

# BelleII実験 TOP カウンターにおける MCP-PMTの量子効率測定と 最新の運転状況

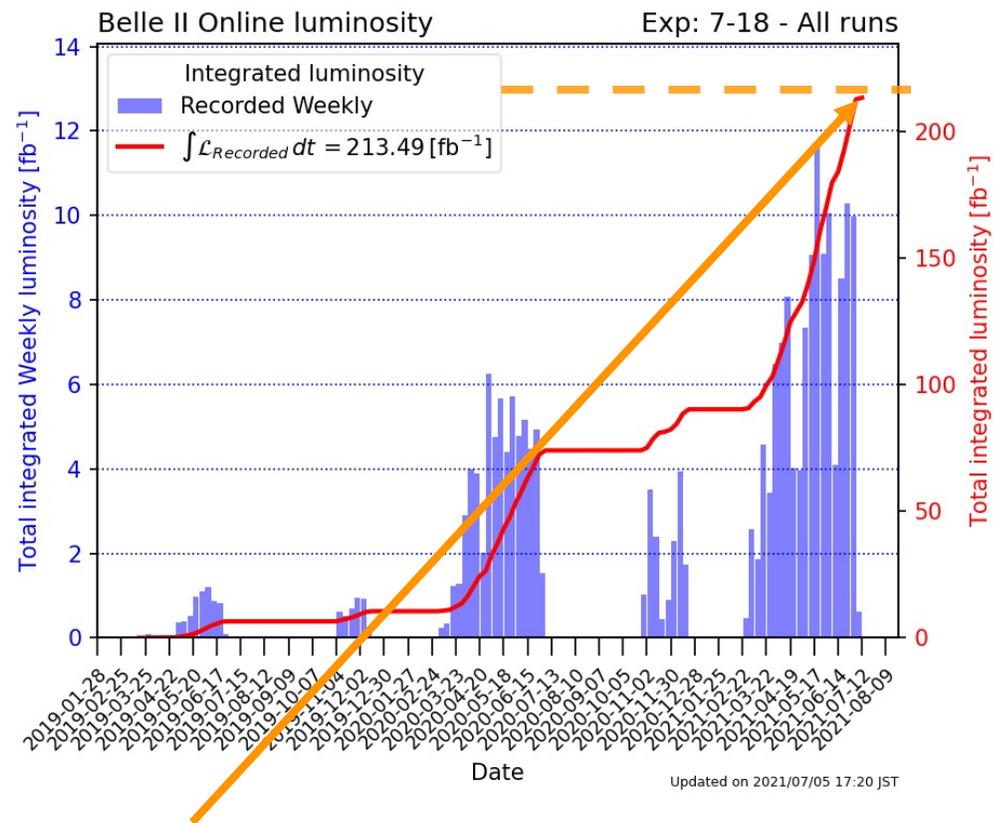
名大理<sup>A</sup>, 名大 KMI<sup>B</sup>, KEK 素核研<sup>C</sup>

大久保亮吾<sup>A</sup>, 飯嶋徹<sup>A,B,C</sup>, 居波賢二<sup>A</sup>, 吉原圭亮<sup>B</sup>, 都築識次<sup>A</sup>, 児島一輝<sup>A</sup>,  
前田朱音<sup>A</sup>, 中野友也<sup>A</sup>, 安達佑也<sup>A</sup>, 他 BelleII TOP グループ

# Belle II 実験

- 重心系エネルギー10.58 GeVの電子陽電子衝突実験。
- 世界最高ルミノシティーにより大量のB中間子を生成し、崩壊過程を精密測定。
- 2021年6月22日、世界最高の  $3.12 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  のピークルミノシティーを達成。  
(Belle実験の記録:  $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )

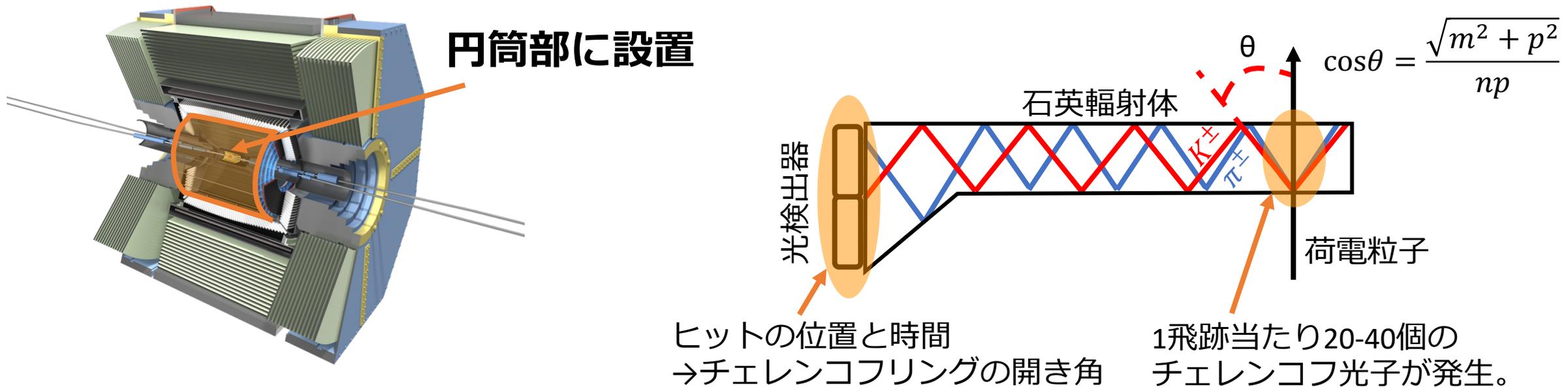
## Belle II 実験で蓄積したルミノシティー



現在までで、213.49 fb<sup>-1</sup>を蓄積。  
前身のBelle実験の20%に到達。

# TOPカウンター

光検出器に到達するチェレンコフ光の検出時間、検出位置からチェレンコフリングを再構成することで粒子を識別する。

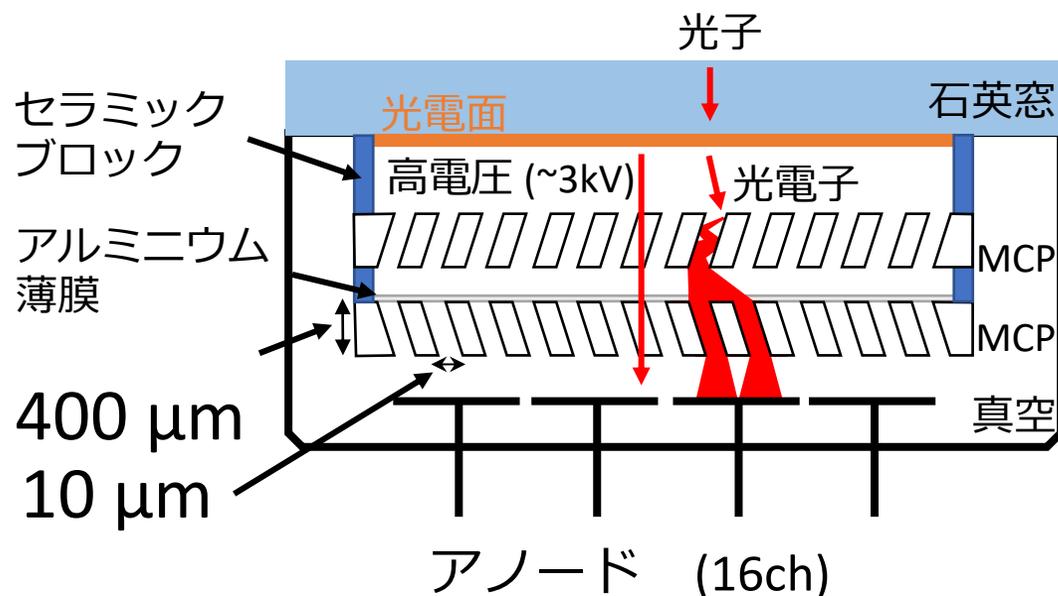


識別性能  $\propto \frac{\sqrt{\text{検出光子数}}}{\text{時間分解能}}$  → TOPカウンター運用において、**時間分解能(~30ps)**と高い**検出効率**が重要

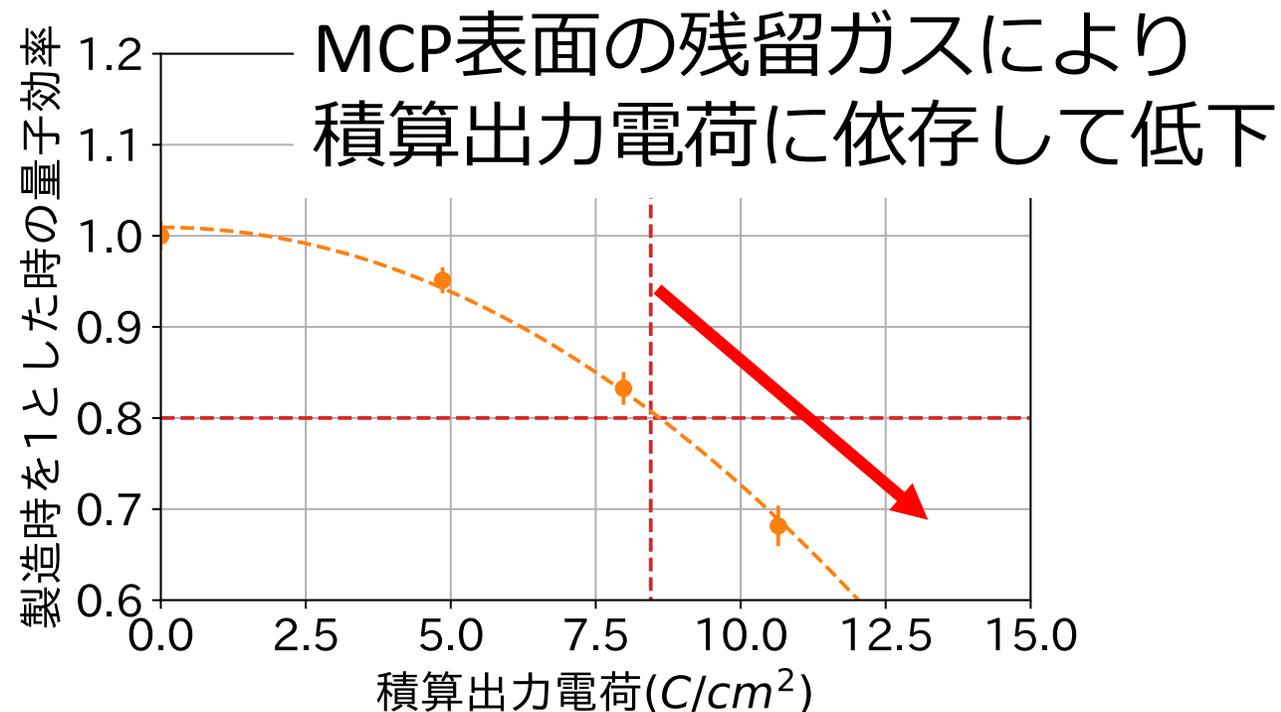
# MCP-PMT

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

$\sigma \approx 34.3 \text{ ps}$ の高い時間分解能を実現。  
→TOPカウンターの粒子識別を可能にする



## MCP-PMTの光電面寿命



(TOPカウンターに取り付け予定のMCP-PMTから  
サンプリングして測定)

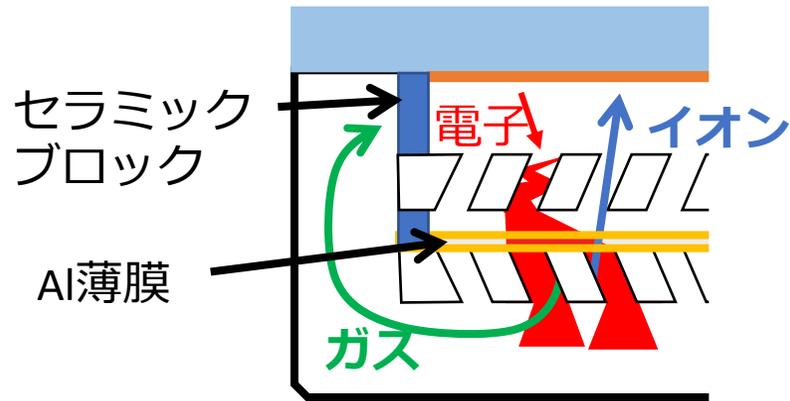
**時間分解能に優れるが、光電面寿命に注意して運用しないといけない**

# TOPカウンターのMCP-PMTの種類

## 初期量産型

イオンやガスが光電面に到達する経路を塞ぐ。

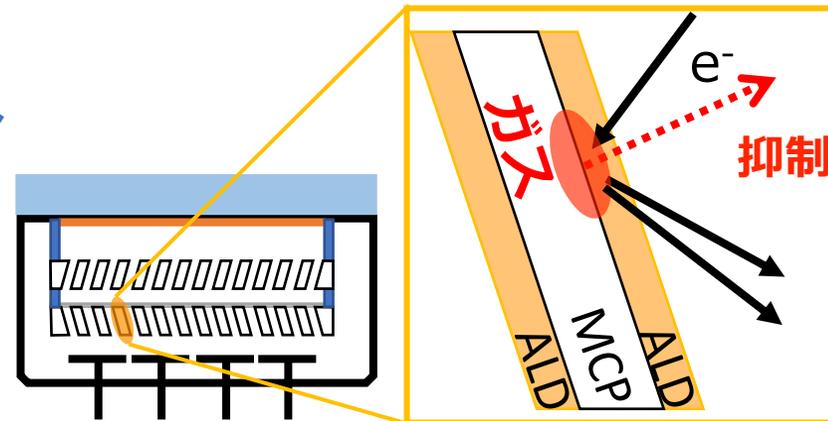
**光電面寿命** 1.1 C/cm<sup>2</sup> (平均)



## ALD型

MCP表面に原子層堆積 (ALD) を施す。

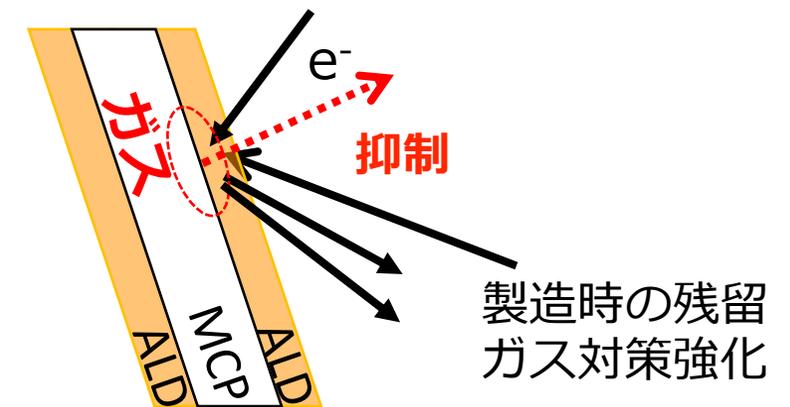
**光電面寿命** 10.4 C/cm<sup>2</sup> (平均)



## 寿命改善ALD型

ALDに加えて、製造時の残留ガス対策を強化。

**光電面寿命** 13.6 C/cm<sup>2</sup> (最小)



3段階の寿命対策をした。短寿命な初期量産型は2022年に取り替え予定。

**取替直前は、急激な量子効率低下が予測されるので、**

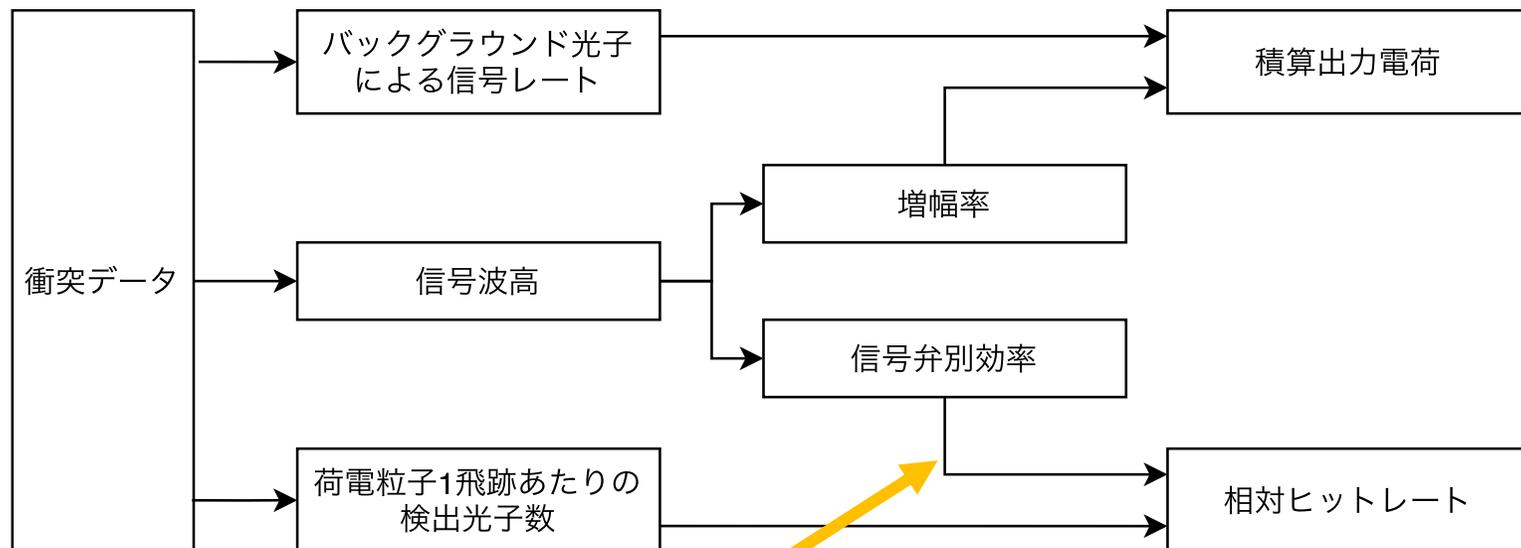
**注意深いモニタリングが重要。**

# 本研究の内容

本研究では、TOPカウンターに取り付けたMCP-PMTの量子効率変動を評価する。

- 量子効率の評価方法
- 評価結果
  - 積算出力電荷
  - 光子検出能力
  - 量子効率低下の疑いのあるPMT
- TOPカウンターの運転状況
- まとめ

# TOPカウンターのMCP-PMTの 量子効率測定



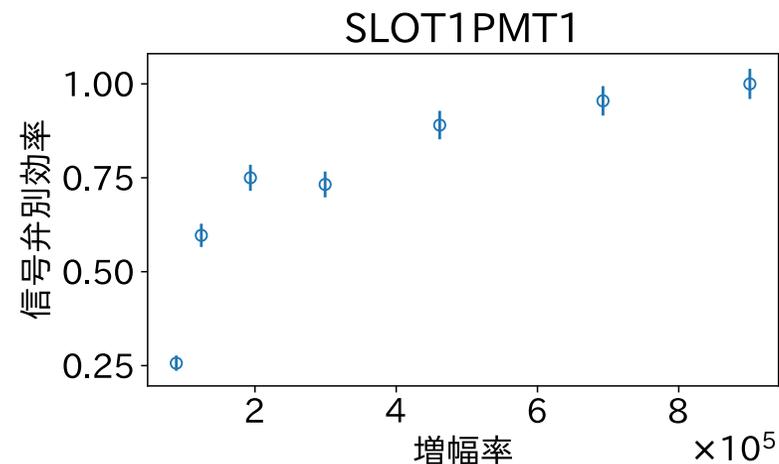
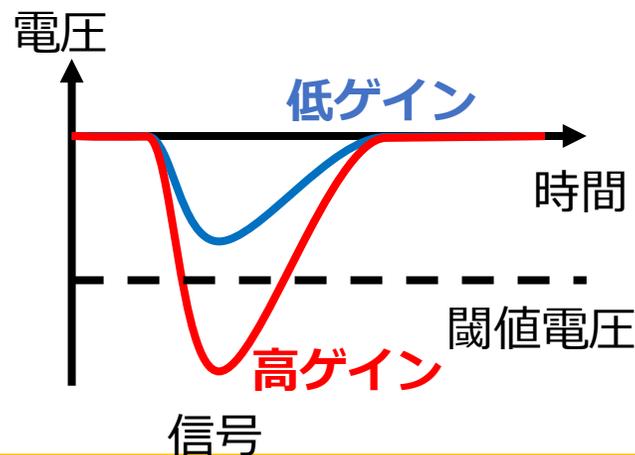
## 使用したデータ

- 積算出力電荷
  - 全データ
- 相対ヒットレート
  - 2021年以降の衝突データ

信号弁別効率で補正した  
検出光子数の相対値

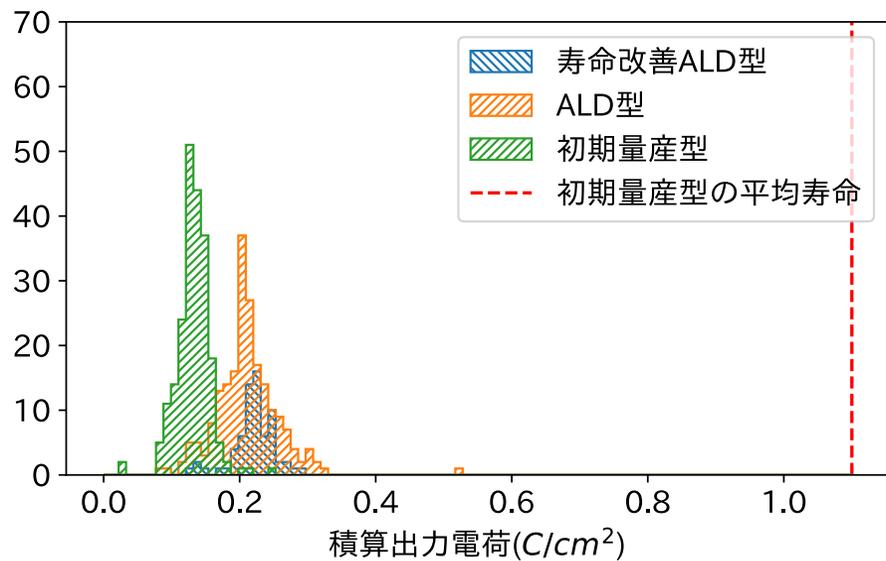
信号弁別効率とは、**光電子が生じた時に実際に読み出される効率**。  
増幅率により信号弁別効率が変化。

物理ラン停止時にレーザーを使用して取得したデータを使って補正する。



# 積算出力電荷

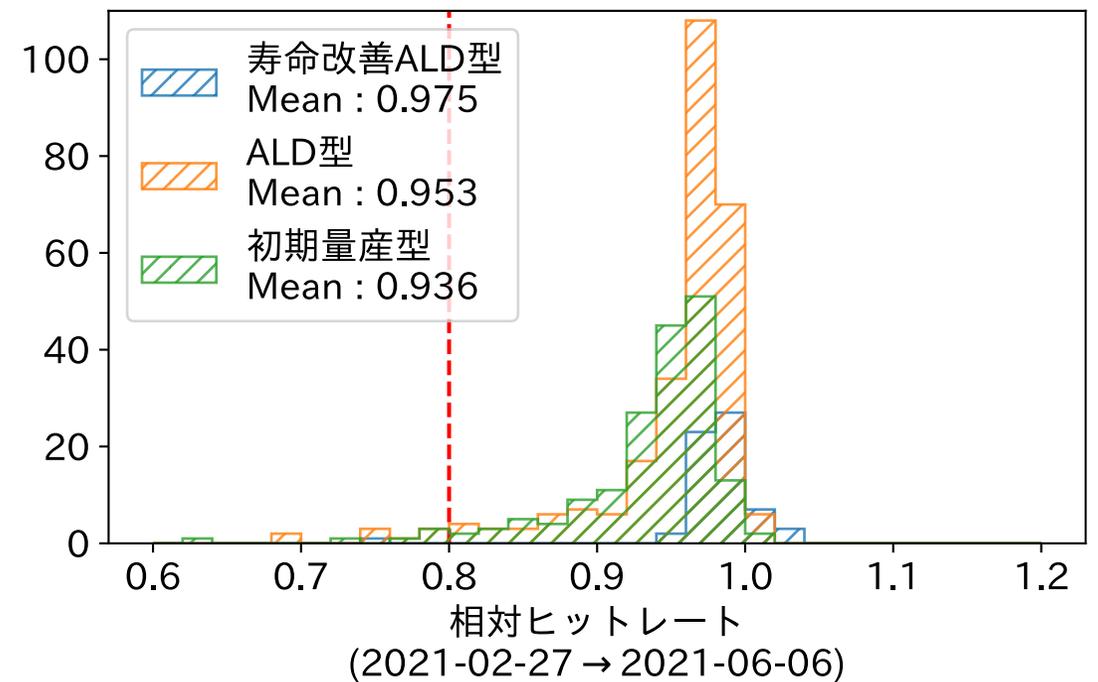
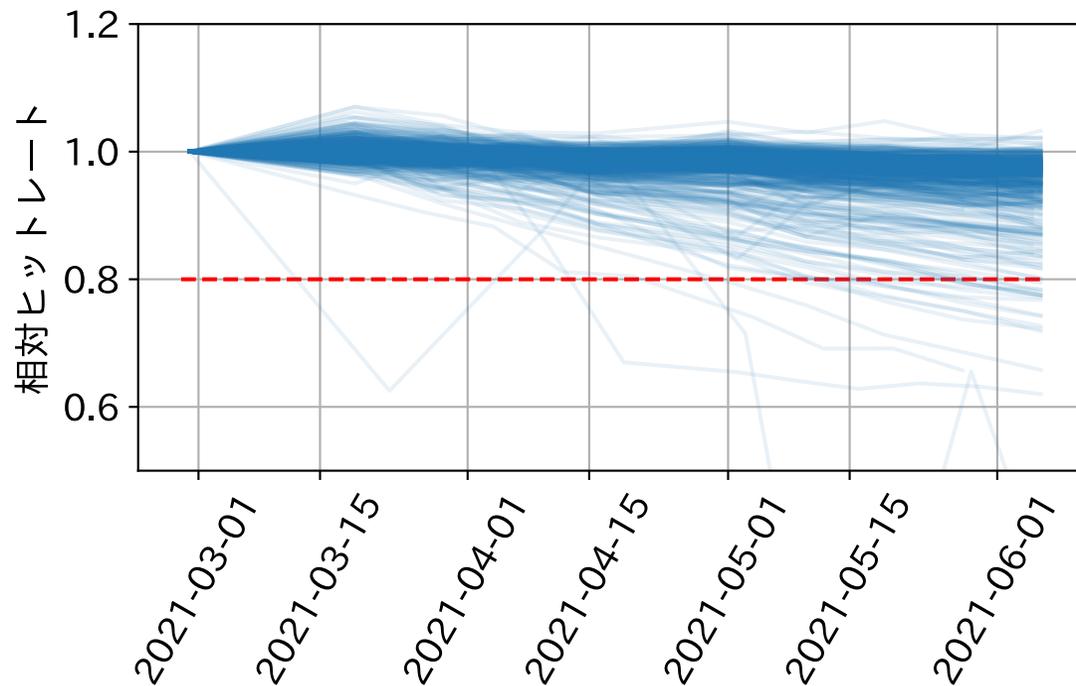
積算出力電荷は平均0.15C/cm<sup>2</sup>であり、寿命に対して十分に小さい。  
量子効率低下は起きないと予測される。



	寿命	積算出力電荷
寿命改善ALD	13.6 C/cm <sup>2</sup> (最小)	0.22 C/cm <sup>2</sup>
ALD	10.4 C/cm <sup>2</sup> (平均)	0.21 C/cm <sup>2</sup>
初期量産型	1.1 C/cm <sup>2</sup> (平均)	0.13 C/cm <sup>2</sup>

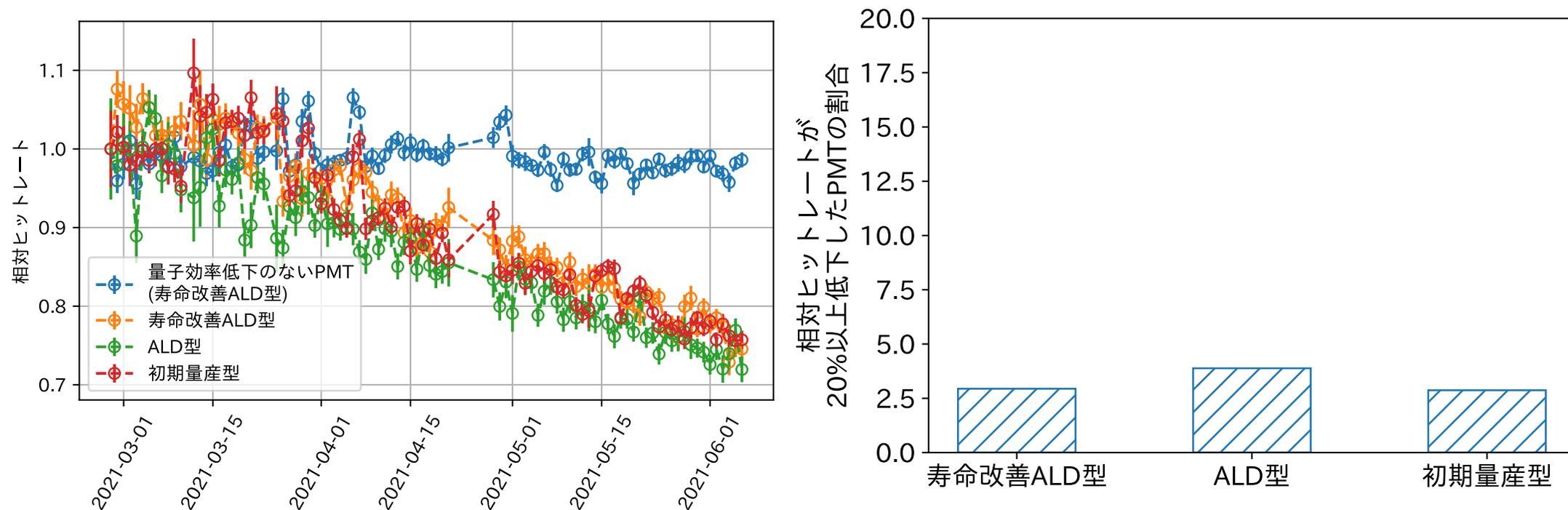
# 相対ヒットレート

- 全体的にわずかに低下している。
- **97%以上**のPMTで、粒子識別性能からの要求である相対ヒットレート80%をクリアしている。



# 相対ヒットレート低下の大きいMCP-PMT

- 約3%のPMTで相対ヒットレートが低下。
- PMTのタイプによらず低下しているので、量子効率低下以外の要因で低下している可能性も考えられる。



# 相対ヒットレートを引き起こす要因

測定方法によって相対ヒットレートを低下する可能性を検討した

信号弁別効率

$$\text{相対ヒットレート} = \frac{\text{検出光子数}}{\text{信号弁別効率}}$$

信号弁別効率を過大評価した場合、  
相対ヒットレート低下が起こる

バックグラウンドヒット

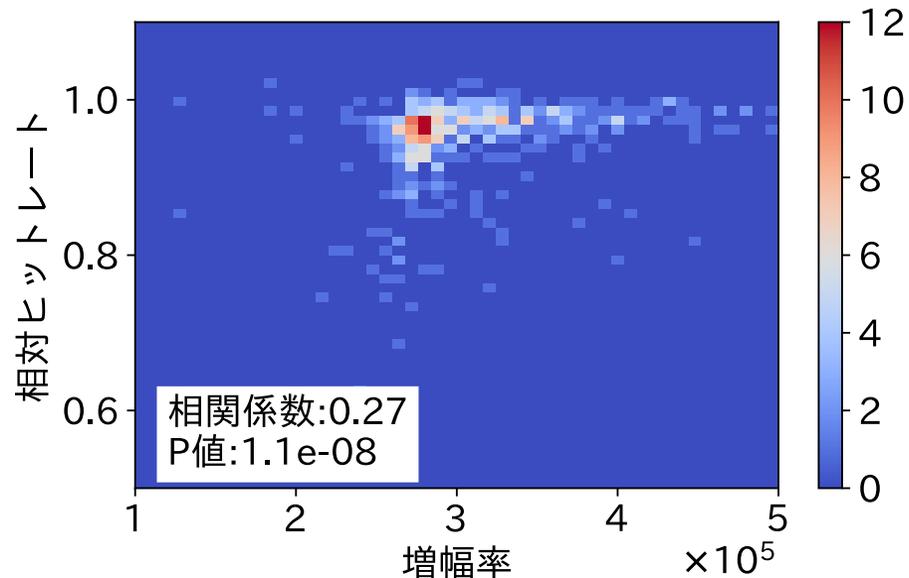
$$\text{相対ヒットレート} = \frac{\text{検出光子数}}{\text{信号弁別効率}}$$

バックグラウンド光子を過大評価す  
ると相対ヒットレート低下が起こる

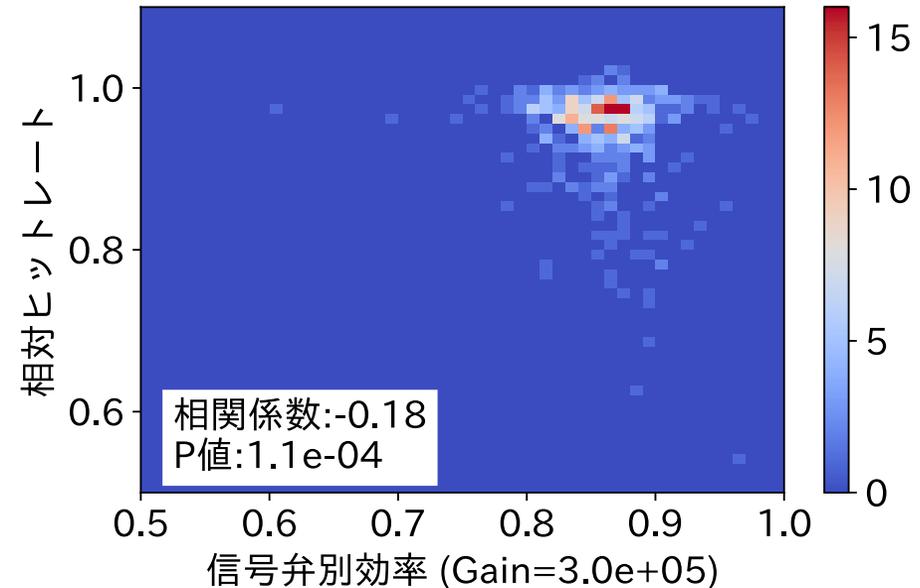
検出光子数 = 荷電粒子がTOPに入射した時の光子数 - バックグラウンド光子数

本発表では、信号弁別効率について考察する

# 信号弁別効率と相対ヒットレートの相関



増幅率と正の相関  
→増幅率が低下することで  
ヒットレートが下がる可能性



信号弁別効率と負の相関  
→信号弁別効率の過大評価により、  
相対ヒットレートが下がる可能性

**検出光子数の補正が間違っていて、相対ヒットレートが下がっている可能性がある。  
今後、MCP-PMTへの印加電圧を上げることでヒットレートが  
回復するかどうか確かめる計画である。**



# 結論

Belle II 実験の粒子識別装置、TOPカウンターのMCP-PMTの量子効率変動を評価した。

- **積算出力電荷**

- 平均 $0.15\text{C}/\text{cm}^2$ であり、MCP-PMTの寿命に対して十分に小さい。

- **相対検出光子数**

- 平均的に数%の低下があるものの、粒子識別性能からの要求を上回っている。

- **量子効率**

- 約3%のPMTを除き、一定の量子効率を保っている。
- 低下の原因には、量子効率以外にも信号弁別効率による補正、バックグラウンドヒットの除去などの測定方法に由来する要因も考えられる。