

Belle II 実験 TOP カウンターのアップグレードに向けた 光検出器 SiPM の放射線損傷評価のための事前測定

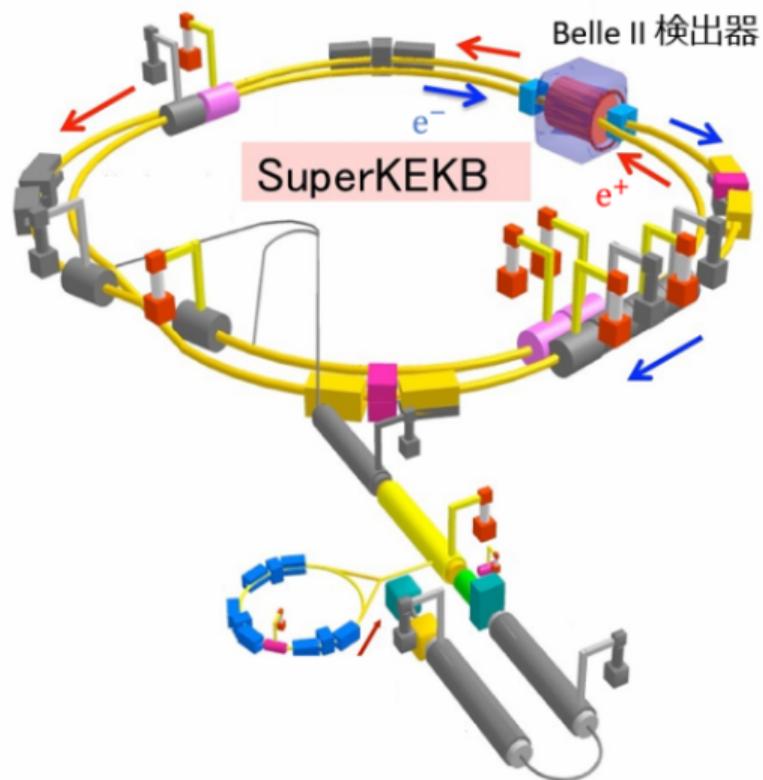
小森 涼太郎

名古屋大学 高エネルギー素粒子物理学研究室 修士 1 年

2023/11/22

Belle II 実験

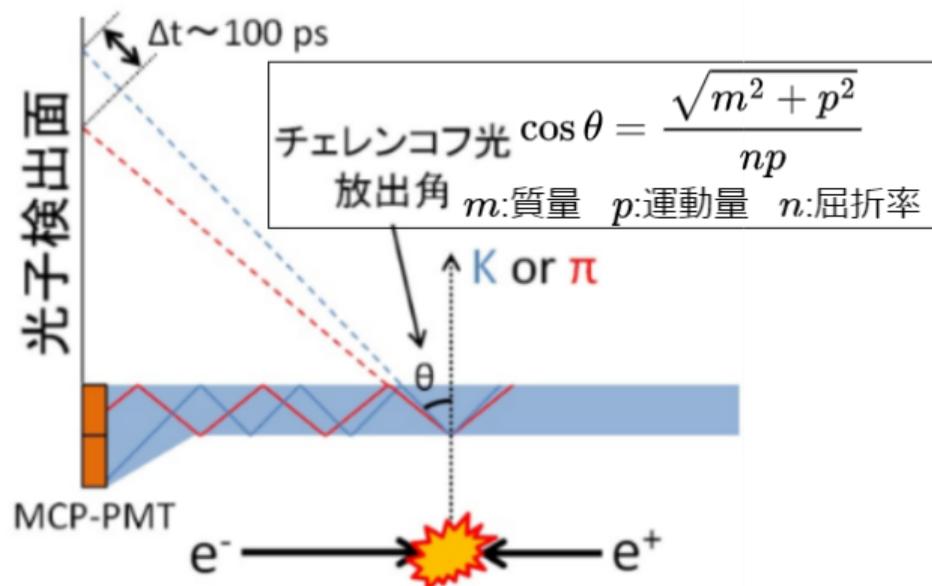
- 重心系エネルギー 10.58 GeV の衝突実験
- B 中間子を大量に生成
→ 大統計量で標準理論を検証
例: $B \rightarrow K \pi$
- 世界最高ルミノシティ $4.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
(目標: $6.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
- 高いバックグラウンド下でも運用できる
検出器開発が必要



TOP カウンター

- 円筒部に設置されたリングイメージ型チェレンコフ検出器
- 石英輻射体+光検出器 MCP-PMT
→ チェレンコフ光が光検出器に到達した時間と位置を使って
K 中間子と π 中間子を識別

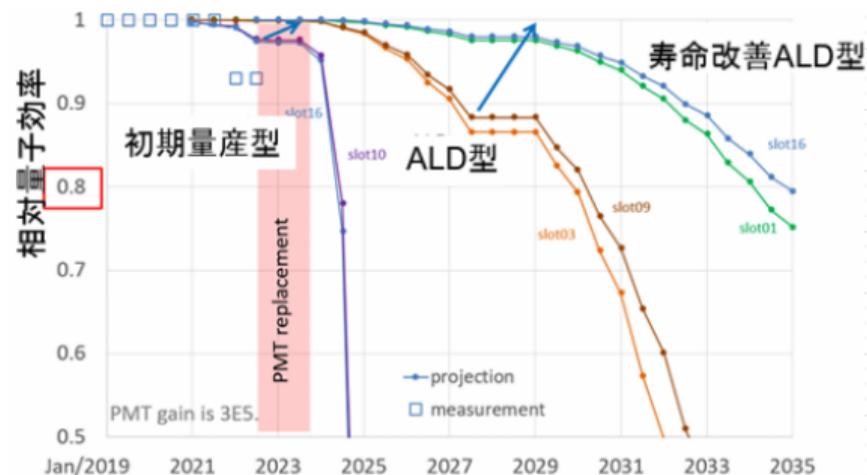
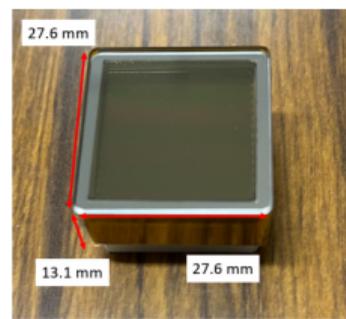
$$\text{識別性能} \propto \frac{\sqrt{\text{検出効率}}}{\text{時間分解能}}$$



- TOP カウンターにおいて高い検出効率と時間分解能が重要

光検出器MCP-PMT

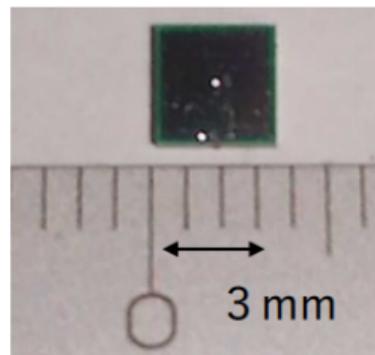
- マイクロチャンネルプレート (MCP) を使用した光電子増倍管
- 性能
 - ▶ 時間分解能 34.3 ps
 - ▶ 量子効率 29.3 %
- 問題
 - ▶ 積算出力電荷の増加するにつれて量子効率が低下
 - ▶ これまでよりも高輝度な環境に向けて対策が必要



量子効率低下の予想

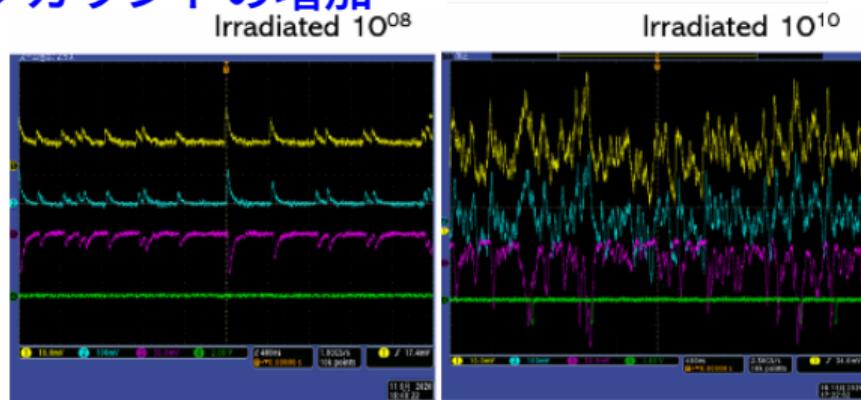
新しい光検出器:SiPM

- ガイガーモード APD をマルチピクセル化
- 基本性能
 - ▶ 高い光子検出効率 (400nm で 35 %)
 - ▶ 時間分解能 (TTS) 100 ps 以下
 - ▶ 中性子放射線損傷によるダークカウントの増加



- 研究目標
 - ▶ TOP カウンター周囲の中性子の量の測定
 - ▶ Belle II 検出器内で SiPM の中性子放射線損傷の評価

→ SiPM のダークレートを測定



SiPM に中性子を照射した様子

古井孝祐. 「ARICH アップグレードに向けた光検出器 MPPC の研究」;FPWS(2020)

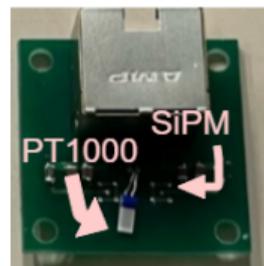
本研究で用いる SiPM

使用する SiPM の基本性能

	Hamamatsu S13360-3050VE (VE)	Hamamatsu S13360-1375CS (CS)
ピクセルピッチ (um)	50	75
増倍率	1.7×10^6	4.0×10^6
検出効率 (%)	40	50
有効受光面 (mm)	3.0×3.0	1.3×1.3
開口率 (%)	~100	82
ダークカウント (kcps)	90	500

SiPMの読み出し

- Belle II 検出器に SiPM を設置
- エレキハットから LAN ケーブルで電源供給
- SiPM の読み出し
 - ▶ Hamamatsu S13360-3050VE (VE)
 - ★ SiPM の基板に測温抵抗体 PT1000 を設置
 - ★ アルミニウムカバーを実装
 - ★ 15 m の LAN ケーブルで波形読み出し
 - ▶ Hamamatsu S13360-1375CS (CS)
 - ★ 検出器付近にアンプを設置
 - ★ 15 m の同軸ケーブルで波形読み出し



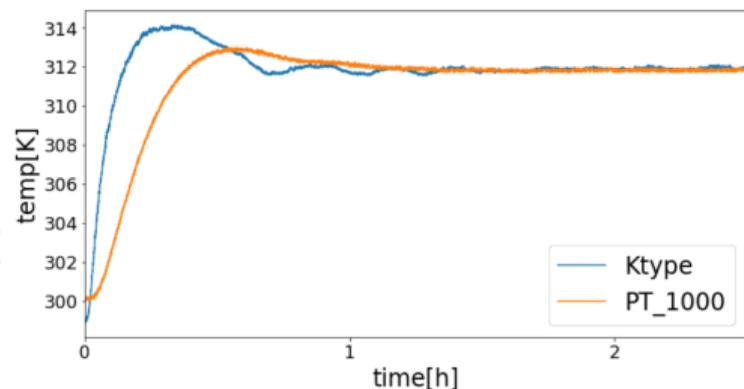
- 検出器付近のアンプが放射線で劣化する可能性あり
→ アンプの影響を調べるため2種を用意

測温抵抗体の性能確認

- 温度上昇に伴って、SiPM のダークレートが増加
- セットアップ
 - ▶ VE をオープンの中に設置
 - ▶ レファレンスとして熱電対 (K タイプ) を使用
- 測定結果
 - ▶ 熱電対と公称誤差の範囲で一致
 - ▶ 熱平衡状態の温度となる時間にずれ
- 考察
 - ▶ アルミニウムカバーによって SiPM の基盤が温まるまで時間がかかる
 - ▶ SiPM 周りの温度が正しく測れている

使用する温度計の公称誤差

	熱電対(Kタイプ)	PT1000
公称誤差 (K)	±1.0	±0.8



熱電対と PT1000 の測定結果

SiPMの設置

- 設置個数

- ▶ VE の SiPM 4 つ
- ▶ CS の SiPM 1 つ

- 設置場所

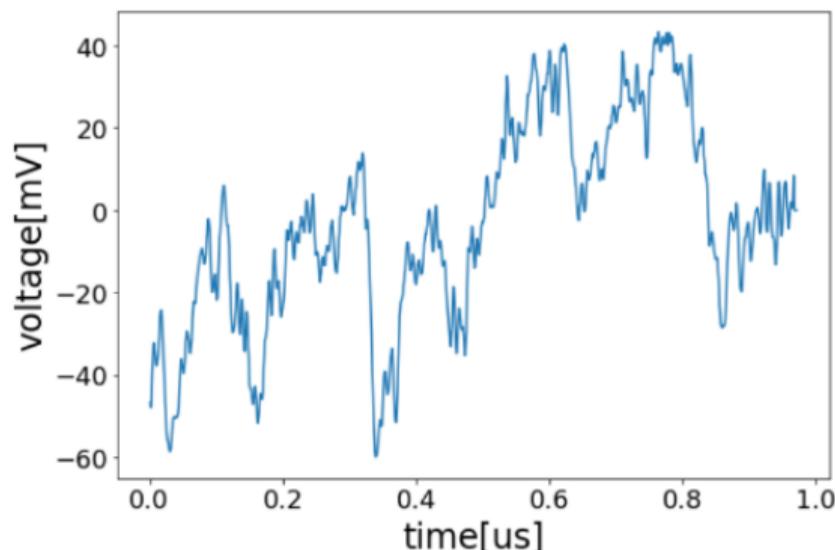
- ▶ Belle II 検出器の下部
- ▶ CDC/TOP ケーブル下



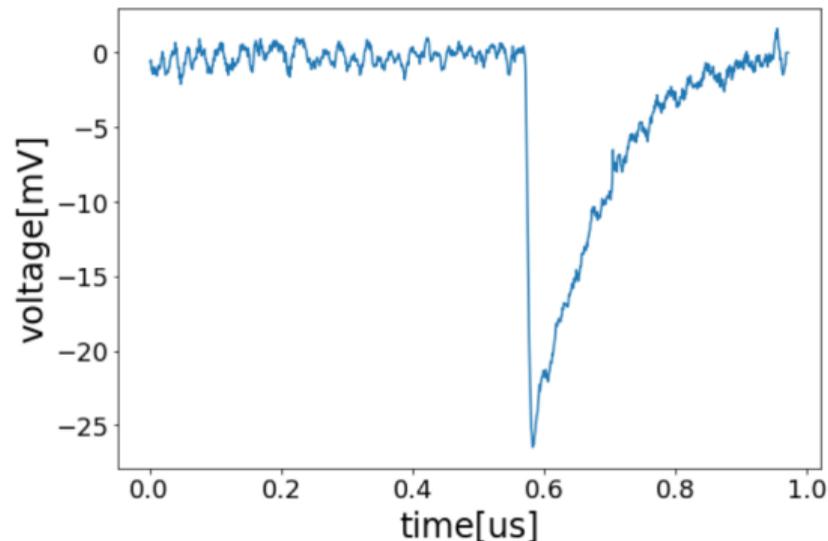
Belle II 検出器に取り付けた様子 (左・右上) 読み出し部分 (右上)

Belle II 検出器での波形測定

- デジタイザーで Belle II 実験運転前の波形データを取得



VE の波形データ



CS の波形データ

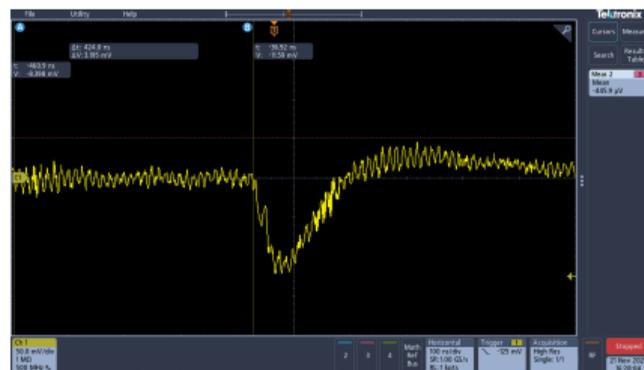
- CS の波形データは信号がはっきり見えるが、VE の波形データでは信号とノイズが区別できていない

VE の読み出し回路の改善

- ノイズを減らすため、読み出し回路を改善
 - ▶ 帯域フィルタの導入
 - ▶ GND の強化
- 実験室での改善前と改善後の比較
 - ▶ 改善後の回路では改善前には見られなかった 50mV の高さを持つ信号は観測できた



改善前の波形データ



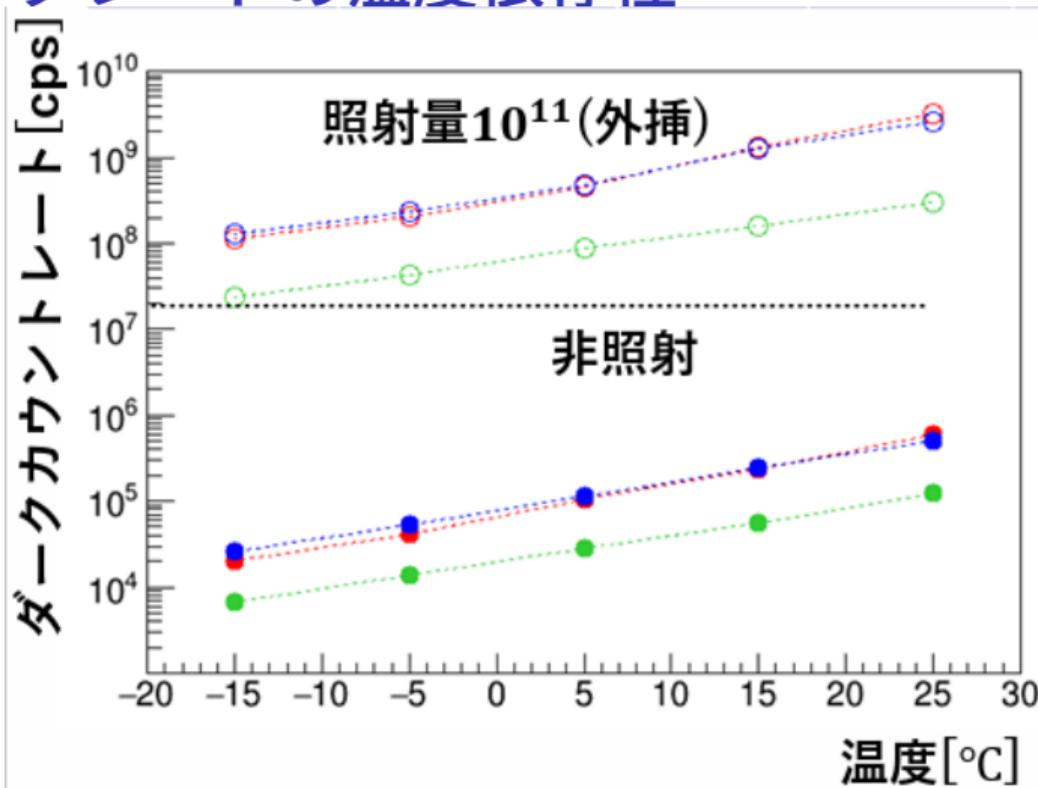
改善後の波形データ

- Belle II 検出器の中にいれて再度波形測定を計画

本研究の要約

- 光検出器 MCP-PMT の代わりに新しい光検出器 SiPM を検討中
- TOP カウンター周囲の中性子の量の測定と Belle II 検出器内で SiPM の中性子放射線損傷の評価を行いたい
 - Belle II 検出器の中にいれてダークレートを測定
- 信号とノイズを識別するための新しい読み出し回路を開発中
- 波形データをリモートで収集する手法を開発予定

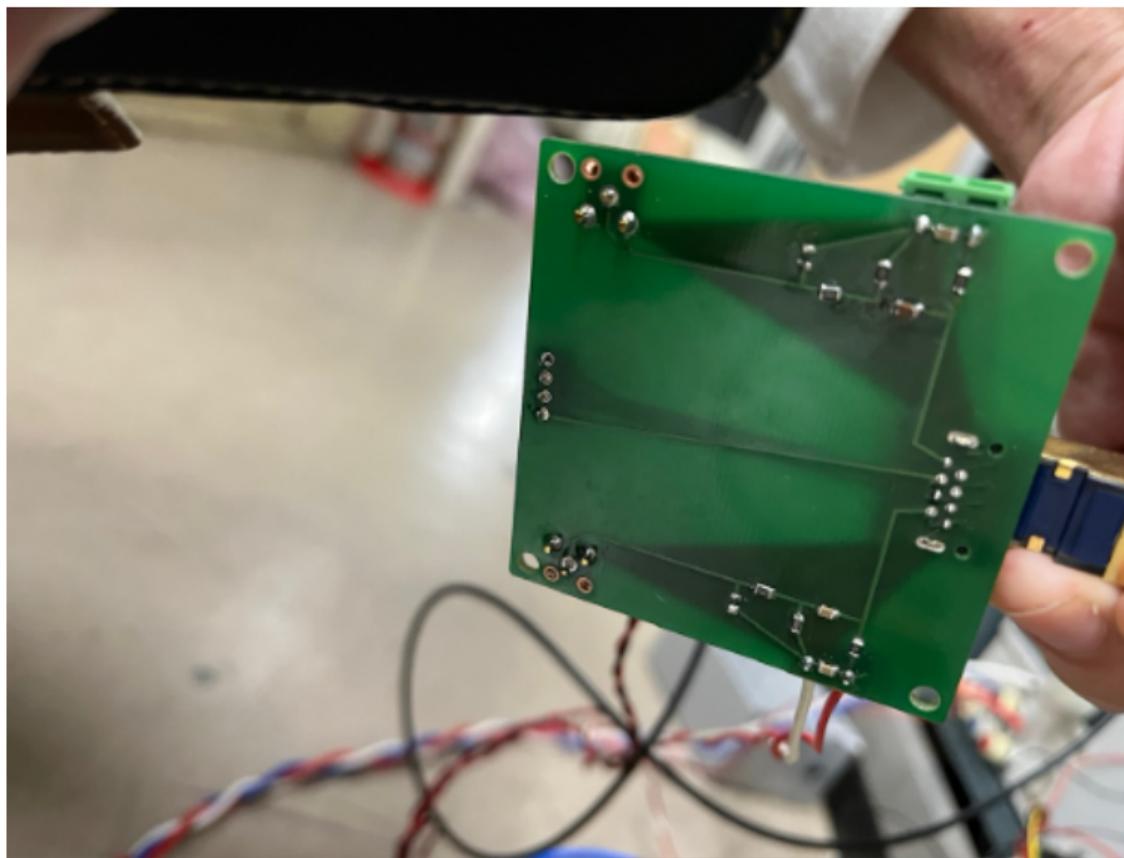
BackUp: ダークレートの温度依存性



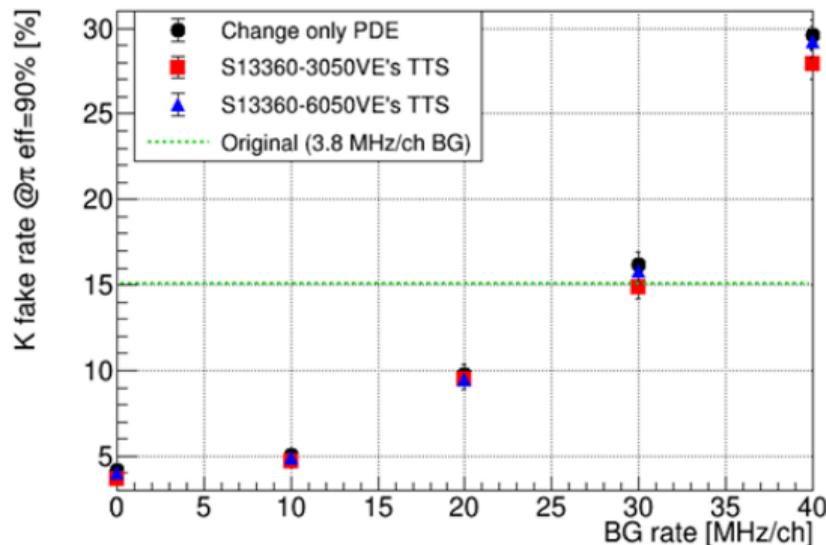
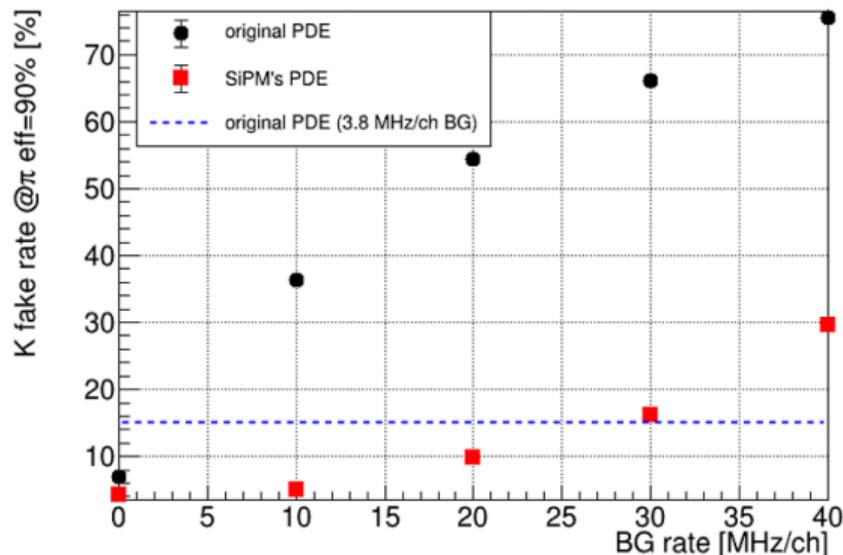
動作電圧 $V_{op}(V_{bd} + 3[V])$ における照射量 10^{11} のダークカウントレート

本橋完太. 「Belle II 実験 ARICH 検出器アップグレードに向けた光検出器 MPPC の放射線耐性の評価」;FPWS(2021)

BackUp: 読み出し回路の具体的な改善点



BackUp:SiPM を使ったTOPカウンタのシミュレーション



MCP-PMT を SiPM に置き換えた際の K/π 誤識別率の結果