

μ の寿命と g 因子の測定

植松祐輝 久保善嗣 佐野友彦 関繁人 水谷圭吾

2010年3月29日

目次

1	理論	2
1.1	μ^+ の生成	2
1.2	μ^+ の寿命	3
1.3	g 因子とは	3
2	実験の概要	3
2.1	実験目的	3
2.2	実験原理	3
3	実験装置	3
3.1	装置の種類	3
3.2	コイルの設定	5
3.3	回路	5
3.4	各種設定	7
3.5	TDC 校正	7
3.6	TDC の原点	7
4	実験データ	8
4.1	実験データ	8
5	解析	9
5.1	μ^+ の寿命	9
5.2	μ^+ の g 因子	9
6	考察と反省	11
6.1	μ^- の評価	11
6.2	寿命の評価	11
6.3	g 因子の評価	12
6.4	反省	12
6.5	まとめ	12
	謝辞	13
	参考文献	13

1 理論

1.1 μ^+ の生成

μ^+ は π^+ の崩壊によって生成される。宇宙線には高エネルギーの陽子などが含まれ、それが大気中の原子核と反応することで π 中間子が生成する。これらは π^+, π^0, π^- の三種類があり、それぞれは弱い相互作用によって W^+ などに崩壊する。 W^+ はレプトンとニュートリノに崩壊し、これによって μ^+ が生成される。

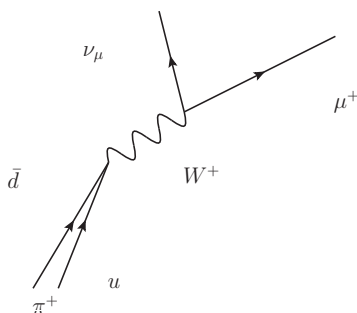


図1 π^+ の崩壊過程

ここでニュートリノのパリティの破れについて述べる。ニュートリノは運動量方向のスピンのどちら向きかで右巻き、左巻きと分かれるが自然界のニュートリノには左巻きしか見つかっていない。従って、うえの崩壊過程で生成されるニュートリノも左巻きである。

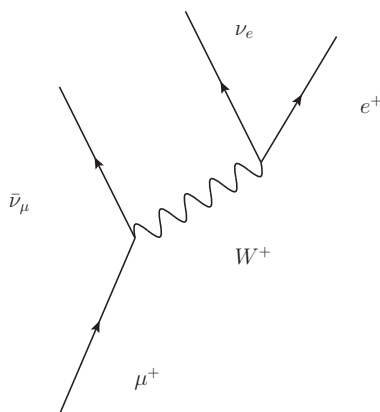


図2 μ^+ の崩壊過程

また重心系で崩壊過程を眺めれば角運動量は、スピンと軌道角運動量それぞれで保存するので、ニュートリノのパリティが破れていることにより、崩壊で生じた μ^+ は左巻きに偏向していることになる。また W^+ のスピンは1である。これにより μ^+ の崩壊で生成される陽電子のスピンと運動量も制限される。

1.2 μ^+ の寿命

μ^+ はまず $\bar{\nu}_\mu$ と W^+ に崩壊して、さらに e^+ と ν_e に崩壊する。この崩壊過程の寿命は次のように計算される。まずダイアグラムの確率振幅を書き下し、それを運動量とスピンの積分して単位時間あたりの崩壊率を計算し、その逆数が寿命である。

実際に弱い相互作用を入れたレプトン場のラグランジアンから計算されるのであろうが、細かい計算手法は追えなかった。

1.3 g 因子とは

g 因子とは電磁相互作用するときのスピンの持った粒子の磁気モーメントの比例定数で、磁場との相互作用が $-\boldsymbol{\mu} \cdot \boldsymbol{B}$ の時に $\boldsymbol{\mu}$ とスピンの線形比例定数が $\boldsymbol{\mu} = g(e/2m)\boldsymbol{S}$ となるように g 因子が定められる。これは QED で tree graph を計算すると $g = 2$ となるが、高次の量子補正を加えると少し大きくなる。

2 実験の概要

2.1 実験目的

この実験の目的は、ミューオンの寿命と g 因子を求めることである。

2.2 実験原理

宇宙からやってきた宇宙線は大気中の原子と衝突してミューオンに変化する。 μ^+ は 3 枚のトリガーシンチレータを通過して銅板のところまで来る。銅板のところでは μ^+ は崩壊し陽電子 e^+ をそのスピンの方向に放出する。この e^+ を 2 つのシンチレータで検出する。(図 3)

(1) 磁場がない場合

磁場がない場合、 μ^+ との相互作用はないので崩壊してできた e^+ は等方的に飛んでいくつまり CH1、CH2 から得られるデータには何の相関もない。ゆえにデータは指数関数となりそこから寿命が求められる。

(2) 磁場がある場合

磁場がある場合、磁場による相互作用があるため、スピンの歳差運動がおこる。この歳差運動によってスピンの方向が一定の周期で上下入れ換わるため、CH1、CH2 から得られるデータは、反相関の一定周期で振動する指数関数になる。この周期から g 因子を求めることができる。

3 実験装置

3.1 装置の種類

μ^+ を検出しアナログ信号に変えるまでの装置は次の 4 つから構成される。

- プラスチックシンチレータ 4 枚 100cm × 48cm × 1cm
- 光電子増倍管 (PMT) 5 個
- 銅板 2 枚 50cm × 48cm × 1cm

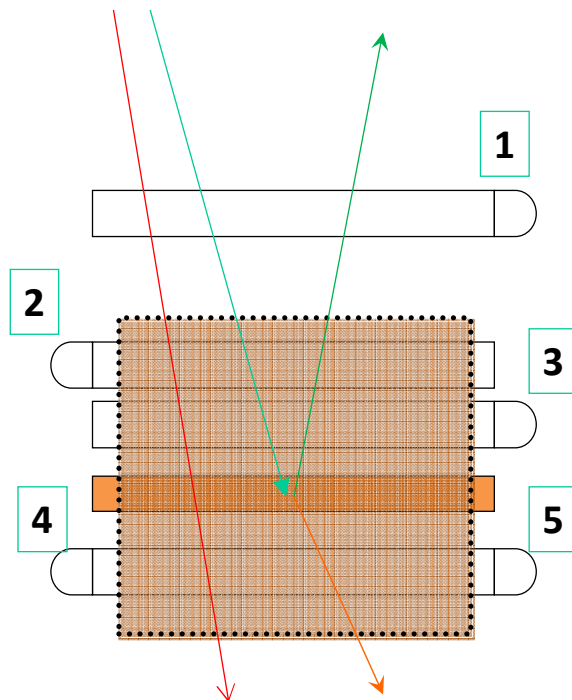


図3 降り注ぐミューオンと実験の流れ

- コイル (詳細は後述)

プラスチックシンチレータ及びPMTは、黒いビニール及びビニールテープで完全に遮光する。光を当てたときと当てないときとで観測するイベント数に有意な差がなければ遮光されている。銅板を用いたのは密度が高いため μ を止めやすい、強磁性体でないため磁化が存在しない、さらに μ^- が銅の中では非常に早く崩壊し、検出にかかるのがほぼ μ^+ によるものになるからである。各装置の位置関係は図のようになる。(図4)

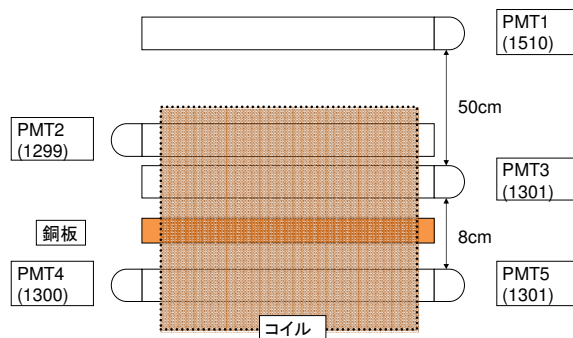


図4 実験装置の位置関係

プラスチックシンチレータは上から順にA、B、C、Dとする。BとCは間隔0で重なっておりAとの高さの差は50cmと設定した。また、CとDの高さの差は8cmである。

この高さの設定はデータ数と精度に大きく関係する。A と B との間の距離を大きくすればするほどデータ数は減るがシンチレーターに垂直に入射するものだけを取るなので精度が上がる。しかしながら小さくするとデータ数は増えるが斜めに入射するものも取るので精度が下がる。今回我々は 50cm の高さで高めに設定し精度を上げることにした。この際データ数が減るがデータを取る日にちを増やせばこの欠点は克服できるとした。

3.2 コイルの設定

コイルは 2004 年度に先輩方が作ったものを使わせていただいた。エッジの影響を少なくするためにメイン 4 つに加えて端にサブのコイルが 2 つついている。(図 5) 何カ所かで磁場の値を計り、その平均値を磁場の値

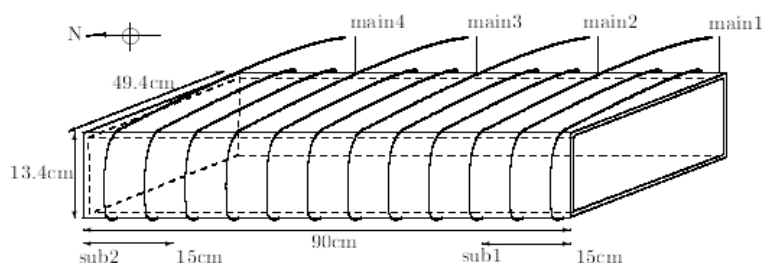


図 5 コイル

とした。測定結果は以下の通りである。(図 6)

3.3 回路

PMT1 ~ 5 が出す信号を用いて以下の図のように回路を組む。

- Discriminator : アナログ信号をデジタル信号に変換する
- Delay : 信号を指定の時間遅らせる
- Coincidence : 複数の入力端子に同時に信号が入ったときのみ出力を出す
- Veto in : 信号が入っている間 Coincidence の信号を出さない入力端子
- Gate Generator : 信号の幅を変えたり信号を遅らせたりする

ここで Gate Generator は Veto が機能するようにオシロスコープを見ながら設定する。これにより Start signal として PMT1 ~ 3 が同時に反応したがそのとき PMT4、PMT5 が反応していなかったときの信号 (シンチレータ A、B、C を宇宙線が通り銅板で止まった時の信号) を取り出すことができる。また CH1 としては PMT2、PMT3 が同時に反応したもの (銅板から崩壊した e^+ のうち上向きのもの) のうち Start signal を除いたもの、CH2 としては PMT4 かつ PMT5 が反応した時の信号、つまり銅板から崩壊した e^+ のうち下向きものを取り出せる。論理回路としては次のようになる。

$$Startsignal : (1 \cap 2 \cap 3) \cap (4 \cup 5)$$

$$CH1 : (2 \cap 3) \cap \overline{Startsignal}$$

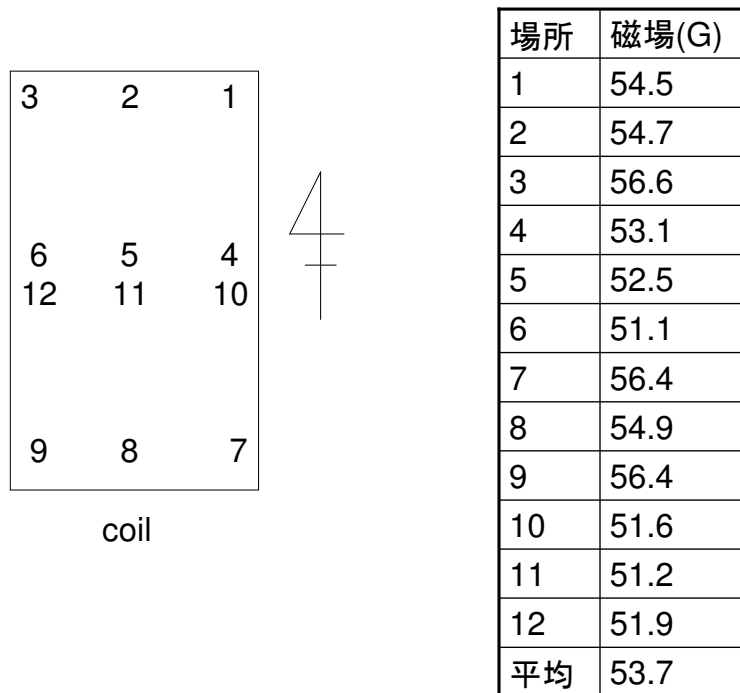


図 6 磁場測定的位置とその結果

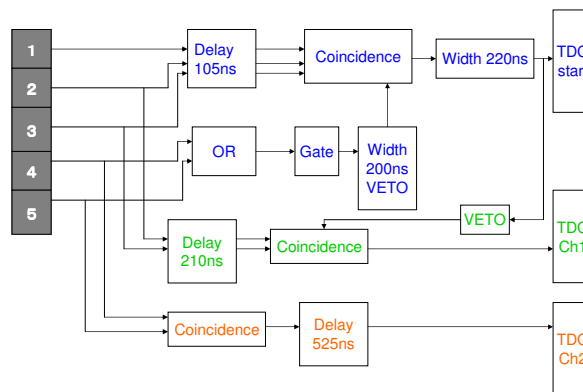


図 7 実験で用いた回路

CH2: 4n5

ここで CH1、CH2 の信号で AND の論理回路を用いている。これは環境放射線、電子のコンプトン散乱による偶発的なノイズの量が非常に多いため OR 回路にすると無意味なデータが多くなってしまいうのでノイズの量を減らすために行っている。(図 7)

3.4 各種設定

3.4.1 PMT の電圧設定

PMT は電圧をかけることで粒子の通過を電気信号として取り出すことができる。その電圧が低すぎると、2枚に重ねたシンチレータのコインシデンスのカウント数が電圧を下げると少なくなるから、感度が落ちていることがわかる。逆に高すぎてもアフターパルスが発生し粒子が通過していないのに電気信号が発生するという事態が起こる。ゆえに各 PMT に適当な電圧をかける必要があるが、その電圧はシンチレータ 2枚のコインシデンスのカウント数が電圧を変えても誤差の範囲で一定になる範囲でなるように設定した。PMT1~5の順に 1510,1299,1301,1300,1301(V) で実験を行った。

3.5 TDC 校正

TDC は Start signal に対する CH1、CH2 の信号の時間差を計測するものであるが、その目盛りを較正する必要がある。そのために Clock Generator で信号を作り、Gate Generator を用いて先ほどの信号に対し 0.5,1,1.5,2,3,...10 μ s 遅れている信号を作った。そして、これを TDC に入れて較正を行った。ここで用いた信号の遅れはオシロスコープを見ながら肉眼で調整したが、その誤差の大きさは最大でも $\pm 1\%$ 程度と見込まれる。その結果が以下の 2つのグラフである。(図 8) CH1 については 7.53 μ s が 10⁷ カウント、CH2 では

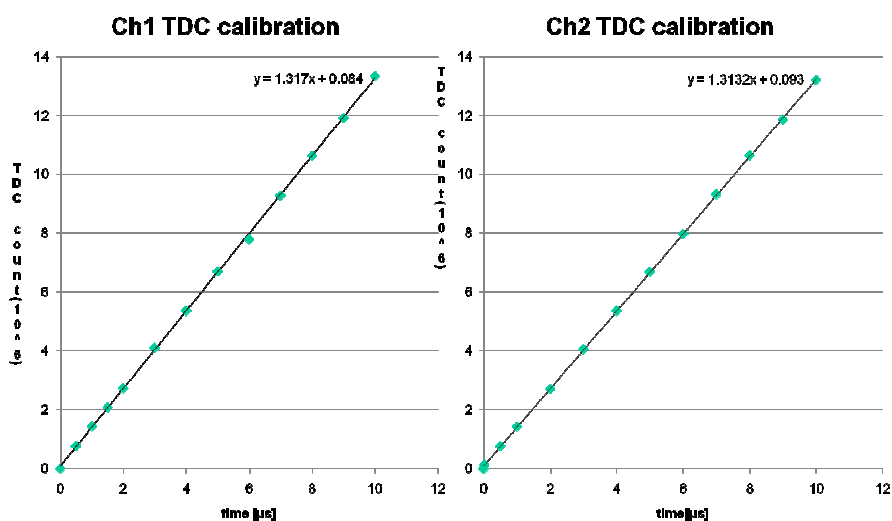


図 8 TDC 校正の結果

7.55 μ s が 10⁷ カウントに相当することがわかる。上のグラフに示されている変換式に従って、得られたカウント数を時間に変換した。

3.6 TDC の原点

TDC は Start signal と Stop signal が同時に入ったと仮定しても時間 0 を出力しない。また、調べたい信号は図 3-4 の回路を通過する際に遅れてしまう。start signal,CH1,CH2 に用いる回路のそれぞれにおいて生

じる時間の遅れを計測、計算したところ、start signal に対して CH1 では 112ns, CH2 では 574ns だけ遅れていたため、この遅れを引いた時刻を TDC の原点として解析した。

4 実験データ

4.1 実験データ

今回の実験では、以下の 2 種類の実験を行った。

(1) 磁場をかけない場合まず、磁場がない時に歳差運動が起こらないことを確かめる。またその状態で μ^+ の寿命を測るために、磁場をかけずにデータを取った。歳差運動によるグラフの振動があると μ^+ の寿命が見えにくくなってしまうからである。ここでは、7 日間のデータを取り、CH1 で 5263 個、CH2 で 6783 個のデータを取ることができた。効率はそれぞれ 752 個/日、969 個/日である。これを図 9 に示す。

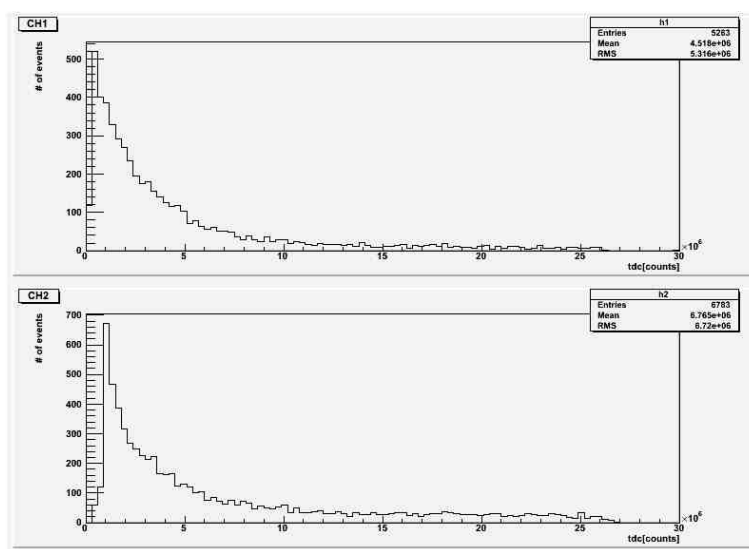


図 9 磁場なしのデータ

(2) 磁場をかけた場合次に、 μ^+ の寿命、スピンの歳差運動の振動数を調べるため、磁場をかけてデータを取った。ここでは、46 日間のデータを取り、CH1 で 33992 個、CH2 で 48877 個のデータを取ることができた。効率はそれぞれ 739 個/日、1063 個/日である。これを図 10 に示す。なお、CH1 と CH2 が両方反応しているものは μ^+ の崩壊が見える前に異なる粒子が入射してきたためと思われるので除いてある。また、グラフは 100ns ごとに区切って、それぞれの区間のデータ数をヒストグラムで表してある。

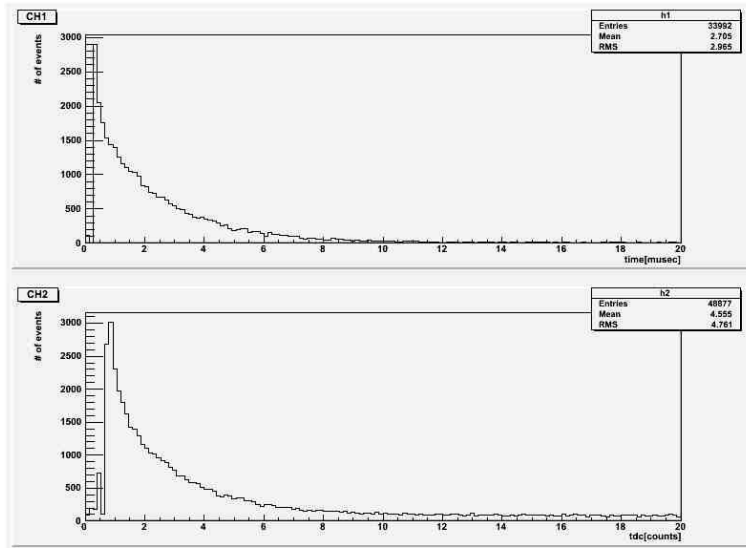


図 10 磁場ありのデータ

5 解析

5.1 μ^+ の寿命

μ^+ の寿命を求めるため、磁場をかけない状態のデータからヒストグラムを作成し、以下の式でプロットした。

$$N_1 = N_0 \exp(-t/\tau) + C_1 \quad (1)$$

また、 C_1 については、グラフが平らになったと判断できる $15\mu\text{s}$ から $20\mu\text{s}$ の間のカウント数の平均をとり、バックグラウンドとして採用した。ここで、 τ が寿命である。また、フィッティングの範囲は $1\mu\text{s}$ から $20\mu\text{s}$ の間とした。 $1\mu\text{s}$ より前は、アフターパルスや μ^- の影響を考慮して、範囲から除いた。以上の条件でプロットしたものを図 11,12 に示す。得られた寿命は、ch1 では $2.218 \pm 0.055\mu\text{s}$ 、ch2 では $2.179 \pm 0.054\mu\text{s}$ である。

5.2 μ^+ の g 因子

次に、 μ^+ の g 因子を求めるため、磁場をかけた状態のデータからヒストグラムを作成し、以下の式でプロットした。

$$N_2 = N_0 \exp(-(t - t_0)/\tau) \{1 + A \cos(\omega(t - t_0))\} + C_2 \quad (2)$$

C_2 については、寿命の時と同様に、 $15\mu\text{s}$ から $20\mu\text{s}$ の間のカウント数の平均をとり、バックグラウンドとして用いた、 t_0 については、start と ch1、ch2 のそれぞれの回路に信号を入力し、生信号と回路を通した信号との時間のずれを計測することで、start と ch1、start と ch2 の間の時間のずれを求め、それをを用いた。これは ch1 においては 112ns 、ch2 においては 574ns であった。

また、フィッティングをする際に、このままでは変数が多く、解析に用いた ROOT ではよい結果が得られな

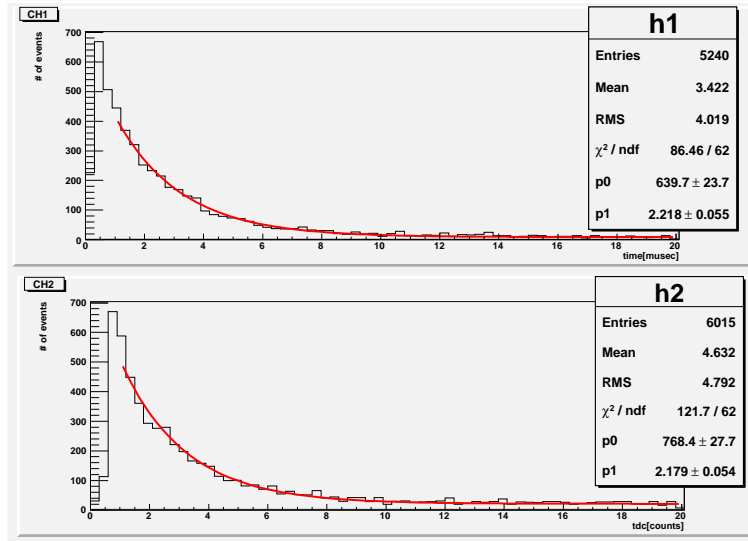


図 11 磁場なしのフィッティング結果

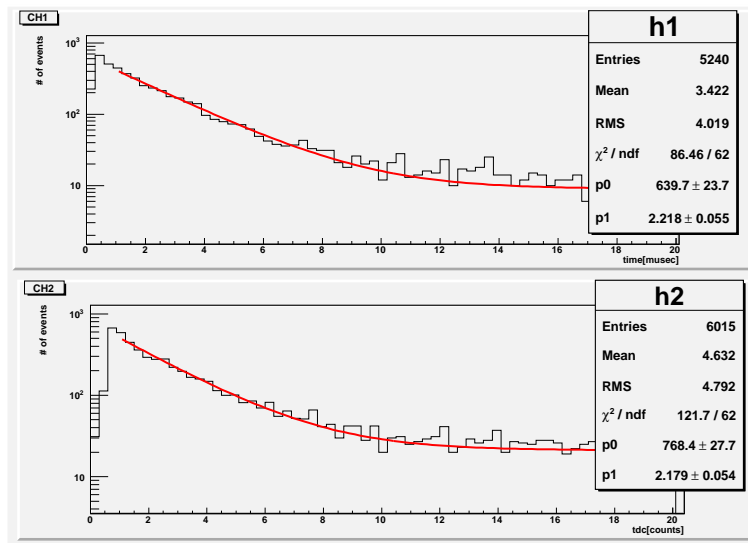


図 12 対数グラフでのフィッティング結果

かった。そのため、まず A を 0 としてフィッティングすることで ω と N_2 を決定、それを固定し、変数を少なくした。また、ch1 と ch2 では、逆相関の関係があるとして、位相を π ずらした。以上の条件でプロットしたものを図 13 に示す。

得られた ω の値は、ch1、ch2 でそれぞれ 4.509 ± 0.054 、 4.478 ± 0.048 であった。この値と

$$g = \frac{2m\omega}{eB} \quad (3)$$

であることを用いて g 因子を計算した結果、ch1 では 1.971 ± 0.024 、ch2 では 1.958 ± 0.021 であった。ここで m は μ^+ の質量であり、105.6MeV である。得られた ω とともに次の表に示す。

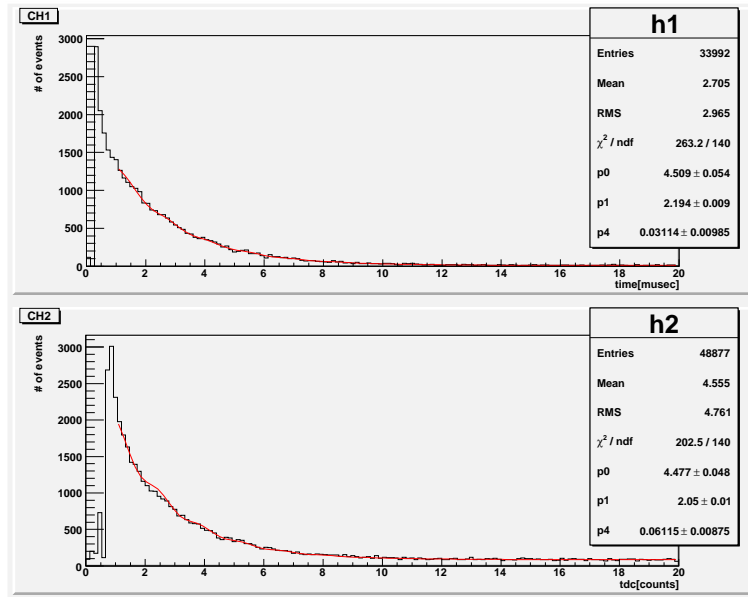


図 13 磁場をかけたデータのフィッティング結果

	ch1	ch2
$\omega(\mu s^{-1})$	4.509±0.054	4.477±0.048
A	0.03114±0.00985	0.06115±0.00875
g	1.971±0.024	1.958±0.021

6 考察と反省

6.1 μ^- の評価

μ^- の影響は考えなくてもよいことを示そう。

文献値によると、地上においては

$$\frac{(\mu^+ \text{の個数})}{(\mu^- \text{の個数})} = 1.25$$

であり、銅板中での μ^- の寿命は $0.160 \pm 0.004 \mu s$ である。よって時刻 t においては

$$\left| \frac{(\mu^- \text{の個数})}{(\mu^+ \text{の個数})} \right| \leq \frac{1}{1.25} \exp \left(- \left(\frac{1}{0.164} - \frac{1}{2.197} \right) t \right)$$

が成り立つ。フィッティングは $1 \mu s \sim 20 \mu s$ の範囲で行ったので、 $1 \mu s$ で計算すると μ^- は μ^+ の約 0.3% 以下だと分かり、 μ^- の影響は確かに無視してよいことが確認できる。

6.2 寿命の評価

次に示すのは、実験で得られた寿命及び文献値との差である。

	CH1(磁場なし)	CH2(磁場なし)	CH1(磁場あり)	CH2(磁場あり)
寿命 [μs]	2.218	2.179	2.194	2.050
文献値との差	0.96%	0.82%	0.14%	6.69%

磁場をかけずに行った実験で得られた結果と文献値との誤差は1%未満となった。一方磁場をかけたときは誤差が7%近く出た。磁場ありの場合の誤差が磁場なしのときより大きい原因としては、グラフの振動によりフィッティング時の誤差が増すことなどが考えられる。

6.3 g 因子の評価

以下に、実験で得られた g 因子及び文献値との差をまとめる。

	CH1	CH2
g 因子	1.971	1.958
文献値との差	1.5%	2.2%

g 因子は CH1,CH2 ともに文献値との誤差は約 2% となった。ここで、磁場の値としては測定した 12 箇所
の平均値 53.7G を採用しているが、最小値 51.1G を使って計算した g 因子の値は 2.07 となる。また最大値
56.6G を使って計算した g 因子の値は 1.87 となり、磁場の測定誤差を考えると上の表に得られた値は十分考
えられる値である。

6.4 反省

磁場測定が難しかった。ガウスメータを持つ手の角度や、測定位置によって大きく測定結果が変化していた
ので、磁場の測定精度は良くなかった。シンチレータの設置後に磁場測定したことも、測定を難しくした原因
だと考えられる。シンチレータ設置前に磁場測定すべきだった。

HV の適正値を考えずに実験し、2 週間分のデータを無駄にってしまった。

6.5 まとめ

寿命については、磁場なしの測定ではほぼ文献値と等しい値が得られたが、磁場ありのときは 1 割弱もの
誤差が見られた。g 因子については、およそ文献値に近い値が得られた。(CH1 では文献値との誤差が下方に
1.5%、CH2 では下方に 2.2% 出た。)

謝辞

実験を進めていくにあたって、中家剛先生をはじめ TA の増田孝彦さん、高橋将太さんに適切な指導、アドバイスを頂きました。この場を借りて A1 一同より御礼申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 小田稔 『宇宙線』 裳華房
- [2] 武田暁 『素粒子』 裳華房
- [3] 2009 年度 前期 A1 レポート