

# Belle II 実験 TOP カウンターにおける シミュレーションによる SiPM 実装方法の研究

---

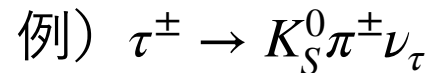
前田朱音<sup>A</sup>、居波賢二<sup>A</sup>、飯嶋徹<sup>ABC</sup>、吉原圭亮<sup>B</sup>、都築識次<sup>A</sup>、  
児島一輝<sup>A</sup>、大久保亮吾<sup>A</sup>、鷺見一路<sup>A</sup>、安達佑也<sup>A</sup>、  
他 Belle II TOP グループ

名大理<sup>A</sup>、名大 KMIB<sup>B</sup>、KEK素核研<sup>C</sup>

# 研究の背景

KEK (つくば市) で行われている Belle II 実験で新物理探索

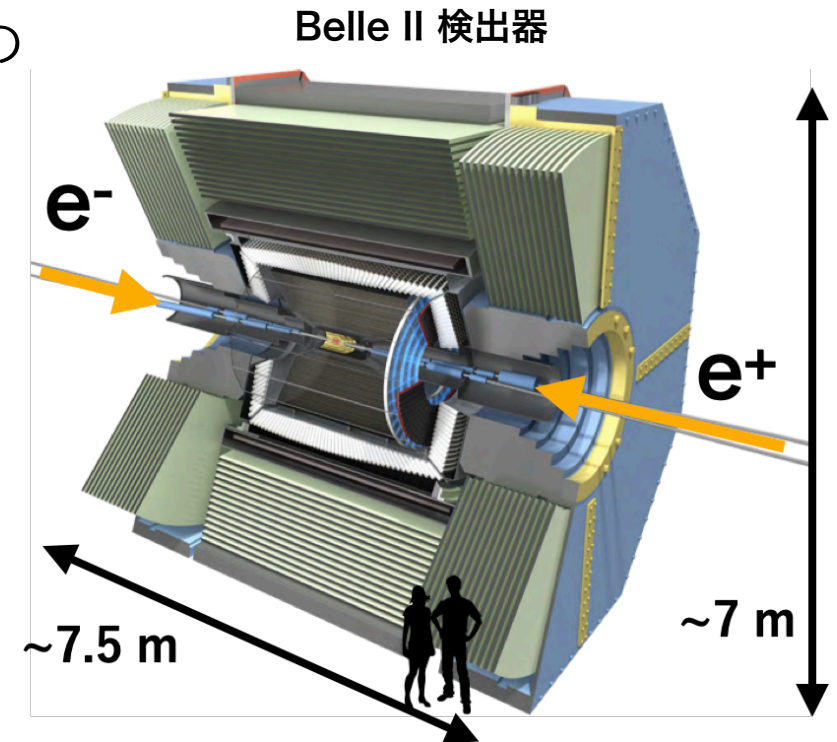
非対称電子陽電子型衝突加速器を用いて大量の  
B、D、 $\tau$ などを生成



統計量が必要な標準理論の検証

2030年にルミノシティ  $6.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$   
を目標に稼働中

ビームバックグラウンドは  
ルミノシティ増加に伴い増大する



▶ 以後現目標の5倍以上の高輝度化も検討され、  
検出器のバックグラウンド (BG) 耐性が重要

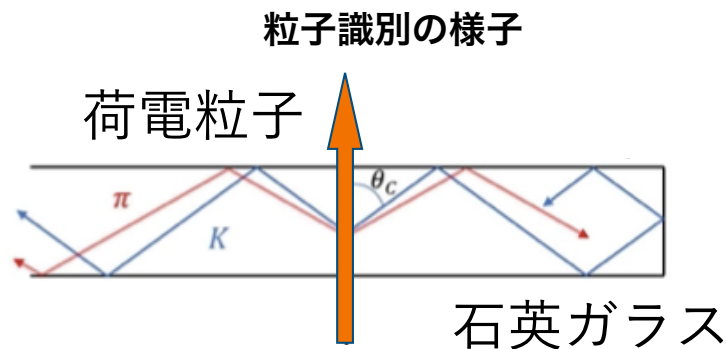
# TOP (Time-Of-Propagation) カウンター

リングイメージ型チェレンコフ検出器

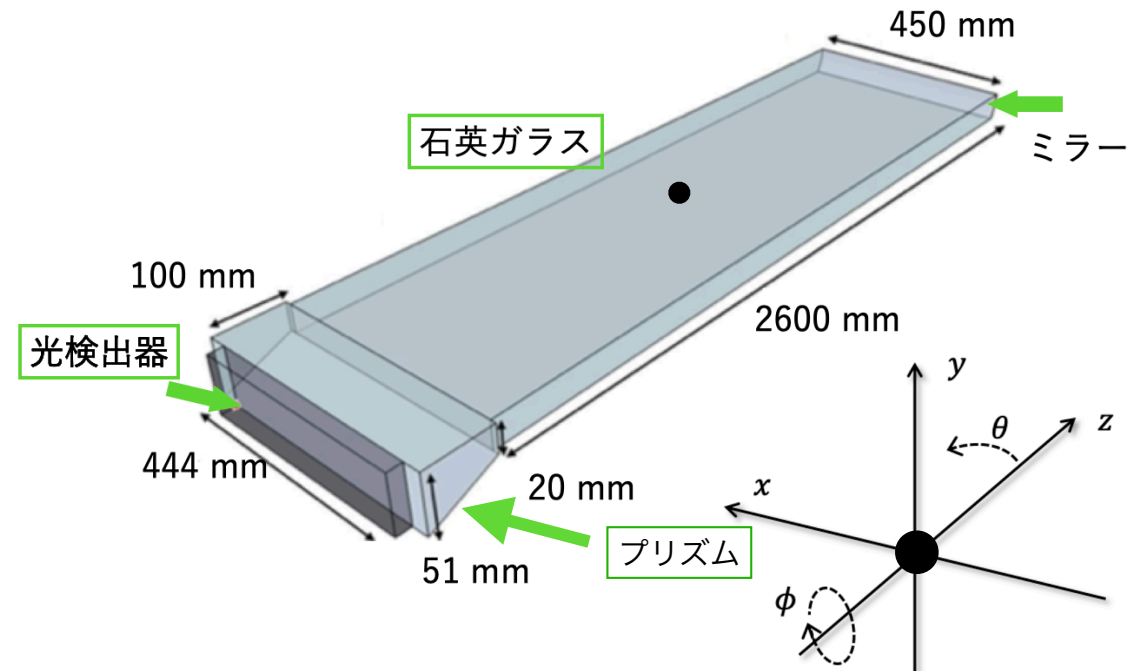
## 識別に必要な情報

予測：確率密度関数

測定：到達位置と到達時間差



TOP カウンター1スロットとその軸設定



## 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 (=時間差)、光子検出効率 (=点の数)

動作環境：磁場中 (1.5 T)、放射線

# 粒子識別方法

入射位置と運動量から事前に各粒子に対して確率密度関数を準備

粒子種ごとに20個程度の測定値と尤度を算出

➡ 荷電粒子の種類を判断

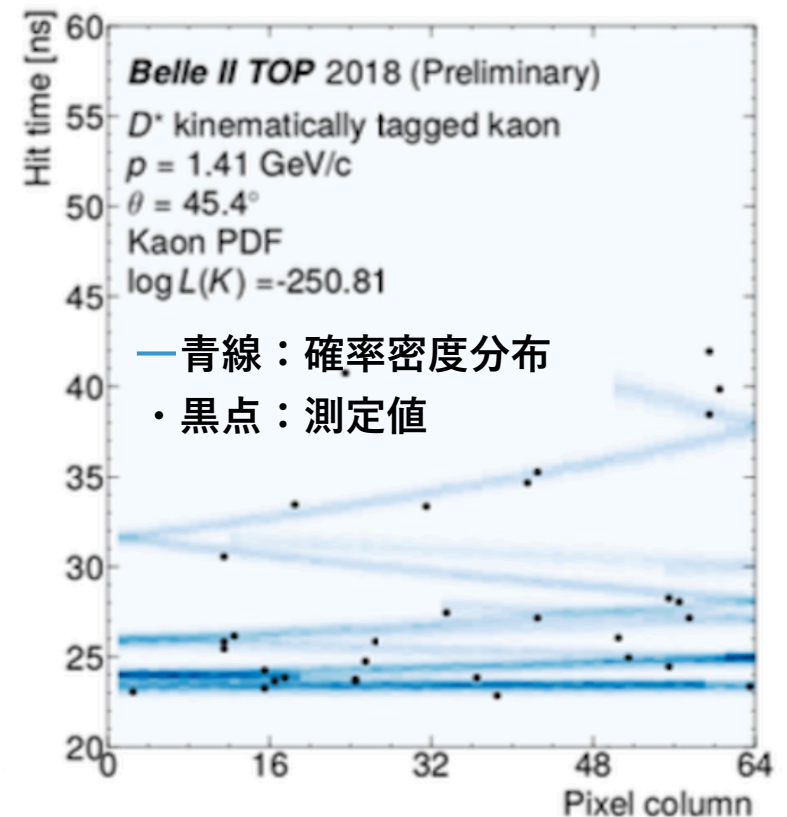
$$\text{粒子識別性能} \propto \frac{\sqrt{\text{検出光子数}}}{\text{時間分解能}}$$

## 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 ( $10^{10} - 10^{11}$ 中性子/cm<sup>2</sup>)

確率密度関数を用いた粒子識別の様子



# 現状の光検出器

## Micro-Channel-Plate (MCP)-PMT

時間分解能：34.3 ps

量子効率 (360 nm)：29.3%

放射線耐性と磁場中での動作保証

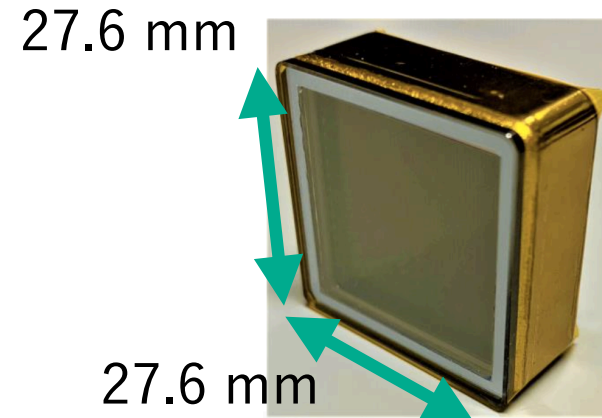
▶ TOP の高い粒子識別性能を実現

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

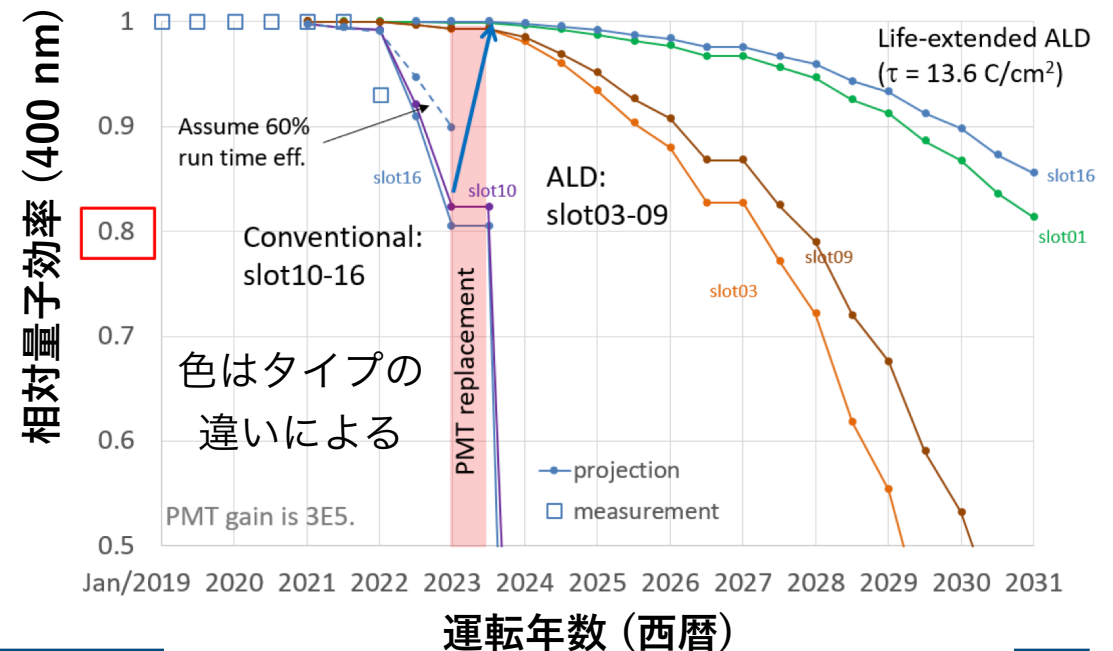
▶ 光検出器の長寿命化には技術革新が必要

新しい光検出器導入を検討

MCP-PMT



光検出器の寿命



# SiPMの性能

## 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

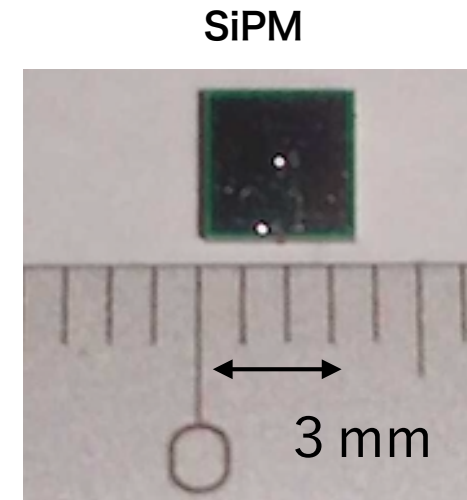
時間分解能：  $O(100 \text{ ps})$

光子検出効率(400 nm)：  $\sim 35\%$

ダークカウントが多い ( $\sim 1 \text{ MHz}$ )

磁場に対して安定

出力電荷量で劣化しない



## 先行研究

- 光子検出効率の向上によるBG耐性の向上
- 100 ps程度の時間分解能であればTOPの粒子識別性能に影響はない

# 検討課題と研究内容

## 検討課題

中性子損傷

1MeV中性子 $10^{11}$  個の照射

ダークカウントは数 MHz/mm<sup>2</sup>

(同メーカー、-30°Cで測定)

(修士論文 古井孝侑 東京大学 2021)

ダークカウントの増加

TOP カウンター  
の性能悪化

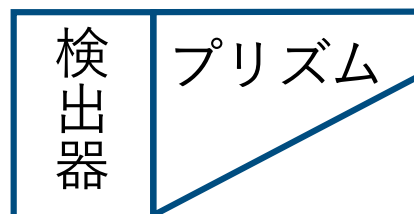
抑制

低温環境

## 研究内容

- シミュレーションによる断熱層の見積り  
➡ 空気層5 mm以上で十分な熱遮蔽性能
- 粒子識別性能への影響を評価

現状



対策案



# 粒子識別性能の評価方法

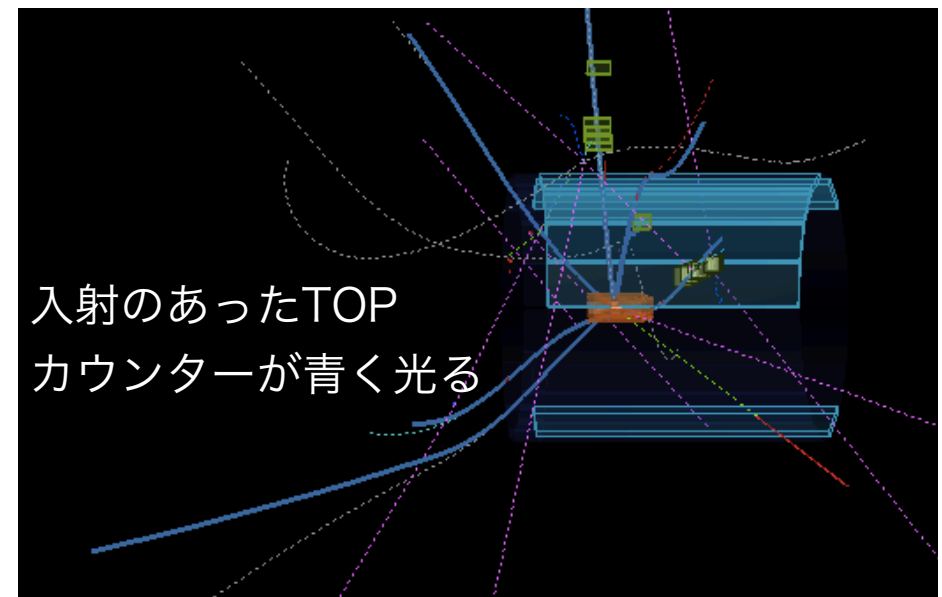
Belle II 実験で共通して使用されるGeant4 ベースの検出器シミュレーション

- MCP-PMTの光子検出効率をSiPMのものに変更
- 0 mmから10 mmまでの空気層を挿入
- $B^0 \rightarrow K^* (\rightarrow K^+ + \pi^-) + \gamma$ のみの

$10^6$  イベント分のシグナルMC

$\pi^-$  と  $K^+$  の運動量が大きくなり  
粒子識別が難しい

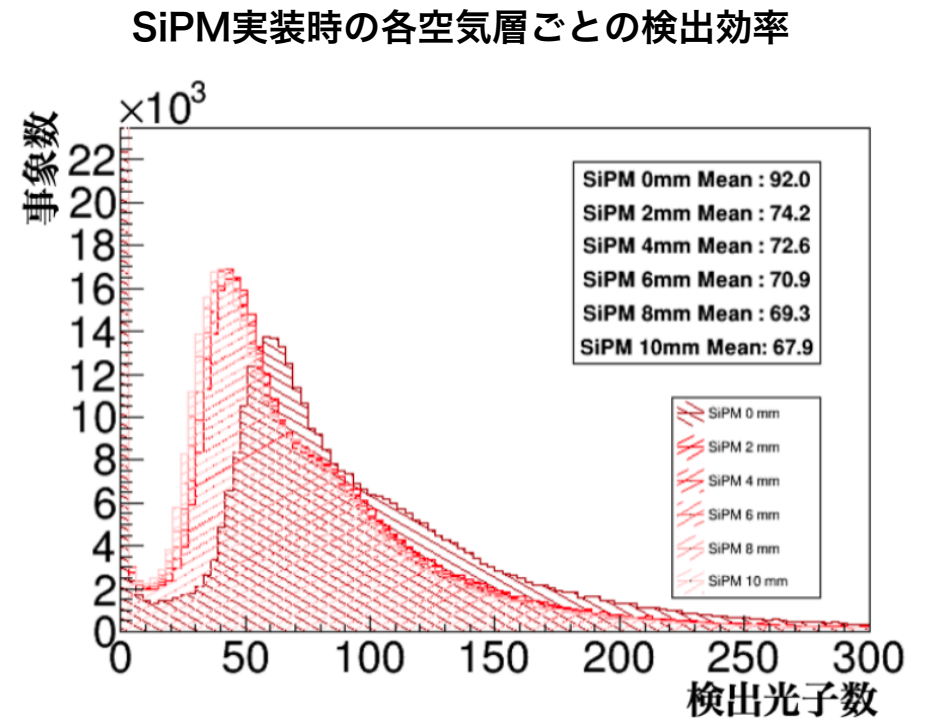
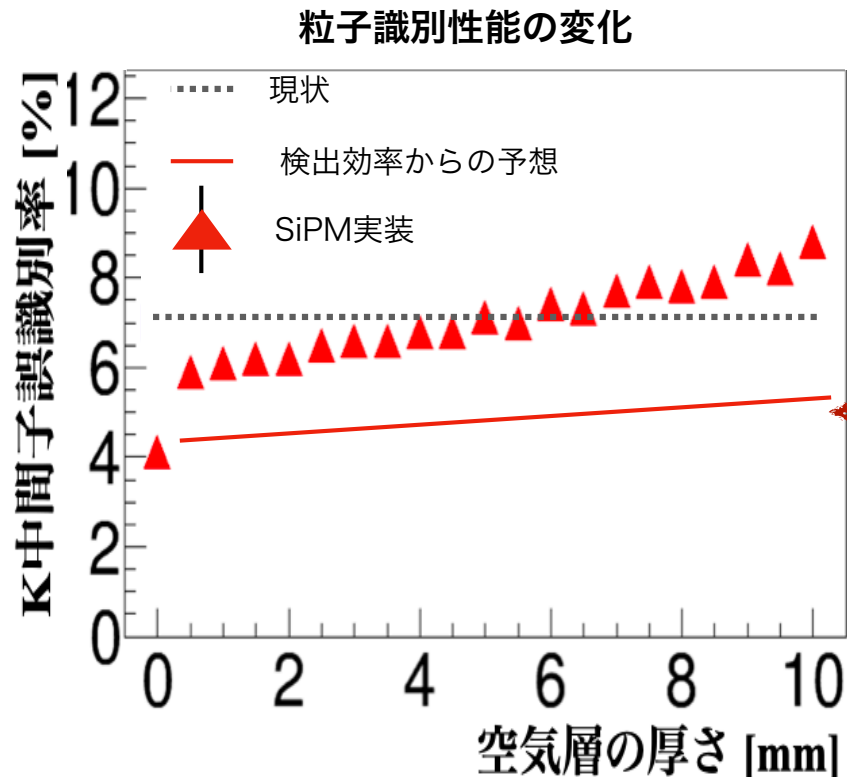
シミュレーションの様子



$\pi^-$  の検出効率90 %時のK中間子の誤識別率で識別性能を評価



# 粒子識別性能への影響



0 mm(完全接着) では光子検出効率の向上で識別性能は向上する  
光子検出効率の変化だけでは粒子識別性能の悪化を説明できない

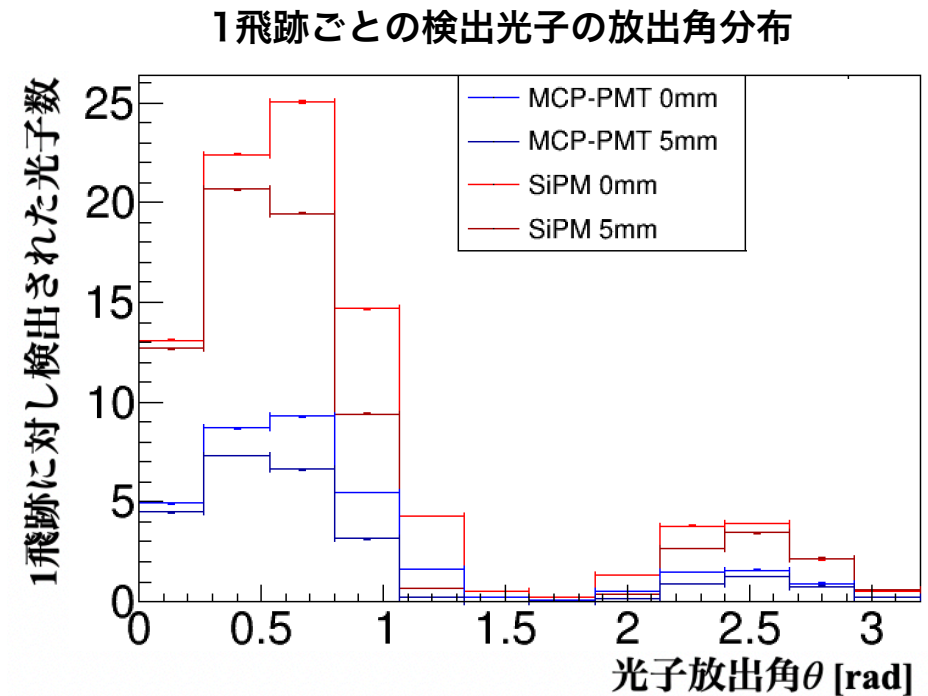
▶ SiPM使用時に空気層5 mmで現状の TOP カウンターと同程度の識別性能

# 角度による粒子識別性能への影響

$z = [100 \text{ cm}, 150 \text{ cm}]$ 、 $\theta = [40^\circ, 60^\circ]$   
の範囲に入射した荷電粒子から出た光子について放出角を調査  
=>光路が長い事象

全反射角 $0.75 + 1.5\text{rad}$  付近で全反射  
による検出光子数の減少

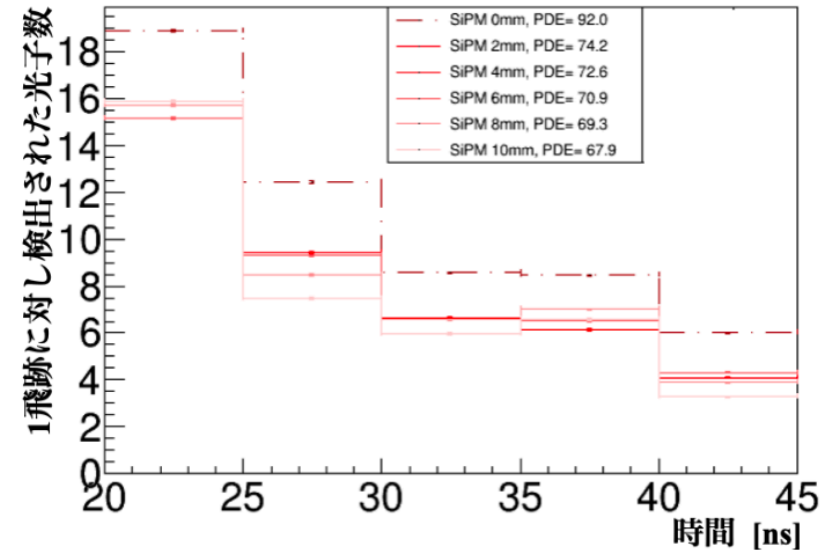
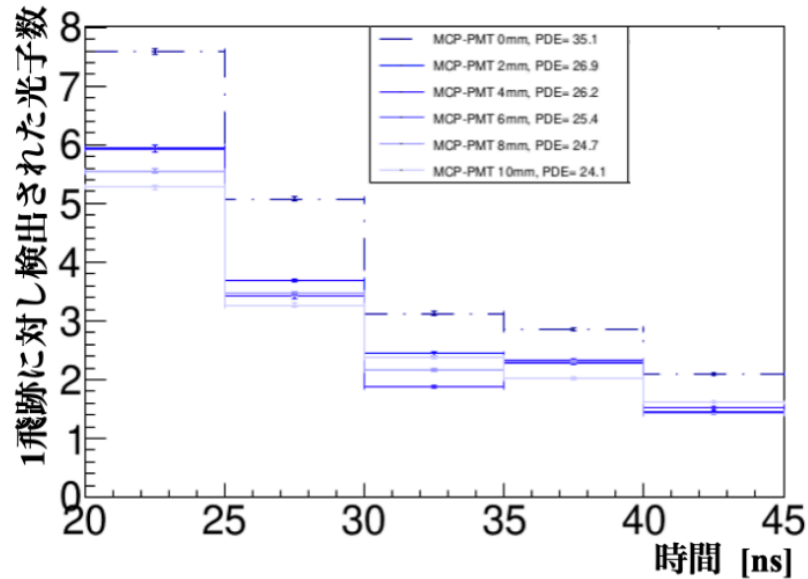
=>光路が長い光子の検出率が増加



光路の長い光子が粒子識別に与える影響を調査

# 時間による粒子識別性能への影響

5 nsごとの検出光子数の変化



輻射体内の光子の伝搬時間は最短15 ns

想定している飛跡では20 ns 以降に到達した光子を考慮する

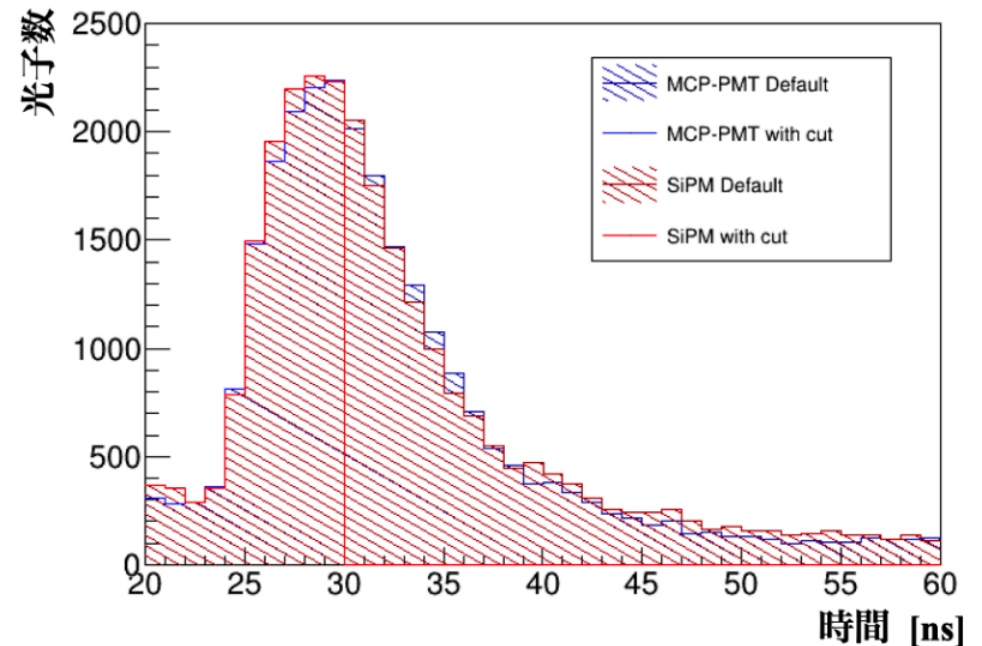


リングイメージの再構成方法から30 ns以降の遅い光子の減少が粒子識別に大きく影響すると考えた

# 時間による粒子識別性能への影響

$z = [100 \text{ cm}, 150 \text{ cm}]$ 、  
 $\theta = [40^\circ, 60^\circ]$  の粒子

30 ns 以降に観測された光子を除去



		K 中間子の誤識別率 [%]	検出光子数 [個/事象数]
MCP-PMT	Default	$18.8 \pm 0.5$	$35 \pm 6$
	30 ns Cut	$12.4 \pm 0.4$	$25 \pm 5$
SiPM	Default	$17.2 \pm 0.5$	$77 \pm 9$
	30 ns Cut	$12.3 \pm 0.4$	$59 \pm 8$



粒子識別性能は30 ns以降の光子の減少によるものではないことがわかった

# 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に着目した

ダークカウント対策として低温運用を検討した場合、光検出部とプリズムの間に断熱が必要

遅い光子の減少が空気層挿入時の粒子識別性能悪化の原因でないことがわかった

必要な断熱層を空気層5 mmと見積もり、粒子識別性能は現状と同程度の誤識別率 7 %であることがわかった

## 今後の展望

断熱層による空気の屈折を考慮した確率密度関数を使用

冷却機構の構築とそれらを考慮した熱シミュレーション