

物理学実験 II レポート

課題 9 「素粒子の相互作用と磁気モーメント」

実験回： 第 x 回

氏名：

実験者番号：

共同実験者：

実験日：2025 年 x 月 x 日～ x 月 x 日

提出日：2025 年 x 月 x 日

レポートのコメントを希望します。

具体的には、○○について評価を下さい。

概要

このテンプレートにある指示文章は全て削除し、自分で書いた文章に差し替えること。残っていた場合は読みやすさを損ねるため減点とする。（概要ではレポートの概要を簡潔に記述せよ。例えば、以下のようなものである。）○○の目的のために、■■の実験を行った。その結果△△であることが確かめられた。

1 目的

この実験のねらいが何であるかを、テキストを参考に簡潔にまとめる。

2 原理

2.1 素粒子の相互作用

最も基本的な粒子である素粒子は、そのスピンや電荷などの性質によって大別される。図 1 に素粒子の分類を示す。

表 1: 素粒子の分類

	スピン	電荷	第 1 世代	第 2 世代	第 3 世代
クォーク	$\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	u	c	t
		$-\frac{1}{3}$	d	s	b

	スピン	電荷	電磁相互作用	弱い相互作用	強い相互作用
レプトン	$\frac{1}{2}$	0	ν_e	ν_μ	ν_τ
		-1	e^-	μ^-	τ^-
ゲージ粒子	1	0	γ	Z^0	g
		± 1	-	W^\pm	-

	スピン	電荷
ヒッグス粒子	0	

ここで、クォークやレプトンは物質を構成する粒子であり、それぞれが第 1 世代から第 3 世代まで存在する。また、ゲージ粒子やヒッグス粒子は、素粒子間の相互作用を媒介する粒子である。この相互作用は、電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用、および重力相互作用の 4 種類に分類される。

電磁相互作用は、電荷を持つ粒子間で働く相互作用であり、光子 (γ) が媒介する。一方で、弱い相互作用、強い相互作用はそれぞれ弱荷を持つクォークとレプトン、カラー荷を持つクォーク間で働く相互作用であり、電磁相互作用に対する力との相対的な強さから、

その名が付けられている。また、重力相互作用は質量を持つ粒子間で働く相互作用であるが、他の相互作用と比較して非常に弱いため、素粒子実験においては無視されることが多い。一方で、唯一斥力をもたない重力相互作用は、力が相殺されることがなく遠くまで伝わるため、宇宙規模の現象を説明する上で重要な役割を果たす。

2.2 磁気モーメント

円電流が作る磁場を考えると、磁気 (双極子) モーメント $\boldsymbol{\mu}$ を用いて次のように表される。

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\boldsymbol{\mu} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}, \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3(\boldsymbol{\mu} \cdot \hat{\mathbf{r}})\hat{\mathbf{r}} - \boldsymbol{\mu}}{r^3}, \quad (2)$$

ここで、磁気双極子モーメントは円電流 I と円電流が囲む面積 $S_a \mathbf{n}$ (\mathbf{n} は面の法線方向) を用いて、

$$\boldsymbol{\mu} = IS_a \mathbf{n}, \quad (3)$$

と定義される。

以上の議論をもとに、電荷 $+e$ 、質量 m を持ち、等速円運動する粒子について考えると、その角運動量は、

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} = m\mathbf{r} \times \mathbf{v} = mvr\mathbf{n} \quad (4)$$

で表される。一方で、磁気双極子モーメントは、

$$\boldsymbol{\mu} = IS_a \mathbf{n} = \frac{ev}{2\pi r} \pi r^2 \mathbf{n} \quad (5)$$

つまり、磁気双極子モーメントと各運動量の間の関係として、

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{e}{2m} \mathbf{L}, \quad (6)$$

が導かれる。

素粒子の場合はさらに軌道角運動量 \mathbf{L} に加えて、素粒子固有の内部自由度に起因するスピン角運動量 \mathbf{S} が存在する。このとき、スピン角運動量も含めた磁気双極子モーメントは、

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{e}{2m} (\mathbf{L} + g\mathbf{S}), \quad (7)$$

と表される。ここで、 g は Landé の g 因子と呼ばれる定数である。

2.3 ミューオンに働く相互作用

3 実験装置

4 課題 1: ミューオン崩壊事象の測定

4.1 方法

まず始めに、シンチレーションカウンタの動作確認を行った。ここでは、光電子増倍管 (PMT) に適当な電圧を印加した際にシンチレータから信号が得られるのを確認した。PMT には熱雑音などからくる信号も計測されるが、同じプレートに接続された 2 つの PMT からの同時信号のみを計測することでこの雑音を除去することができる。そこで、電圧を上げて同時計数を確認し、適当な電圧で計数が一定になるまたは一般に期待される 80 count/sec 程度になることを確認した。この過程を上段、中段、下段 (それぞれ Plate 1, Plate 2, Plate 3) の各シンチレータで確認し、以降の実験ではそれぞれこの電圧で測定を行った。

次に、ミューオンフラックスの測定実験を行った。ここでは、上段と中段シンチレータの信号を用い、コインシデンス回路を用いて同時計測を行うことで、ミューオンフラックスの計数を行った。上から降り注ぐ宇宙線の大半はミューオンであるため、同時計測によって他の影響を排してミューオンフラックスを測定することができる。

以上の確認の後に、3 枚のシンチレータから出力される信号のタイミングから、ミューオン崩壊事象の測定を行った。計数ブロック図を図 1 に示す。

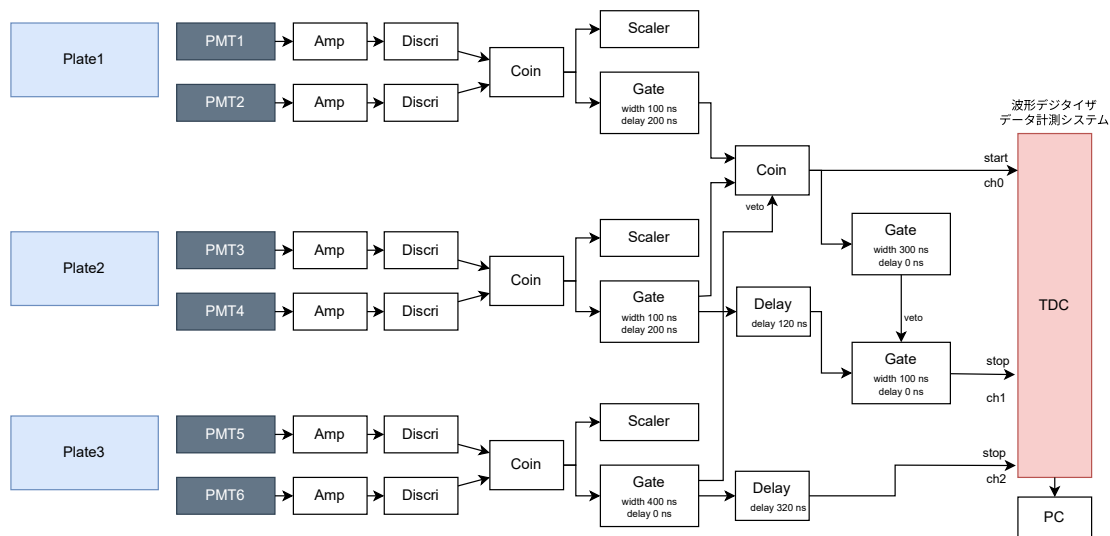


図 1: ミューオン崩壊事象の計数ブロック図

飛来したミューオンが銅板で静止する場合，上段および中段のシンチレータでほぼ同時に計測された後，銅板で止められ崩壊して放出される電子または陽電子が中段または下段のプレートを通して計測される．このとき，銅板で静止しない場合や銅板のない領域を通過する場合，下段のシンチレータは上中段のシンチレータとほぼ同時に信号を出力するため，これを利用して崩壊事象でない事象を除外することができる．

また，計測を開始する前に，計測器 (TDC) のキャリブレーションを行った．TDC では時間差をデジタル数値 (TDC Channel) で計測するため，時間差と TDC Channel の関係を調べる必要がある．さらに，このキャリブレーションに加え，実際には回路等から生じる時間差があるために，同時に起こる事象に対しても測定される時間差にはオフセットが存在する．そこで，図 1 中の veto 信号を一度無くして 1 分間計測を行った．このときに観測される事象はその殆どが銅板でミューオンが静止せずに通り抜ける事象であり，これはほぼ同時に発生するため，この計測からオフセットを求めることができる．

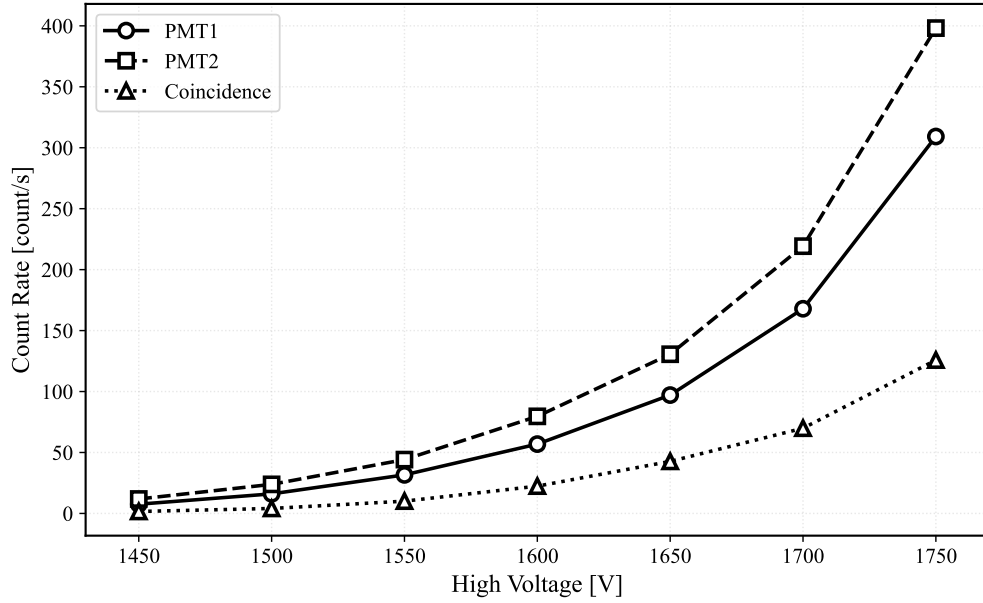
以上のキャリブレーションとオフセット測定の後約 6 日間計測を行い，ミューオン崩壊事象の計数を行った．

4.2 結果

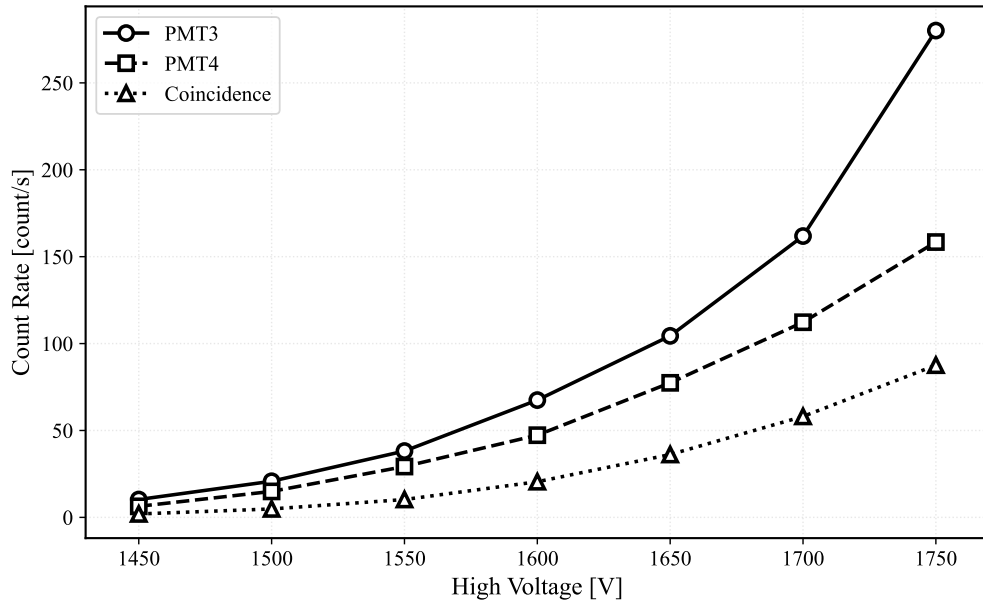
まず始めに，PMT から信号波形を図??に示す．

次に，上中下段のシンチレータについて印加する電圧と得られた信号数の関係を図 2 に示す．また，特に図 3 に印加する電圧と同時計数率の関係を示す．測定の結果，上段では

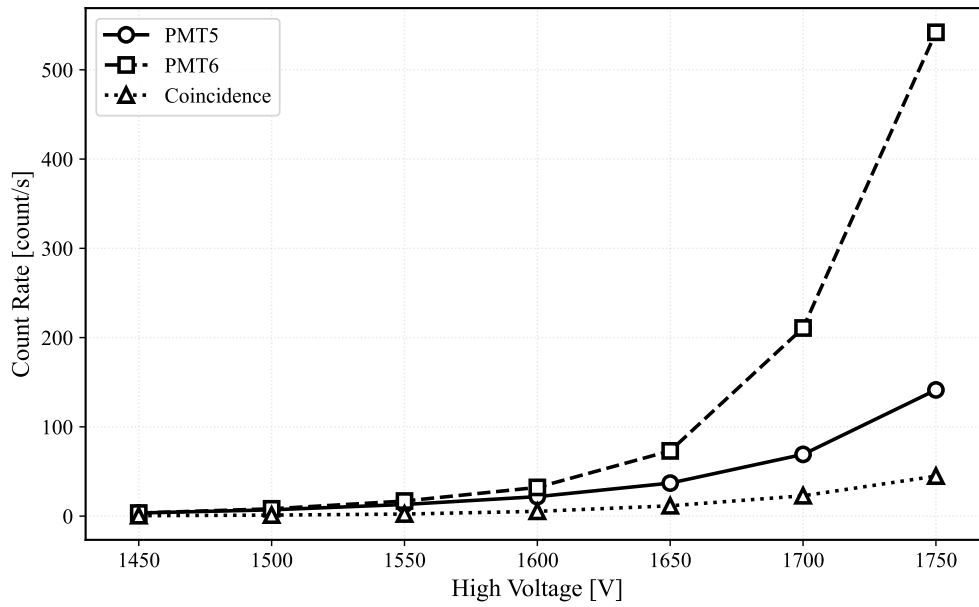
1700 V, 中段では 1750 V において同時計数率が 80 count/sec 程度となったため, 以降はこの電圧値において計測を行った. 一方で, 下段では 1750 V においても同時計数率が 45 count/sec 程度であったが, 印加できる電圧の上限が 1750 V であったため, 以降この電圧で計測を行った.



(a) 上段シンチレータの電圧と計数.



(b) 中段シンチレータの電圧と計数.



(c) 下段シンチレータの電圧と計数.

図 2: シンチレータの電圧と計数.

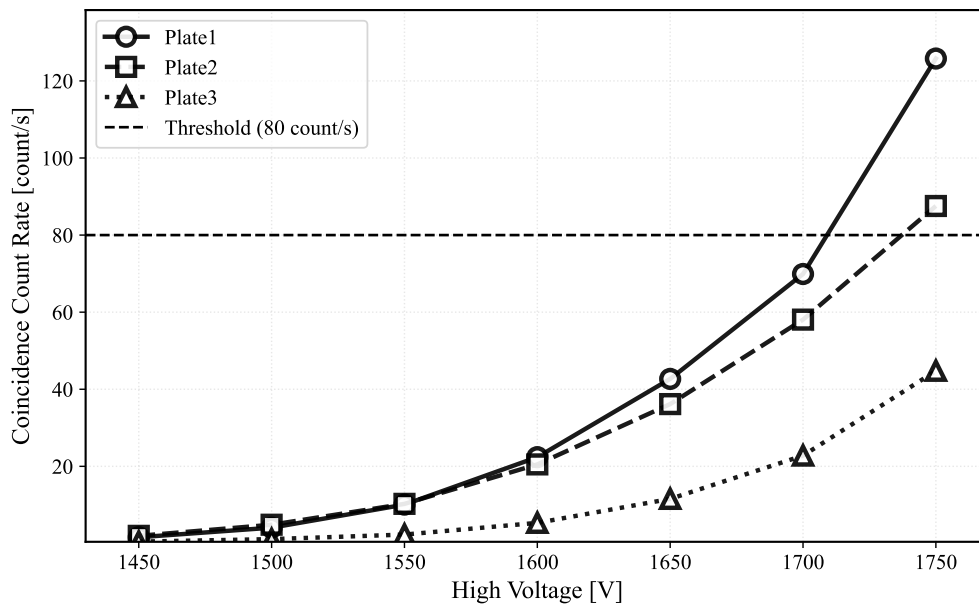


図 3: 上中段シンチレータの同時計数率.

次に、ミューオンフラックスの測定実験の結果を述べる。

1 分間の同時測定の結果、上段・中段の同時計数率は $n = 6.2$ [count/s] であった。上段、中段のプレート面積はそれぞれ $S_1 = 0.50$ [m²], $S_2 = 0.74$ [m²], プレート間距離は $L = 0.88$ [m] であった。したがって、中段プレートのある点から上段プレートを見込む立体角 Ω は、 $L \gg S_1$ の条件のもとで次のように近似できる：

$$\Omega = \frac{S_1}{L^2} = \frac{0.50 [\text{m}^2]}{(0.88 [\text{m}])^2} \approx 0.65 [\text{sr}], \quad (8)$$

となる。これを中段のプレート面積で積分することでアクセプタンス A を求めると、

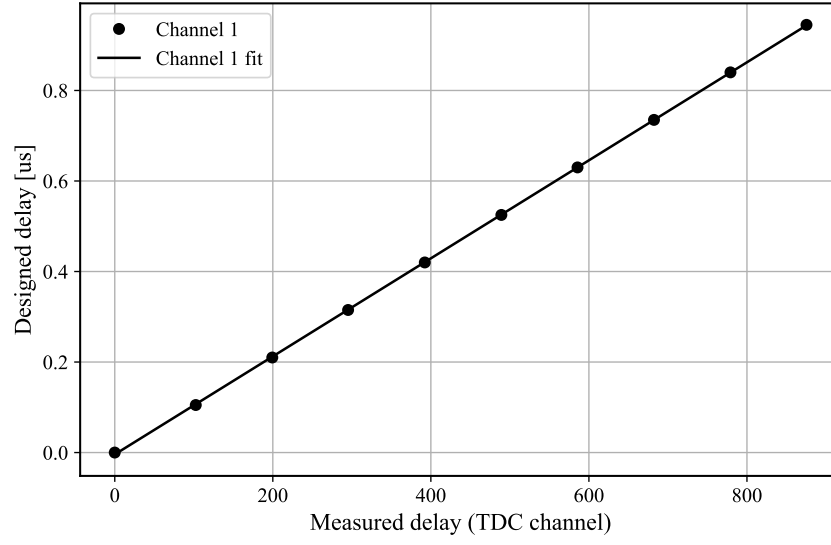
$$A = \Omega S_2 = 0.65 [\text{sr}] \times 0.74 [\text{m}^2] \approx 0.48 [\text{m}^2 \cdot \text{sr}], \quad (9)$$

したがって、同時計数率をアクセプタンスで規格化してミューオンフラックスを求めると、

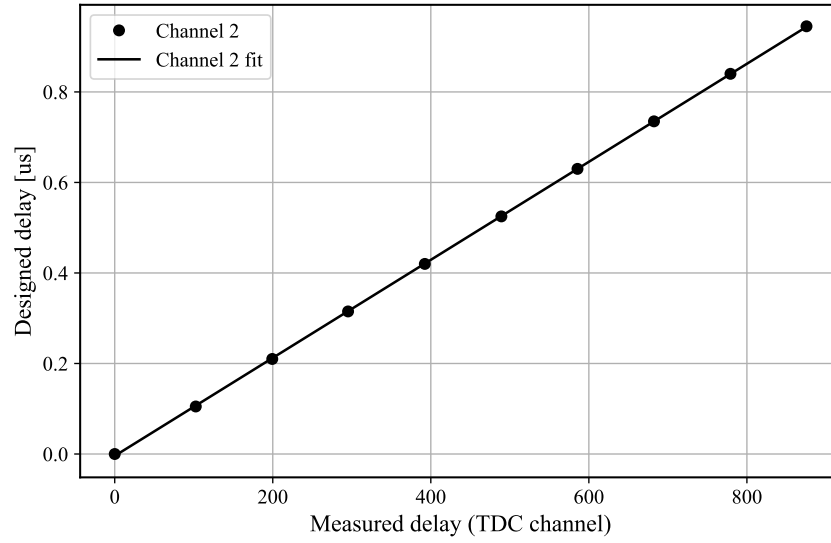
$$\Phi = \frac{n}{A} = \frac{6.2 [\text{count/s}]}{0.48 [\text{m}^2 \cdot \text{sr}]} \approx 12.9 [/(s \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr})], \quad (10)$$

最後に、ミューオン崩壊事象の測定結果について述べる。

まず始めに、TDC のキャリブレーション結果を図 4 に示す。横軸が TDC で計測されたデジタル数値 (TDC Channel) であり、縦軸が回路を作成して設計された時間差 (ns) である。



(a) Ch.1 のキャリブレーション測定.



(b) Ch.2 のキャリブレーション測定.

図 4: TDC のキャリブレーション測定.

また最小二乗法によるフィッティングの結果は、それぞれ以下ようになった.

$$\begin{cases} \text{Ch.1 : } Y = 0.00108X - 0.00409, & R^2 = 1.00, \\ \text{Ch.2 : } Y = 0.00108X - 0.00416, & R^2 = 1.00. \end{cases} \quad (11)$$

また、回路によって生じる時間差を計測した結果を表 2 に示す.

表 2: 回路による時間差の測定結果.

TDC Channel	時間差 [TDC Channel]	オフセット [μs]
Ch.1	-1.00	-0.00518
Ch.2	45.0	0.0446

以上の測定結果をもとに、同時信号とその時間差からミューオン崩壊事象の計数を行った結果を図 5 に示す. ここで、崩壊時間が短いデータ ($\Delta t < 10$ [μs]) および長いデータ ($\Delta t > 10$ [μs]) は除外している. これは、極端に崩壊時間が短いデータや長いデータには熱雑音など他の影響による事象が含まれる可能性が高いと考えられるためである.

また、図 5 には、崩壊曲線として指数関数型の $Y = Ae^{-X/\tau} + C$ をフィッティングした結果も示している. ここで τ がミューオンの寿命であり、定数項 C は背景雑音の影響を取り入れるために導入している.

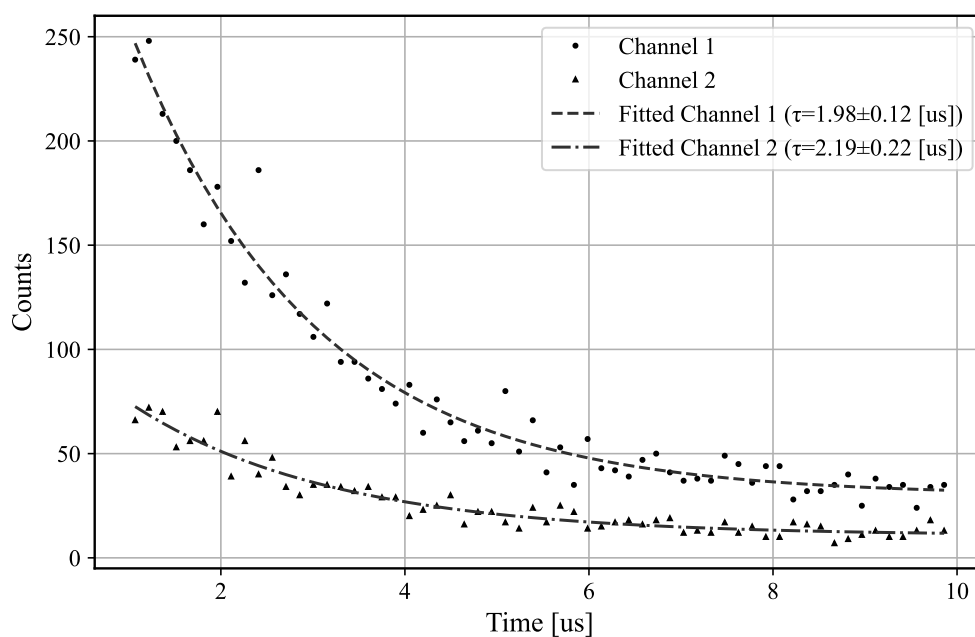


図 5: ミューオン崩壊事象の計数.

4.3 考察

5 課題 2: 一様磁場の生成

5.1 方法

5.2 結果

5.3 考察

6 課題 3: ミューオン磁気モーメントの測定

6.1 方法

6.2 結果

6.3 考察

7 設問への解答

8 結論

実験目的を要約して記述し、それに対応する結論を最後に記述すること。

参考文献

- [1] A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, Phys. Rev. **47**, (1935) 777.
- [2] J.J. Aubert *et al.*, Phys. Lett. B **123** (1983) 275.