

KEK 測定器開発テストビームライン共同利用実験成果報告書

2024 年 2 月 17 日

1. 課題番号

2023ARTBL010

2. 課題名

MCP-PMT 及び GasPM を用いたチェレンコフ TOF 検出器の時間分解能検証

3. 研究代表者

氏名： 松岡 広大

所属機関： 高エネルギー加速器研究機構

職名： 准教授

連絡先： matsuoka@post.kek.jp

4. 実験参加者 (氏名、所属機関、職名または学年)

- ・ 梶 翔太、名古屋大学、学部 4 年生
- ・ 近藤 彩夏、名古屋大学、学部 4 年生
- ・ 市川 忠樹、名古屋大学、学部 4 年生
- ・ 上田 晃市、名古屋大学、学部 4 年生
- ・ 千葉 公太郎、名古屋大学、学部 4 年生
- ・ 大久保 亮吾、名古屋大学、博士課程 3 年生
- ・ 鷺見 一路、名古屋大学、博士課程 2 年生

- ・ 堀井 泰之、名古屋大学、准教授
- ・ 居波 賢二、名古屋大学、准教授
- ・ 鈴木 一仁、名古屋大学、特任講師
- ・ 飯嶋 徹、名古屋大学、教授
- ・ 大谷 将士、高エネルギー加速器研究機構、助教

5. ビームタイムの期間

(エリア内準備期間、ビーム使用期間、撤収期間がわかるように)

2023年12月10日 09:00 エリア内準備開始

2023年12月10日 19:00 頃 ~ 12月13日 08:00 頃 ビーム使用

2023年12月13日 09:00 エリア撤収完了

6. ビームの状況

PF-AR は 6.5 GeV での運転。テストビームラインでは、ビーム運動量を 2、3 または 5 GeV/c に設定、3 GeV/c のときビームレートは約 0.6 kHz だった。

7. 実験成果

開発中のチェレンコフ TOF (Time-Of-Flight) 検出器 4 台、およびビームトリガーとして有感面積 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ と $4 \times 4 \text{ cm}^2$ のシンチレーションカウンター各 2 台をビームライン上一直線に並べ、電子ビームを照射、TOF 検出器の性能を評価した。TOF 検出器は、厚さ 1.5 mm の人工石英窓と厚さ 5 mm のサファイアガラスを輻射体とする MCP-PMT (マイクロチャンネルプレート型光電子増倍管) 2 台、厚さ 2.0 mm の人工石英窓に LaB_6 光電面を備えた GasPM (Gaseous Photo-Multiplier) 1 台、厚さ 2.4 mm の MgF_2 窓に CsI 光電面を備えた GasPM 1 台である。また、後者の GasPM と同じ構造で CsI 光電面を SUS 電極に付け替えた RPC (Resistive Plate Chamber) 1 台も比較用に設置した。GasPM と RPC には、R134a と SF_6 の混合ガスを直列で流した。混合比は当初 9:1、実験最後に 1:1 まで徐々に変化させた。シンチレーションカウンターをトリガーにし、各検出器からの信号を 5 Gsample/s のデジタルイザで記録した。

MCP-PMT を用いた TOF 検出器 (MCP モニタ) の時間分解能を評価するため、ビーム運動量 3 GeV/c のデータで、 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ のシンチレーションカウンター 2 台にヒットがあるイベントのみを用いて、MCP モニタ 2 台のビーム検出時間差を測定した。ここでは暫定的に、波高が 200~800 mV の範囲にある MCP モニタの信号のみを使う。図 1 に MCP モニタ 2 台のビーム検出時間差を示す。ガウス関数でフィットした

とき、標準偏差は 22.8 ± 0.2 ps だった。読み出し回路の時間分解能 10.6 ± 0.1 ps を差し引くと、MCP モニタ単体の時間分解能は 14.2 ± 0.2 ps だった。この MCP モニタは、J-PARC ミューオン $g-2$ /EDM 実験において 40 MeV ミューオンビームの縦方向バンチ幅をモニタするためのもので、単一荷電粒子に対して 10 ps の時間分解能を持つことが要求されるが、まだその要求を満たせていないことがわかった。人工石英とサファイアの屈折率の違い（それぞれ波長 400 nm において 1.47 と 1.79）によりチェレンコフ光が境界面で全反射してしまうことなどがわかっており、今後改良が必要である。

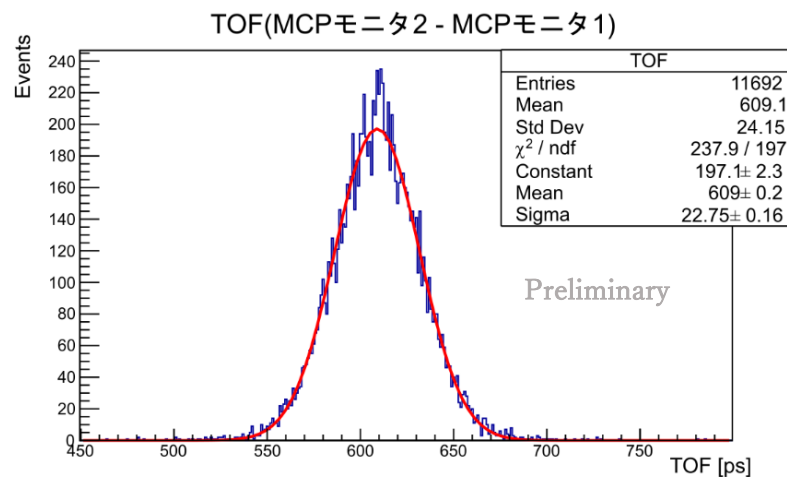


図 1：MCP モニタ 2 台のビーム検出時間差。ヒストグラムはデータ、赤線はフィットしたガウス関数。

GasPM (CsI 光電面、高抵抗板はソーダガラス) を用いた TOF 検出器の時間分解能を評価するため、GasPM と MCP モニタのビーム検出時間差を測定した。GasPM に印加した電圧は -2800 V、ギャップ幅が $200 \mu\text{m}$ なので電場にして 140 kV/cm 、ガス混合比は 1:1 だった。ここでは暫定的に、波高が $200 \sim 700$ mV の範囲にある GasPM および MCP モニタの信号のみを使う。図 2 に GasPM の信号波形を示す。ほぼすべてのイベントで、チェレンコフ光による信号パルスの直後に photon feedback によるものと思われるパルスが重なっていた。パルス波高が最大値の $1/4$ から $3/4$ に立ち上がるまでの時間を立ち上がり時間と定義し、立ち上がり時間が約 0.5 ns と最も短い信号のみを用いたときの GasPM と MCP モニタのビーム検出時間差を図 3 左に示す。二重ガウス関数でフィットしたとき、標準偏差は 55.5 ± 6.0 ps だった。MCP モニタと読み出し回路の時間分解能を差し引くと、GasPM 単体の時間分解能は 52.6 ± 6.0 ps だった。これは GasPM (LaB₆ 光電面) の単光子検出における時間分解能 25.0 ± 1.1 ps [1] よりも悪い。さらに、図 2 右のようにパルスの重なりが区別できないとき立ち上がり時間は長くなり、図 3 右に示すように GasPM の時間分解能が悪化する。Photon feedback があっても TOF 検出器として動作することはわかったが、時間分解能を改善するためには、photon feedback の影響を低減するなどのさらなる研究開発が必要である。

図 4 に、印過電圧が同じ -2800 V のときの GasPM (CsI 光電面) と RPC の出力電荷分布を示す。GasPM の出力電荷が RPC よりも大きく、信号数も約 1.5 倍であることから、GasPM の信号には RPC のガス電離に加えチェレンコフ光によるものも含まれることが確かめられた。

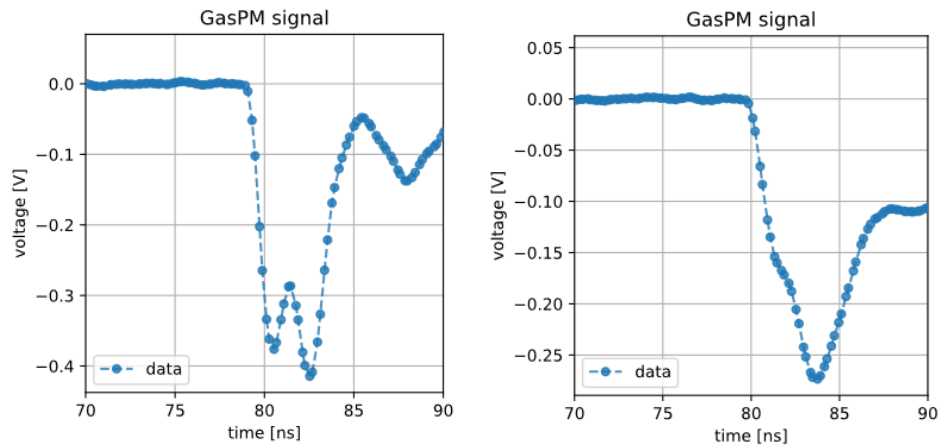


図 2 : GasPM (CsI 光電面) の信号波形

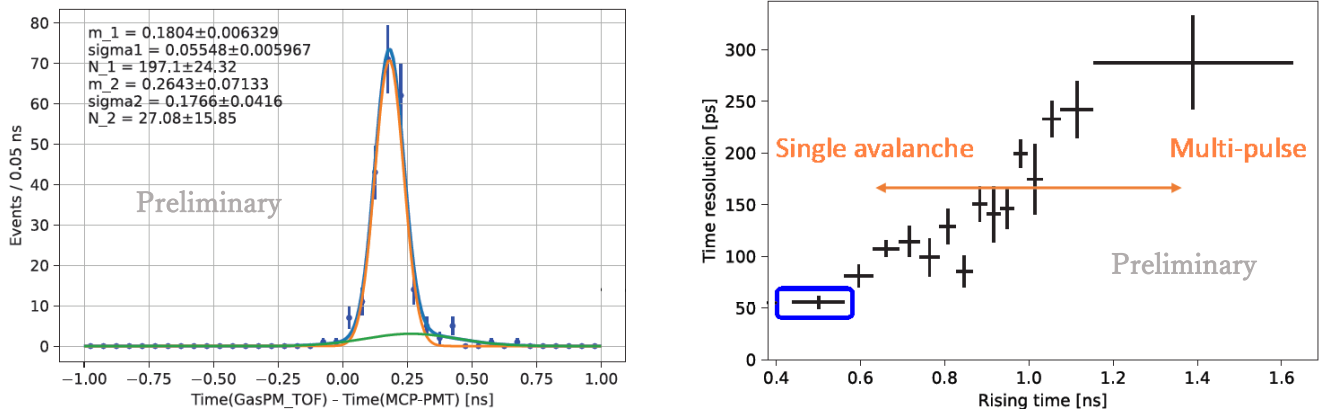


図 3 : 左図は、GasPM (CsI 光電面) と MCP モニタのビーム検出時間差で、GasPM 信号の立ち上がり時間が 0.5 ns 付近 (右図一番左の点) のイベントのみを抜き出したもの。エラーバー付きの点はデータ、青線 (オレンジ線+緑線) はフィットした二重ガウス関数。右図は、検出時間差の標準偏差と GasPM 信号の立ち上がり時間の関係。

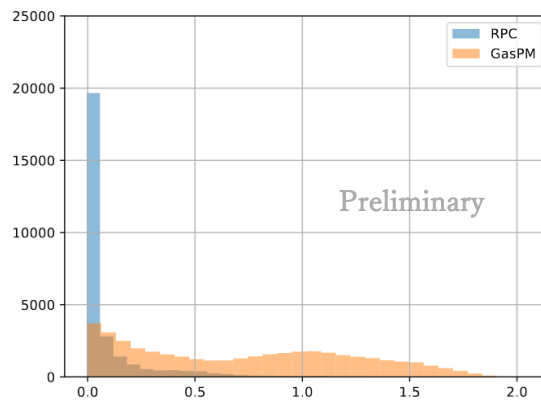


図 4 : GasPM (CsI 光電面) と RPC の出力電荷分布。軸のスケールは任意。

GasPM (LaB₆ 光電面) の高抵抗板には紙製ベークライトを使用した。体積抵抗率が $10^9 \Omega\text{cm}$ とソーダガラスの $10^{13} \Omega\text{cm}$ と比べて低いため、GasPM (CsI 光電面) よりも高いレート耐性が期待できる。GasPM (LaB₆ 光電面) のレート耐性を測定するため、ビーム運動量 (2, 3, 5 GeV)、四重極電磁石のオン・オフ、検出器上流に設置したビームコリメータによってトリガーレートを 1.5~90 Hz の間で変化させた。トリガーレートとともに GasPM のゲインと検出効率が予想に反して低下した。ただし、明確な結論を得るにはまだ詳細なデータ解析が必要である。

参考文献

[1] K. Matsuoka, R. Okubo, and Y. Adachi, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1053 (2023) 168378.

8. 結果の公表予定

2024 年 4 月 4~5 日に KEK で行われる「共同利用 AR テストビームライン研究会」、2024 年 9 月 16~19 日に北海道大学で行われる物理学会第 79 回年次大会で発表する予定。

9. 今後の要望

以上