

CMB偏光観測実験QUIET Phase-IIへ向けた ADCシステムの開発

石徹白晃治 (KEK素核研)

共同研究者:

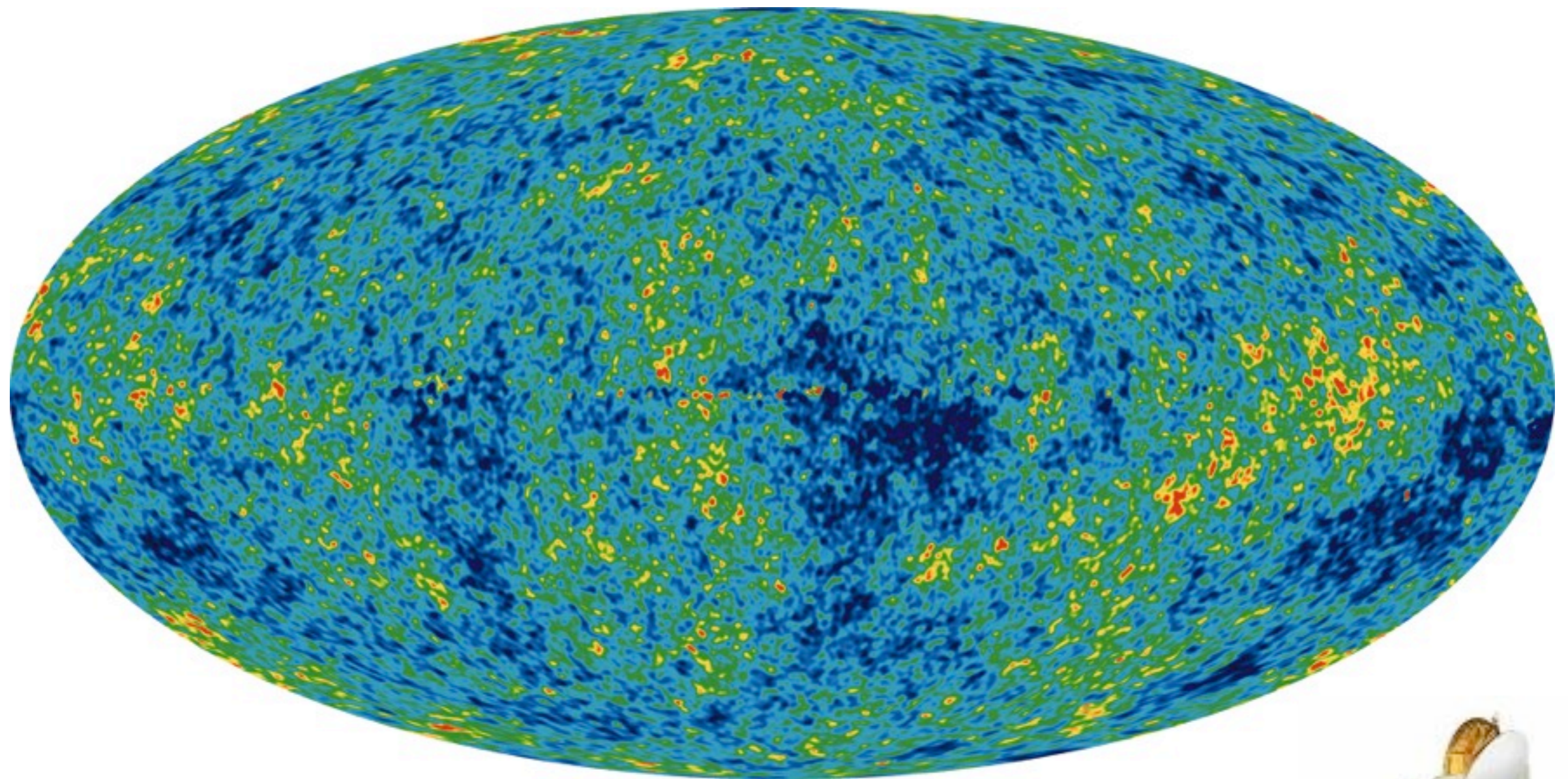
永井誠, 樋口岳雄, 池野正弘, 内田智久, 田島治,
田中真伸, 茅根裕司, 羽澄昌史, 長谷川雅也

QUIET実験が目指すもの

インフレーションの解明



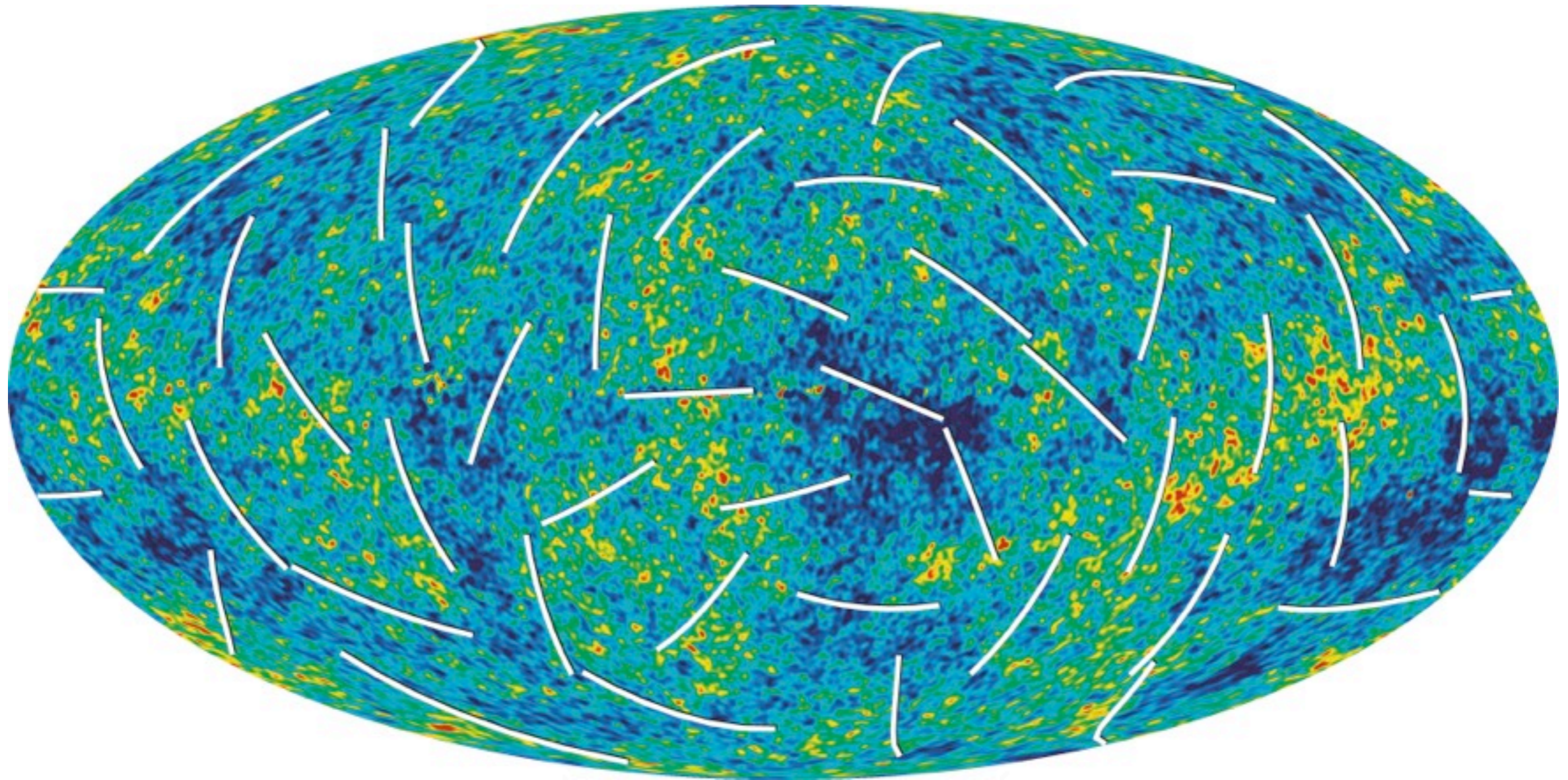
WMAPが捉えたCMBの温度ゆらぎ
インフレーションから宇宙晴れ上がりまでの情報が刻まれている



WMAP

CMBの偏光パターン

⇒ Bモード偏光を通じてインフレーションに迫る

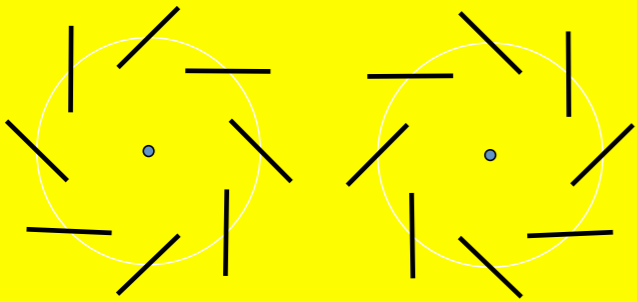


CMBの偏光パターン

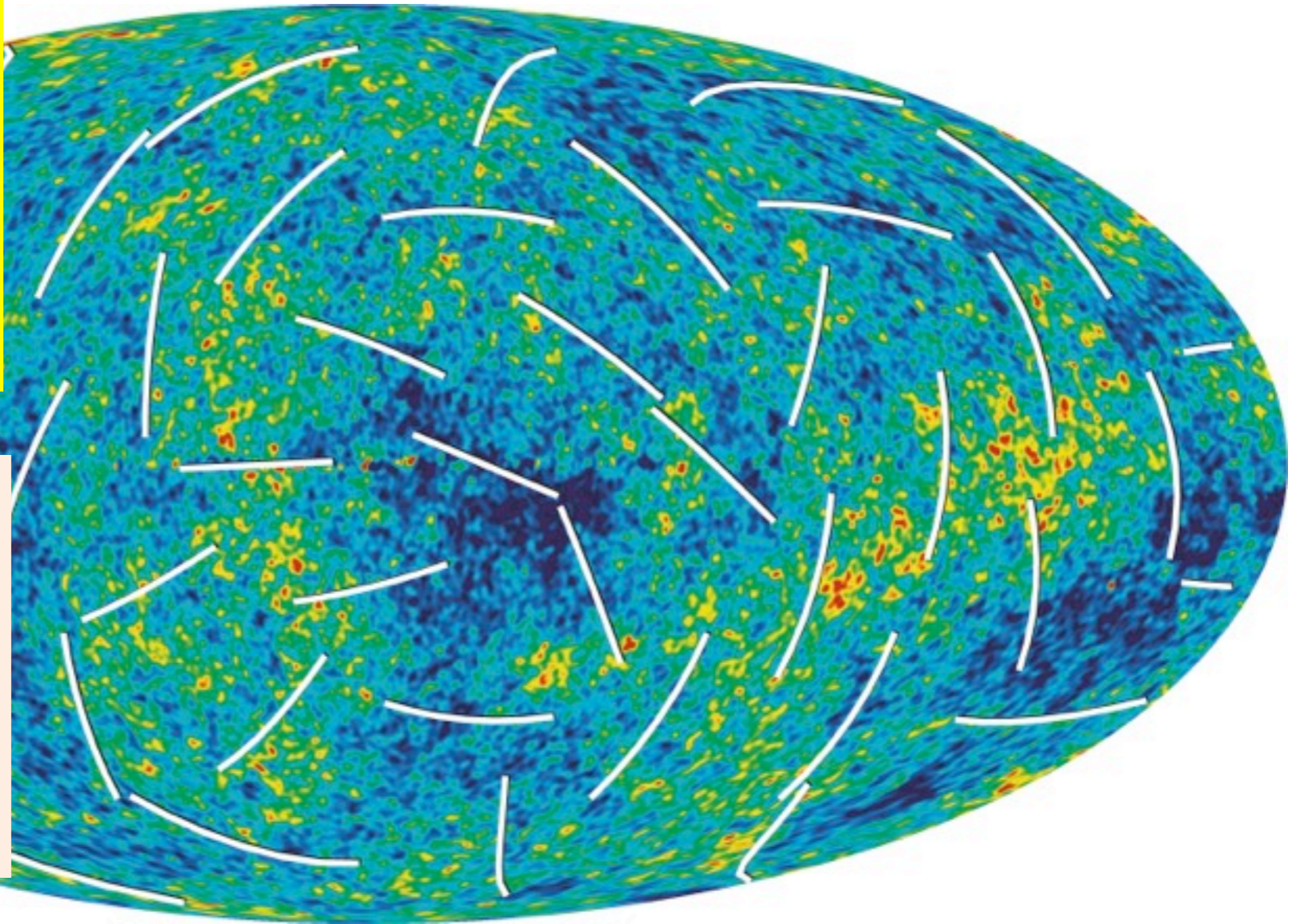
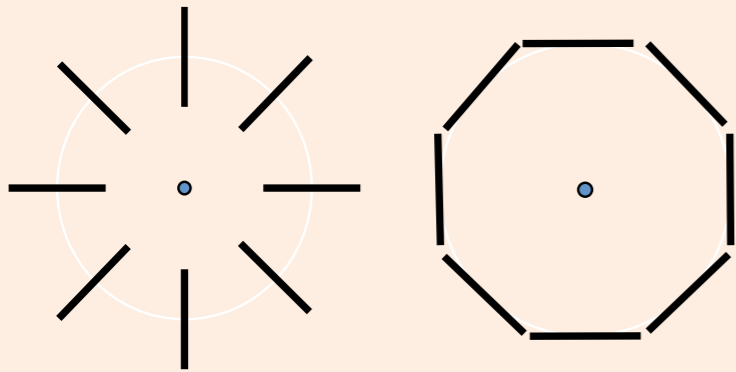
⇒ Bモード偏光を通じてインフレーションに迫る

Bモード (parity odd)

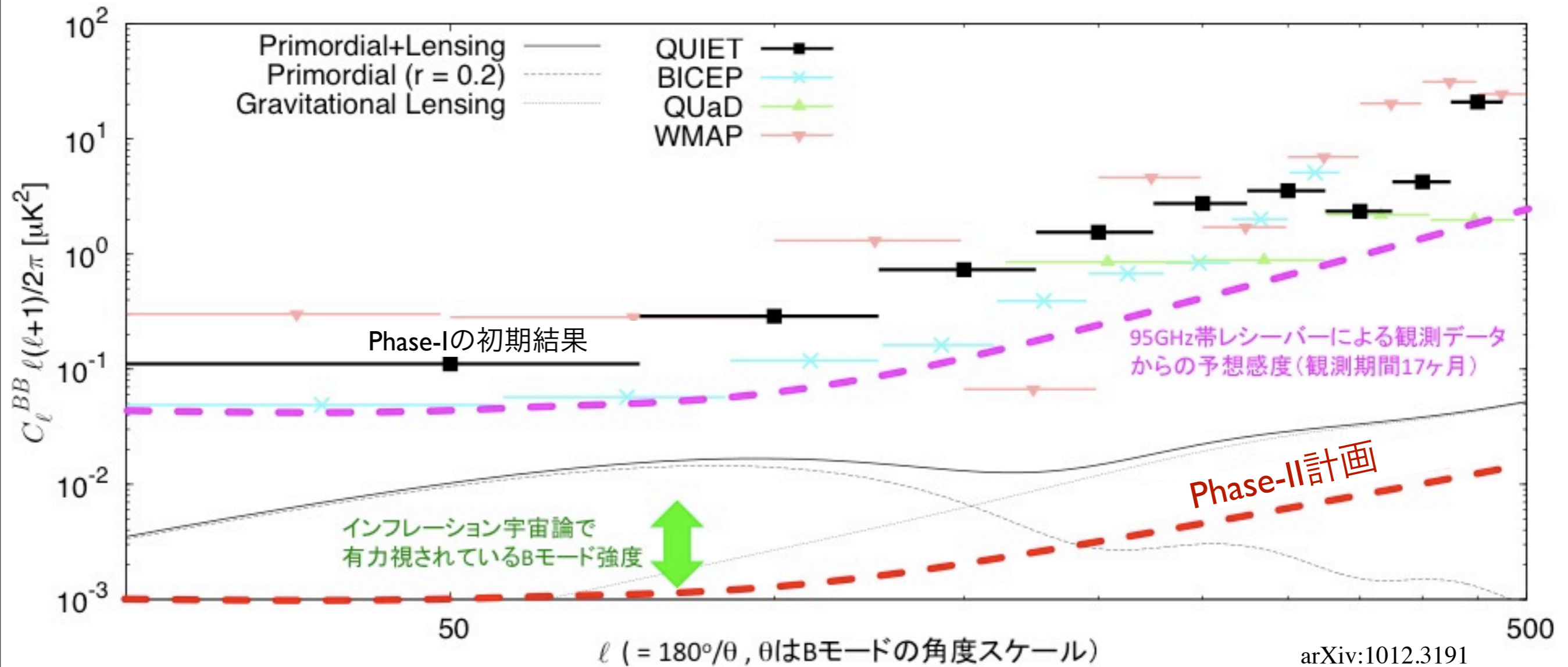
インフレーションの決定的証拠!!



Eモード (parity even)



Bモード探索の現状とQUIET



QUIET Phase-I 世界最高レベルでの上限値を報告

QUIET Phase-II インフレーションに起因するBモードを捉える

QUIET Phase-II

コンセプト

偏光検出器の低雑音化

偏光検出器の数を増やす (⇔ 統計を増やす)

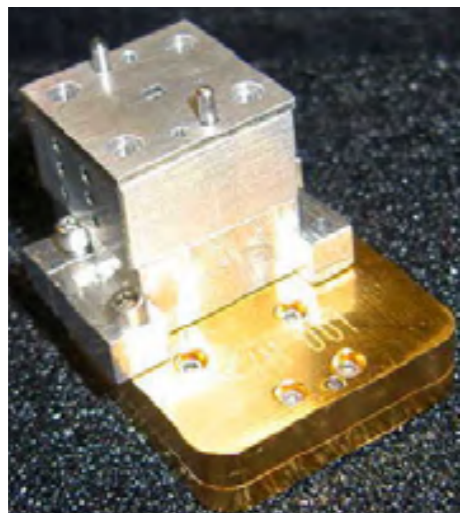
Phase-I (90 x 4ch) ⇒ Phase-II (500 x 4ch)

Phase-IIへ向けて: CH数の増加により信号読み出しのUpgradeが必要

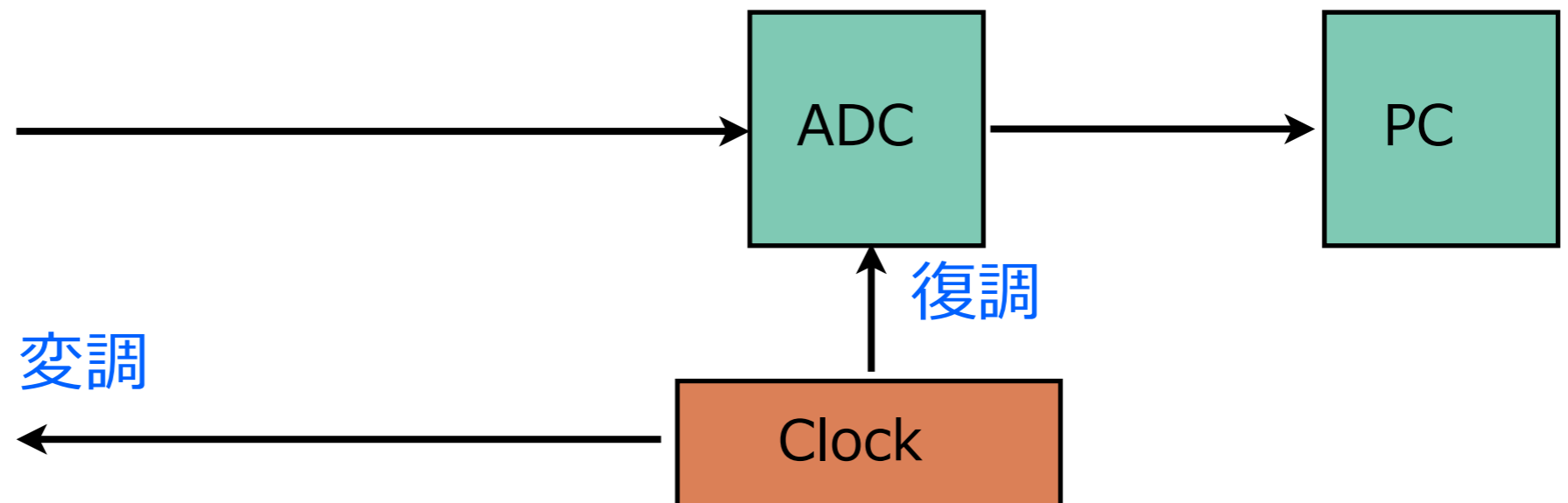
QUIET信号読み出し

全chのデータを取り続ける (イベントという概念は無い)

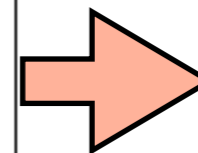
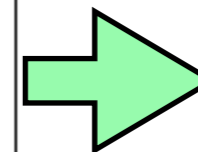
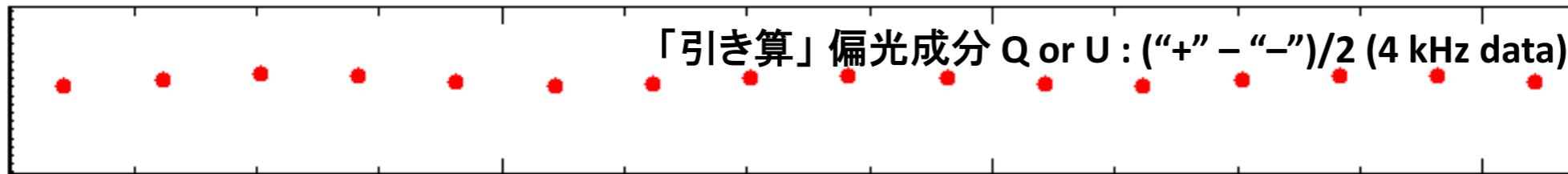
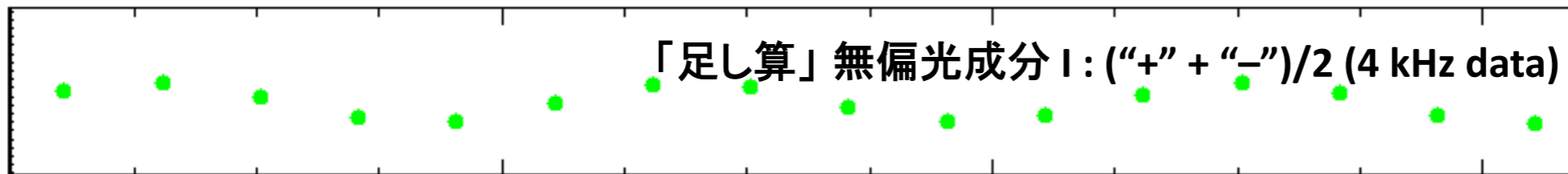
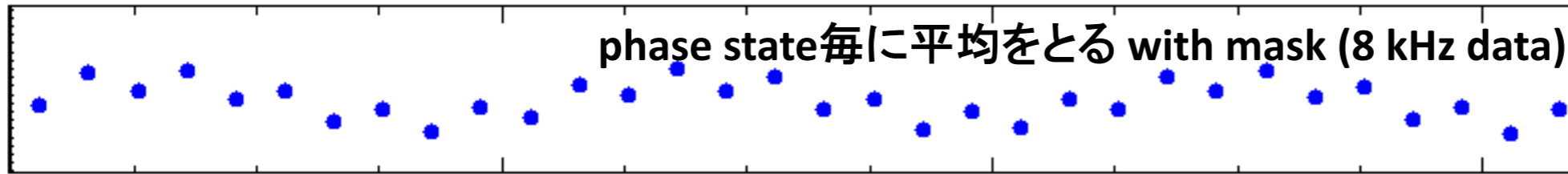
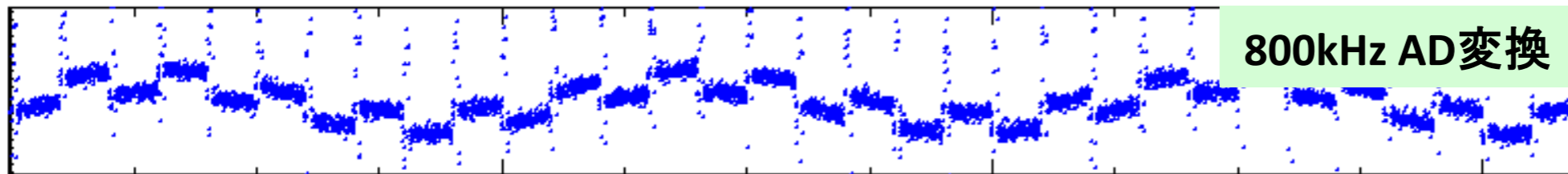
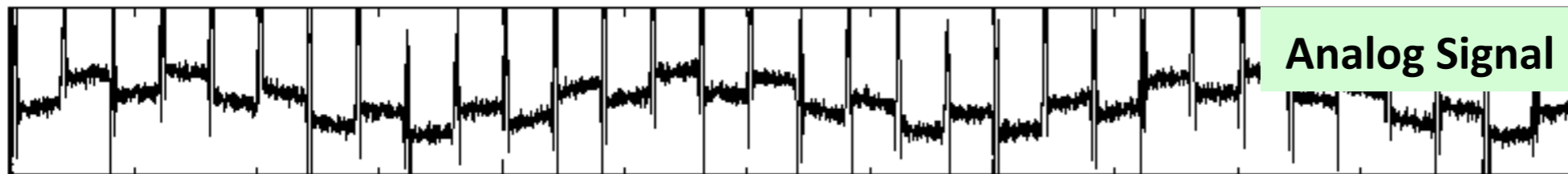
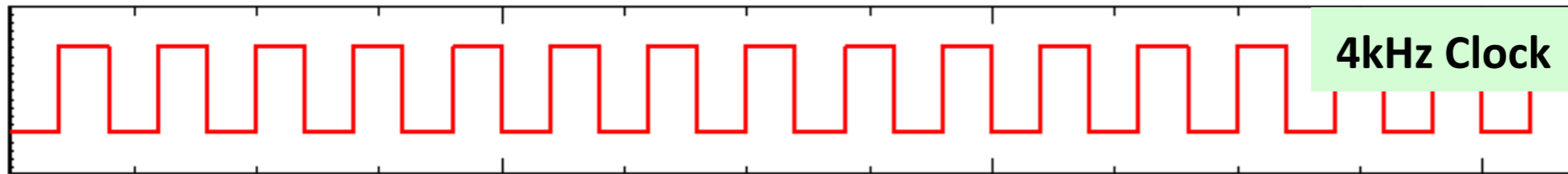
Clockに同期した信号の変調復調, 偏光と無偏光成分の同時測定



偏光検出器



信号復調の例



Down sample
100 Hz

ADCシステム

KEKではADCシステム (ADCとClock)を開発

仕様

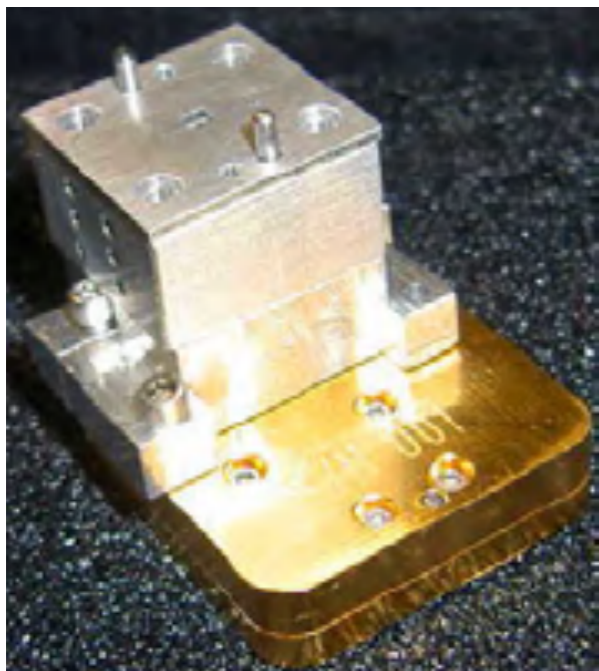
800 kHz, 18 bitで2,000個のアナログ信号をデジタル化する

FPGAでClock (4 kHz, 50Hz)に同期した復調とダウンサンプリング

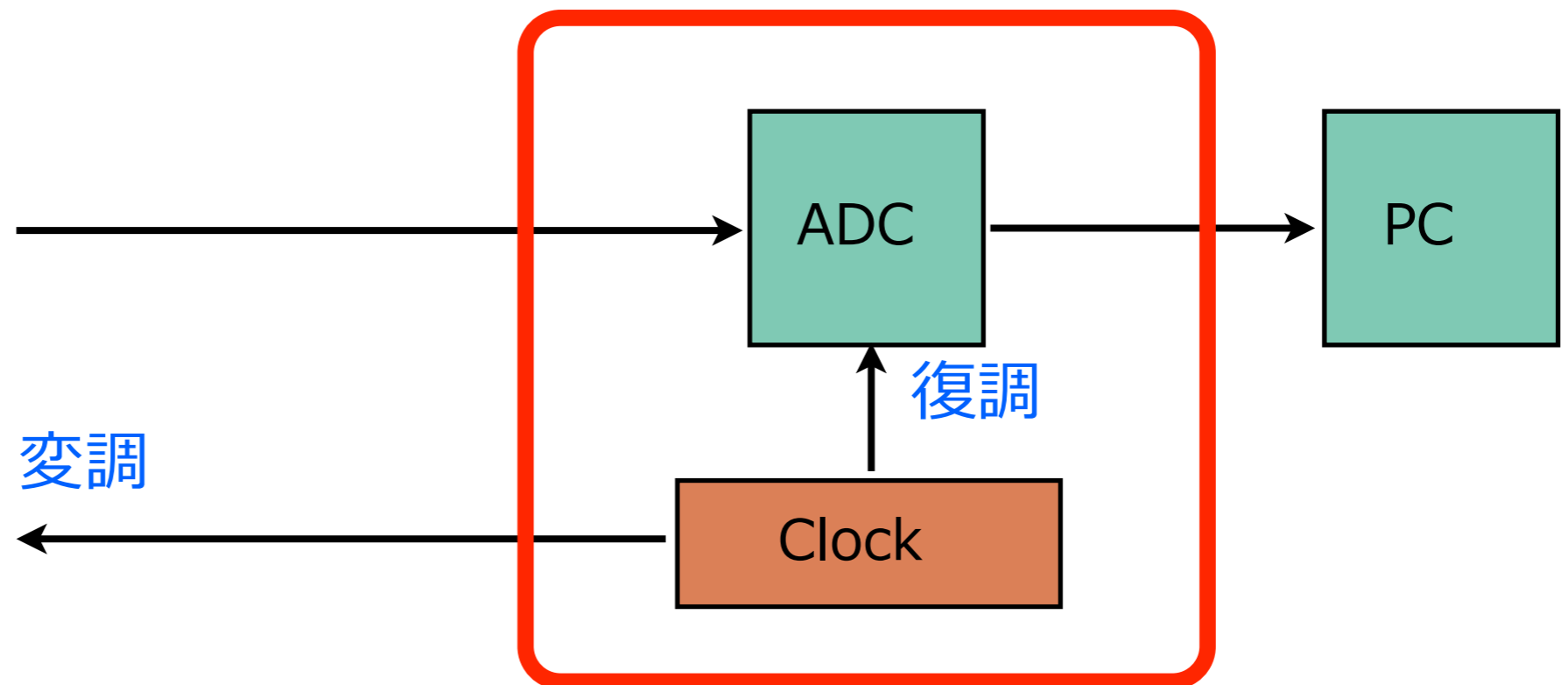
ADCは偏光検出器の雑音より1桁小さい: $< 0.1 \text{ mV/rHz}$ ($\sim 50 \mu\text{K/rHz}$)

CHクロストーク: 無偏光成分が偽の偽偏光を作らない: $< 100 \text{ dB}$

データ生成速度 $\sim 250 \text{ GB/day}$

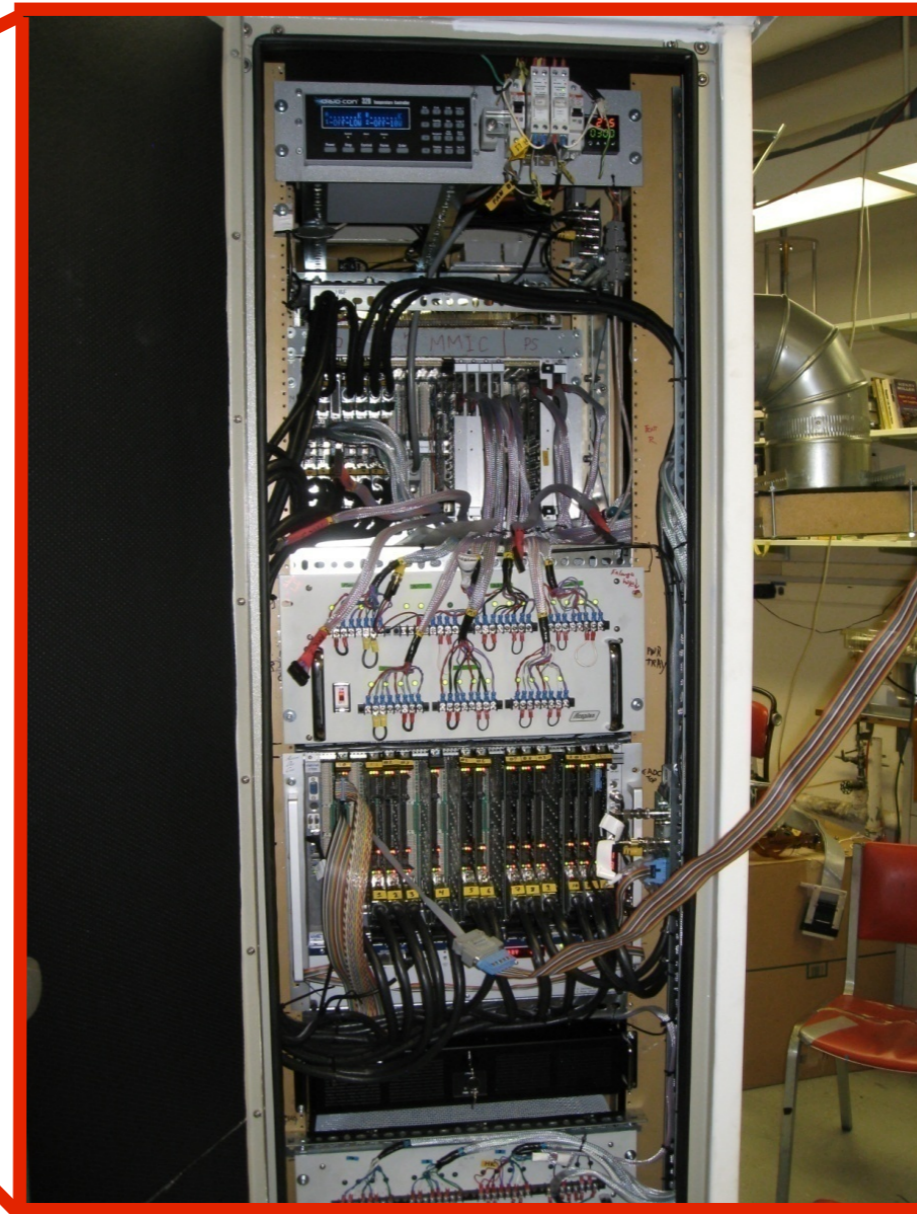
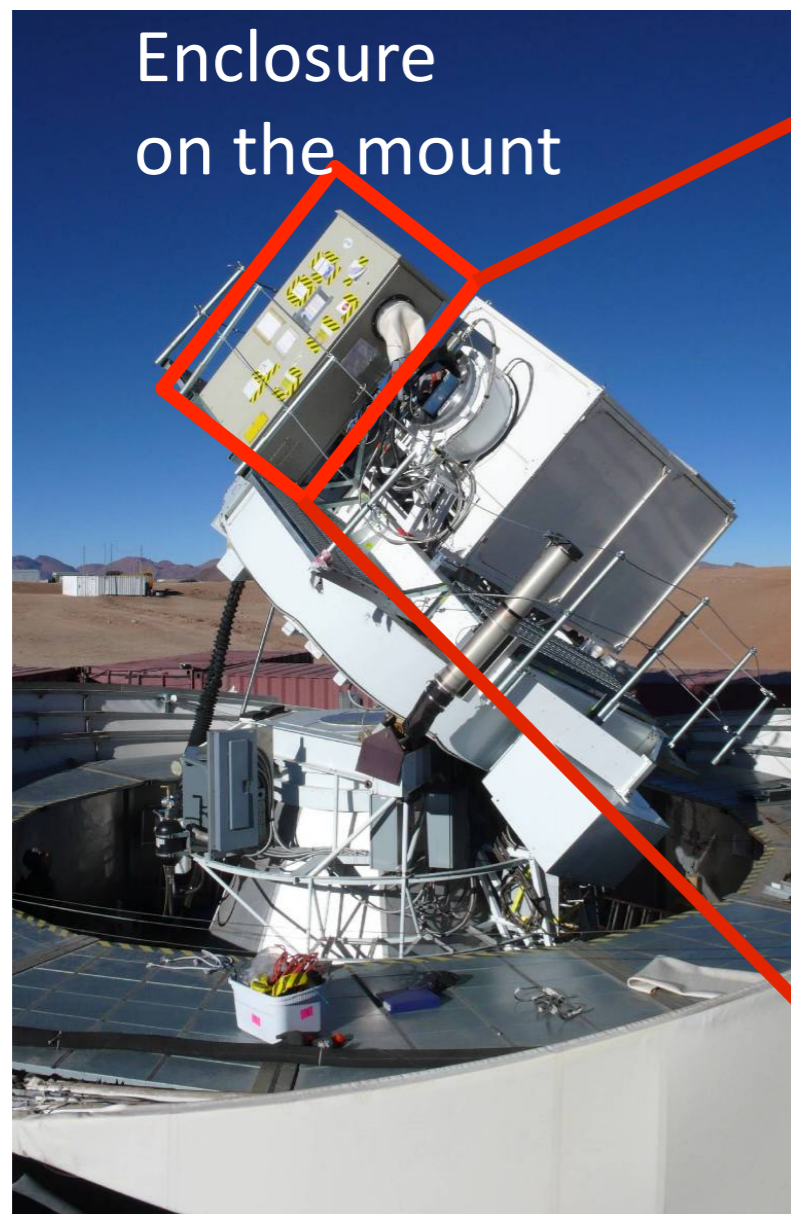


偏光検出器



設置場所がテレスコープの上

スペースが限られている中CH数が増えるのでよりコンパクトにしたい
ぶんぶん振り回される



QUIET-II ADCシステム

コンパクトでスケールラブルなシステムである必要がある

方法

高密度なADCボード (VME6Uサイズで64個のADC)

Master Clockの導入

昨年10月くらいから設計開始

2月末に試作品がジーエヌディーから納品

SiTCPの導入

New ADC board

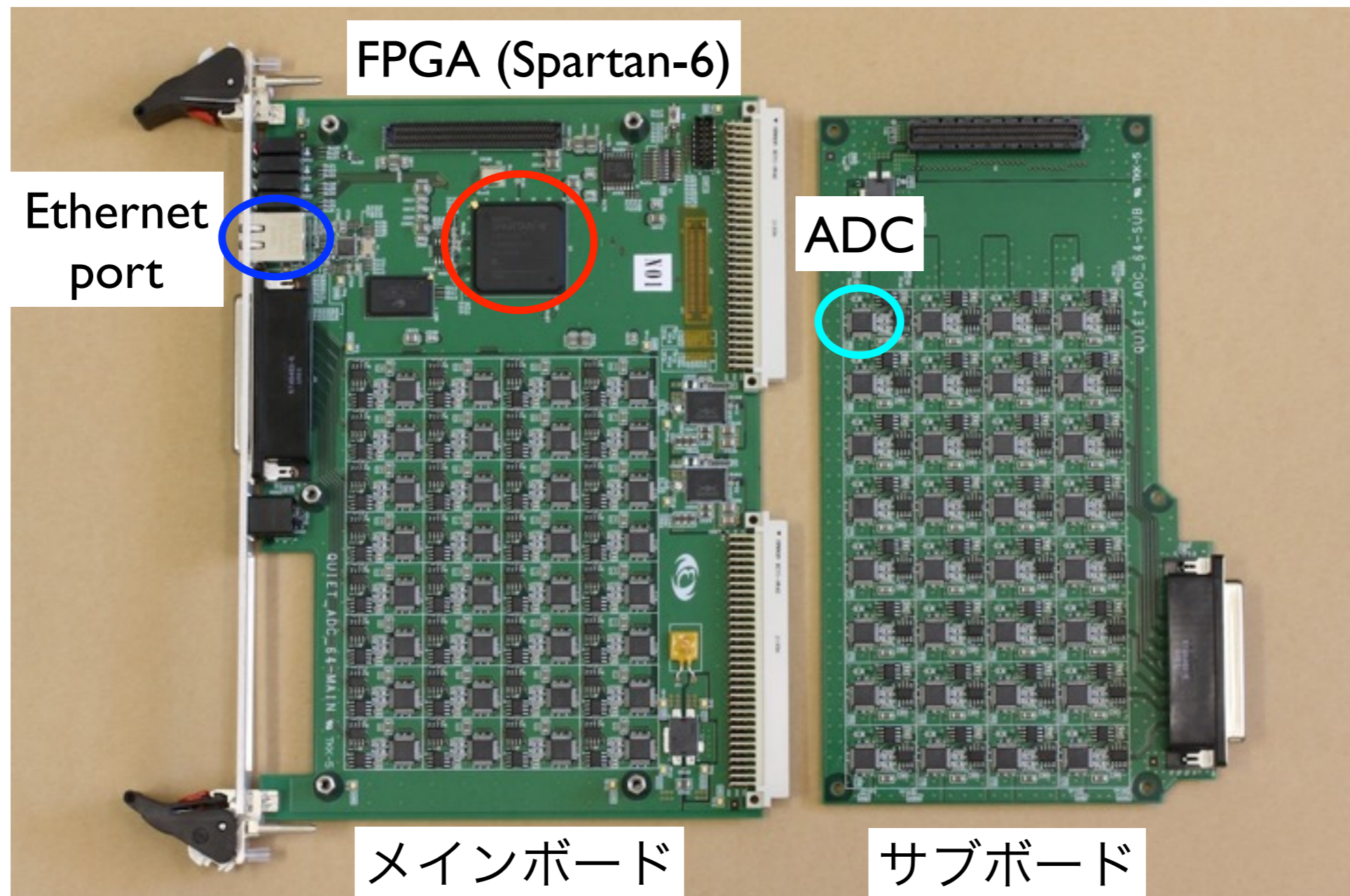
昨年12月に東京エレクトロンデバイスから試作品2枚が納品

今年1月に先行量産品4枚の追加発注, 3月に納品予定

特徴:

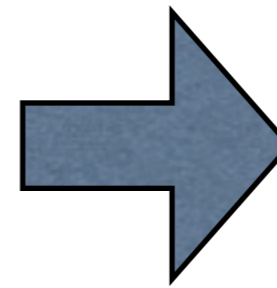
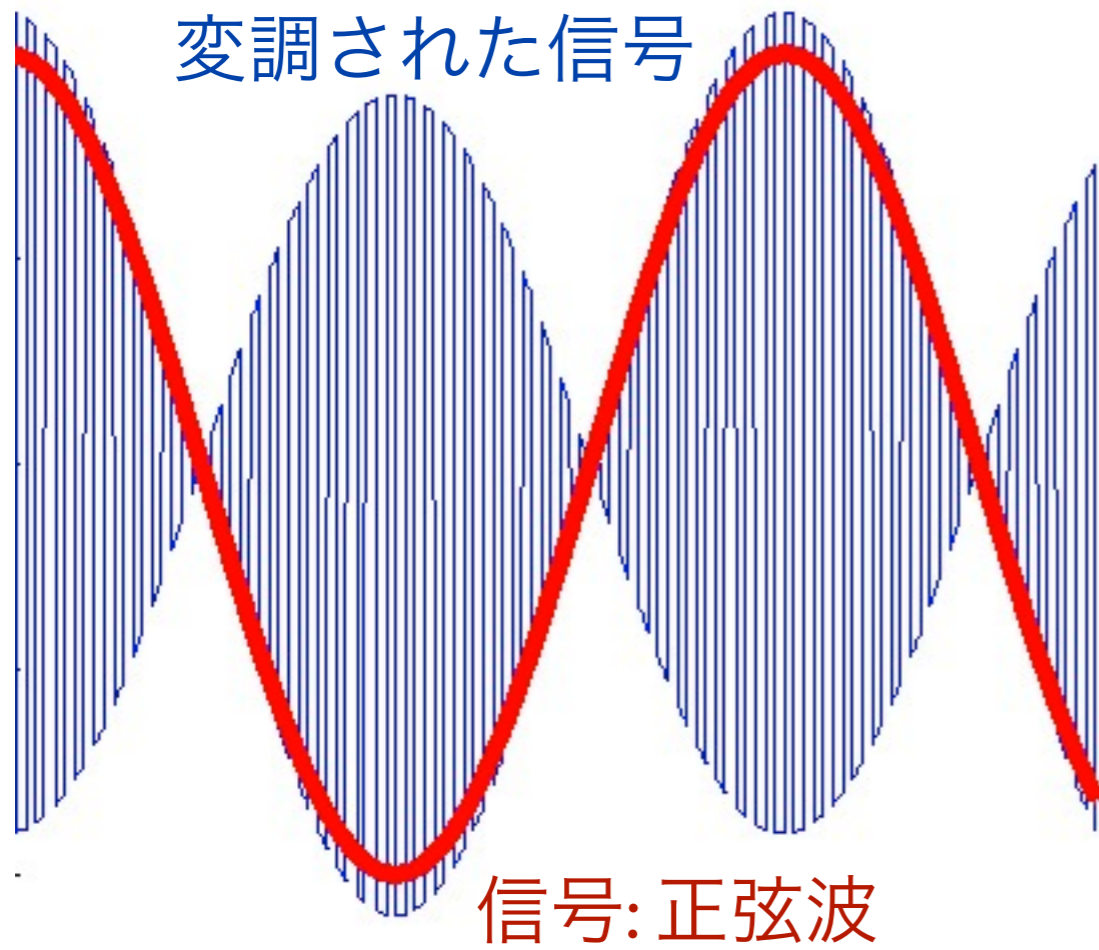
サブボードを用いて2倍の高密度化, Ethernetの導入

オンボードで4kHzと50Hzの2重復調まで実装

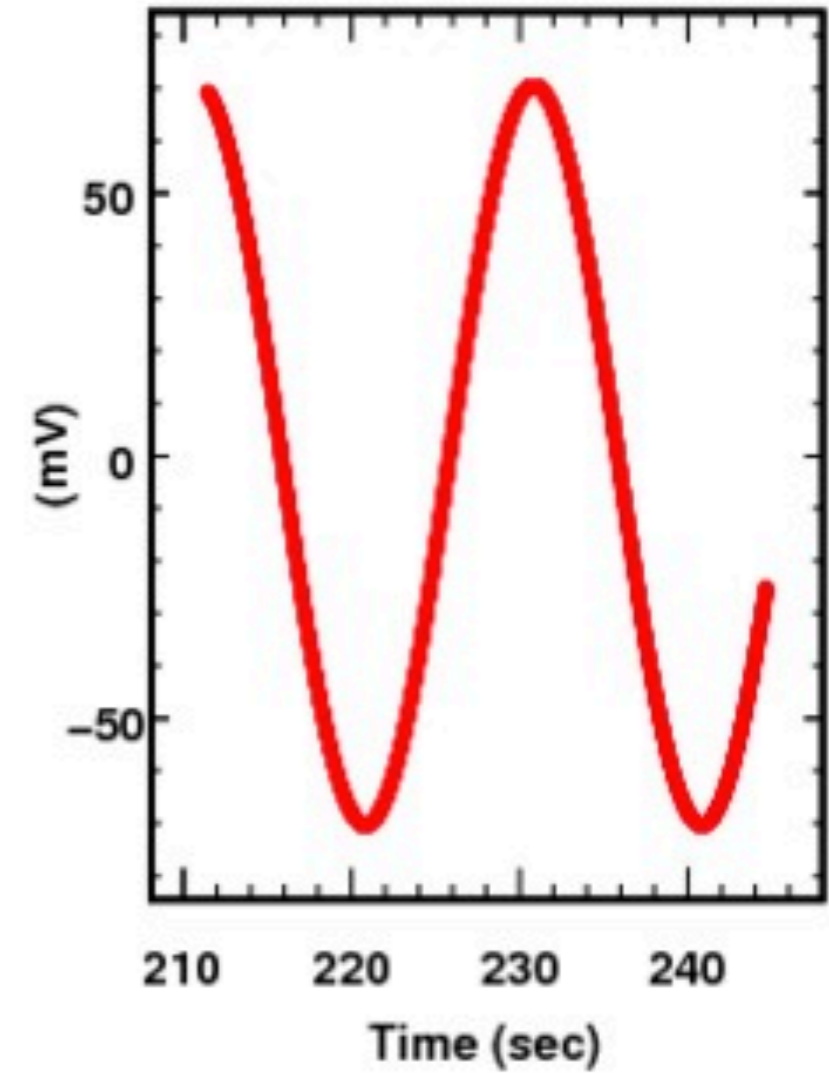


復調テスト

入力波形 (イメージ)



復調波形

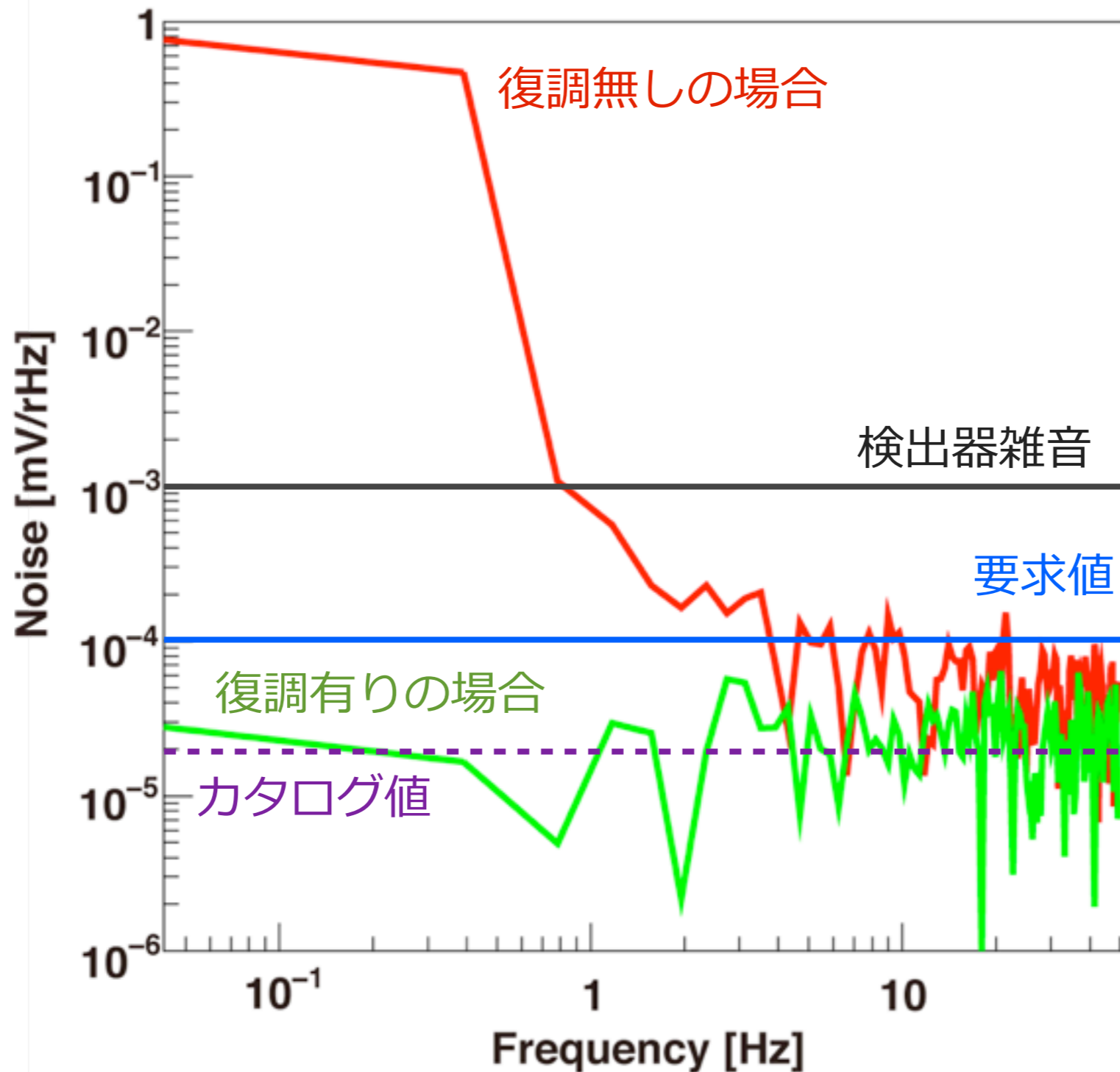


信号の復調に成功

性能評価

雑音スペクトル

復調によりADC雑音もキャンセル

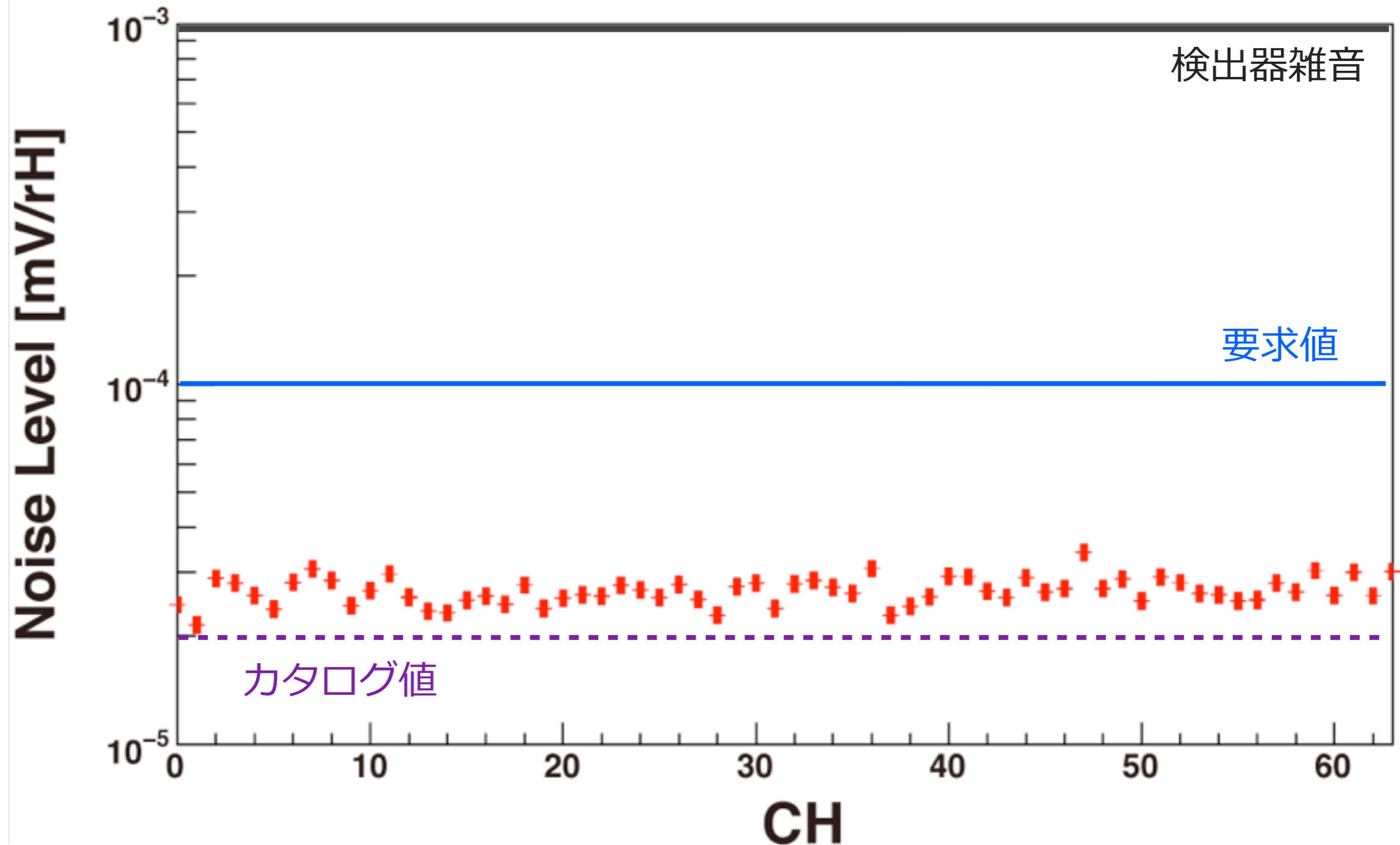


性能評価

雑音スペクトル

復調によりADC雑音もキャンセル

全CHで要求値 0.1 mV/rHzをクリア

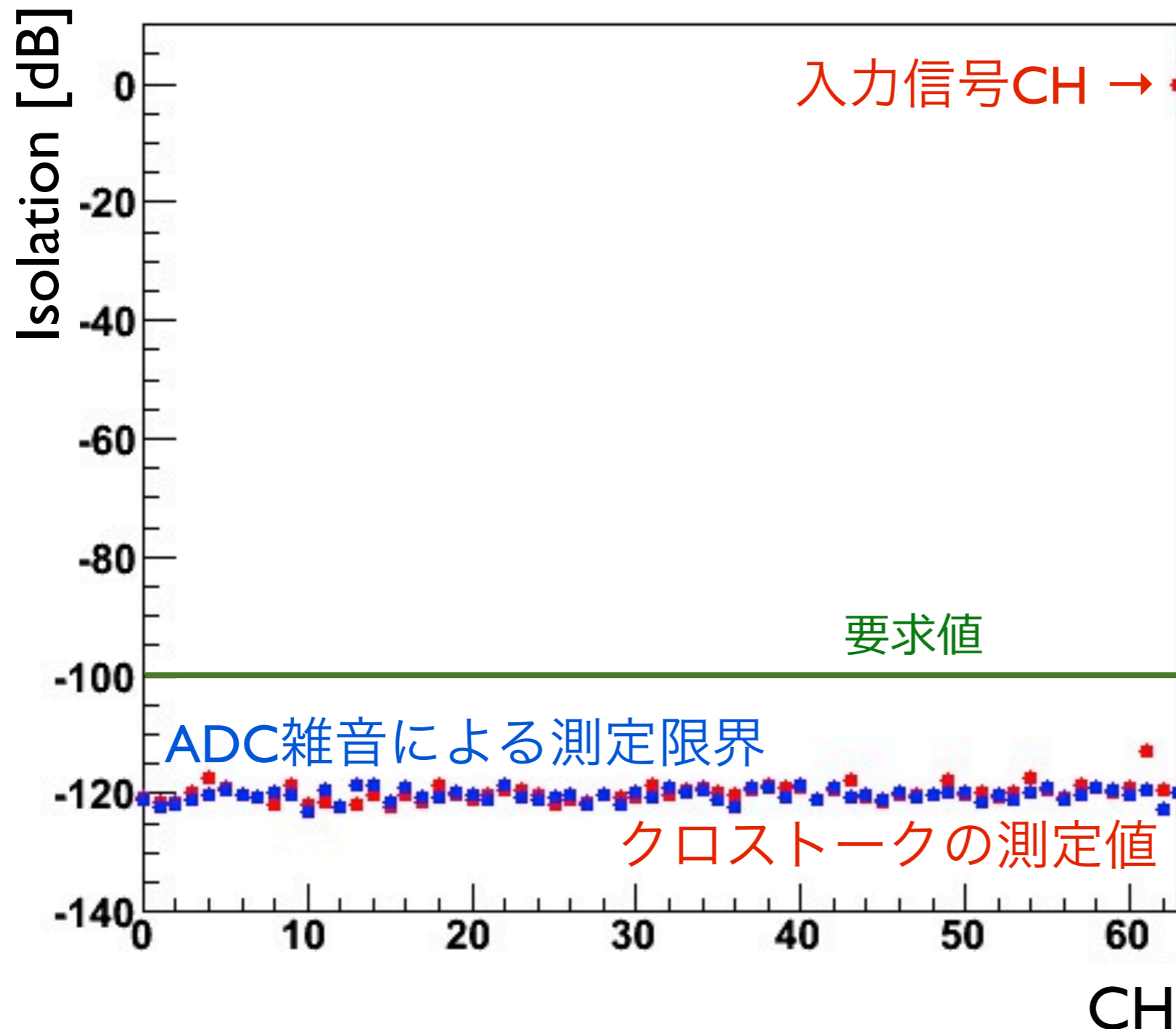


性能評価

クロストーク

全Chでクロストークの大きさは100dB以下であることを確認

CH63に1Hzの大きな模擬無偏光を入れた場合



現状のまとめと今後の予定

基本的に極めて順調

(皆様の協力、ご指導に感謝)

3月: MasterClockと固定アドレスを
振ってのシステムとして試験を開始

4月: ADCボードを他のコラボレーターに配布予定

デザインとプロトタイプ試験の結果を論文 (NIMA)と
国際会議 (TIPPやIEEE)で発表予定

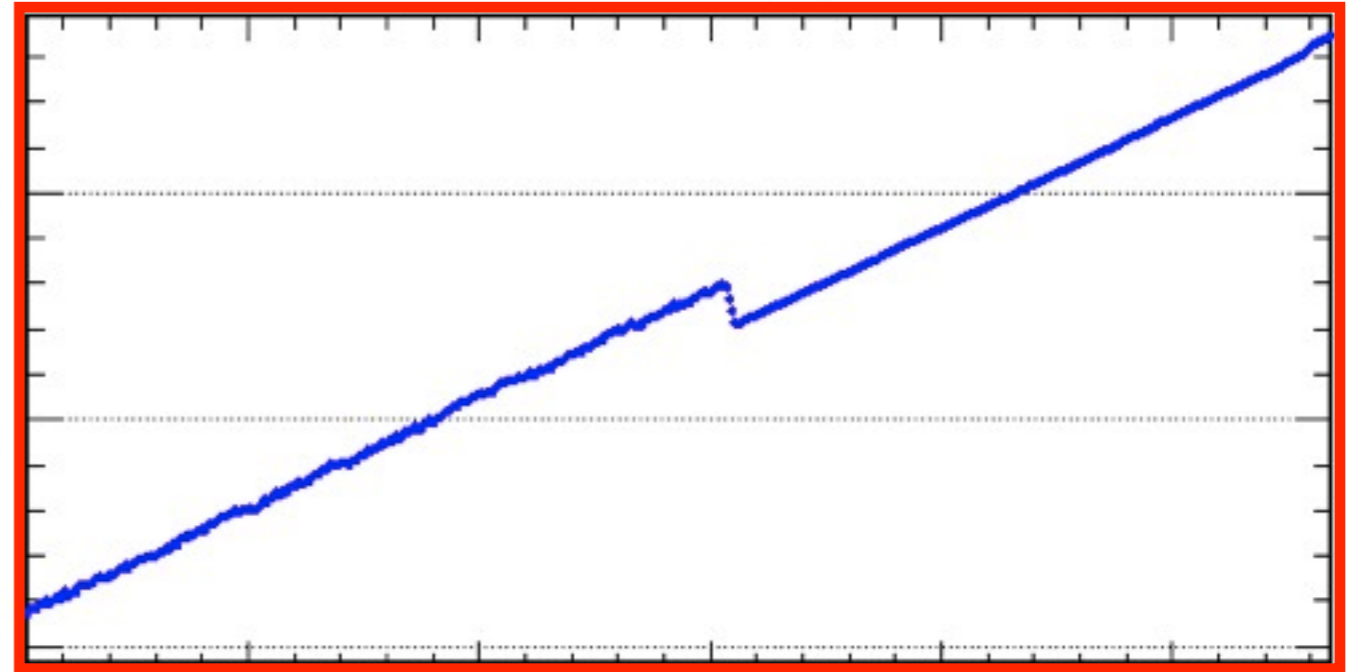
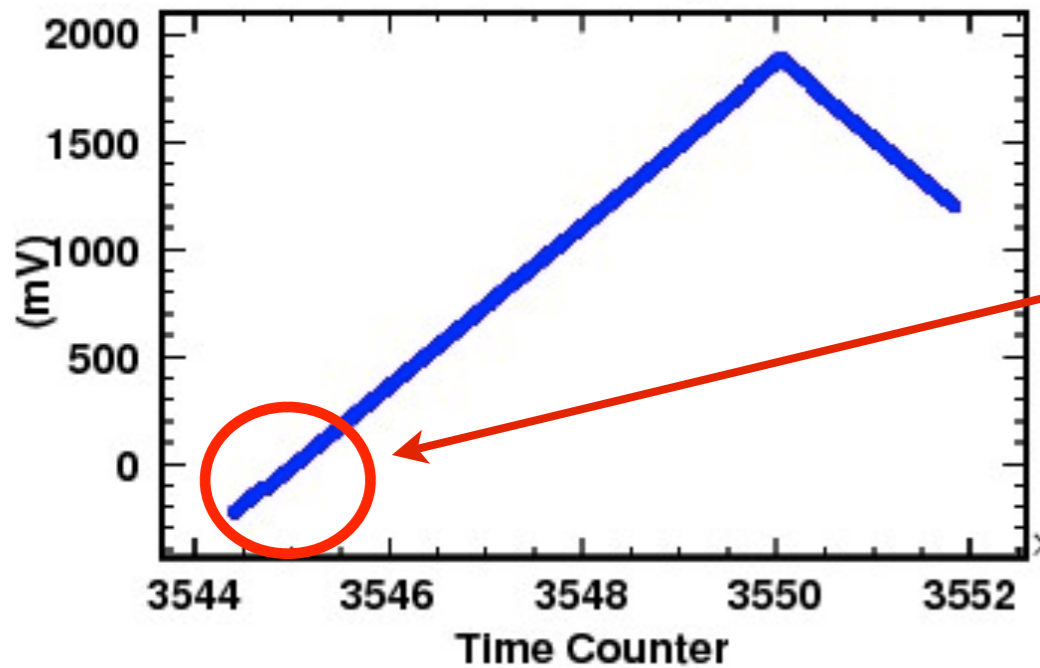
話は代わって、

順調ではあるがトラブル、失敗もたくさん
いくつか紹介します。

ADCの変な振る舞い I

特定ADCの特定bitで謎のグリッチの出現

三角波を入れた時の時系列



実はADCをデータシート通りドライブしていなかった
最初の1個で問題が無かったので、気にしていなかった

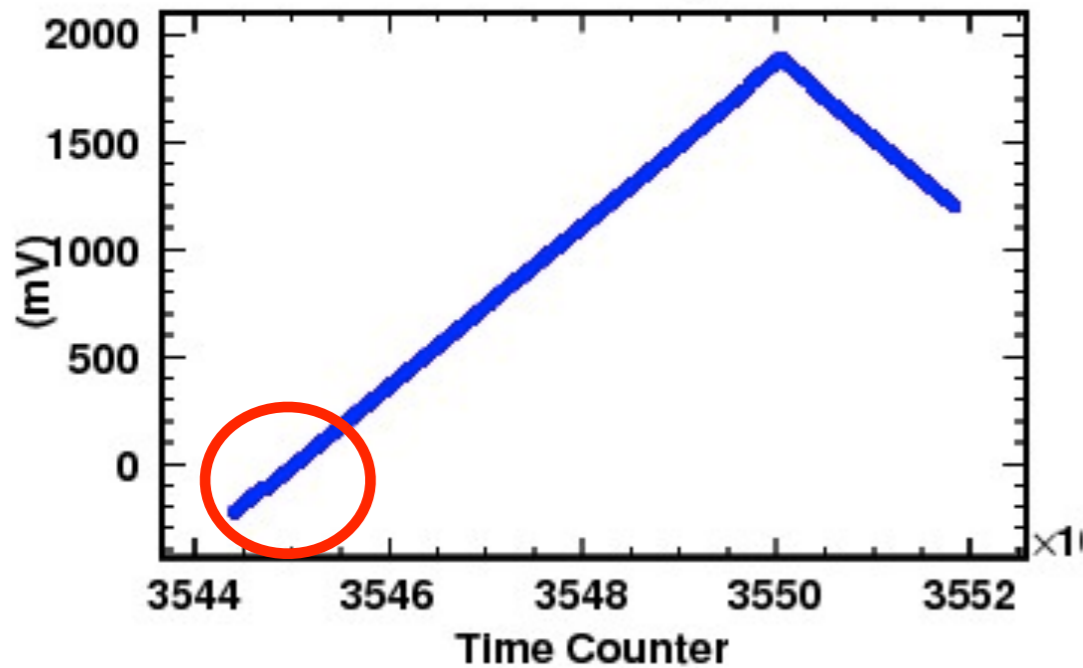
データシートを精読してFirmwareの修正で解決

教訓: データシートは精読する, データシートに従う

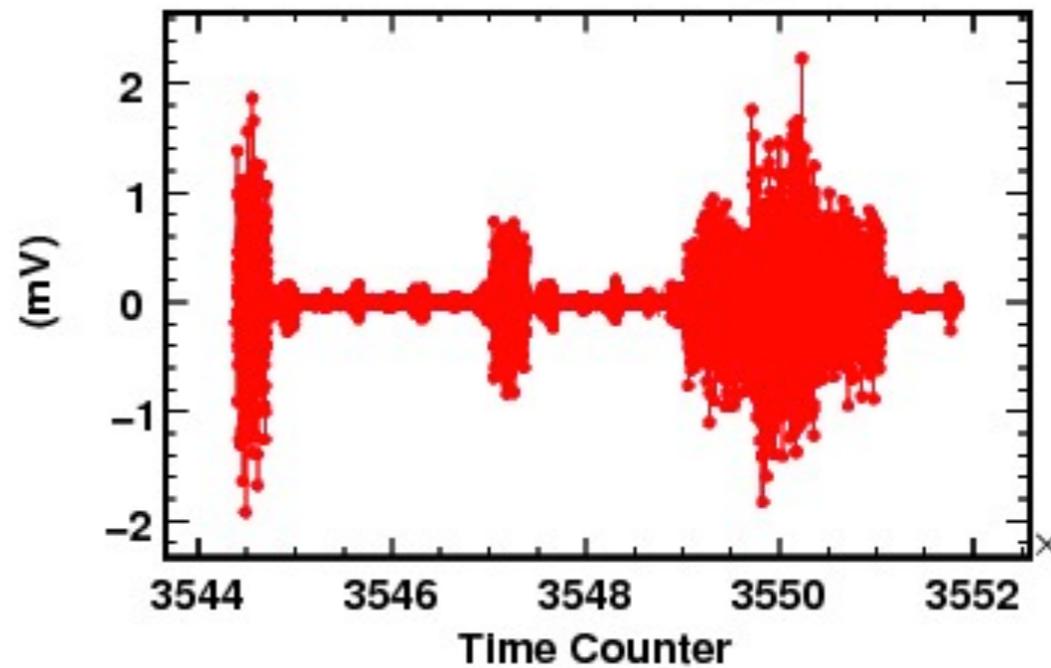
ADCの変な振る舞い I

特定ADCの特定bitで謎のグリッチの出現

三角波を入れた時の時系列



微分した時系列



実はADCをデータシート通りドライブしていなかった
最初の1個で問題が無かったので、気にしていなかった

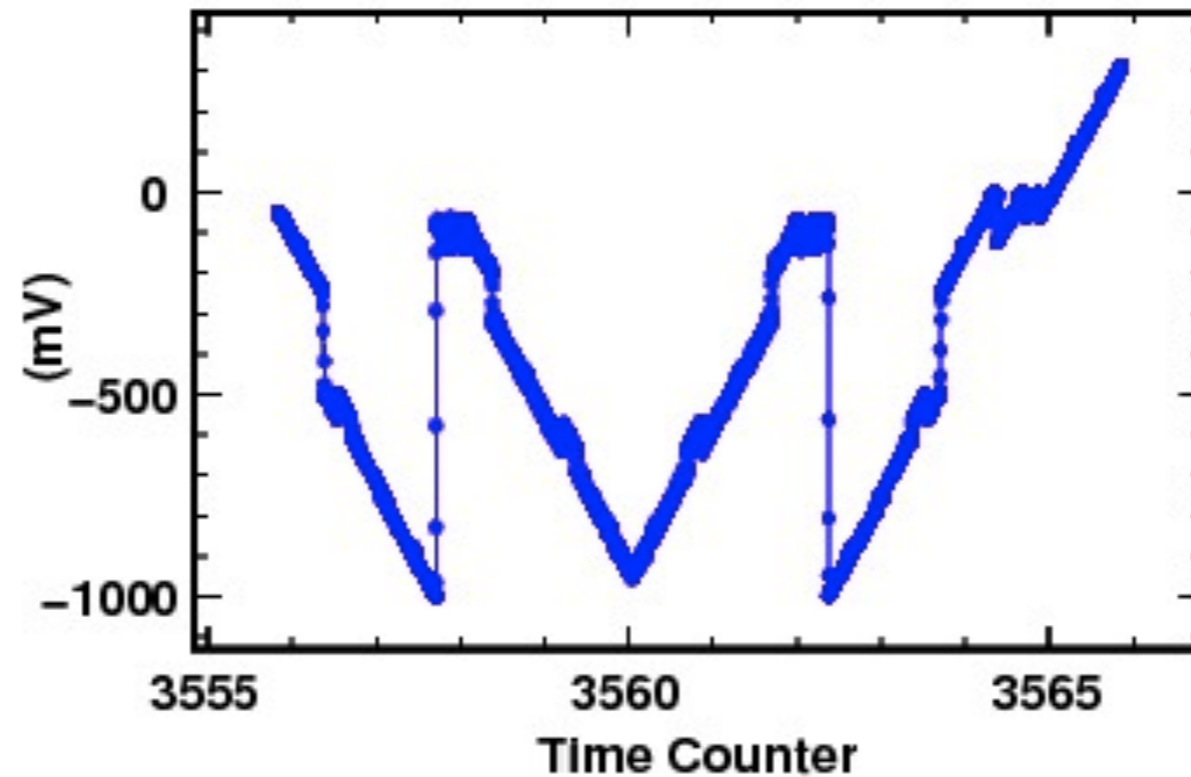
データシートを精読してFirmwareの修正で解決

教訓: データシートは精読する, データシートに従う

ADCの変な振る舞い II

オンボードのクロックから外部クロックに変更すると、一部のADCが正常に動かない

三角波を入れた時の時系列



外部クロックはLVDSで入力. 実はGNDが接続されていなかった

教訓: GNDは重要

ADCボードのLED

LED位置の深さ方向があっていない



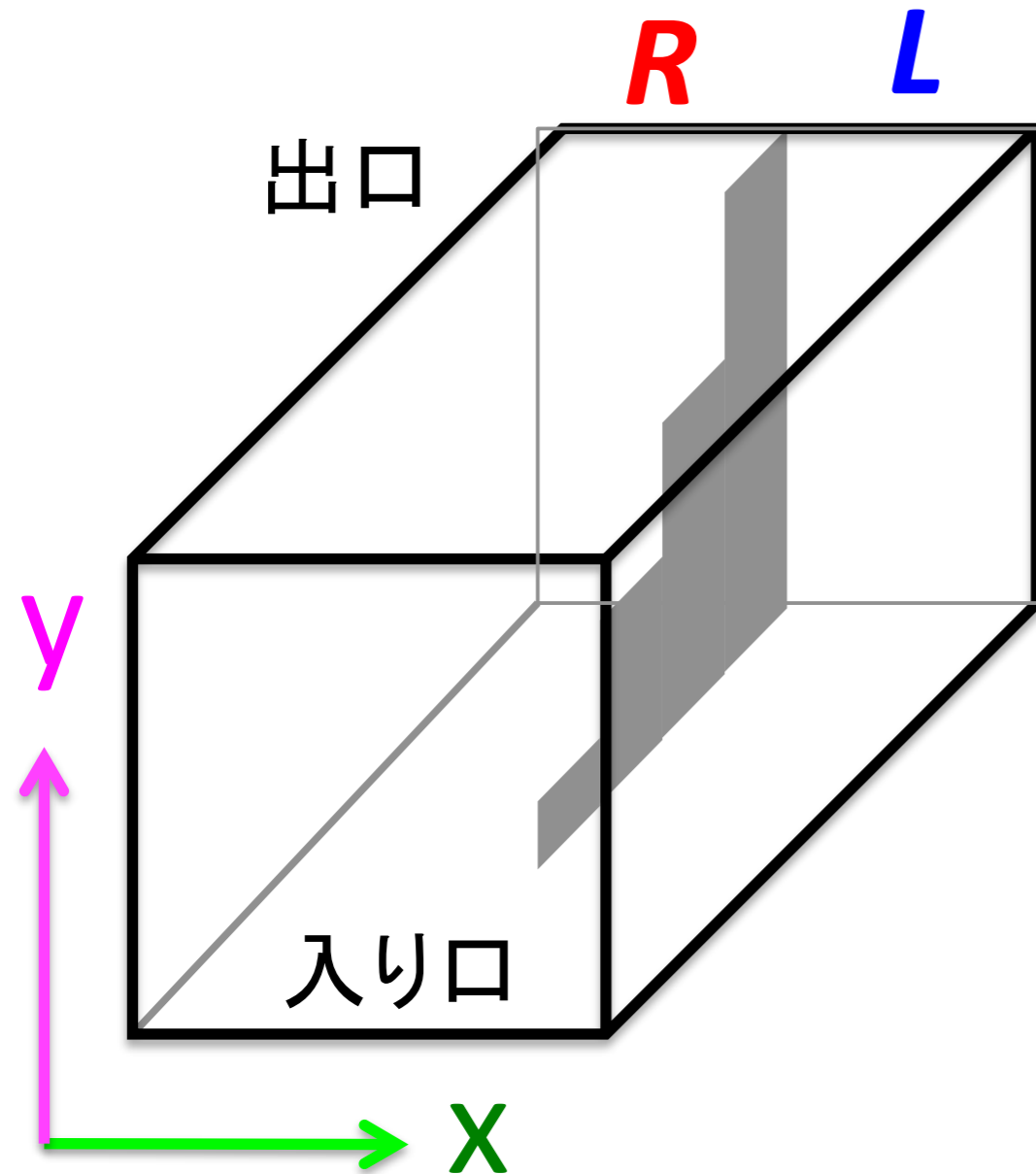
下は、もう1個前のADCボードのLED
こちらのLEDは良い場所にある

教訓：業者から上がってくるAWを詳細に確認する

付録

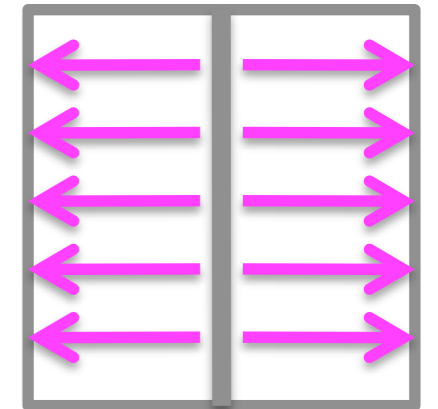
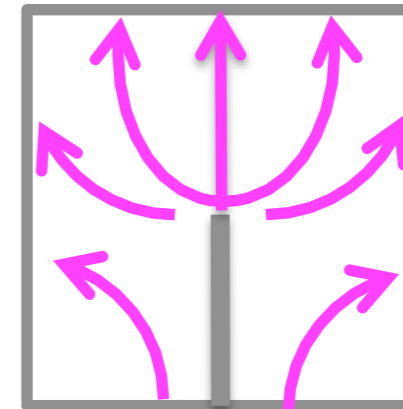
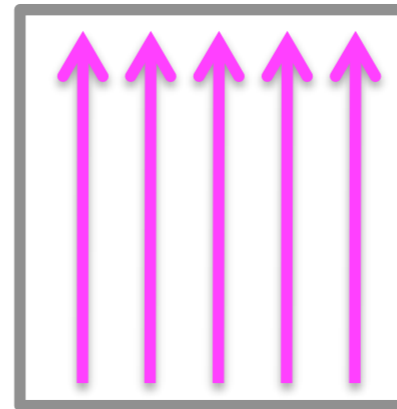
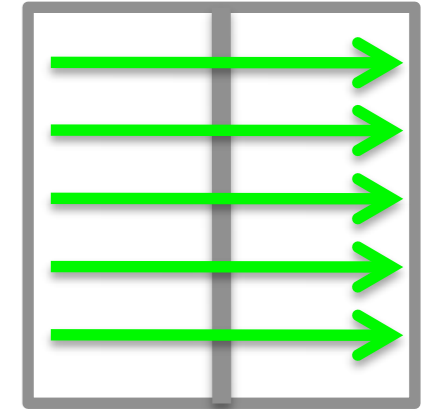
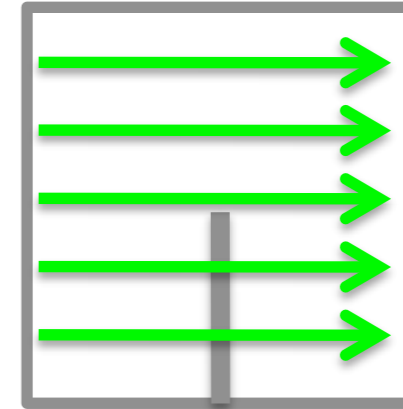
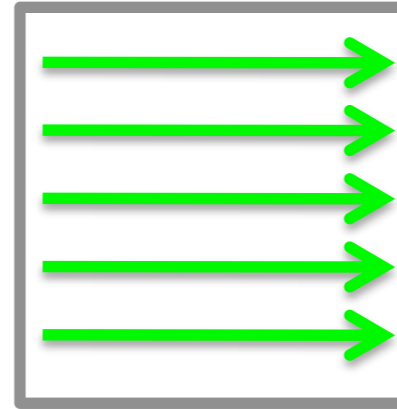
Septum Polarizer (OMT)

- 電磁波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

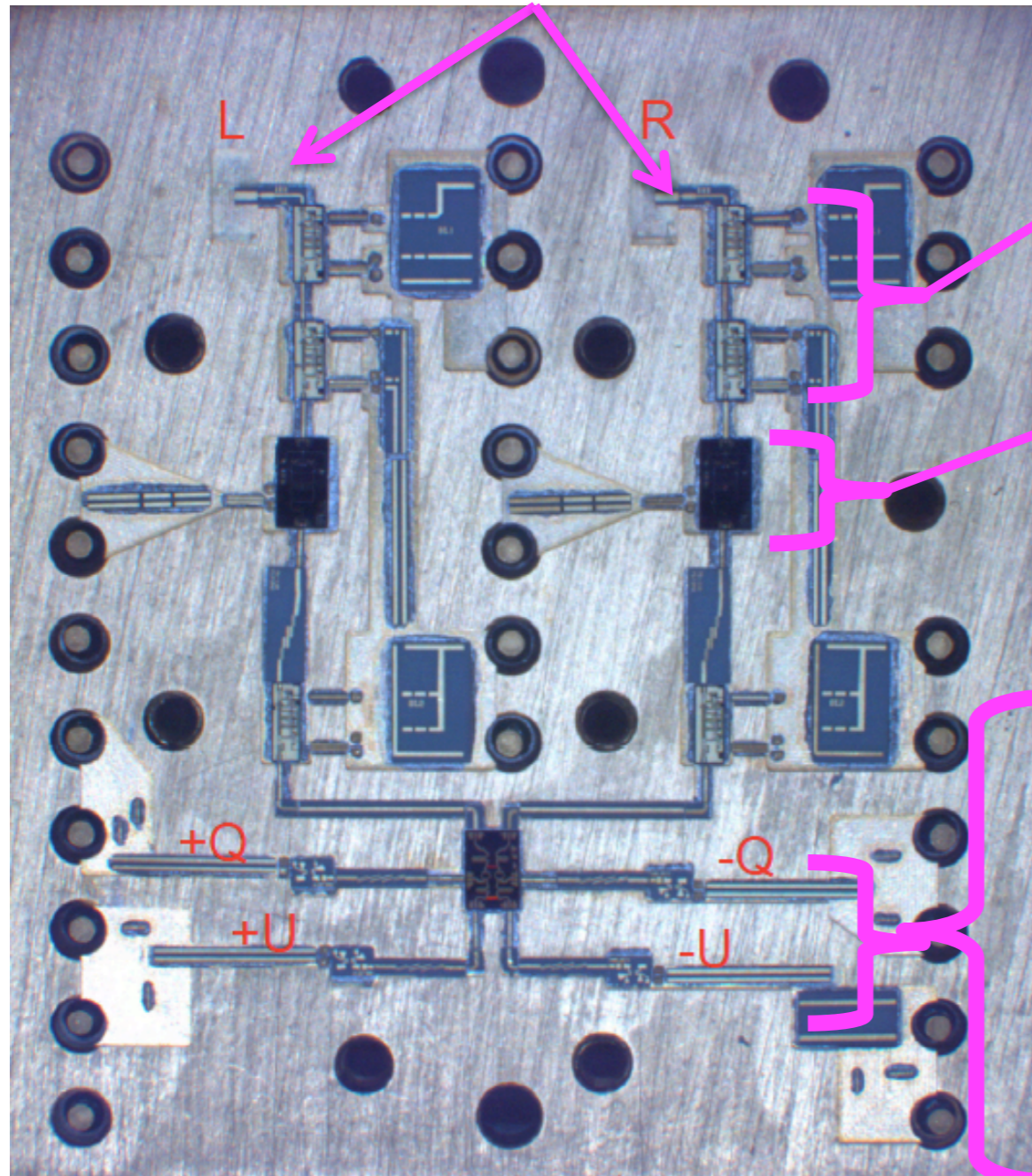


$$R = E_x - iE_y$$

$$L = E_x + iE_y$$

Polarization Module

電磁波(L, R)をピックアップするアンテナ



W-band module

HEMT Amp.
信号増幅時に
 $1/f$ noiseが乗る
(knee ~ 1kHz)

Phase switch
それぞれのrateで
phaseを反転

180° Coupler: (± 1)

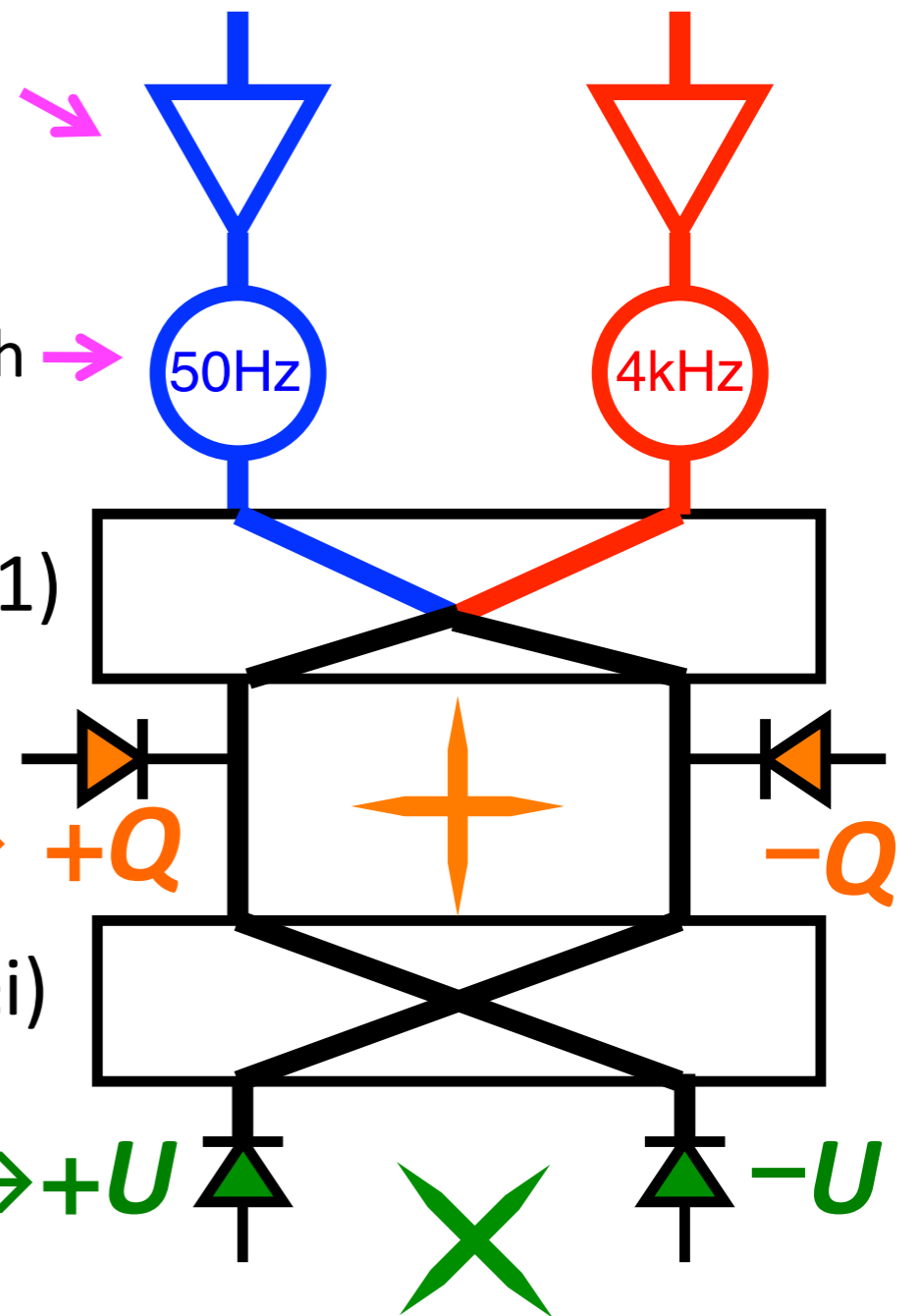
Det. Diode
 $\pm(E_x^2 - E_y^2) \rightarrow +Q$

90° Coupler: ($\pm i$)

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

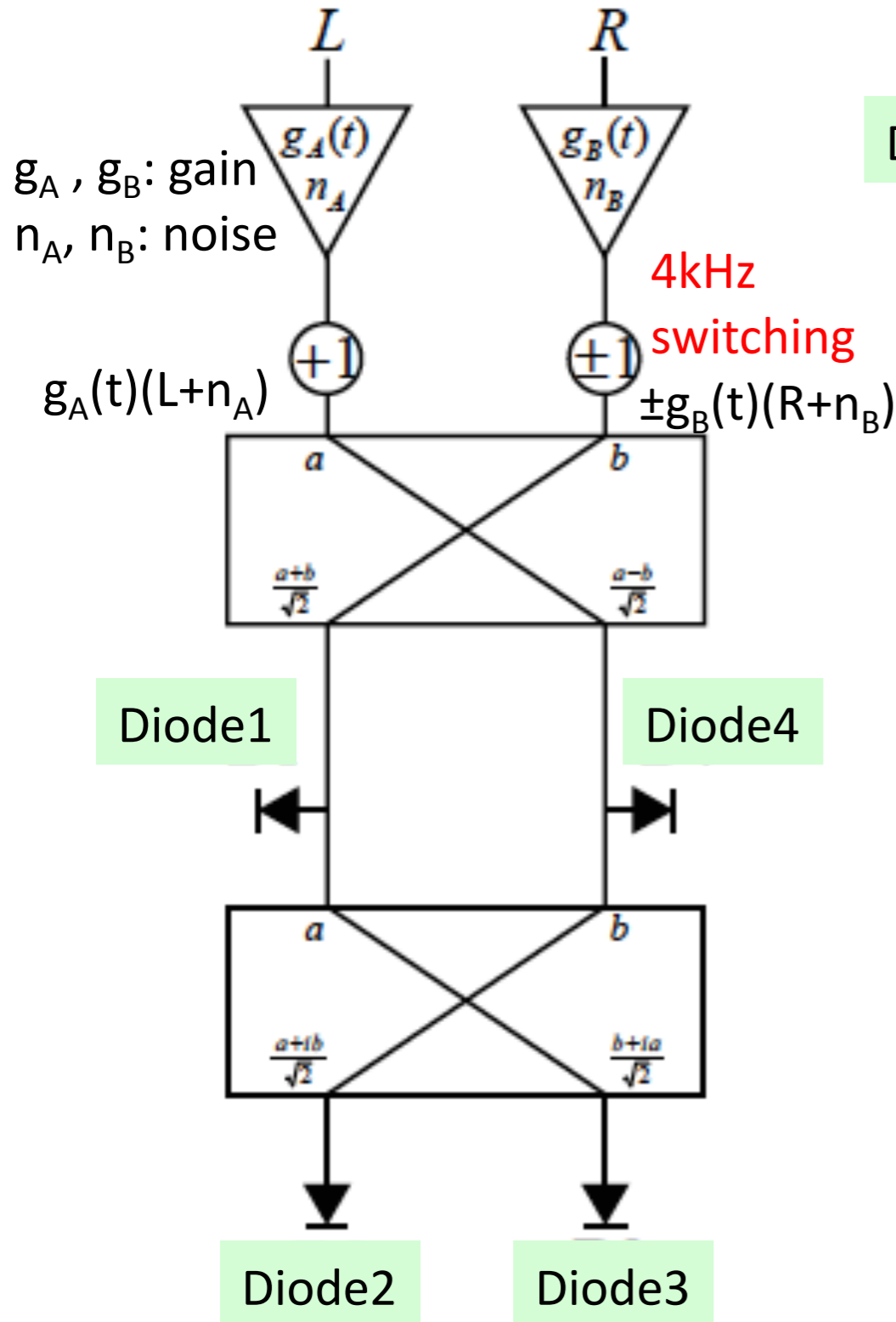
$$L = E_x + iE_y$$

$$R = E_x - iE_y$$



1つのmoduleからの4つのdiode信号. これをADCで読む(800kHz).
ただし、phase statusを考慮しながら、onlineでdown samplingする

数式で書いてみる



Diode1の出力 $V_k(+, \pm)$ がどうなるか？

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

$$a_i(+, \pm) = \frac{V_k(+, +) + V_{k+1}(+, -)}{2} \quad \leftarrow 2\text{kHz data} \quad \text{「足し算」}$$

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

$$d_i(+, \pm) = \frac{V_k(+, +) - V_{k+1}(+, -)}{2} \quad \leftarrow 2\text{kHz data} \quad \text{「引き算」}$$

$$= g_A g_B Q$$

$$A(+, \pm) = \frac{1}{20} \sum a_i(+, \pm) \quad \leftarrow 100\text{Hz data} \quad \text{「足し算平均」}$$

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

$$D(+, \pm) = \frac{1}{20} \sum d_i^2 \quad \leftarrow 100\text{Hz data} \quad \text{「引き算平均」}$$

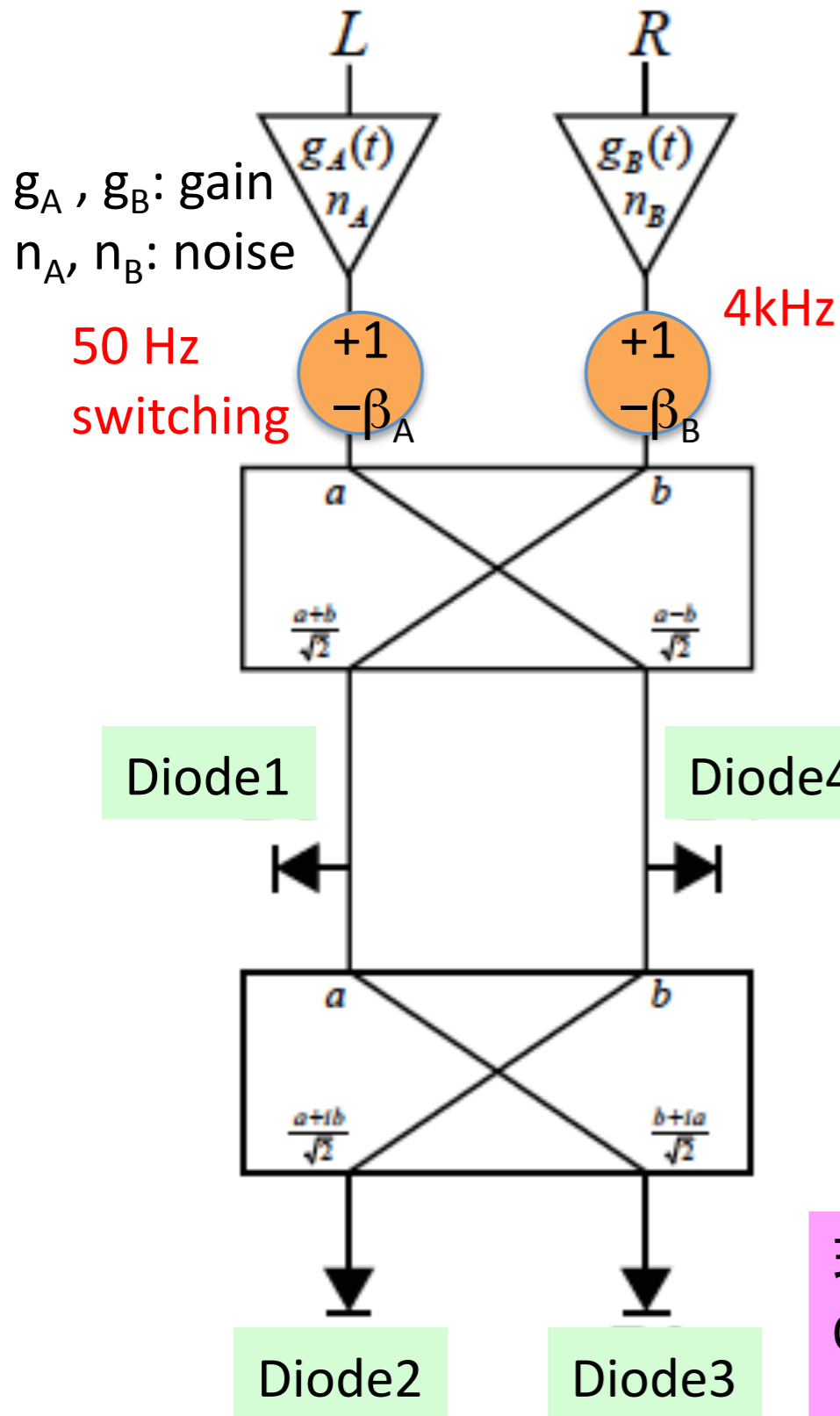
$$= \langle g_A g_B Q \rangle$$

 : 1/f noise (knee ~1kHz)

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

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

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

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

「引き算平均」の引き算
50 Hzデータ

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

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

「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

The QUIET Collaboration

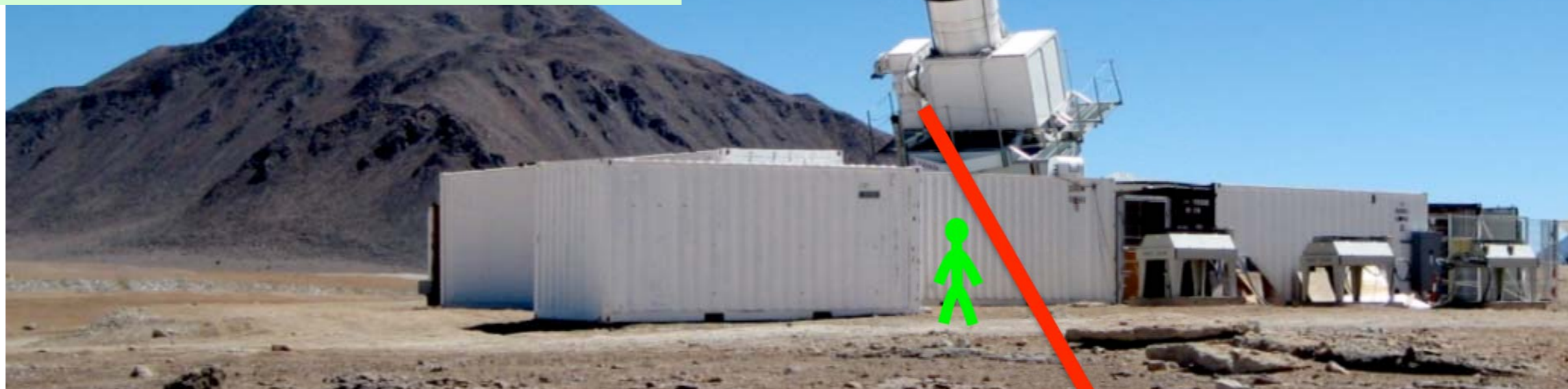
5 countries, 14 institutes, ~35 scientists



Chajnantor Plateau (5,080m), Chile Atacama Desert
World's best site for observation frequencies of QUIET !



QUIET偏光検出器



Simultaneous measurement of

Q +

U X

polarized

as well as I un-polarized

2008年10月~2009年6月

Q-band (43GHz) 検出器 17+2個

Module: $280 \mu\text{Ks}^{1/2}$

→ array: $69 \mu\text{Ks}^{1/2}$

1/f knee 5.5mHz !!

5cm

