Belle II実験ARICH検出器 アップグレードのための 信号読み出しシステムの性能評価

東京都立大学 M1
石井凌太

Flavor Physics Workshop 2026

目次

◆研究背景
- Belle II実験
- ARICH検出器
- MPPC信号読み出しシステム

◆MPPC信号読み出しシステムの評価
- 読み出し幅の調整
- 光子入射による測定
- 宇宙線を用いた測定

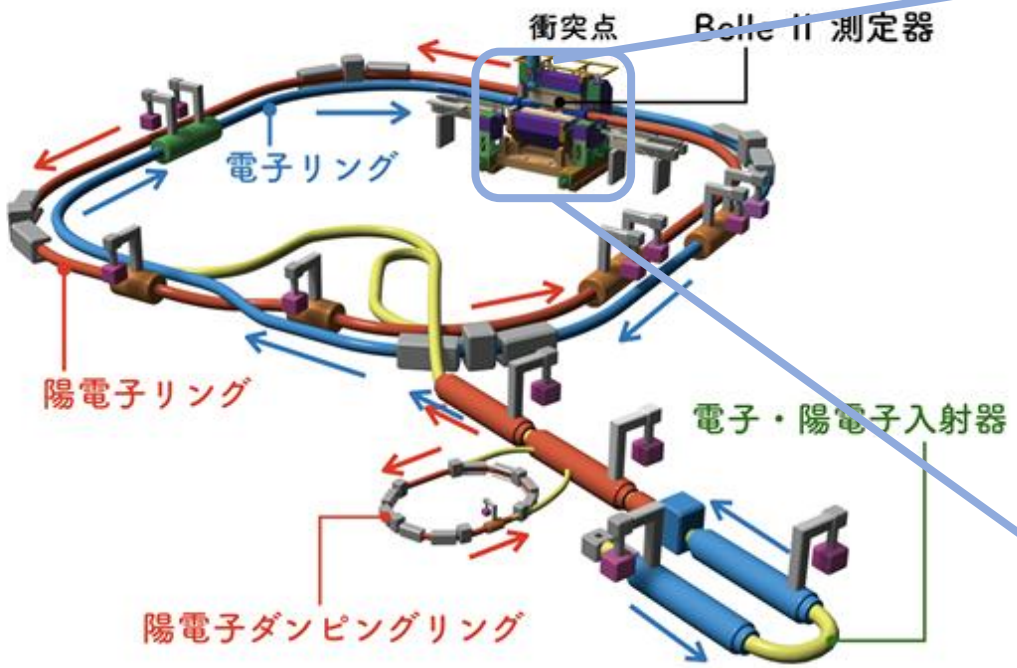
◆ビームテストへの準備

◆まとめ・今後

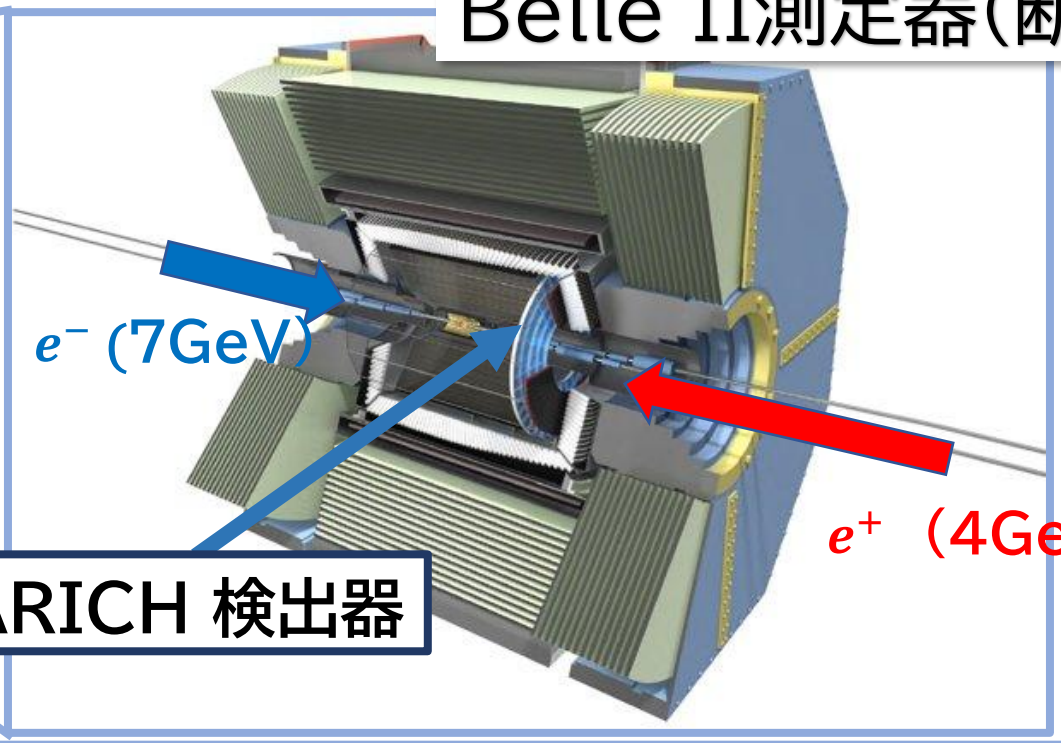
Belle II実験

- 新物理の探索を目的として大型加速器を用いた電子・陽電子衝突型実験
- 高エネルギー加速器研究機構（茨城県つくば市）で実施
- B, τの稀崩壊を精密に測定するため**粒子識別が重要**

SuperKEKB加速器



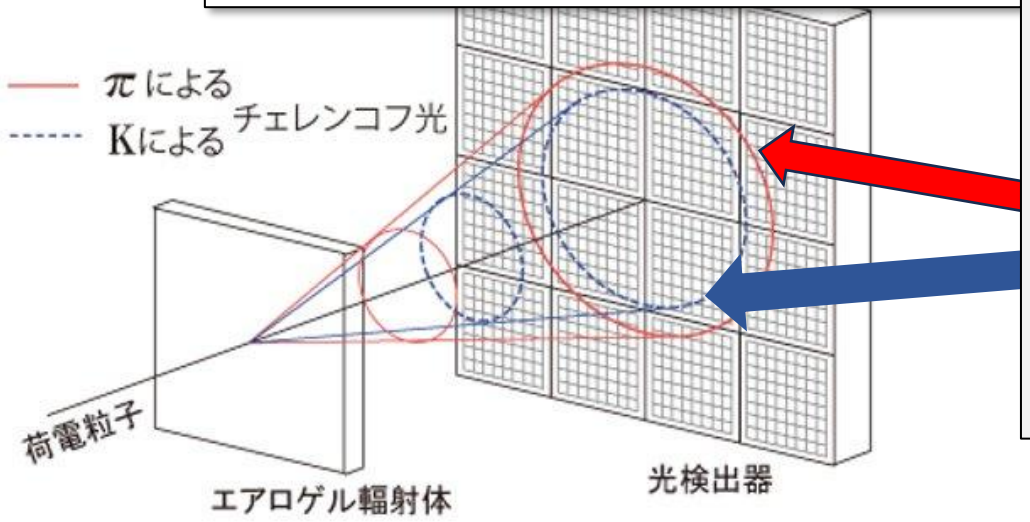
Belle II測定器(断面)



ARICH(Aerogel Ring Imaging Cherenkov counter)検出器

- 荷電粒子がエアロゲル中をその媒質中の光速を超えて入射するとチェレンコフ光を放出
- 放射角の違いを検出することで粒子を識別

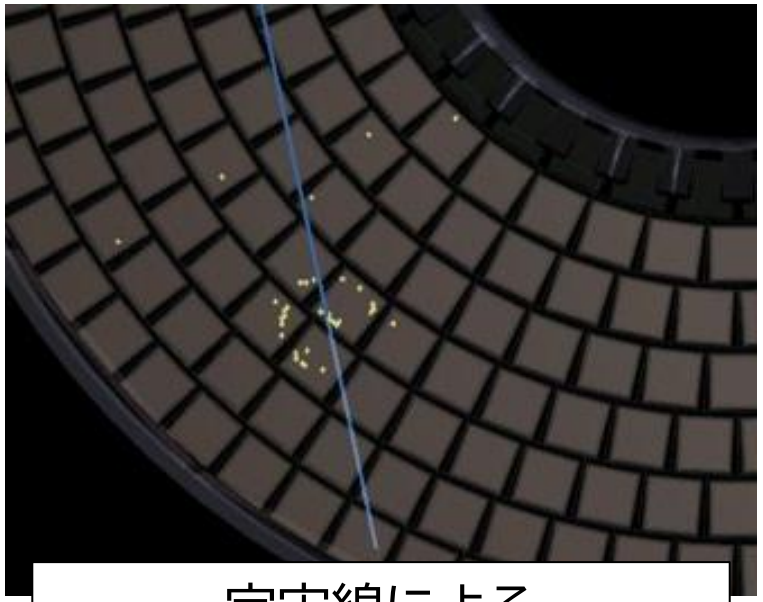
光検出器HAPD
(Hybrid Avalanche Photo- Detector)



$$\cos\theta_c = \frac{\sqrt{m^2 + p^2}}{np}$$

m:粒子の質量
p:運動量(測定値)
n:屈折率(既知)
θ_c:放射角

π中間子とK中間子の識別が可能

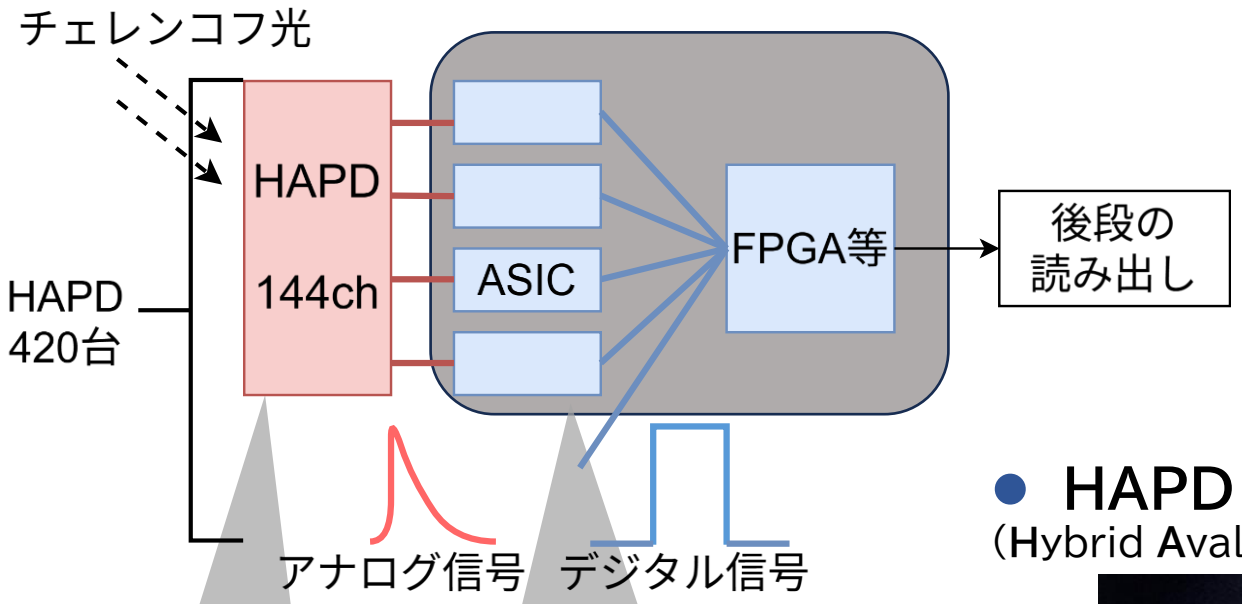


宇宙線による
チェレンコフリングの様子

o(10)程度の光子

数mm程度の位置分解能と1光子検出が必要

ARICHの読み出しシステム構成

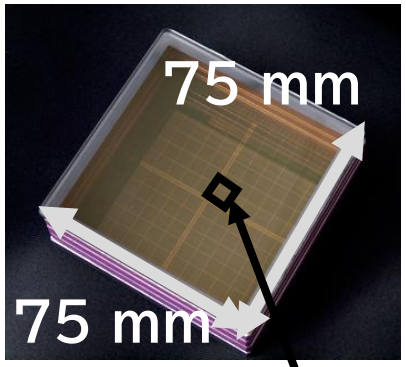


読み出しシステムも
置き換えを検討

光検出器HAPDは生産が終了
Belle IIの10年以上の運用に
向けて置き換えを検討

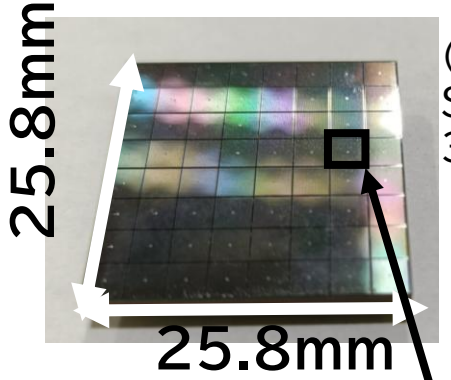
・本研究の目的
置き換え候補の一つMPPC用
読み出しシステムの性能評価

- **HAPD** 144ch
(Hybrid Avalanche Photo-Detector)



1 ch 5×5 mm^2

- **MPPC**
本実験で使用したものは64ch
(Multi-Pixel Photon Counter)



(HAMAMATSU
S13361-
3075AE-08)

1 ch 3×3 mm^2

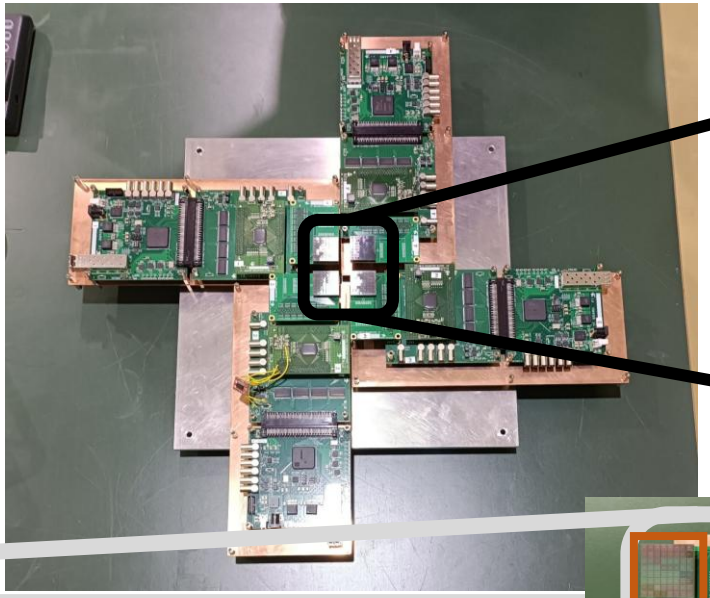
MPPC読み出し用評価ボード

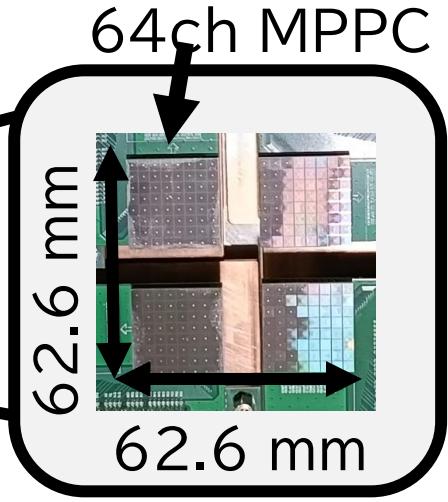
- MPPCからの信号処理のため ARICH向けに開発されたASIC であるTF01A64を搭載

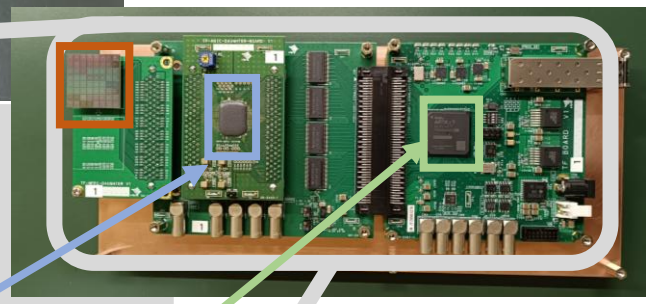
ASICの先行研究:日本物理学会第75回年次大会,17p-G21-5 鶴藤昌人

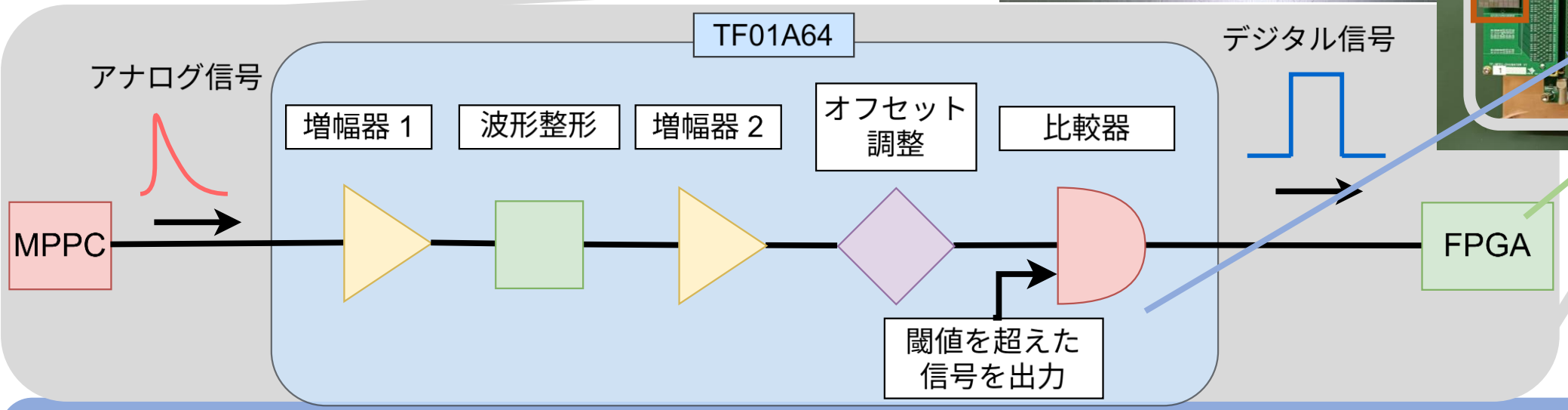
- 64 ch MPPCを4個使用することで チェレンコフリングの観測が可能

ボードの先行研究 : S.Kurokawa doi:10.1016/j.nima.2026.171398







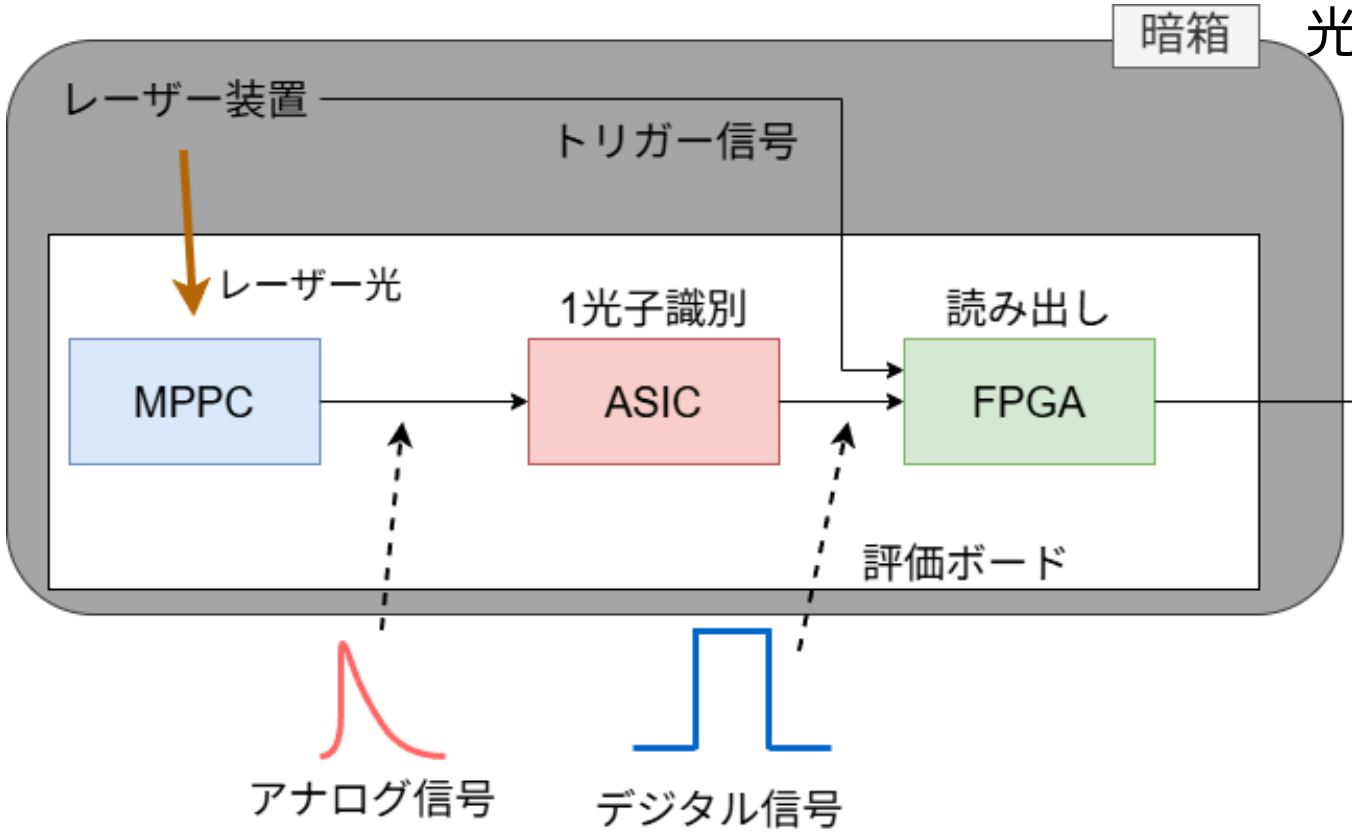


目次

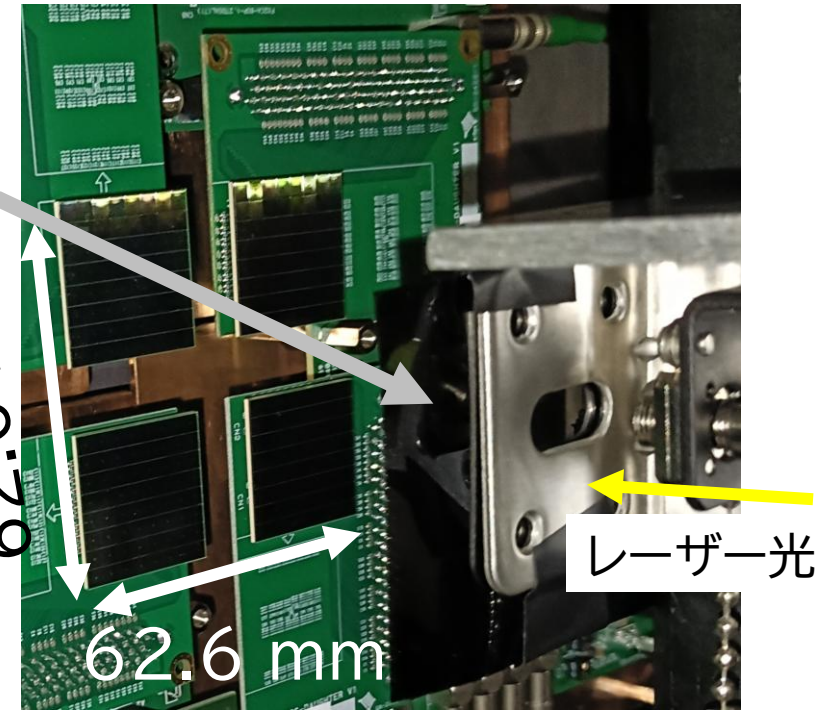
- ◆研究背景
  - ●Belle II実験
  - ●ARICH検出器
  - ●MPPC信号読み出しシステム
- ◆MPPC信号読み出しシステムの評価
  - ●読み出し幅の調整
  - ●光子入射による測定
  - ●宇宙線を用いた測定
- ◆ビームテストへの準備
- ◆まとめ・今後

光子入射によるデータ収集セットアップ

- パルスレーザー光と同期したトリガー信号を利用
- 1光子レベルに閾値を設定



NDフィルターで
1光子レベルに
光量を調整



本測定では
ヒット率＝ヒット回数/トリガー回数
として評価を行う

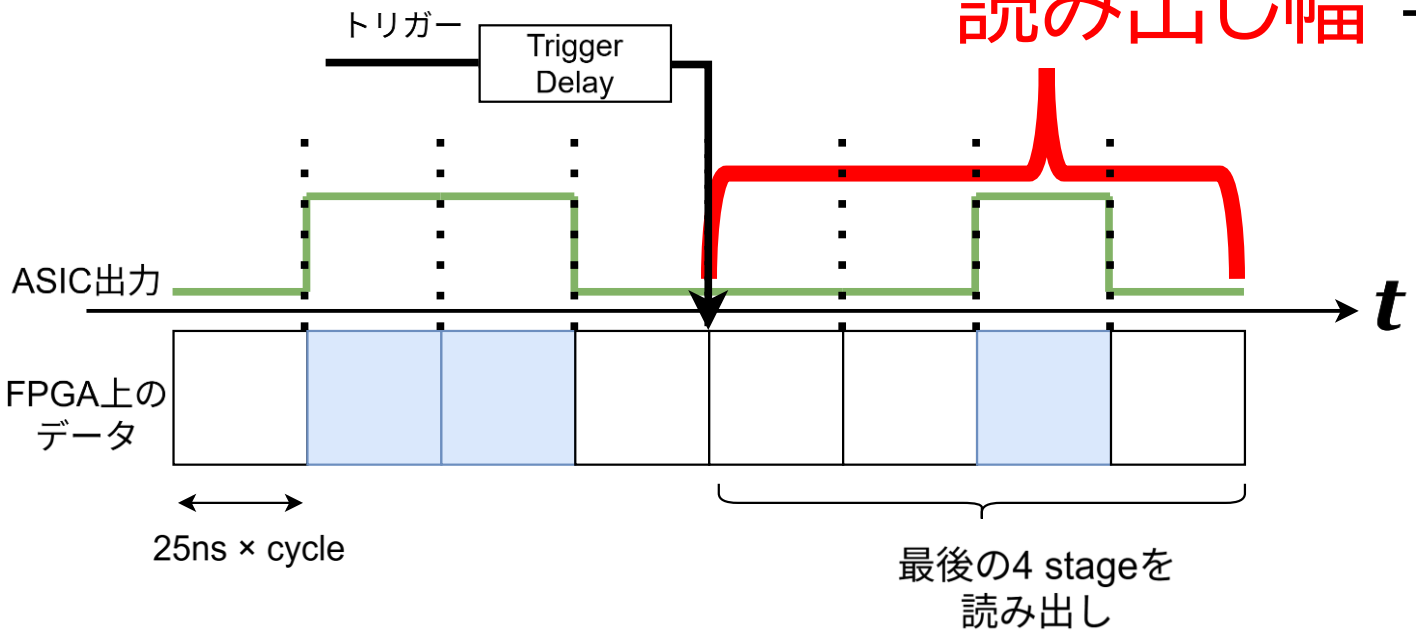
読み出し幅の調整

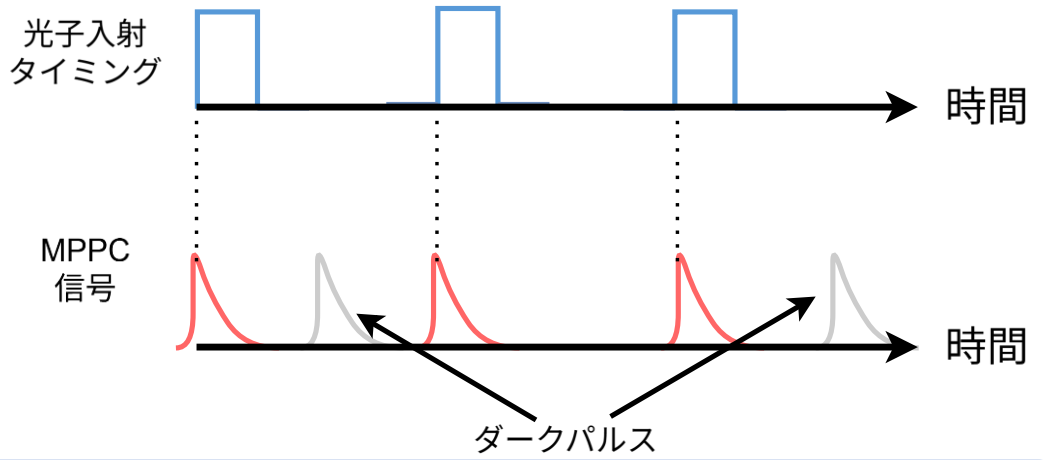
- MPPCには熱励起による偽信号**ダークパルス**が多く発生する
- FPGA上のデータの1マスの大きさ（時間の長さ）を変更可能
- 読み出し幅を狭めることでダークパルスの影響の低減が期待できる

読み出し幅 ＝（25 ns × **cycle**）× N

Nstage分の読み出し

1～16で調整可能

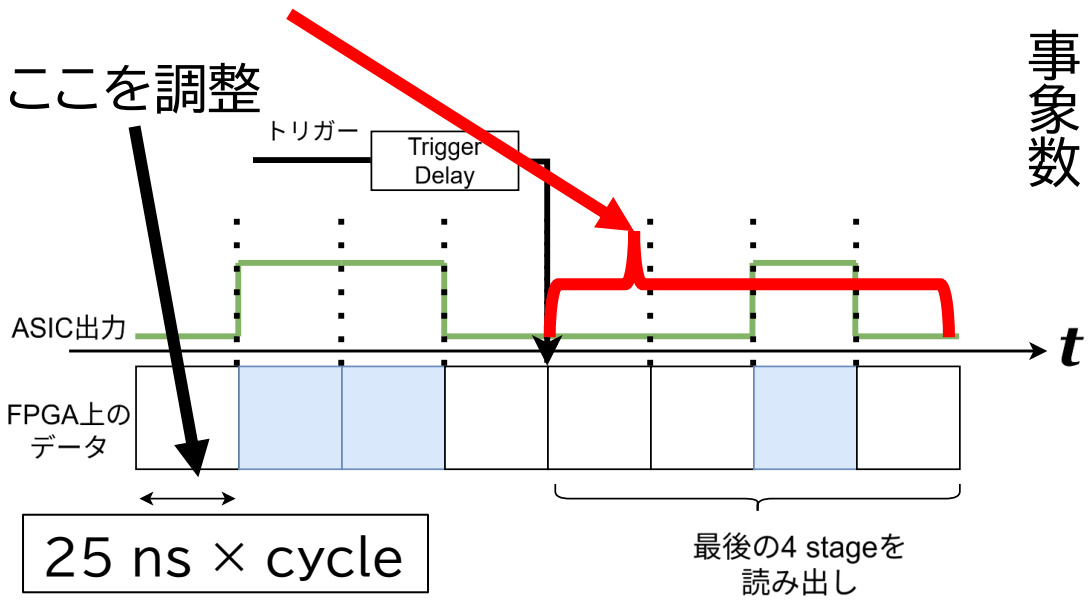




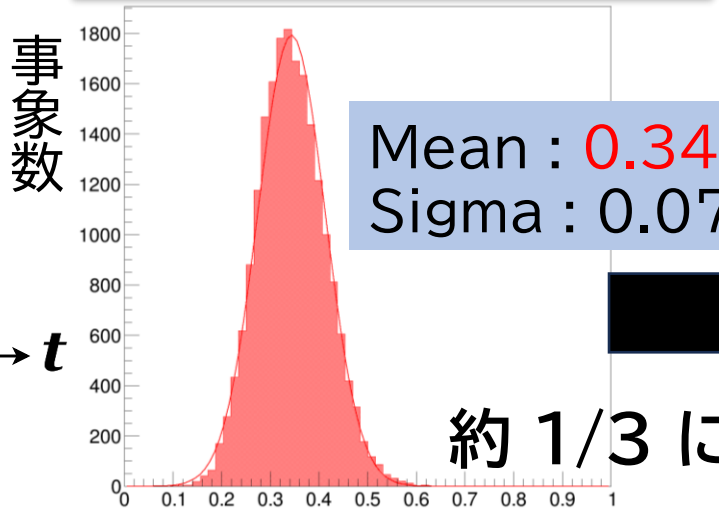
ダークパルスの影響と読み出し幅の調整

- レーザーは入射せず読み出し幅を変えながらダークパルスの測定

読み出し幅 = 25 ns × **cycle** × 4

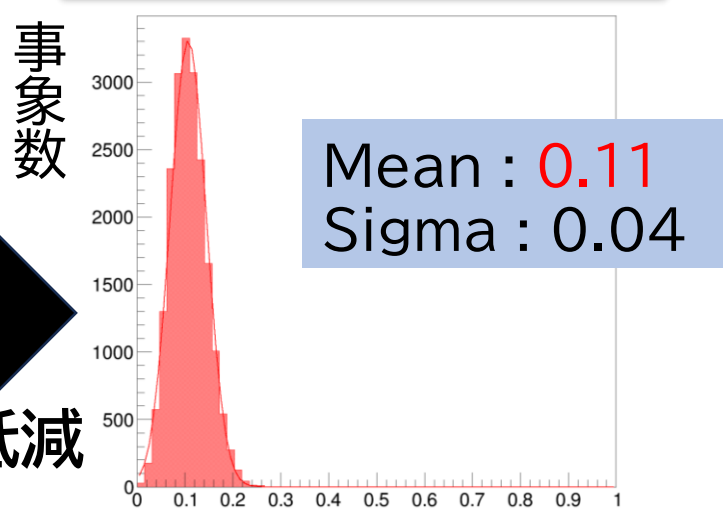


読み出し幅1000 ns



約 1/3 に低減

読み出し幅200 ns



時間幅を変えることでダークパルスの影響を抑制
読み出しstage数を変えることでさらなる低減が可能

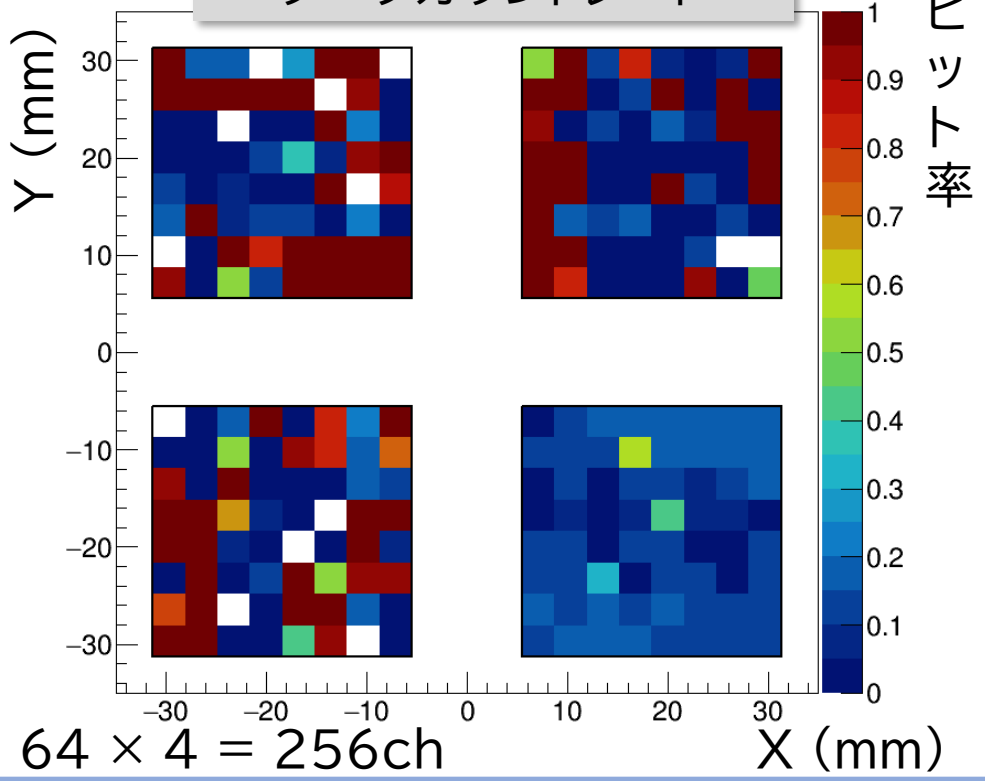
MPPC読み出しの問題点



MPPC
配置

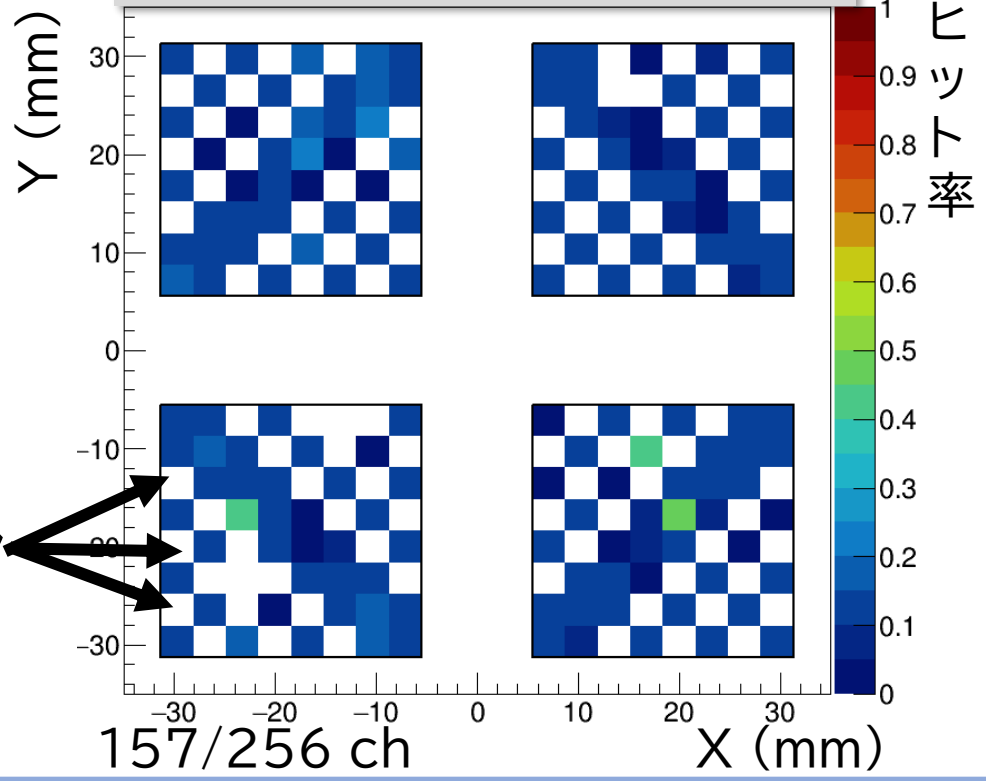
- 評価ボードにMPPC接続時にノイズが発生する
- 当面は有効チャンネル数を減らすことで対処可能

全チャンネル有効時の
ダークカウントレート



64 × 4 = 256ch

一部チャンネルをオフにしたときの
ダークカウントレート



OFFのチャンネル

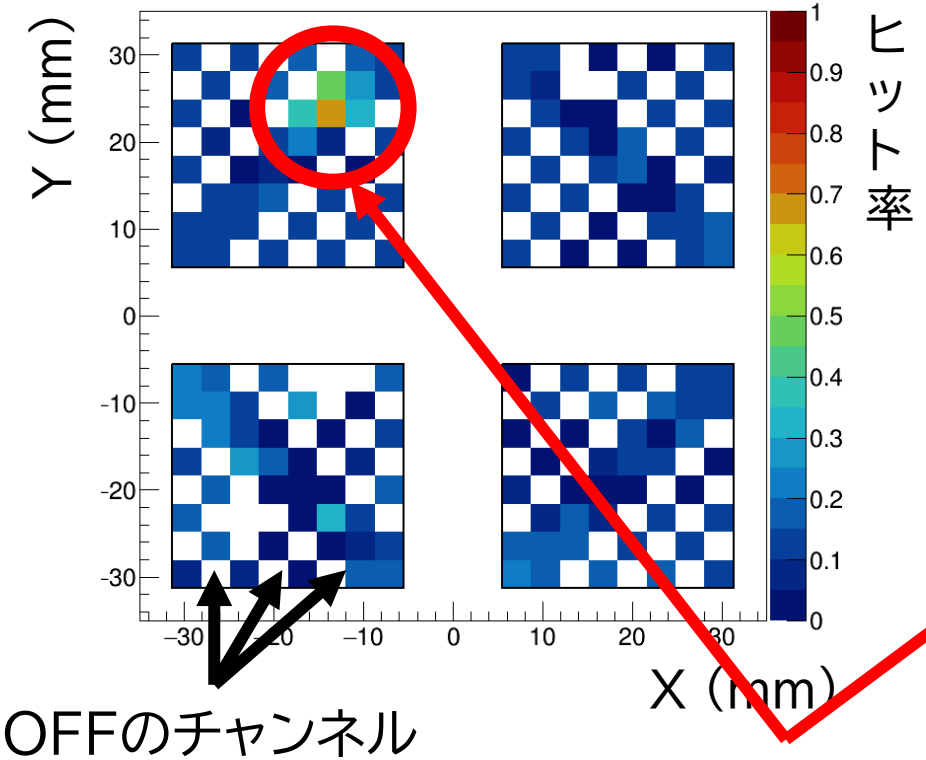
157/256 ch

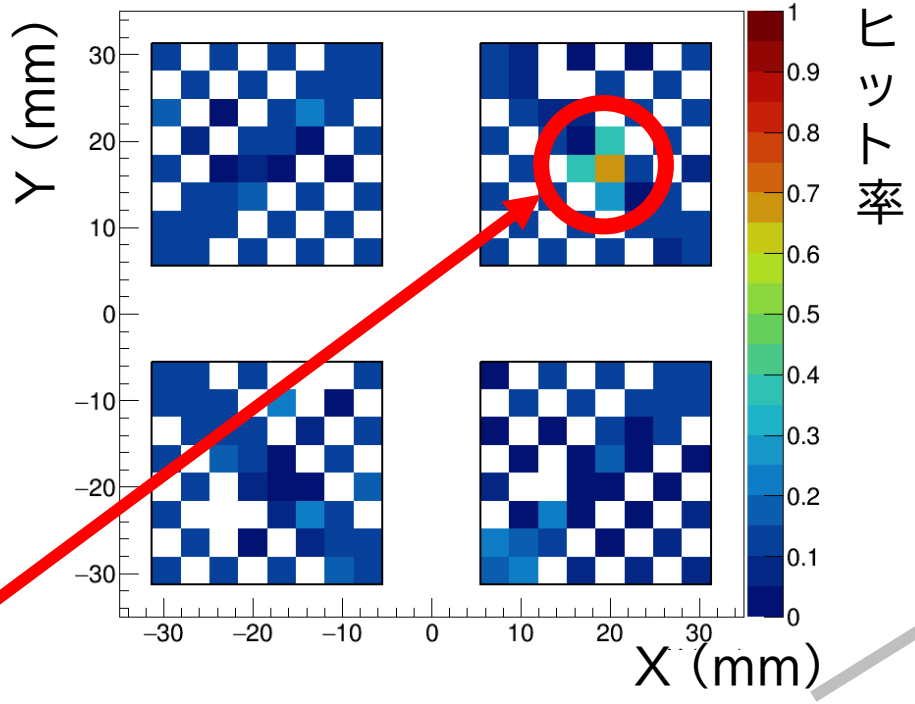
光子入射による照射位置の確認

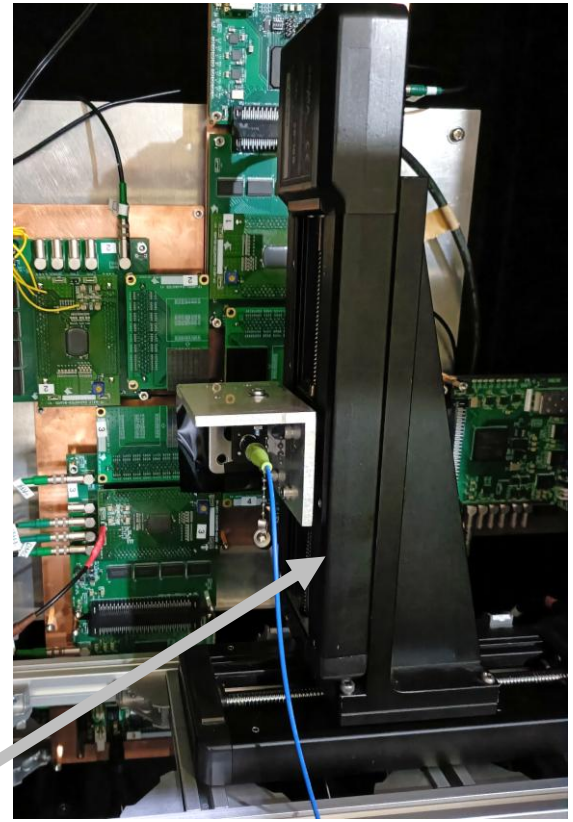


MPPC
配置

- 照射位置を変化させたときのヒット率の変化
- 比較器出力を有効化するチャンネルを切り替えての測定





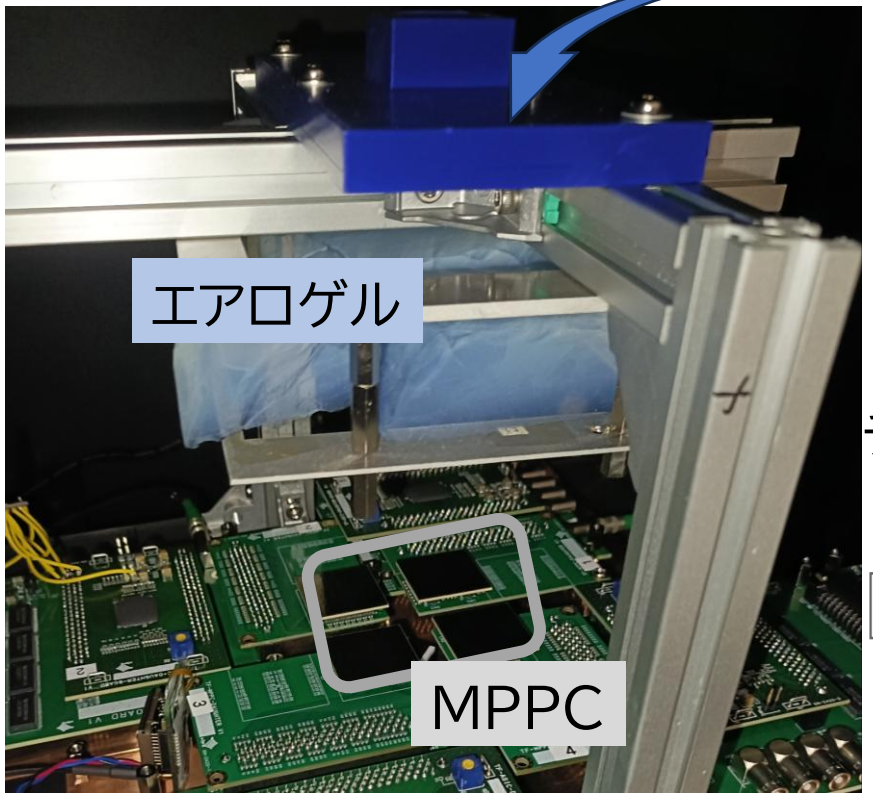


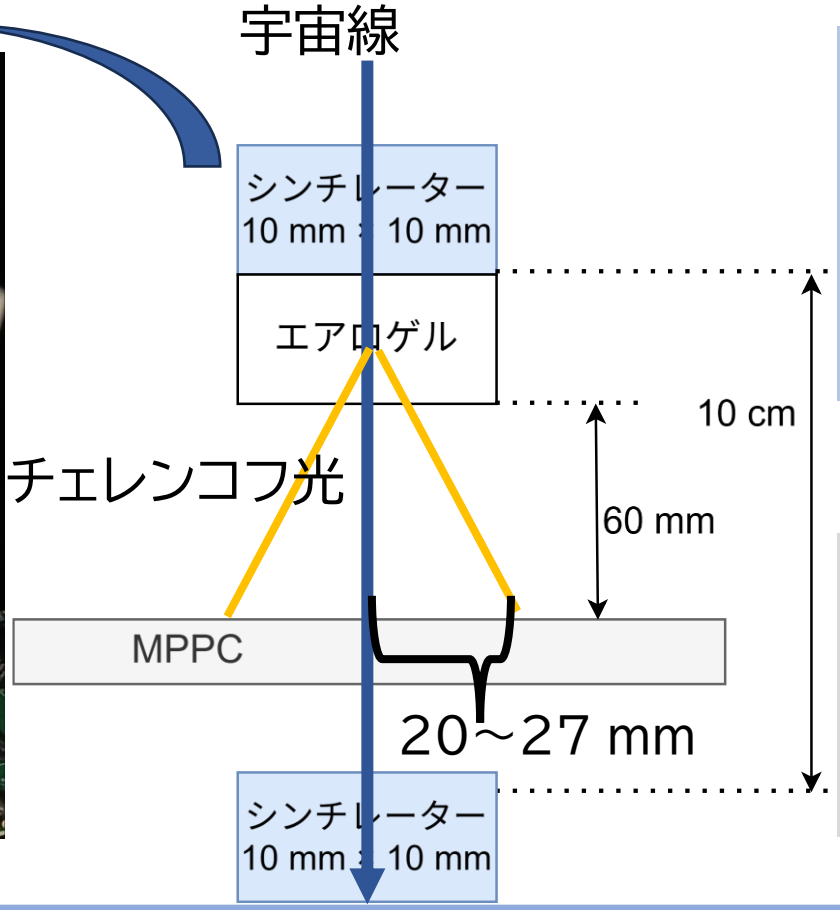
OFFのチャンネル

照射位置の検出を確認 → 移動式ステージを用いて全チャンネルスキャンし **255/256ch**で応答を確認

宇宙線を用いたチェレンコフ光の観測

- 宇宙線によるチェレンコフ光の検出を目指す
- チェレンコフ光は中心からの距離20 ～ 27 mmの位置で検出されると予想



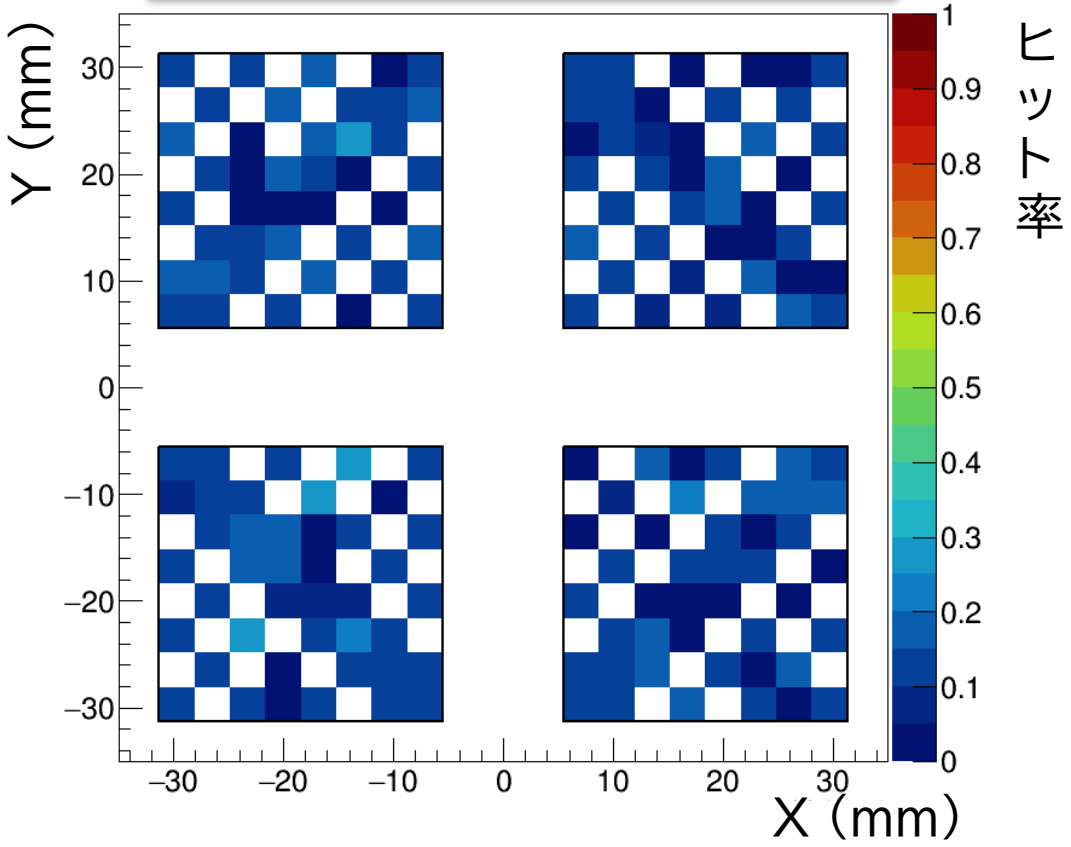


宇宙線
測定時間：41 日（984 時間）
総イベント数：288 イベント
イベントレート：0.29 /時間
（計算値：0.25 /時間 ）

ダークパルス
総イベント数：10万 イベント
12pのセットアップでレーザーを入射せず測定

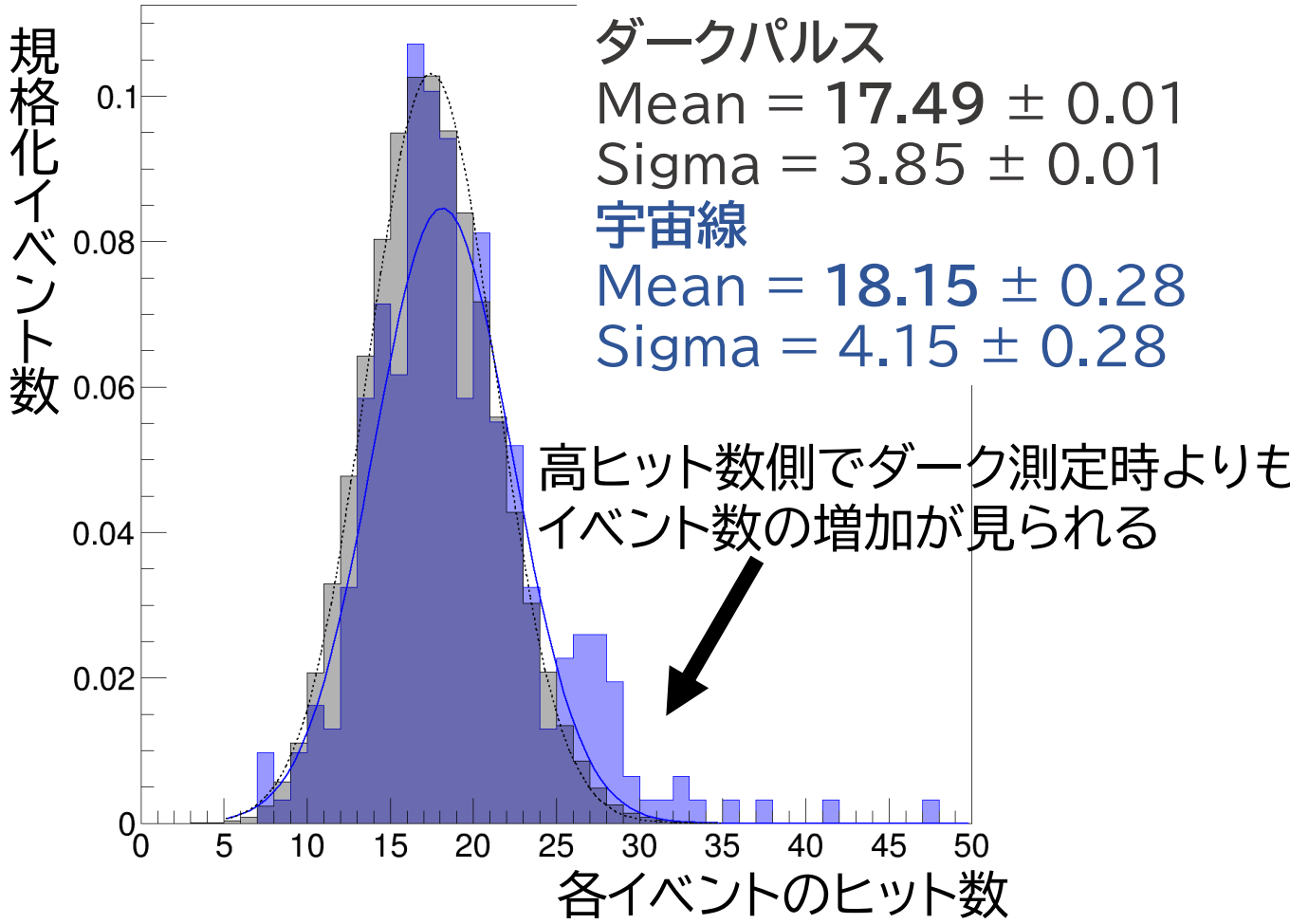
宇宙線を用いた測定結果

宇宙線観測時のヒット率マップ



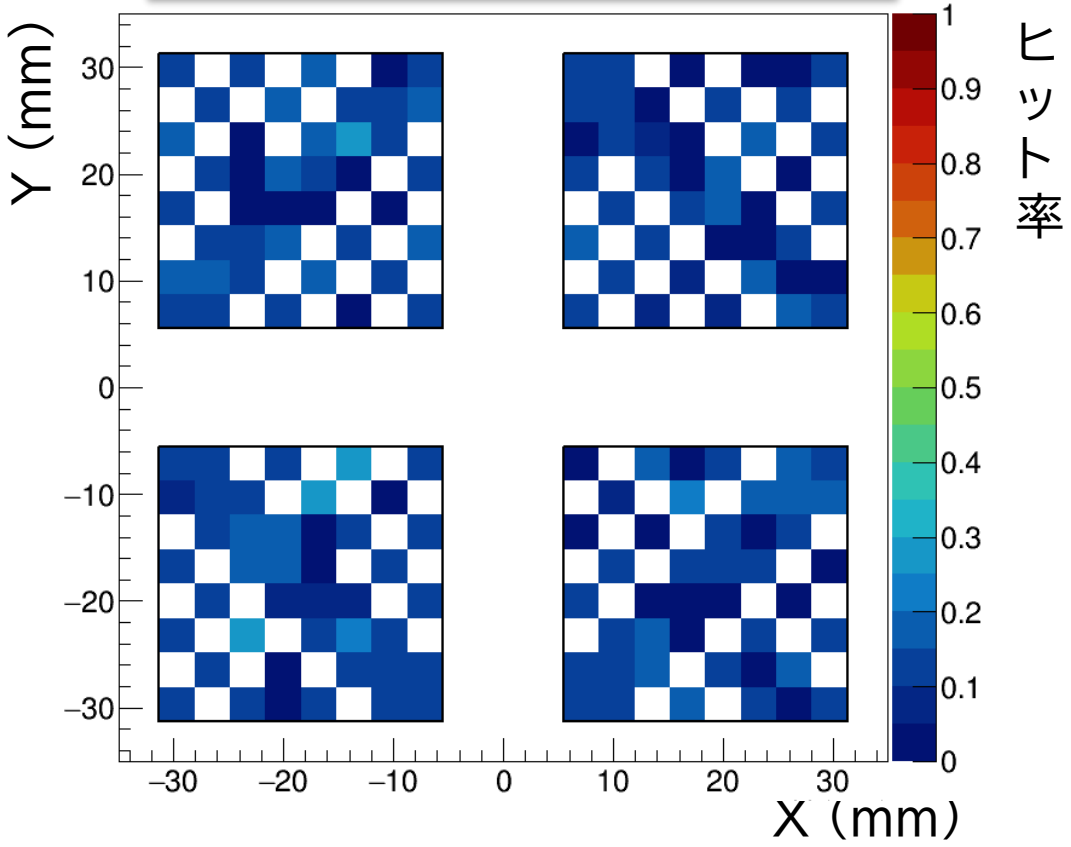
明確なヒット率の上昇は見られない

ダークカウントと宇宙線観測のヒストグラム



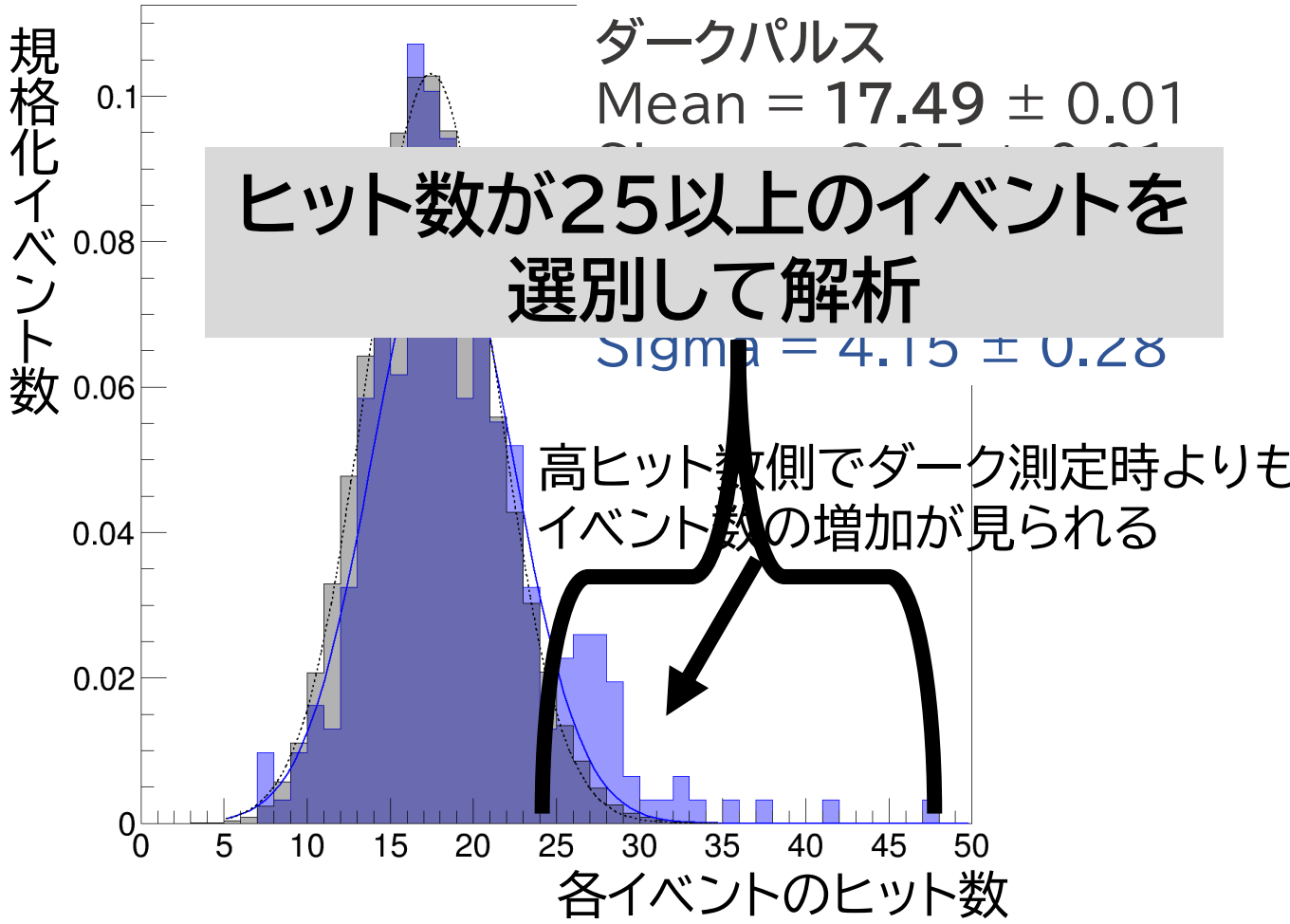
宇宙線を用いた測定結果

宇宙線観測時のヒット率マップ



明確なヒット率の上昇は見られない

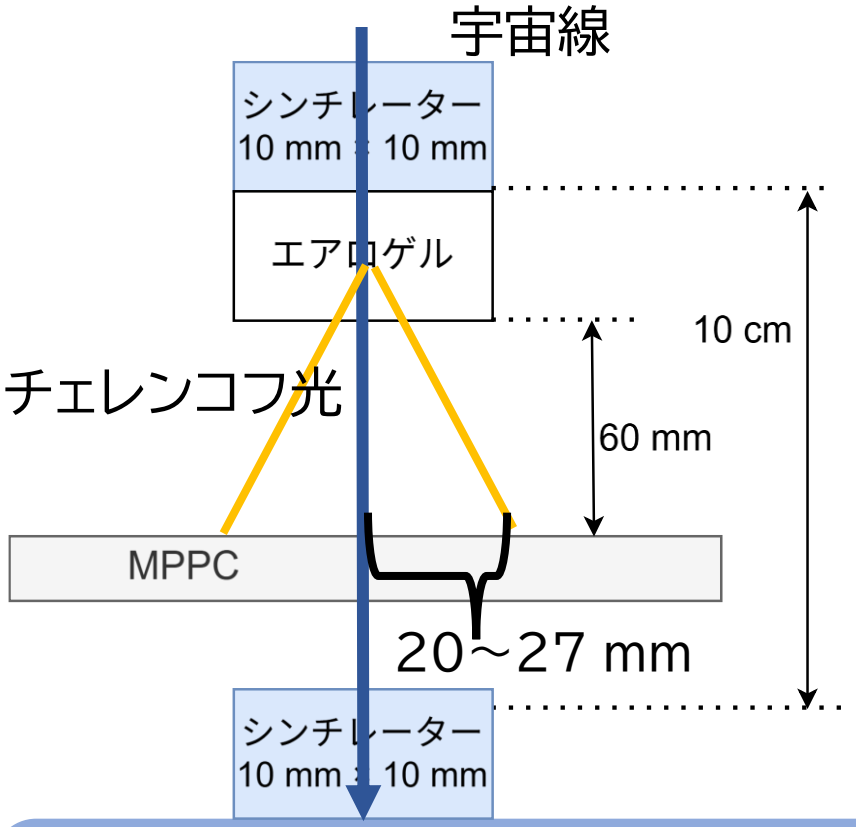
ダークカウントと宇宙線観測のヒストグラム



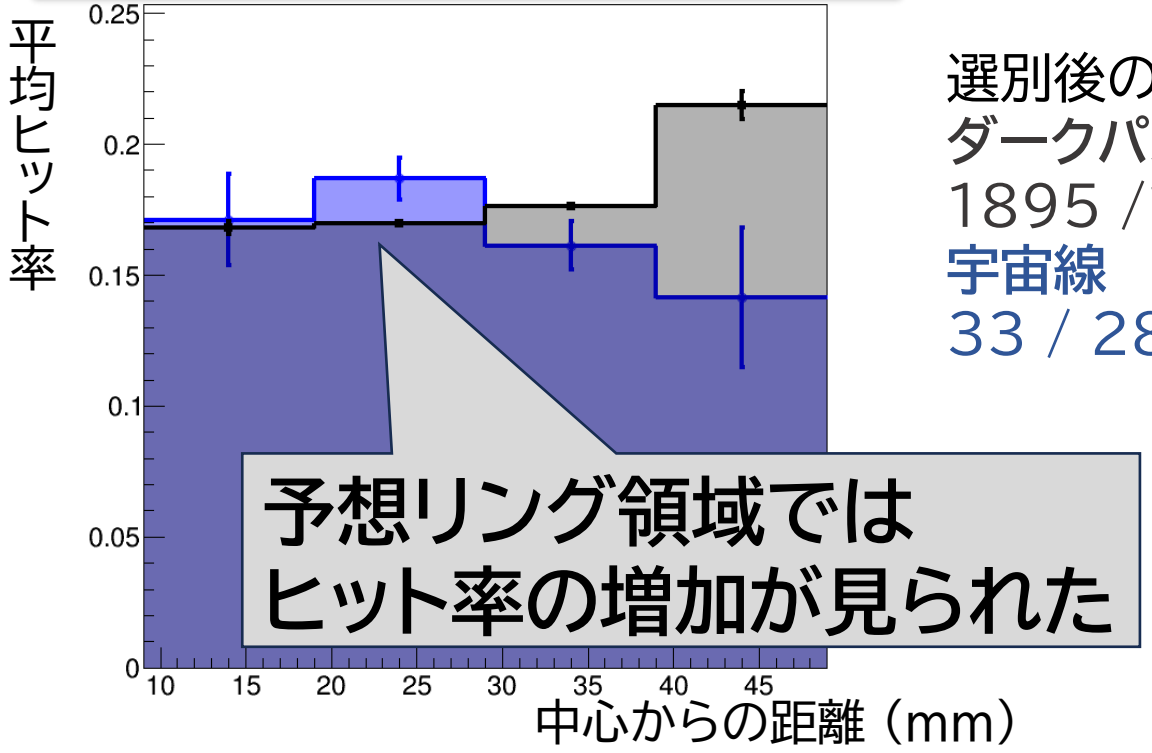
ヒット数が25以上のイベントを選別して解析

イベント選別後の宇宙線の測定結果

- 中心からの距離ごとにヒットレートの平均値を計算
- チェレンコフ光が放出されれば中心距離20～27 mmで検出されると予想



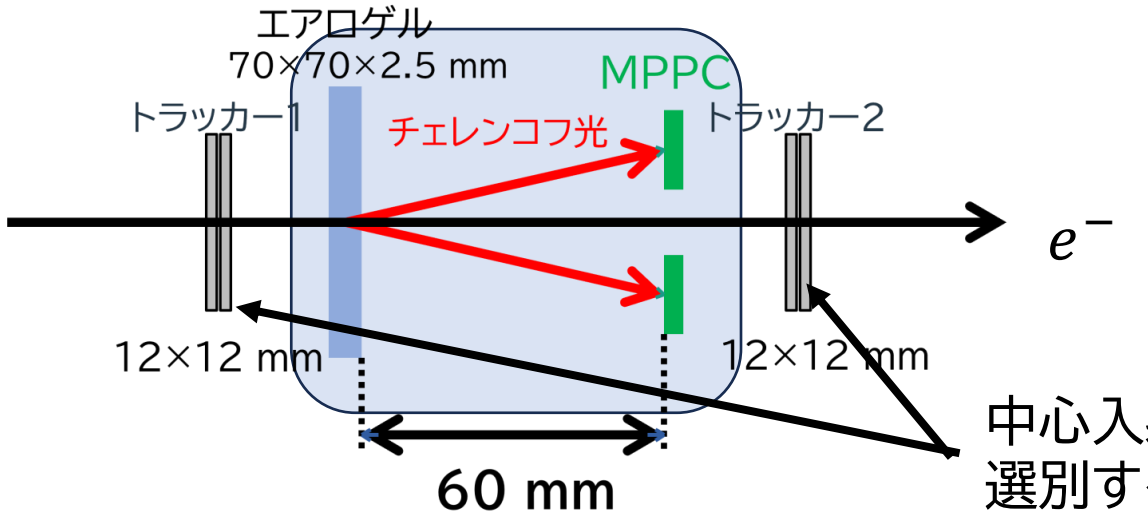
中心距離ごとの平均ヒット率の分布



選別後のイベント数
ダークパルス
1895 /100000 (2 %)
宇宙線
33 / 288 (11 %)

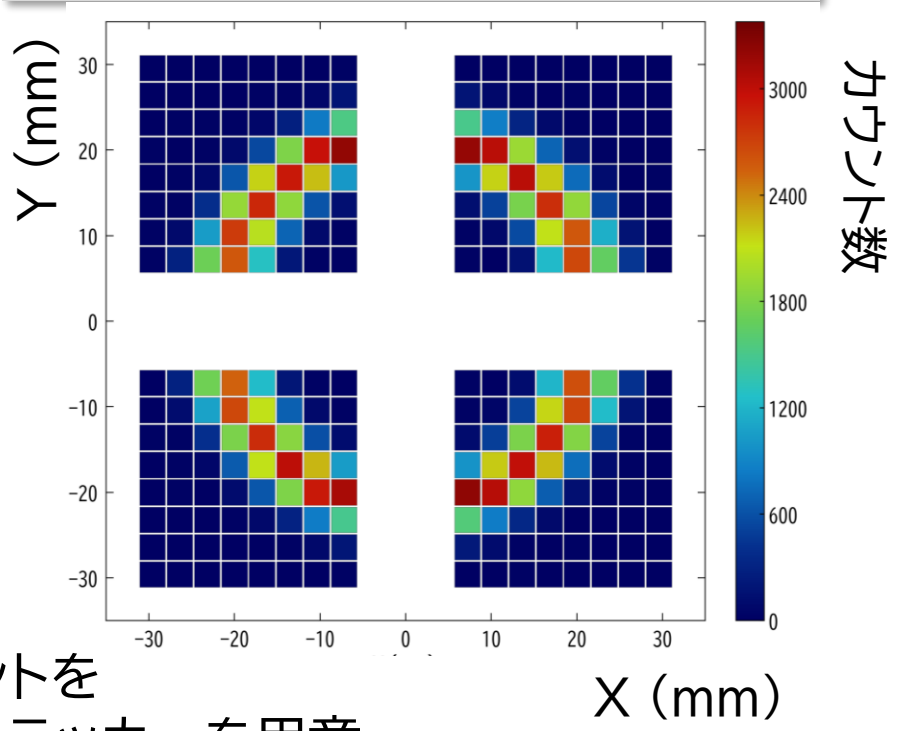
ビームテストに向けて

- 宇宙線測定ではイベント数が足りずリングイメージは見えなかった
  - ➡ KEK,PF-ARのテストビームラインを用いた試験を計画
- 目的
  - チェレンコフリングの再構成
  - 単一光子検出性能の評価
  - 光子検出位置分解能の評価



中心入射のイベントを
選別するためにトラッカーを用意

4GeV電子でのシミュレーション結果

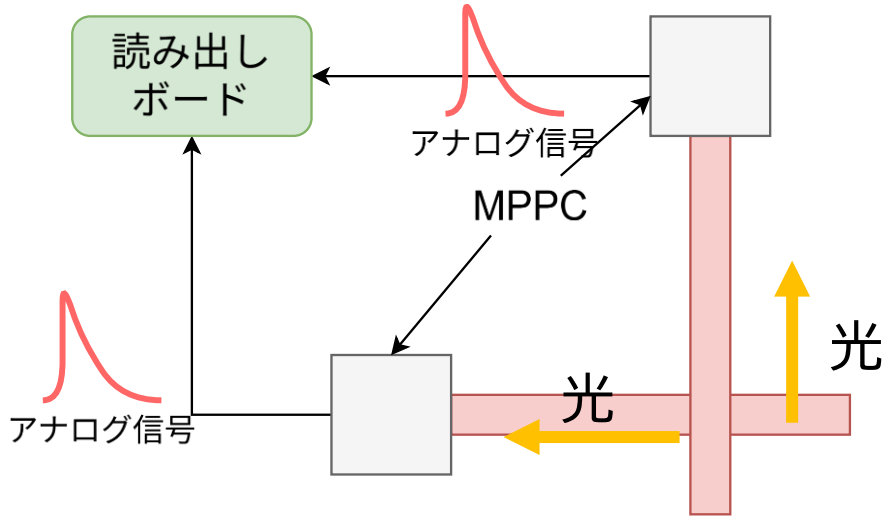


ビームテストへの準備

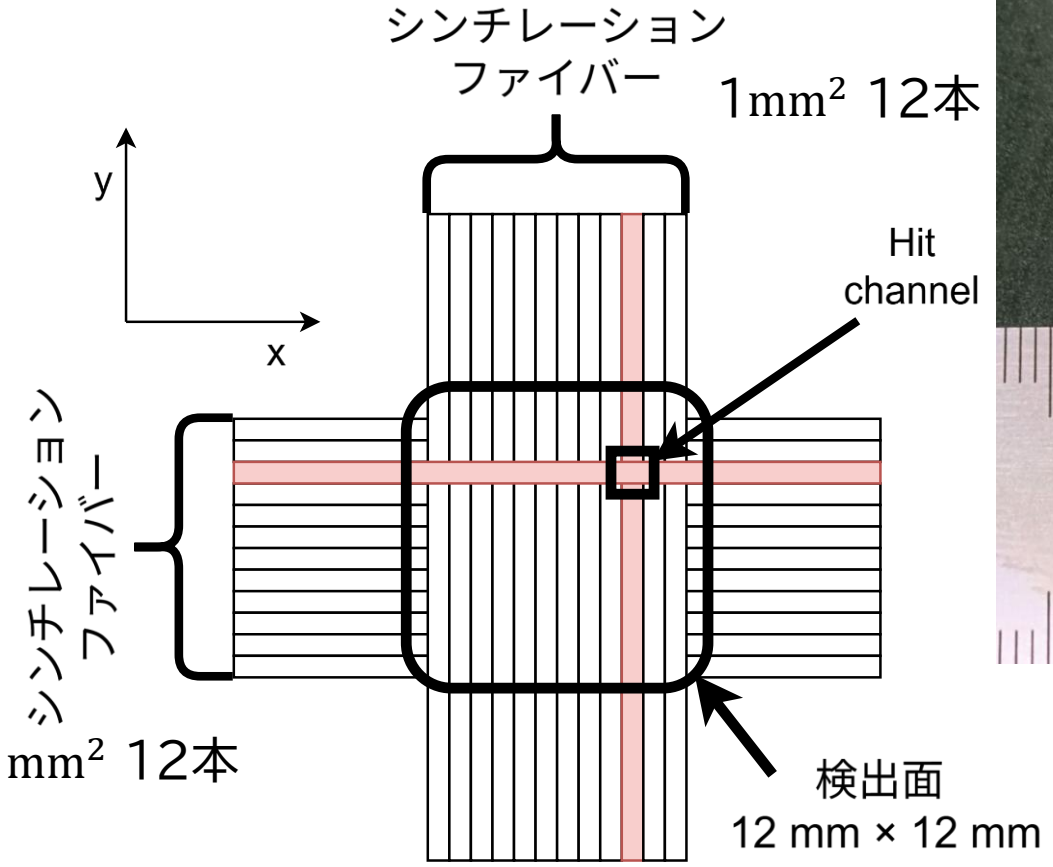
- トラッカーを用いて検出器中心を通ったイベントを選別予定

シンチレーションファイバーを用いた
ファイバートラッカーを作成中

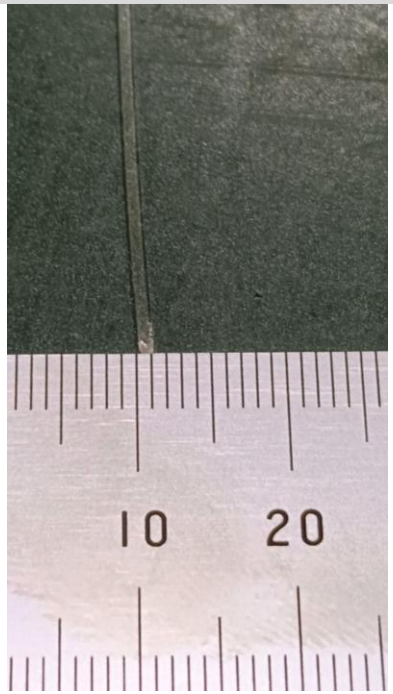
トラッカーからの読み出しの流れ



トラッカーの概略図



使用予定のファイバー



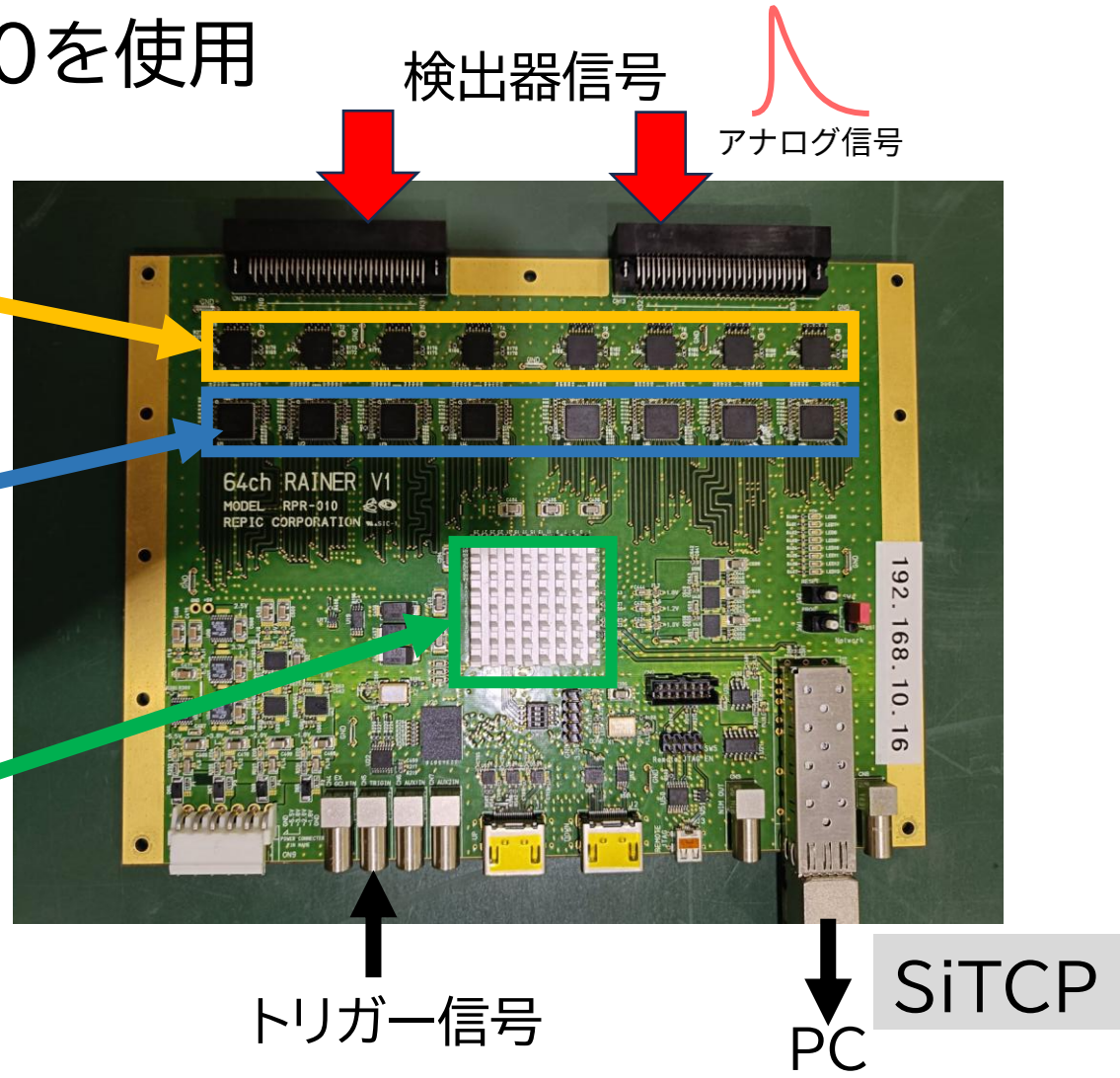
ファイバートラッカー読み出しボード

- ガス検出器用読み出しボードRPR-010を使用

ASD（Amp Shaper Discriminator）
- ADCに増幅したアナログ信号を送信
- TDCにヒット情報を送信

ADC（Analog Digital Convertor）
- アナログ信号をデジタル信号に変換
- 32ns単位での保存

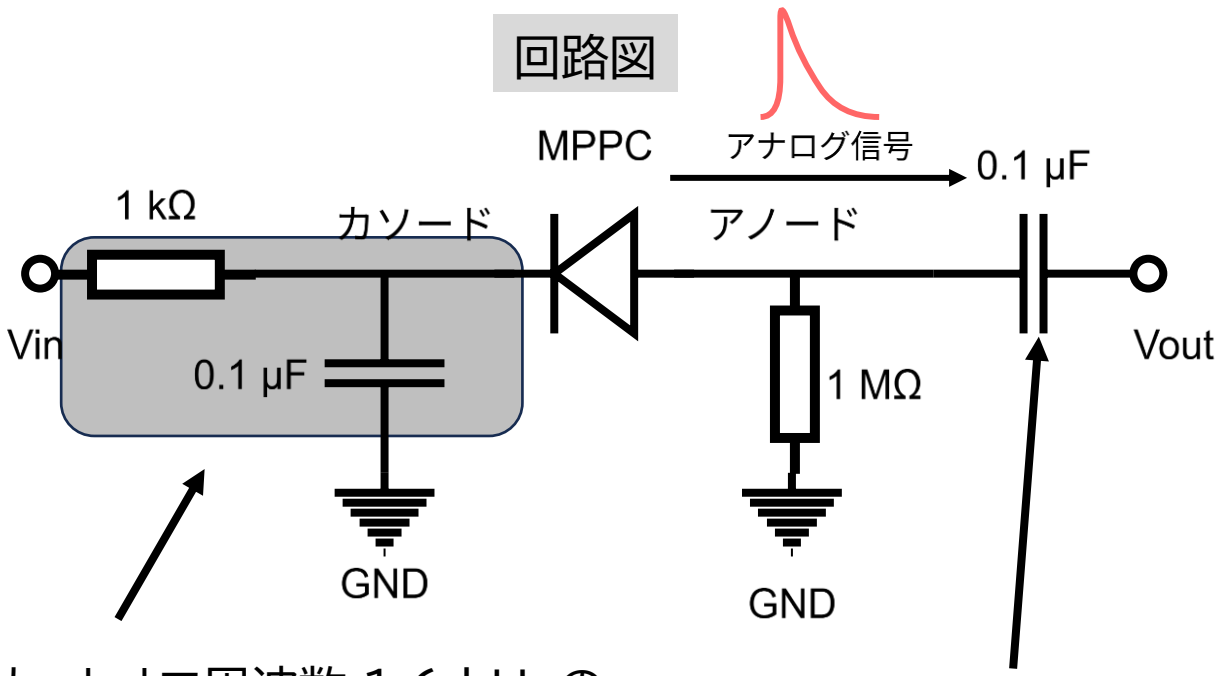
FPGA（Field Programmable Gate Array）
- TDCを内蔵して時間情報を追加
- 8μsの情報を保持



トラッカー読み出しセットアップ

- テスト回路を作成して読み出し試験を実施中

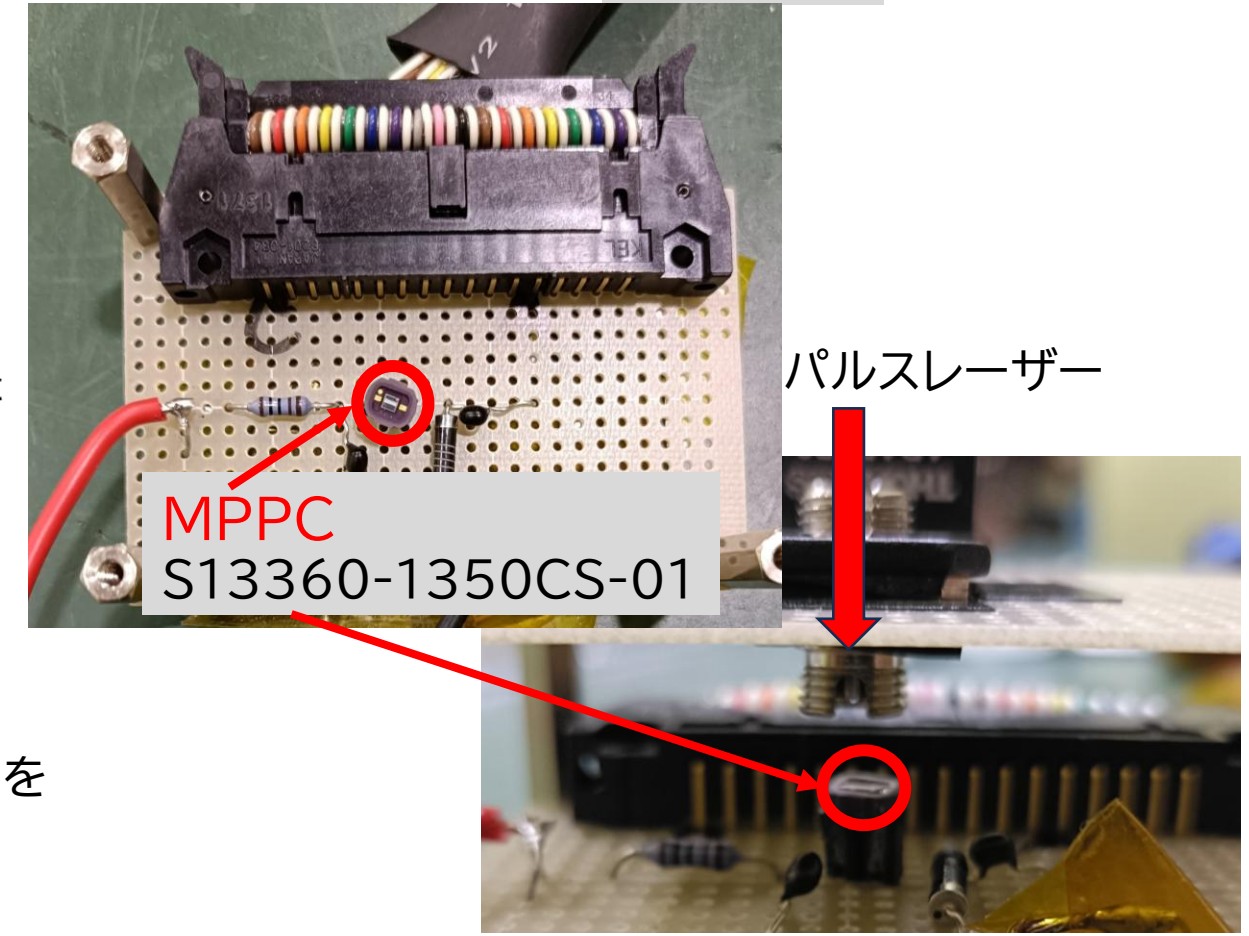
回路図



カットオフ周波数 1.6 kHzの
ローパスフィルターとして作用する

MPPCの電圧変化を
伝えるため

実際の写真



まとめ・今後

- Belle II 実験 ARICHアップグレード用MPPC向け読み出しシステムの性能評価
- 光子照射による評価
  - 読み出し幅を狭めることでダークカウントの影響を約 1/3 に低減
  - 255/256 chでレーザー照射に対する応答を確認
  - 60 × 60 mm^2サイズの読み出しシステムの動作を確認
- 宇宙線による測定
  - チェレンコフ光の予想領域でヒット率の上昇が見られた
  - 宇宙線トリガーによるMPPC読み出しシステムの動作を確認
- 今後
  - KEK,PF-ARテストビームラインの加速器ビームを用いた性能評価を行う
  - ビームテストに向けた準備が進行中

Appendix

宇宙線イベントレートの計算

- 2つのシンチレータは上下に地面と垂直に同一直線状に配置

シンチレータ間距離：$\mathrm{L} = 10\ \mathrm{cm}$

シンチレータ面積：$\mathrm{S} = 1\ \mathrm{cm} \times 1\ \mathrm{cm}\ = 1\mathrm{cm}^2$　1辺：$\mathrm{a} = 1\ \mathrm{cm}$

ミュオンの許容角度：$\tan\theta_{\max} = \frac{\mathrm{S}}{\mathrm{L}} = \frac{\sqrt{2}}{10}$　　$\theta_{max}\ \approx 8.05°$

θが小さいので$\cos\theta$=1と近似

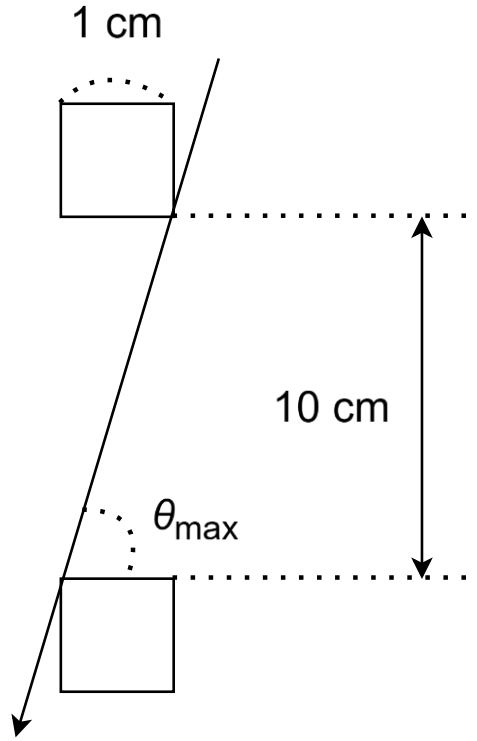
地表付近のミュオンの角度分布：$I(\theta) = I_0\cos^2\theta$

鉛直方向のミュオン強度：$I(\theta)\ \approx I_0 \approx 70\ m^{-2}s^{-1}sr^{-1}\ =\ 7.0 \times 10^2 s^{-1}sr^{-1}$

粒子を測定できる立体角の範囲：$\mathrm{G} \approx \frac{\mathrm{a}^2 \times \mathrm{a}^2}{\mathrm{L}^2} = \frac{1^2 \times 1^2}{10^2} = 1.0{\times}10^{-2}\ cm^2\ \mathrm{sr}$

イベントレート：$R = \mathrm{I_0 G} = 0.007{\times}1.0{\times}10^{-2} = 7.0{\times}10^{-5}\ s^{-1}$

1時間あたりでは：$R_{hour} = 7.0{\times}10^{-5} \times 3600\ \approx\ 0.252$

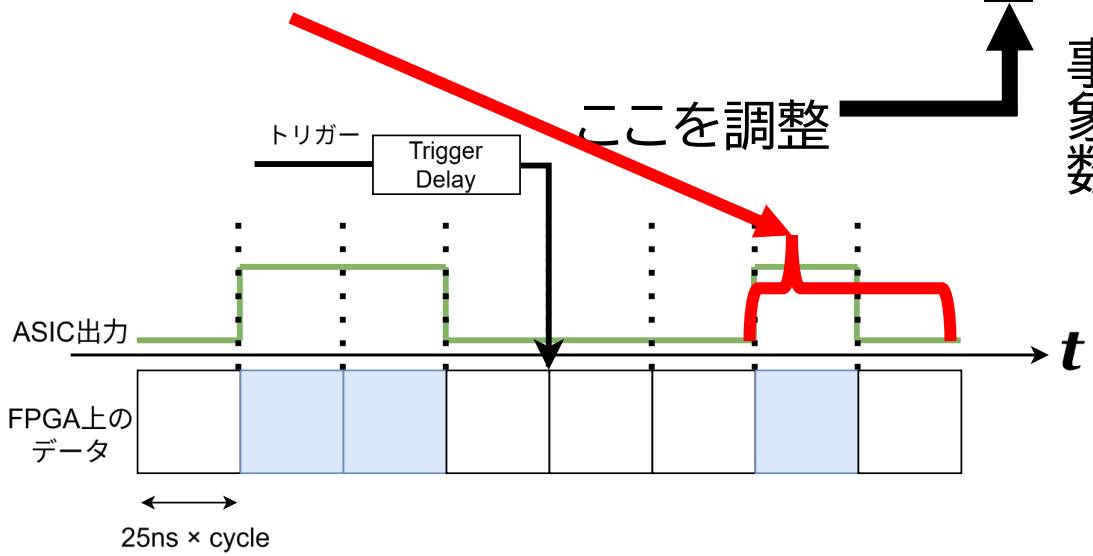


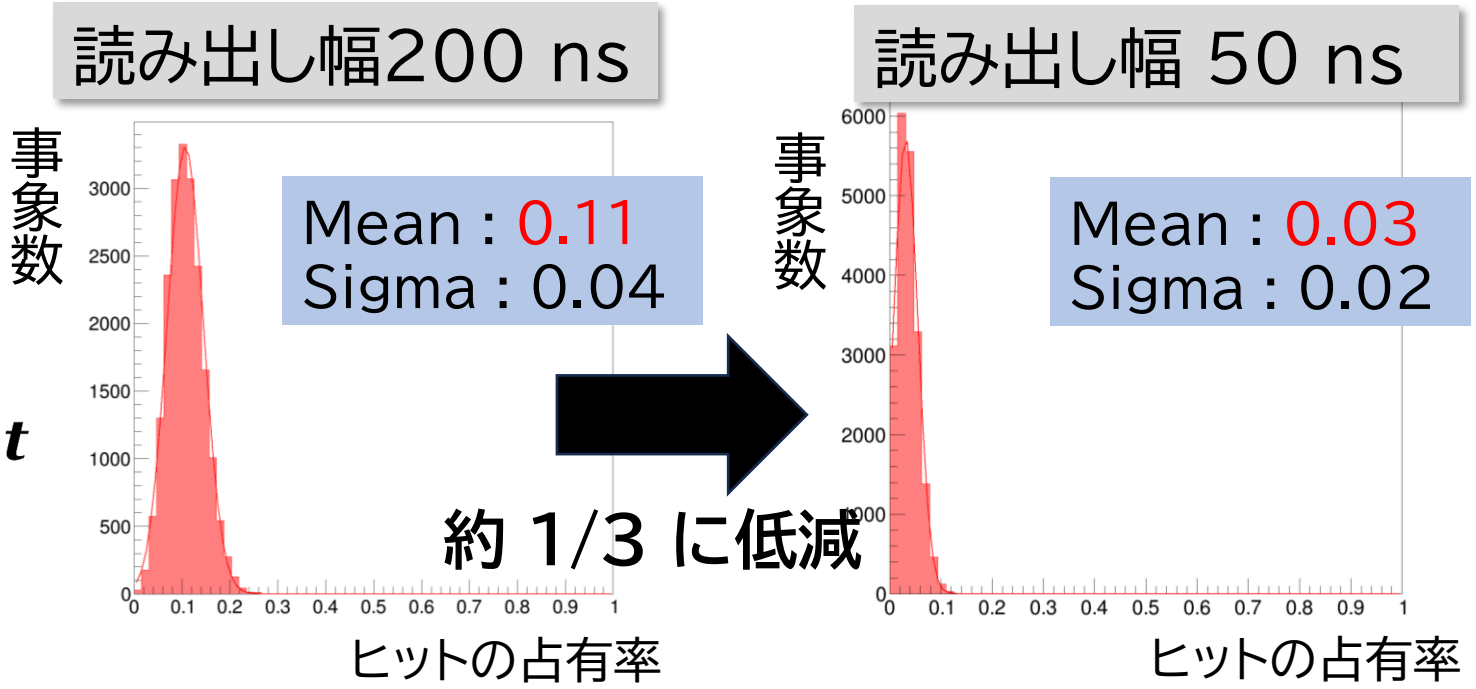
この他にも同時に別々の宇宙線が上下のシンチレータを貫くこともあるのでレートは上がる

ダークパルスの影響と読み出し幅の調整

- さらなる低減のためにFPGAのファームウェアを変更
- レーザーは入射せず読み出し幅を変えながらダークパルスの測定

読み出し幅 = 25 ns × cycle × 2

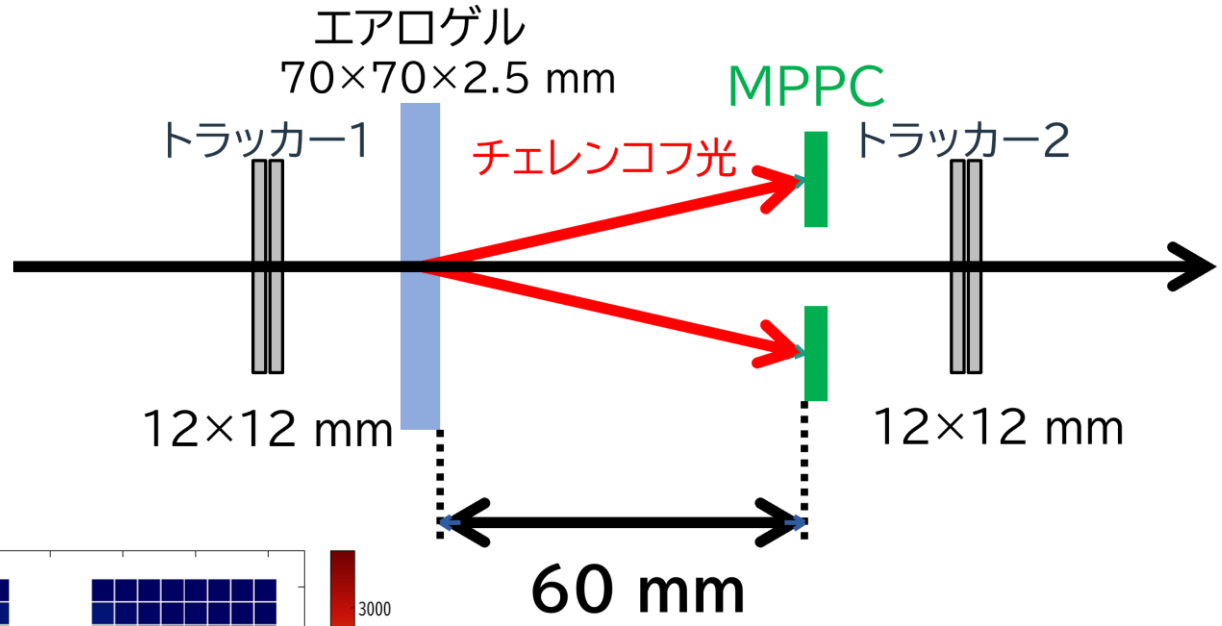


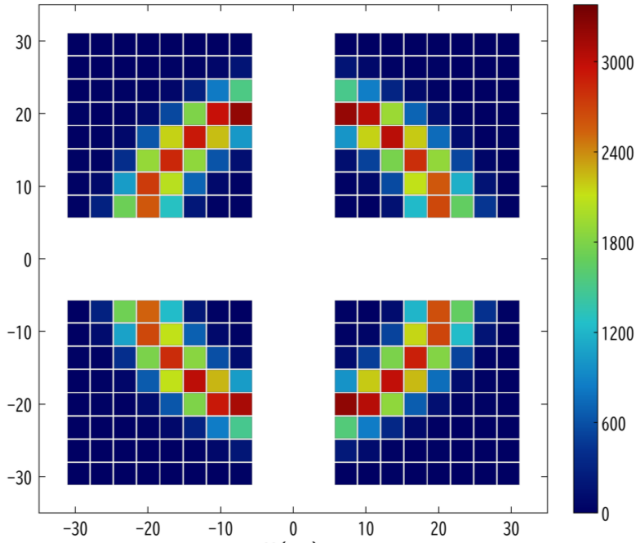


ダークパルスの影響を3%まで低減

シュミレーション条件

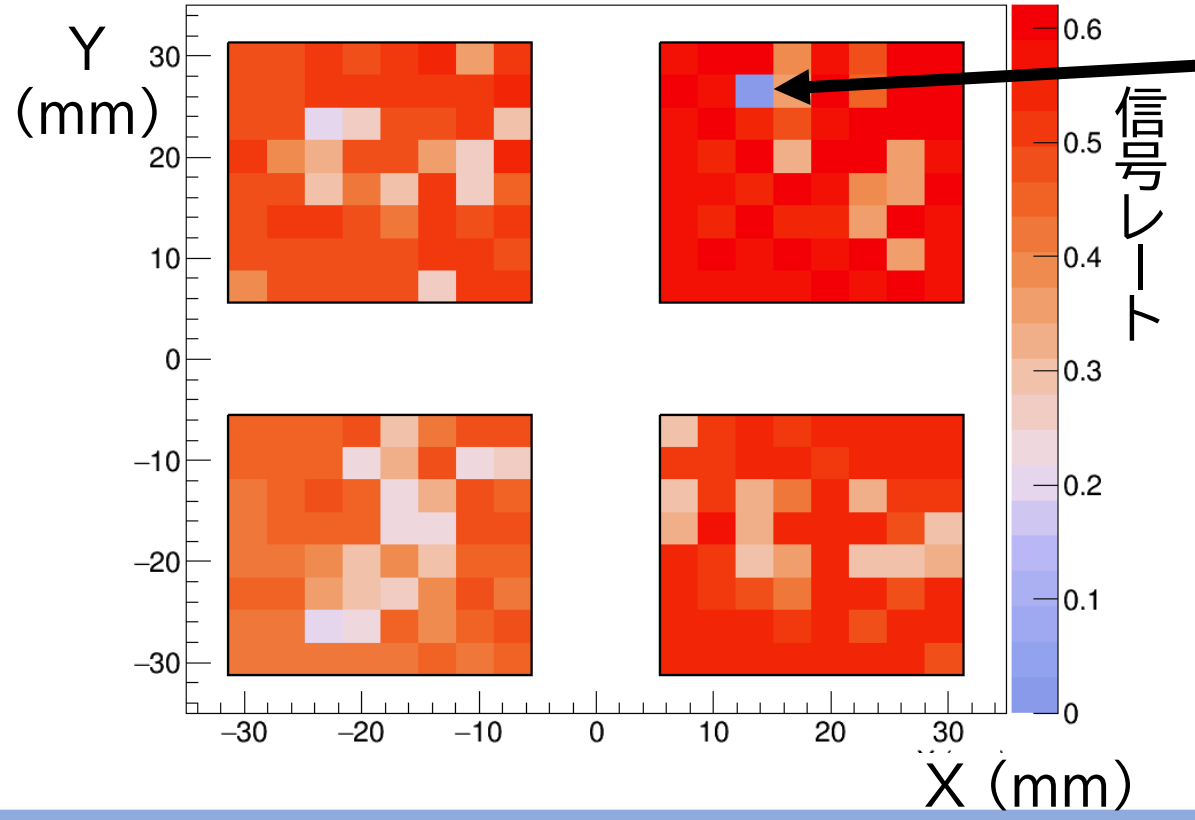
- ◆考慮済み
  - ●電子ビーム4GeV
  - ●エアロゲル-MPPC間60mm
  - ●実際のボードと同じMPPC配置
  - ●ビームの広がり
  - ●1光子以上の到達を1カウント
- ◆未考慮
  - ●MPPCのPDE、ダークパルス
  - ●ヒットタイミングのカット





全チャンネルの健全性の確認

- 半分ずつチャンネルを有効にして測定したものを統合
- レーザー照射時のヒットレートからダークカウントレートをチャンネルごとに引いたものをプロット



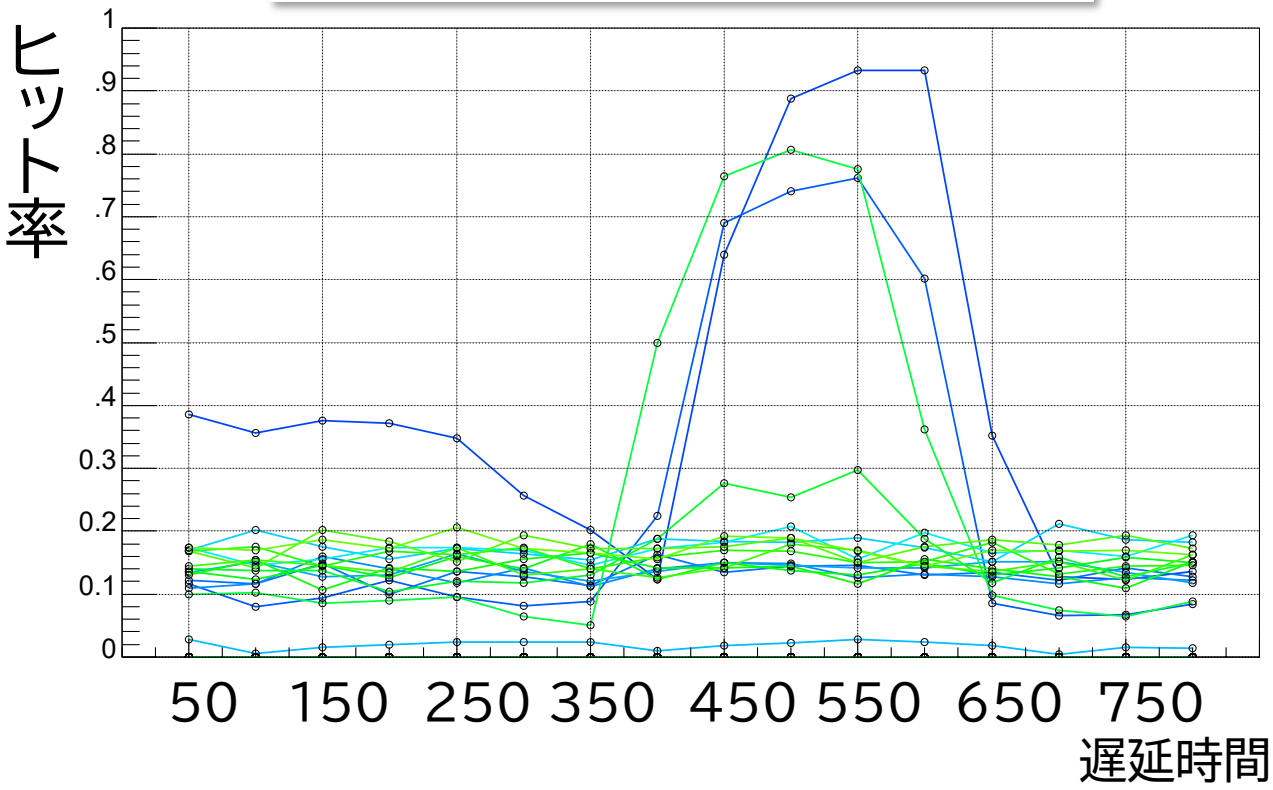
Dead channel
ASIC出力がない

255/256ch で
ヒット位置の検出を確認

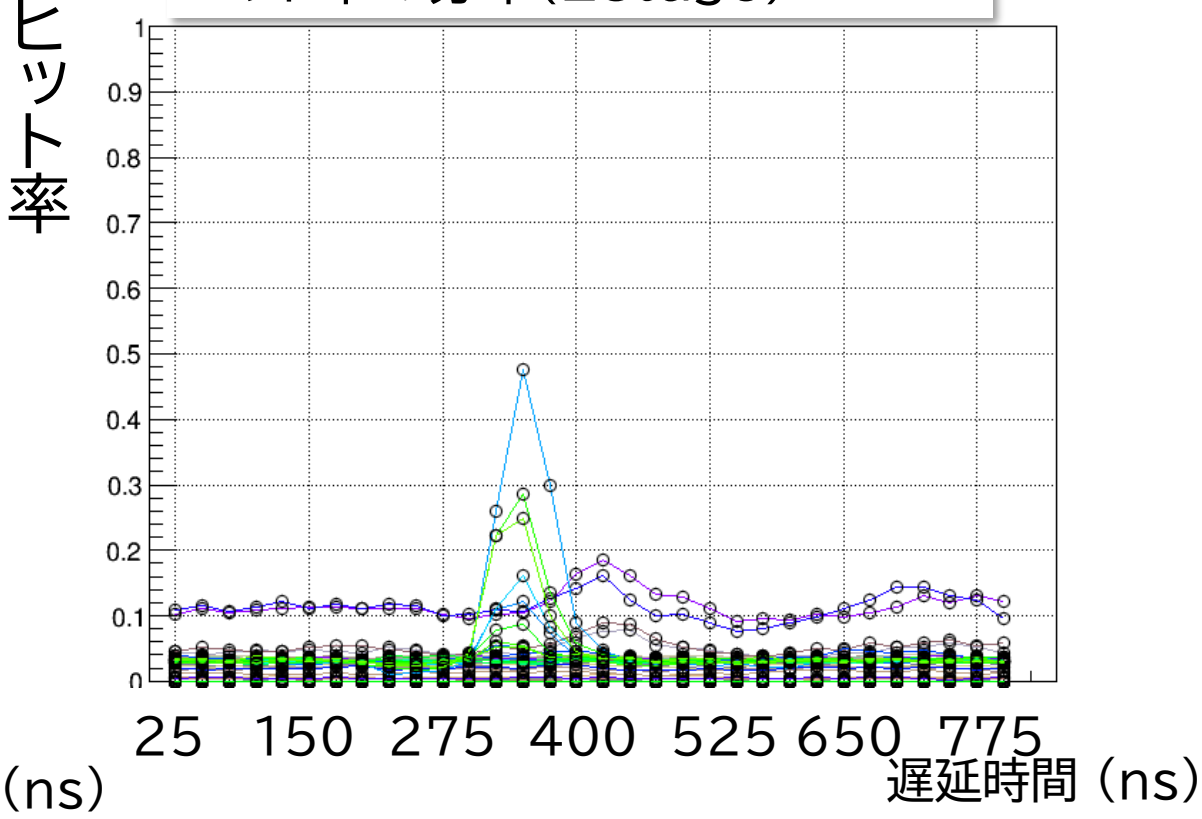
タイミング調整

- 遅延時間の設定値を変えながらレーザーを当てて測定

レーザー照射時の遅延時間による
ヒット率の分布(4stage)



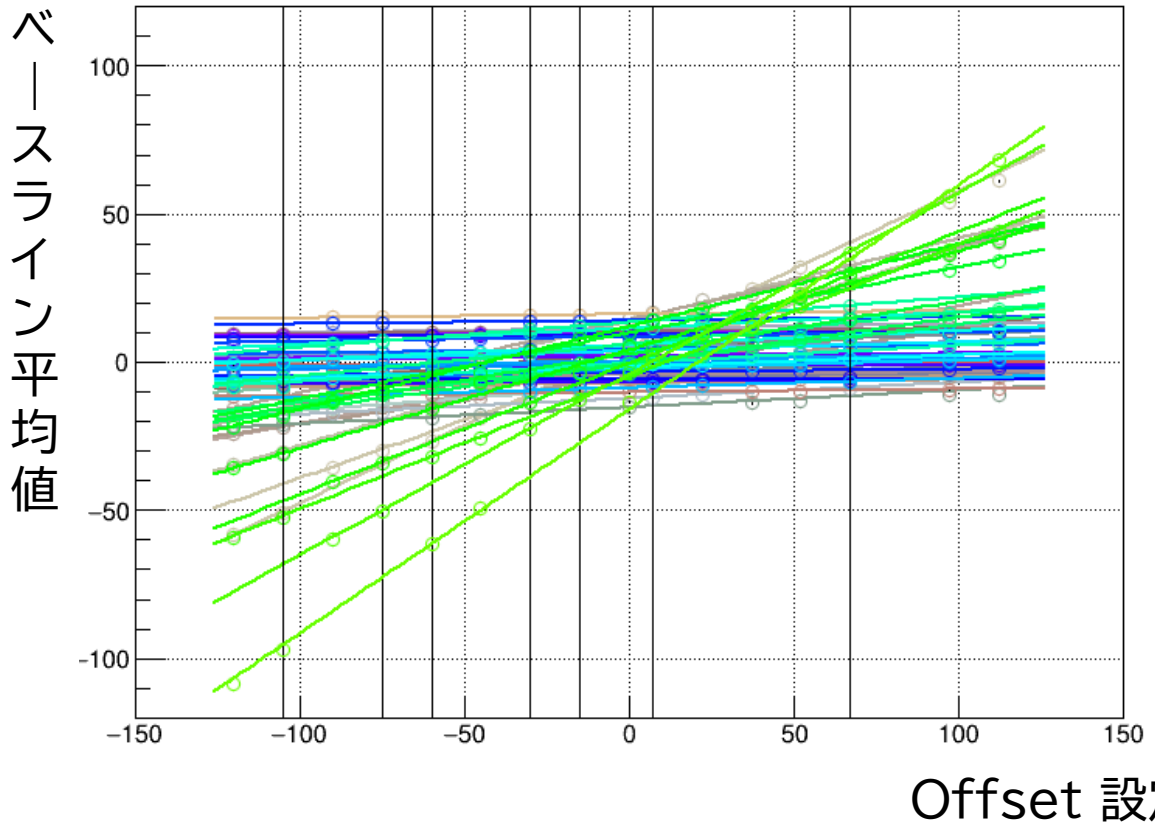
レーザー照射時の遅延時間による
ヒット率の分布(2stage)

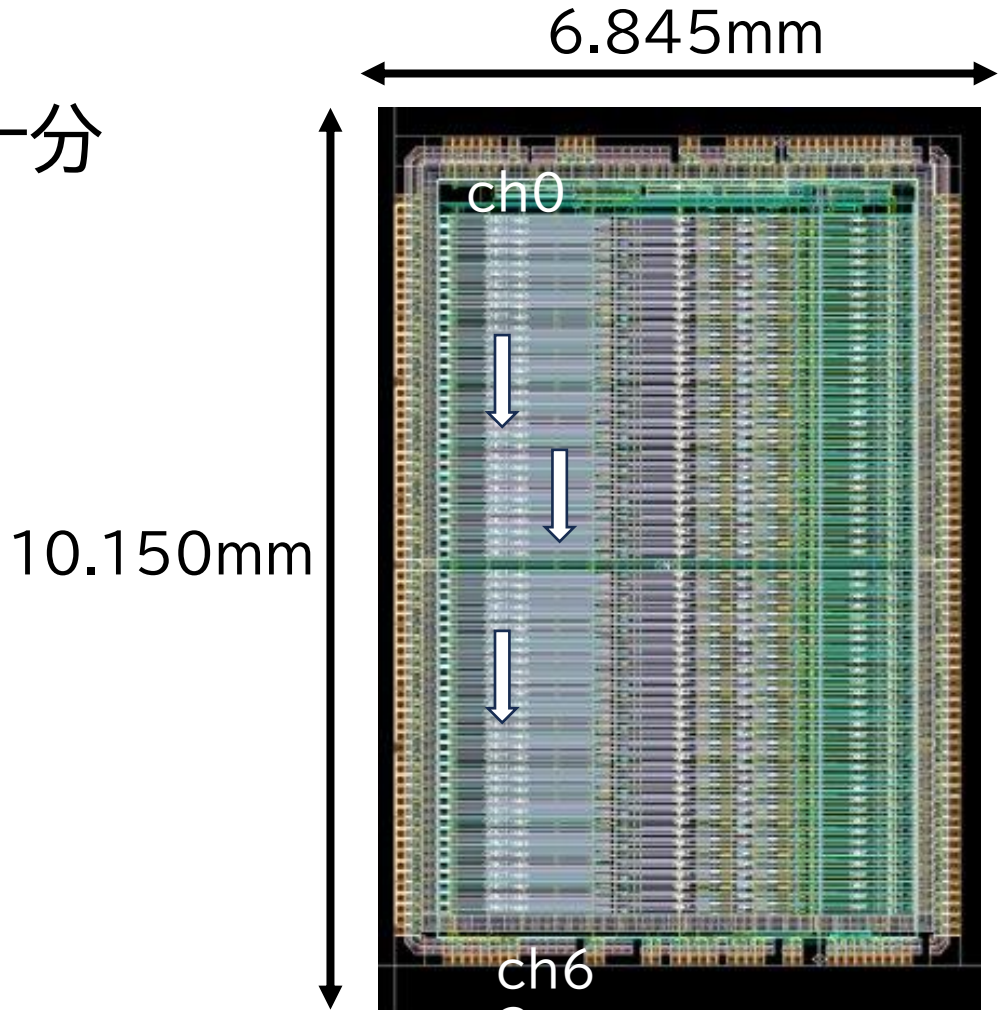


オフセット調整のチャンネル依存性

- チップの中間に電源供給がない

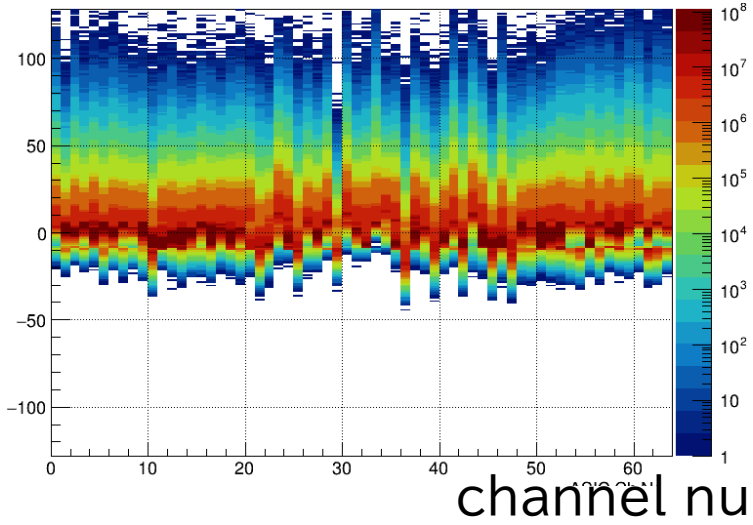
→中間のチャンネルのオフセット調整が不十分



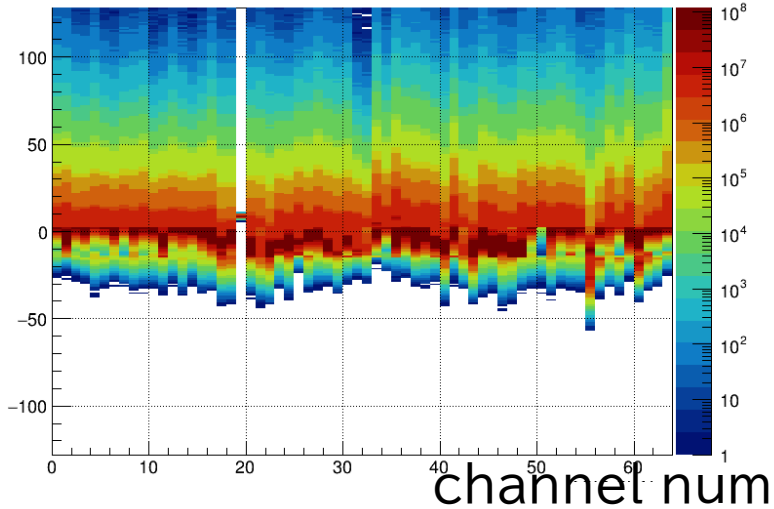


オフセット調整後のベースライン

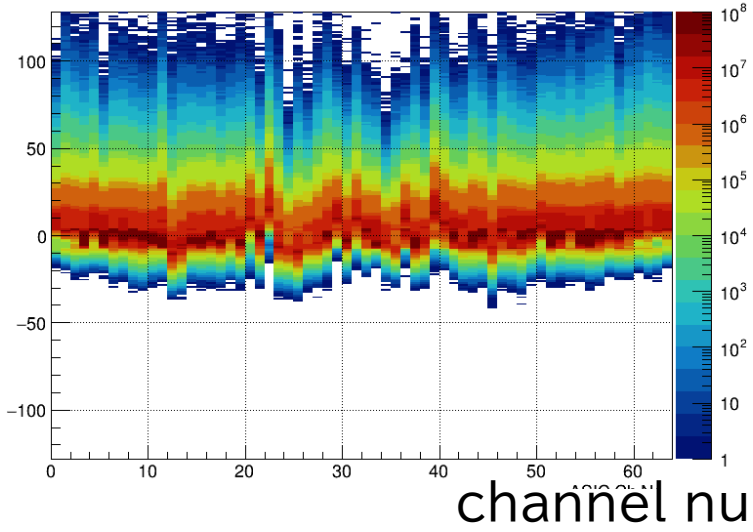
Unit 1



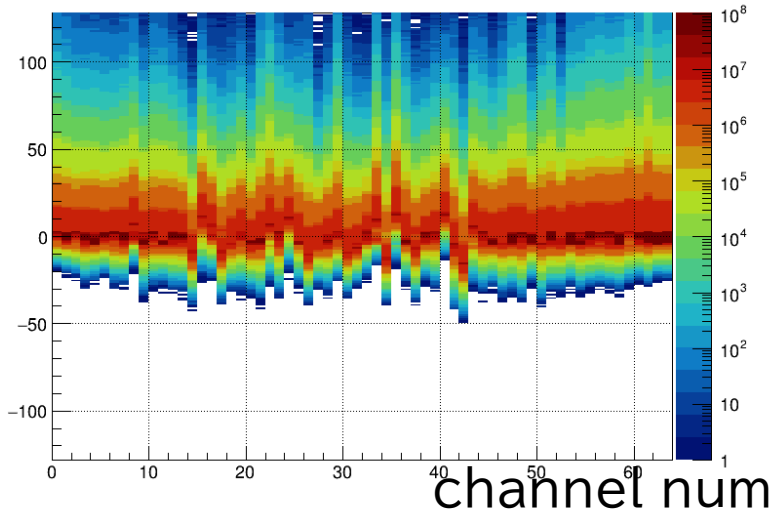
Unit 0



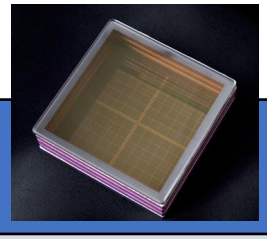
Unit 2

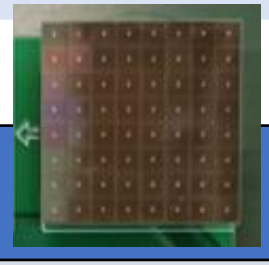


Unit 3



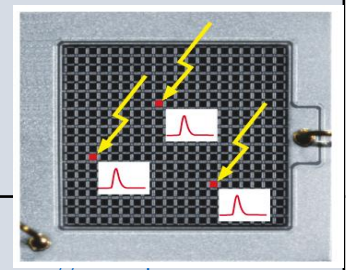
HAPDとMPPCの比較





	HAPD（現行）	MPPC（置き換え候補）
動作原理	加速による増幅（1700倍）とアバランシェ増幅（40倍）	多数のピクセルで構成され、入射した光子数に比例した波高パルスを出力
動作電圧	~8000 V	40~60 V
増倍率	5.6×10^4	10^5~10^6
ダークカウントレート	~0 cps	~1 Mcps
放射線耐性	耐性あり	高耐久サンプルが必要

1チャンネルは
マルチピクセル化
されている



https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/what is mppc.html