

# 加速器科学インターンシップ終了報告書

名古屋大学理学部物理学科 4 年 高エネルギー素粒子物理学研究室  
茨木優花 菊池美雪

## 1 はじめに

私は、ガラス材を取り付けたマイクロチャンネルプレート (MCP)-PMT の時間分解能を調べるために、J-PARC MLF D1 ミューオンビームラインを使用し、2つの MCP-PMT の飛行時間測定を行った。実験は 1 月 16 日 9:00-22:00 に行った。

## 2 実験目的

J-PARC ミューオン  $g - 2$ /EDM 実験のミューオン線形加速器中速部におけるミューオンビームのバンチ幅測定にガラス材を取り付けた MCP-PMT が使用可能であるか検証をする。加速器の低速部では、バンチ幅測定のための検出器に 40 ps 程度の時間分解能が要求されたが、低速部の 4 倍の加速周波数を用いて 40 MeV まで加速する中速部では、10 ps 程度の時間分解能が要求される。MCP-PMT は 1 光子で 30 ps の時間分解能を持つので、適切なガラス材を用いることでミューオンから十分な数のチェレンコフ光を発生させ、要求される時間分解能を達成できると考えられる。本実験では、サファイアガラスを取り付けた MCP-PMT の時間分解能を調べる。

## 3 実験概要

D1 ラインでの TOF カウンターのセットアップは図 3.1 のように配置した。MCP-PMT は 140 mm の TOF カウンターになるようにし、ビーム軸がトリガー、MCP-PMT の中心を通るように配置した。トリガーにはライトガイド付きのシンチレーションカウンターを用いた。また、ビームの強度を落とすためにスリットサイズを 15 mm にまで絞った。

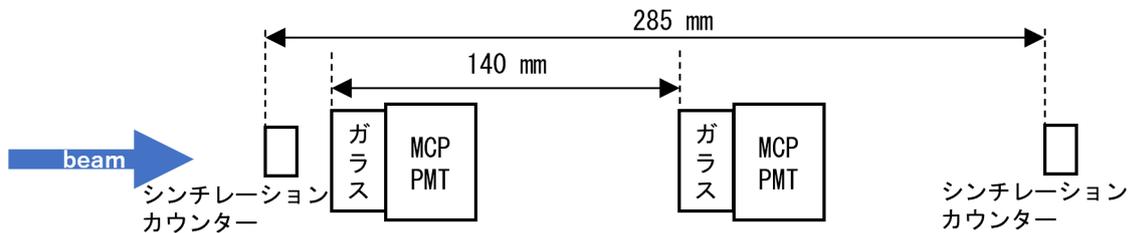


図 3.1: ビームラインにおけるセットアップ。

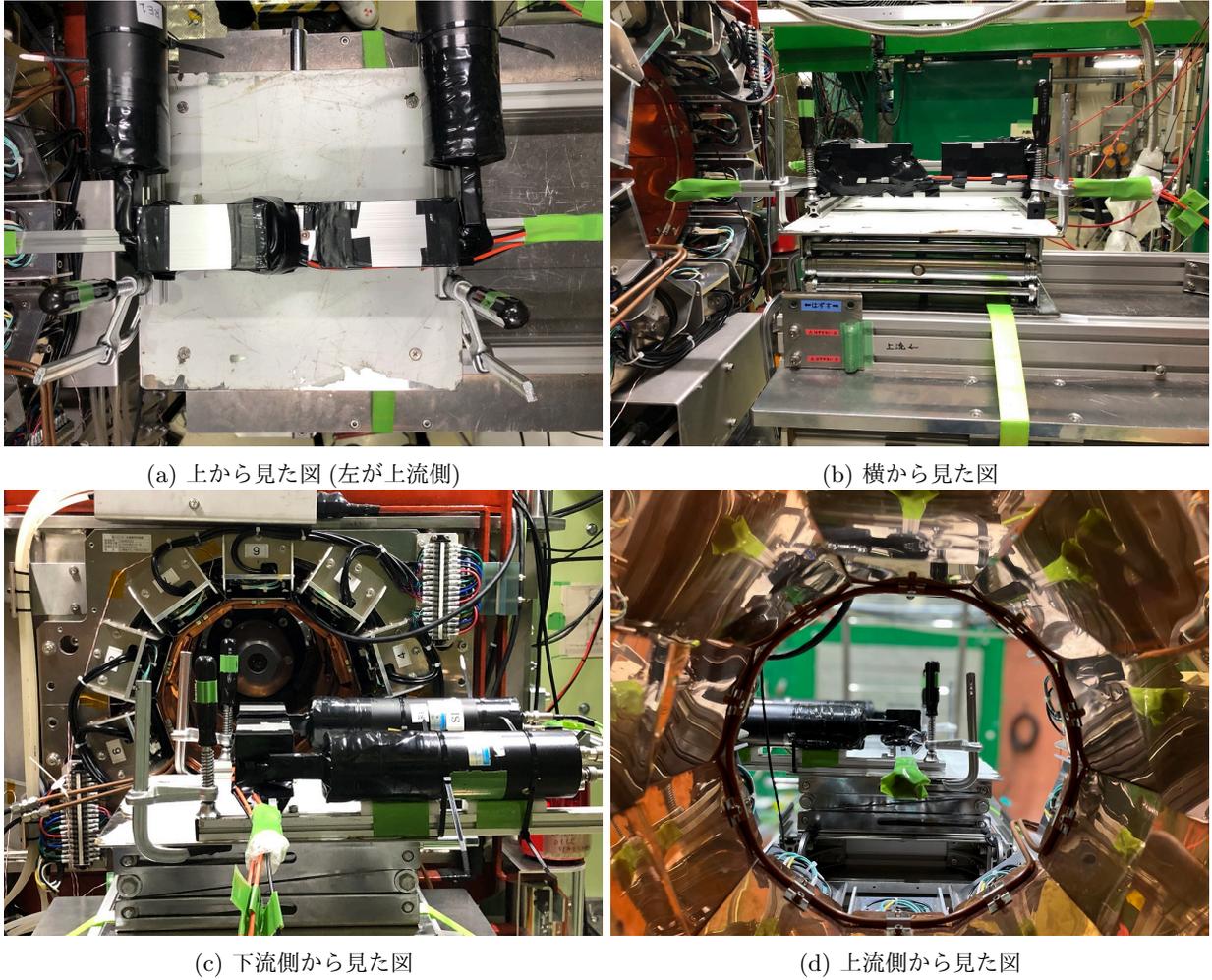


図 3.2: ビームラインにおけるセットアップの実際の写真。

粒子速度  $v$  は飛行距離  $d$  及び、時間差 TOF から式 (3.1) で書ける。

$$v = \frac{d}{\text{TOF}} \quad (3.1)$$

本研究では、ビームに使用するミューオンの運動エネルギーと飛行距離が分かっているため、理想的な TOF を計算することができる。ミューオンの飛行距離は 140 mm、ミューオンの運動エネルギー  $K$  は 40 MeV である。このときの TOF を計算する。 $K = m(\gamma - 1)$ 、 $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$  を用いる。ここで  $m$  は粒子の質量であり、ミューオンの質量は 105.6 MeV である。よって、

$$\begin{aligned} K &= m(\gamma - 1) \\ \Leftrightarrow \gamma &= \frac{K}{m} + 1 \\ \Leftrightarrow \frac{1}{1-\beta^2} &= \left(\frac{K+m}{m}\right)^2 \\ \Leftrightarrow \beta &= \sqrt{1 - \left(\frac{K+m}{m}\right)^{-2}} \\ &\sim 0.6885 \end{aligned}$$

140 mm の TOF を考えるので、光速  $c$  を用いて

$$\begin{aligned}\text{TOF} &= \frac{140 \times 10^{-3}}{\beta c} \\ &= 677.8 \text{ ps}\end{aligned}$$

となる。

本実験では、2つのトリガーカウンターのコインシデンスを TDC、デジタイザのトリガー、ADC のゲートに使用し、以下の情報を取得した。

#### 時間情報 (TDC)

- ・トリガー 1 (上流側)
- ・トリガー 2 (下流側)
- ・MCP-PMT1 (上流側)
- ・MCP-PMT2 (下流側)
- ・トリガーのコインシデンス
- ・ビームタイミング

#### 電荷情報 (ADC)

- ・トリガー 1 (上流側)
- ・トリガー 2 (下流側)
- ・MCP-PMT1 (上流側)
- ・MCP-PMT2 (下流側)

#### 波形情報

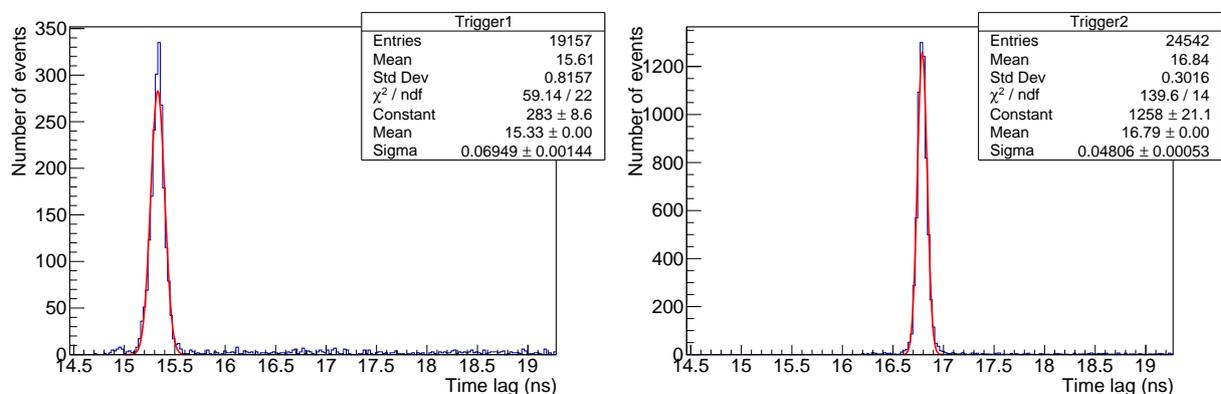
- ・MCP-PMT1 (上流側)
- ・MCP-PMT2 (下流側)
- ・MCP-PMT1 (上流側) のディスクリミネーターを通した後の波形

## 4 実験結果

### 4.1 時間情報と電荷情報での解析

#### 4.1.1 トリガーについて

トリガーとコインシデンスの時間差をみると、図 4.1 のようなピークが見えた。



(a) コインシデンス - トリガー 1 (上流側) の時間差

(b) コインシデンス - トリガー 2 (下流側) の時間差

図 4.1: コインシデンスとトリガーの時間差。

2つのトリガーは285 mm 離して設置しており、140 mm 離れた MCP-PMT の TOF が677.8 ps になることから、2つのトリガーの TOF は1.38 ns になることが分かる。TDC の異なるチャンネル間には測定時間にずれがあり、その補正をかけると、2つのトリガーの TOF は

$$\begin{aligned} & \{(\text{コインシデンス - トリガー 1 の時間差}) - (\text{TDC;ch14-ch7})\} \\ & - \{(\text{コインシデンス - トリガー 2 の時間差}) - (\text{TDC;ch14-ch1})\} = \text{TOF} \\ & \{15.33 \times 10^3 - (-841.7)\} - \{16.79 \times 10^3 - 635.6\} = 17.3\text{ps} \end{aligned}$$

各トリガーの PMT での増幅過程に個体差があり、トリガー 1 とトリガー 2 の 0 距離のときのディスクリミネーターを通した後の信号の時間差を見たところ、トリガー 1 の方が 3.5 ns 程度速く信号が出力されることが分かった。そのことを踏まえても、TOF は  $-3.2$  ns となってしまう、理想的な値からは外れてしまう。そのため、次にトリガー同士の時間差をみた。トリガーも MCP-PMT と同様に、1 イベント中に複数の信号を出力するので、全ての信号において総当たりで時間差を見た結果、図 4.2 となった。

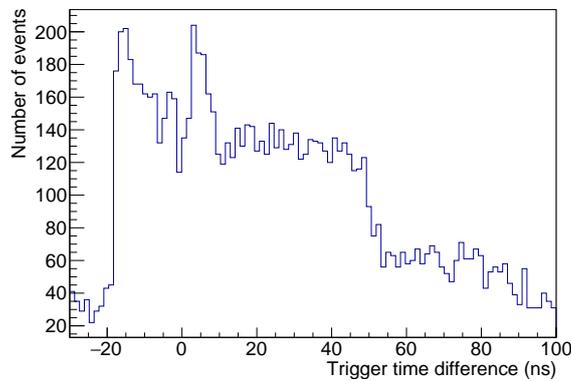
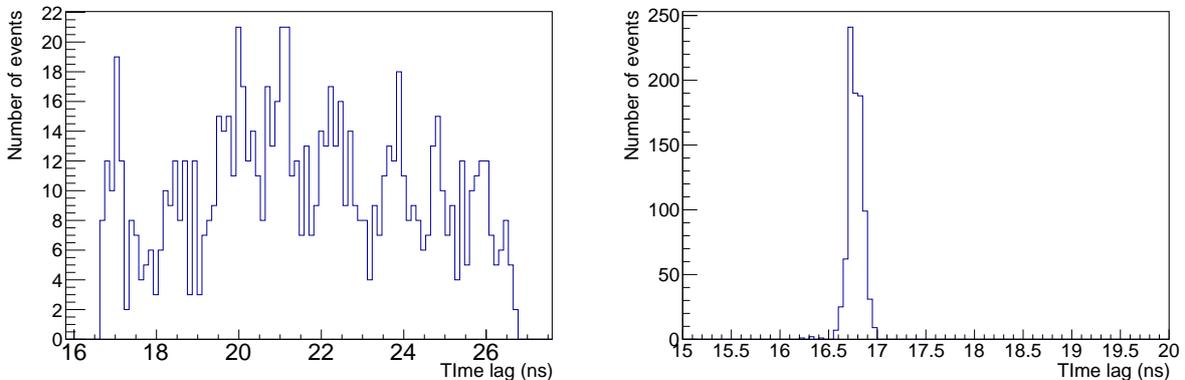


図 4.2: トリガー同士の時間差。(トリガー 2-トリガー 1)

図 4.1 で見たピークが作る時間差は、 $15.33 - 16.79 = -1.46$  ns である。確かに図 4.2 でも  $-1.5$  ns あたりにピークはあるが、それ以上に時間差が 5 ns 程度となる部分に大きなピークが見える。トリガーの TOF が 1.38 ns であること、トリガー 1 のほうがトリガー 2 より同じタイミングの信号でも 3.5 ns 程度速く出力されること、TDC のチャンネル間の時間差が  $-1.5$  ns 程度であることを考えると、3.5 ns あたりにピークがあると考えられるので、図 4.2 で見える 5 ns 程度にあるピークは正しい信号によるものであると考えられる。ここで、時間差が 0-10 ns にあるトリガーのコインシデンスとの時間差を見たところ、図 4.3 のようになった。



(a) コインシデンス - トリガー 1 (上流側) の時間差 (b) コインシデンス - トリガー 2 (下流側) の時間差

図 4.3: コインシデンスとトリガーの時間差。(トリガー 2-トリガー 1 が 0-10 ns にあるもの)

図 4.3 を見ると、トリガー 2 の方は図 4.1 で見えたピークと一致していたが、トリガー 1 はそうでなかった。その理由としてトリガー 1 が少し放電気味であり、かつ、トリガー 1 の信号をいれるディスクリミネーターの閾値が高めに設定されていたことが考えられる。そのために図 4.4 のようにトリガー 1 の真の信号は閾値を超えずに TDC に記録されず、真の信号の後の放電による波形のみ閾値を超えて、その時間情報が真の時間よりも遅れて TDC に記録された可能性がある。

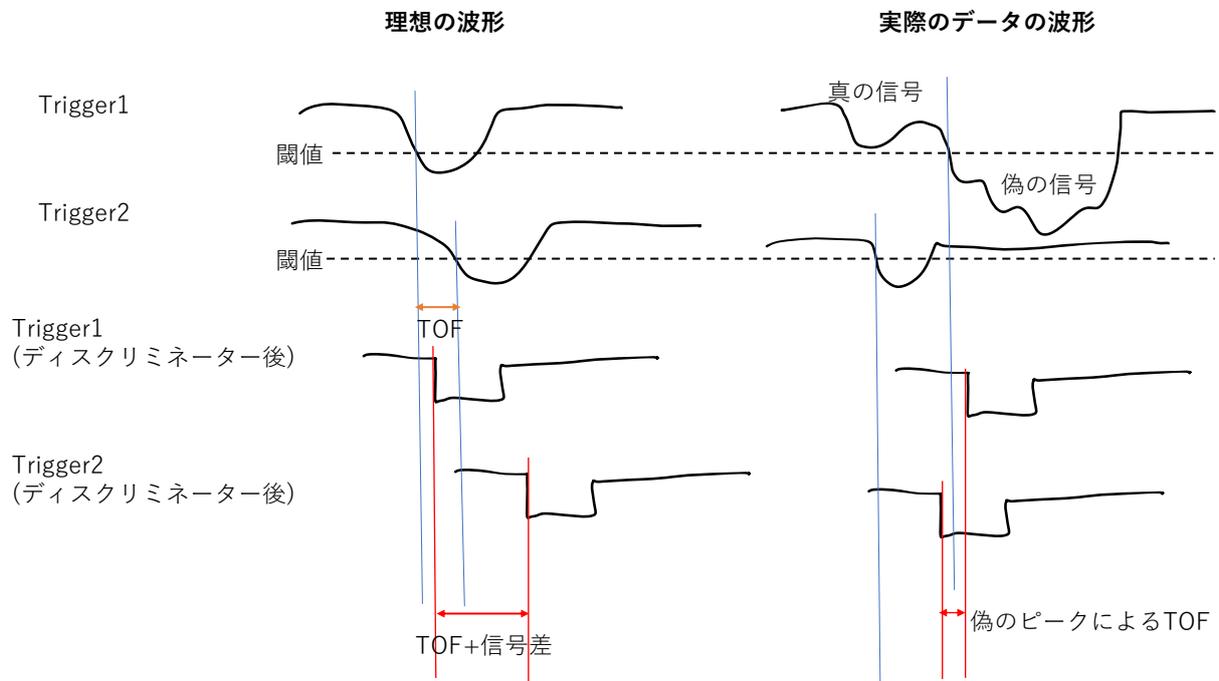


図 4.4: 理想的な信号と図 4.1a でピークを作りだしている信号。

本来はトリガー 2 に依存してコインシデンスが発行されるが、コインシデンスのほとんどがコインシデンスとトリガーの時間差でピークを作っているトリガー 1 の偽のピークに依存するものだと考えるとコインシデンスをカット条件に使用できない。

一方トリガー 2 の情報は信用できるものとして、カット条件に使用する。

まず、トリガー 2 の時間情報を使用するために、コインシデンスとトリガー 2 の時間差の平均値  $16.79 \text{ ns} \pm 3\sigma$  以外にあるものをカットした。

また、ミューオンが 2 発以上入ってくるイベントを除くためのカットを考えた。ADC のゲートは  $110 \text{ ns}$  開いている。また ADC ゲートの最初の  $50 \text{ ns}$  で ADC はカウントされない。トリガーの信号は尾を引くことが多く、立ち下りから立ち上がりまで最大  $70 \text{ ns}$  ほどの時間差があった。よって図 4.5 のように、真のトリガー (青色) の時間から前に  $70 \text{ ns}$ 、後に  $60 \text{ ns}$  の間に他の信号 (赤色) のようなものが入っていない事象を選ぶ必要がある。

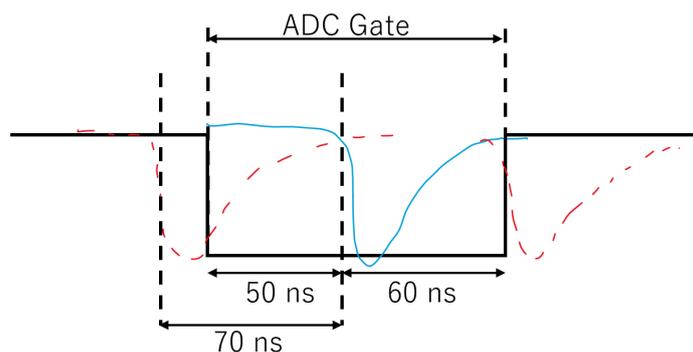


図 4.5: ADC ゲートとトリガーの信号の関係。

真の信号があると考えられる図 4.1 のガウス分布の平均値から前に 70 ns、後ろに 60 ns の間にトリガーの時間情報が 2 つ以上あるものの ADC カウントと、1 つのみである ADC カウントを比べると、図 4.6 のようになった。青色の線のヒストグラムが時間情報が 1 つのみのときの ADC カウント、赤色の線のヒストグラムが 2 つ以上のときの ADC カウントである。

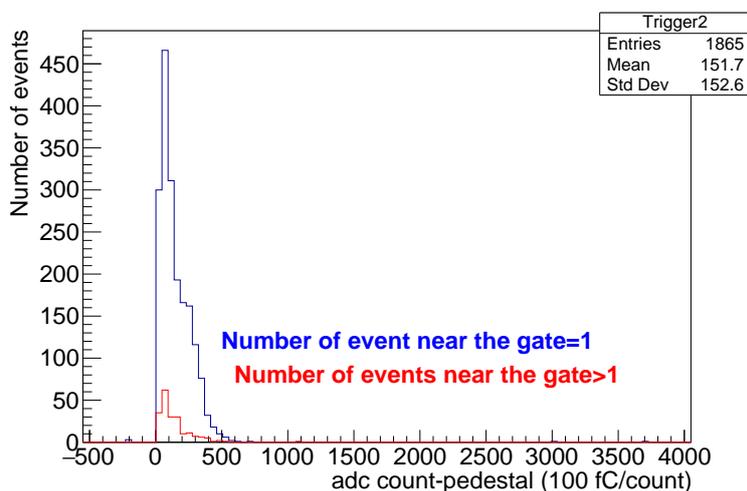


図 4.6: ADC gate 内のイベントの数との ADC カウント。

ADC ゲート内のイベント数が 2 個以上のときの ADC カウントはミュオンが落とすエネルギーが増えるために、イベント数が 1 個の時よりも大きくなると思ったが、図 4.6 をみるとその傾向は見られないことが分かる。よって、2 個以上のイベントがあるときも、トリガーの中を 2 個以上のミュオンが通ったのではなく、ライトガイドを 2 回通った、もしくはライトガイドとシンチレータの両方を通ったイベントが増えるのだと考えられる。イベント数が 2 個以上のときも、ミュオンが 2 回通った可能性は低く、イベント数が 2 個以上のものをカットすることは事象数を減らしてしまうだけだと考え、ADC ゲート内のイベント数が 1 個以上である事象は全て用いることにした。

以上トリガー 2 によるカットでは、以下の条件を満たさないものをカットする。

- ・ コインシデンスとトリガー 2 の時間差が  $16.79 \pm 3\sigma$  ns にあるもの
- ・ ADC ゲート内にある信号の数が 1 個以上

#### 4.1.2 MCP-PMT について

MCP-PMT の時間情報の信号量は 1 イベントにつき平均 20 個程度あった。信号数が多くなってしまった理由として以下のことが考えられる。

1. MCP-PMT に 2 発以上入ったミューオンや崩壊により出てきた電子による事象を見ている場合
  2. ノイズを拾ってしまっている場合
  3. ビーム 1 バンチにつき、ミューオンが複数個、タイミングをずらして入ってくる場合
- 多くある信号数から TOF を計算するためには、ミューオンが MCP-PMT を通った真の時間を選ぶ必要がある。

まず始めに、MCP-PMT1 とビームタイミングの時間差と ADC カウントの相関を見た。MCP-PMT1 とビームタイミングの時間差と ADC カウントの二次元分布は図 4.7 のようになった。またそれを拡大したものが図 4.8 のようになった。

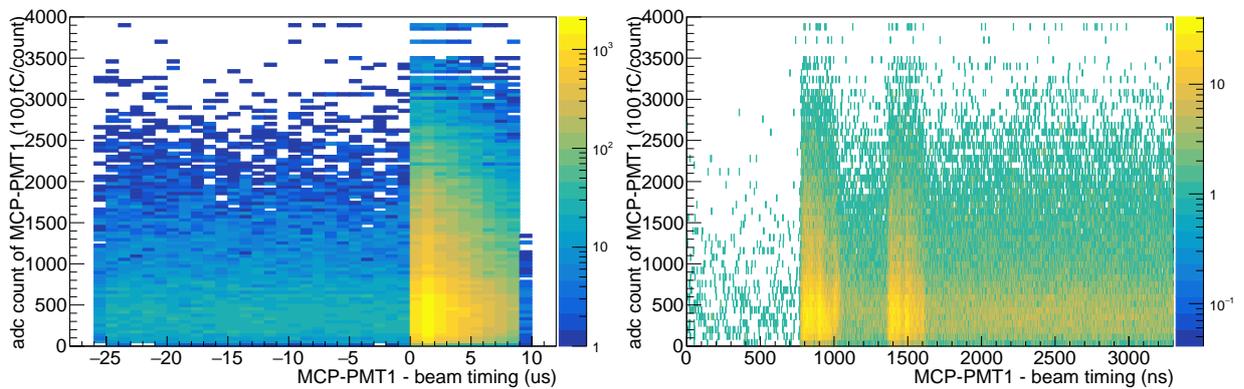


図 4.7: MCP-PMT1(上流側)– ビームタイミングの時間差と ADC カウント。 図 4.8: MCP-PMT1(上流側)– ビームタイミングの時間差と ADC カウントの拡大版。

ビームタイミングと MCP-PMT1 の時間差が 800–1000 ns あたりにあるものが 1 バンチ目のミューオンが MCP-PMT を通ったもの、1400–1600 ns あたりにあるものが 2 バンチ目のミューオンが MCP-PMT を通ったものであると考え、TDC カウントが 800–1000 ns あたりにあるものをさらに拡大したものが図 4.9 となる。

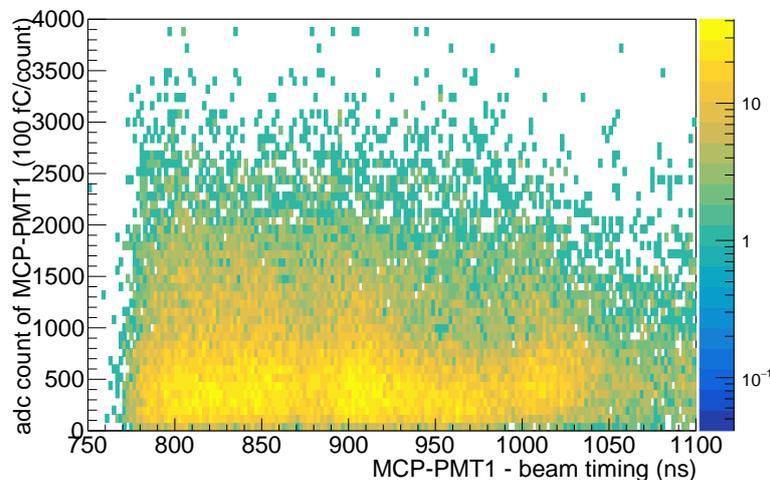


図 4.9: MCP-PMT1(上流側)– ビームタイミングの時間差と ADC カウント。(1 バンチ目)

図 4.9 をみると、MCP-PMT1 とビームタイミングの時間差が 800 ns あたりから 100 ns 周期で 3 つの部分で相関があるように見える。そこで、時間差のみをプロットした結果、図 4.10 のようになった。また、トリガー 2 とビームタイミングの時間差と MCP-PMT2 とビームタイミングの差も同時に比べた。ここでトリガー 2 の信号は、トリガーのカットの際の ADC ゲートの中にある個数が 1 個以上のものを使用している。

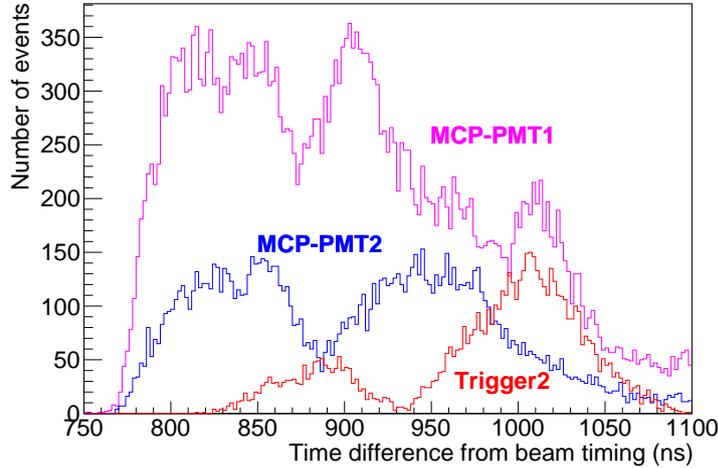


図 4.10: MCP-PMT1, MCP-PMT2, トリガー 2 とビームタイミングの時間差。(1 バンチ目)

MCP-PMT2 とトリガー 2 の山は 2 つ山となっている。この山はビーム構造が見えたものであると考えられる。MCP-PMT1 は他 2 つと分布が異なって見えるが、他 2 つと同じ形の山のそれぞれの 100 ns 後にもう一つの山が見えているものだと考えられる。2 つの MCP-PMT の間にケーブルによる時間差はほぼなく、MCP-PMT とトリガーの信号の時間差はおよそ 60 ns であった。2 つの MCP-PMT の信号は同じところに山があり、MCP-PMT の山の 60 ns 後にトリガー 2 の山があるので、ビームタイミングと MCP-PMT の時間差が 800 ns–1000 ns にある部分の事象はミューオンによる事象だと考えられる。そのため、ビームタイミングと MCP-PMT の時間差が 800 ns–1000 ns にある MCP-PMT の信号のみを取り出して TOF を見た。まず、ビームタイミングと MCP-PMT の時間差が 800 ns–1000 ns にある MCP-PMT の信号の数は、表 4.1 のようになった。

表 4.1: ビームタイミングと MCP-PMT の時間差が 800 ns–1000 ns にある MCP-PMT の信号の数。

信号の数	0 個	1 個	2 個	3 個	4 個	5 個
MCP-PMT1	14 イベント	527 イベント	1751 イベント	3257 イベント	2745 イベント	308 イベント
MCP-PMT2	2842 イベント	2312 イベント	2141 イベント	1010 イベント	294 イベント	3 イベント

1 バンチ目の 8602 イベントのうち、ビームタイミングと MCP-PMT の時間差が 800 ns–1000 ns にある信号を複数もつものが大半である。1 イベントに複数個の信号を持つものについて、時間差を取る際にどの時間情報同士を組み合わせればよいのかを選ぶ必要がある。各イベント、出力された順番の違う信号同士を組み合わせると、ns オーダーの部分に TOF のピークが見えてしまい明らかに同じミューオンによる事象ではなかった。また、各イベントの 2 番目以降に出力された信号同士を見ると、事象数が少なくなってしまうことから、各イベント一番最初に出力された信号同士の TOF をとった。その結果図 4.11 のようにピークが見え、その部分を拡大すると図 4.12 のようになった。

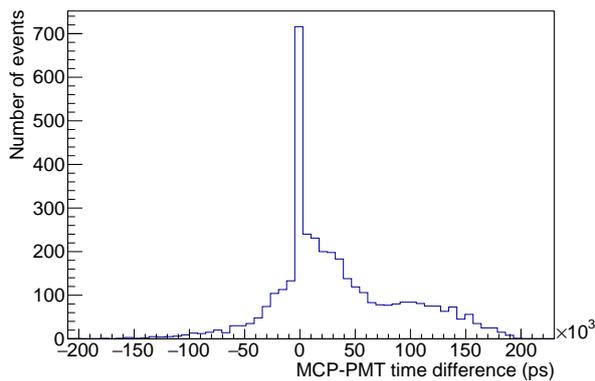


図 4.11: ビームタイミングと MCP-PMT の時間差が 800 ns–1000 ns にある MCP-PMT の信号の時間差。

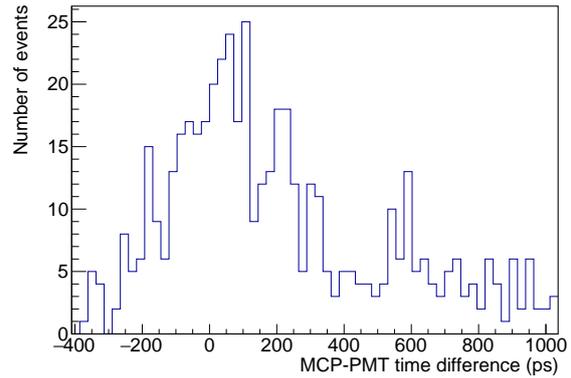
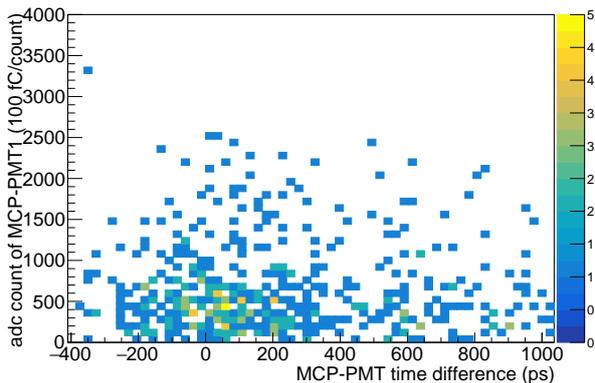
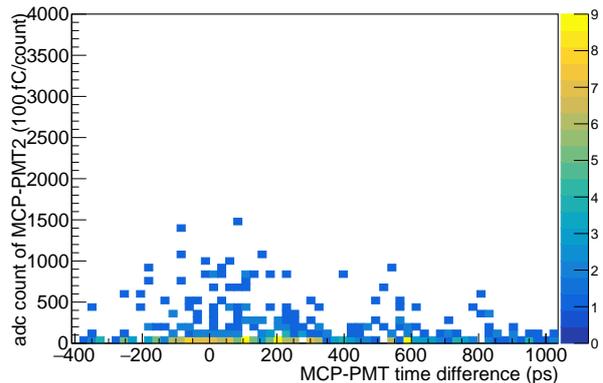


図 4.12: ビームタイミングと MCP-PMT の時間差が 800 ns–1000 ns にある MCP-PMT の信号の時間差の拡大版。

本来のピークは、TDC のチャンネルの時間差等を考えなければ 677.8 ps になり、ケーブル遅延等の時間差を考えると、ピークはおよそ 500 ps になると考えられるが、50 ps あたりに山がある。図 4.12 を MCP-PMT の ADC カウントと同時に見ると、図 4.13 のようになる。



(a) ビームタイミングと MCP-PMT の時間差が 800 ns–1000 ns にある MCP-PMT の信号の時間差と MCP-PMT1 の ADC カウント



(b) ビームタイミングと MCP-PMT の時間差が 800 ns–1000 ns にある MCP-PMT の信号の時間差と MCP-PMT2 の ADC カウント

図 4.13: ビームタイミングと MCP-PMT の時間差が 800 ns–1000 ns にある MCP-PMT の信号の時間差と ADC カウント。

図 4.13 からは ADC カウントと 2 つの MCP-PMT の時間差との間に相関は見えない。今回の結果で TOF を適切に測れなかった原因として、ミューオンによる事象の MCP-PMT の真の信号を適切に選択できなかったことが挙げられる。取得した波形データをみると数 ns のうちに信号が出力されたり、2 つの波が途中で重なったようなものが見られた。そのことを考えるとディスクリミネーターの出力波の幅が適切でなかった場合がある。20 ns の幅に設定したため、真の信号の数 ns 前に偽の信号が入った場合に、真の信号が隠されて TDC に記録されないということが考えられる。またビーム環境の問題もある。図 4.10 でみた時間帯から、MCP-PMT の信号を取り出したが、1 イベントに複数個の時間情報をもつものがほとんどであった。1 イベントに複数個時間情報を持つ理由として、ミューオンが 2 個以上検出されている可能性、ミューオンと崩壊した陽電子がタイミングをずらして検出された可能性、ガラスを突き抜けたミューオンが MCP

と相互作用し、光子とは別に信号を発生させる可能性等考えられる。

## 4.2 時間情報と波形情報での解析

次に、波形情報も用いて解析を行った。波形情報をもとに、TDC に記録されている時間情報を選別した。まず TDC に記録されている時間情報とデジタイザに記録されている波形情報の紐づけを行った。TDC の時間情報は、コインシデンスの時間から MCP-PMT の時間を引いたときの時間差が、 $-70 \text{ ns} \sim 130 \text{ ns}$  になる部分を取り出した。そのうえで、波形情報と TDC の時間情報をあわせると、図 4.14 のようになった。ここで TDC の時間情報は、波形情報の上に線で描いた。波形情報は 2 つの MCP-PMT の生信号、MCP-PMT1 のデジタル信号がある。

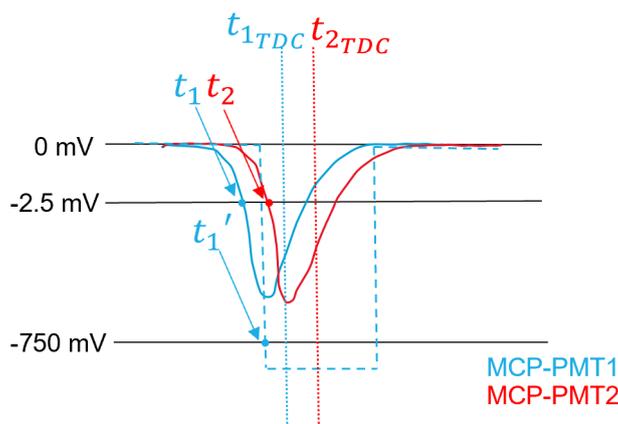


図 4.14: 時間情報の選別。

ここでの事象選別は以下のようにした。

1.  $-4 \text{ ns} < t_1 - t_2 < 4 \text{ ns}$
2.  $-3 \text{ ns} < t'_1 - t_1 < 3 \text{ ns}$
3.  $-5 \text{ ns} < t_{2\text{TDC}} - t_2 < 10 \text{ ns}$
4.  $-3 \text{ ns} < t_{2\text{TDC}} - t_{1\text{TDC}} < 3 \text{ ns}$

そのうえで、MCP-PMT1 と 2 の時間差を見たところ図 4.15 のようになった。

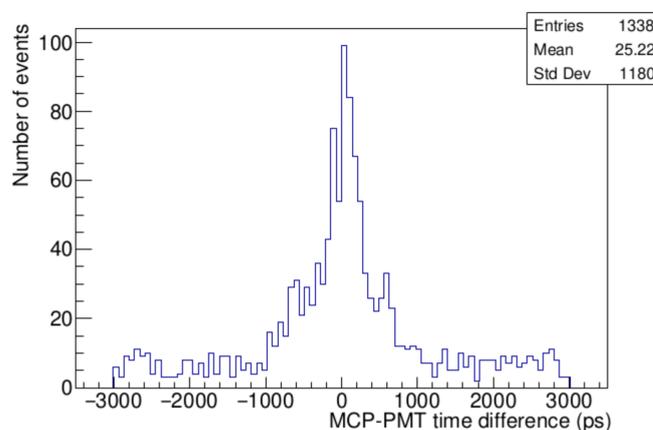


図 4.15: MCP-PMT の信号の時間差。

このカットでも  $500 \text{ ps}$  あたりにピークはたたなかった。ミューオンによる事象で MCP-PMT が信号をだすおおよその時間をビームタイミングやケーブルの時間差等からだし、その条件も今回の事象選別条件

に加えると TOF が見える可能性がある。

## 5 結論

本実験では、サファイアガラスを取り付けた MCP-PMT の時間分解能を調べるために TOF を測定した。しかし、現状の解析では TOF の値をだすことができず、時間分解能を調べることができなかった。今後同じ測定をする場合にはビーム環境とセットアップを改善する必要がある。今回の実験ではミューオンが1個だけ MCP-PMT に入ることが前提にあるため、1 イベントに複数個時間情報を持つ可能性を減らすためにもバンチあたりの密度が低いビームを使用できれば、真の時間情報を選択しやすくなる。セットアップの観点では、できる限り MCP-PMT の信号を入力するディスクリミネーターの出力波の幅を狭くしたセットアップにすれば、必要な情報の取得漏れがなくなると考えられる。また、トリガーが真の信号でトリガーした可能性が低い以上、トリガーの信号を入力するディスクリミネーターの閾値の設定も見直すべきである。今回取得したデータで解析を行うには、TDC の時間情報ではなく波形の情報から直接時間情報を取り出すことで、時間分解能を導出できる可能性がある。

## 謝辞

加速器を用いた実験という貴重な経験をさせていただきありがとうございました。加速器科学インターンシップの受入担当教員になっていただいた高エネルギー加速器研究機構 梅垣 助教をはじめとする J-PARC の皆様に、この場をお借りして皆様に深い敬意と感謝を示し、御礼申し上げます。

