

高輝度環境下での SiPM の 1 光子時間分解能測定

前田朱音^A、居波賢二^A、飯嶋徹^{ABC}、吉原圭亮^B、都築識次^A、
児島一輝^A、大久保亮吾^A、鷺見一路^A、中野友也^A、安達佑也^A、
他 Belle II TOP グループ

名大理^A、名大 KMIB^B、KEK素核研^C

研究の背景

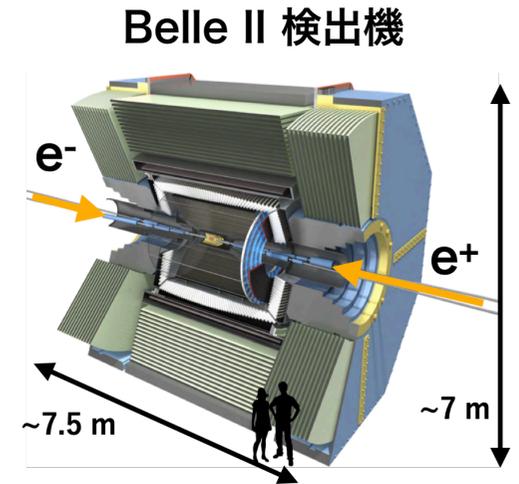
KEK（つくば市）で行われているBelle II実験に参加

Belle II実験

大量のB、D、 τ などを生成し、標準理論の精密測定や新物理探索を行う

今後現目標の5倍以上の高輝度化も検討され、
ビーム由来のバックグラウンド（BG）の上昇が想定される

➡ 将来の高輝度環境下で物理成果を獲得するには検出器のBG耐性が重要



TOP (Time-Of-Propagation) カウンター

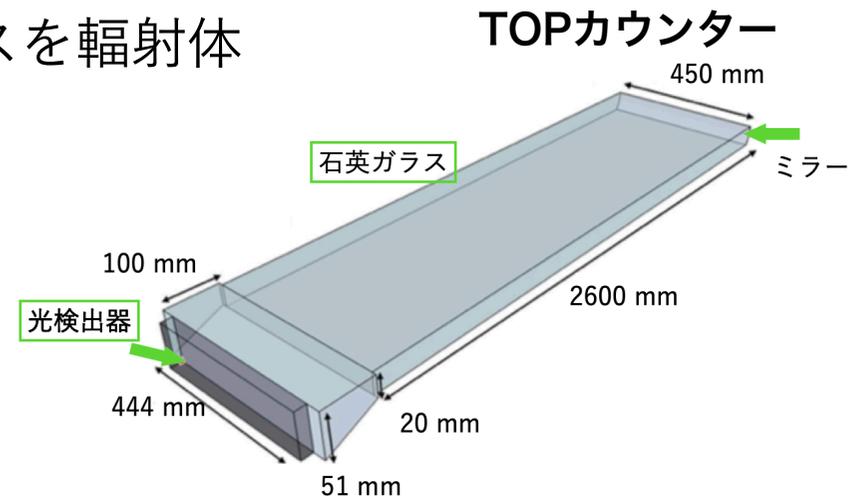
Belle II 検出器で π とK識別を担う石英ガラスを輻射体とするリングイメージ型チェレンコフ検出器

光検出器への要求

性能を決める主なパラメータ：

1光子時間分解能、光子検出効率

動作環境：磁場中（1.5 T）、放射線



現状の光検出器

Micro-Channel-Plate (MCP)-PMT

時間分解能：34.3 ps

光子検出効率 (360 nm)：29.3%

放射線耐性と磁場中での動作保証

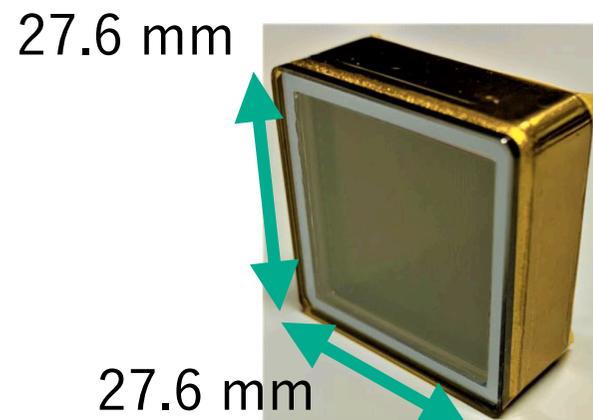
▶ TOP の高い粒子識別性能を実現

データ取得による積算出力電荷の増加に伴い量子効率が低下する問題が存在

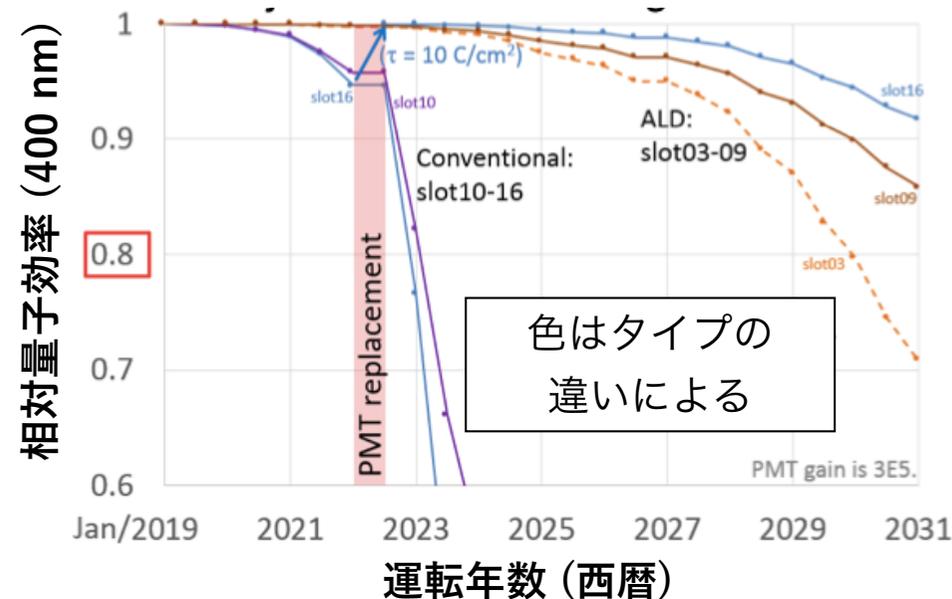
▶ 検討されている高輝度、高BG下で光検出器の長寿命化が必要

新しい光検出器導入を検討

MCP-PMT



運転年数に伴う量子効率の変化



Kodai Matsuoka. The Belle II Experiment: Status and Prospects. ICHEP2020. July 2020.

SiPMの利点

SiPM (Silicon Photomultiplier)

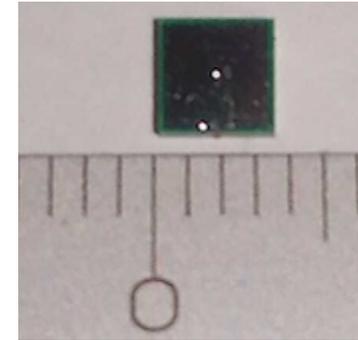
ガイガーモードアバランシェフォトダイオードをマルチピクセル化

公称性能

時間分解能： $O(100 \text{ ps})$

光子検出効率(400 nm)： $\sim 35\%$

ダークカウントが多い ($\sim 0.5 \text{ MHz}$)

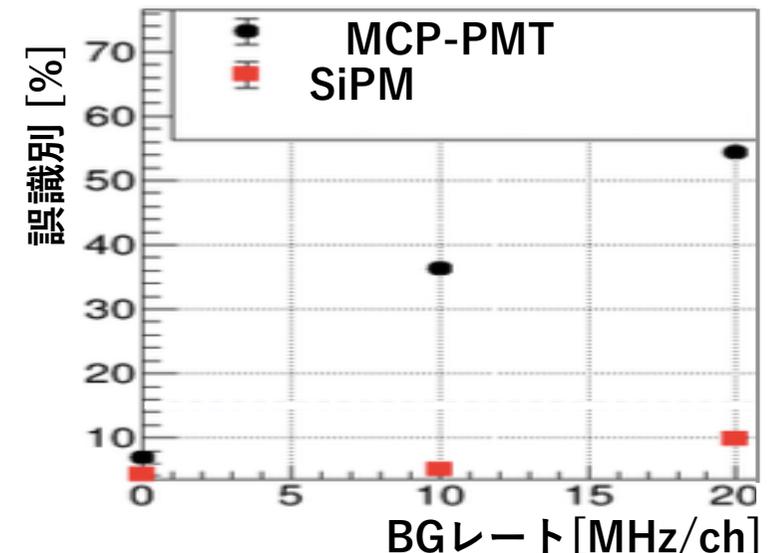


SiPM導入の利点

- 磁場に対して安定
- 出力電荷量で劣化しない
- 光子検出効率の向上による粒子識別性能向上の可能性 (シミュレーション)

(第75回年次大会 17aG22-6 前原)

光子検出効率を変更したの誤識別率



検討課題

検討課題



- 時間分解能の低下



100 ps程度であればTOPの粒子識別性能に影響はない
(2020年秋季大会 15pSF-10 前原)

- パイルアップによる影響

- SiPMの出力波形は一般に80~120 nsでMCP-PMTの数十倍

- 現目標輝度で想定されているヒットレートは
約0.5 MHz/4 mm × 4 mm

- 中性子損傷によりダークカウントが増加

現目標ルミノシティで予測されている
1MeV換算の最大年間中性子照射数 : $10^{10} - 10^{11}$ 中性子/cm²



パイルアップ事象では有限の立ち上がり速度で時間分解能が悪化し、TOPの性能低下を招く

研究課題

対策案

低温環境での動作：中性損傷によるダークカウントの発生を抑制
波形解析：パイルアップの影響を抑制
(現行のTOPの読み出しで使用)

- ✓ -20 °Cの低温環境下においてダークカウントが低下
- ✓ 時間分解能が100 ps 程度 (2021年年次大会 14pT2-5 前田)

研究内容

1. 信号としてのレーザー光に加えBGとしてLED光を入射し、時間分解能への影響を評価する
2. 読み出し系をTDC-ADCからデジタイザーに変更し、波形解析による時間分解能への影響を評価する

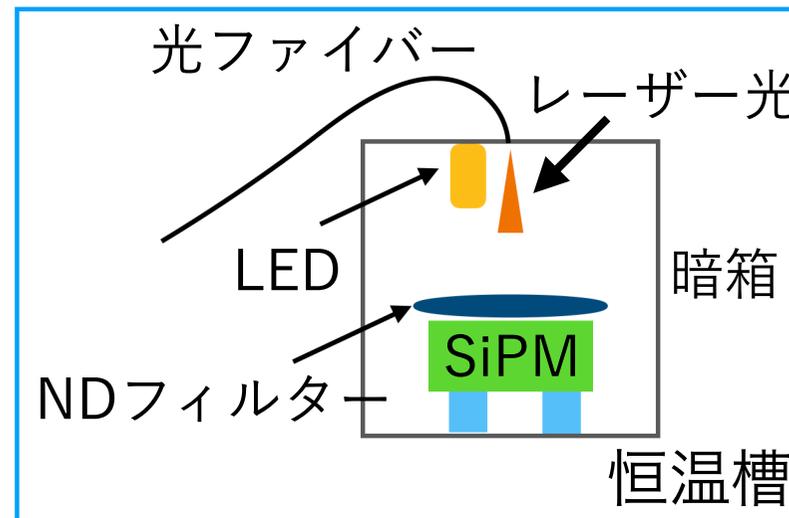
BG入射のためのセットアップ

浜松ホトニクス製のS13360-3050VEを使用

チャンネルサイズ : 3 mm × 3 mm

ピクセルピッチ : 50 μm

500 Hzで発光するレーザーと
光量可変なLED(660 nm)を設置

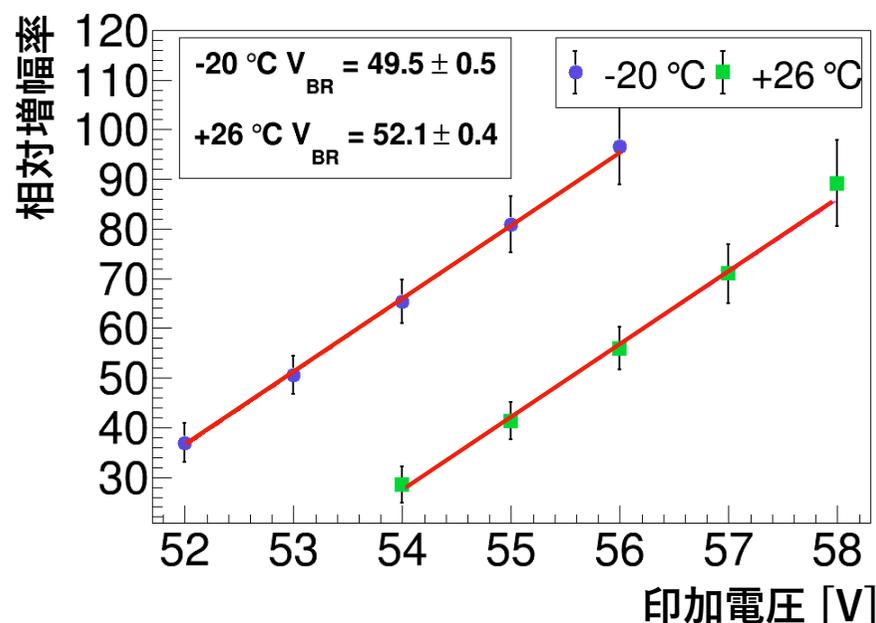


温度変化による増幅率の変動を防ぐため、
動作電圧を各温度毎に決定

CAMACのADCカウントから各温度に
おける降伏電圧を算出

動作電圧 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} : 52.5\text{ V}$
 $+26\text{ }^{\circ}\text{C} : 55.1\text{ V}$

降伏電圧の導出



デジタイザー

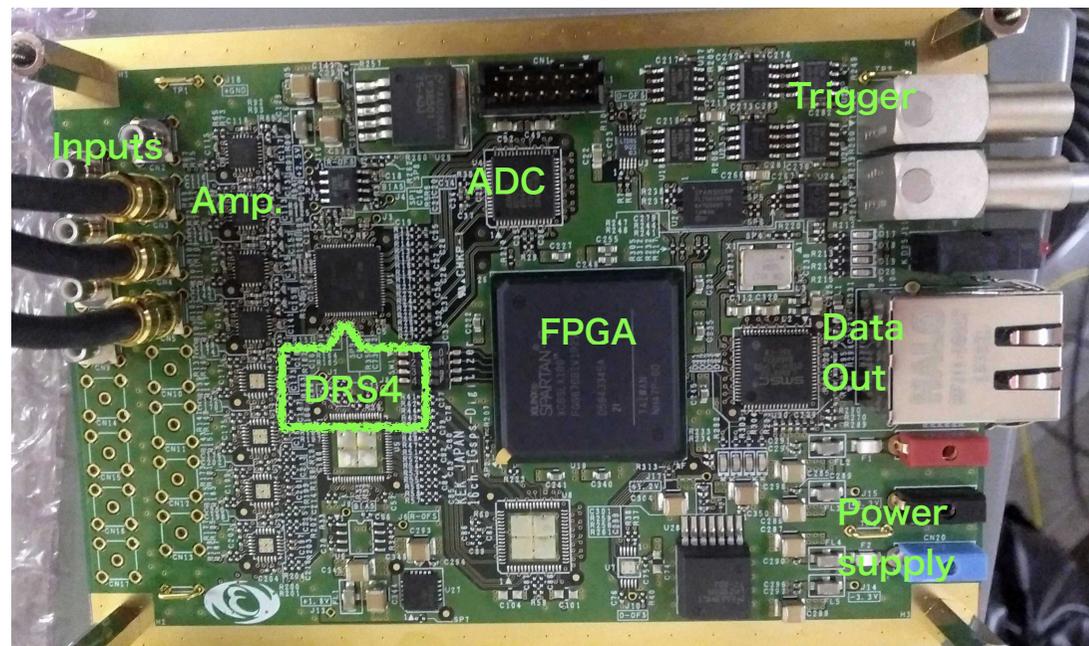
使用したデジタイザー

DRS4を使用したデジタイザー
(BBTX-112) を使用した

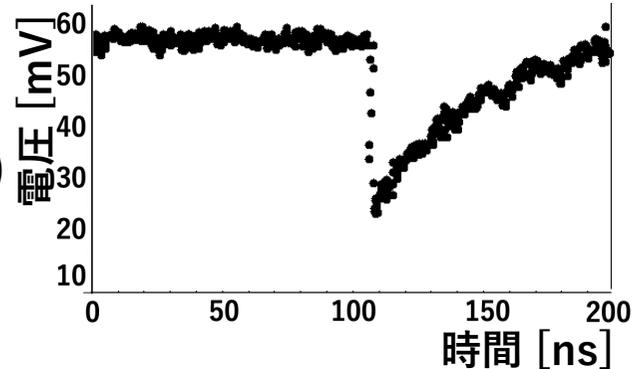
DRS4が1024個のコンデンサー
を用いて5 GHzで波形情報を
サンプリング

波形解析とサンプリング誤差に
対する補正でサンプリング周期
以上の時間分解能を持つ

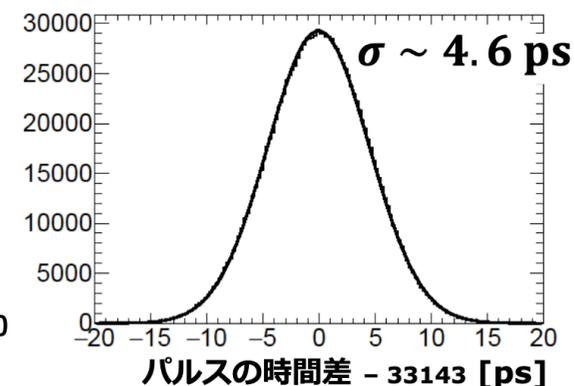
- パルスジェネレーター(ガウス)
- 33 ns程度の時間差
=>時間分解能：4.6 ps



実際に得られた波形データ



補正後の時間分解能

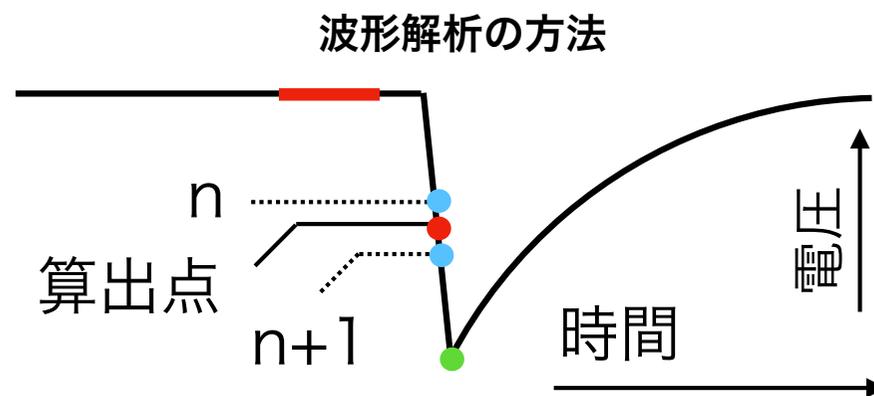


時間分解能評価方法

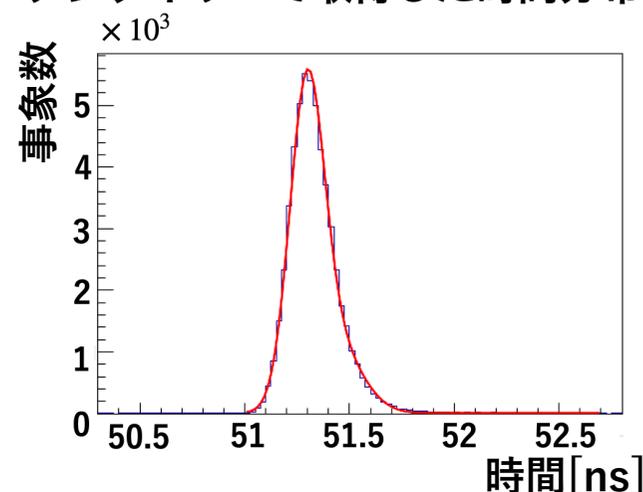
CAMACのTDC-ADCを用いた測定では同様の手法で組み、評価の方法も踏襲
(2021年年次大会 14pT2-5 前田)

デジタルサイザーを用いた場合

- データからベースライン(赤線)と最下点の電圧(緑点)を求める
- 電位差から半波高の電圧(赤点の電圧)を求め、その前後のサンプル(青点)を求める
- 前後のサンプルから一次関数を利用し、信号の到達時刻(赤点の時刻)を導出する
- 得られた時刻を用いてTDC-ADCと同様に時間分解能を評価



デジタルサイザーで取得した時間分布



時間分解能の測定結果

ノイズレートごとに時間分解能を評価

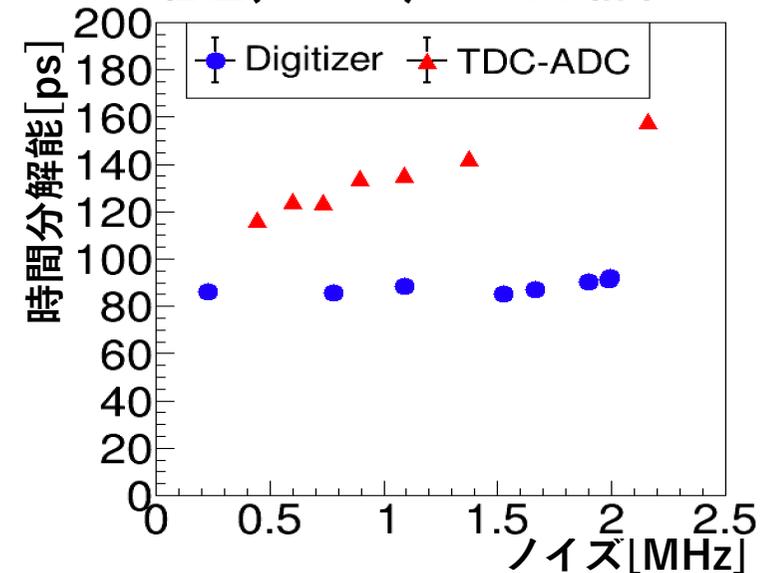
ノイズ：低温で数%、室温で数十%のダーク
カウントとLED由来のBGを含む

TDC-ADCを用いた解析で時間分解能が
2 MHzで160 ps程度まで悪化

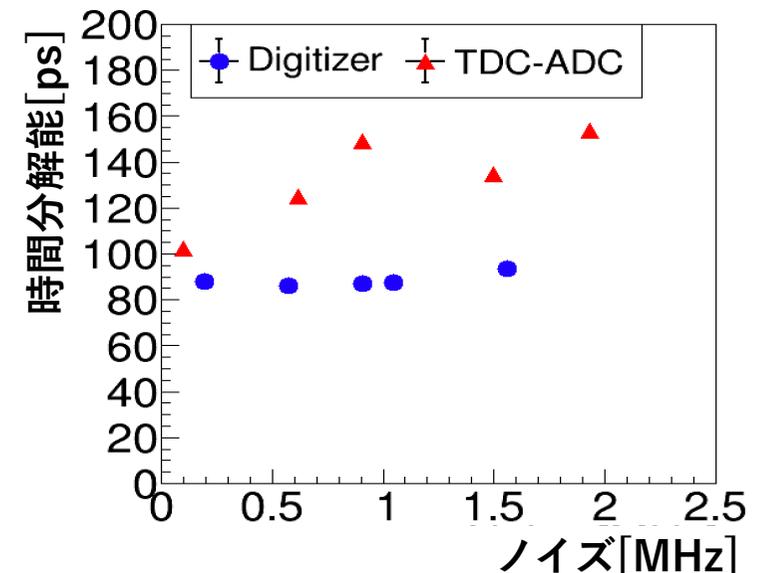
デジタイザーを用いた解析で時間分解能の
悪化が100 ps程度に抑制

➡ 波形解析の導入によりノイズの影響が
低減されたと考えられる

低温(-20 °C)での測定結果



室温(+26 °C)での測定結果

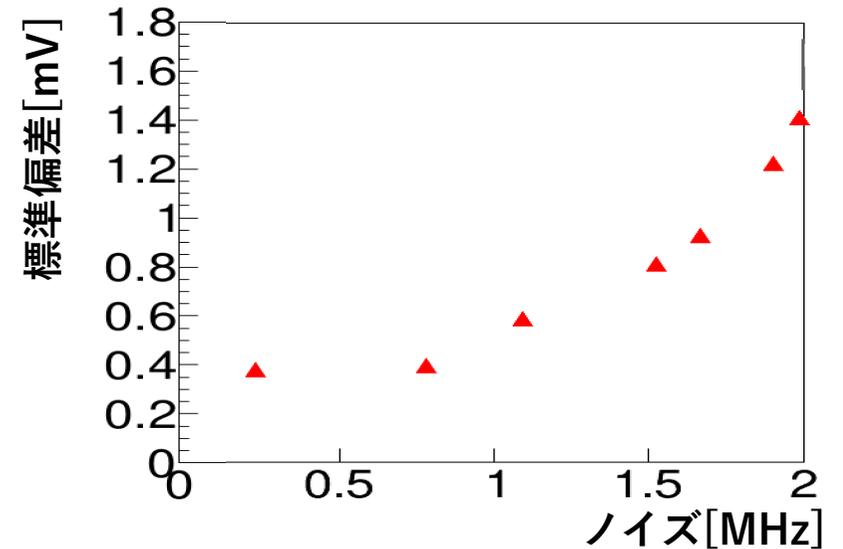


ノイズの影響

室温環境時のベースライン分布の変化

ノイズの増加による影響について
デジタイザーで取得したデータから調査

- 立ち上がり速度に大きな変化はなく
-0.01 mV/ps 程度
- ベースライン標準偏差が約 4 倍増加

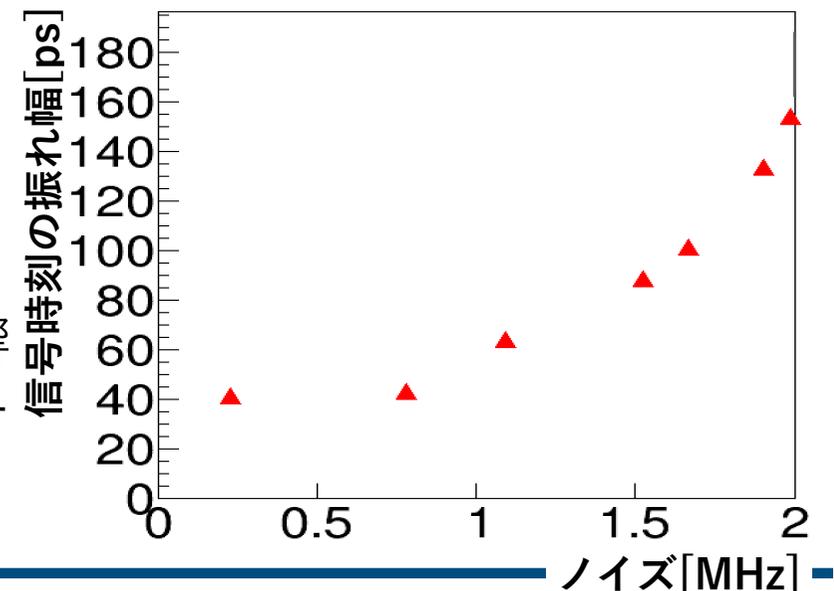


信号時刻の振れ幅

標準偏差と立ち上がり速度から
信号到達時刻の振れ幅を試算



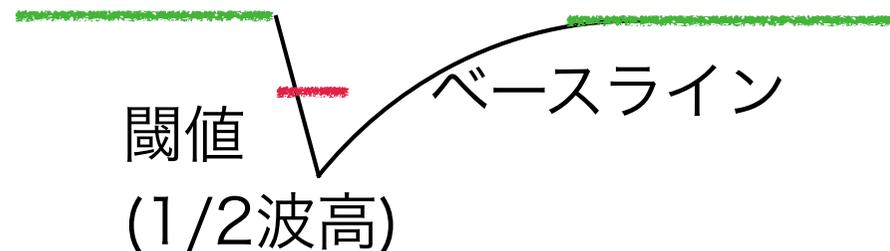
ベースラインの幅が時間分解能に影響
を与えるほどの時間的な幅を生み出す



波形解析の効果

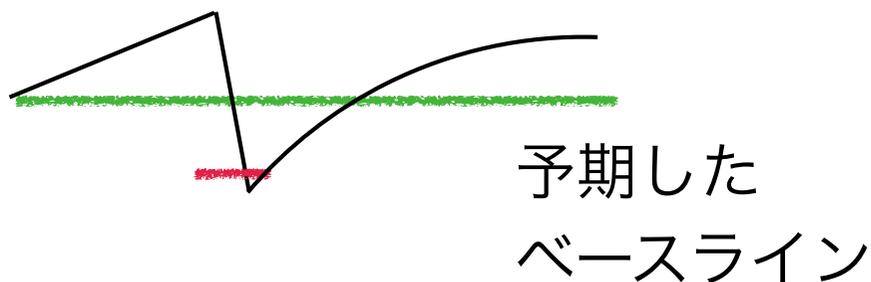
ベースラインが動揺しない場合

解析手法によらず正しく信号の時刻を測定することができる

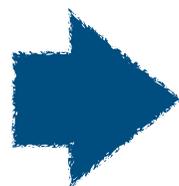
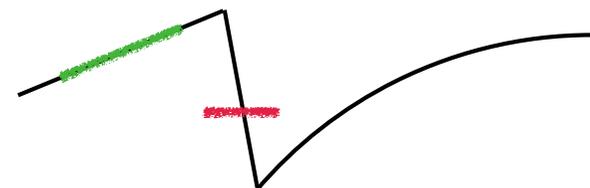


ベースラインが動揺する場合

TDC-ADCの解析



波形解析



デジタイザーによる波形解析でベースラインのふらつきの影響は低減され、時間分解能を100 ps程度に維持することが可能

まとめと展望

Belle II 実験 TOPカウンターの新しい光検出器としてSiPMに着目すると、パイルアップ対策が必要

室温、低温の両環境下でLED光を入射し、TDC-ADCの読み出しでは時間分解能が2 MHzで160 ps程度まで悪化

デジタイザー読み出しによる波形解析の導入により、時間分解能の悪化を抑制できる

2 MHzまでのノイズでTOP実装に必要な100 ps程度の時間分解能を達成

今後の展望

3 MHz以上の高いノイズの環境下で実験を行い、波形解析の手法確立と性能限界を調査する

出力波形の短いSiPMで同様の実験を行う