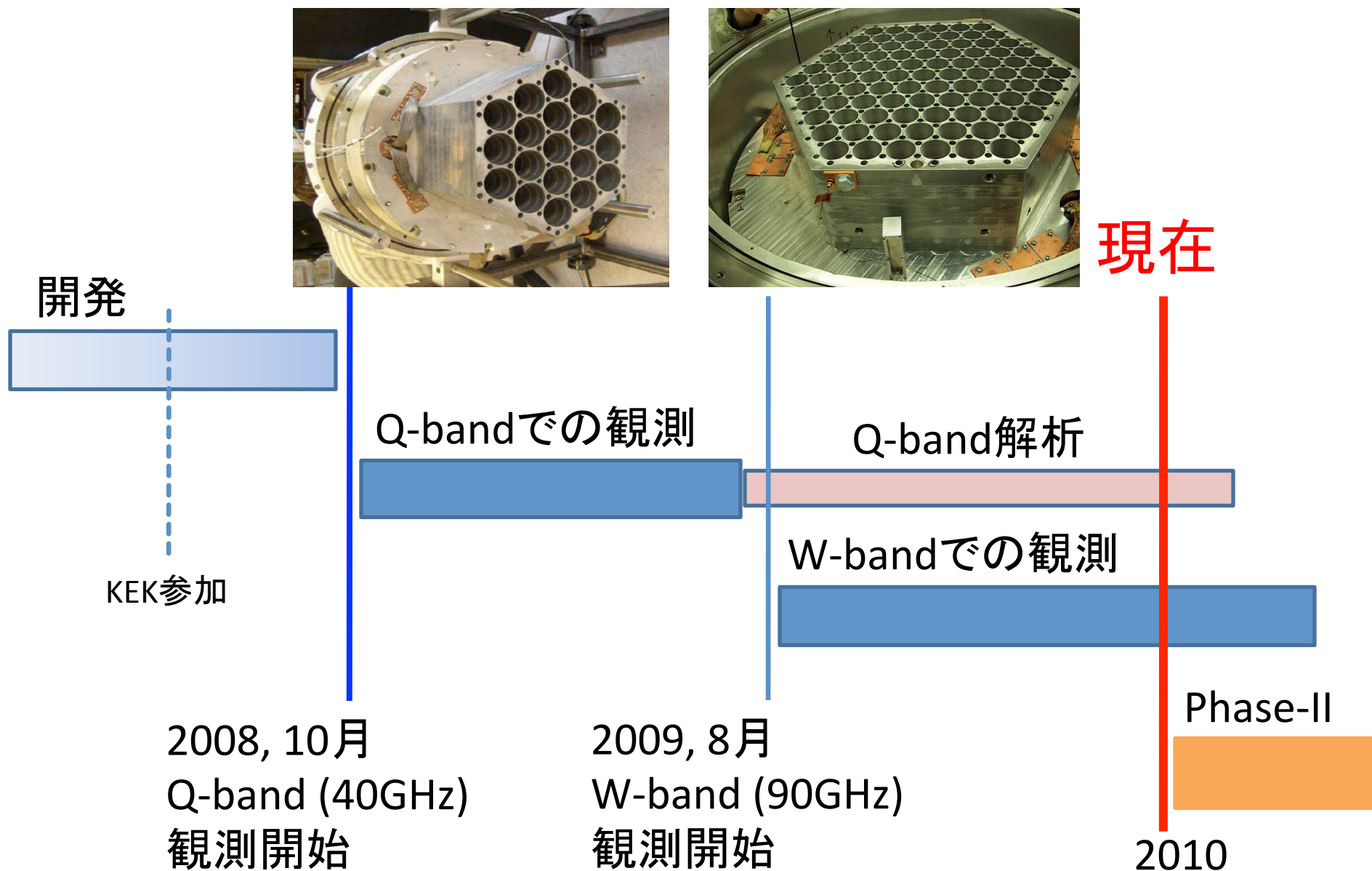


5 countries, 14 institutes, ~35 scientists

Collaboration meeting at Fermilab, June 2009



おおまかな歴史

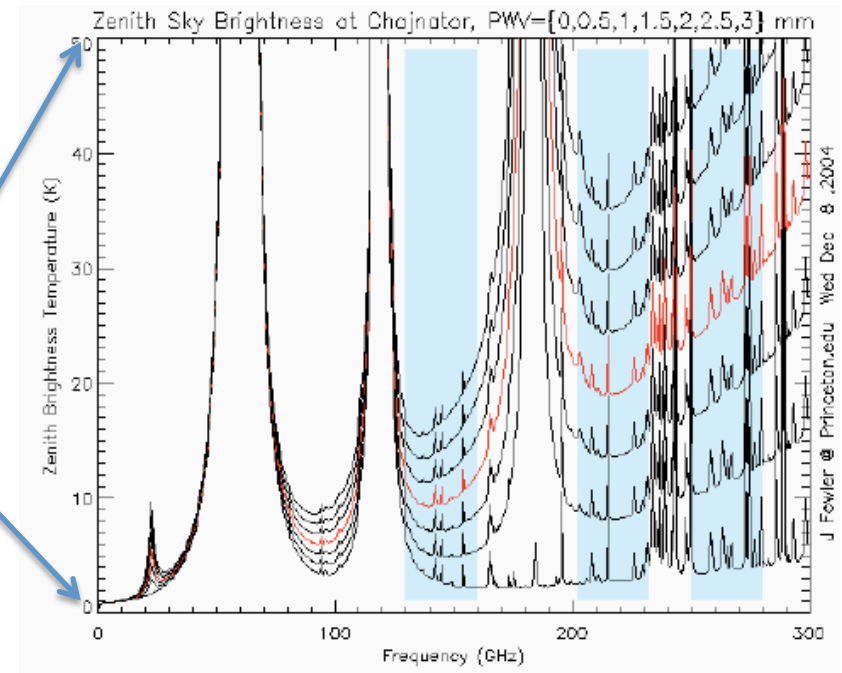
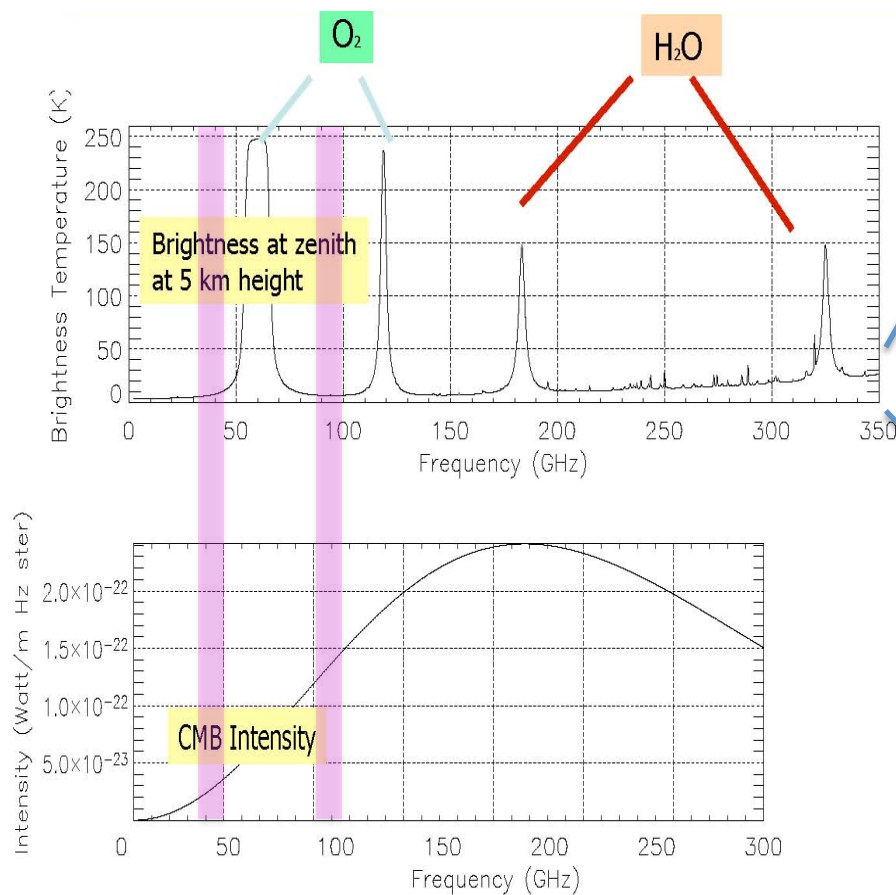


観測サイト

- 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

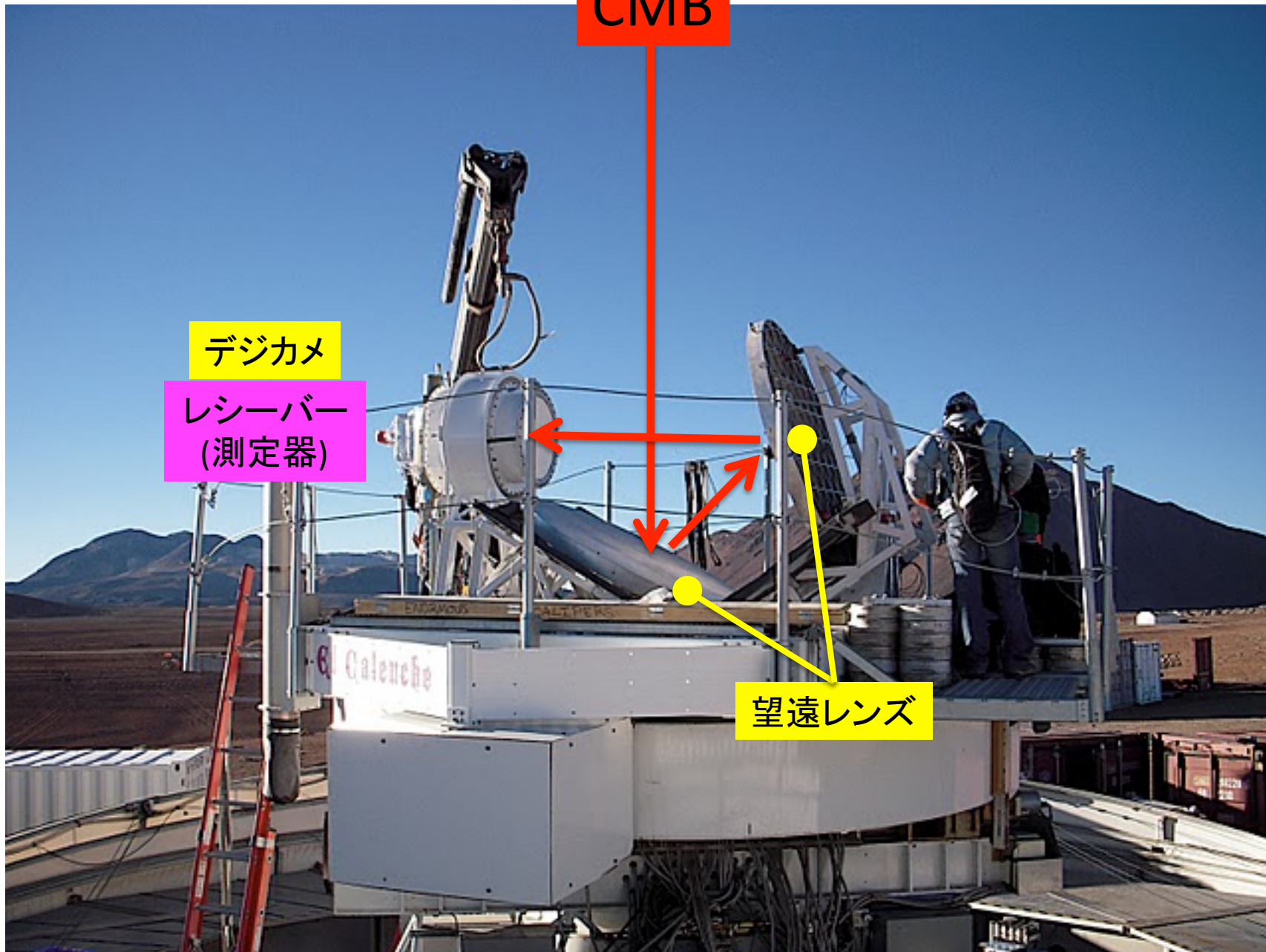


CMB

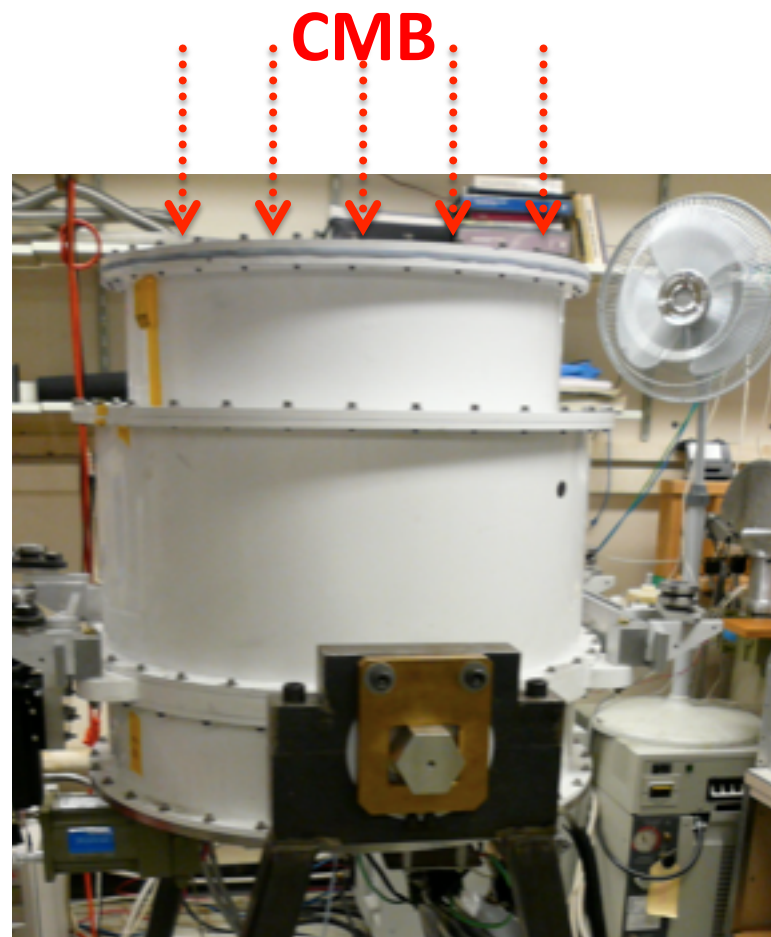
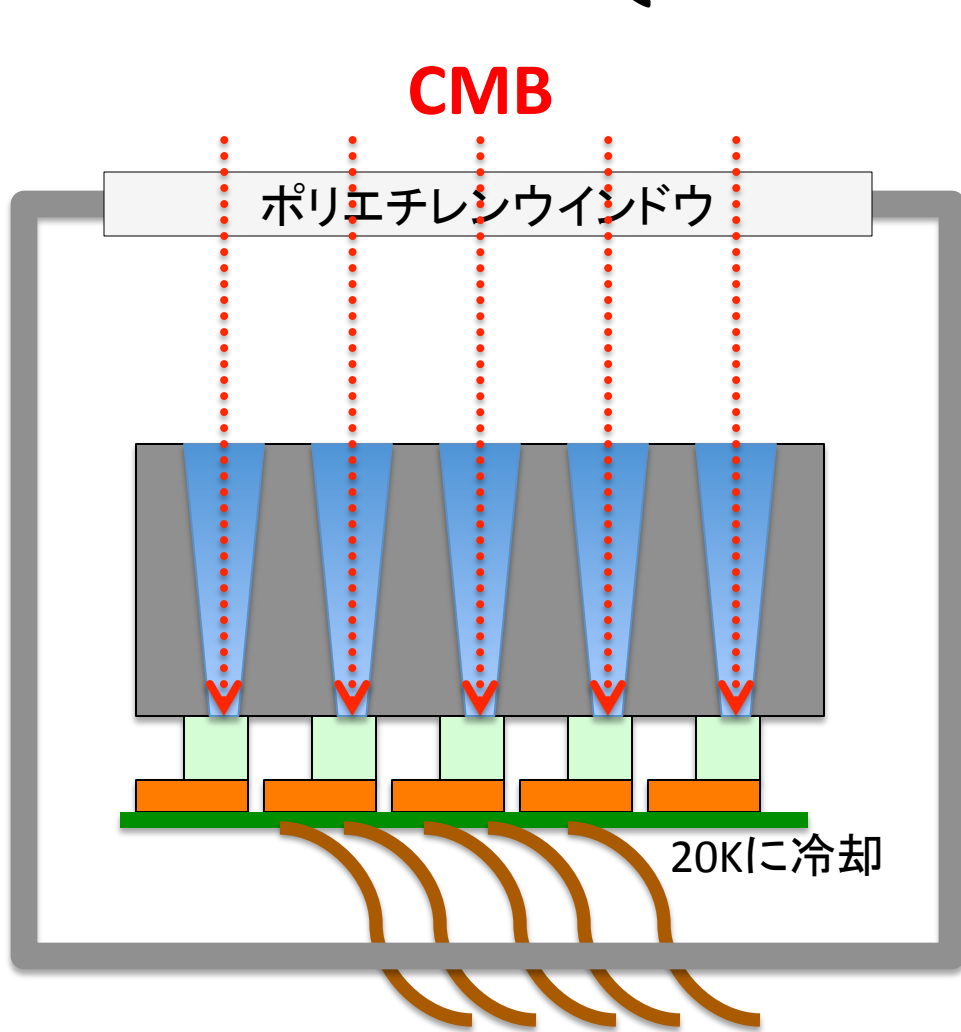
デジカメ

レーザバー
(測定器)

望遠レンズ

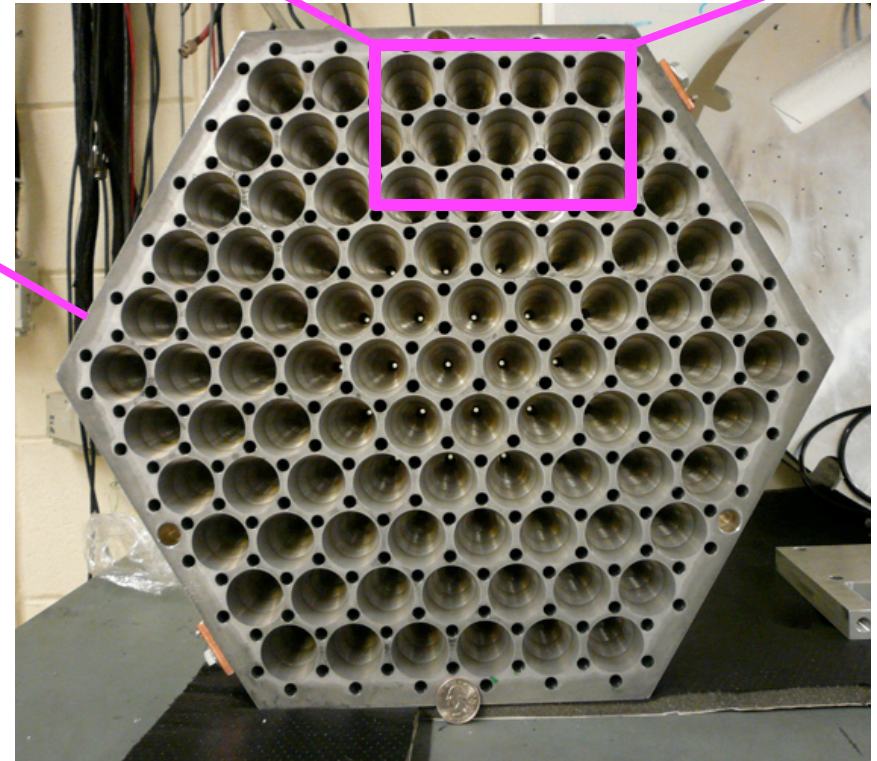
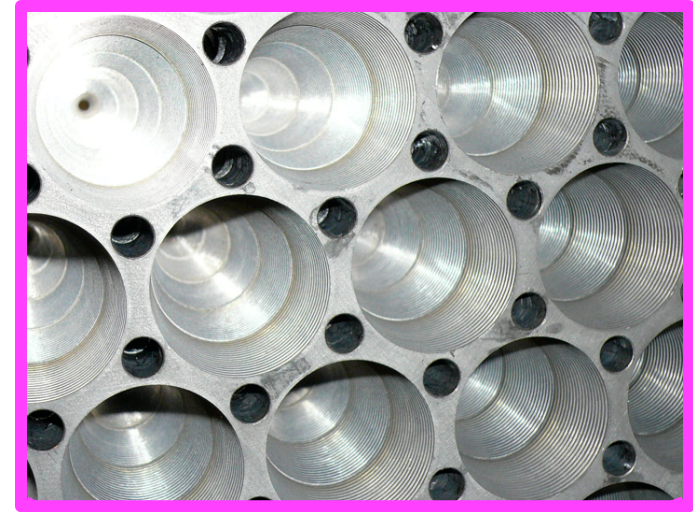
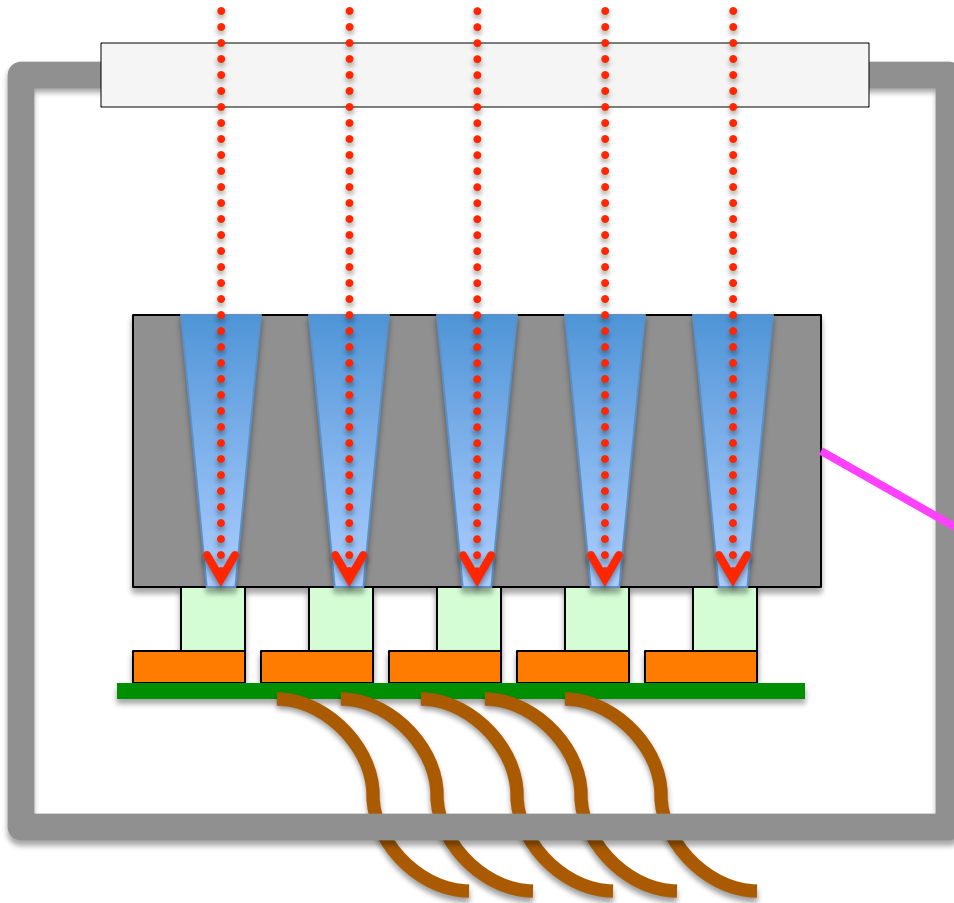


QUIET Receiver



Platelet Array (horn)

CMB

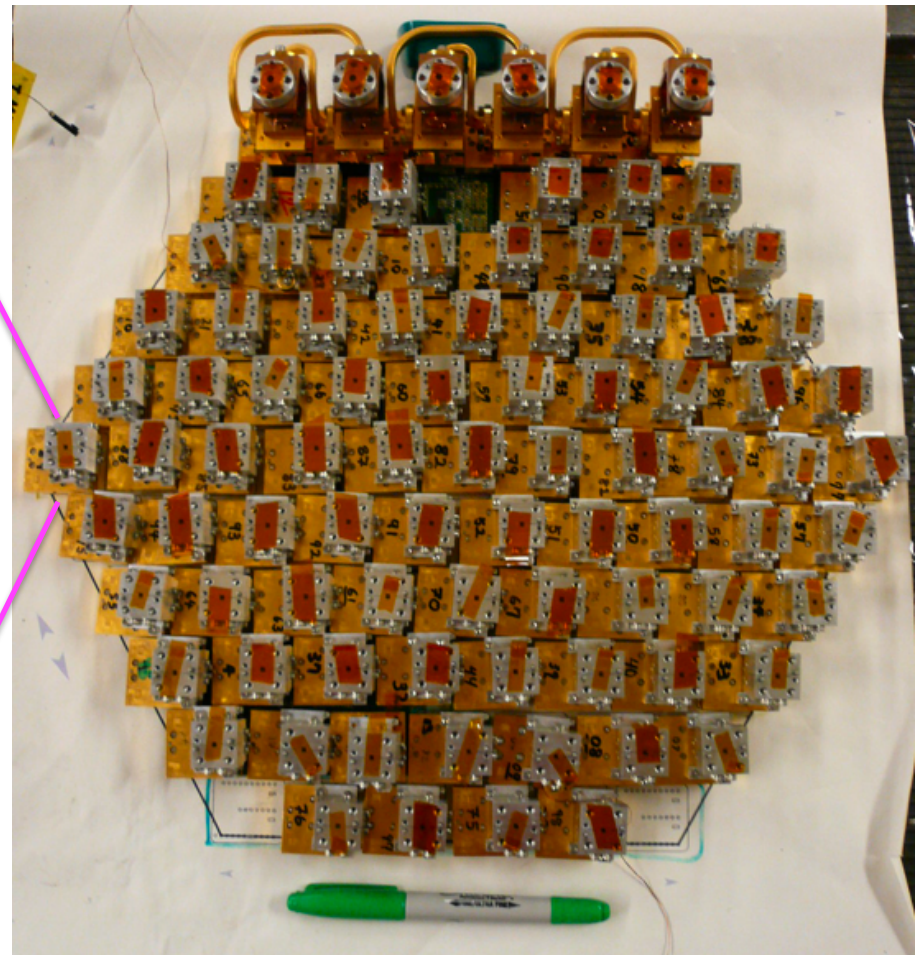
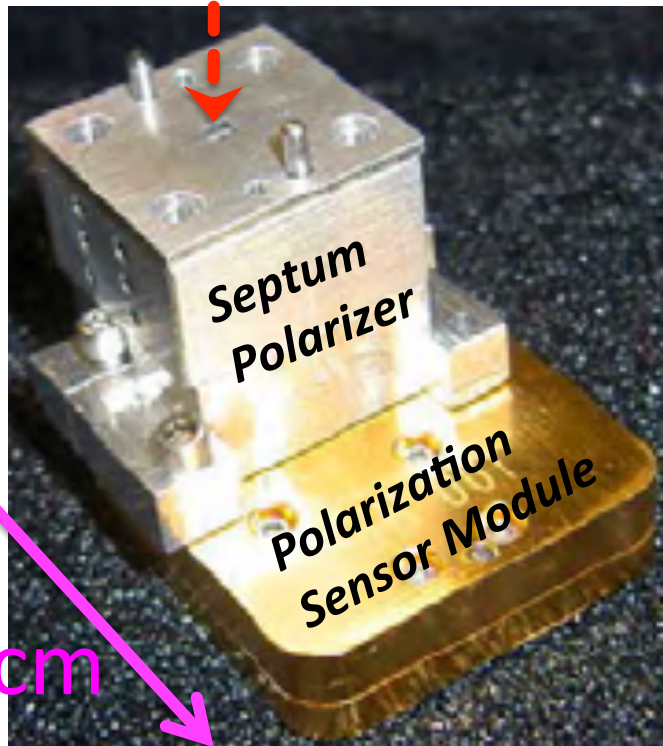


検出器

Septum Polarizer & Polarization Module

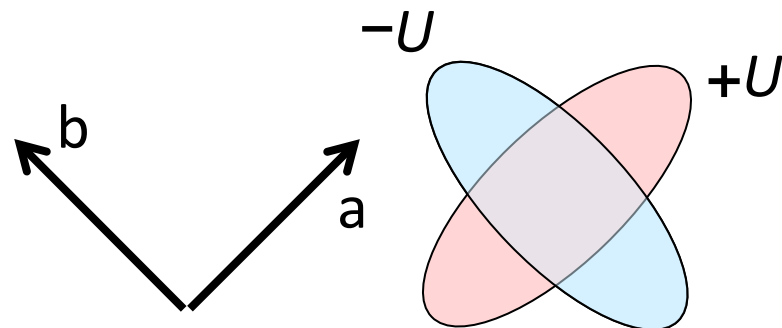
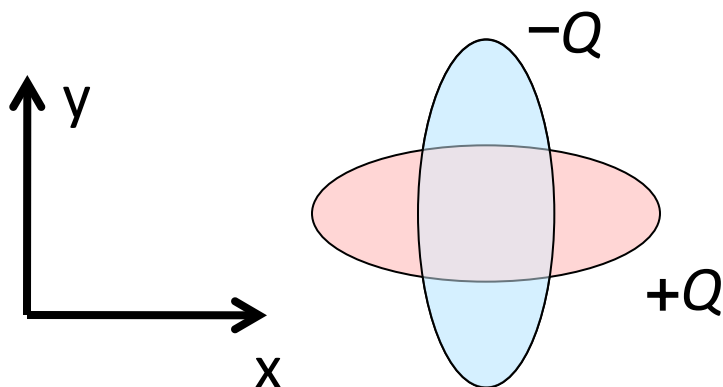
90画素偏光検出器

集光されたCMB



“偏光”の意味

- “偏光”: 統計的な量
 - 空の一点から来る光子を数える
 - それぞれの光子について, 線偏光の方向を測る
 - x-y 固有状態: $N_x > N_y \rightarrow +Q$
 - a-b 固有状態: $N_a > N_b \rightarrow +U$
- この (Q, U) を空の各点で測る $\rightarrow$ 偏光map



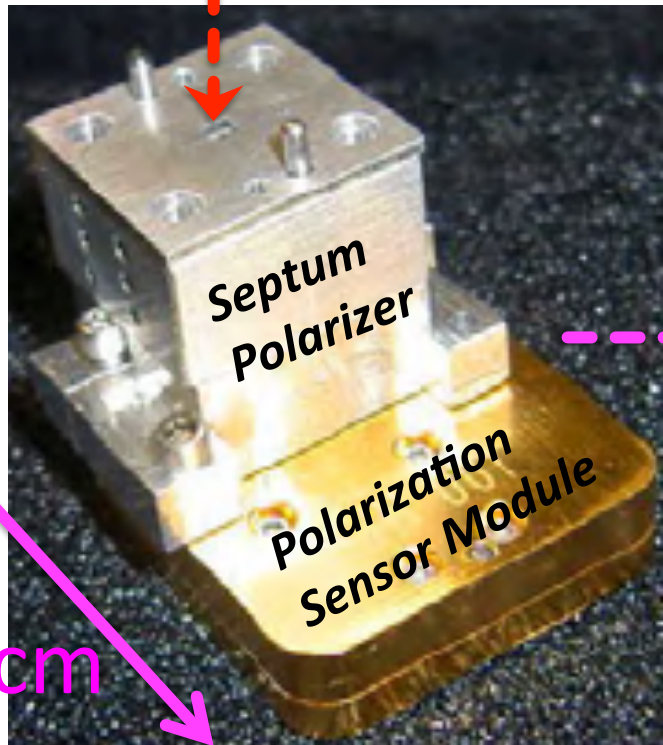
CMB偏光のシグナルは、 とても、とても、とても...小さい

- 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 $\sim 0.05 \text{ mV}$
- 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

検出器

Septum Polarizer & Polarization Module

集光されたCMB

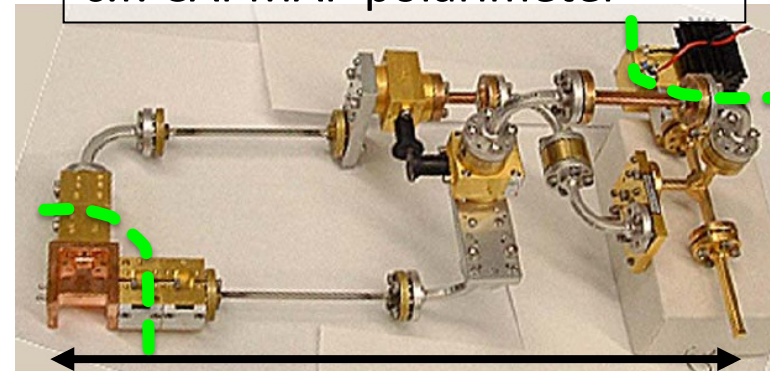


基本原理は成熟しているが、
最新の検出器！！

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

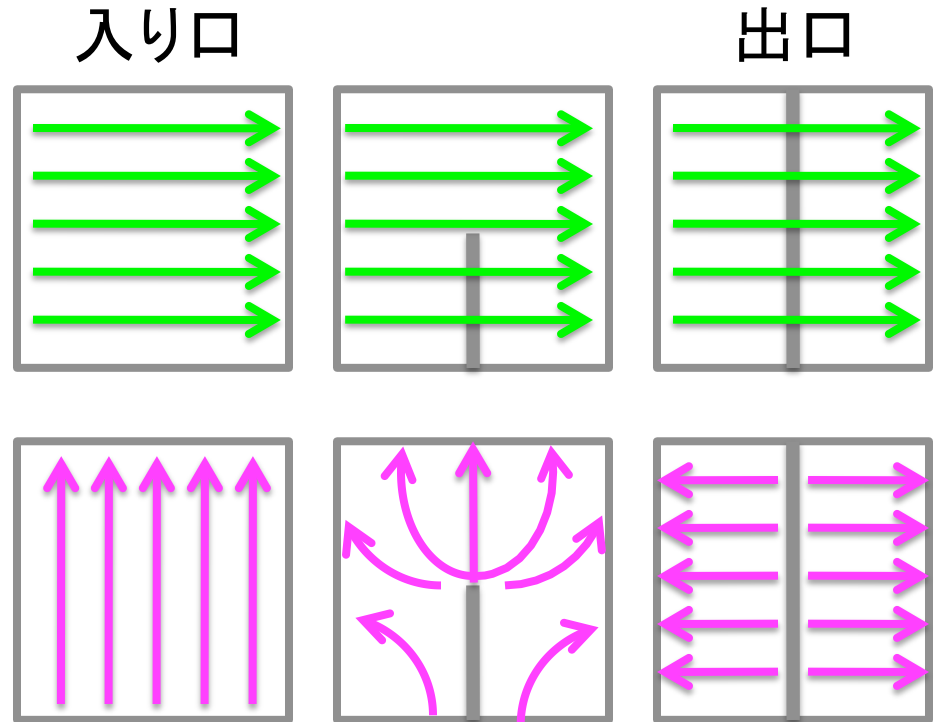
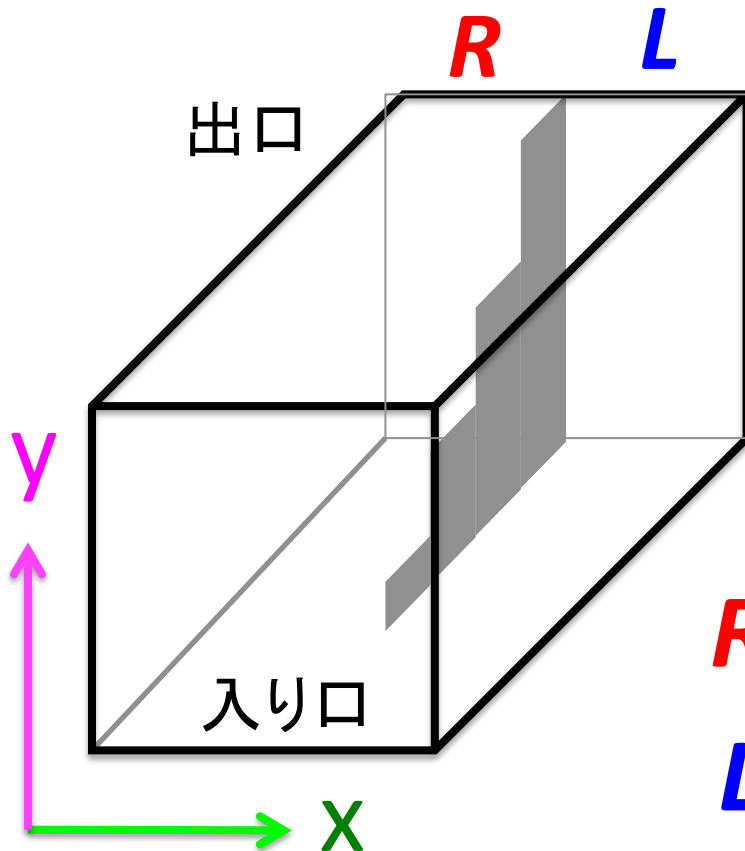
こういった原理検証を行なったこともQUIET phase1の大きな成果

~30cm

まだ、電波の世界

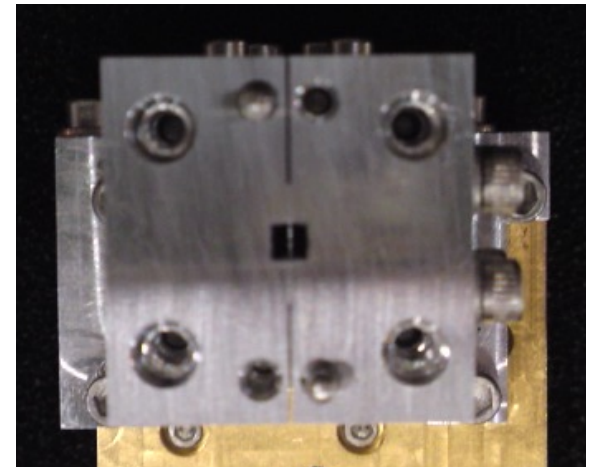
Septum Polarizer (OMT)

- 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



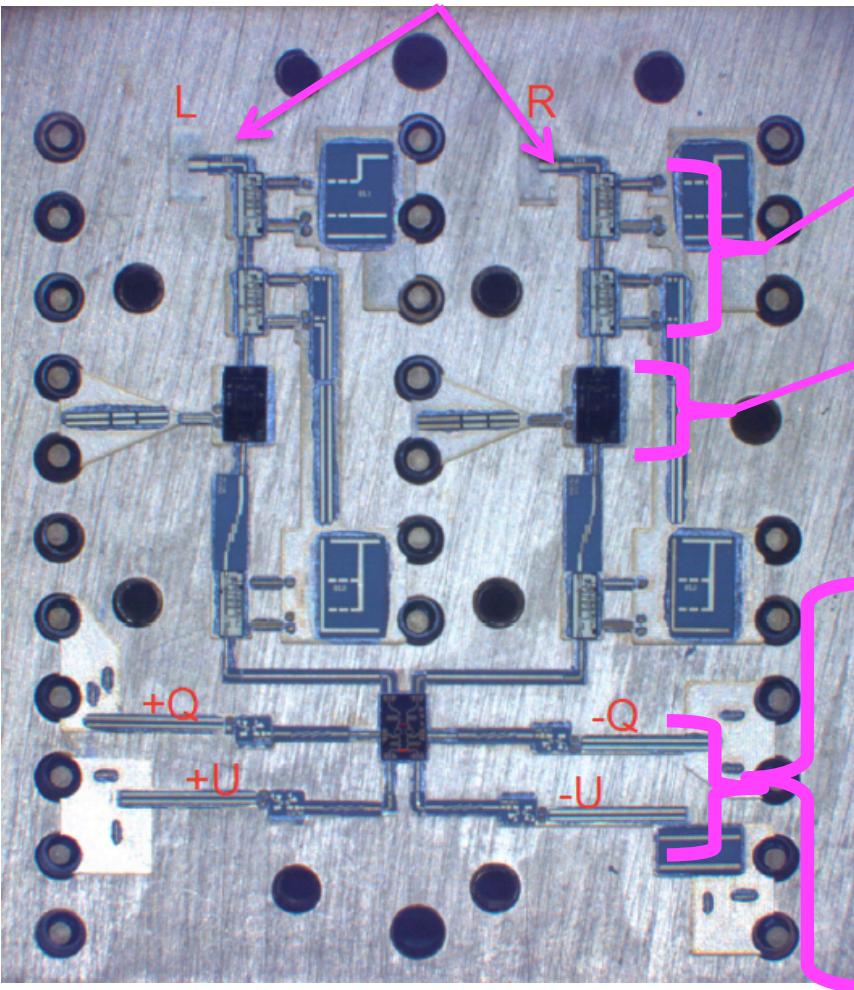
$$R = E_x - iE_y$$

$$L = E_x + iE_y$$



Polarization Module

電磁波(L, R)をピックアップするアンテナ



W-band module

HEMT 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: (± 1)

Det. Diode

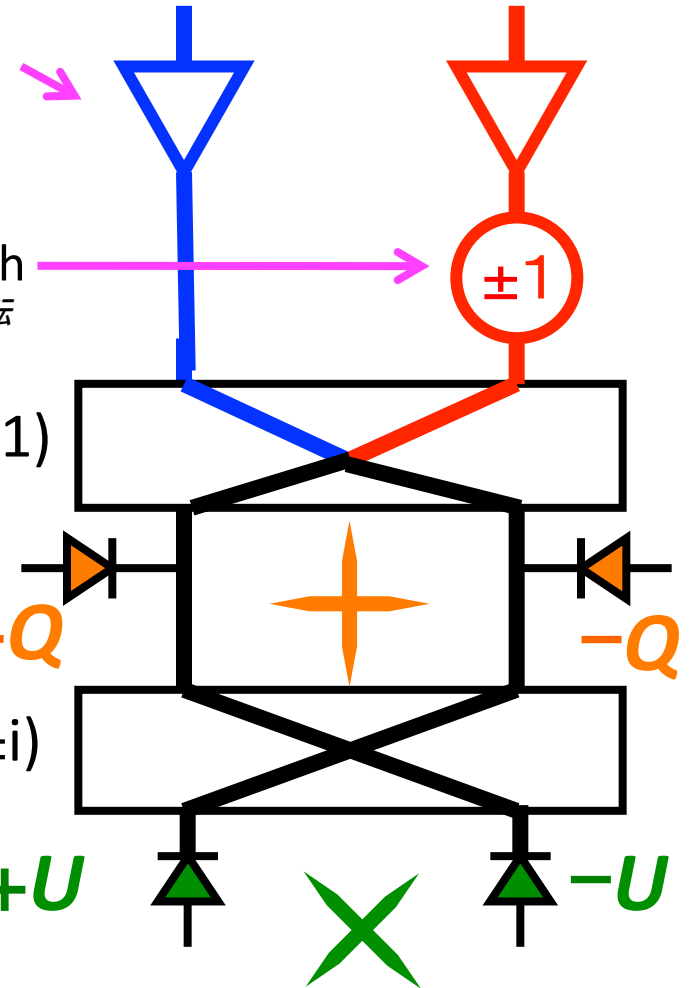
$$|L \pm R| \rightarrow +Q$$

90° Coupler: ($\pm i$)

$$|L \pm iR| \rightarrow +U$$

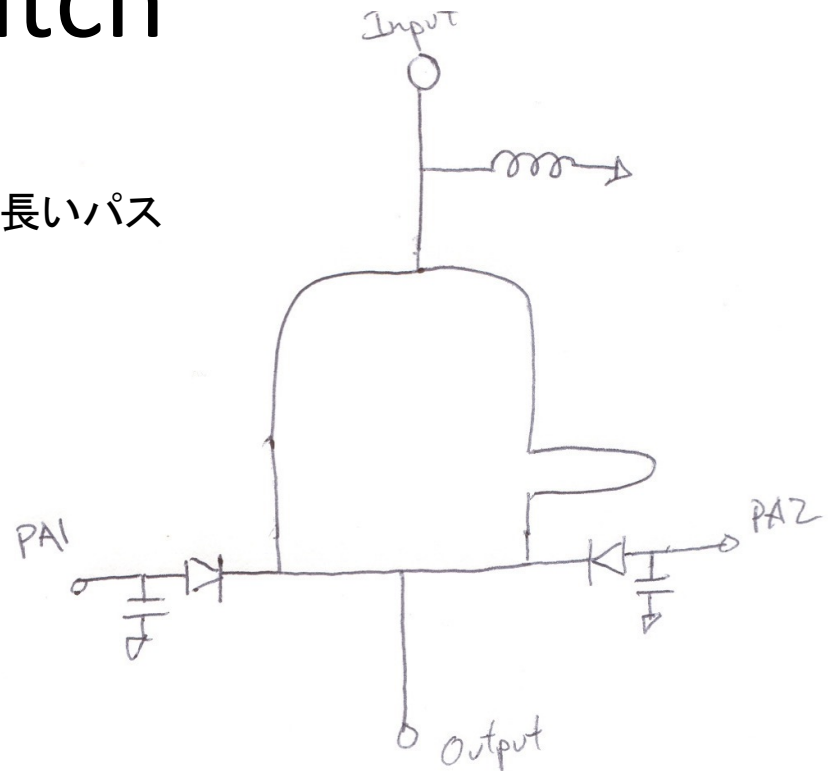
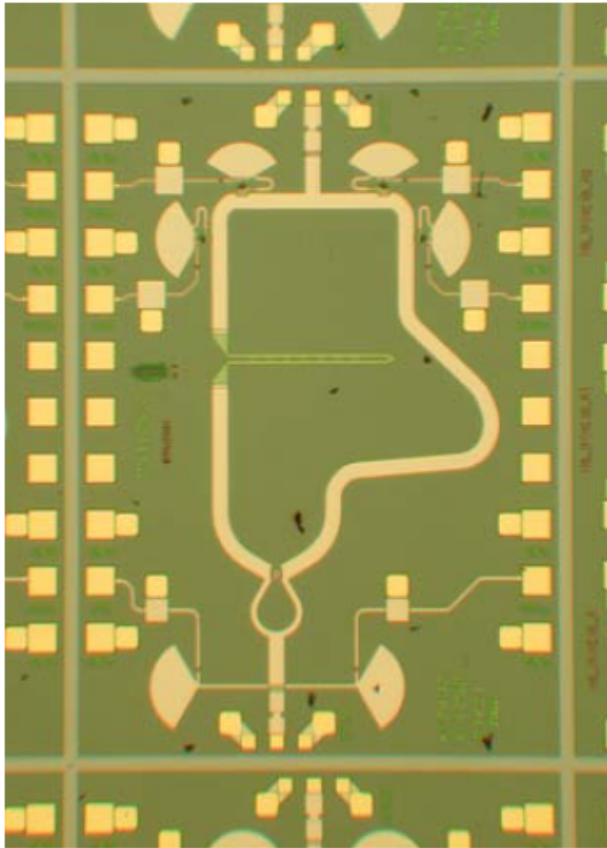
$$L = E_x + iE_y$$

$$R = E_x - iE_y$$

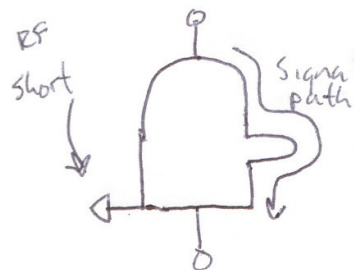


Phase Switch

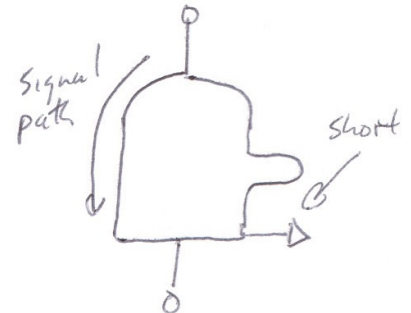
- 信号の流れるパスを切り替える
一方が短いパス、もう一方が半位相分長いパス



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

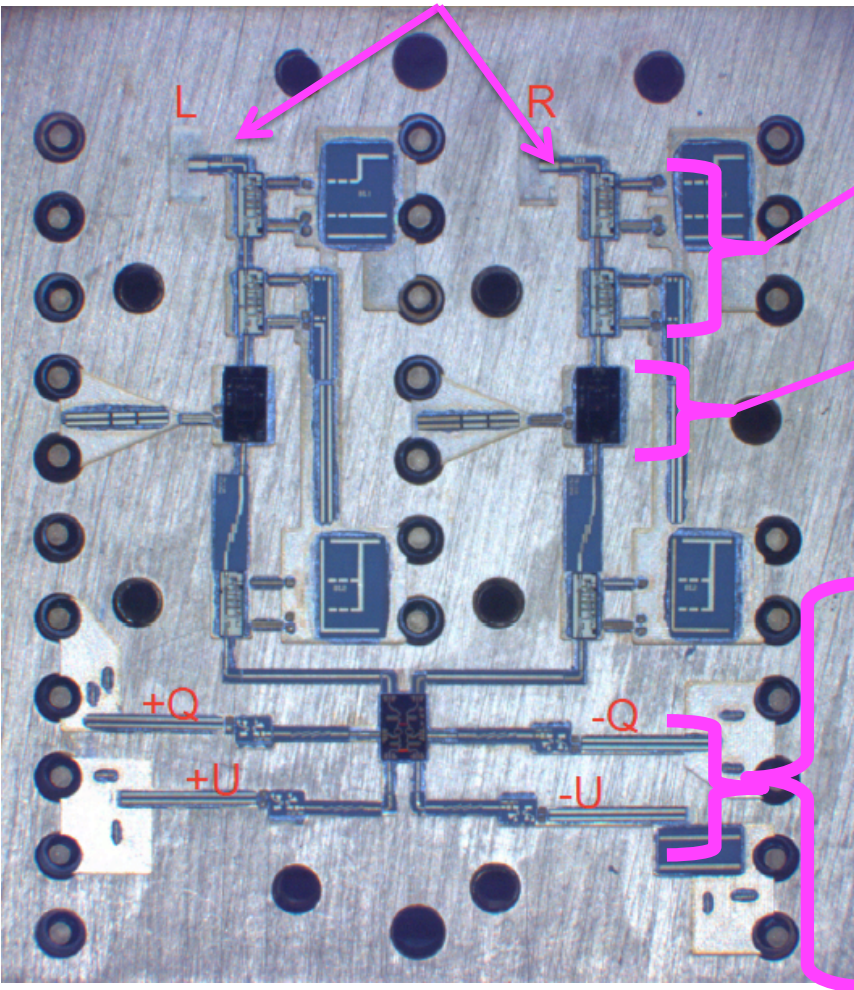


When $PA2 = +0.6V, \sim 1ma$
Equiv circuit is :

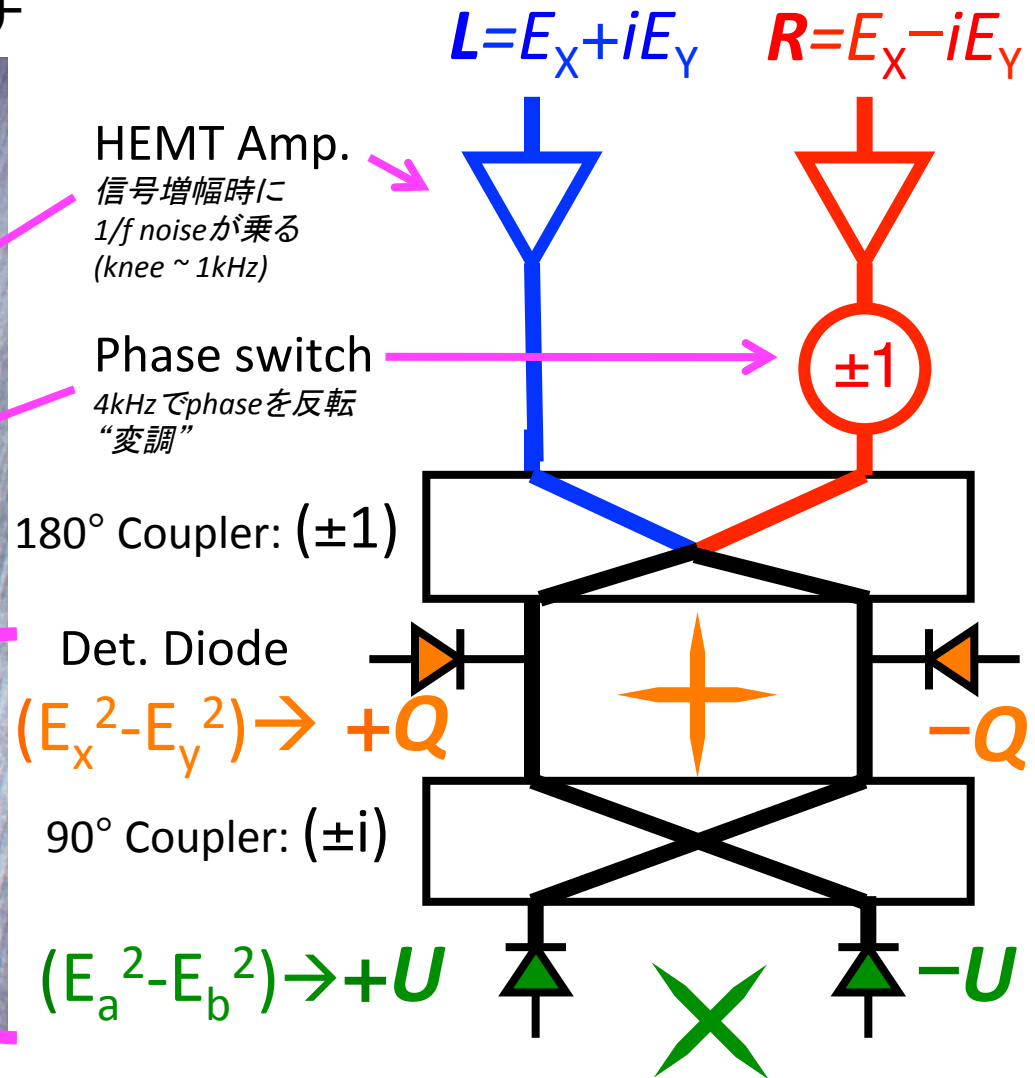


Polarization Module

電磁波(L, R)をピックアップするアンテナ



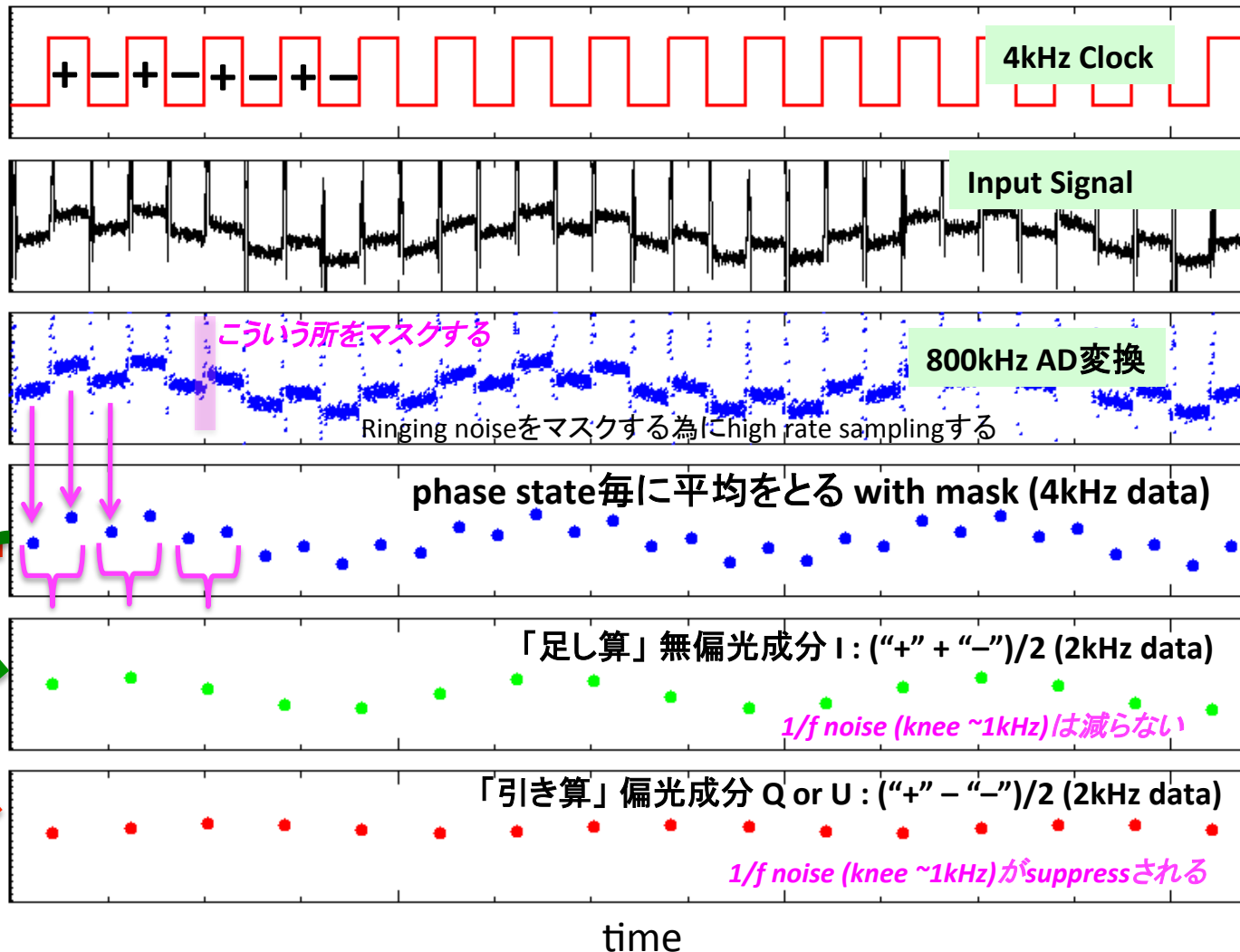
W-band module



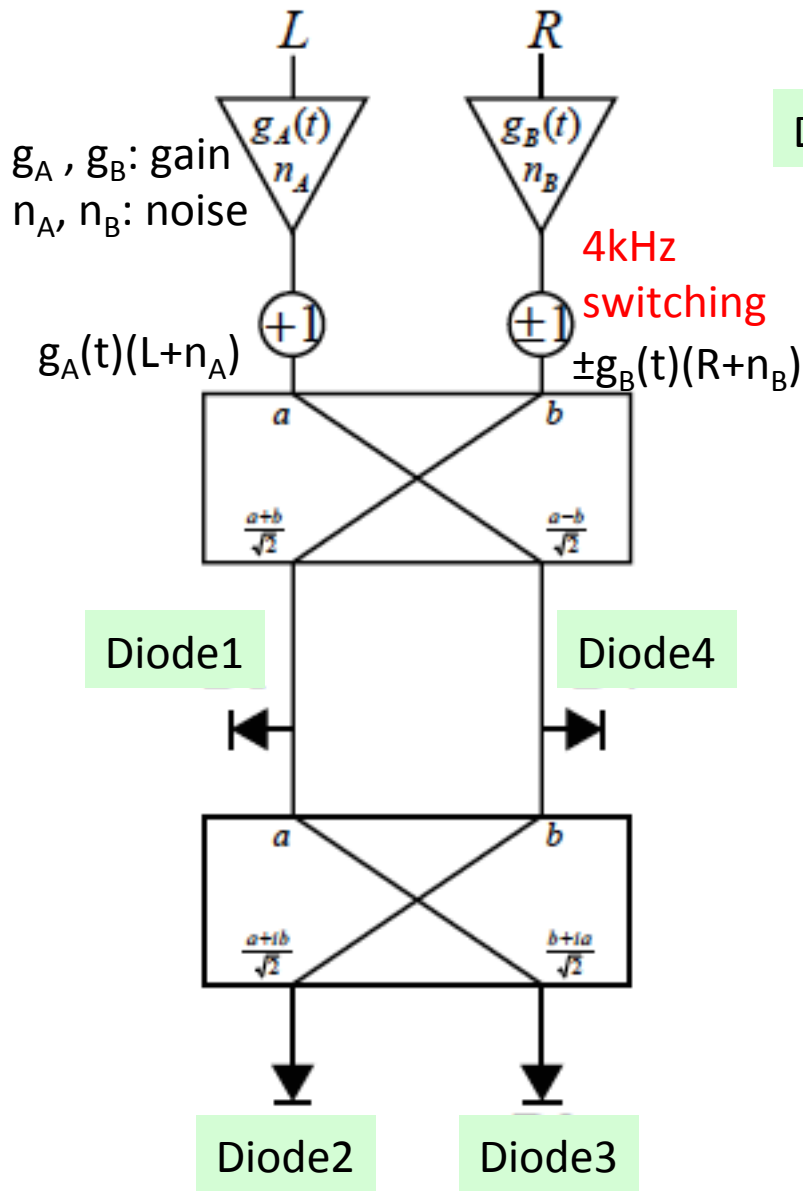
実際の測定では、diode信号を読み出して、
phase statusを考慮しながら、onlineで復調(“引き算”)する

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」

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

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

「引き算平均」

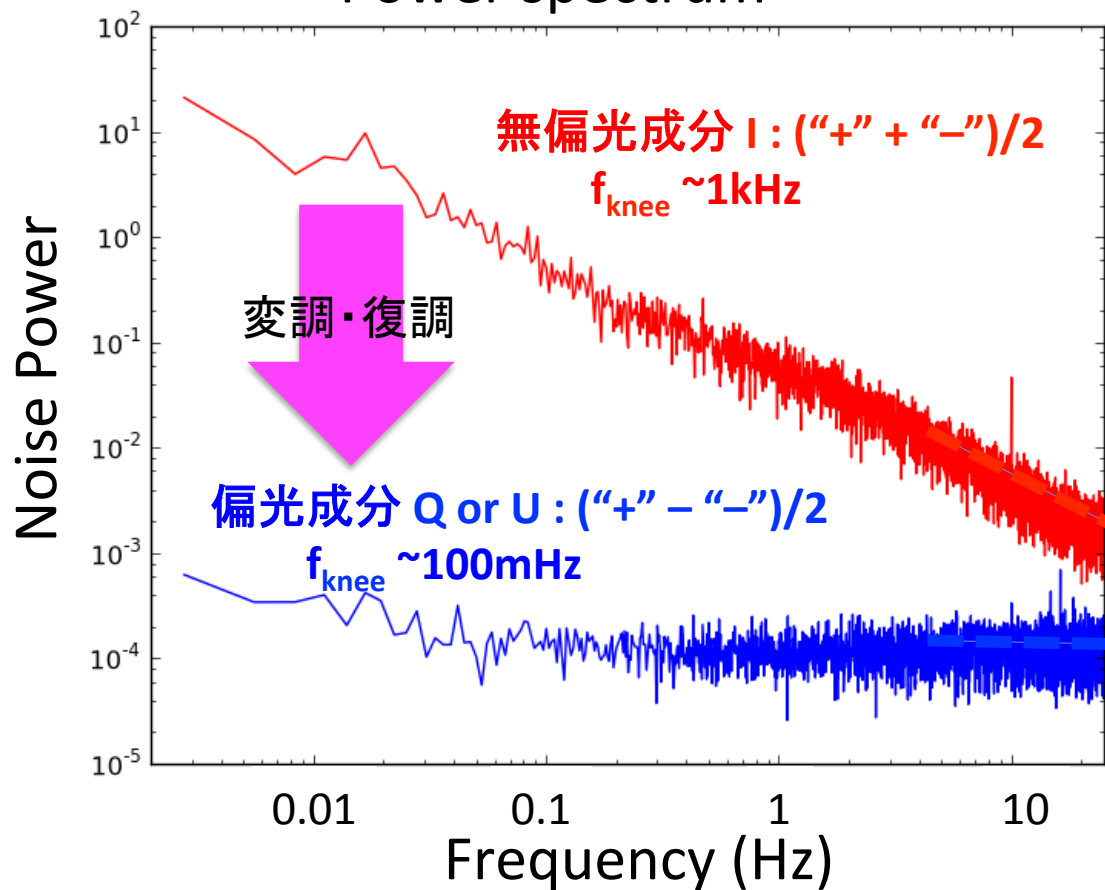
無偏光成分
偏光成分

 : 1/f noise (knee ~1kHz)

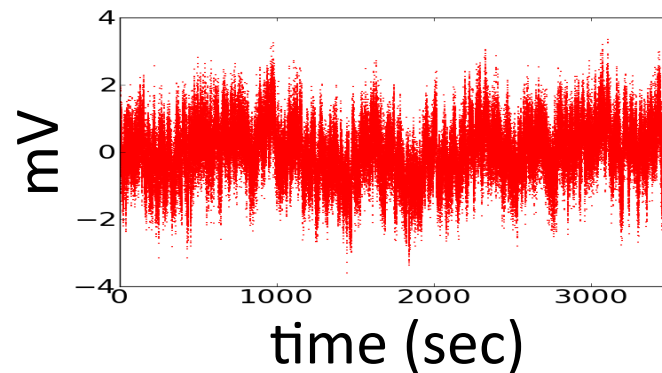
1/f noise のtermが「引き算」で落ちる(demodulation)

変調・復調のインパクト(実データ)

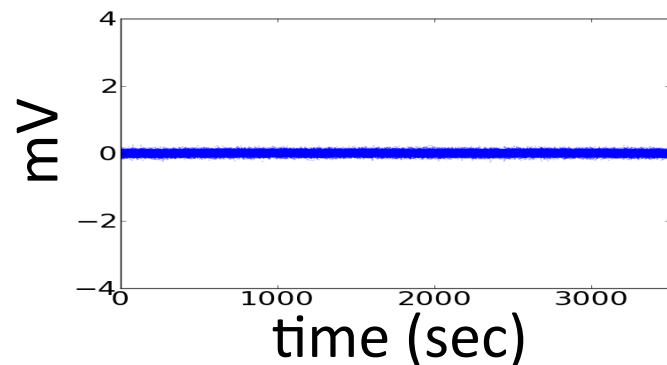
Power spectrum



Time stream data



4kHz Switching



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。

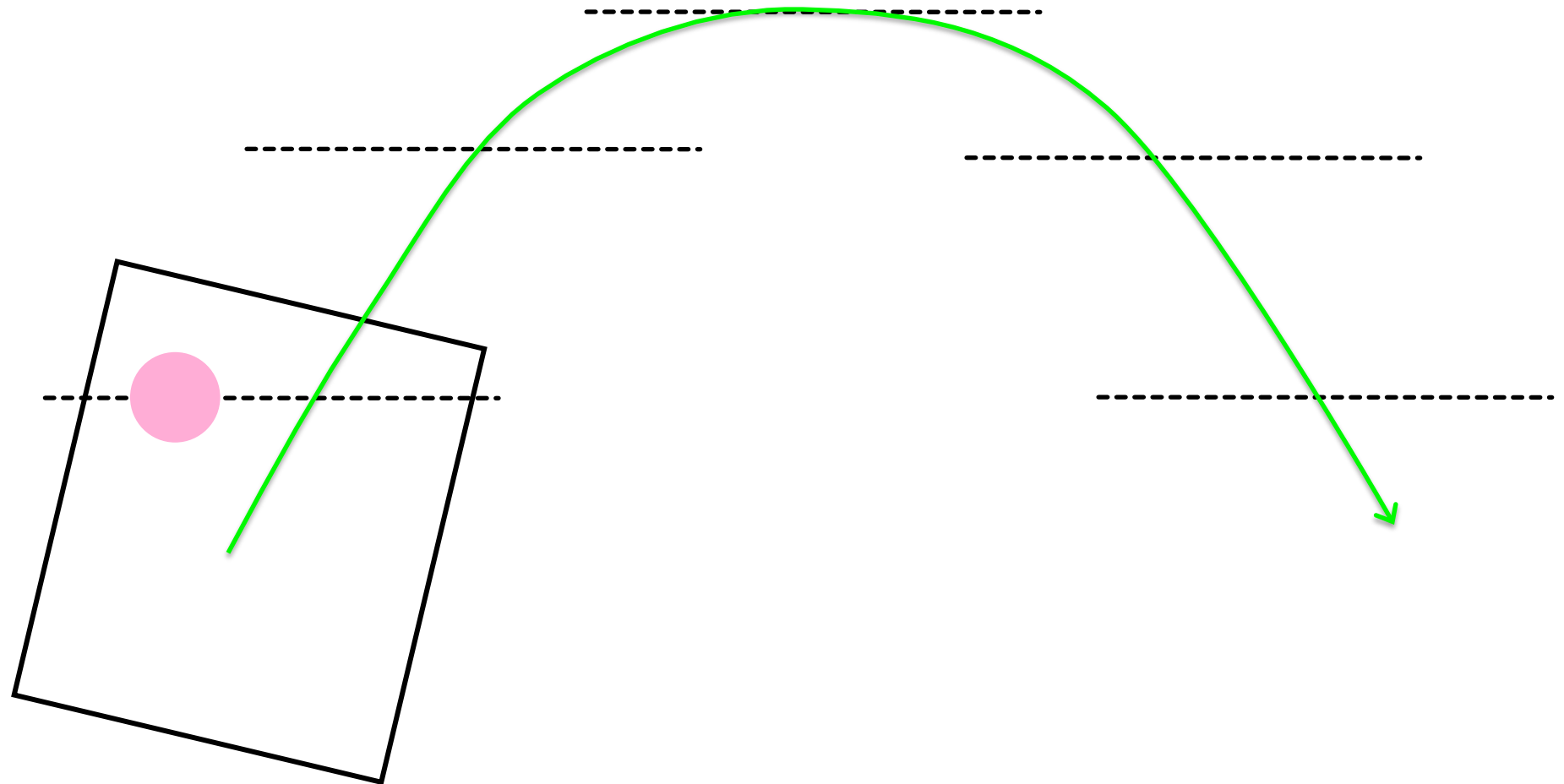
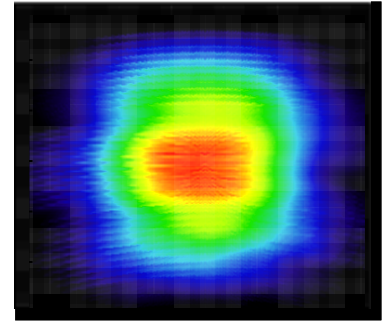
観測について

実際の観測の様子



QUIETのスキャン方法

限られた領域を重点的に「深く」観測



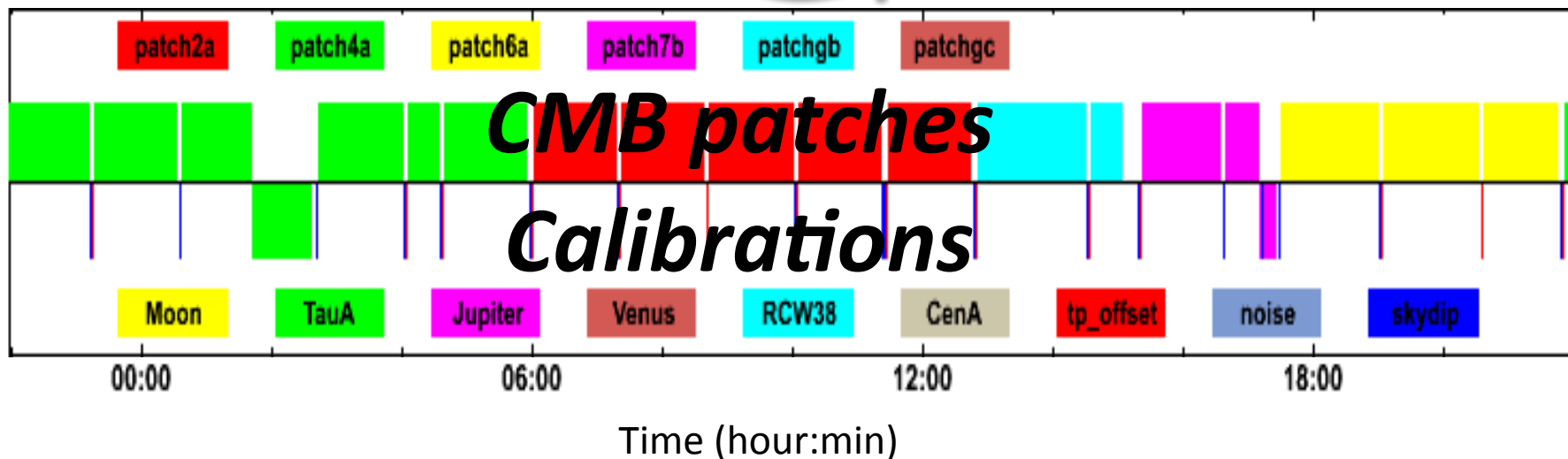
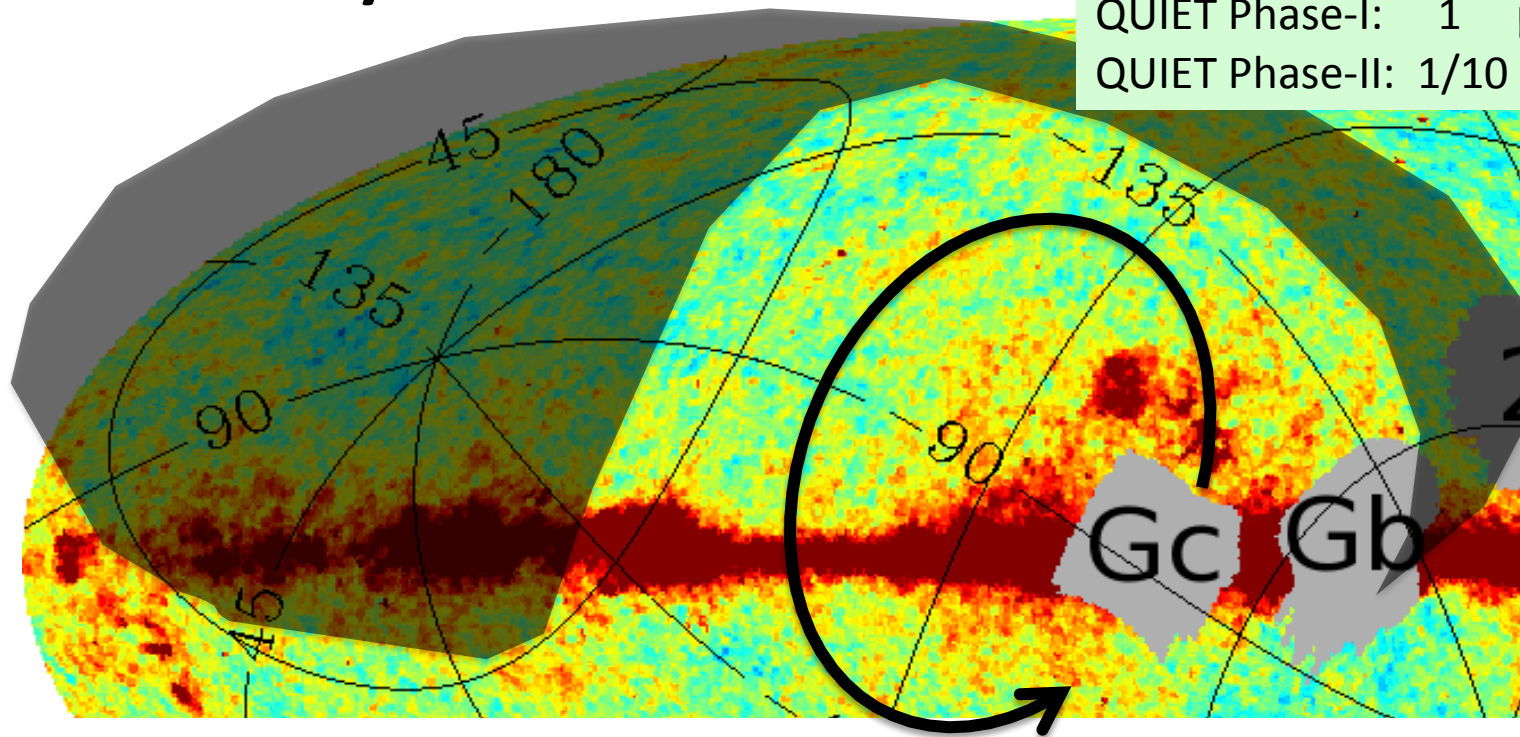
Daily Observation

Map precision on 1x1 degree pixel:

Planck: 1 μK (100 GHz)

QUIET Phase-I: 1 μK (40GHz)

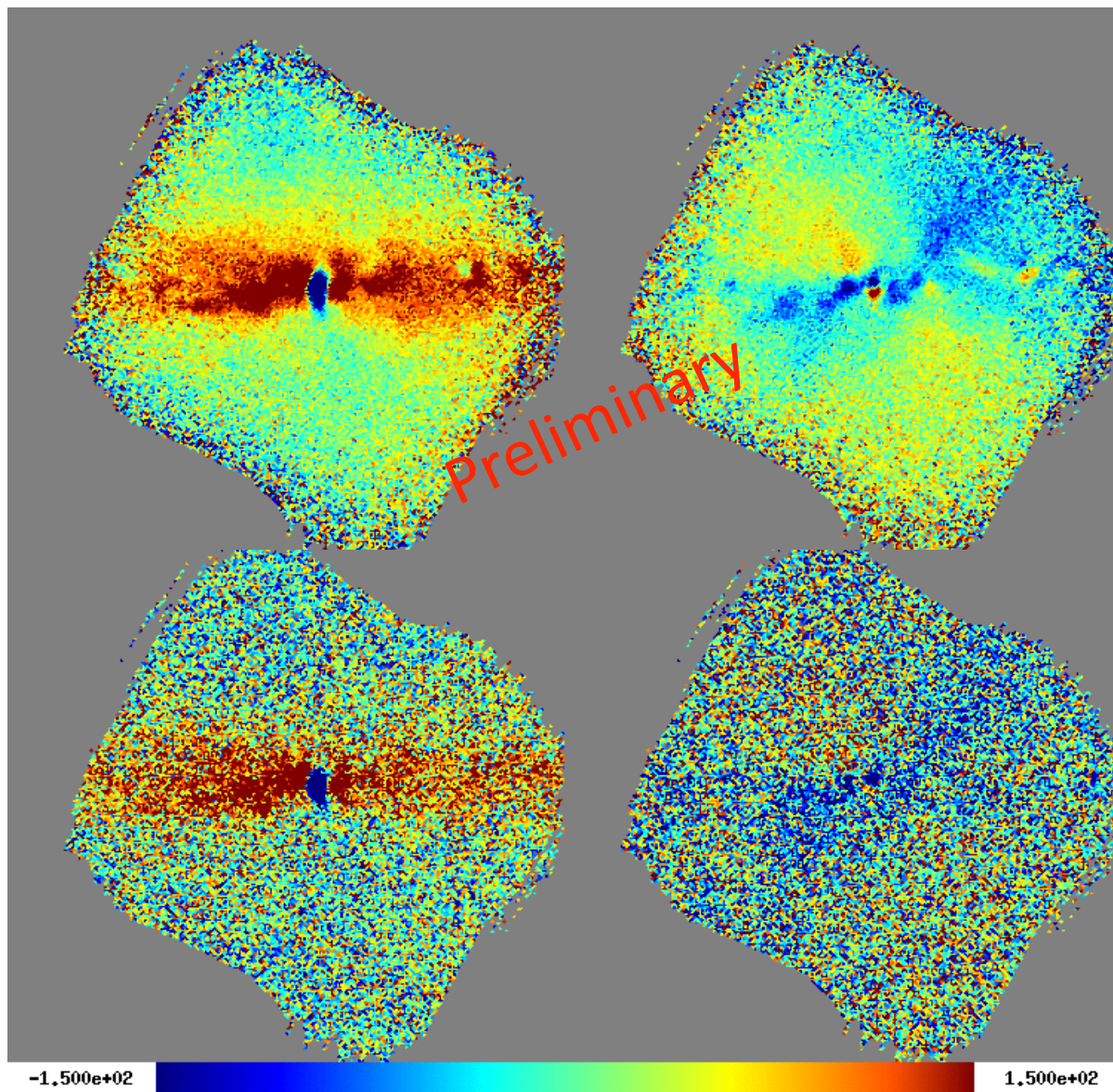
QUIET Phase-II: 1/10 μK (90GHz)



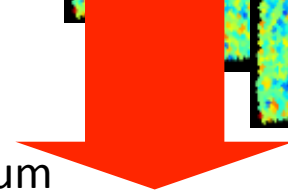
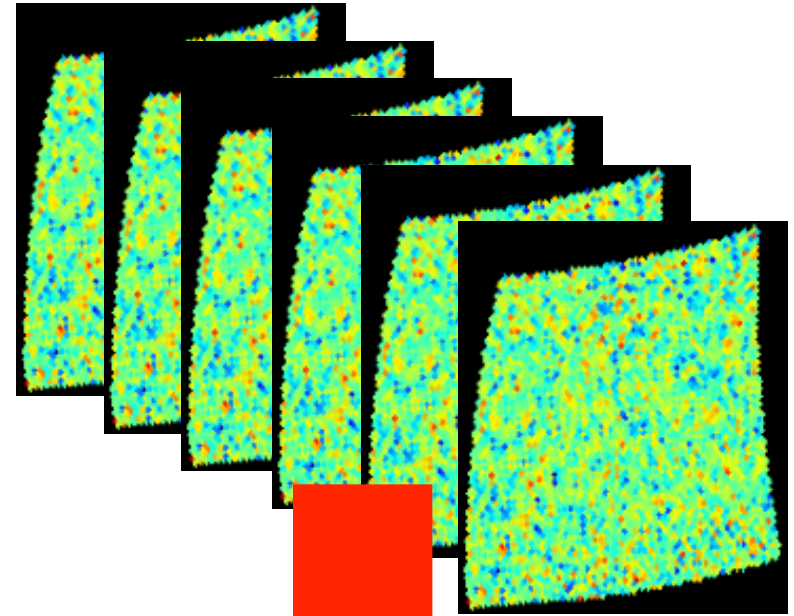
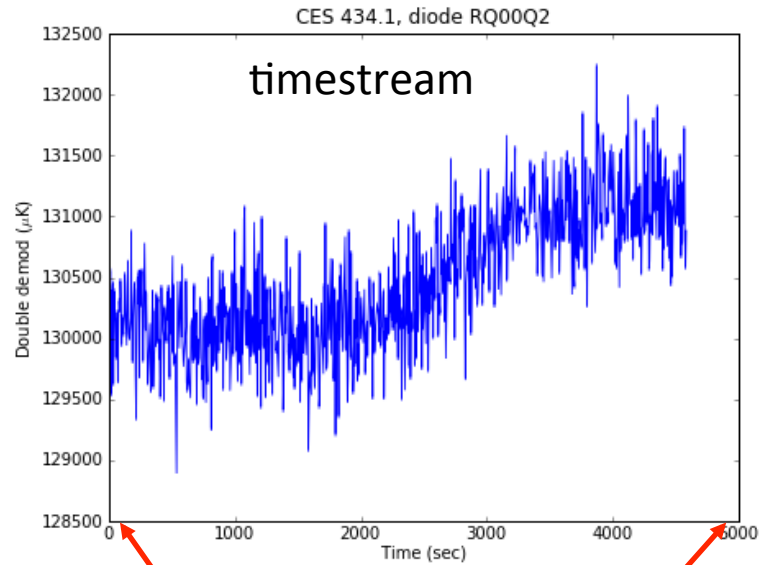
(もちろん)WMAPよりも高感度

Galaxy (Q-band)
systematic effects
not considered yet

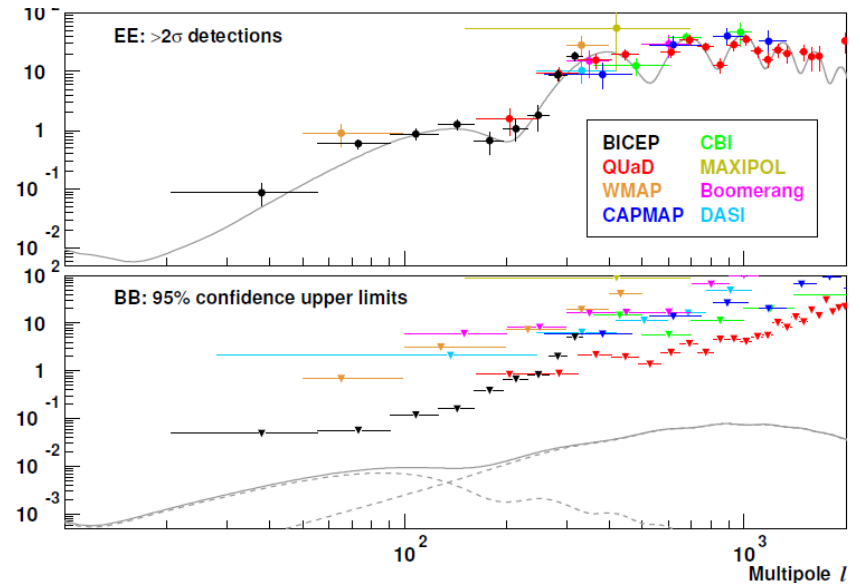
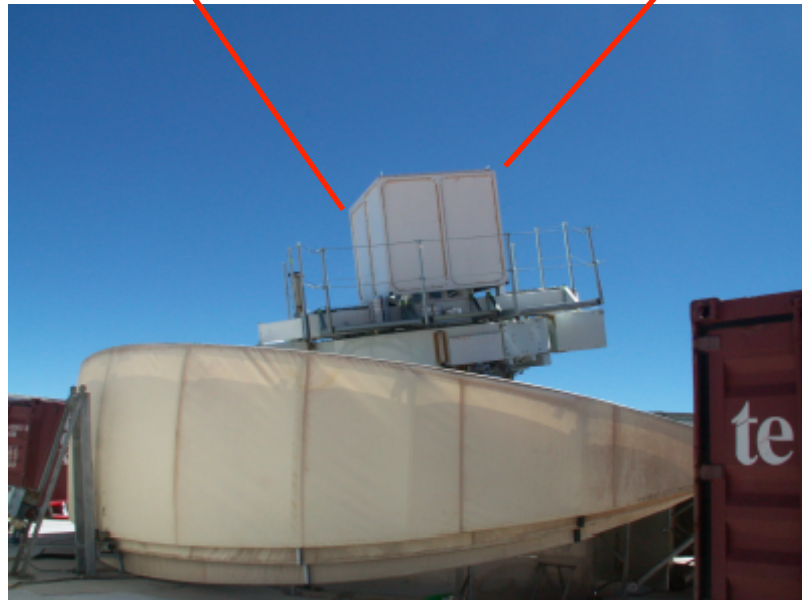
WMAP 5-year



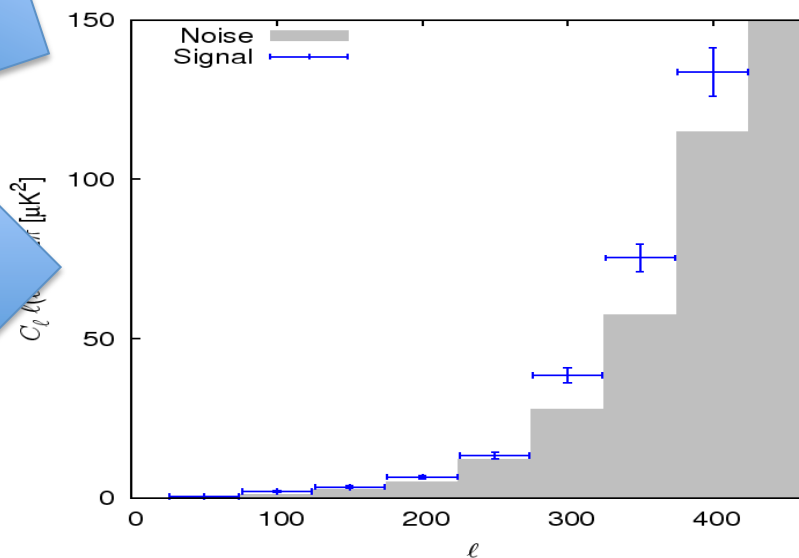
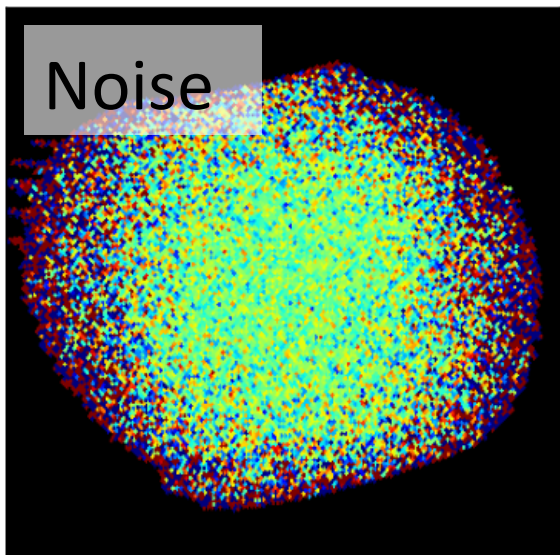
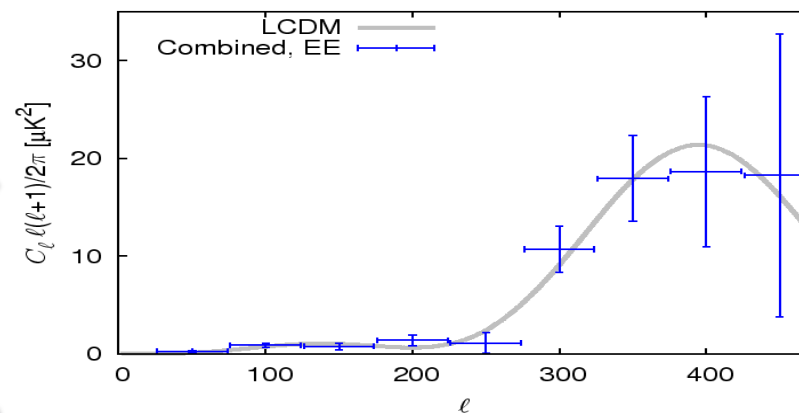
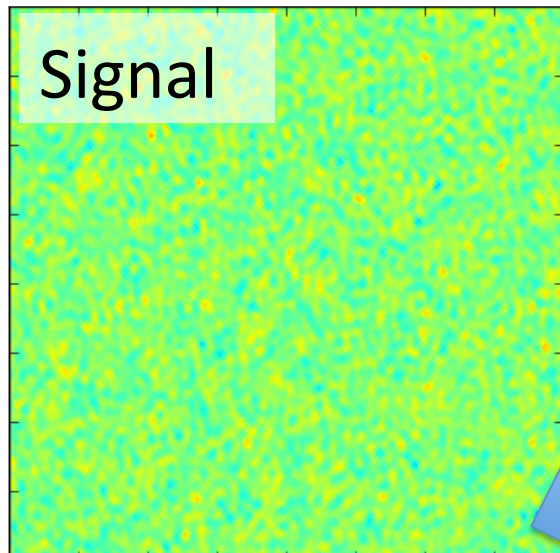
QUIET実験での観測・データ解析の概要



power spectrum



ノイズはどこに？



ノイズはどこに？

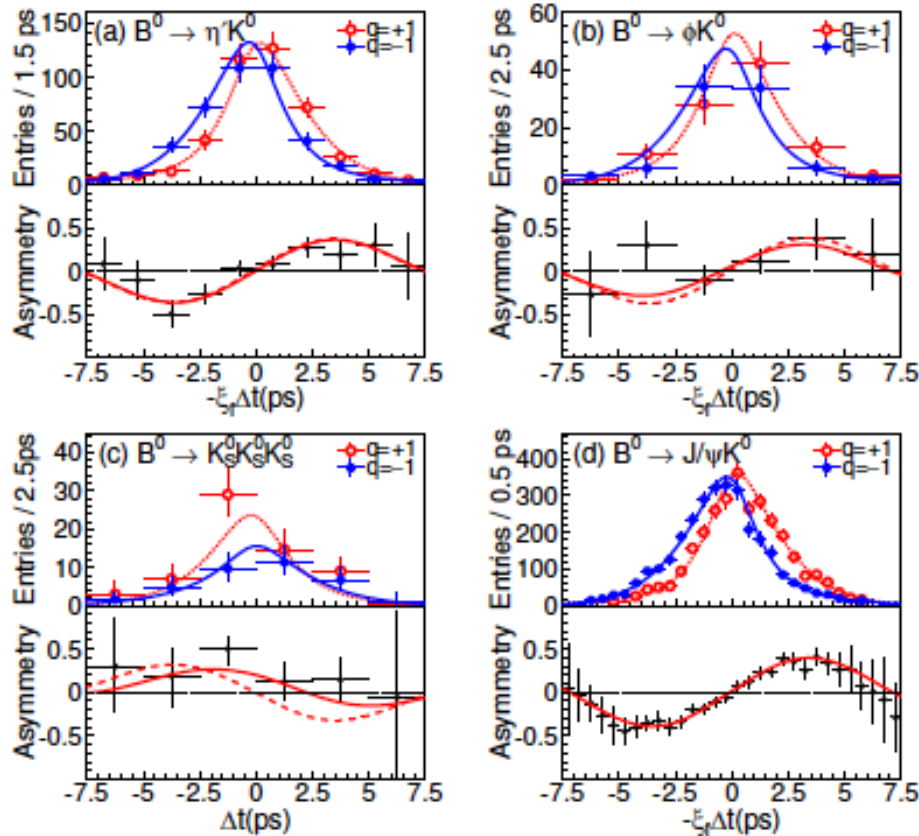
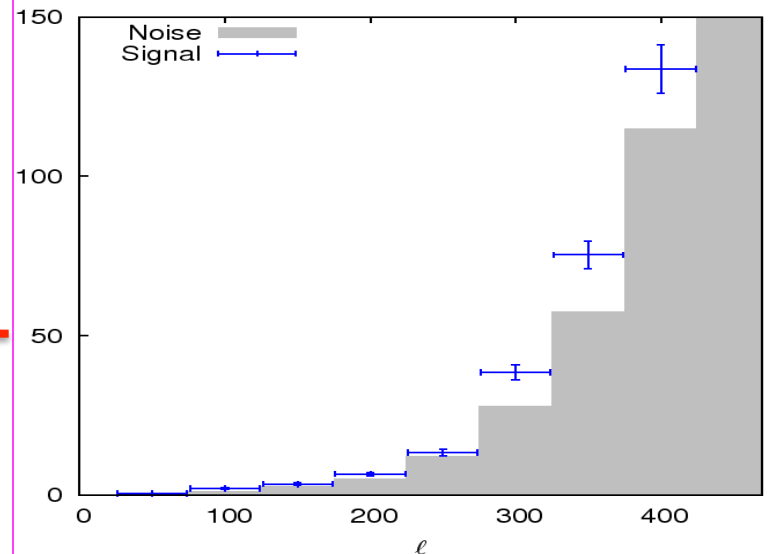
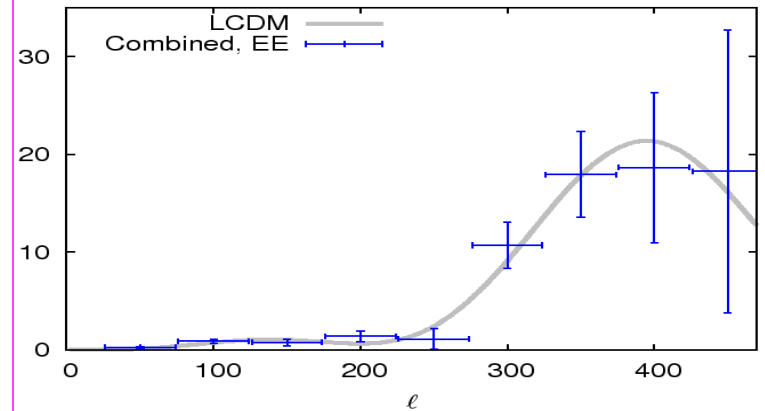


FIG. 3: Background subtracted Δt distributions and asymmetries for events with good tags ($r > 0.5$) for (a) $B^0 \rightarrow \eta' K^0$, (b) $B^0 \rightarrow \phi K^0$, (c) $B^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0 K_S^0$ and (d) $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$. In the asymmetry plots, solid curves show the fit results; dashed curves show the SM expectation from our $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$ measurement.



ノイズはどこに？

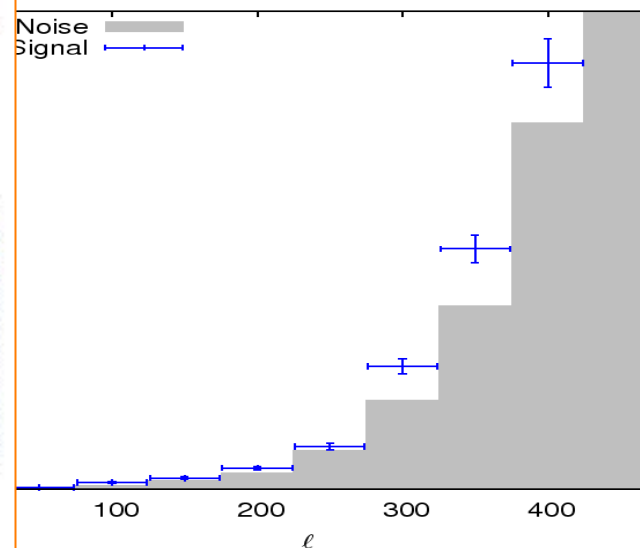
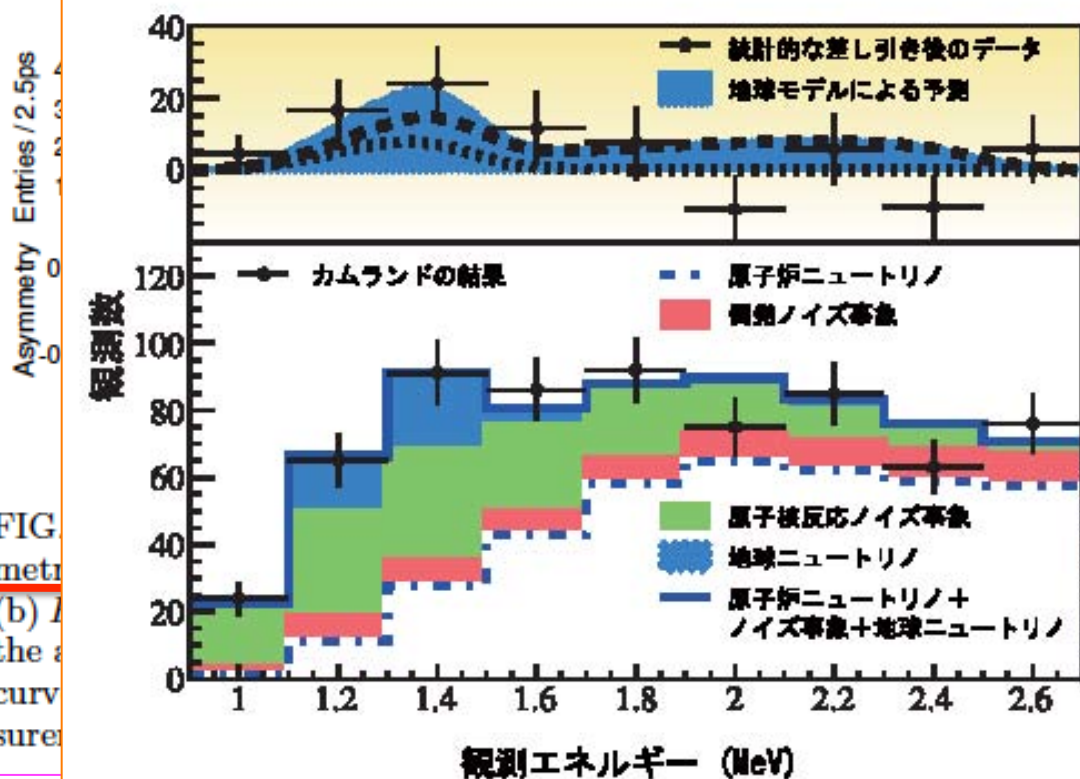
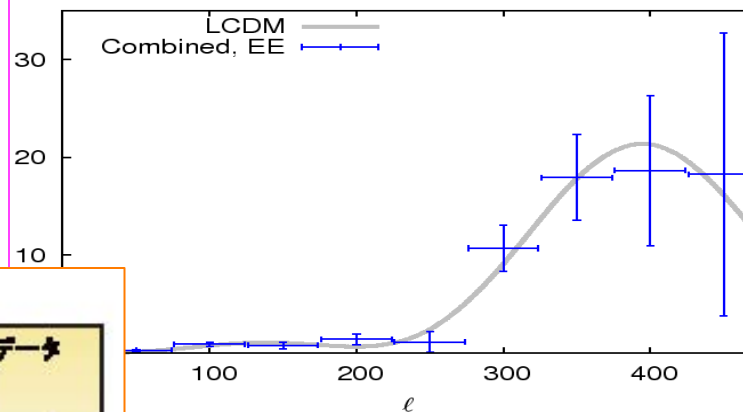
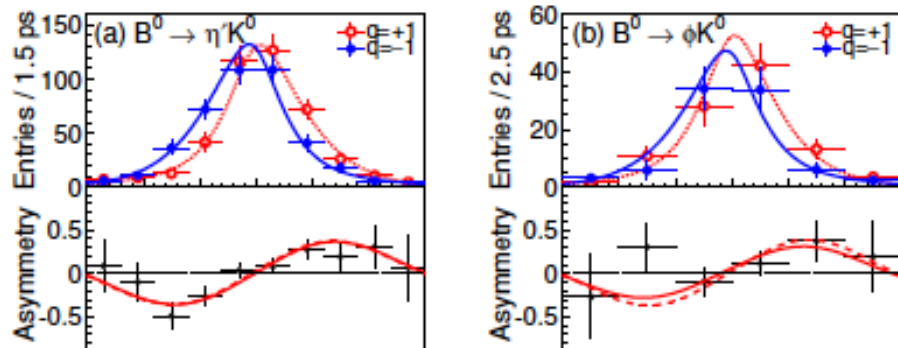
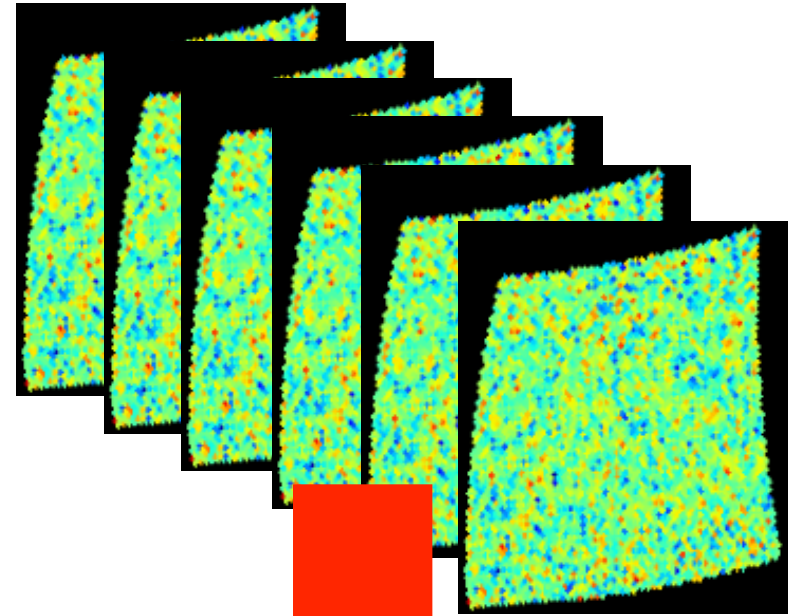
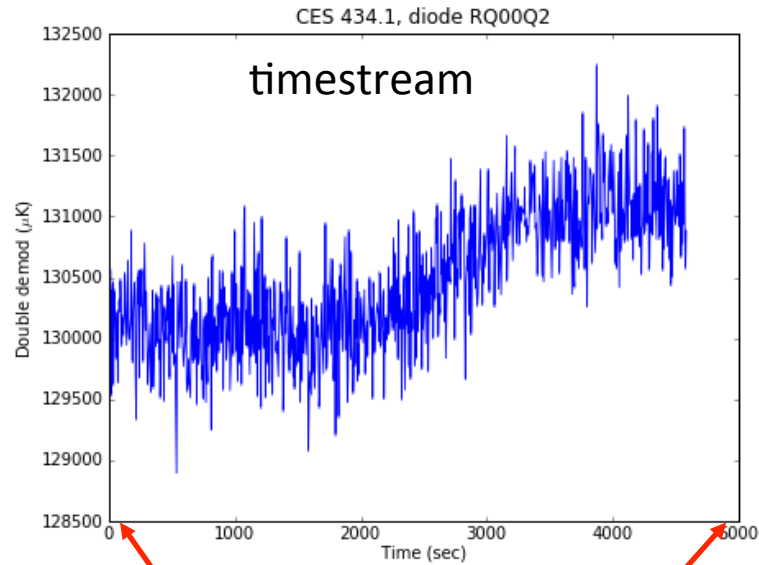
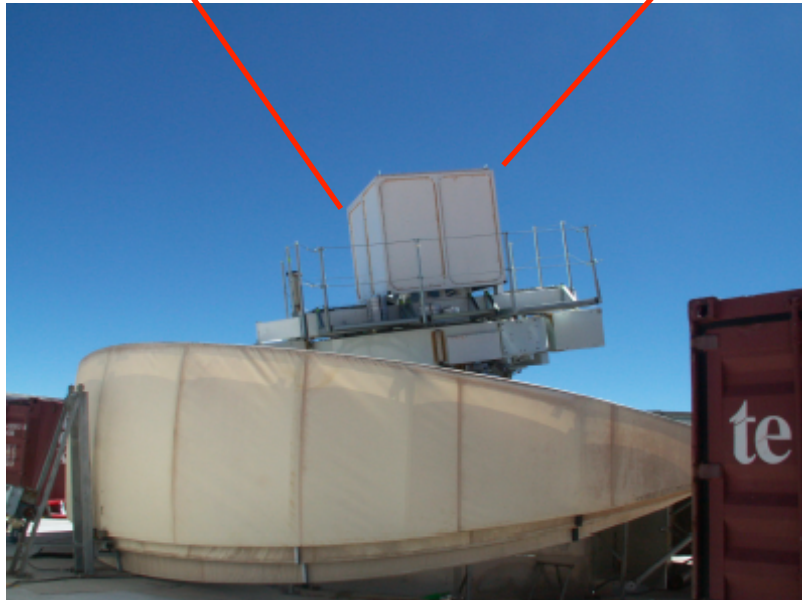
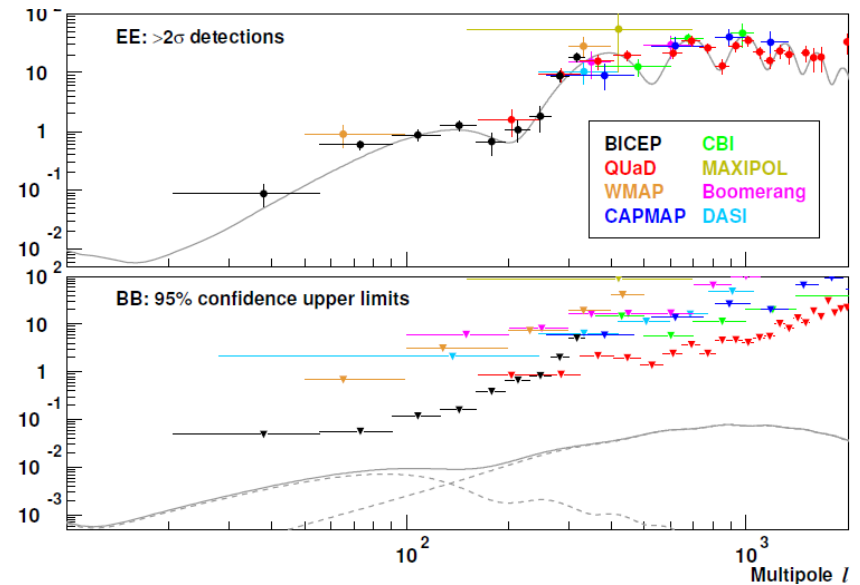


FIG. 1. (a) Asymmetry entries (ps) vs energy (MeV) for the $B^0 \rightarrow \eta K^0$ and $B^0 \rightarrow \phi K^0$ decays. (b) Asymmetry entries (ps) vs energy (MeV) for the $B^0 \rightarrow \eta K^0$ and $B^0 \rightarrow \phi K^0$ decays.

QUIET実験での観測・データ解析の概要

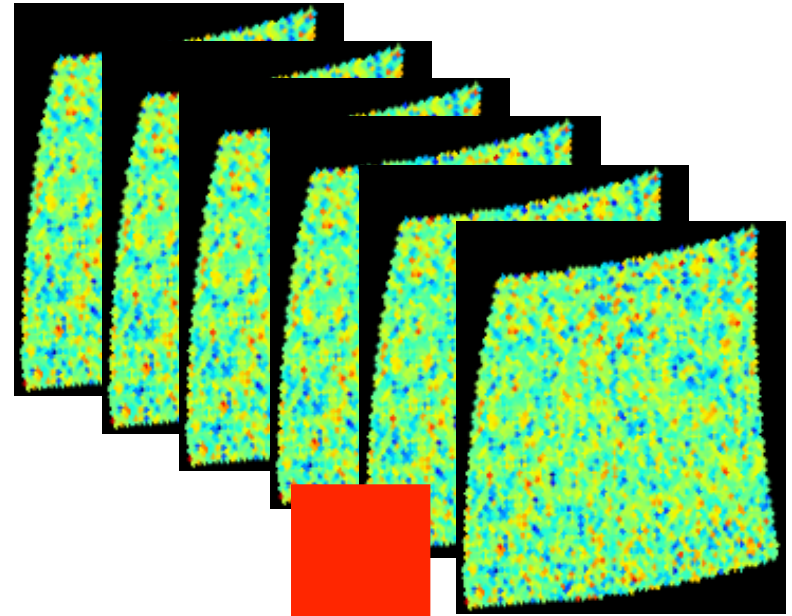
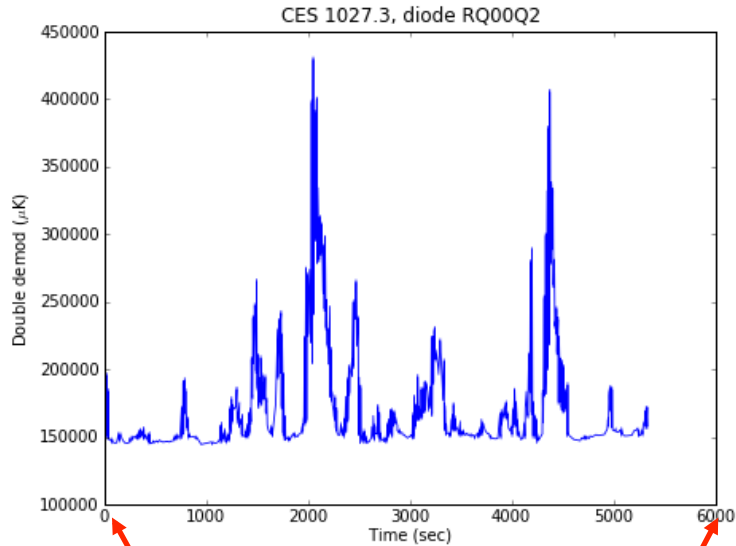


power spectrum

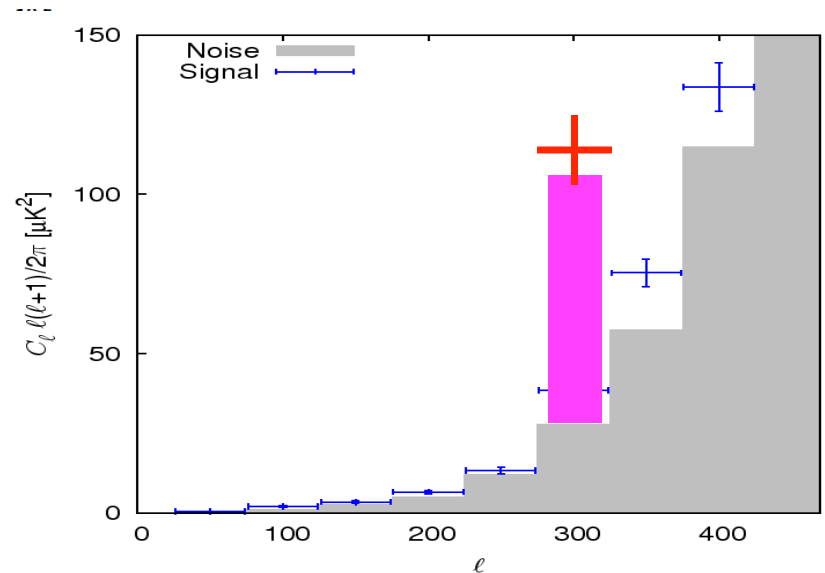


QUIET実験での観測・データ解析の概要

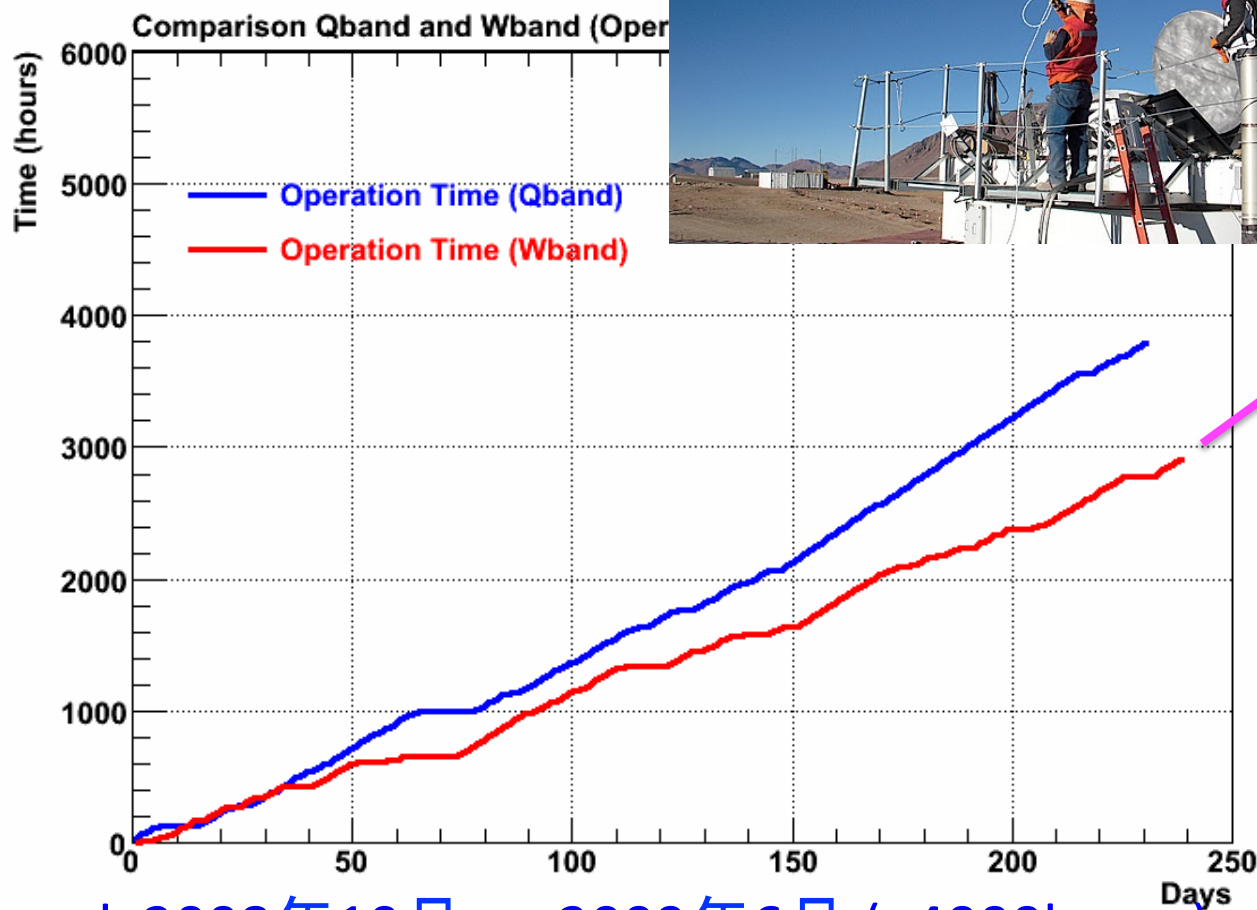
timestream



power spectrum



観



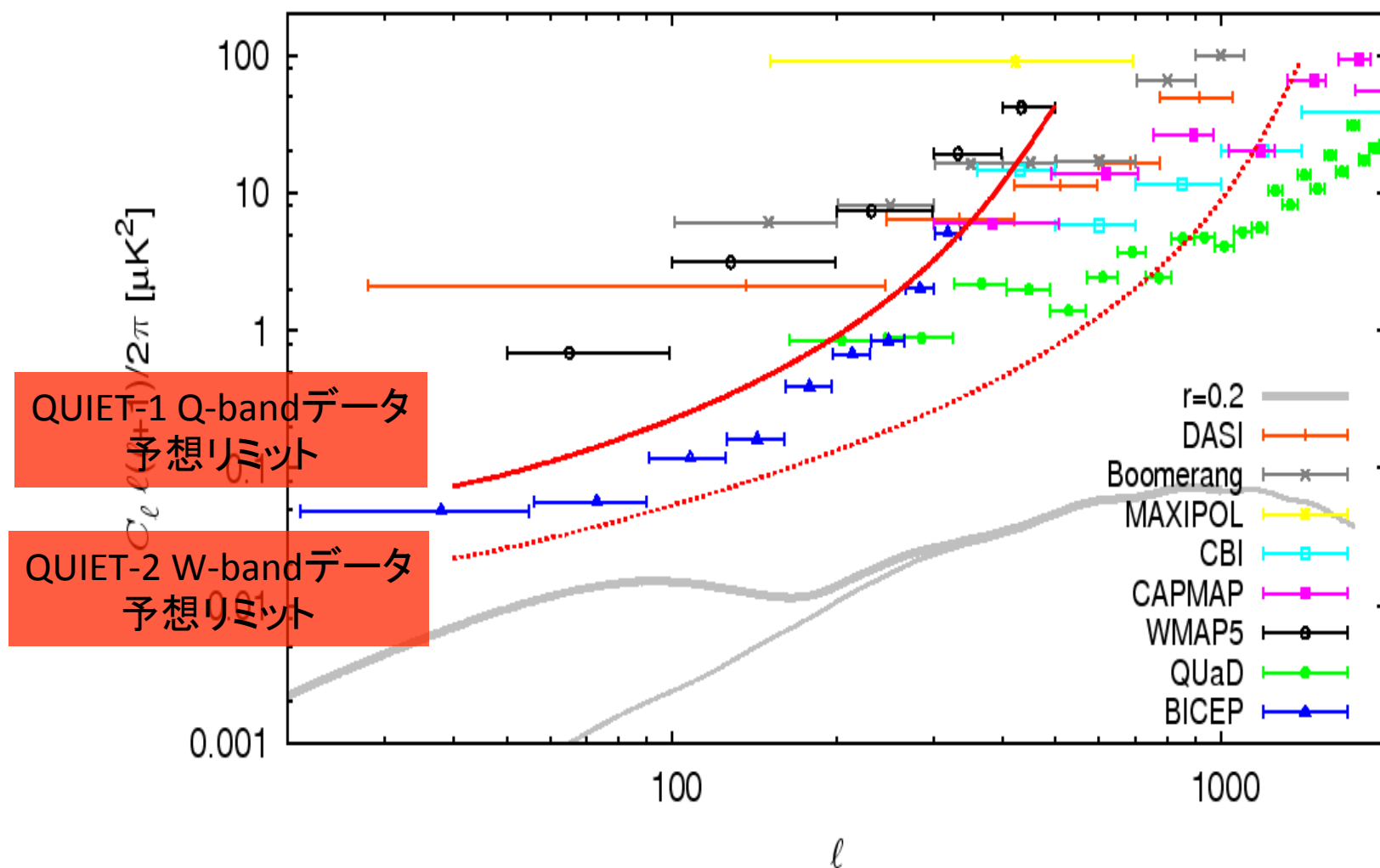
W-band

- 現在～3000時間取得
- 12月までに～6000時間

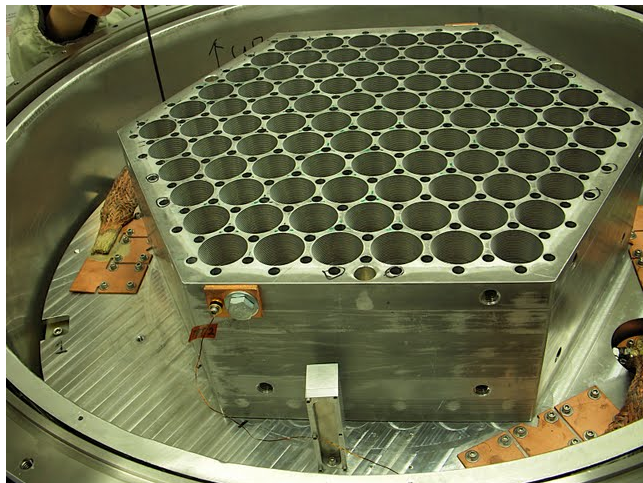
Q-band 2008年10月 ～ 2009年6月 (～4000hours)

W-band 2009年 8月 ～

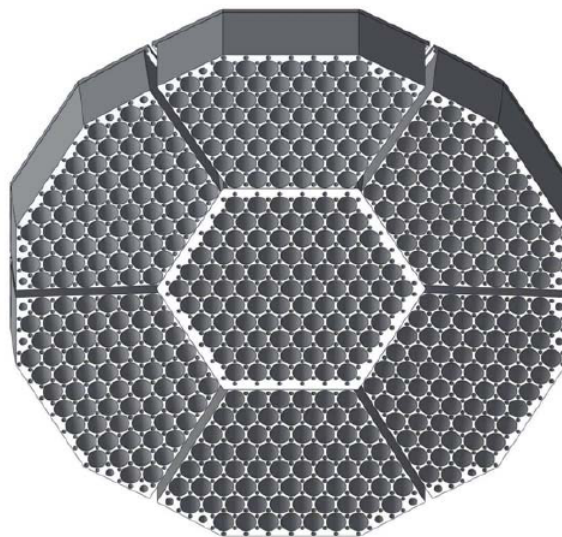
探索感度 QUIET phase1 & phase2



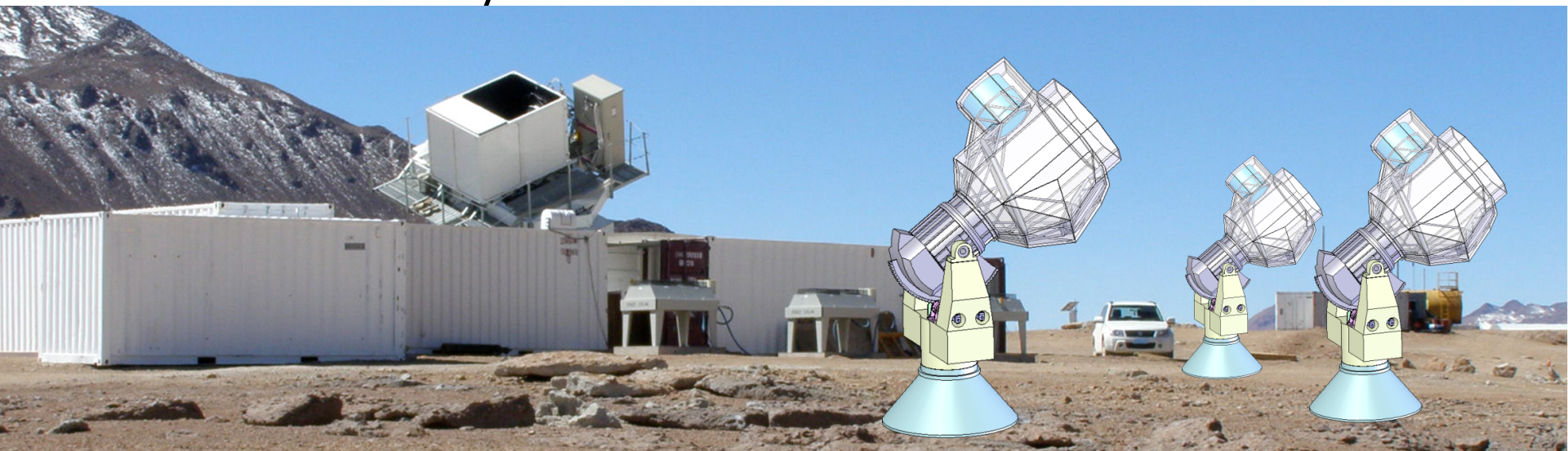
QUIET Phase-II (x16 scale up!)



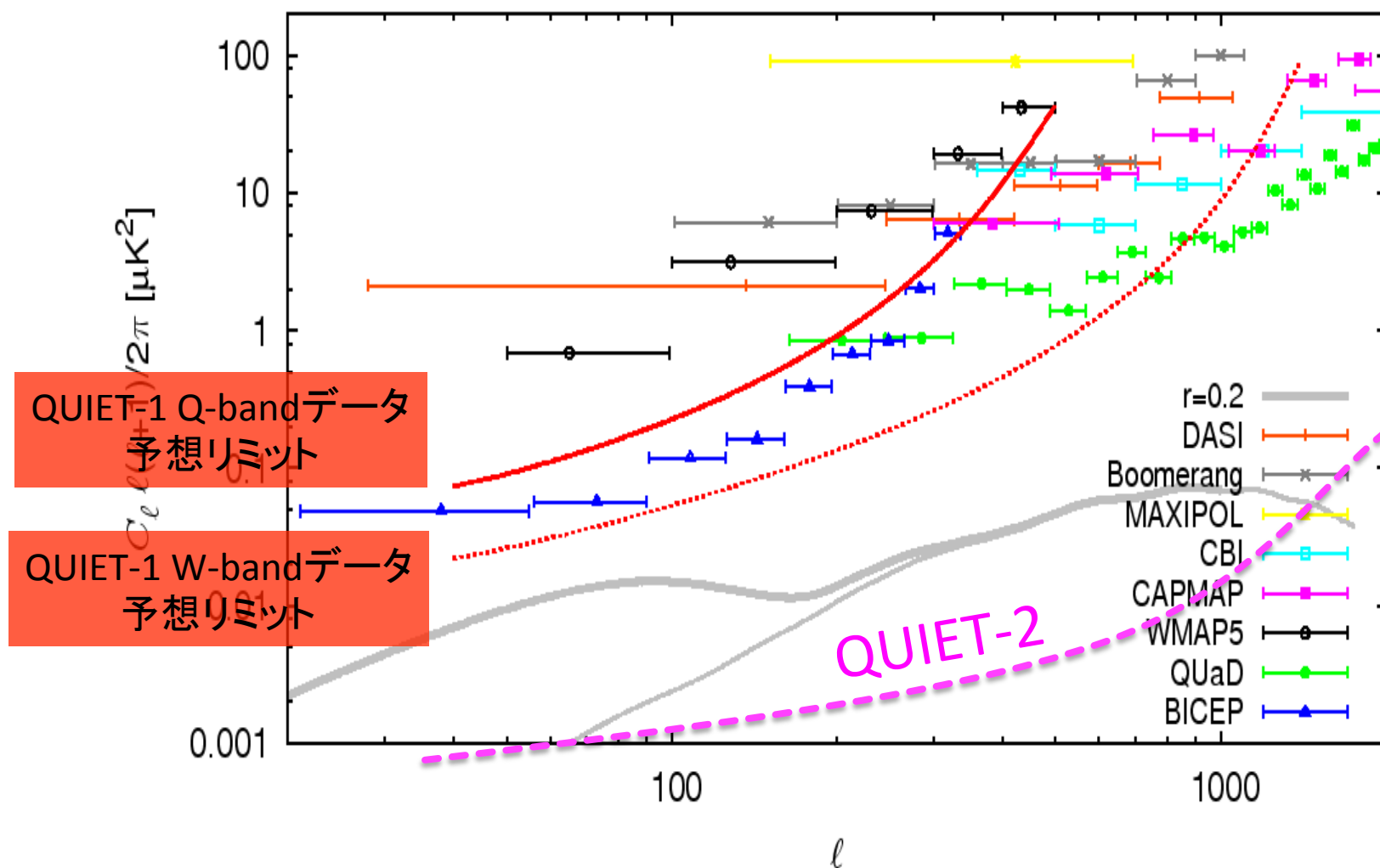
Phase-I W-band
91-element array



499-element
array (x3)

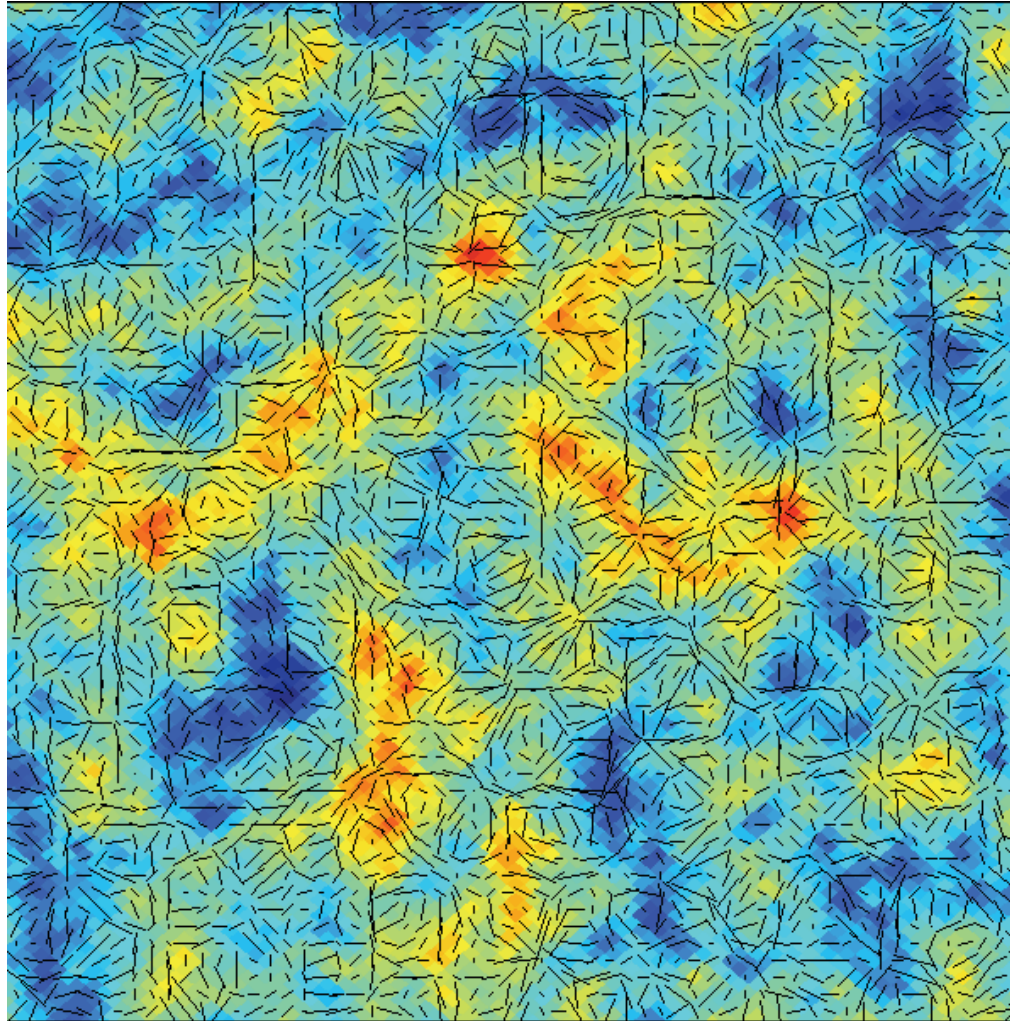


探索感度 QUIET phase1 & phase2



Simulated sky with $T/S=0.2$

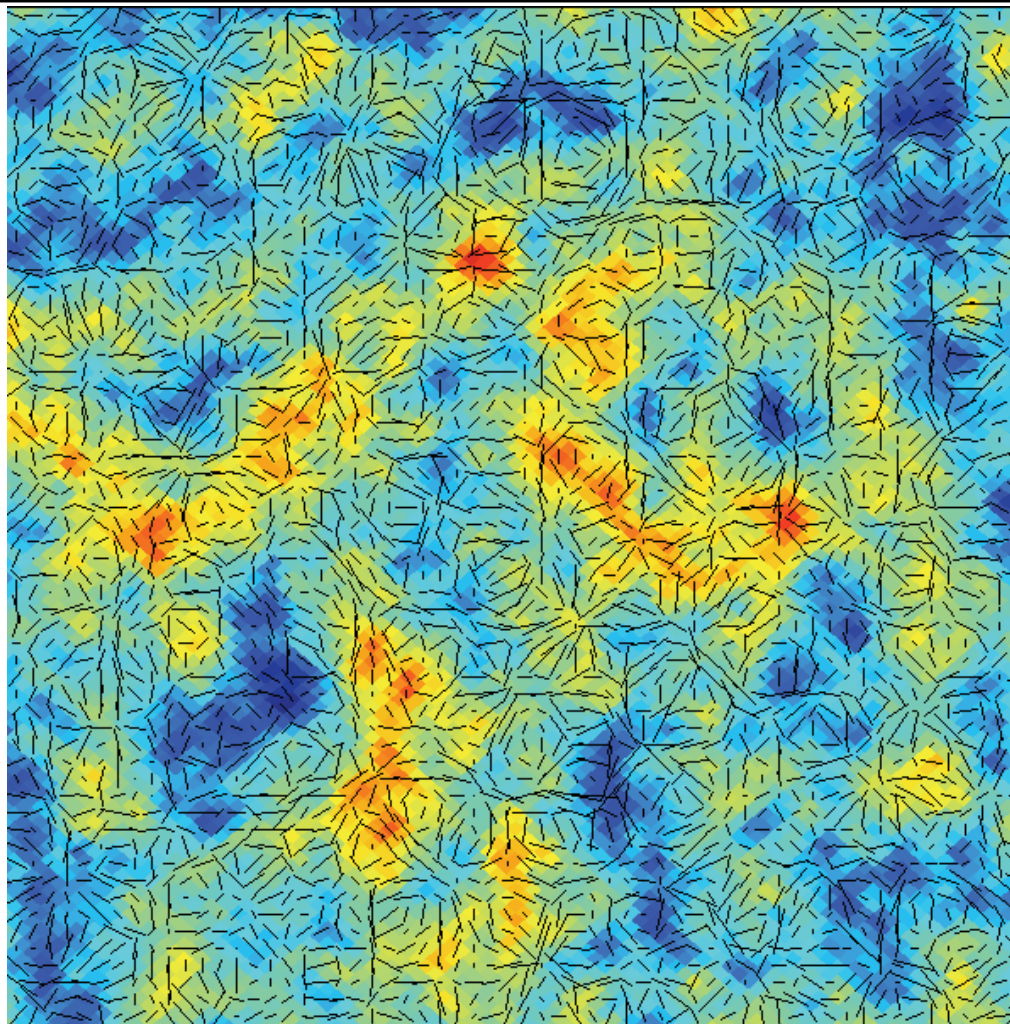
10 deg by 10 deg field



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

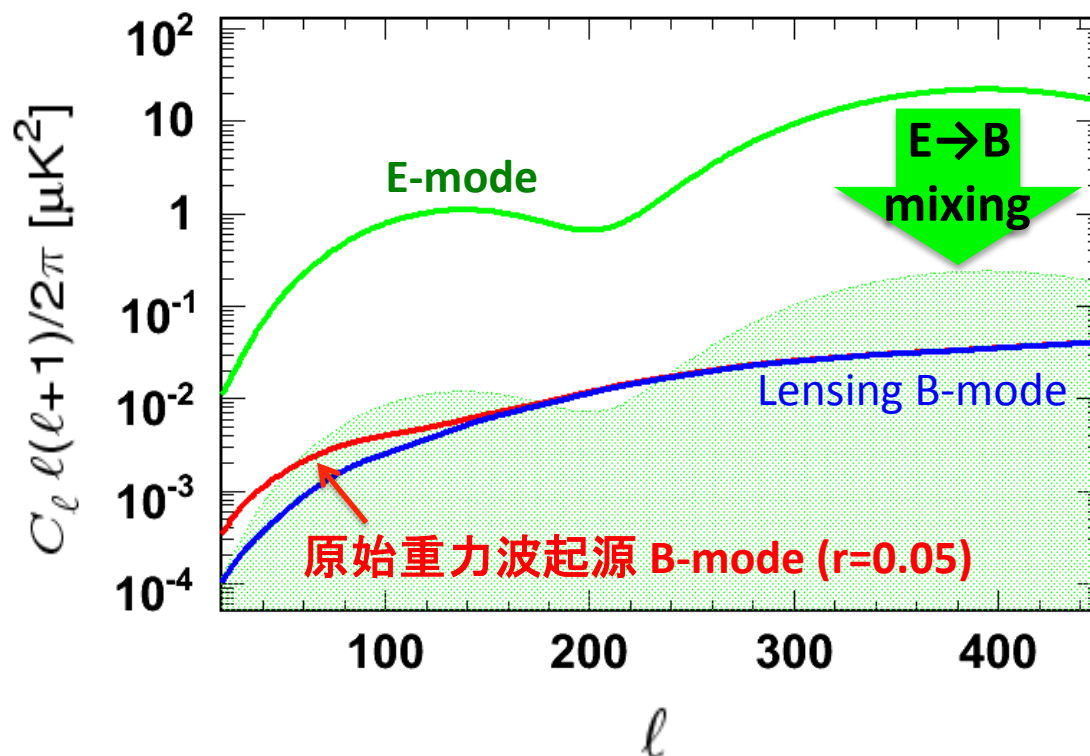
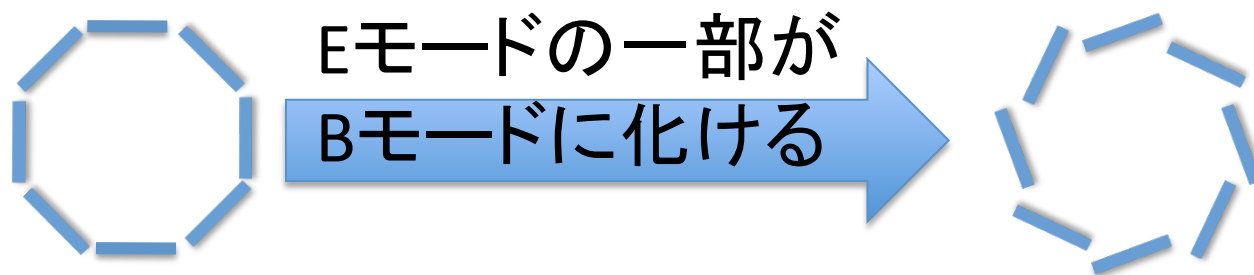


Bモード~~無~~しのsimulation map

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すると...



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

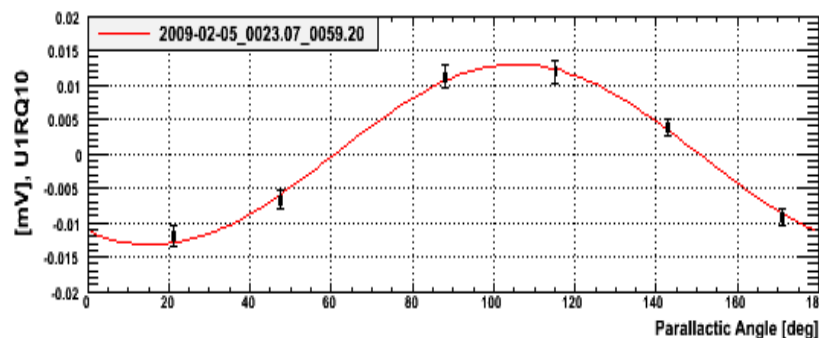
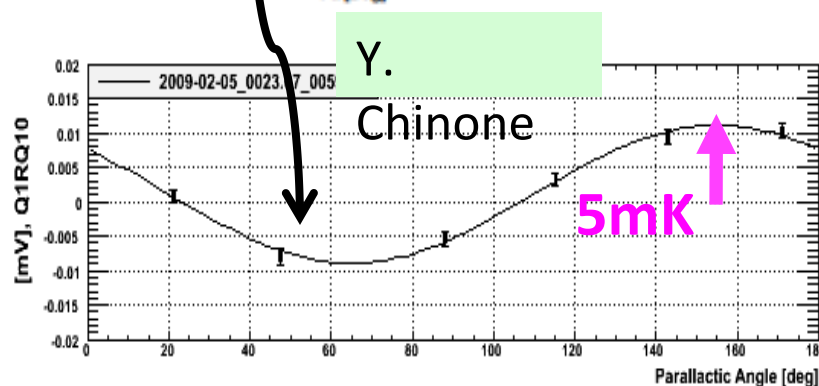
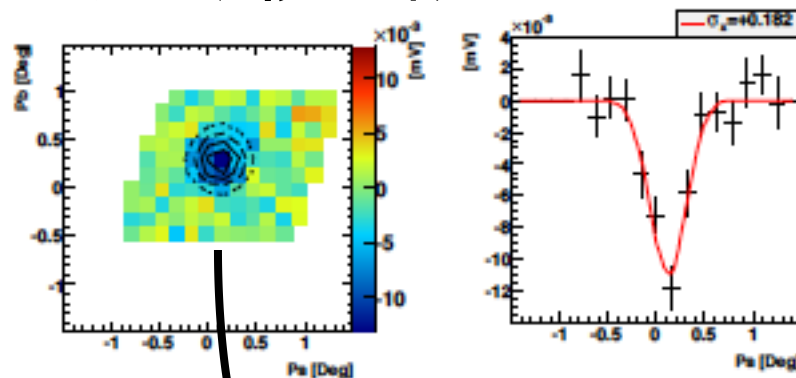
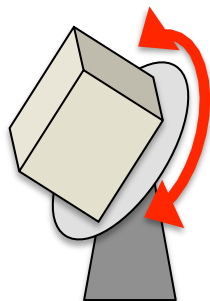
TauAを使って1つの検出器を 空の座標系での絶対角度を高精度で較正 一年がかりで、統計誤差0.1°

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



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

TauA

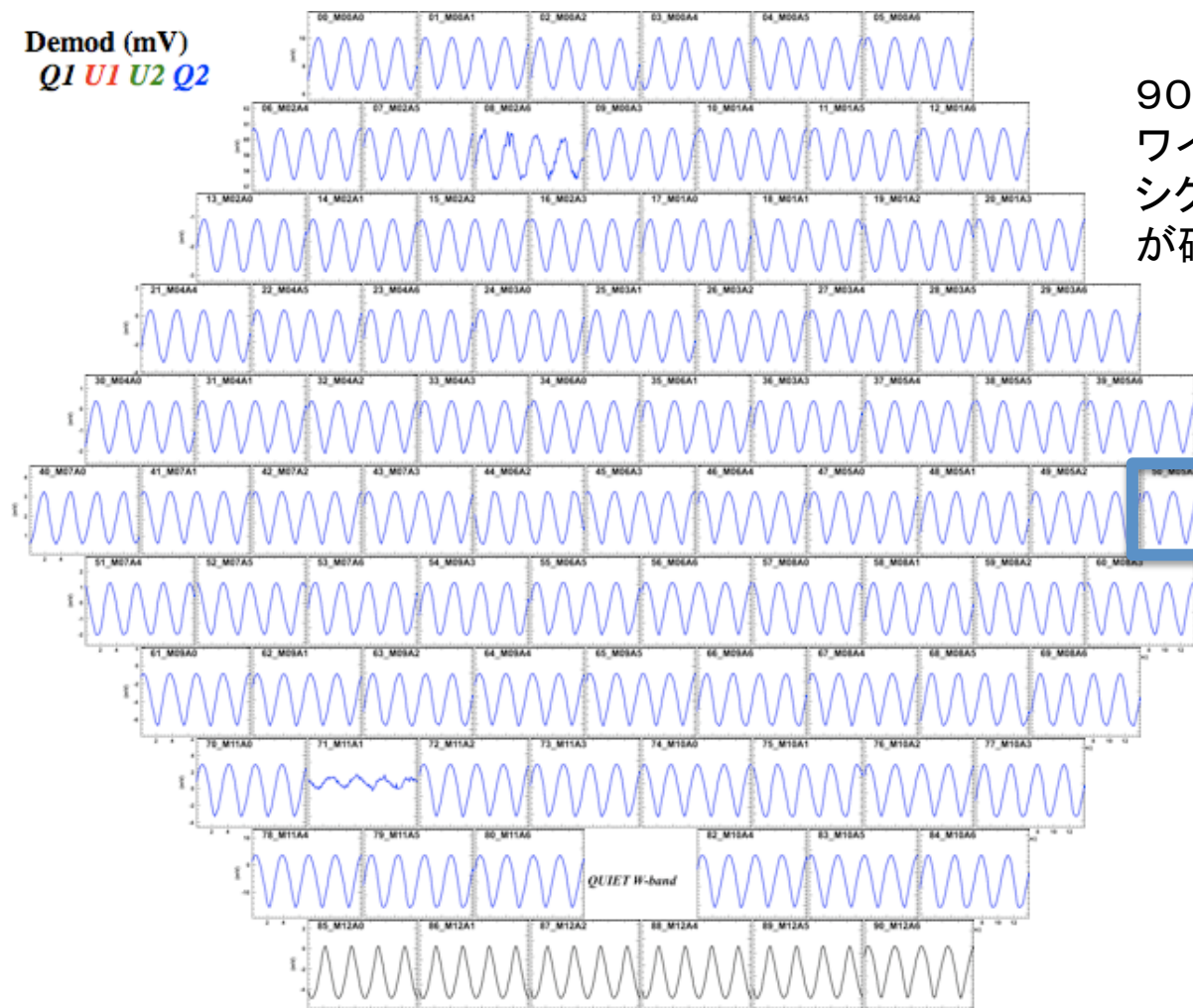


検出器間の角度の較正は “疎密な”ワイヤーグリッドで実現！ 較正精度 $0.1^{\circ}/30\text{秒}$



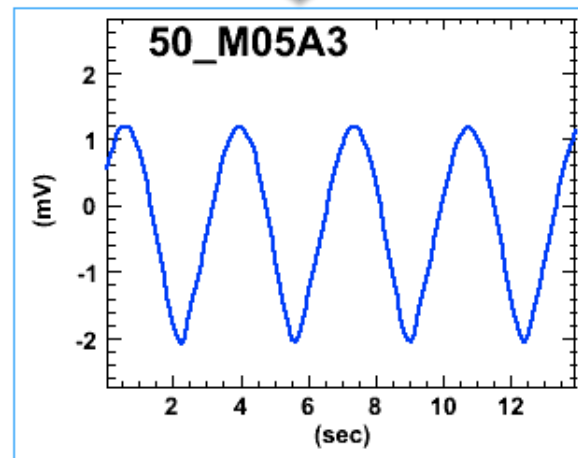
試作ワイヤーグリッドによる偏光シグナル

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



まとめ

QUIET実験は

- 地上からCMB偏光を観測する
- 原始重力波起源のB-modeがターゲット

- 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至らない

- Phase-II:

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)
Bモードの世界初観測にとどく有力な実験

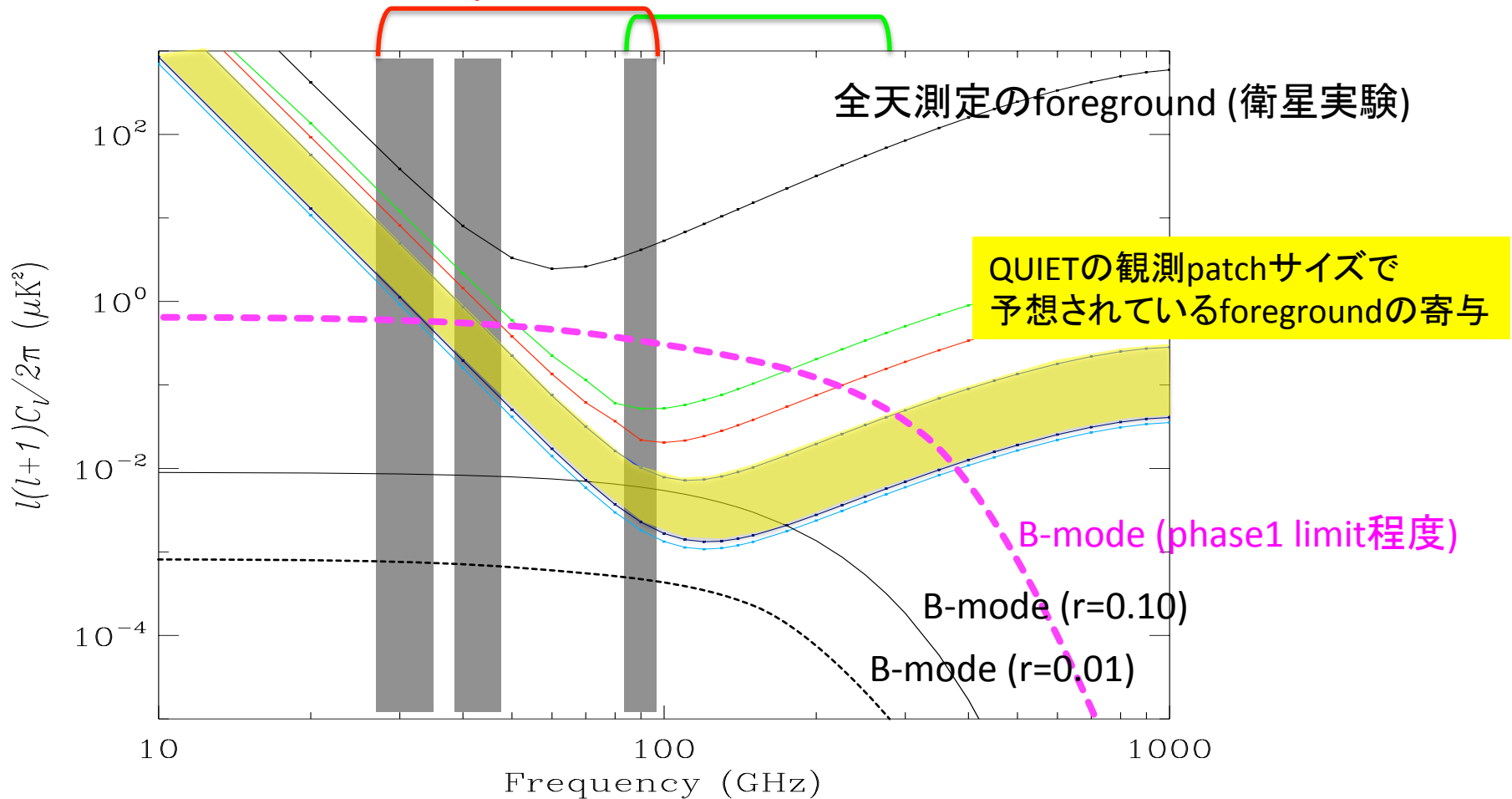
☆ onlineで復調するテクニックはHEPのセンスに近い

☆ 装置の較正 地下ニュートリノ実験と近い感じ

☆ チャンネル数 数十個 → 数千個 HEP的なDAQセンスが必要

Foreground (前景の銀河等の影響)

QUIET PolarBeaR, ABS

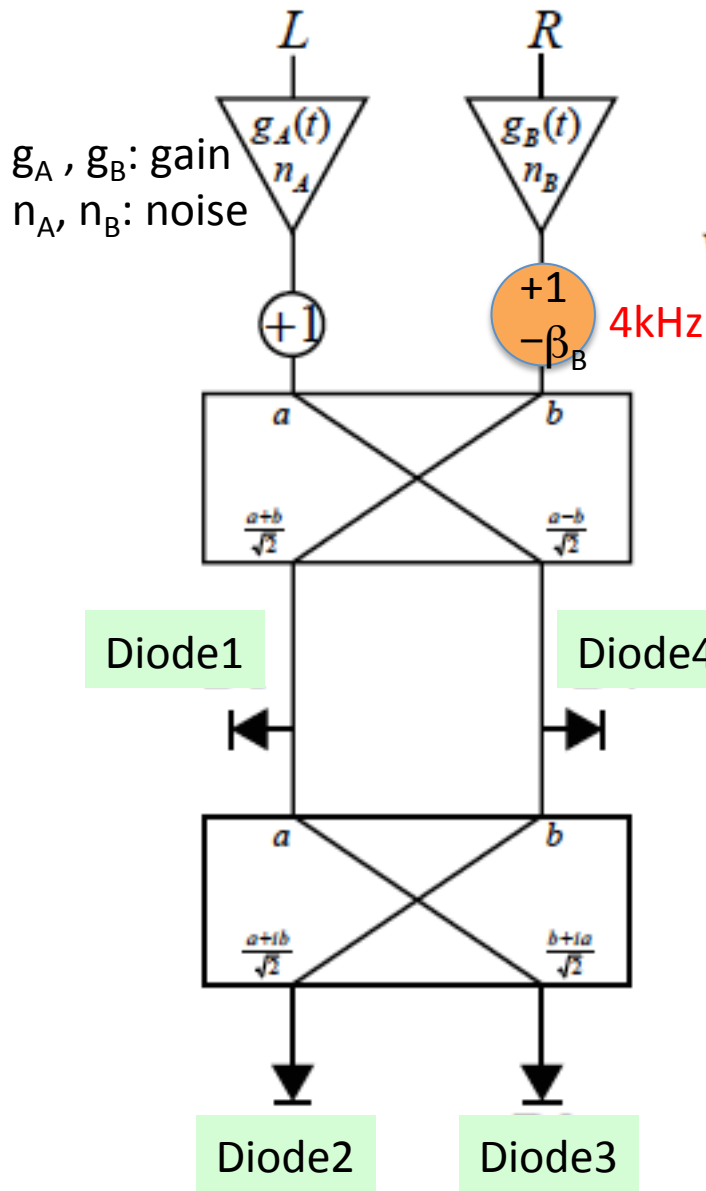


- まだ見ぬ、foregroundの寄与。Phase2の感度になると、その寄与がvisibleになる(と言われている)
もし、この寄与が深刻になった時のために、phase2では
- 2つの低い周波数帯(Q, Ka)のレシーバーでW-bandでのforegroundの寄与を見積もる
 - 他の高い周波数帯の実験(PolarBeaR, ABS)とのじalliance, i.e.同じpatch(場所)を見て情報交換

素粒子実験とちょっと違うところ

- トリガーがない
- Bモードの探索感度は統計に比例して向上する($\sqrt{N}$ でない)
 - 観測時間
 - 検出器数
 - band width

再び数式で書いてみる



現実のswitchingはきれいに ± 1 にならない

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

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

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

$$= \frac{1 - \beta_B^2}{4} g_B^2 I + \frac{1 - \beta_B^2}{2} g_B^2 n_B^2 + \frac{1 + \beta_B}{2} g_A^2 g_B^2 Q$$

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

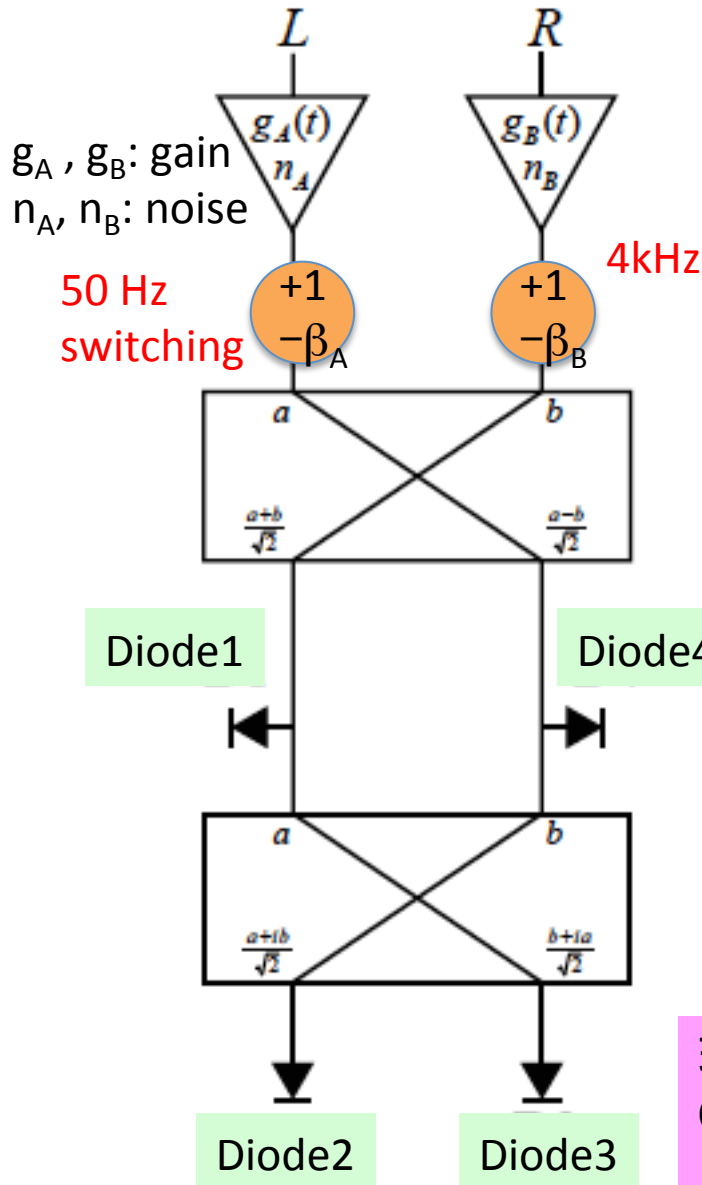
「引き算平均」

$$= \left\langle \frac{1 - \beta_B^2}{4} g_B^2 I \right\rangle + \left\langle \frac{1 - \beta_B^2}{2} g_B^2 n_B^2 \right\rangle + \left\langle \frac{1 + \beta_B}{2} g_A^2 g_B^2 Q \right\rangle$$

この微妙な残りが $\text{fknee} \sim 100\text{mHz}$ の $1/f$ noise
また、微妙に余分な offset も残る

反対側もphase switchingしてみると...

50Hz phase switchingがここで登場



「引き算平均」(demod)の100Hzデータのphaseが交互に変わる

$$D(+1, \pm) = \left\langle \frac{1 - \beta_B^2}{4} g_B^2 I \right\rangle + \left\langle \frac{1 - \beta_B^2}{2} g_B^2 n_B^2 \right\rangle + \left\langle \frac{1 + \beta_B}{2} g_A g_B^2 Q \right\rangle$$

$$D(-\beta_A, \pm) = \left\langle \frac{1 - \beta_B^2}{4} g_B^2 I \right\rangle + \left\langle \frac{1 - \beta_B^2}{2} g_B^2 n_B^2 \right\rangle - \left\langle \beta_A \frac{1 + \beta_B}{2} g_A g_B^2 Q \right\rangle$$

$$DD = \frac{D(+1, \pm) - D(-\beta_A, \pm)}{2}$$

$$= \left\langle \left(\frac{1 + \beta_A}{2} \right) \left(\frac{1 + \beta_B}{2} \right) g_A^2 g_B^2 Q \right\rangle$$

「引き算平均」の引き算
50 Hzデータ

「引き算平均の引き算」でノイズのResidualが消える
Demodulationのdemodulationなので
Double-demodulationと呼んでいる

といいつつfknee~10mHz程度の1/fが微妙に残る
(元はfknee~100mHzなので一桁improvement)

現在、Double-demodulationはoffline解析でおこなっている
Onlineでやってしまえばデータサイズを半分に出来る
QUIET-II ADC systemに期待されている新機能