

Belle II 実験 TOP カウンター用光検出器 MCP-PMT の 環境依存性評価

小森 涼太郎

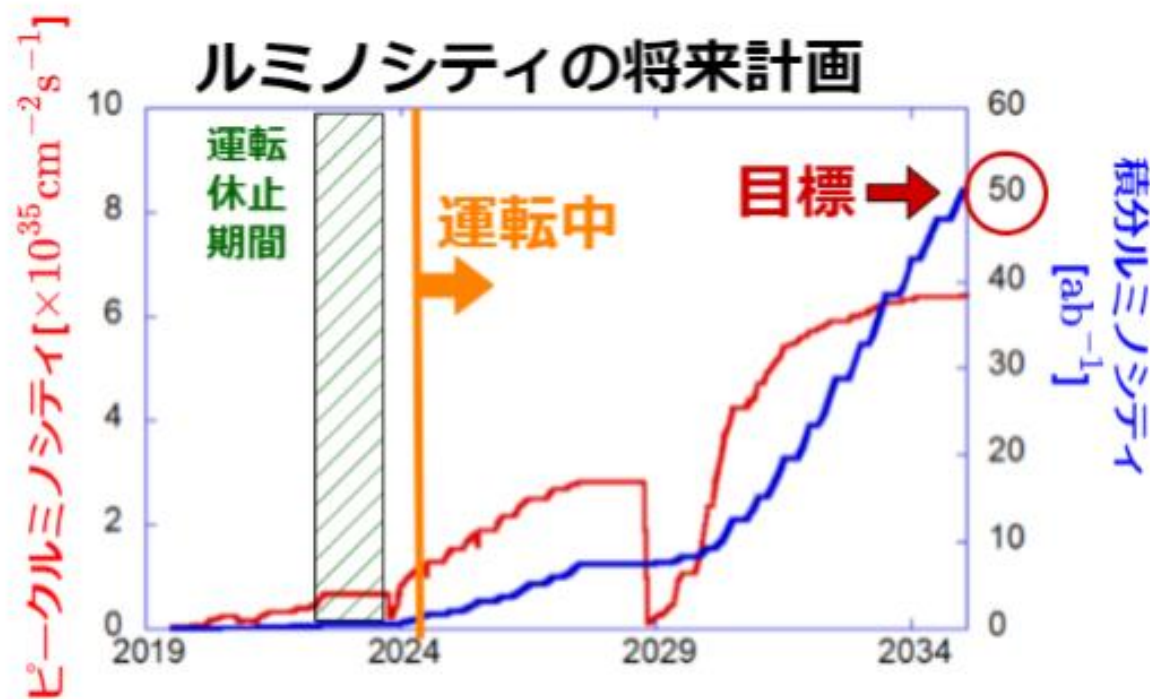
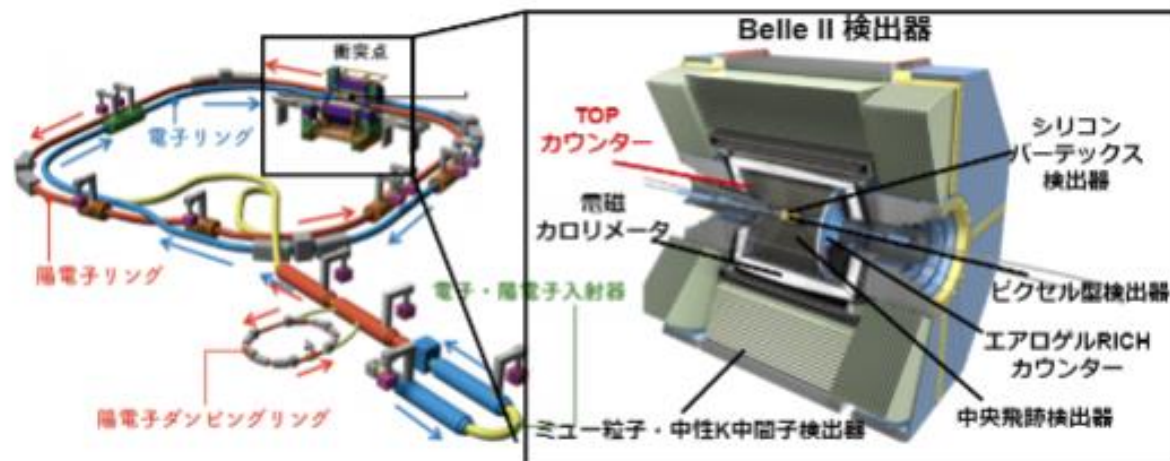
名古屋大学 高エネルギー素粒子物理学研究室 修士 2 年

2024/12/03

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
- B 中間子や τ 粒子の崩壊などから素粒子理論を検証
- 世界最高ピークルミノシティ
 $4.7 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
- 今後さらにルミノシティを増やす
→ 信号・背景事象も増加

高レート環境下でも
検出器の性能を維持したい



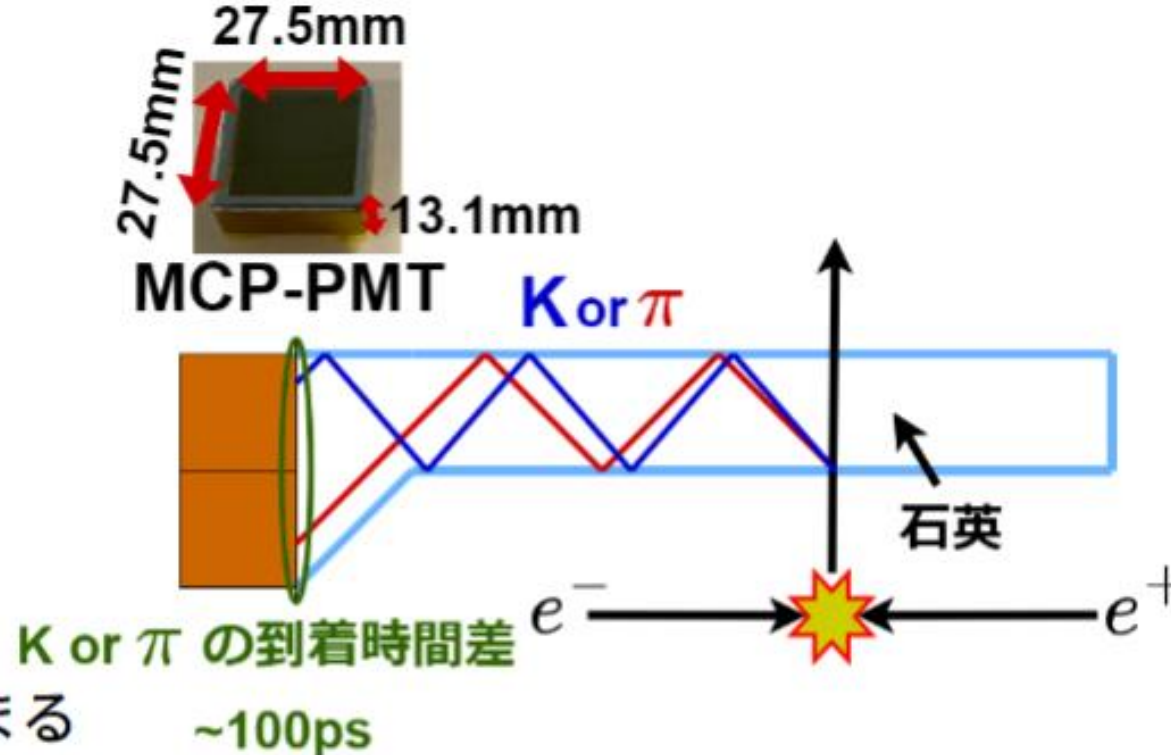
TOP カウンター

- TOP カウンター

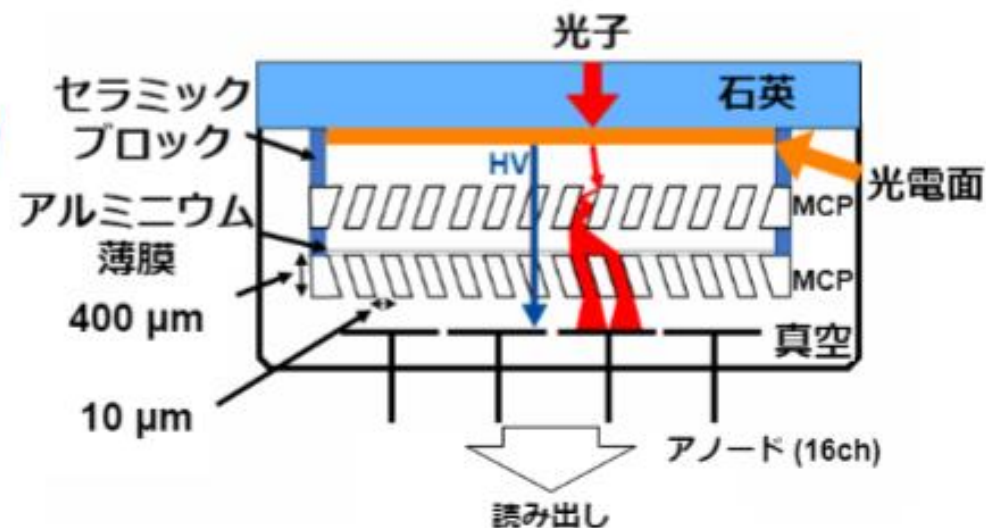
- ▶ リングイメージ型チェレンコフ検出器
- ▶ チェレンコフ光が光検出器に到達した時間と位置を使って K 中間子と π 中間子を識別
- ▶ 検出光子数：20 – 40 個 / 1 飛跡
- ▶ 識別性能は 検出効率 と 時間分解能 で決まる

- 光検出器 MCP(Micro Channel Plate)-PMT

- ▶ 時間分解能 $\sigma \sim 34.3$ ps (< 100 ps (要求値))
- ▶ 量子効率 29.3% , 一光子検出効率 18%

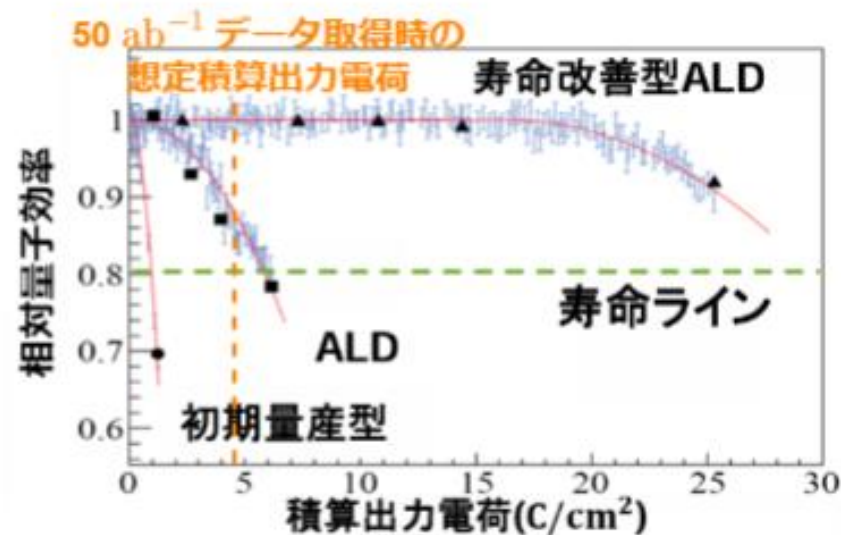


検出原理

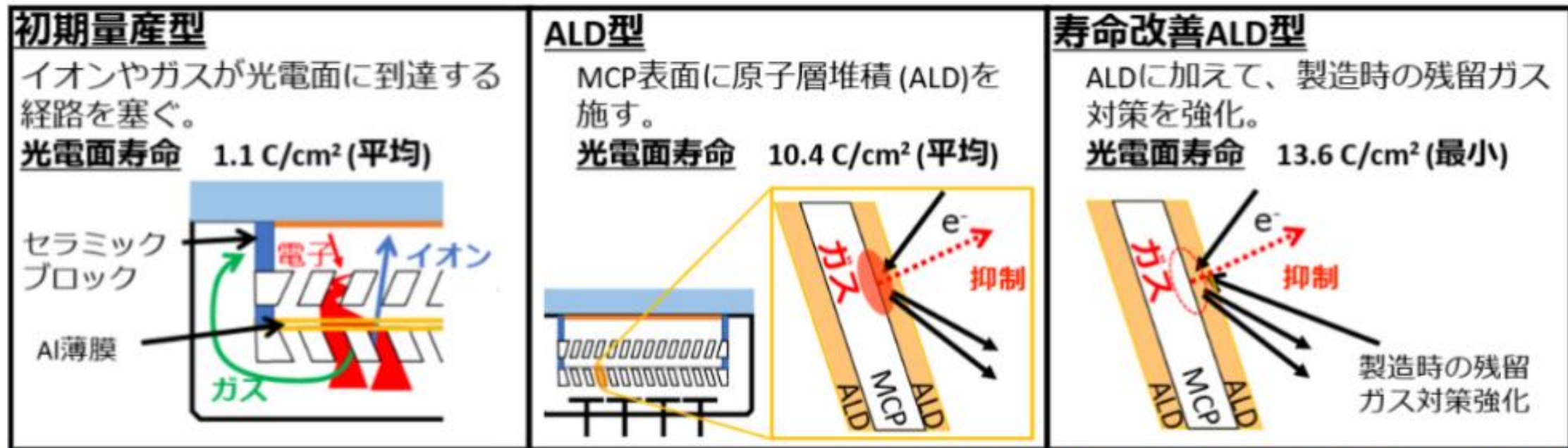


MCP-PMTの課題と対策

- 積算出力電荷に依存して量子効率 (QE) 低下
- 原因：イオンやガスが光電面に到達すること
- Belle II 運転前にテストベンチで3種類のPMTのQEと積算出力電荷を測定
→ Belle II 運転中のQEの変動を予測



(2018 年秋季大会 15pS13-7 名古屋大・室山)

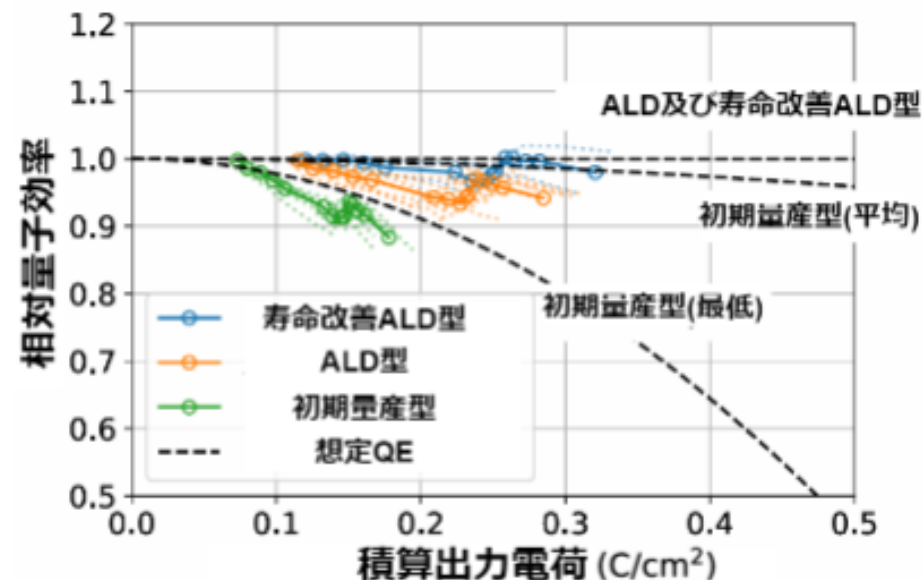


Belle II 運転中のQE低下

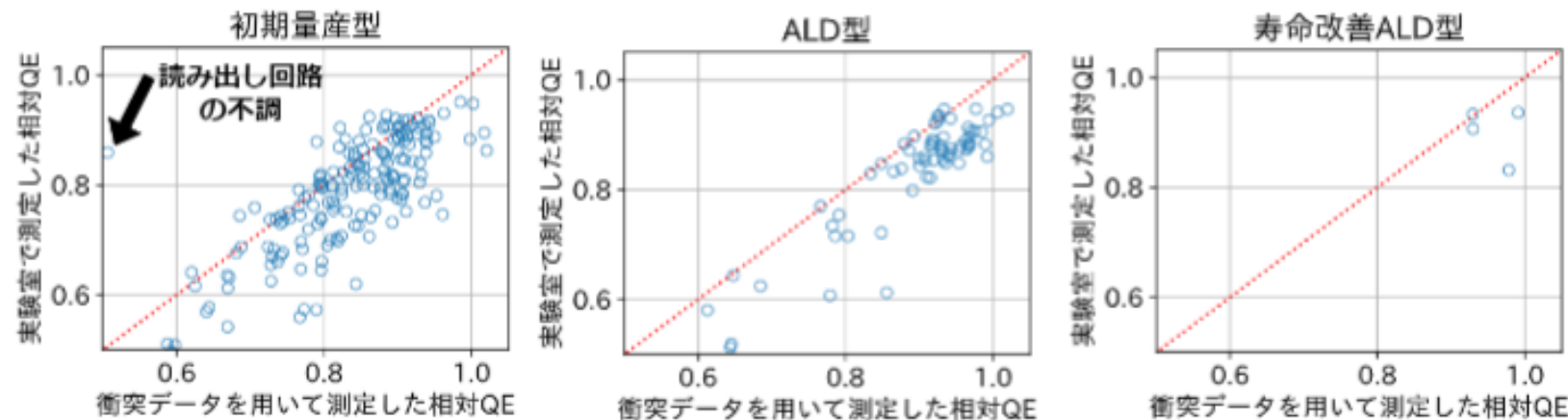
- 衝突データを用いて Belle II 運転中に積算出力電荷と QE を測定

→ 予想よりも早く QE が低下した

- 量子効率が大きく低下した PMT を新品の PMT と交換
- 取り外した PMT をテストベンチで QE 測定
→ 衝突データから得た結果を再現

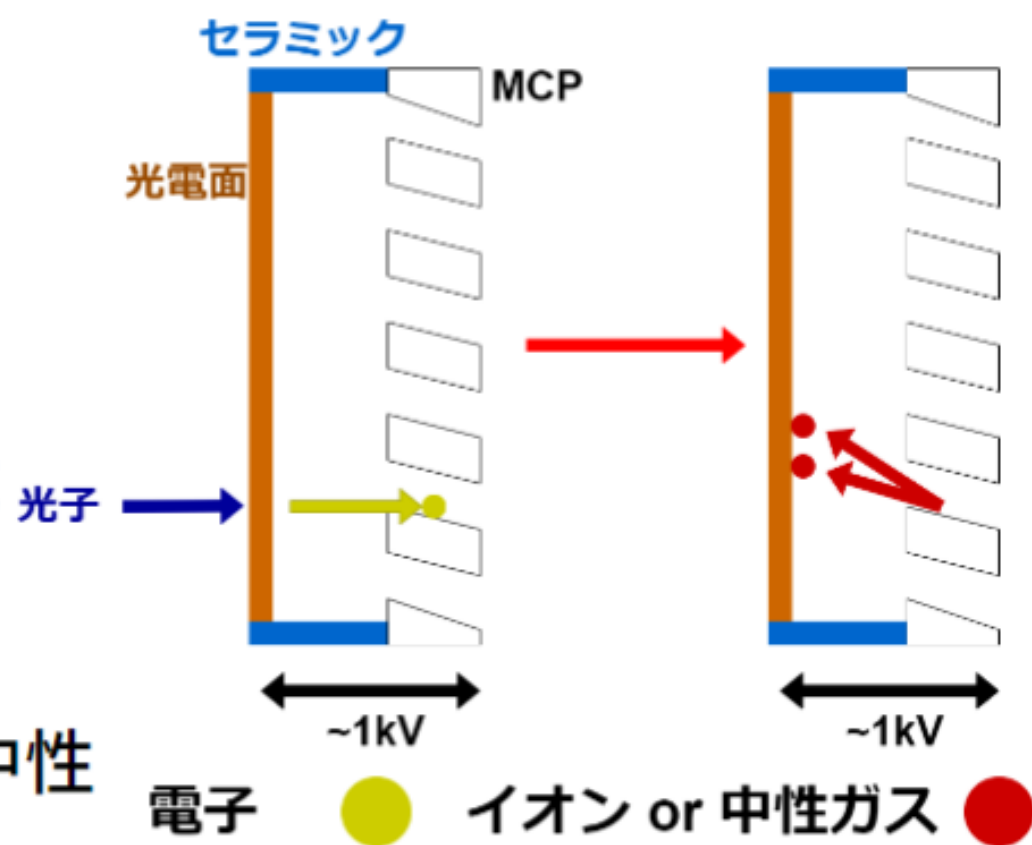


何が原因なのか？



想定以上のQE低下の要因：温度

- 製造時の残留ガスがMCPに付着
- 電子増幅過程でイオンや中性ガスが放出
- これまでのQEと積算出力電荷の測定環境
 - ▶ テストベンチ：25 °C
 - ▶ 測定器内：40 – 50 °C
- 仮説：熱エネルギーで放出するイオンや中性ガスが増加？



テストベンチで測定器内の温度を再現しながら試験

高温環境下測定

- 積算出力電荷

- ▶ 測定に使った PMT
相対 QE 0.8 – 0.9 の PMT
(初期量産型:4 本,ALD 型:2 本, 寿命改善 ALD 型:2 本)
- ▶ 恒温槽内に MCP-PMT を設置
- ▶ LED の光を MCP-PMT に当てる
- ▶ ADC を使って電荷のデータを取得

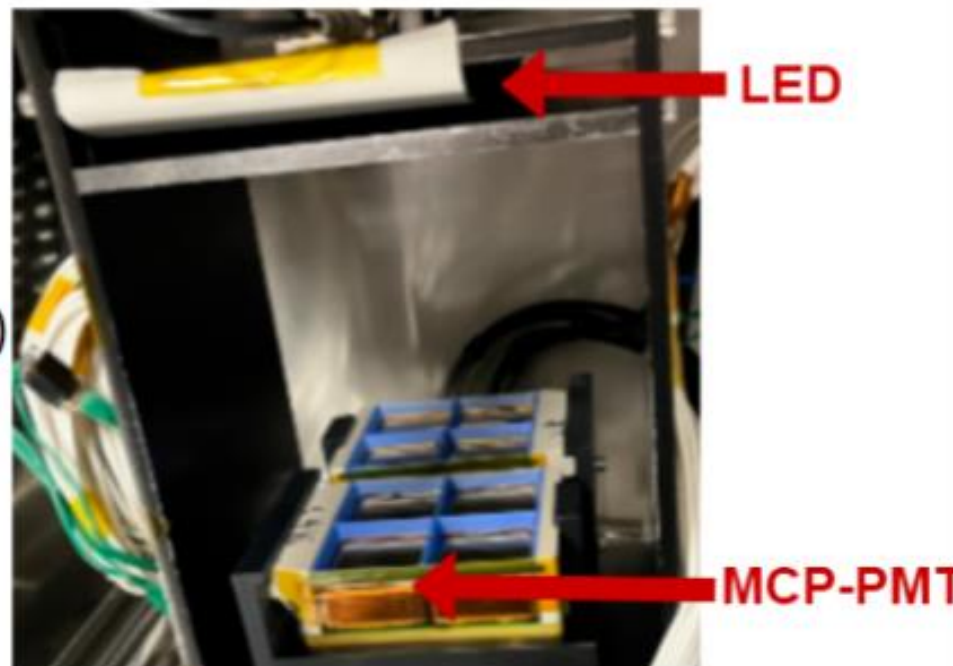
- QE

- ▶ 恒温槽から取り出し、単色光を
PMT とフォトダイオード (PD) に照射

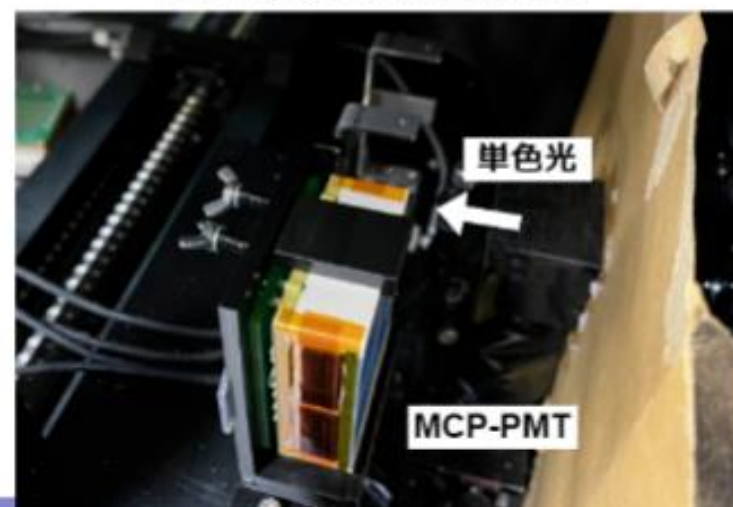
$$QE^{mcp} = \frac{I_{light}^{mcp} - I_{dark}^{mcp}}{I_{light}^{PD} - I_{dark}^{PD}} QE^{PD}$$

- 繰り返し積算出力電荷と QE を測定した

積算出力電荷の測定ベンチ



QE measurement

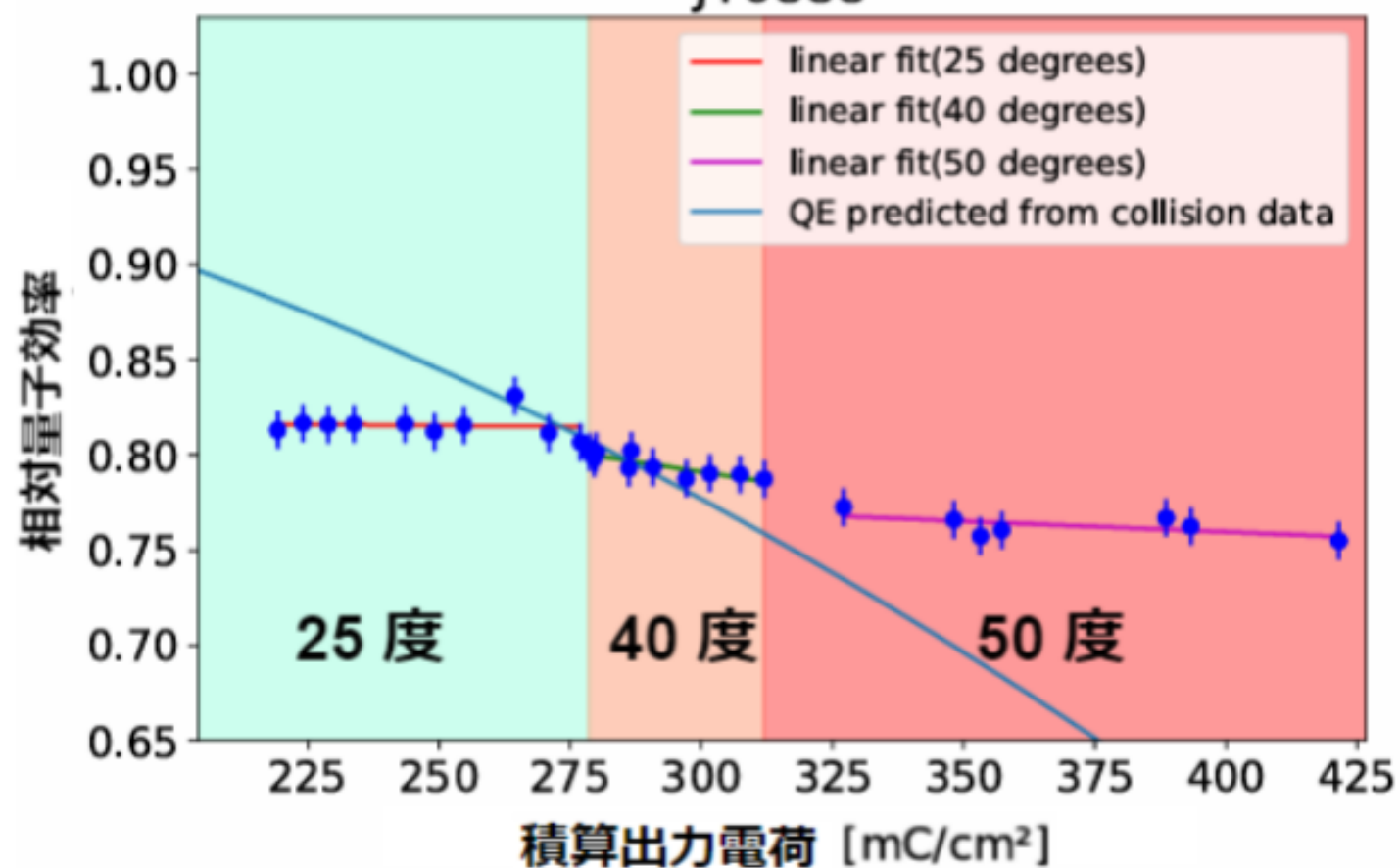


高温環境中の測定結果

- 25 °C → 40 °C → 50 °C と温度を変化させて測定
- 一次関数で温度毎に測定結果をフィッティング
- Belle II 運転中のデータでフィットした傾きと比較
- **どの MCP-PMT でも Belle II 運転中の QE 低下を再現する QE 変動は見られなかった**

測定結果の例(初期量産型)

JT0888



想定以上のQE低下の要因：磁場

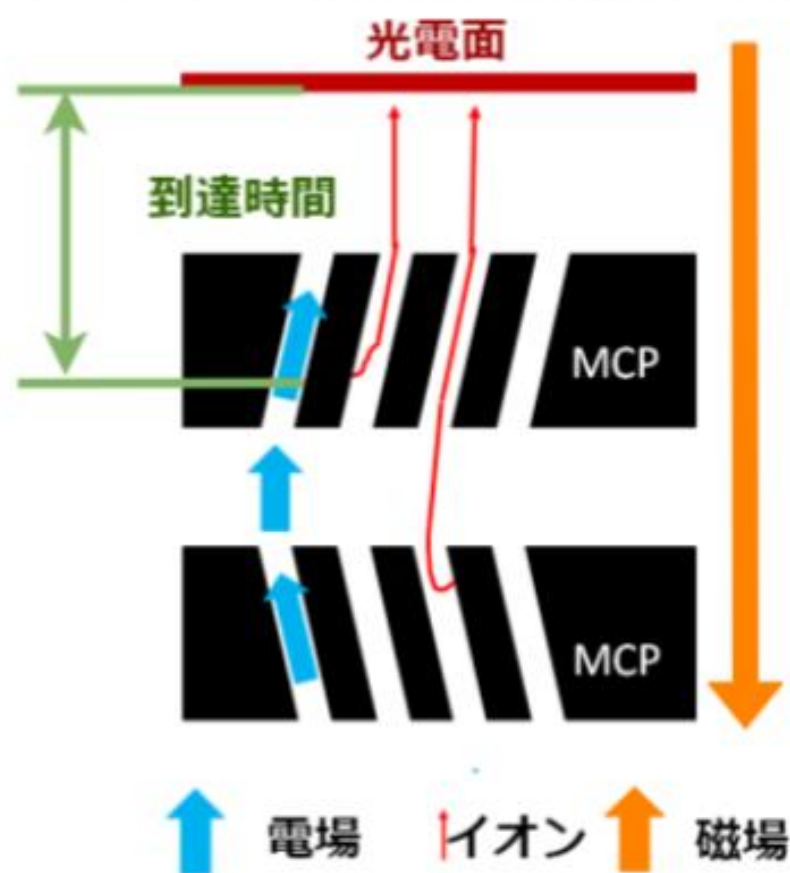
- 温度以外の測定環境の違い → 磁場
 - ▶ テストベンチ：0 T
 - ▶ 測定器内：1.5 T
- 仮説：電子増幅過程の変化 → イオンや中性ガスの変化？
- MCP-PMT に光を照射し、電荷を貯めるのは時間がかかる
- まずはイオンの種類や量が磁場の有無で変化があるか確認
→ アフターパルスを使ってイオンを調べる

アフターパルスの要因

- アフターパルス：光電面にイオンが衝突して電子を出し、MCP内で増幅された信号
- 光電面に到達する時間はイオンの質量・電荷、MCPにかける印加電圧で決まる
→ **アフターパルスでイオンが分かる**
- 想定されるイオンと光電面に到達する時間

イオン	到達時間(ns)	イオン	到達時間(ns)
H	6.66	O ₂	37.73
He	13.33	CO ₂	44.24
H ₂ O	28.29	Pb	96.18

アフターパルスの発生原理

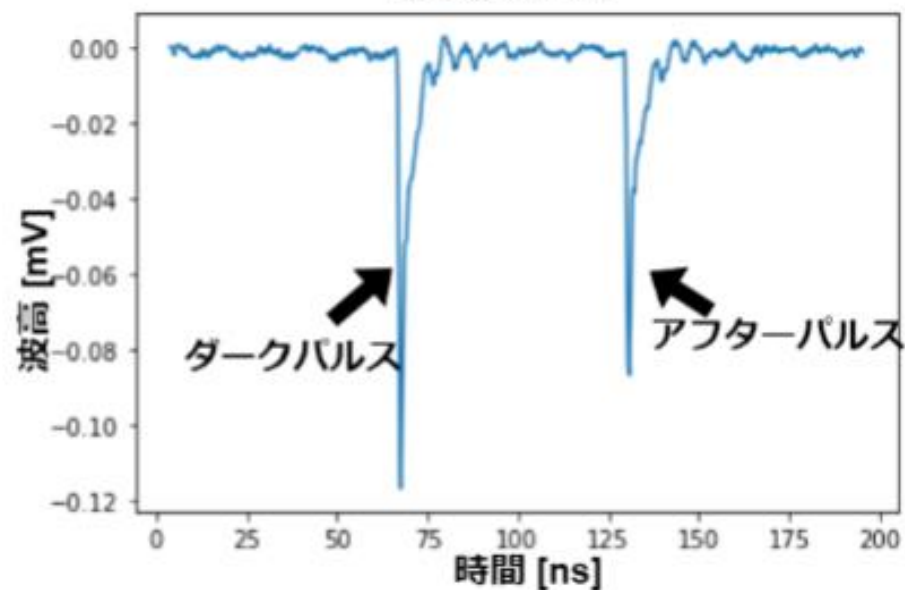


アフターパルス測定

- KEK の北カウンターホールの電磁石を使用
- 電磁石内に TOP から取り外した初期量産型 MCP-PMT(相対 QE:0.822) を設置
- 0 T と 1.5 T の環境中で同じゲインで測定
- ダークパルスをトリガー
- DRS4 で波形を取得
- ダークパルスとアフターパルスの時間差を求める
→ **光電面に到達する時間**

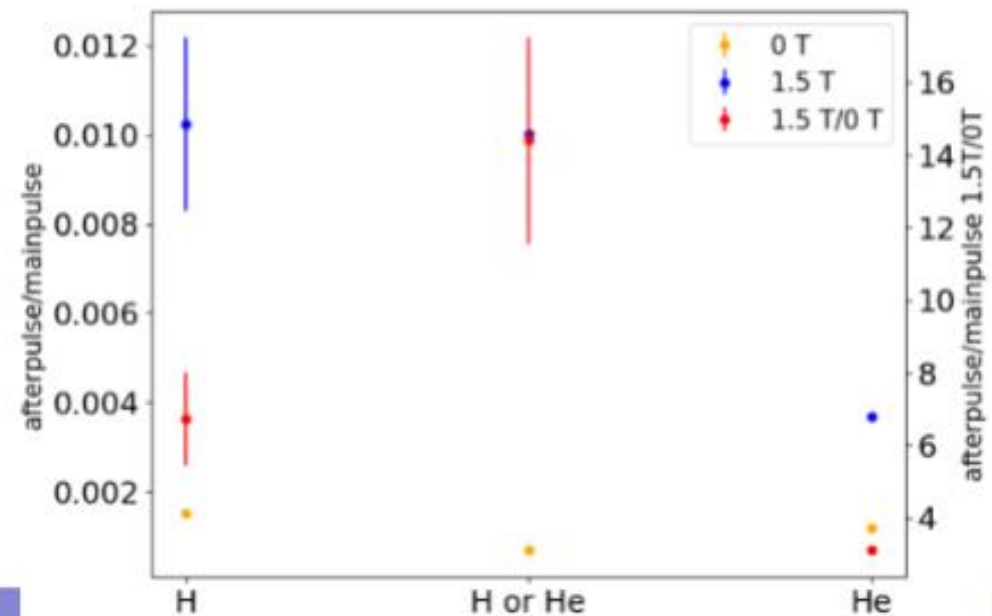
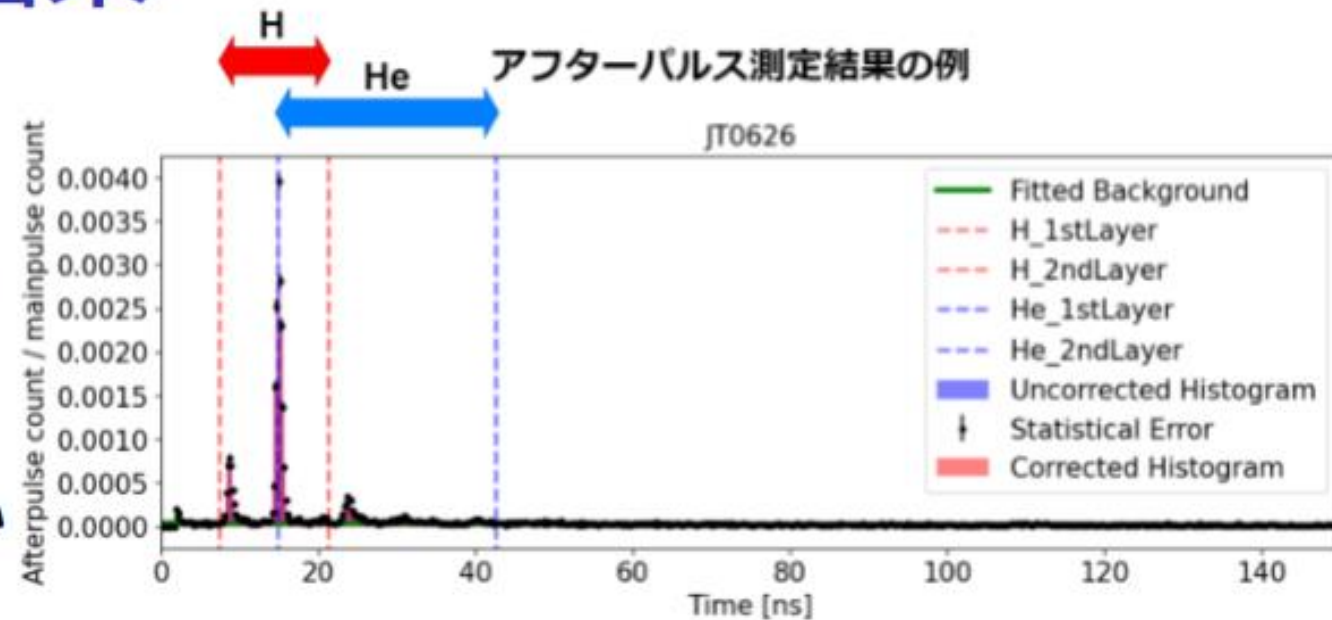


波形の例



アフターパルスの測定結果

- ダークパルスが2本以上入る事象
→ ピーク以外をフィッティング
→ アフターパルス量を見積もる
- 20 ns 以内のアフターパルスが多い
軽いイオン (H、He)
- 1.5 Tの方が0 Tよりも軽いイオンのアフターパルス量が多い
磁場によって光電面に到達する
軽いイオン (特に水素) の数が増加



結論

- 今回の研究の結論

- ▶ Belle II 運転中に MCP-PMT の QE が想定より低下した
- ▶ 高温環境中で積算出力電荷と QE の関係を調べたが、大きな QE 低下は確認できなかった
- ▶ アフターパルスを測定することによって、磁場中で光電面に到達する軽いイオン (特に水素) の数が増加した

- 今後の展望

- ▶ ALD 型、寿命改善 ALD 型の PMT で磁場中のアフターパルス測定を行う
- ▶ 水素イオンが大きく増えた要因を調査する
- ▶ 実際に磁場中で積算出力電荷をため、QE 低下を調べる