

1 はじめに

1.1 実験の目的

地上にはたくさんの原子核や素粒子が降り注いでおり、その粒子は宇宙線と呼ばれている。その宇宙線のほとんどはミュオン粒子に崩壊し、その過程で粒子はさまざまな寿命を持つことが分かっている。今回の実験では CsI シンチレーターを用いて、地表にたどり着く μ 粒子を測定すること、またその結晶内で崩壊する μ 粒子を使って寿命を測定、解析することを試みる。その過程において、素粒子物理学の実験的研究を行うと共に、高エネルギー物理学の基本的な実験技術を習得することを目的とする。

1.2 実験課題

今回の実験ではシンチレーションカウンターに入射した μ 粒子が崩壊したときのエネルギースペクトルを測定する。寿命の測定にあつては、プラスチックシンチレーター・CsI シンチレーター・光電子増倍管・FADC などを用いて測定された電気信号を増幅し、AD変換上のデータ処理を行うことによって μ 粒子の寿命を測定する。その過程において、寿命測定の解析プログラムを開発することが今回の課題である。

1.3 本論文の構成

本論文ではまず宇宙線や放射線計測の原理について述べ、次に μ 粒子の寿命測定の原理、装置やセットアップについて述べる。さらにデータ収集の方法、そのデータを使っての解析、プログラムの説明などを組み込み、実験結果を述べていく。

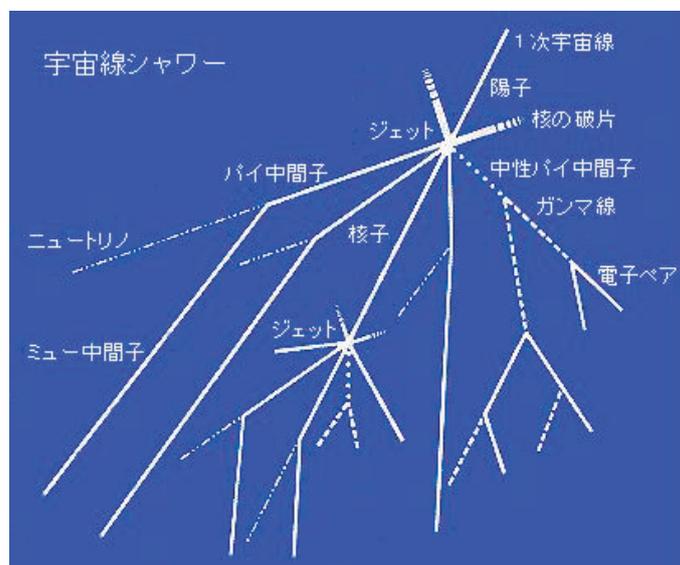
2 宇宙線・ μ 粒子

2.1 宇宙線について

宇宙線とは、宇宙空間から地球に入射する高エネルギーの放射線のことである。宇宙線は常に私たちの身の回りに降り注いでおり、高いエネルギーを持っているため私たちの体や建物を突き抜けていく。そのため、屋内での観測が可能である。

宇宙では、超新星の爆発や、太陽の表面で起こる爆発などで発生した高エネルギーな粒子飛び交っている。それらの粒子には、陽子（水素の原子核）が約90%、アルファ粒子（ヘリウム原子）が約8%、その他の粒子が約1%含まれ、これらを一次宇宙線と呼んでいる。

一次宇宙線が大気圏に突入すると、大気中に含まれる窒素や酸素などの原子核と衝突し、核反応を起こして放射性同位元素や、 π 中間子などの粒子を生成する。これらの粒子は二次宇宙線と呼ばれる。二次宇宙線は原子核を相互作用し、新たな二次粒子を生成する。ちなみに、 π 中間子の寿命は $(2.6030 \pm 0.0024) \times 10^{-8}$ secである。これをカスケードシャワー（cascade shower）と言う。二次宇宙線のうち、電子や γ 線は大気中で吸収され、地上に来る粒子の大部分を μ 粒子とニュートリノが占めている。



2.2 μ 粒子について

μ 粒子は、地上に到達する二次宇宙線の荷電粒子の大部分（約3/4）を占めている。
 μ 粒子は π 中間子が崩壊して生成される。 π 中間子は、宇宙から降ってきた陽子が大気中の原子核と‘強い

相互作用’することによって生成される。 π 中間子は π^0 と π^\pm があり、 π^\pm は“弱い相互作用”によって、ほぼ 100 % 次のように崩壊する。

$$\begin{aligned}\pi^+ &\longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^- &\longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu\end{aligned}$$

μ 粒子は第 2 世代のレプトンで、質量 $105.7\text{MeV}/c^2$ 、電荷 -1 、スピン $1/2$ の粒子である。そして、 μ 粒子は‘弱い相互作用’によって、次のように崩壊する。

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

また、 μ 粒子の寿命は $2.2\mu\text{sec}$ である。本実験では、この寿命を測定する。

3 放射線計測の原理

放射線は我々の五感では感じる事ができない。そのため荷電粒子の電離作用と発光現象を用いて放射線を検出する。今回はシンチレーターで粒子が崩壊するとエネルギーを失い発光し、その光を光電子増倍管で増幅させ電気信号に変えるという方法を用いている。

3.1 電離損失

荷電粒子が物質中を通過すると、入射荷電粒子と物質を構成する原子との相互作用によって、原子が電子と陽イオンに分離される。これを、原子の電離 (Ionization) という。また、電離作用を起こさずに、原子や分子がエネルギーの高い状態 (励起状態) になることもある。これを、原子、分子の励起 (Excitation) と呼ぶ。入射荷電粒子が物質を通過する時、物質中の電子と衝突し、電離や励起を繰り返しながらエネルギーの一部を失う。これを電離損失 (Ionization loss) という。電離損失によって荷電粒子が失うエネルギーは Bethe - Bloch の式で表される。

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi N_0 z^2 e^4 Z}{mv^2 A} \left[\ln \left\{ \frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)} \right\} - \beta^2 \right] (MeV/g/cm^2) \quad (1)$$

- m: 電子の質量
- e: 電子の電荷
- z: 入射粒子の電荷
- v: 入射粒子の速度
- Z: 物質の原子量
- A: 物質の質量数?
- I: 電離ポテンシャル
- N_0 : アボガドロ数
- $\beta = \frac{v}{c}$

電離損失 $\frac{dE}{dx}$ は入射荷電粒子の質量には依存しないが、速度 $v = \beta c$ には依存する。入射荷電粒子のエネルギーが低く、 β が小さい時、Bethe - Bloch の式は

$$\frac{dE}{dx} \approx \frac{1}{\beta^2} \quad (2)$$

入射粒子の運動量が大きくなると、電離損失は $\frac{1}{\beta^2}$ に従って急激に減少し、最小値に達する。この領域での電離を Minimum ionization という。図からも分かるように電荷が同じ粒子ならば、最小値はほぼ同じ値をとる。入射荷電粒子のエネルギーが高くなると、 $\beta^2 \cong 1$ となり、1 式の第 2 項が効くのでエネルギー損

失は、

$$\frac{dE}{dx} \approx \log \left[\frac{\beta^2}{Z(1-\beta^2)} \right] \quad (3)$$

となる。

電離・励起状態にある原子・分子が基底状態に遷移する時、二つに状態のエネルギーの差を光として放出する。この発光をシンチレーション (Sintillation) という。今回の実験では、シンチレーション光を用いて、入射粒子の電離損失を測定する。

3.2 制動放射

荷電粒子の中でも、電子は質量が小さいことと、物質中の電子と同じであることから、重い荷電粒子と扱いが異なる。

電子は質量が小さいので、他の荷電粒子と衝突した際に、原子の励起やイオン化を行わない弾性衝突であっても、速度の時間変化、方向変化かなり受け、加速度運動する。古典電磁気によると、加速度の二乗に比例するエネルギーを電磁波として放出する。加速度の大きさは物質内の荷電粒子の電荷 Z に比例し、入射電子の質量に反比例するので、放出するエネルギーは Z^2 に比例する。したがって、物質内で Z の大きい原子核の存在が最も制動放射に効く。

また、制動放射によるエネルギー損失は入射電子のエネルギーに比例して増していく。そのため、この損失は電子が高速になってから有効となる。この論理式は次式のようになる。

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = \frac{NEZ^2r_e^2}{137} \left(4 \ln \frac{183}{z^{\frac{1}{3}}} + \frac{2}{9}\right) \quad (4)$$

- N :物質の単位体積中の原子数
- E :入射電子のエネルギー
- r_e :電子の古典半径
- A :物質の原子量
- N_0 :アボガドロ数
- ρ :物質の密度

制動放射でエネルギーを失って、電子の始めのエネルギーの $\frac{1}{e}$ になるまでに走る物質層の長さ X_0 を放射長 (radiation length) という。

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0}$$

となるので、 X_0 を求めることが出来る。

今、CsI シンチレーターのエネルギーロス

$$\Delta E = \frac{dE}{dX} \times \rho \times t \quad (5)$$

で求めることができる。

ここで

$$\frac{dE}{dX} = 1.243\rho = 4.53 \quad (6)$$

であるので、C s Iシンチレータの1 c mあたりのエネルギーロス

$$\Delta E = 1.243 \times 4.53 \times 1 = 5.63 \text{MeV} \quad (7)$$

4 測定原理

4.1 計測原理

放射線を計測する際、放射線は五感では感じるできないため、粒子の動きを電気的信号に変換して計測する必要がある。そのため、シンチレーターと光電子増倍管を使用し、計測する。シンチレーターから発生した光は光電効果によって電子を発生し、光電子増倍管で増幅する。 μ 粒子の寿命計算では、一般的に放射性崩壊の指数関数を用いて μ 粒子の寿命を求める。

4.2 μ 粒子の寿命算出

μ 粒子の寿命測定を行うにあたって、放射性崩壊の指数関数法則を用いる。今回の実験で用いた指数関数法則は以下のように導かれる。

今、それぞれの粒子が単位時間に崩壊する確率を λ とする、独立な粒子の集合を考える。時間 dt の間に崩壊する数は次式で与えられる。

$$dN = -\lambda N(t)dt \quad (8)$$

ここで、 $N(t)$ はある時間 t に存在する粒子の数である。 λ は粒子の年齢とは無関係である。8式を積分する。 N_0 を時間 t_0 に存在する粒子数とすると、

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_{t_0}^t dt \quad (9)$$

$$[\ln N]_{N_0}^N = -\lambda [t]_{t_0}^t \quad (10)$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda \{t - t_0\} \quad (11)$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda(t - t_0) \quad (12)$$

$t = t_0$ の場合、12式は通常放射性崩壊の指数関数法則である次式に書き換えられる。

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (13)$$

この N 個の粒子はそれぞれ、 t よりも短い寿命を持っていることになる。時間 t と $t + dt$ との間の無限に小さい時間間隔 dt の間に崩壊する粒子の絶対平均数は、平均として $N \lambda dt$ であり、これらの粒子は時間 t だけ存在する。個すべての粒子の生存時間の和 L は $t N \lambda dt$ の $t = 0$ から $t = \infty$ までの積分であり、(17)式で与えられる。

$$L = \int_0^{\infty} t N \lambda dt \quad (14)$$

$$= \int_0^{\infty} t N_0 \lambda e^{-\lambda t} dt \quad (15)$$

$$= N_0 \lambda \left[\frac{1}{\lambda^2} \right]_0^{\infty} \quad (16)$$

$$= \frac{N_0}{\lambda} \quad (17)$$

よって、平均生存時間（平均寿命時間 τ ）は式で与えられる。

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{1}{\tau} \quad (18)$$

これを (13) 式に代入すると、

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (19)$$

が得られる。この式を用いて μ 粒子の寿命を測定する。

4.3 ADCについて

μ 粒子の寿命を測定する際に ADC(アナログ・デジタル回路)を用いて測定する。ADCはアナログ電気信号をデジタル電気回路に変換する電子回路のことである。今回の実験では、ADC(Qモード、Vモード、FADC)を用い、C s Iシンチレーター内で崩壊した μ 粒子を数値化して解析する。

<Qモード>

荷電積分型 ADC。

Gateパルス内の電圧信号を時間積分するモード

図1に示す。

<Vモード>

ピークホール型 ADC。

Gateパルス内の最大電圧信号を測定するモード

図2に示す。

<FADC>

ADC(アナログ→デジタル変換器)の一つ。

図3に示す。

FADCは通常のADCに比べて、A-D変換速度が極めて速いので、時系列データを読み込むことが可能となり信号の波形を細部まで観測することができる。FADCにはstartモードとstopモードがあり、FADCのモジュール内で切り換えることができる。今回の実験ではstopモードを使用した。波形の終わった所からさかのぼり、後ろから設定した時間ごとにシグナルの高さをプロットしていく。(下の図は設定時間が281nsecの場合)

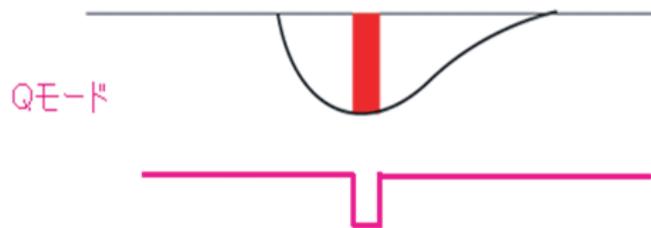


図 1: Qモード

4.4 Qモード、Vモードでの μ 粒子の崩壊

< μ 粒子が通過する場合 >

波形は1つ山

→ QモードとVモードで同じ波高を測定する。

図 4 に示す。

< μ 粒子が崩壊する場合 >

波形は2つ山

→ QモードとVモードで異なった波高を測定する。図 5 に示す。

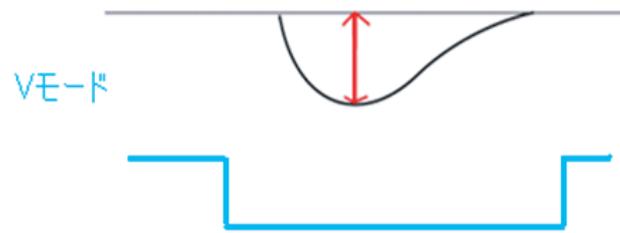


図 2: v モード

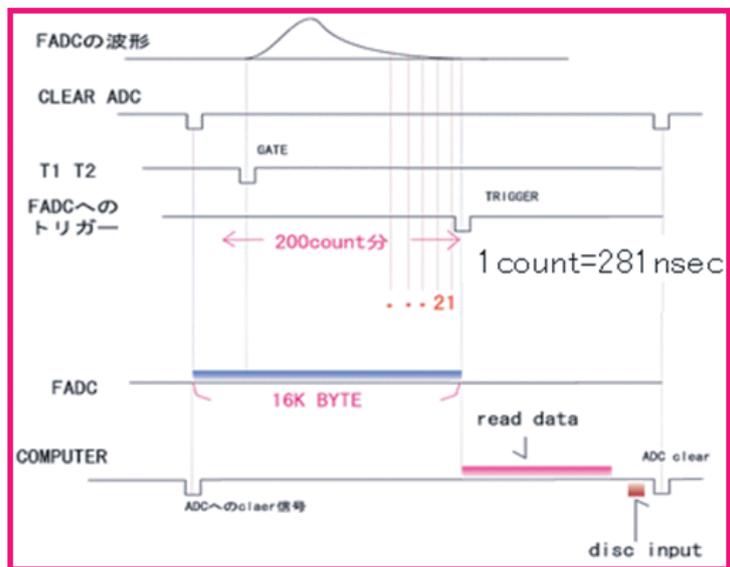


図 3: v モード

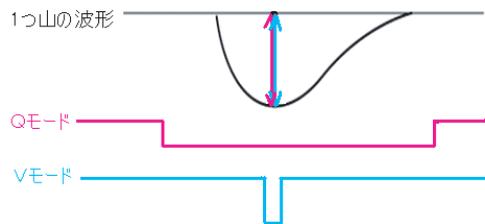


図 4: μ 粒子が通過するとき

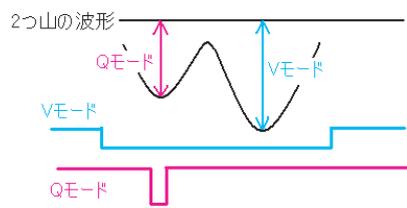


図 5: μ 粒子が崩壊するとき

5 セットアップ

5.1 エレクトロニクスのセットアップ

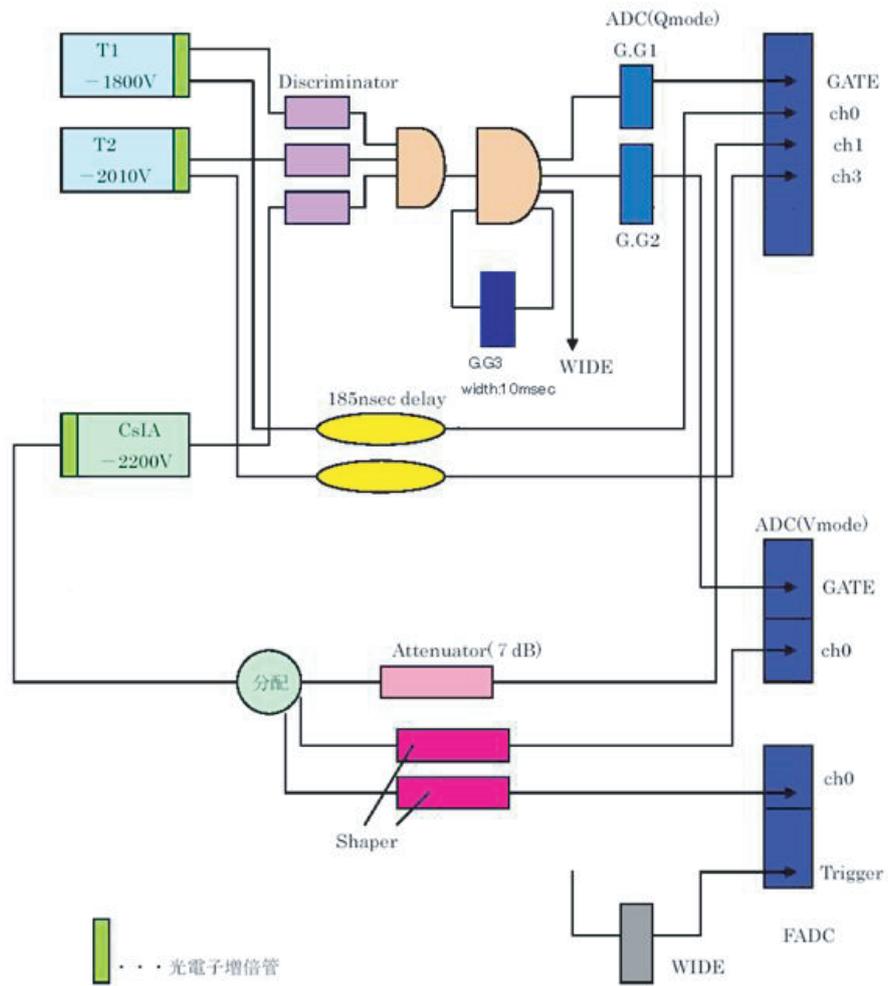


図 6: エレクトロニクスセットアップ

本実験では図6のような配線を組み、イベントを収集した。それぞれに用いた装置について説明する。

(1) シンチレーションカウンター (scintillation counter)

シンチレーションカウンターは放射線検出器の一種である。シンチレーターは荷電粒子が通過する時にその粒子が失うエネルギーを光エネルギーに変換する物質である。シンチレーターに粒子が入射すると、ある波長の光が放出される。この光を光電子増倍管で電気信号に変換すると、放射線検出器として働く。シンチレーターには、有機シンチレーターと無機シンチレーターがあり、それぞれ発光機構に違いがある。本実験では、前者のプラスチックシンチレーターと後者の CsI シンチレーターの二種類を用いる。

プラスチックシンチレーター (T1、T2)

ポリエチレン等プラスチック中に有機発光物質が溶かし込まれている。そのため、形状の加工が簡単である。また、応答が数 nsec のオーダーであり、シグナルの立ち上がり立ち下がりが非常に速い(時間分解能が高い)。一方、光量が無機シンチレーターに比べると少なく、エネルギーの等しい粒子に対する発光量にばらつきがある(エネルギー分解能が低い)。時間分解能が高いことを利用し、本実験ではトリガーカウンターとして使用する。

CsI(Tl) シンチレーター

入射粒子のエネルギーに応じて光り、そのエネルギー損失が1つの数値として光電子増倍管で増幅され、コンピューターで読み込まれる。プラスチックシンチレーターに比べてエネルギー分解能が高ので、トリガーカウンターの近くに置き、粒子のエネルギーを復元する。

(2) 光電子増倍管 (Photomultiplier)

光電効果を利用して光エネルギーを電気エネルギーに変換する光電管を基本とし、電流増幅、つまりは電子増幅機能を付けた高感度光検出器である。

光電面に光が入射すると光電効果によって電子が飛び出す。真空管の中で電極に高電圧をかけて電子を加速すると、飛び出した電子がダイノード(Dynode)に衝突し、ダイノードがいくつかの電子を放出する。この放出された電子は、次のダイノードとの間かけられた電場によって加速され、次のダイノードに衝突し、より多くの電子が放出される。これを繰り返すことで電子を倍増する。この電子がアノード(Anode)に集まり、電気信号として出力される。

図7に光電子増倍管の構造を示す。

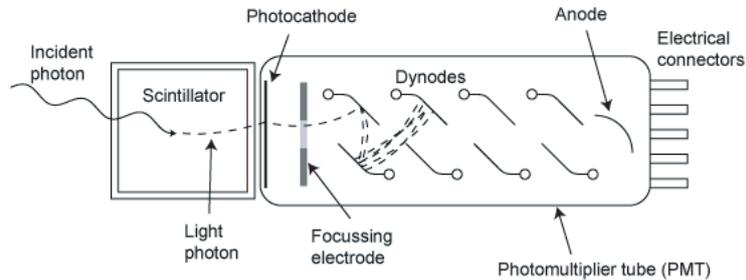


図 7: 光電子増倍管の構造

(3) ディスクリミネーター (discriminator)

あらかじめ設定しておいた threshold(しきい値) よりも大きなシグナルが入力された時、方形(パルス)波を出力する装置。放射線検出器からのシグナルの波高分析やタイミングパルスの発生などに使用されるが、本実験では threshold 以下のノイズを除去するために用いた。パルスは - 0.7V、140nsec と NIM 規格で決められている。

(4) コインシデンス (coincidence)

NOT、OR、AND があり、本実験では AND を使用する。AND は複数のパルスが時間的に重複して入力された時にパルスを出力する。本実験では、T1、T2 に同時に信号がきた時に信号が出るようにした。

(5) ゲート・ジェネレーター (Gate and delay Generators)

入力信号に対して、最小で 110nsec から最大で 4.0sec までの範囲で delay させたり、パルス幅を調整するためのものである。

(6) アテニュエーター (Attenuator)

ADC が読み取れる範囲にするため、入力信号の電圧を減衰させる装置。
単位は dB。

$$dB = - 20 \log_{10} \frac{V_{in}}{V_{out}}$$

V_{in} : 入力信号の波高、 V_{out} : 出力信号の波高

(7) シェイパー (Shaper)

波形整形をするためのもので、FADC を読み込みやすいように立ち上がりとしち下がりを長くする。

(8) ADC(アナログ・デジタル変換回路)

アナログ電気信号をデジタル電気回路に変換する電子回路のこと。本実験ではQモード、Vモード、FADCを用いる。

(9) エレクトロニクスの設定

本実験では、それぞれの設定を下の表のように決定し、測定を行った。

| | HV[V] | Threshold[mV] | Width[nsec] |
|-----|-------|---------------|-------------|
| T1 | -1800 | 150 | 150 |
| T2 | -2010 | 150 | 150 |
| CsI | -2200 | 150 | 150 |

5.2 シンチレーションカウンターのセットアップ

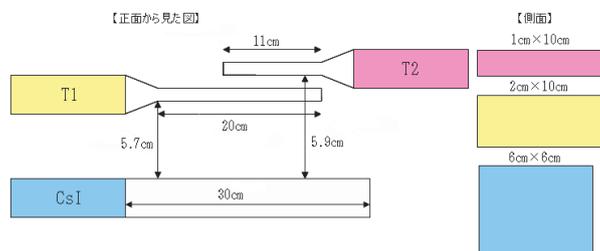


図 8: シンチレーションカウンターのセットアップ

今回は図 8 のように、プラスチックシンチレーター (T1、T2) と、CsI シンチレーターを配置して実験を行った。

● トリガーカウンター

宇宙線である μ 粒子は宇宙から絶え間なく降り注いでいる。CsI(T1) にはあらゆる方向から μ 粒子が入射してくる。そのため、CsI(T1) 中で μ 粒子が崩壊したかどうかの判別が難しい。そこで T1、T2 を CsI(T1) の上に置くことで、CsI(T1) に Hit の条件を与える。そうすることによって余分なデータが削られ、必要とするデータのみを取り出すことが可能となる。この作業をするのがトリガーカウンターである。本実験では T1、T2 をトリガーカウンターとして使用する。

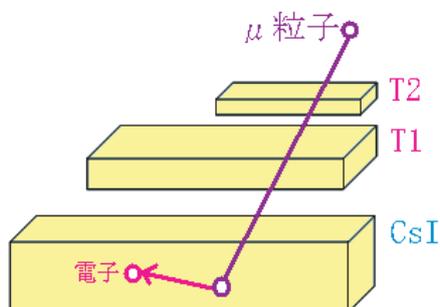


図 9: シンチレーター内で μ 粒子が崩壊する様子

6 CAMACとデータ収集プログラム

6.1 CAMAC(computer aided measurements and control)

CAMAC はモジュール化されたデータを処理するシステムで、世界中のほとんどの物理研究室やたくさんの工業現場で使用されている。これは U.S の NIM とヨーロッパの ESONE 委員会のジョイントで提供された。

CAMAC は計算機周辺でのデジタル化された情報の処理を各機能ごとにモジュール化して行えるようになっている。すなわち、実験装置など外からの情報はプラングイン・ユニットまたはモジュールの画面パネルからコネクタを通して入り込む。この情報はプラングインの中で処理されると、裏面のプリント基板エッジを利用したコネクタでクレートと呼ばれるプラングインを収容する箱の裏側の配線(データウェイ)とつながれる。このデータウェイはクレートコントローラーが制御するが、たいていはクレートコントローラー自身が計算機の指示に従って制御するようになっている。クレートコントローラーはたいてい小型計算機と CAMAC のインターフェースを兼ねる。プラングイン・ユニットは回路配線に使われたプリント基板自身のエッジが 86 ピンのコネクタとなって飛び出しており、クレートに挿し込むと自動的にクレート裏側のコネクタを通して CAMAC データウェイと接続され、電源やデータの受け渡し、制御信号の受け渡しがされるようになっている。

CAMAC の規則は、アドレスの指定のことであり、CNAF で指定する。

C : creat controler の数。本実験では creat は 1 つだけ使用しているので、C=1

N : station number(横)

A : モジュール内のアドレス (縦)、ADC においては 12 個の信号を読む。

F : function

F(0) : Read Data

F(2) : Read and Clear LAM

F(8) : Test LAM

F(9) : Clear LAM

F(24) : Disable LAM

F(26) : Enable LAM

LAM : Look-At-Me のこと。LAM がたつと ADC から computer にデータが送られ、読み込むことが出来るようになる。

6.2 データ収集プログラム

本実験では、CAMAC からのデータ収集プログラムの言語に Microsoft Visual Basic.NET を用いた。VisualBasic では、ボタンやメニューなどといったアプリケーションを作成するのに必要な部品やそれらを

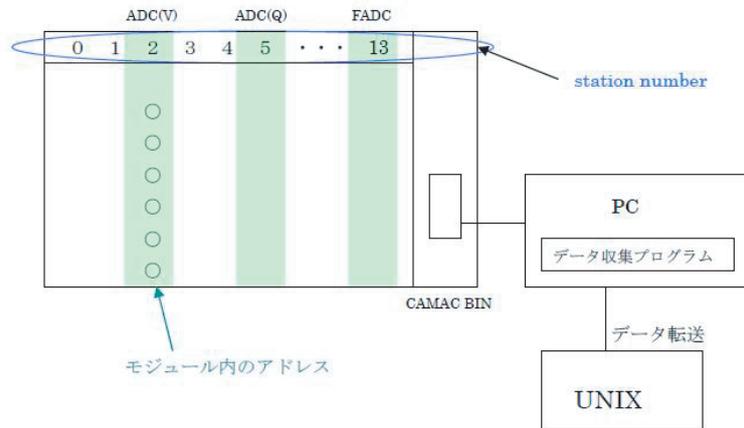


図 10: UNIX

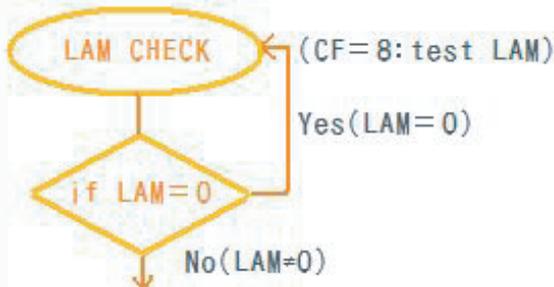
機能させるための処理があらかじめ用意されている。アプリケーションの開発者はそれらをどう組み合わせるかを考え、必要最低限の処理を記述するだけで簡単にプログラムを完成することが出来る。Visual Basic の中でも最新バージョンである.NET では、より効率的にプログラムを開発できるように機能が拡充されている。この Visual Basic を用いて収集するイベントの個数を指定し、データを収集した。

Friend class form1 ... 宣言文

- <Timer1_Tick>
 - ・CNAFの指定
 - ・初期値の代入、TextBoxへの書き込み
- <Button1_Click>
 - ・File名をTextBox9に入力
 - ・File名を読み込む
 - ・Fileを開く
 - ・入力された値を読み込む(初期値から変更のある場合)

Doループ iの初期化

- ・i = TotalEvent とし、iをDoループで1つずつ増やしていく
- ・アドレスクリア (CF= 9: clear module and LAM)
- ・LAMのクリア (CF= 10: clear LAM)



- ・データの読み込み (CF= 2: read registers and clears module and LAM)
- ・出力

FADCの読み出しループ

- Nrecはイベント1つにつき読み込んだ値
- ・Nrecは1つずつ増やす
- ・Nrec>32099ならばDoループを出る

→ 1シグナルで読み込める値の最大は32100
それより多い値を読み込むデータはおかしいのでCutを入れる。

- ・データの読み込み
- ・読み終わったから200個前までの分のみ印刷

- ・LAMのclear
- ・iを1ずつ増やしてループをまわす。
- ・もし、interapt<0ならばループ終了
- ・ファイルを閉じる

End Class

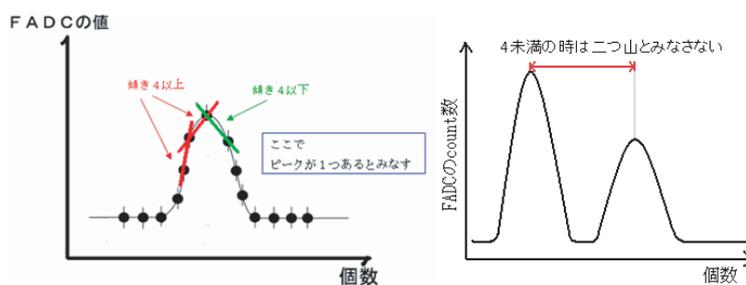
図 11: プログラミング

7 二つ山を探すプログラム

VisualBasic のプログラムで収集したデータを UNIX コンピュータに転送し、データ解析を行った。 μ 粒子が崩壊する場合は FADC の波形が二つ山になるので、この二つ山を探すプログラムを作成した。

7.1 ピークを見つける

FADC は 1event あたり 200 個の値を出して波形を構成する。まずこの各値を読み込んで 1 間隔毎の傾きを出す。この傾きで正 (4 以上) が 2 回以上続いた後に、負 (-4 以下) に変わった時点でピークがあるとみなす。そうすることで一瞬上がってすぐ下がるようなノイズをピークとしてカウントするのを防ぎ、ピークの数に正確に数えられる。このピーク数をカウントし、カウント数が 2 の時の event 番号と FADC の値を書き出すようなプログラムを作成した。ここでノイズを除くためにペDESTAL を設定した。また、二つ山を見つけた時、二つ山のピーク間が 4 未満では二つ山とみなさないというプログラムにしている。

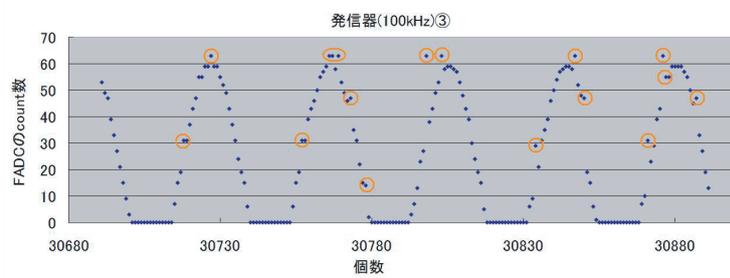


7.2 見つかった二つ山

見つかった二つ山をグラフで表すと 62、63count に飛んでいる点が多く見つかったので、その原因を探った。

7.2.1 飛んでいる点の原因を探る

発振器から 100kHz の信号を入れて、FADC に出力させると図 7.2.1 のようになる。各 count 数を図 12 のように 2 進数で表すことで、FADC のどのアンプが壊れているかを探った。



| count数 | 個数 |
|--------|----|
| 15 | 1 |
| 29 | 1 |
| 31 | 33 |
| 47 | 3 |
| 55 | 1 |
| 63 | 8 |

図 12: 各 count 数に対する個数

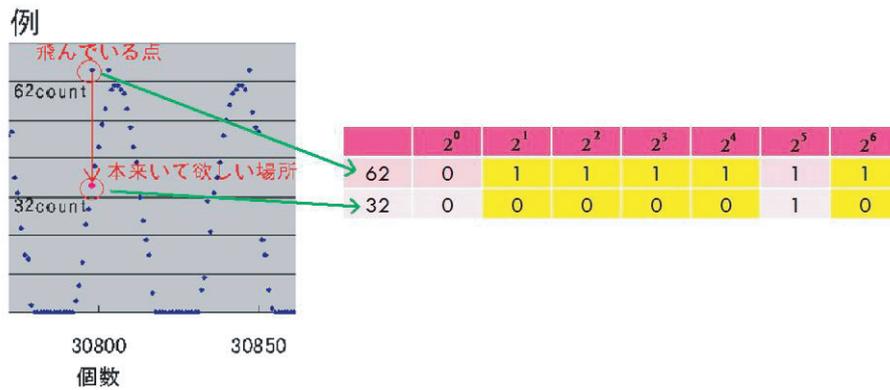


図 13: 2進数の表し方

飛んでいる点を2進数で表し、図13のような方法で壊れているアンプを探そうとしたが、原因は分からなかった。

7.2.2 FADCのチャンネル

FADCは2ch同時計測なので、今まで使用していたch0をch1に差し替えたことで飛ぶ点がほぼなくなった。しかしch0でかなり多くのデータをとっていたので、それを使用するために、飛んでいる点を見つけるようなプログラムを考えた。

7.2.3 外れた点の見つけ方

- 一つ目の方法

まず、以下のような式を考える。

$$\{data(i) - data(i - 1)\} \times \{data(i + 1) - data(i)\} = \text{負}$$

ある値と、その前後の差の積を取った時に負になれば、外れた点であると判断する場合。

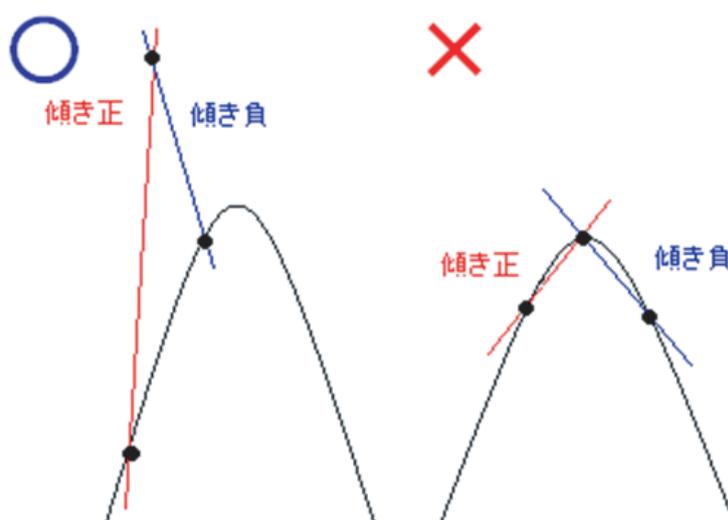


図 14: ある点の前後の傾きの積で判断する場合

この場合、図 14 の右側のようになっていれば、確かに前後で傾きが正、負と順に出てくるので、その積は負となる。

しかし左の図のように、ある値がちょうど山のピークにあたる場合でも、前後で傾きが正、負と順に出てきて、その積が負になってしまう。

従って、この方法で外れた点を判断するのをやめて別の方法を考えた。

● 二つ目の方法

初めに fly を以下のように定義する。

$$fly \equiv \left\{ data(i) - \frac{data(i+1) + data(i-1)}{2} \right\} \div data(i)$$

fly ≥ 0.3 ならば外れた点とみなす。この時、図 15 の左のように外れた点を見つけたら、その前後の点の平均値に置き換える。

$$data(i) = \frac{data(i+1) + data(i-1)}{2}$$

置き換えた点のエラーバーは 10 とする。その様子を表すのが図 15 の右側である。エラーバーを大きくすることで、Fit する時に実質その値を無視してくれる。

プログラミングは以下のようなものを追加している。

```
do 100 i=4,(ixmax-ixmin) fly=(fdat(i)-(fdat(i+1)+fdat(i-1))/2)/fdat(i) if(fly.ge.0.3) then print *,'fly=',fly,'i=',i,' ',fdat(i)=,fdat(i) fdat(i)=(fdat(i+1)+fdat(i-1))/2 edat(i)=10.0 print *,'new fdat(i)=',fdat(i) end if 100 continue
```

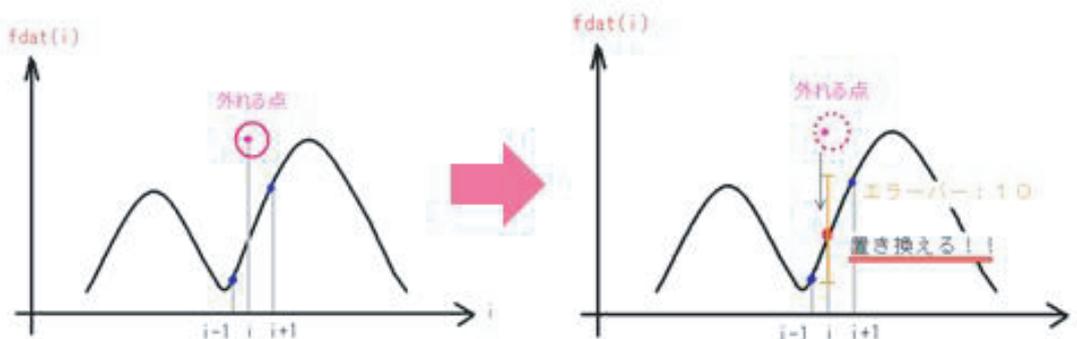
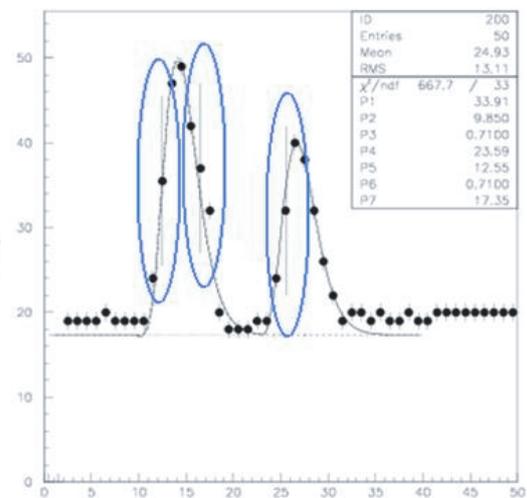
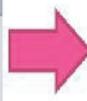
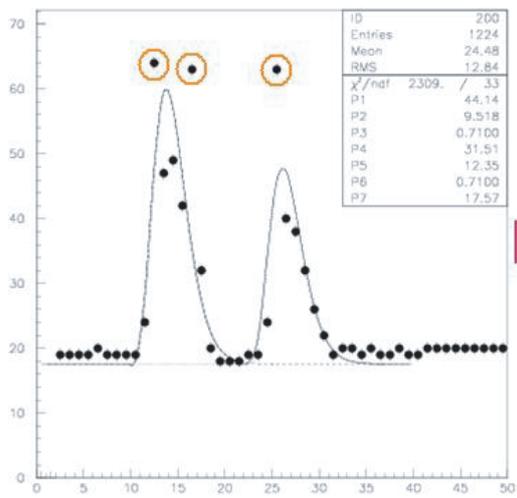


図 15: 外れた点を元に戻す様子

実際に、外れた点を元に戻した様子は下図のようになる。

左側の赤で囲んだ点が外れた点で、右側の青で囲んだ部分が平均値に置き換えて、エラーバーが 10 となっている様子である。



8 データ解析

8.1 全データ

| | |
|------|--------------|
| 今年度 | 296,870event |
| 一昨年度 | 356,087event |
| 合計 | 652,957event |

このうち、 μ 粒子の崩壊で得られる2つ山のeventを122events見いだした。

8.2 FADCのサンプリング周波数

図16に示す。

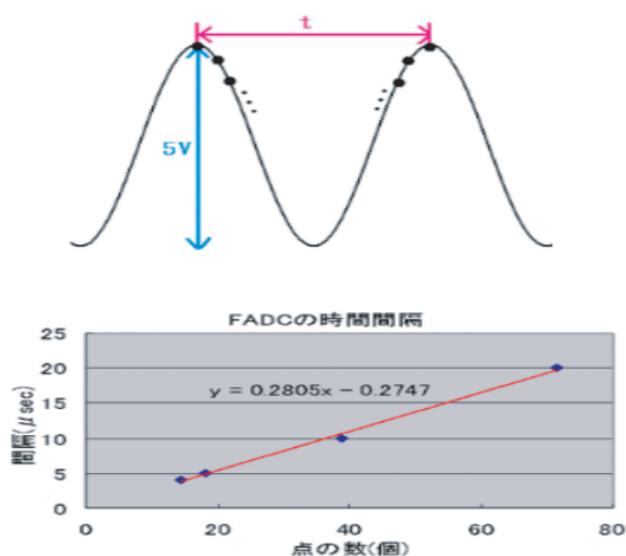


図16: FADCのサンプリング間隔

発振器からの信号を、 $t = 4, 5, 10, 20[\mu \text{ sec}]$ と順に変化させてFADCに入力し、10eventずつ測定する。こうしてFADCがどのような時間間隔でデータを収集しているのか(サンプリング周波数)が分かる。本実験では傾き $0.2805 \mu \text{ sec}$ なので、サンプリング周波数は281nsecと得られた。

8.3 μ 粒子の選別

(1) 寿命の式が

$$y = P_1 \exp\left\{\frac{-x}{P_3}\right\} \quad (20)$$

と表せる。

(20) 式の P_3 の値と寿命は対応している。この P_3 の値にサンプリング周波数である 281[nsec] を掛けることで寿命が算出出来る。

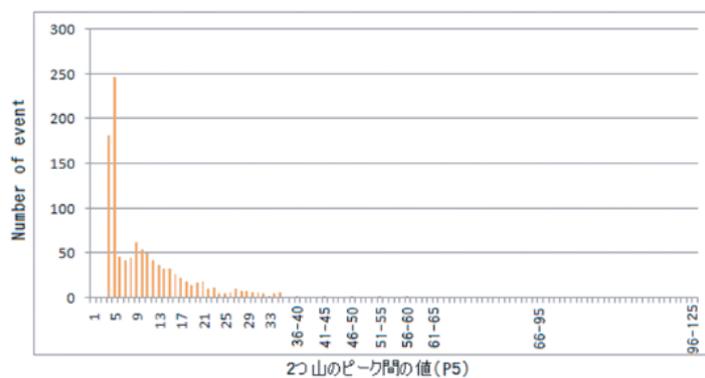


図 17: μ 粒子の event 選別

P5 のそれぞれの値ごとに見つかった 2 つ山を順に見ていく。

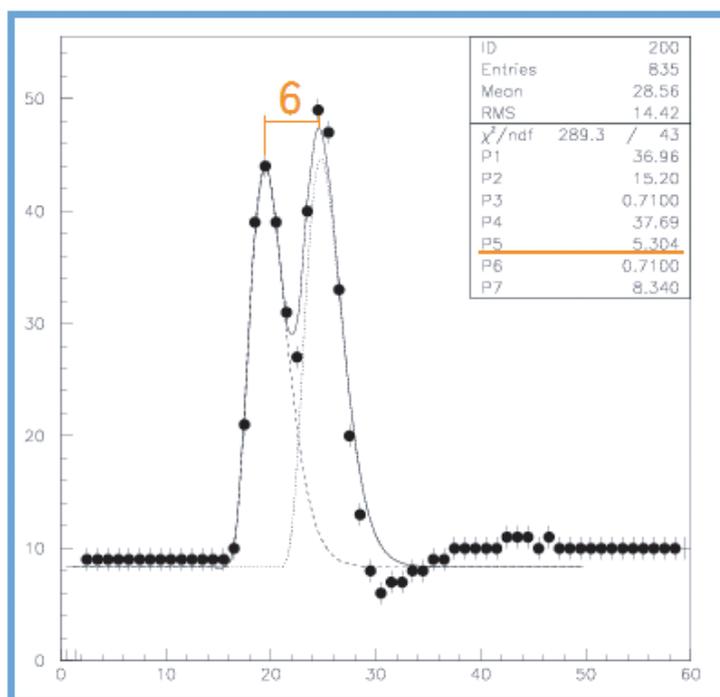


図 18: P5=6 のとき

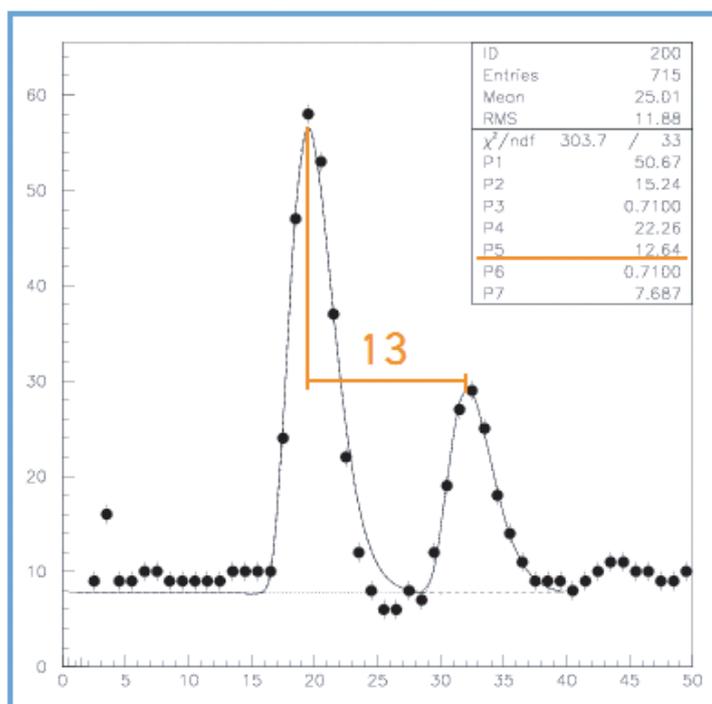


図 19: P5=13 のとき

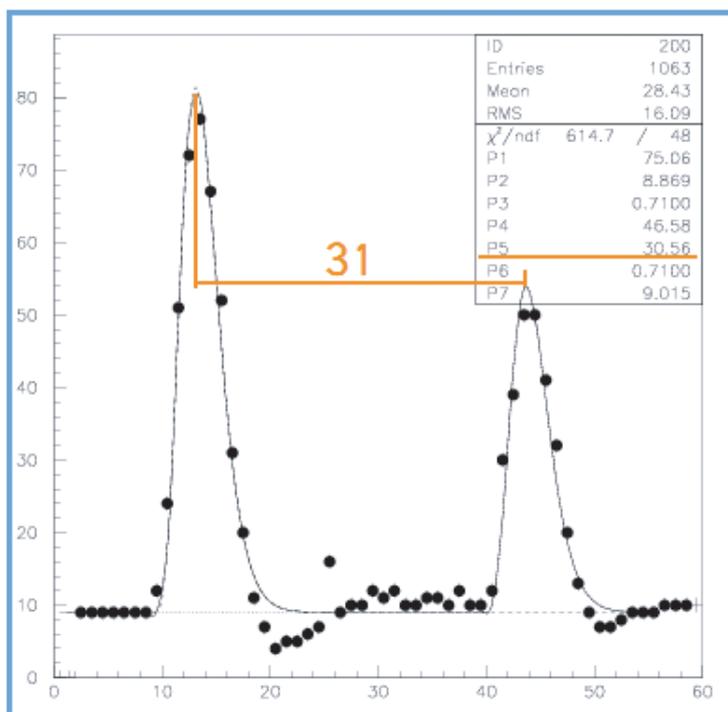


図 20: P5=31 のとき

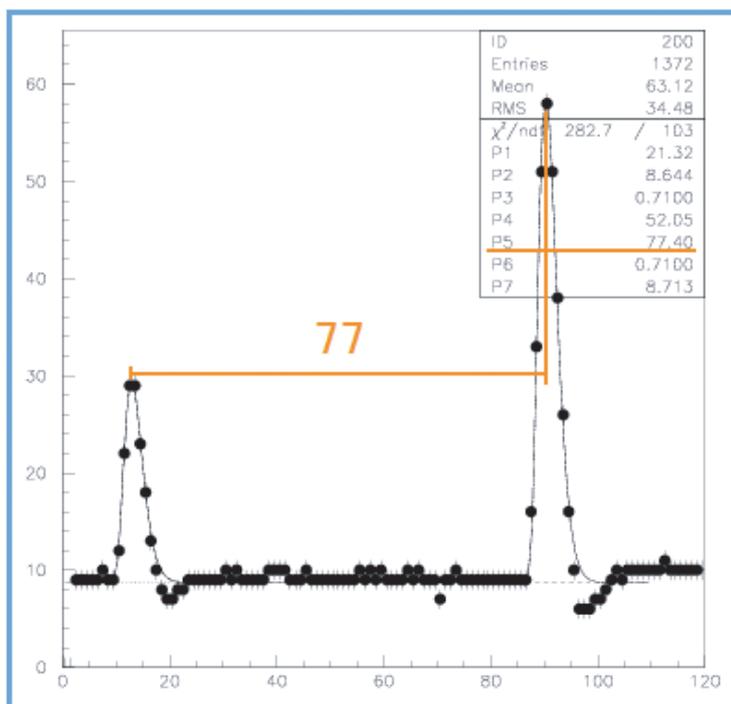


図 21: P5=77 のとき

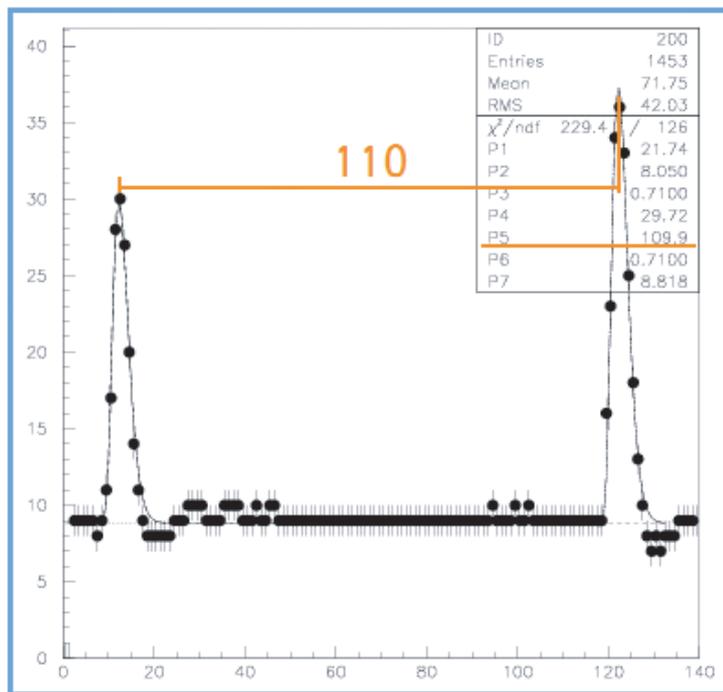


図 22: P5=110 のとき

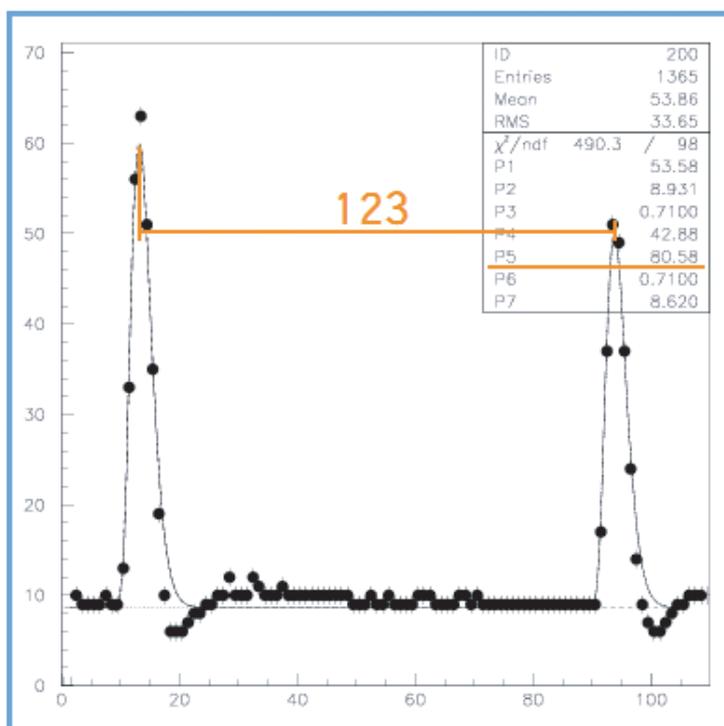


図 23: P5=123 のとき

(2) グラフを (20) 式で fit する。

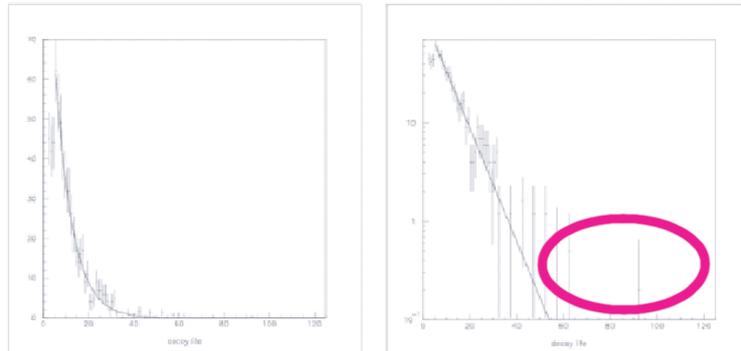


図 24: Fit の結果

ここで、log スケールのグラフで $P_5 = 60$ 以降では Fit には寄与していないと考えられる。そこで、Fit の範囲を $P_5 = 6 \sim 60$ にする。Fit の結果より、

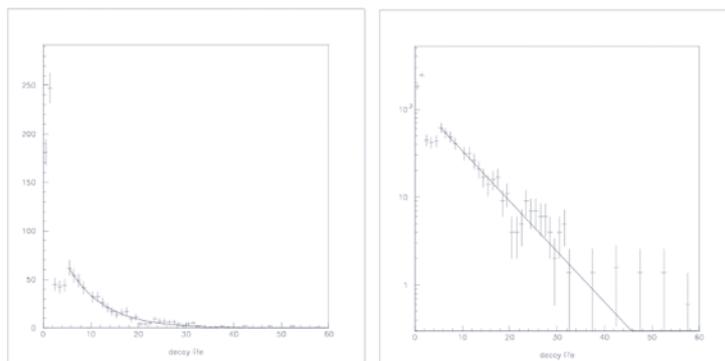


図 25: Fit の結果

- P1 ... 76.949 ± 48.572
- P2 ... 3.8005 ± 4.2691
- P3 ... 7.5427 ± 0.6607

寿命 τ は

$$\tau = P3 \times 246\text{nsec}$$

$$= 2119.5 \pm 185.66 \text{nsec}$$

$$\cong 2.12 \pm 0.19 \mu\text{sec}$$

Particle Data Book に記載されている μ 粒子の寿命は $2.19703 \pm 0.00004 \mu\text{sec}$ である。

9 考察

9.1 χ^2 検定

| 範囲 | χ^2/NDF | 寿命 |
|--------|--------------|-----------------|
| 6~25 | 0.69 | 1.96 ± 0.15 |
| 6~45 | 0.76 | 2.10 ± 0.19 |
| 6~65 | 0.74 | 2.12 ± 0.20 |
| 6~95 | 0.73 | 2.12 ± 0.19 |
| 6~125 | 0.73 | 2.12 ± 0.19 |
| 10~25 | 0.87 | 1.85 ± 0.19 |
| 10~35 | 0.93 | 2.10 ± 0.07 |
| 10~45 | 0.88 | 2.13 ± 0.07 |
| 10~65 | 0.85 | 2.17 ± 0.08 |
| 10~95 | 0.83 | 2.17 ± 0.08 |
| 10~125 | 0.83 | 2.17 ± 0.08 |

Fit の範囲を変えることで P3 の値が変わる。

どの程度関数が波形に Fit しているかをあらわすものが χ^2 と NDF である。 $\chi^2/NDF \cong 1$ のとき Fit がよくできているといえる。

今回の測定結果から μ 粒子の寿命は $\tau \cong 2.12 \pm 0.19[\mu \text{ sec}]$ (Fit に使った event 数は 694event)
精度を上げるには data 数を増やすことが考えられる。data 数が現在の 10 倍、100 倍となったことを想定してみる。

data 数が 10 倍 … 精度約 3 %

data 数が 10 倍 … 精度約 3 %

現在の data 収集システムは T1、T2 を通って CsI に入る μ 粒子の個数は 1 分間で約 25 個である。それに対して 1 分間でデータ処理できる個数は約 6 個である。

CAMAC での data の読み出しのスピードを上げる事が今後の課題である。

今回の実験では FADC の ch0 と ch1 の両方の結果を用いて寿命を算出した。ch0 のみ、ch1 のみを解析し、その両方で同等の結果が得られることを確かめてから

FADC の