

Stopped Muon  
崩壊による電子のエネルギー分布の  
測定

94S2003J 宮島 晃

平成11年3月10日

# 目次

1	目的	2
2	理論	3
2.1	Muon	3
2.2	$\beta$ 崩壊で生成される電子の運動エネルギー	4
2.3	$\beta$ 崩壊後の電子のエネルギー分布	6
3	装置	7
3.1	概要	7
3.1.1	実験装置	7
3.1.2	シュミレーション	11
3.2	改良点	14
3.2.1	トリガー	14
3.2.2	カロリメータ	15
3.3	予備実験	16
3.3.1	トリガー	16
3.3.2	カロリメータ	19
3.3.3	ゲート信号	19
3.3.4	通過粒子の ADC 分布	21
4	実験	23
4.1	結果	23
4.2	考察	26
5	最期に	27
5.1	謝辞	27
5.2	感想	28
5.3	参考文献	28

# 1 目的

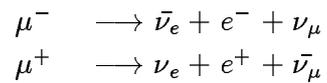
現在の理論では、ニュートリノの質量はゼロと定義されている。しかし、本当にゼロなのであろうか。この実験の目的は、Muonの崩壊によってできる電子のエネルギーの分布を測定する事により、ニュートリノの質量を論じることである。

Muonは、平均約 $2.2 \mu s$ で電子とニュートリノに崩壊する。宇宙線の大部分はMuonであるから、測定器内でストップして、崩壊するMuonを高い頻度で観測する事ができる。この実験では、鉄とシンチレーターからなるモジュールで、Muonをストップさせ、崩壊した後の電子のエネルギーを測定する。

## 2 理論

### 2.1 Muon

地上に降りそそいでいる宇宙線中に含まれている Muon は、平均寿命約  $2.2 \mu s$  で、



という、 $\beta$ 崩壊をする。この実験では、 $\beta$ 崩壊後に生成される電子のエネルギーを測定し、その分布をみる。

時間  $t = 0$  のときの Muon の個数を  $N(0)$ 、 $t = t$  のときの Muon の個数を  $N(t)$  とすると、

$$N(t) = N(0) \exp(-\lambda t)$$

と、表される。 $\lambda$ は平均寿命。 $t = a$  から  $b$  までの時間に観測される Muon の崩壊する個数の期待値は、上式より、

$$\begin{aligned}N &= \frac{N(a) - N(b)}{N(0)} \\ &= \exp(-\lambda a) - \exp(-\lambda b)\end{aligned}\tag{1}$$

となる。

## 2.2 $\beta$ 崩壊で生成される電子の運動エネルギー

Muon が  $\beta$  崩壊してできる電子とニュートリノは、当然エネルギー保存則と運動量保存則を満たしているので、とりうる電子の運動エネルギーの最大値が計算できる。

2つのニュートリノが同じ方向に進み、電子の運動量と、2つのニュートリノの運動量の和が、大きさが同じで向きが反対になるような  $\beta$  崩壊を考える。

この運動量を  $P$  とすると、エネルギー保存則より、

$$M_\mu c^2 = \sqrt{M_e^2 c^4 + p^2 c^2} + \sqrt{M_\nu^2 c^4 + p^2 c^2} \quad (2)$$

これを  $P$  について解くと、

$$P^2 = \frac{c^2}{4M_\mu^2} \left[ M_\mu^4 + M_\nu^4 + M_e^4 - (M_\mu^2 M_\nu^2 + M_\nu^2 M_e^2 + M_e^2 M_\mu^2) \right] \quad (3)$$

となる。

電子のエネルギーを  $E_e$  とする。式3で求めた  $P$  を使って  $E_e$  を求めると、

$$\begin{aligned} E_e &= (M_e^2 c^4 + p^2 c^2)^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{M_\mu^2 + M_\nu^2 + M_e^2}{2M_\mu} c^2 \end{aligned} \quad (4)$$

となり、これより電子の運動エネルギーの最大値  $T_{max}$  は、

$$\begin{aligned} T_{max} &= E_e - M_e c^2 \\ &= \frac{[(M_\mu - M_e)^2 - M_\nu^2] c^2}{2M_\mu} \\ &= \left[ (M_\mu - M_\nu - M_e) - \frac{(M_\mu - M_\nu)^2}{2M_\mu} + \frac{M_e^2}{2M_\mu} \right] c^2 \end{aligned} \quad (5)$$

と計算される。

ニュートリノが質量をもたない場合には、式5の  $M_\nu = 0$  として、

$$T_{max}' = \left[ (M_\mu - M_e) - \frac{M_\mu}{2} + \frac{M_e^2}{2M_\mu} \right] c^2 \quad (6)$$

となり、Muon の質量は電子のそれよりずっと大きいので、式 6 は、

$$T_{max}' \cong \frac{M_{\mu}c^2}{2} \quad (7)$$

と、近似できる。

AMP を使用するにしても、その線形性を確かめた上で使用する。

実験装置内での実際の  $\beta$  崩壊では、電子と 2 つのニュートリノは、運動量保存則とエネルギー保存則を満たす任意の方向に運動する。しかし、電子の運動エネルギーの最大値が、計算した  $T_{max}'$  を越えるような崩壊はあり得ない。

式 5 で、ニュートリノが質量を持っているときは、その運動エネルギー  $T_{max}$  は式 6 の  $T_{max}'$  より小さくなるはずである。これが、この実験の目的である。

## 2.3 $\beta$ 崩壊後の電子のエネルギー分布

電弱理論によると、 $\beta$ 崩壊後の電子の運動エネルギースペクトルは、

$$\frac{d\Gamma}{dE} = \frac{G^2}{12\pi^2} M_\mu^2 E^2 \left(3 - \frac{4}{M_\mu} E\right) \quad (8)$$

と計算されている。式8の  $\frac{d\Gamma}{dE}$  が電子のエネルギースペクトルで、 $\Gamma$  は Muon の崩壊率、 $E$  は電子のエネルギー、 $G$  は弱結合定数である。

図1は、式8をもとに、縦軸を  $\frac{d\Gamma}{dE}$ 、横軸をエネルギーとして描いたエネルギー分布グラフである。

(図中の式と軸のスケールは、グラフを描くために式8の定数項に数値を適当に代入したものである。)

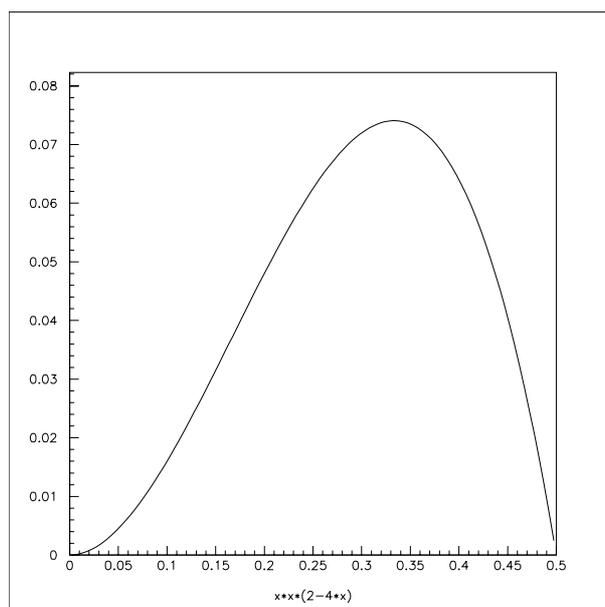


図1: 理論式より導かれるエネルギー分布。

この分布は、他で行われている多くの実験、観測事実と一致している。しかし、僕が行う観測では、実験装置は鉄とシンチで出来ているが、電子がシンチのみに落としたエネルギーだけを観測して、鉄に落としたエネルギー分を見ていないので、図1の様な分布にはならないと思われる。

## 3 装置

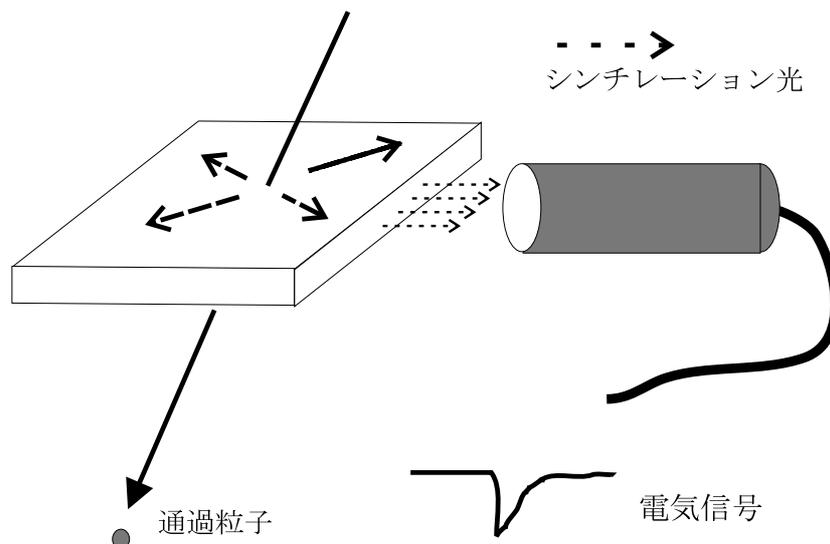
### 3.1 概要

#### 3.1.1 実験装置

この実験では、シンチレーターとフォトマルによってできたトリガーと、シンチレーターと鉄を積み重ねたものとフォトマルによってできたカロリメータでできている。これは、前年度に行なわれた宇宙線中の荷電粒子測定実験の装置を改良して製作した。

物質内を荷電粒子が通過すると、物質中の電子が励起され、通過粒子はその分エネルギーを失う。遊離された電子はすぐに基底状態に戻るが、そのとき光を放出する。シンチレーター (以下シンチ) は透明度の高い物質でできているので、この光をフォトマルまで伝達することができる。

フォトマルは、光を大きな電気信号に変える事のできる装置である。原理は、入ってきた光子が光電面に当たると、光電効果により電子を放出する。光電面と陽極には電圧をかけて、電子を加速させる。加速した電子はダイノードに衝突し、より多くの電子を放出する。これを繰り返して大きな電気信号にすることができる。



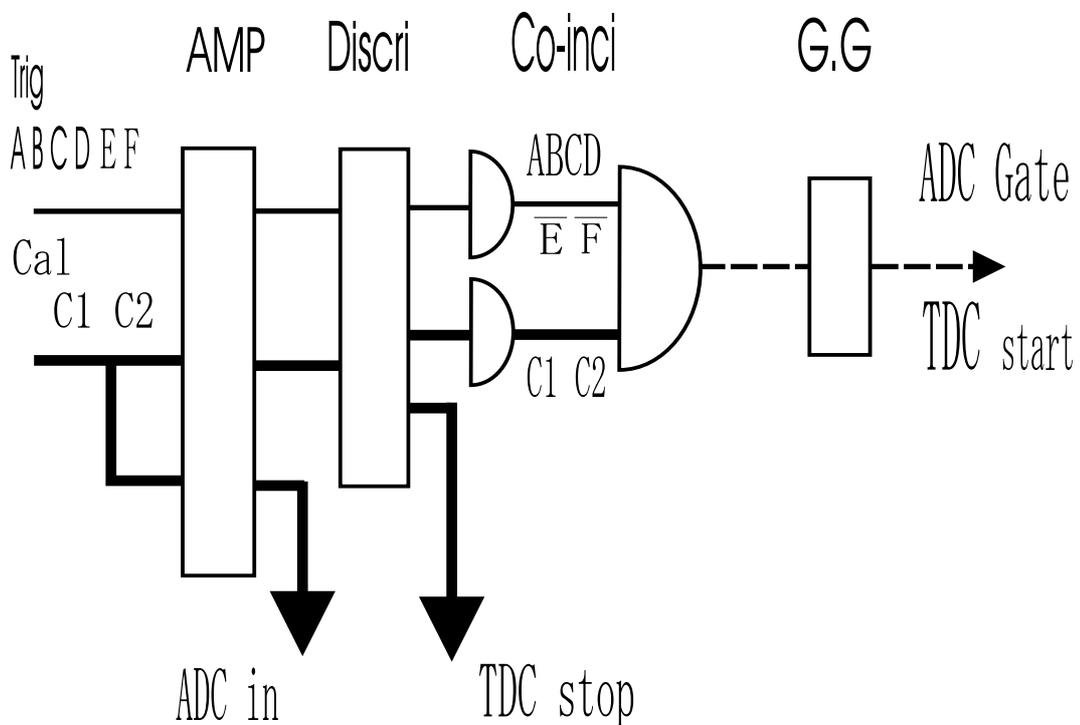


この実験装置の読みだしは、MIN モジュールと CAMAC モジュールによって行う。

NIM では、Discriminator、Co-incidence、Gate-Generator というモジュールを使用した。使用としては、

1. Discriminator で、フォトマルからのアナログ信号を NIM 規格にそったデジタルパルスに変換する。これには、信号が入力されたときに信号を出す出力端子と、信号が入力されない間中信号を出す veto 出力端子がある。
2. Co-incidence で、入力されるパルスの AND が出力される。
3. Gate-Generator で、入力パルスがあったときに、任意の幅のパルスを任意の時間 Delay させて出力する。

となっている。後述するフォトマル用のアンプも NIM モジュールである。



CAMAC モジュールでは、ADC と TDC というモジュールを使用する。NIM またはフォトマルからの信号を入力信号とする。CAMAC は PC によってソフトウェアで制御され、データは PC 内にファイルとして保存される。今回の実験では PC は Mac を使用した。各 CAMAC モジュールは、

- ADC には、複数のアナログ入力端子と、ある幅をもったデジタル信号を入力する端子が一つある。フォトマルからくるアナログ信号の全電荷を、入力されたデジタル信号 ( NIM の Gate-Generator からの信号 ) の幅分の時間、積分する。これによってフォトマルからの出力ゲインをみることができる。
- TDC には、デジタル信号を入力する。TDC はスタート信号入力時からストップ信号が入力されるまでの時間を測定するモジュールなので、スタート信号入力端子 1 つと、複数のストップ信号入力端子がある。

である。

### 3.1.2 シュミレーション

通過する Muon や崩壊後に発生した電子は、この装置ではどのようなエネルギー分布をするのであろうか。それを GEANT でシュミレーションした。

まず、装置内を粒子がストップせずに通過して行くイベントについてシュミレーションした。

シュミレーションによると、約 300 Mev 以上のエネルギーを持った粒子はこの装置では通過していくので、通過 Muon は装置の中心を通る Z 軸上からエネルギー 800 Mev で通過するとした。

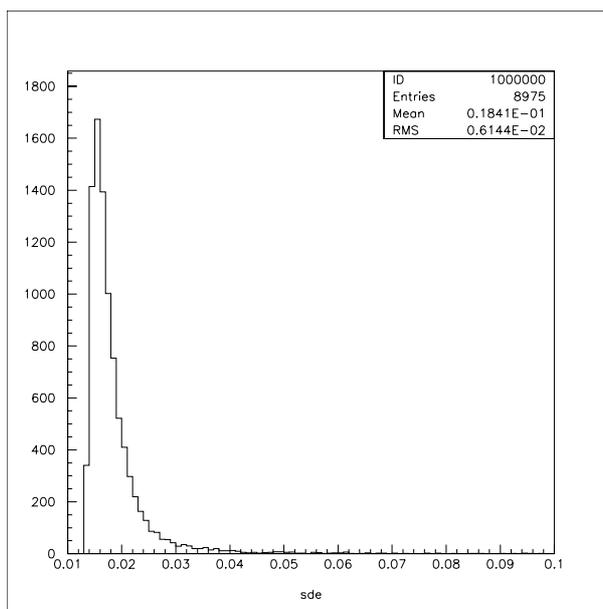


図 2: 通過粒子が測定器内のシンチに落すエネルギー

図 2 は、縦軸はイベント数で、横軸はエネルギー (単位は Gev )。

グラフは良く知られている通過粒子のエネルギー分布の形をしている。Mean は 0.018 Gev となっている。

次に、 $\beta$  崩壊後の粒子が落すエネルギーについてシュミレーションした。

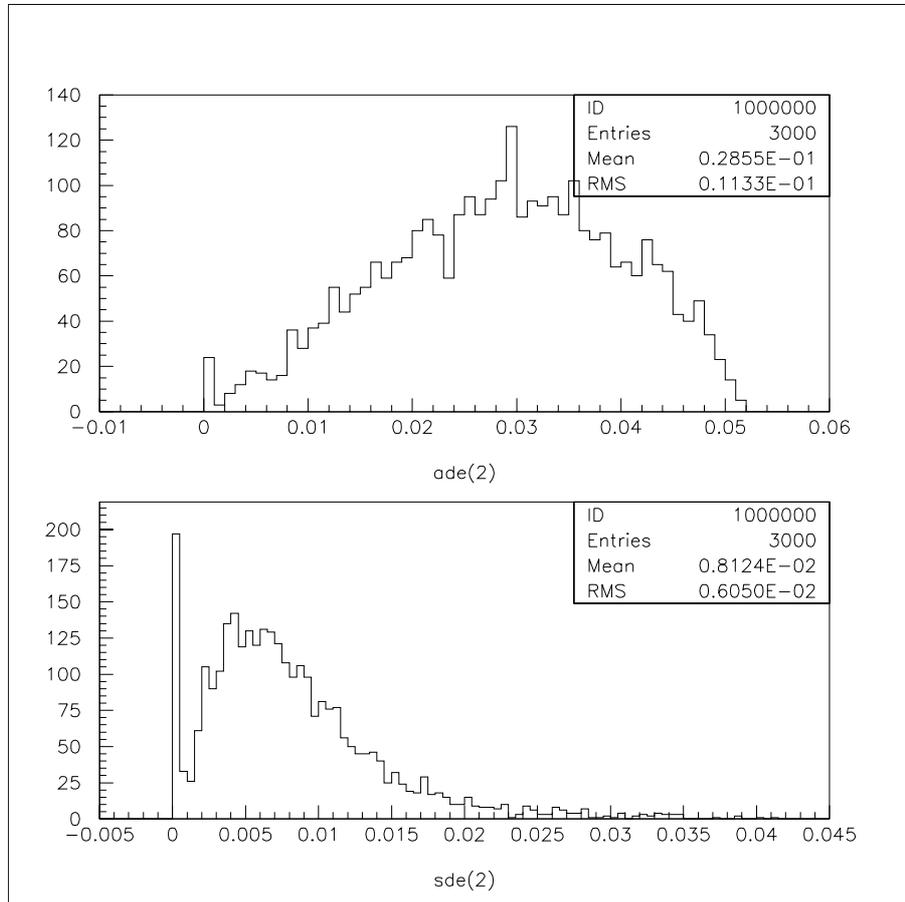


図 3:  $\beta$  崩壊後の粒子が落すエネルギー

図 3 は、 $\beta$  崩壊後の粒子が落すエネルギーについてシュミレーションである。装置の中心にモーメントが 0 の Muon をおき、崩壊後のそれぞれの粒子が持つエネルギーの割合をランダムにして崩壊させている。

図の上 (  $ade(2)$  ) は装置全体に、図の下 (  $sde(2)$  ) は装置内のシンチに落したエネルギーである。 $ade(2)$  については、2.3 章の理論より導かれたエネルギー分布と同じ形をしているのが見て取れる。

しかし、実際の観測では、必ず装置の中心に Muon がストップするとは限らない。

そこで、装置内の任意の位置にランダムに Muon をおき、崩壊させるシミュレーションを行った。

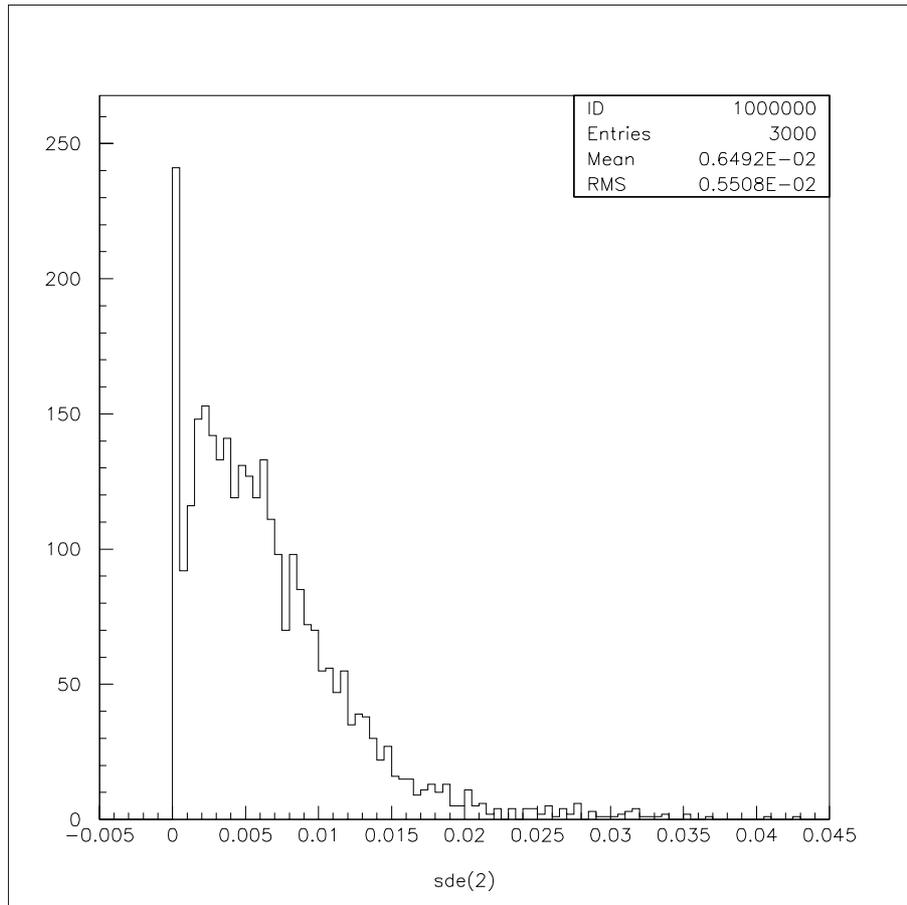


図 4: 測定器内のシンチに落ちたエネルギー

図3と比べると、図4は Mean の値が小さくなり、も小さくなっている事が見て取れる。これは、装置の端のほうで崩壊した Muon は、生成された粒子が装置にほとんどエネルギーを落さずに抜けて行ってしまいうイベントがある。このために、全体的に分布図が左の方にシフトしてしまっていると思われる。

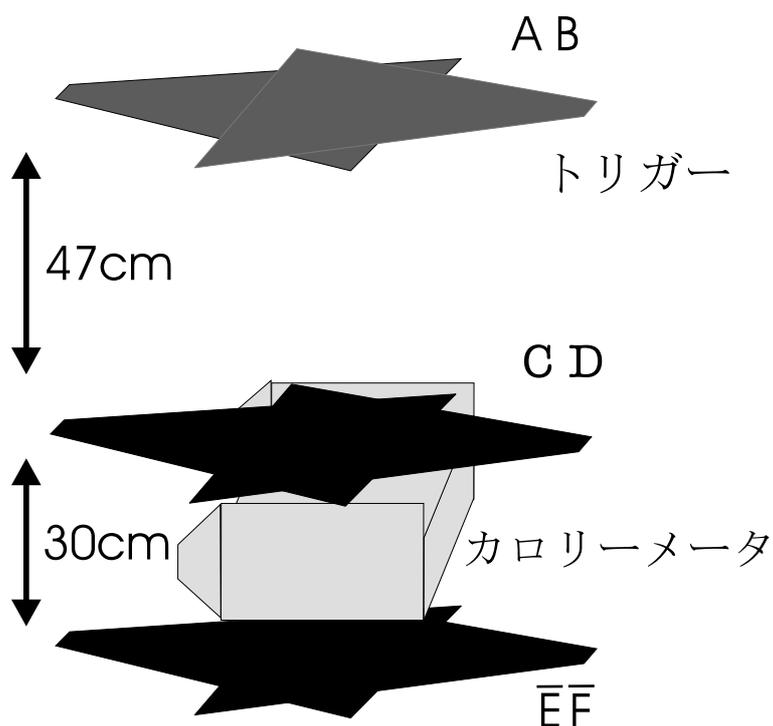
実際の観測では、この様な分布図が得られると予想される。

Mean の値は  $0.65 \times 10^2$  Gev で、Max は 0.043 Gev となっている。

## 3.2 改良点

### 3.2.1 トリガー

トリガーは粒子がカロリメータ内で確実に止まった時にのみ信号を出すように設定しなければならない。既存の装置では、トリガーはカロリメータに対して上下それぞれ2枚ずつだった。この設定では、立体角を計算すると、信号をだしていても実際にはすり抜けしてしまう粒子が多すぎる。また、トリガーシステムのレスポンスがあまりよくない。この問題はトリガーの枚数を増やして、その位置関係を工夫することにより解決した。今回の実験では、下図の様な設定にした。



### 3.2.2 カロリーメータ

通過して行く粒子のカロリーメータからの信号を見る。カロリーメータの上下に2つ以上のトリガーをおいて、信号の AND をとってトリガー信号とする。トリガー信号とカロリーメータからの信号を AND をとって一定時間カウントすると、トリガー信号だけのそれと比べて、80%程しかない。オシロスコープで通過粒子のゲインをみると、トリガーのアナログ信号に比べて、カロリーメータのアナログ信号は同じくらいであった。カロリーメータのほうがシンチの体積は多いから、このカロリーメータは構造上ゲインがすくないといえる。よって ADC や TDC をとる際は、カロリーメータからの出力をアンプに入れて出力することにした。

カロリーメータのゲインを上げるために、既存の装置を一度分解してみた。すると、シンチとライトガイド (シンチから出た光をフォトマルに伝えるための透明なアクリル。) との間の接着面がとても汚かった。そこで、その汚れた面を磨き直して、接着剤を使用しないで組み立ててみた。が、結果は芳しくはなかった。

このカロリーメータで使用するアンプは、NIM モジュールで、信号の整流効果もあるので、トリガーでも使用することにした。

### 3.3 予備実験

#### 3.3.1 トリガー

##### 1) フォトマルのプラトーの決定。

トリガー用のフォトマルにかける電圧を決定しなければならない。フォトマルは電圧が低ければ電子が十分に加速されずに、出力信号が弱くなる。そうすると、粒子がシンチ内を通過または静止していても、イベント数が少なくなってしまう。反対に、電圧が高すぎれば、光電面に光が入射していなくても、光電面から電子が飛び出して、出力信号になってしまい、イベント数が多くなる。

このため、一分間のイベント数を縦軸に、横軸にフォトマルにかける電圧のグラフをとって、かける電圧を決定した。予想されるグラフは、電圧とともにイベント数が増えていくが、ある電圧からイベント数の増加分が少なくなり(これをプラトー領域とよぶ)、ある電圧を越えると再びイベント数の増加分が大きくなっていくはずである。

このプラトー領域は、フォトマル一つ一つ違うので、使用するフォトマルすべてについて実験をおこなった。電圧を変化させるトリガーの上下にあるトリガーに一定の電圧をかけて、3つの信号のANDをとり、通過して行く粒子のイベント数をとった。

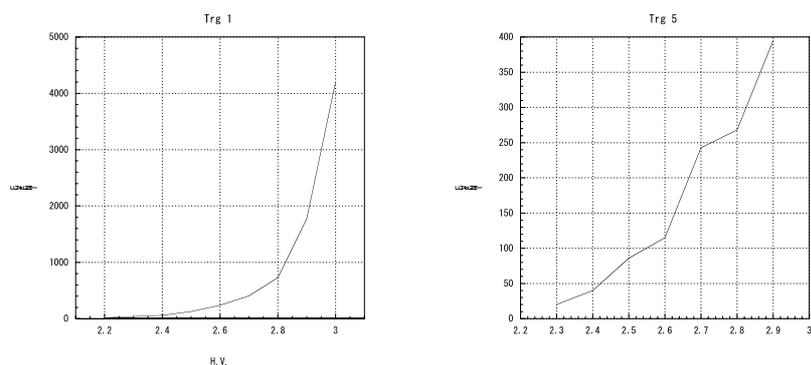


図 5: トリガーの HV 決定

図5で、Trg 5 はきれいなプラトーが現れているが、Trg 1 はよくわからない。この場合、図6の様に2.6 kv から2.9 kv までを細かくとって決定した。

下表に決定したすべてのトリガーの電圧をのせている。(単位は -kV )

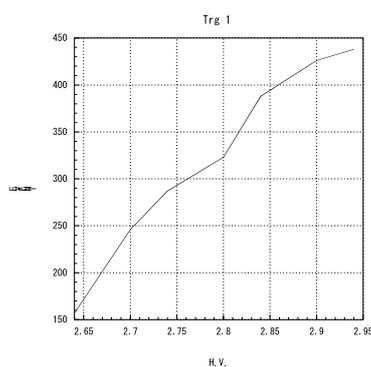


図 6: Trg 1 の HV 細分測定

Trg 1 2.86

Trg 2 2.66

Trg 3 2.80

Trg 4 2.80

Trg 5 2.78

Trg 6 2.32

## 2) Discr1 の スレシオールド の決定。

トリガーのフォトマルから出力された信号はアナログである。これを Discr1 にいれてデジタル信号にする。このときに、ある一定以上の振幅を持つパルスのみを出力するように設定すると、ノイズによる弱い信号をカットすることができる。この設定の値をスレシオールドといい、これを決定するために、縦軸に ABCD の AND をとったもののイベント数を ABC で AND をとったもののイベント数で割った値を、横軸にスレシオールドの値をとったグラフをとった。

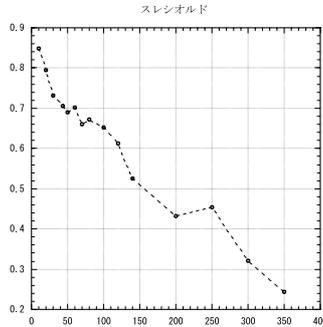


図 7: スレシオールドの決定

グラフをみると、60 mV (実際はマイナス信号だが、絶対値で論じる、) まではイベント数が減少していくが、その後しばらくはプラトーで、100 mV を越えるとまた減少をはじめ。これにより、出力パルスが 60 mV 以下はノイズがまじっていて、100 mV を越えると本信号もカットしてしまうことがわかった。よって、スレシオールドは 60 mV に設定した。

### 3) ノイズによる Co-incidence。

今回設定でのトリガーのシングルレートは、Trg 1 では 1790/s であった。また Trg 2 では 795/s であった。これらはすべてノイズによるものだとすると、ノイズによる Co-incidence の期待値  $I$  は、Discri からの出力を 25 ns と設定してあるので、Co-incidence は前に入ったパルスの立上りと次のパルスの立ち下がりでも AND が取れるとすると、

$$I = \frac{1790}{2 \times 10^{-6}} \times \frac{795}{2 \times 10^{-6}} \times 2 \times 10^{-6} \cong 0.07 \quad (9)$$

となる。実際の Co-incidence 数は 28/s である。これにより AND をとればノイズによる影響はほとんどないと言える。

### 3.3.2 カロリーメータ

カロリーメータのフォトマルは、ゲインを稼ぐために取り得る最大の値の 2.9 V で設定した。しかし、このままでは装置の製作上、左右のゲインが異なってしまっていたので、オシロスコープでゲインの違いを見ながら調整した。その結果、

C 1 2.90

C 2 2.82

と設定した。(単位は -kV )

### 3.3.3 ゲート信号

#### 1) 通過 Muon のためのゲート信号

Muon が装置を通過して行くときにカロリーメータに落ちていくエネルギーを測定するために、確実に通過したと思われるときに信号を出すようにトリガーを設定する。このときの信号を Gate-Generator にいれて、ADC 用の信号をつくりだす。あらかじめカロリーメータからの信号は 40 m ケーブルで 200 ns 遅延してあるので、Gate-Generator はトリガーからの信号が入ってから 150 ns 遅延して、150 ns の幅のパルスをだすように設定した。

トリガーの設定は、3.2.1 章の図で、トリガー 6 枚の信号の AND をとり、カロリーメータの左右の AND をとる。その 2 つの AND をとることにより、確実に粒子が通過したときのゲインを見ることができるよう設定した。カロリーメータからの出力は 2 つに分けてアンプに通してあり、1 つは ADC に、もう 1 つをゲート信号用に使用した。

## 2) 崩壊後の電子を測定するためのゲート信号

崩壊後の電子を測定するには、まず Muon が装置内で静止したということがわかる必要がある。そのために、3.2.1 章の図で、装置より上のトリガー ( ABCD ) の AND をとり、装置より下のトリガー ( EF ) が信号を出さなかったときに出力される Discriminator の veto 信号の AND をとる。それに、通過のときと同様にカロリメータからの信号の AND をとる。この 3 つの AND をとることにより、確実に装置内に静止したという信号を得る。

この信号を使ってゲート信号をつくり出すわけだが、カロリメータのフォトマルと ADC との間に信号の反射があるので ( 40 m ケーブル往復で 400 ns )、ゲート信号は静止後 500 ns から幅 150 ns で出力することにした。

幅 150 ns というのは、実験で使用した TDC の限界である。今回の実験では、Muon の寿命を測定するために ADC と同時に TDC を使用した。

TDC 用の信号については 3.1.1 章の 9 頁の図のように、ADC のスタート用に作った信号を使用している。( Gate-Generator の出力は複数ある ) ストップ信号は Discriminator を通してデジタル信号にしてある。

この設定で観測される電子の個数の期待値は、2.1 章の式 1 で、

$$a = 500 \text{ ns} , b = 650 \text{ ns} , \text{平均寿命 } \lambda = 2.2 \mu \text{ s}$$

として、約 0.05 である。

### 3.3.4 通過粒子の ADC 分布

この実験装置のキャリブレーションをとるために、通過 Muon の ADC 分布をとった。ゲート信号は前述の設定で、3000 イベントとった。

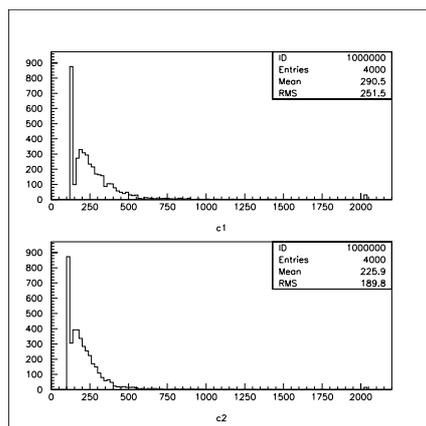


図 8: 通過粒子のエネルギー分布

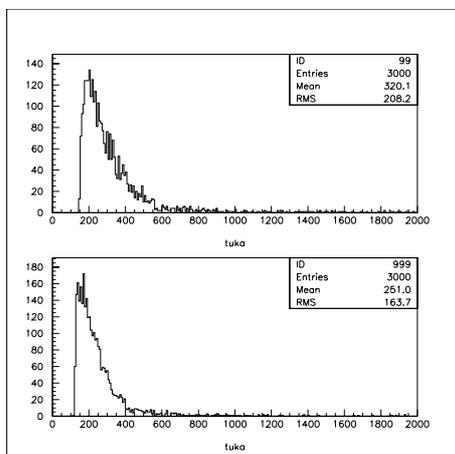


図 9: 通過粒子のエネルギー分布の拡大図

図を見ると、C 1 と C 2 の Mean の値が異なっている。これは、左右のフォトマルのゲインが補正しきれていないからだと思う。C 1 の Mean が 320 ch で、C 2 の Mean が 251 ch なので、C 2 のデータを 320 倍して 251 で割ることにより、左右のゲインをあ

わせた。

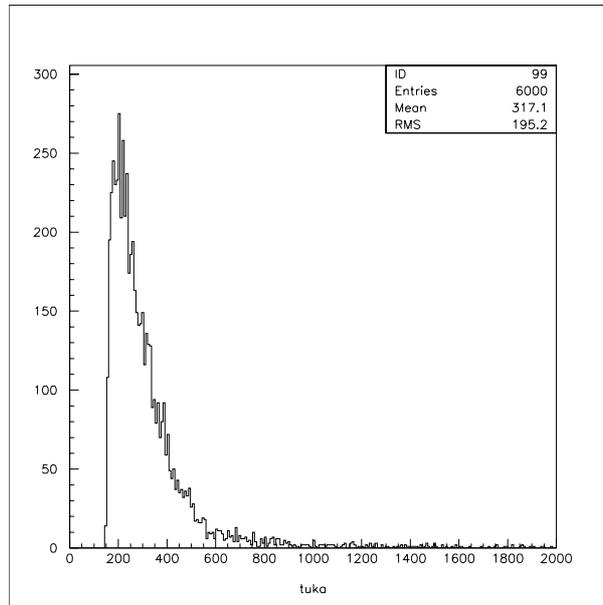


図 10: キャリブレーションして左右をたしあわせたエネルギー分布

このグラフから見て取れるエネルギー分布は、3.1.2章でのシミュレーションのそれと程良く一致している。これによりキャリブレーションを行なう。

グラフを見ると、Mean の値は 317 ch になっている。前述のシミュレーションでは、通過粒子が装置に落ちエネルギーの Mean の値は 0.018 Gev なので、ADC の 1 ch は  $0.018/317$  Gev に相当するということになる。

シミュレーションでの電子のエネルギー分布で、Mean の値は  $0.64 \times 10^{-2}$  Gev、Max は 0.04 Gev であった。実験ではこれらの値は、

$$\begin{aligned} \text{Mean} &: 0.65 \times 10^{-2} \times \frac{317}{0.018} = 113 \quad ch \\ \text{Max} &: 0.043 \times \frac{317}{0.018} = 757 \quad ch \end{aligned}$$

になると予想される。

## 4 実験

### 4.1 結果

図 1 1 は、カロリメータの左右の出力の ADC 分布で、左右の出力を 3.3.4 章のキャリブレーションを使って足し合わせたのが図 1 2 である。

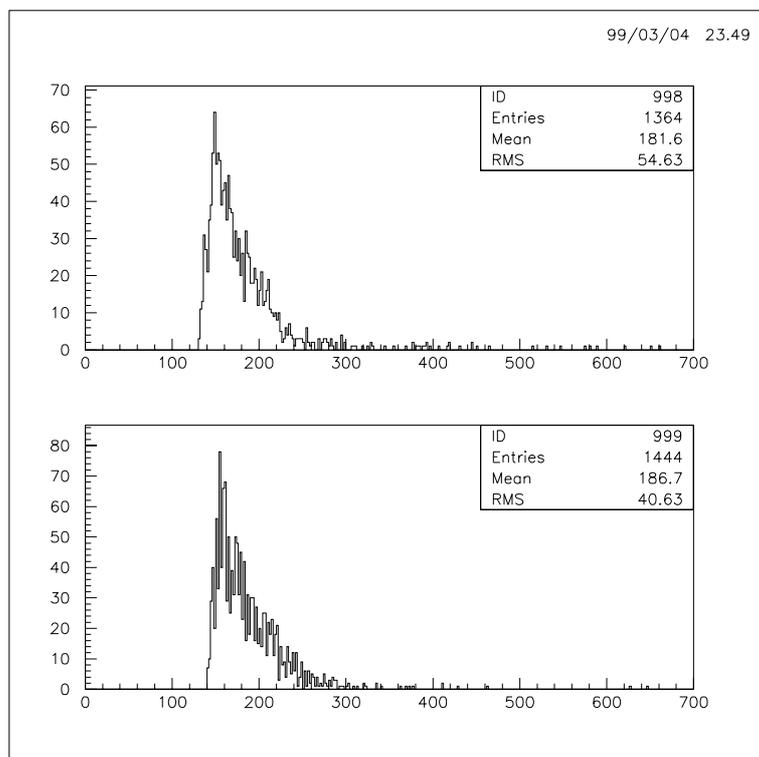


図 11: 崩壊後の粒子が落したエネルギーの分布

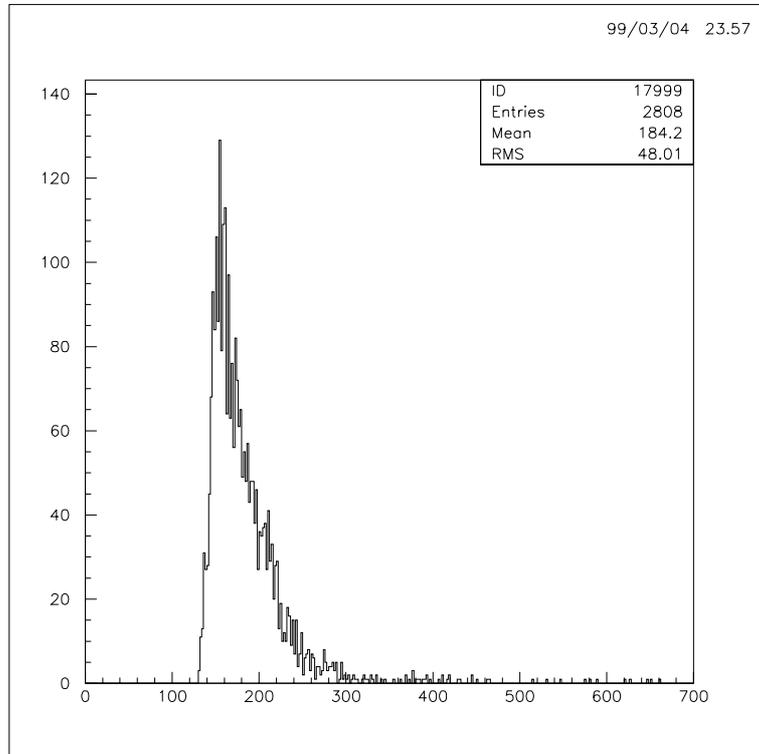


図 12: キャリブレーションして左右をたしあわせた ADC 分布

これを見ると、Mean は 184 ch で、Max は 650ch となっている。  
 また、計算では全イベント中 5% がエントリーするはずであるが、実際には約 1% しかエントリーしていない。また、キャリブレーションした予想値とくらべて、Mean は 112 ch より約 70 ch 大きい。Max は 757 ch よりもずいぶん小さくて 660 ch となっている。

分布は、シュミレーションした Muon 崩壊後の ADC 分布よりも、通過 Muon のシュミレーション分布に似ている。これでは本当に Muon の  $\beta$  崩壊後の電子のエネルギー分布を観測したかどうか疑問である。そこで、次にこれと同時に TDC を測定したので、その分布を見る。

左右の TDC 分布を足し合わせたのが図 14 である。縦軸はイベント数に对数をとってある。横軸は時間。(単位は ns。)

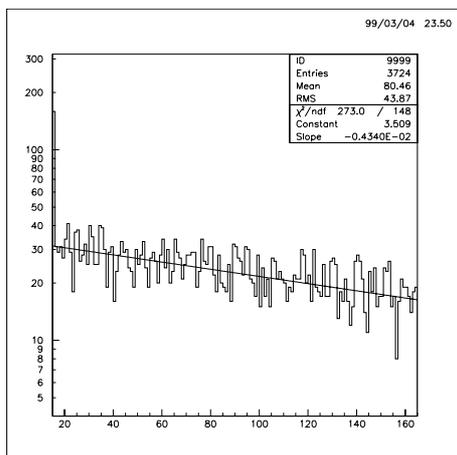


図 13: 左右をたしあわせた TDC 分布

図 14 の分布を log で Fitting してあるので、その傾きを見る。TDC 分布の log fit の傾きの逆数が崩壊時間になる。

この分布の傾きは、 $0.43 \times 10^{-2}$  となっている。  
逆数をとると、崩壊時間  $\lambda$  は、

$$\lambda = \frac{1}{0.43 \times 10^{-2}} \cong 230 \text{ ns} \quad (10)$$

となる。これは、Muon の平均寿命約  $2.2 \mu\text{s}$  より、1桁小さい。

## 4.2 考察

今回の実験では、 $\text{Muon}$  の  $\beta$  崩壊後の電子のエネルギー分布を観測することが出来なかった。原因として考えられるのは、とまかくカロリメータのゲインがわるいことであろう。他には、フォトマルアンプの線形性が疑わしいことと、TDCの測定時間限界が短いのでゲート信号の幅を大きくとれなかったことが上げられる。しかし、通過粒子のエネルギー分布は、(深く考察はしていないが、)みえているので、フォトマルアンプの線形性は悪くないのかもしれない。ゲート幅を大きくとって、長時間観測することが出来れば(イベント数を増やす)、この測定系でも観測が可能であるだろうと思われる。

時間的余裕がなかったので出来なかったが、この測定系にはまだまだ改良すべき点が多くあると思われる。

今後の課題としては、

- カロリメータのゲインを大きくする。そうすれば AMP を使用しないですむ。シンチと鉄を、きっちりと平面を出すように積み重ね、そしてアクリルのライトガイドを積層面にきっちりと、かつ透明度を失わないように固定することが出来れば良い。AMP を使用するにしても、その線形性を確かめた上で使用する。
- トリガーの枚数を増やして、確実に粒子が止まったときのみゲートが開くようにする。単位時間あたりのイベント数は少なくなるが、効率良く観測が実施できるようになる。
- 測定時間限界が長い TDC (平均寿命より長いもの) を使用する。これにより、実験の効率と精密性が向上する。
- キャリブレーションするためのシュミレーションを、より実際の実験装置の設定に近くする。これにより、より厳密に議論できるようになる。また、わかっている観測事実から数値計算でキャリブレーションする。

が、あげられる。

## 5 最期に

### 5.1 謝辞

今回の卒業研究では、担当教官の竹下先生には、実験装置の改良から実際の測定までのあらゆる場面で御指導をしていただきました。また、M1の古川さんには、実験装置や実験理論について、勉強不足だった僕がぶつけた疑問に、様々なヒントやアイデア、答えなどを教えていただきました。この場を借りて御礼申し上げ心から感謝の意を表したいとおもいます。

また、同じ実験装置を共有し、実験にも協力していただいた竹下研の江成君と一宮君、僕のわがままでずいぶんと迷惑をかけたであろうこの二人にも、感謝の意にたえません。

そして、同じ時間と同じ場所をシェアした、旭合同研究室の院生や4年生の皆様、僕の下らない話やわがまを聞いてくださいました。楽しい研究生活を送れたのは皆さんのおかげです。どうもありがとうございました。

## 5.2 感想

初めのうちの、実験装置の改良に思ったより時間がかかってしまい、観測にかけたかった時間が少なくなってしまった。また、改良方法にも問題が生じ、効率が上がらなかった。観測についても、もっと効率良く出来たのではないかと思う。

振り返って見ると、今回の実験では、僕は初めのうちはとにかく勉強不足でした。そして実験に突っ込んで行くのが遅すぎたように思っています。これが一番の反省点です。進めて行くうちに、どんどんとやるべきこと、やりたいことが増えていき、その度に勉強不足を痛感しました。

しかし、自分で選んだテーマにむかって、充実して研究が送れたと思っています。研究と言うものをどのようにして進めて行くべきかを学ぶことが出来ました。ドラマチックかつテクニカルな結論を導くまでには行けなかったけれども、とても満足しています。

### 5.3 参考文献

- 松坂由美子：信州大学理学部物理学科卒業論文 ( 1998 )
- 中川 哲朗：信州大学理学部物理学科卒業論文 ( 1998 )
- F.Halzen , A.D.Martin 共著、小林徹朗, 広瀬立成 共訳  
: QUARKS & LEPTONS ( 1986 )