

15pA562-1

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^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、鷲見一路^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

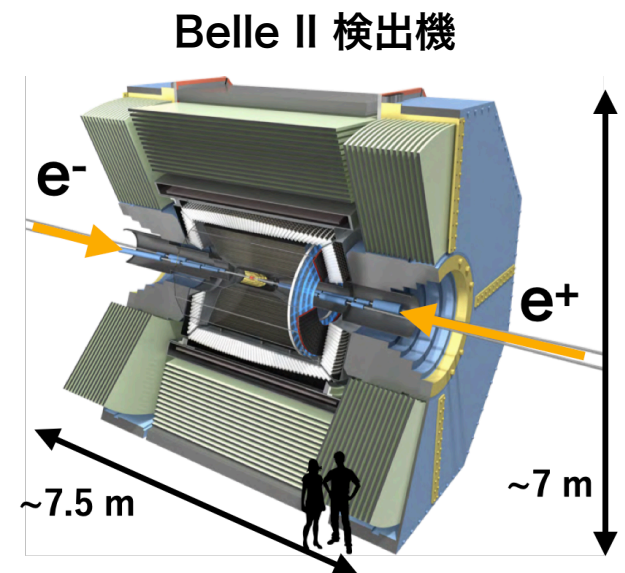
KEK（つくば市）で行われているBelle II実験に参加

Belle II実験

大量のB、D、 τ などの生成により
標準理論の精密測定や新物理探索を行う

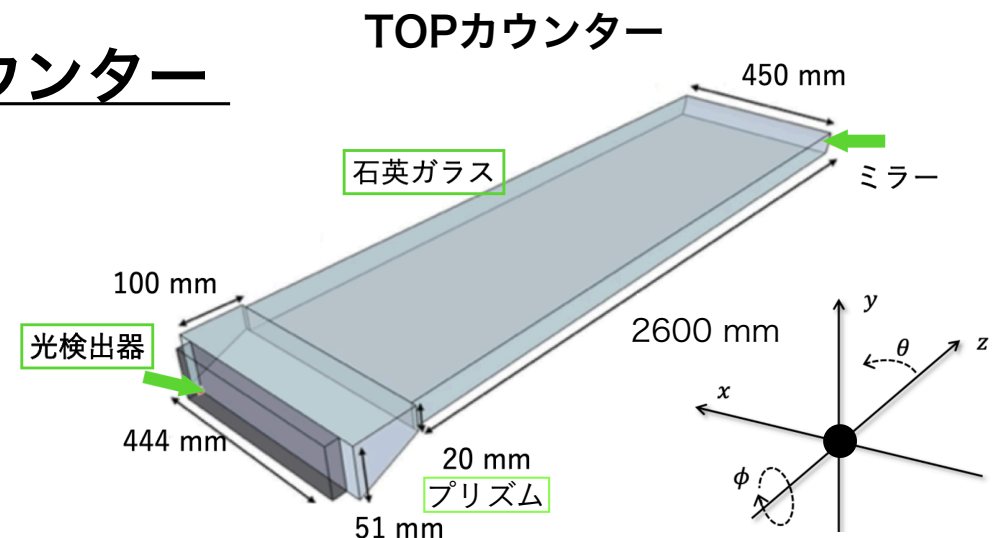
$6.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の5倍以上の高輝度化も検討され、
ビーム由来のバックグラウンド（BG）の上昇

➡ 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の識別を担う
- リングイメージ型チェレンコフ検出器



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

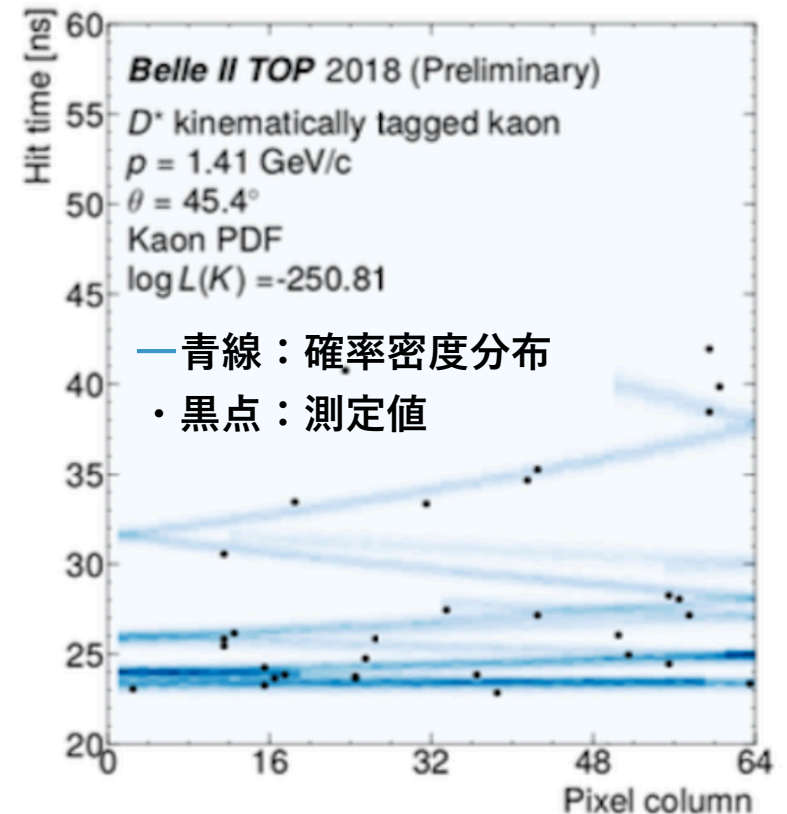
$$\text{粒子識別性能} \propto \frac{\sqrt{\text{検出光子数}}}{\text{時間分解能}}$$

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/cm²)

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

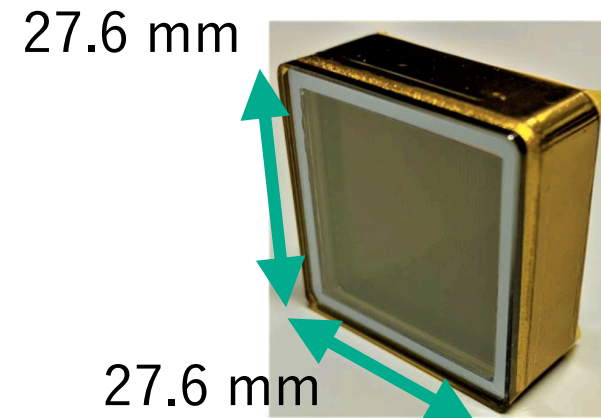
➡ TOP の高い粒子識別性能を実現

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

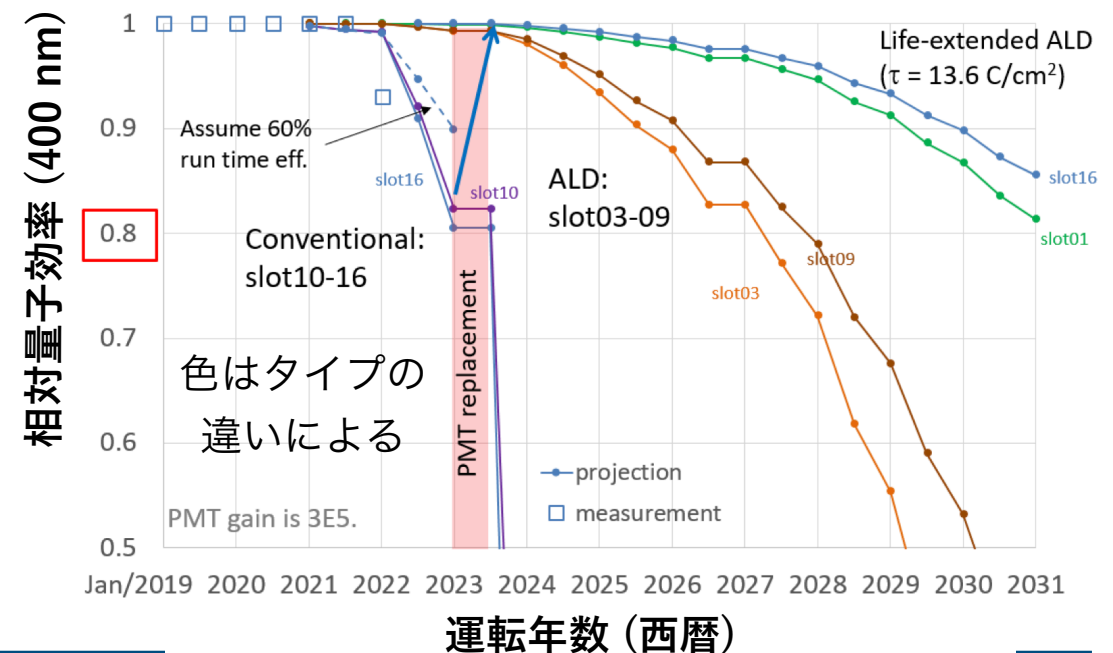
➡ 光検出器の長寿命化には技術革新が必要

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： $O(100 \text{ ps})$

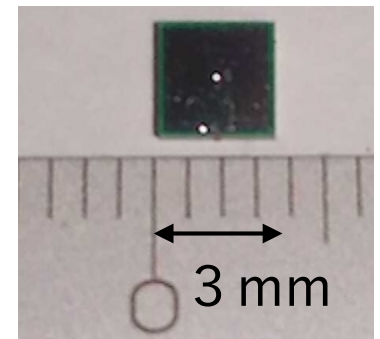
光子検出効率(400 nm)： $\sim 35\%$

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

SiPM



先行研究

- 光子検出効率の向上によるBG耐性の向上
(第75回年次大会 17aG22-6 前原)
- 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
(2020年秋季大会 15pSF-10 前原)

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/mm²

(同メーカー、-30°Cで測定)

(修士論文 古井孝脩 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

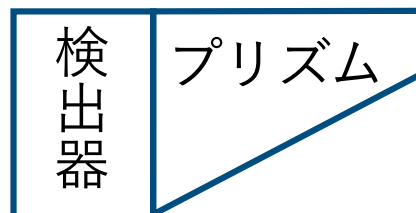
抑制

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
- 粒子識別性能への影響を評価

現状



対策案



必要な断熱層の見積り

要求

1. 現実的な冷却機構が存在する
2. 検出器中心線上 100 mm の位置において室温との温度差が10 K程度

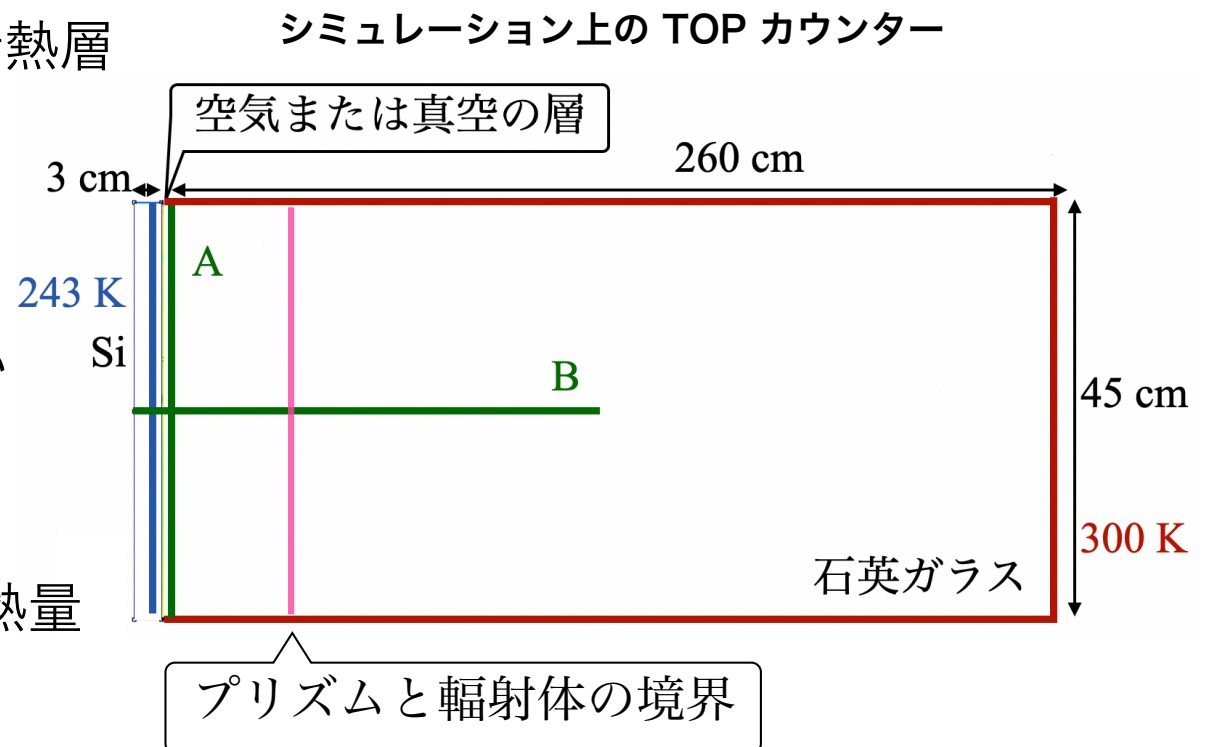
シミュレーション条件

- 光検出部とプリズムの間に断熱層
- 3mm - 8mm まで厚さを変化
- 光検出部は243 KのSi
- 輻射体は300 Kの石英ガラス
- 検出器外部への熱移動はない

線A： 要求1の確認

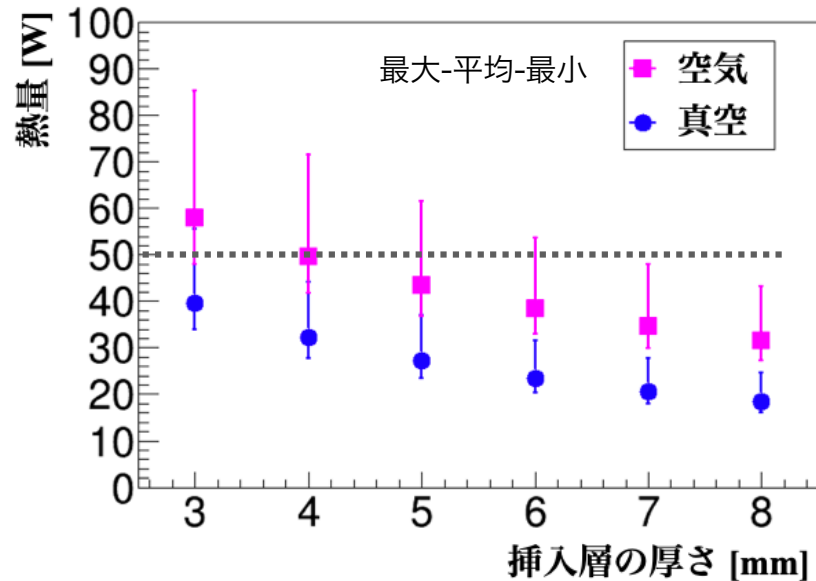
1 スロットあたりに必要な熱量

線B： 要求2の確認



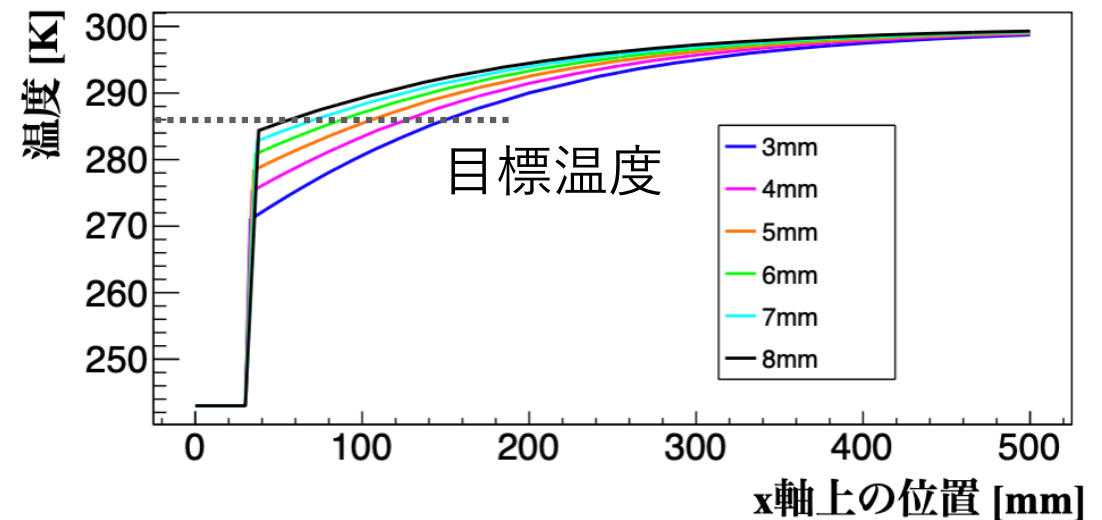
必要な断熱層の見積り結果

1 スロットあたりに必要な熱量



50 W程度でペルチェ素子の
冷却能で1 スロット保冷可能

空気層挿入時の線B上の結果



100 mm付近で室温との温度差が10 K程度



空気層5 mm以上で十分な熱遮蔽性能

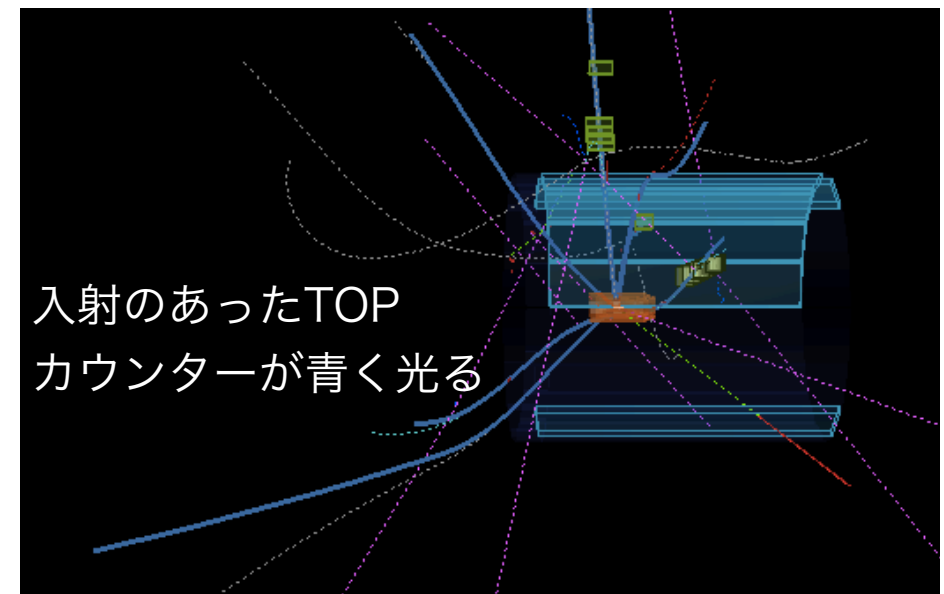
粒子識別性能の評価方法

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
10⁶イベント分のシグナルMC

π^- 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



π^- 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

粒子識別性能の変化

全反射角 0.75 rad 付近で全反射による
検出光子数の減少($0.5\text{--}1.0\text{ rad}$)

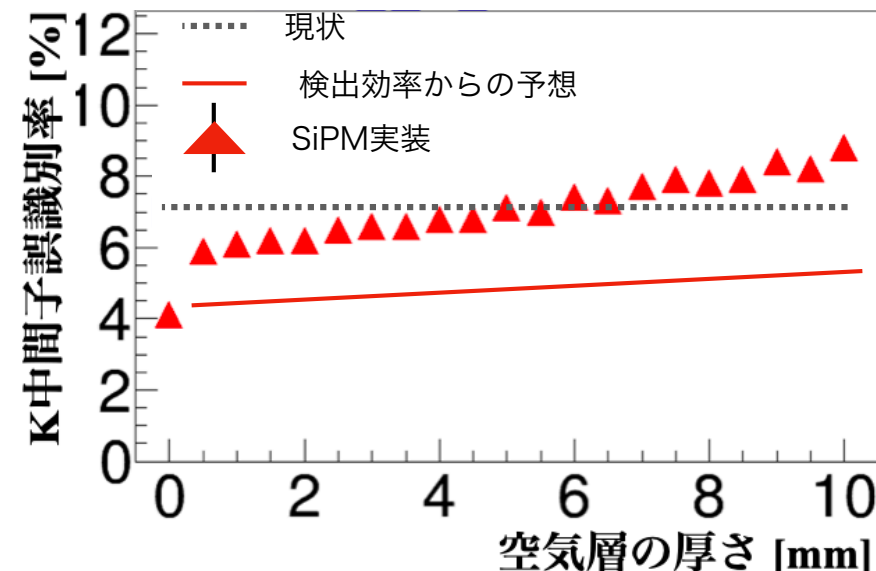
0 mm (完全接着) では光子検出効率の
向上で識別性能は向上する

この減少幅だけでは粒子識別性能の
悪化を説明できない

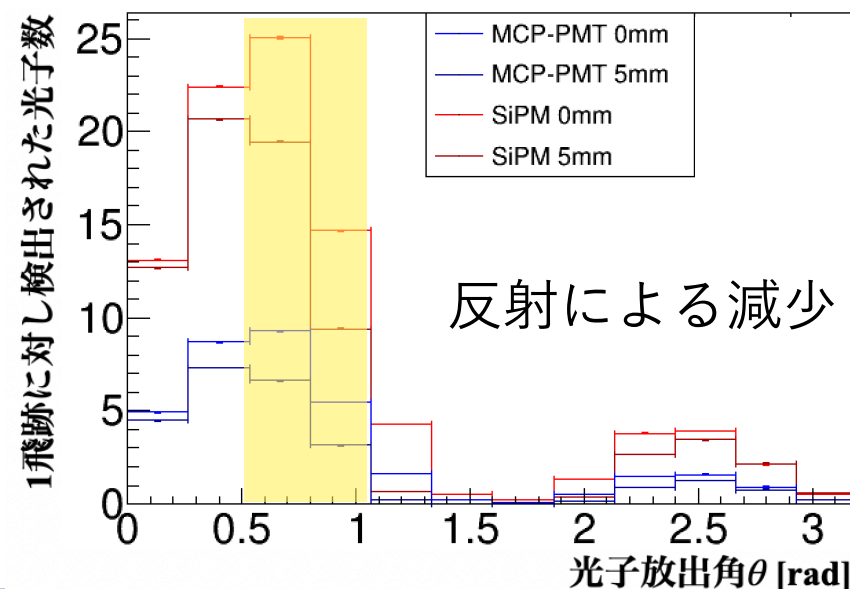
空気層を考慮した確率密度関数



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



検出光子の放出角分布



反射による減少

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

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

空気層を入れた場合でBRを考慮したシミュレーション

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