

# 「ミュー粒子の寿命測定

～フラッシュADCを用いて～」

2005 年度

奈良女子大学 物理科学科 4 回生

生田 繭子, 大重絵梨子

# 目次

## 第1章 はじめに

- 1.1 実験の目的
- 1.2 本論文の構成

## 第2章 放射線計測の原理

- 2.1 電離と発光
- 2.2 電離損失
- 2.3 制動放射

## 第3章 宇宙線

- 3.1 宇宙線とは
- 3.2 Muonについて

## 第4章 Muonの寿命の測定原理

- 4.1 寿命の算出

## 第5章 セットアップ

- 5.1 エレクトロニクスのセットアップ
- 5.2 シンチレーションカウンターのセットアップ
- 5.3 エレクトロニクスの設定

## 第6章 データ収集

- 6.1 ADCとFADCについて
- 6.2 Qモード、Vモードでみる $\mu$ 粒子の崩壊
- 6.3 Qモード、Vモードを使用したイベントの選別方法

## 第7章 Fitについて

- 7.1 一つ山のFit
- 7.2 二つ山のFit

## 第8章 データ解析

- 8.1 全データ
- 8.2  $\mu$ 粒子の寿命のイベント選別
- 8.3  $p_5$ の値ごとに見る代表的な波形
- 8.4  $\mu$ 粒子寿命の算出

## 第9章 まとめと課題

- 9.1 まとめと課題

## 1 . 目的

宇宙から降り注ぐ宇宙線は、何度か変化した後ミュー粒子となる。そのミュー粒子の寿命を測定する事により、高エネルギー実験の基礎的な技術の習得を目指す。

## 2 . 概要

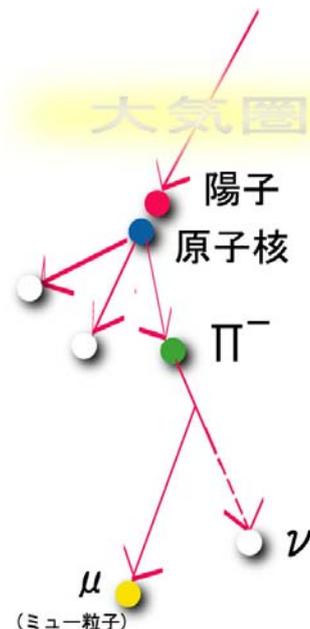
宇宙からは無数の原子核や素粒子が降ってきている。それぞれの粒子は寿命をもっている。今回の実験ではミュー粒子がシンチレーションカウンターに入り崩壊した際のエネルギースペクトルを測定、その結果より $\mu$ (ミュー)粒子についての寿命を測定する。寿命の測定にあたってはシンチレーターと光電子増倍管、FADCを使用。測定された電気信号を増幅し、AD変換の上データ処理を行なう。

## 3 . 宇宙線について

宇宙線とは宇宙空間に存在する高エネルギー - の放射線のことである。宇宙線は大気圏に突入すると色々な粒子に変化する。その粒子は高いエネルギーをもっているため、我々の身体や、建物等をつきぬけていくので屋内での観測が可能である。宇宙線が大気圏に突入した際、大気中に含まれる窒素、酸素などの原子核と衝突し、中間子などの粒子を発生させたりする。これらの発生した粒子は二次宇宙線と呼ばれ、この二次粒子は原子核と相互作用し新たな二次粒子が生成される。こうして変化しながら粒子は地上にまで到達するが、その殆どはミュー粒子である。

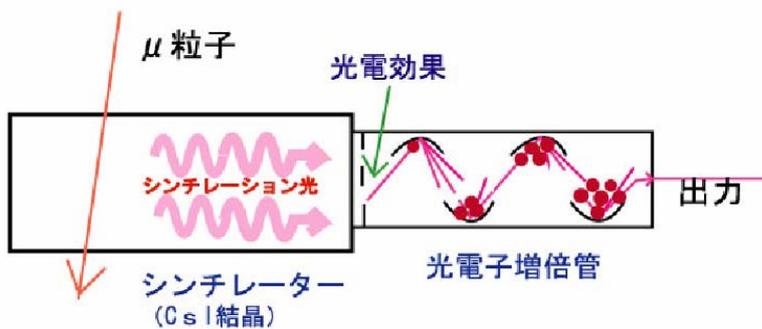
## 4 . ミュー ( $\mu$ ) 粒子

粒子は一定の時間を置いていろいろな粒子に変化していく。その要因などは様々であるが、本実験ではミュー粒子について観測する。宇宙から降ってきた陽子は大気中の原子核と「強い相互作用」をし、中間子を生成する。中間子はさらに、ミュー粒子と $\nu$ に変化する。



## 5 . 計測原理

放射線を計測するには、五感では感じることはできないため、粒子の動きを電気的信号にして計測する必要が生じる。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り電子を発生させ、光電子増倍管で増幅する。ミュー粒子の寿命計算については、一般には放射性破壊の指数関数法則を用いることによりミュー粒子の寿命を求める事ができる。

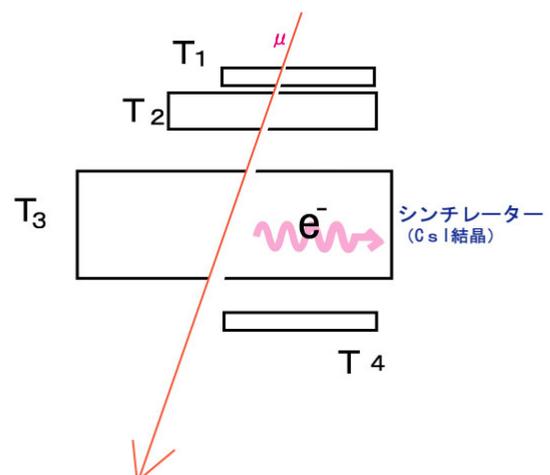


**シンチレーター**：CsI (ヨウ化セシウム) 結晶でできており、内部にミュー粒子が入るとシンチレーション光が発生する。ミュー粒子そのものを検出するのは難しいので、シンチレーターにより光エネルギーに転換する。

**光電子増倍管**：入ってきた光電子を増やし、電気信号にする、役目をする。光電子増倍管は、光子を電子に変換する際にとっても重要な役割を果たす。

## 6 . セットアップ

実際のシンチレーションカウンターは図のように配置して実験する。T1、T2、T4はプラスチックシンチレーターを使用する。T3には色々な角度からミュー粒子が入射してくるが、一般的にはT3内で静止したかどうかは判らない。T3にT1、T2、T3のhitの条件を加える事により、T3で静止した粒子を効果的に計測することができる。



## 7 . F A D C について

A D変換器のひとつで、入力されたアナログ信号をデジタル信号にして出力する。F A D Cは通常のA D Cに比べ処理速度が速いので時系列データを取り込むことが出来る。このことにより出力されるデータの細部まで観測することができる。

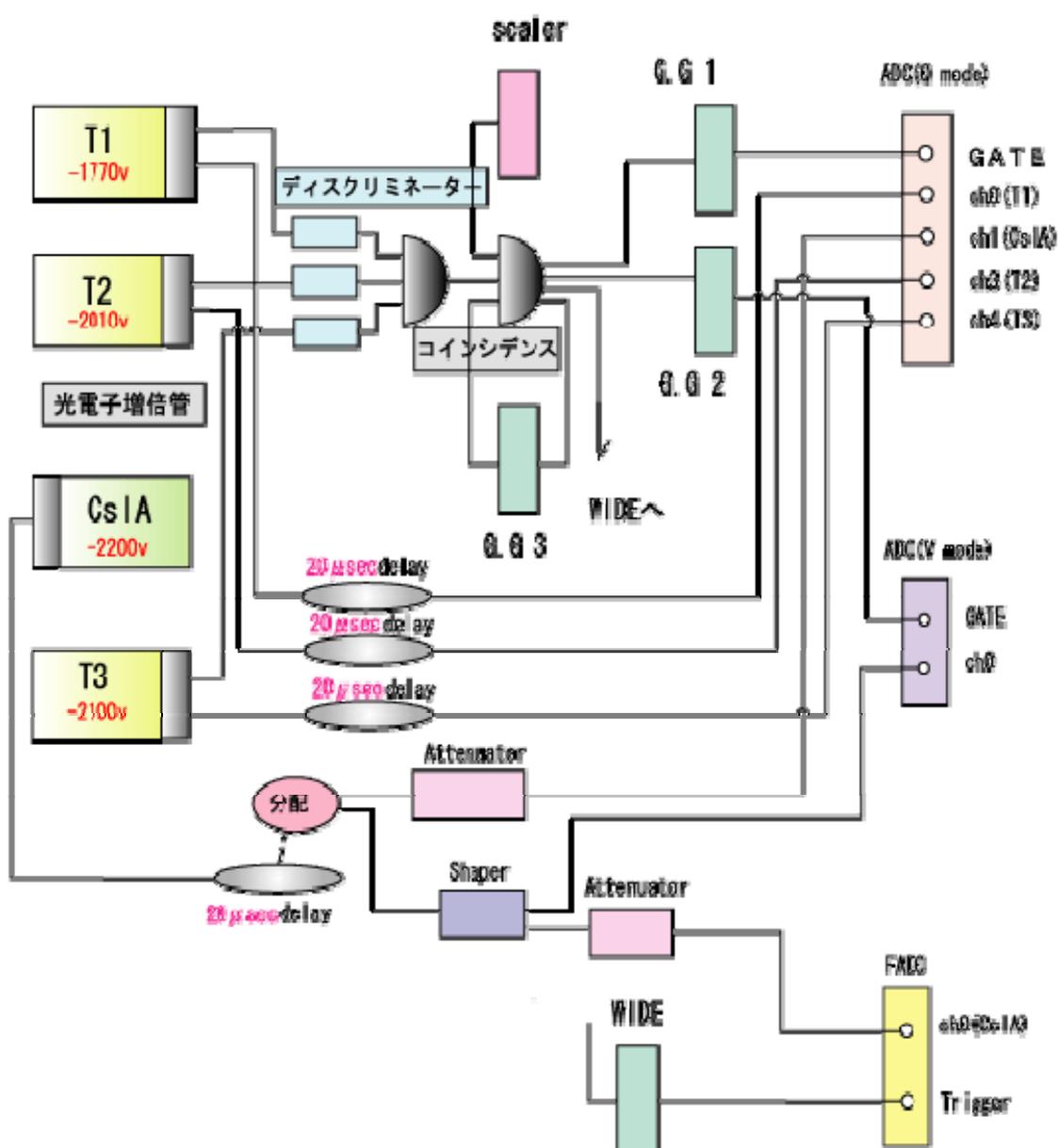
## 8 . 現在の進行状況

現在はシンチレーションカウンターのセットアップ段階で結果は出ていないが、今後は、データ収集プログラムは Visual Basic で書き、随時エレクトロニクスの設定を行い計測していく予定。

## 第5章 セットアップ

### 5.1 エレクトロニクスセットアップ

配線は図のように行った。主な装置については簡単に表にあらわした。それぞれの詳しい説明については次項で行う。



### 主な使用器具についての大まかな説明

T 1、T 2、T 3、C s I	シンチレーションカウンターのこと。入射粒子のエネルギーを光に変える
光電子増倍管	シンチレーション光を電気信号に変え増幅する
ディスクリミネーター	設定した値より大きいシグナルがきたとき、決められたパルスを出す
コインシデンス	T1T2 が同時に Hit した時に信号を出す。
G.G (ゲートジェネレーター)	入力された信号のパルス幅を変えたり、パルスをディレイさせたりする
シェイパー	波形整形
アテニュエーター	入力信号を減衰する

#### シンチレーター

- ・プラスチックシンチレーター(T1,T2, T3) : 反応が不安定なのでエネルギーの測定などには不向き
- ・C s Iシンチレーター : プラスチックシンチレーターに比べエネルギー分解能が高い

#### 光電子増倍管

光電効果を利用した装置。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に衝突し、ダイノードがいくつかの電子をたたきだす。それを繰り返すことによって電子を増倍する。この電子が最終的にアノードに集まり電気信号として出力される。

#### ディスクリミネーター (discriminator)

設定した threshold (しきい値) より大きなシグナルが入ってきたときに、決められた形のパルスを出す。パルスは 0.7V、140nsec と NIM 規格で定められている。

#### コインシデンス (coincidence)

今回はトリガー T1T2 から同時に信号が来たときのみパルスを出すように設定した。今回は AND 回路で設定したが、他にも NOT、OR 等設定できる

### G.G (ゲートジェネレーター)

入力された信号のパルス幅を変えたり、パルスをディレイさせたりする

### シェイパー

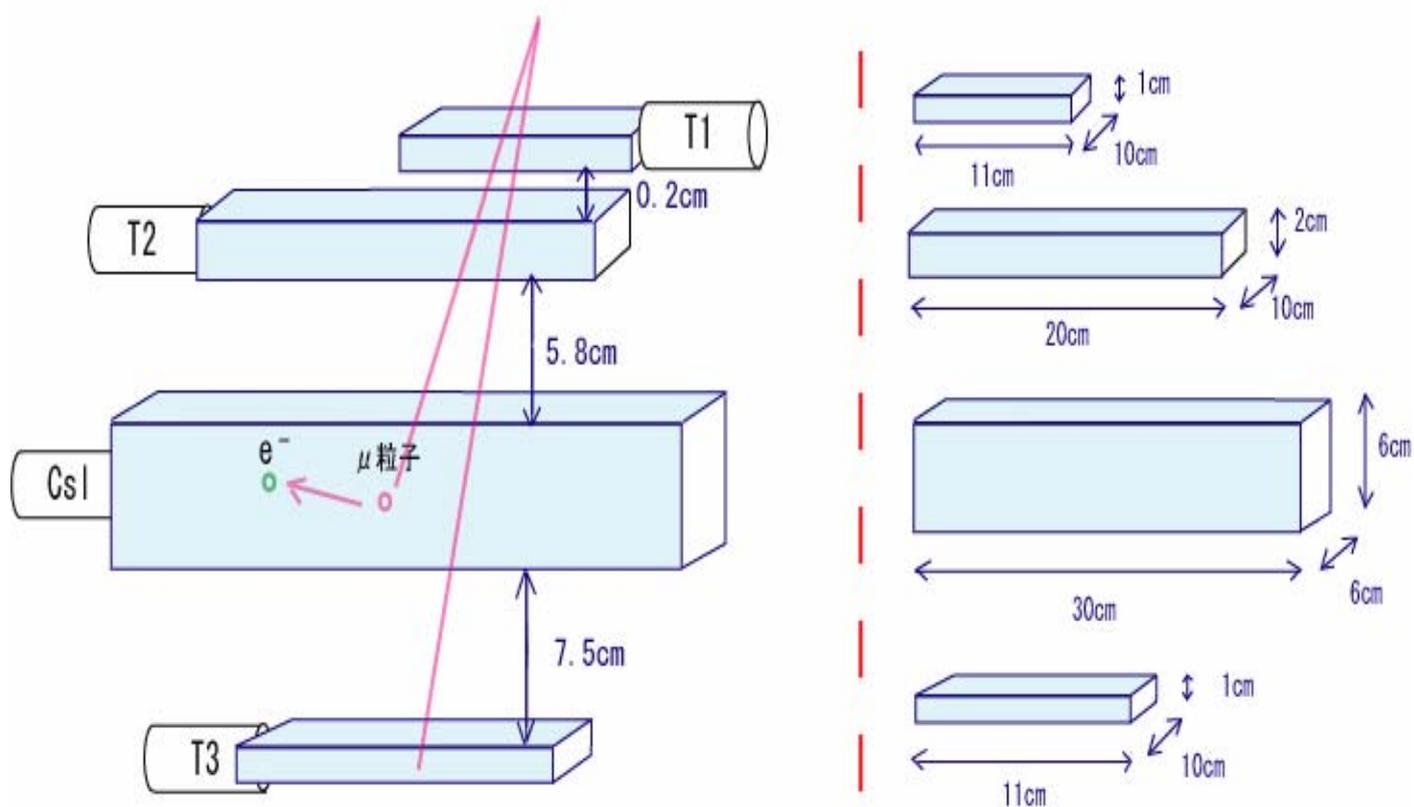
波形整形をするものでFADCが読み込みやすいように立ち上がり立下りを長くさせる。

### アテニュエーター

入力信号を減衰する

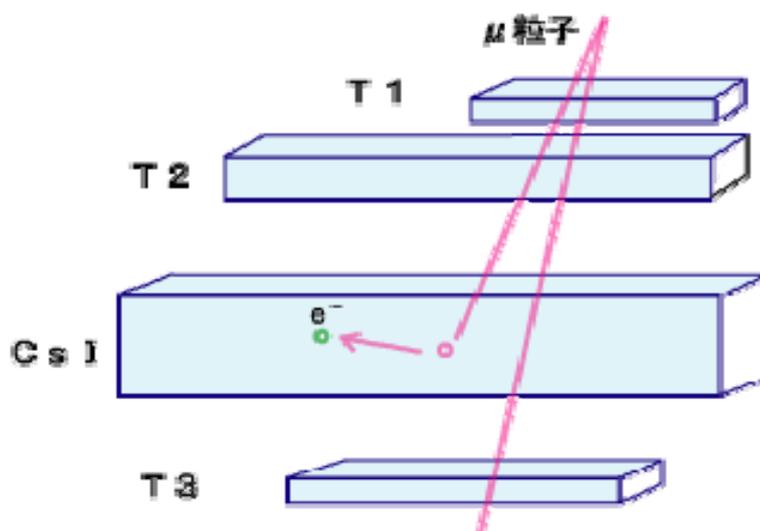
## 5.2 シンチレーションカウンターのセットアップ

本実験では図のようにプラスチックシンチレーター (T1T2T3) と CsI シンチレーターを設置し実験を行った。(T1T2T3 はトリガーとして使用する)



### トリガーによる反応の選別

今回の実験ではトリガーを T1T2 とし、信号を絞ることとする。これは、ミュオンはあらゆる方向から CsI に入射するため、どの信号がミュオンの崩壊の信号が特定できないためである。T1T2 に HIT し、かつ T3 を通過しない粒子が崩壊したミュオンである可能性が高い。トリガーは必要な信号のみを取り出す役目をする。



### シンチレーター

粒子が入射すると入射したエネルギーに応じた発光をする。これをシンチレーター光と呼ぶ。シンチレーター光はかすかなものなのでそのままでは測定できないので、光電子増倍管を通して増幅することにより測定する。

### 5.3 エレクトロニクスの設定

HV、Threshold、ペDESTALの設定はT1, T2、T3、CsIそれぞれのヒストグラムを見て設定する。

	HV (v)	Threshold (mv)	ペDESTAL (ADC count)
T1	-1770	200	36
T2	-2010	400	17
T3	-2100	200	21
CsI	-2200		51

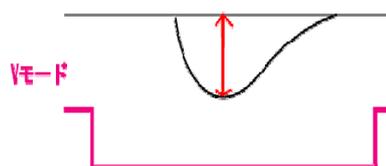
## 第6章 データ収集

### 6.1 ADCとFADCについて（Qモード、Vモード、FADC）

CsIシンチレータ内で崩壊した $\mu$ 粒子は、Qモード、Vモード、FADC、で数値化して解析を行う。

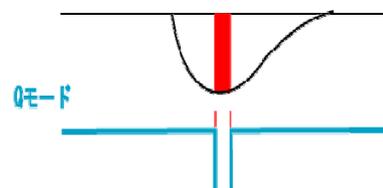
#### Vモード（ピークホールド型ADC）

Gateパルス内の信号の中で、最も大きい電圧の値を測定できるモード。



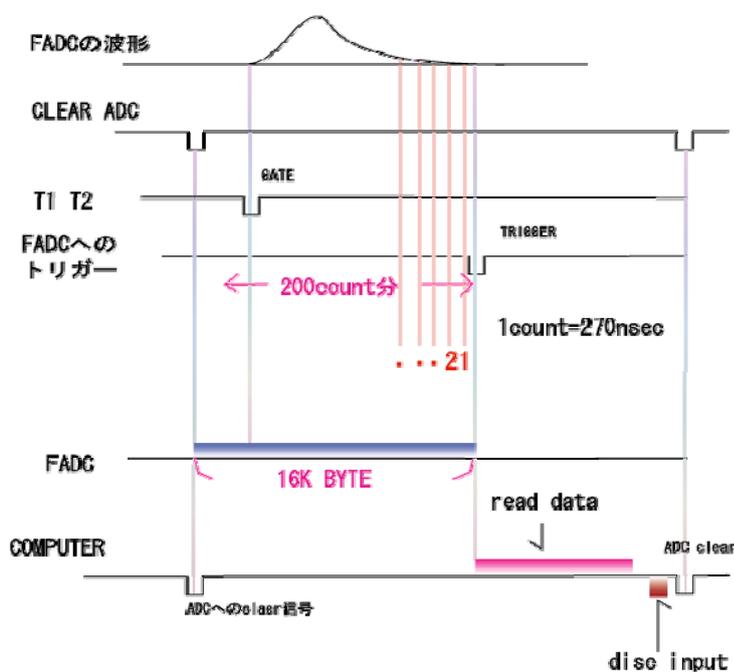
#### Qモード（電荷積分型ADC）

Gateパルス内の電圧の信号を時間積分するモード。



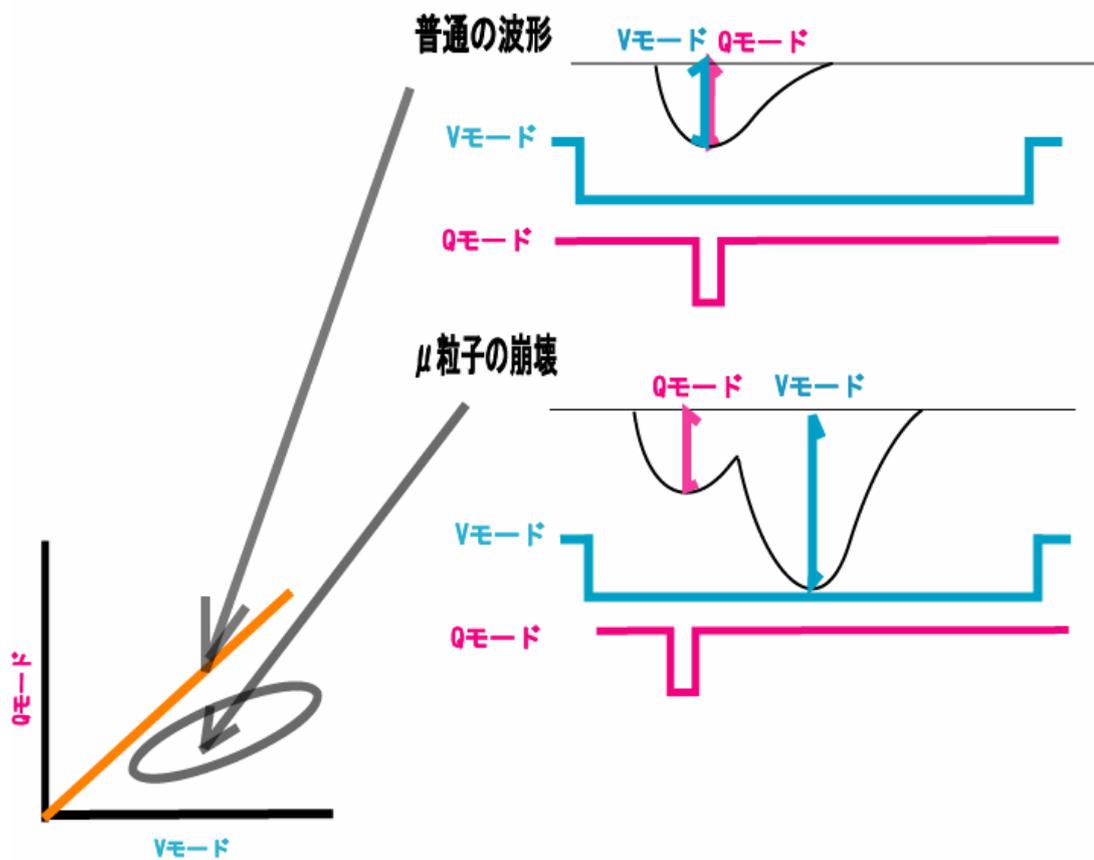
#### FADC（STOPモードを使用）

FADCは時間ごとに波形を測定する。今回の実験では、1プロットを一番小さい値である、270nsecに設定した。波形の終わったところからさかのぼり、後ろから270nsecごとにシグナルの高さをプロットしていく。FADCにはSTARTモードとSTOPモードがあり、今回はSTOPモードを使用した。

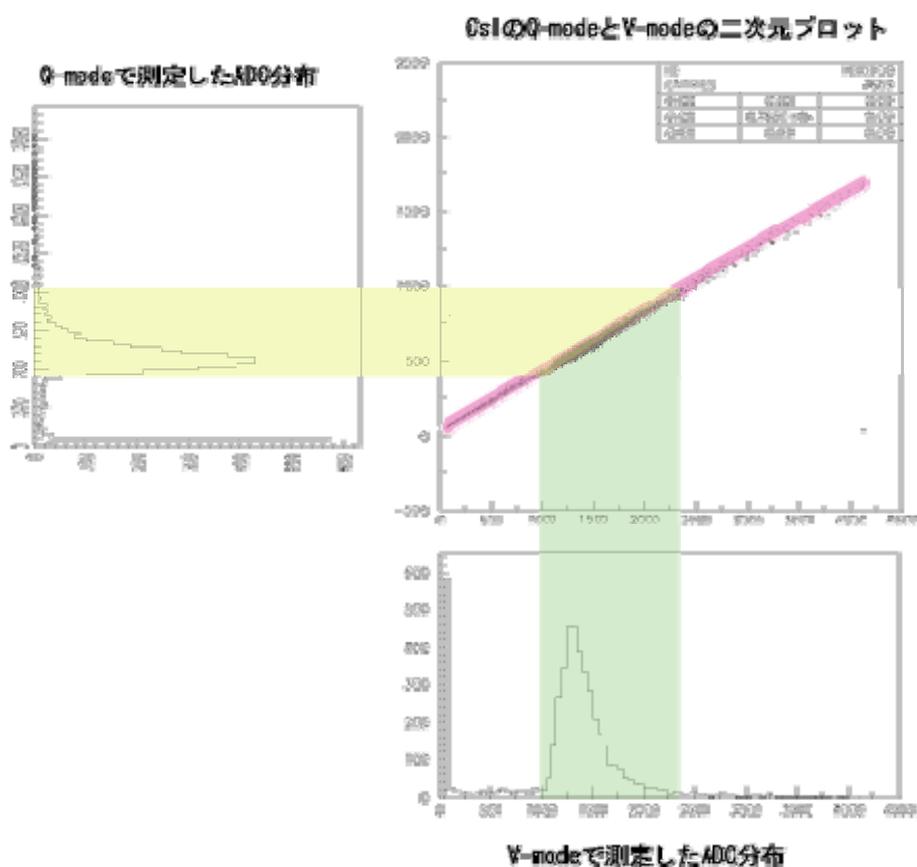


## 6.2 Qモード、Vモードで図る $\mu$ 粒子の崩壊

普通に $\mu$ 粒子が通りすぎただけの時のエネルギー損失はQモード、Vモードで二次元プロットすると比例関係になる。これは、 $\mu$ 粒子がCsI内を単に通過しただけのときは一つ山になるのでVモードQモードで同じ波形を測定することになるが、 $\mu$ 粒子の崩壊の場合は二つ山になるのでQモード、Vモード比例関係からはずれることになる。には逆にこの比例関係から外れた点は $\mu$ 粒子の崩壊の可能性がある。



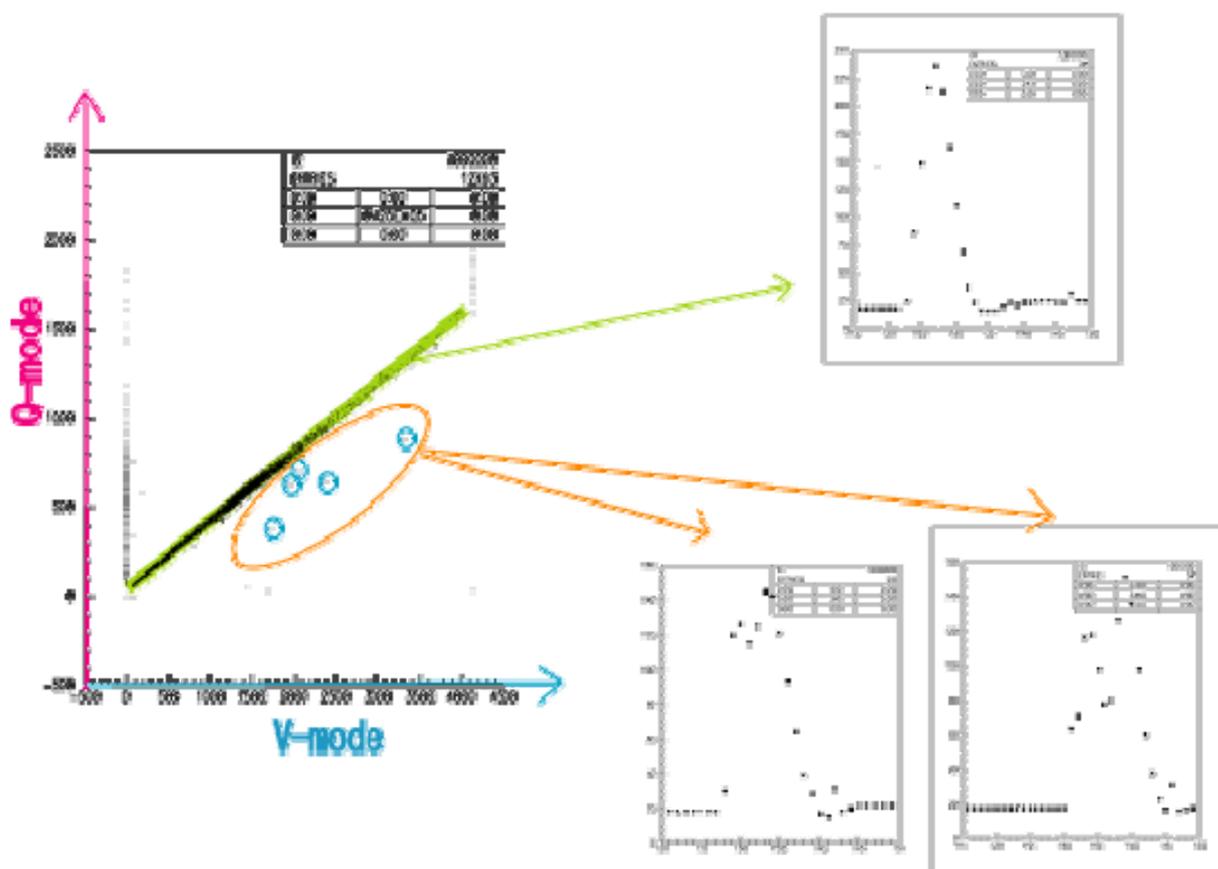
T1, T2, T3のトリガーをONにして測定したときの  
QモードとVモードの二次元プロットの様子



Q-mode と V-mode の ADC 分布は比例している。

### 6.3 QモードVモードを使ったイベントの選別法

トリガーT1,T2 を on にし、T3 を off にして測定する。縦軸を Q モード、横軸を V モードとしたとき、 $\mu$  粒子の波形ではない一つ山の波形であれば比例関係になるが、 $\mu$  粒子の崩壊の場合二つ山になるので、この比例から外れるはずである。つまり、この比例関係から外れたイベントが  $\mu$  粒子の崩壊の反応の可能性が高い。比例関係から外れたイベントについて一つずつ調べていく。



## 第7章 Fitについて

### 7.1 一つ山のFITについて

CsI シンチレーター中を崩壊せずに通過する  $\mu$  粒子の FADC の波形を FIT させる関数

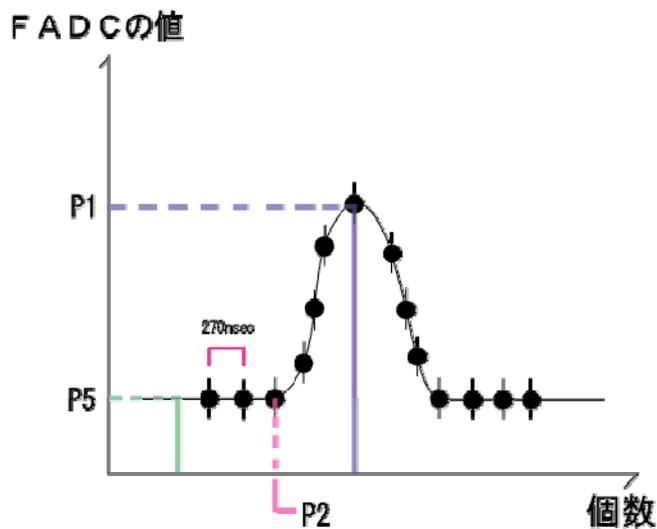
$$f(x) = P1 \frac{\left(\frac{x - P2}{P3}\right)^n}{(n-1)!} \exp\left(-\frac{x-P2}{P3}\right) + P5$$

P1 : 高さ

P2 : はじまりの点

P3 :  $n \times P3 \times 270\text{nsec}$  = 立ち上がりの時間  
波形の形を決める値

P5 : ペDESTALの値



左図の式で表される。

このとき、どの程度関数が波形に FIT しているかを表すのに必要な値が  $\chi^2$  と NDF である。  
この二つの値が n の値を決めるのに必要となる。

・  $\chi^2$  について

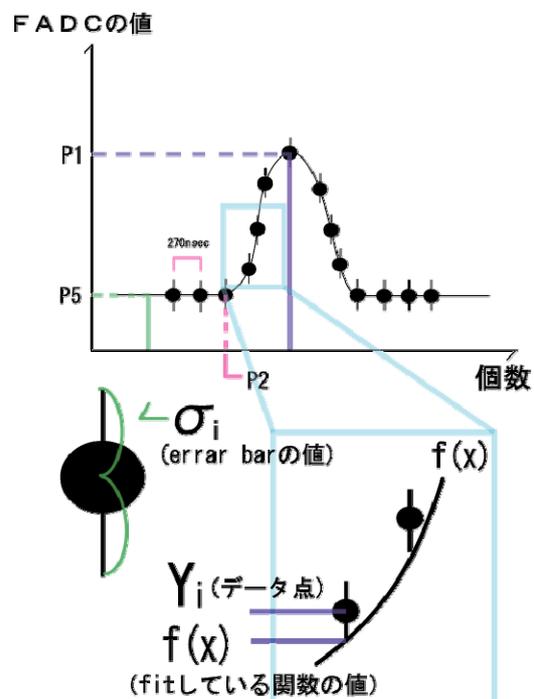
$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(Y_i - f(x))^2}{\sigma_i^2}$$

で表される。

$Y_i$  …… FADC の値

$f(x)$  …… FIT している関数の値

$i$  …… エラーバーの値 (今回は 4 に設定)



$Y_i$  と  $f(x)$  の差を二乗したものを  $\sigma^2$  で割ったものを fit した点の数だけ足し合わせたものである。

・ NDF について

$$\text{NDF} = N - N_{\text{parameter}}$$

(点の数) (パラメーターの数) で表される。

$N$ ・・・FIT している Data の数

$N_{\text{parameter}}$ ・・・FIT する関数に使われているパラメーターの数 (今回は  $P_1, P_2, P_3, P_5$  なので 4)

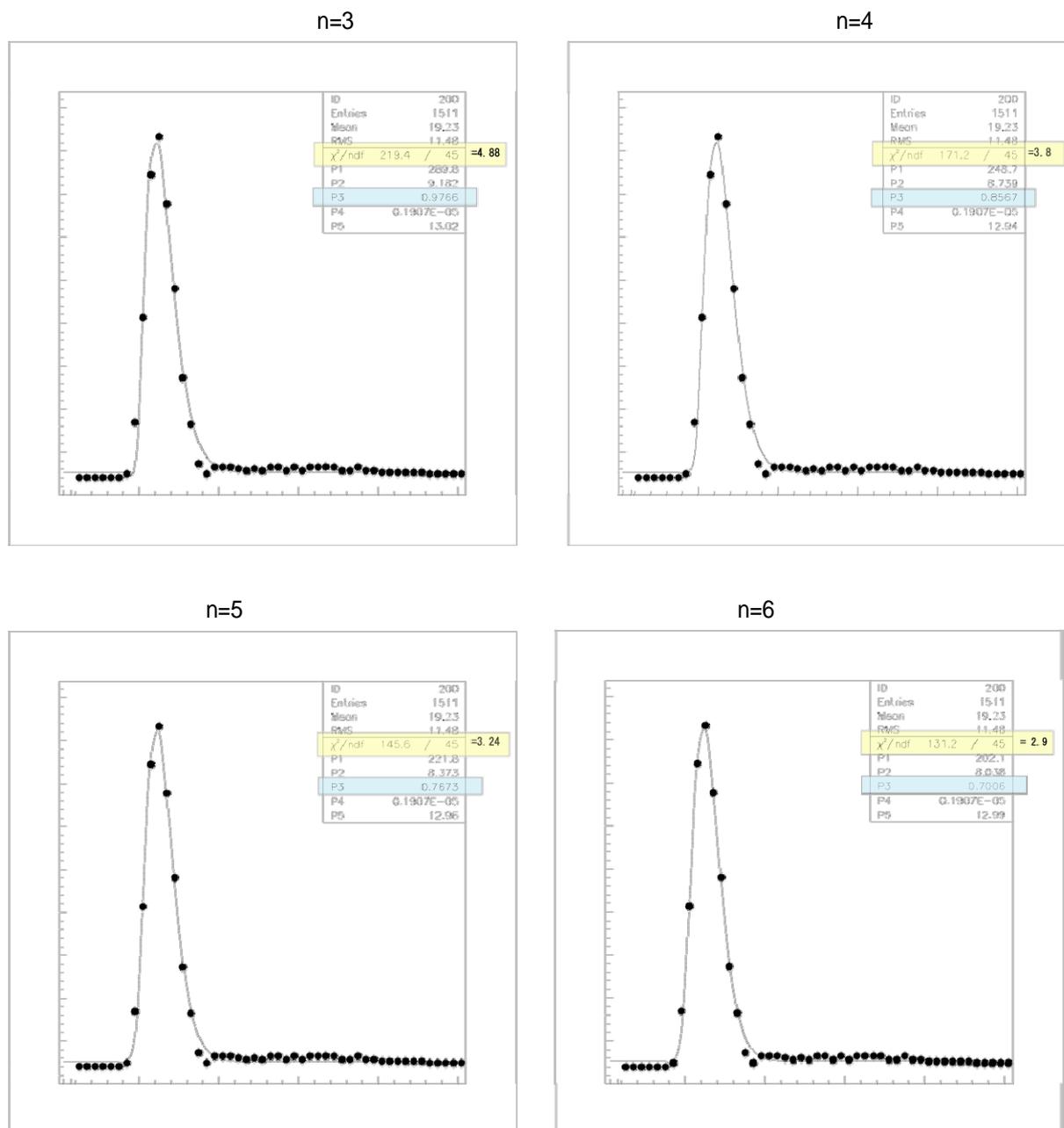
・  $\chi^2$  / NDF について

$\frac{\chi^2}{\text{NDF}} \approx 1$  のとき FIT がよくできているといえる。

ここで、 $n=3, 4, 5, 6$  を代入して、それぞれの  $\chi^2 / \text{NDF}$  の値を比べ、1 に近いときの  $n$  の値に決定する。

・  $n$  の値の決定

1月27日に T1,T2,T3 のトリガーを ON にして測定したデータの event 2 で試してみた。



$n=3,4,5,6$  をそれぞれ代入して  $\chi^2 / \text{NDF}$  の値を比較した結果、 $n=6$  の値が 1 に近いので、 $n=6$  に決定。また、このときの一般的な P3 の値は 0.7 となる

## 7.2 二つ山のFITについて

CsI シンチレーター中で崩壊した  $\mu$  粒子の FADC の波形を FIT させる関数(ひとつ山 FIT の関数と二つ足し合わせたもの)

$$f(x) = P1 \frac{\left(\frac{x - P2}{P3}\right)^6 \exp\left(-\frac{x-P2}{P3}\right)}{(5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2)!} + P4 \frac{\left(\frac{x - P'5}{P6}\right)^6 \exp\left(-\frac{x-P'5}{P6}\right)}{(5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2)!} + P7$$

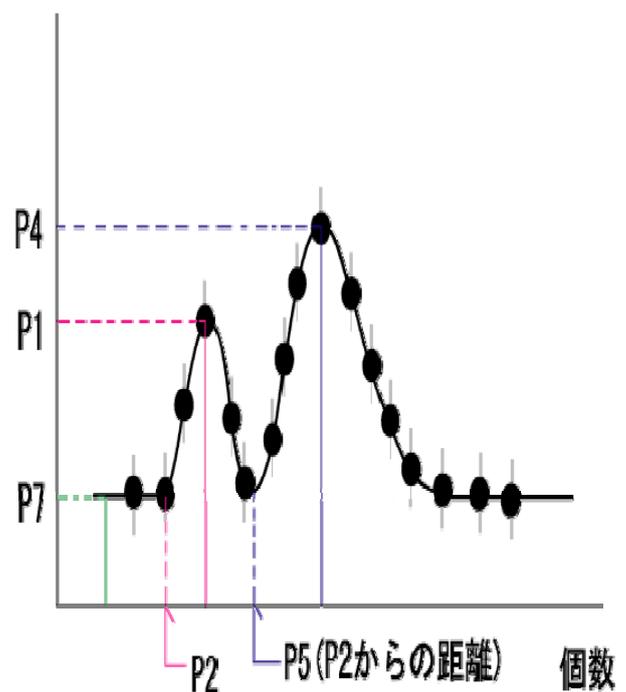
n=6を代入

$\mu$  粒子の式  
 P1 : 高さ  
 P2 : はじまりの点  
 P3 : 波形の形を決める値

電子の式  
 P4 : 高さ  
 P'5 : はじまりの点  
 P'5 = P2 + P5 (P5はP2からの距離)  
 P6 : 波形の形を決める値

P7 : ペDESTALの値

FADCの値

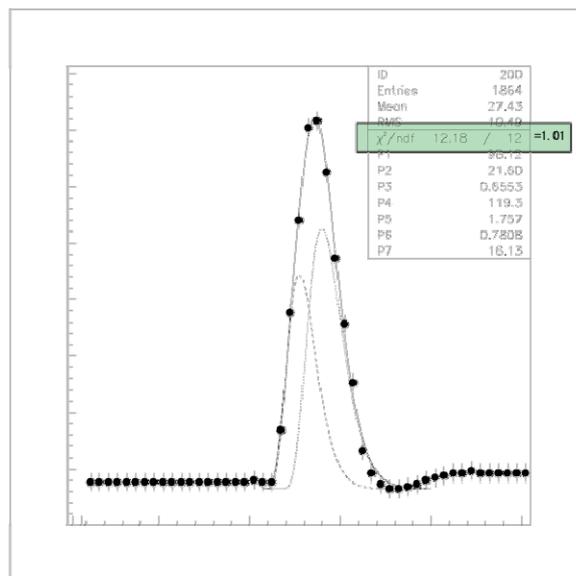
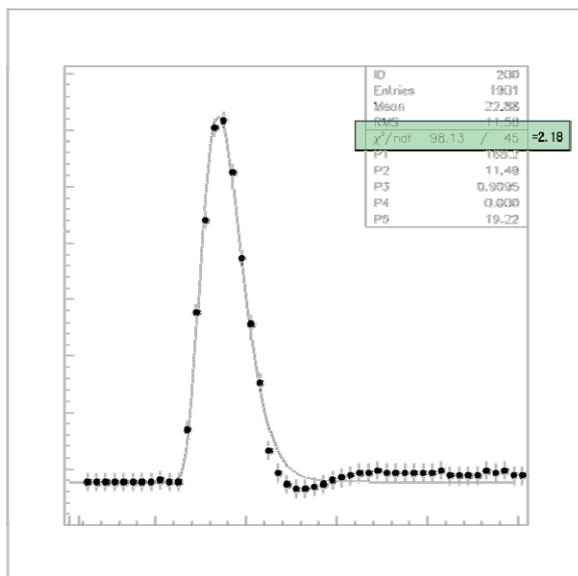


プログラム中では、P3=0.71、P6=0.79としてfixさせた。

- 比例関係から外れた点で、目で見てもひとつ山にしか見えない波形についての選別

ひとつ山の fit 関数と二つ山の fit 関数で fit したときの  $\chi^2 / \text{NDF}$  を値を見比べて、二つ山の方が小さい値の場合、その波形は  $\mu$  粒子の崩壊であるとみなす。

例：0228ev1598 について



この場合、0228ev1598 は  $\mu$  粒子の崩壊の波形とみなす。

## 第8章 データ解析

### 8.1 全データ (221046 イベント/428 時間)

イベント総数	221046 イベント
QモードVモードの比例関係から外れていたイベント	73 イベント
$\mu$ 粒子の崩壊と思われる反応	52 イベント

ミュー粒子の崩壊と思われるイベント: QモードVモードの二次元プロットからずれていた点について、一つ山の関数でFITのほうが、CHISQUARE/NDFの値がいい場合のイベントは省いたイベント。つまり、 $\mu$  粒子の崩壊ではないと思われるイベントを除いた数。

52 イベントについてはP5の値を調べることで寿命を出す。

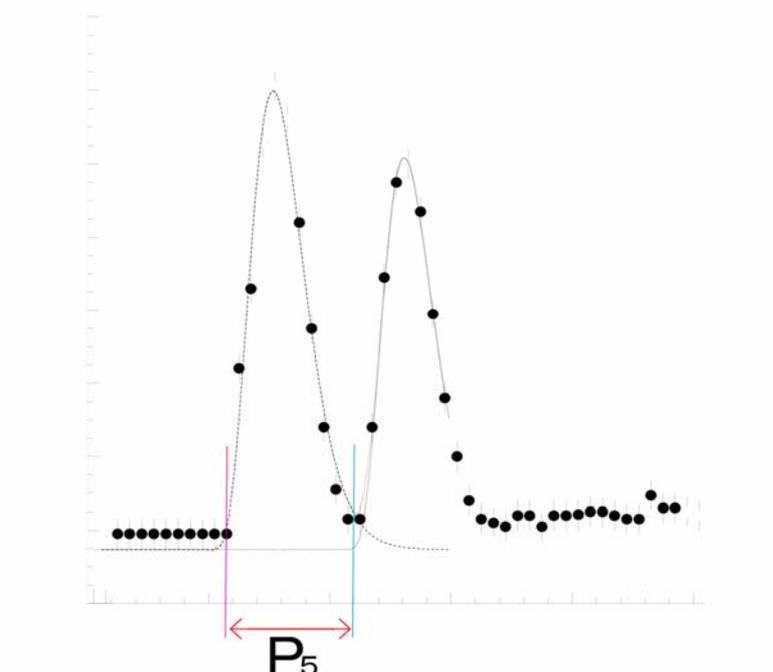
この寿命は

$$N = N_0 e^{-t/\tau}$$

t: 時間

$\tau$ :  $\mu$  の寿命

という式に従って崩壊するのでP5の値をグラフにするとこの式の形のグラフになることが予想される



1 カウントは270nsecなので

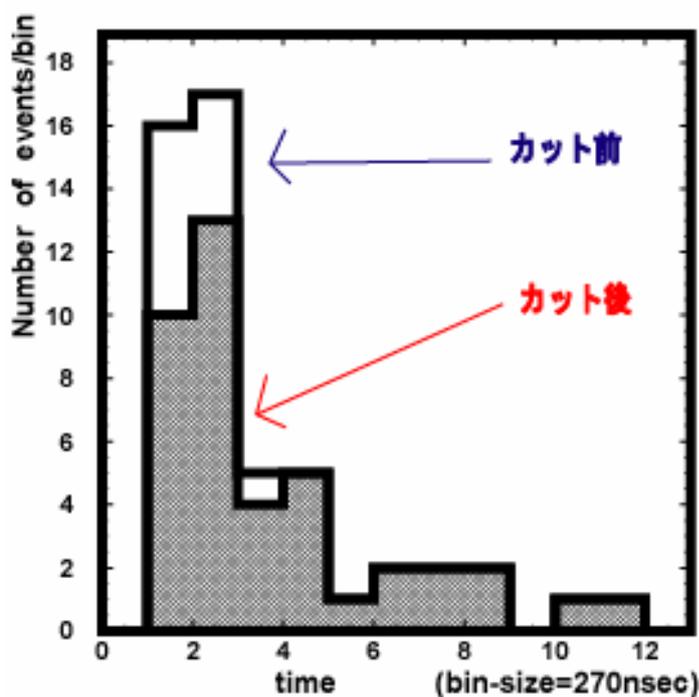
$5 \times 270\text{nsec} = \text{そのイベントの}$   
 $\mu$  粒子の崩壊時刻

(一般的に  $\mu$  粒子の寿命は式中の  $\tau$  のこと)

## 8.2 $\mu$ 粒子の寿命イベントの選別

Fit して出した P 5 の値をヒストグラムにした。縦軸が bin 数、横軸が P 5 の値 (時間) 普通の一つ山の波形なのか、 $\mu$  粒子の崩壊が早すぎて 1 つの山に見えるのか見た目では判別できなのでカットの条件を加える事により判断した。

一つ山の波形なのか、二つ山の波形であるが、 $\mu$  粒子の崩壊が早すぎて 1 つに見えるのか、見た目では判断できないような波形がある。その場合は 1 つ山用の関数で F I T した値と 2 山用の関数で F I T した値の C H I S Q U A R E / N D F を比べ、どちらがより F I T しているかによって、どちらの波形かを判別する。特に今回はカットの条件に - 1 を入れることにより 1 つ山ではなく確実に 2 つ山であることを条件とすることができた。



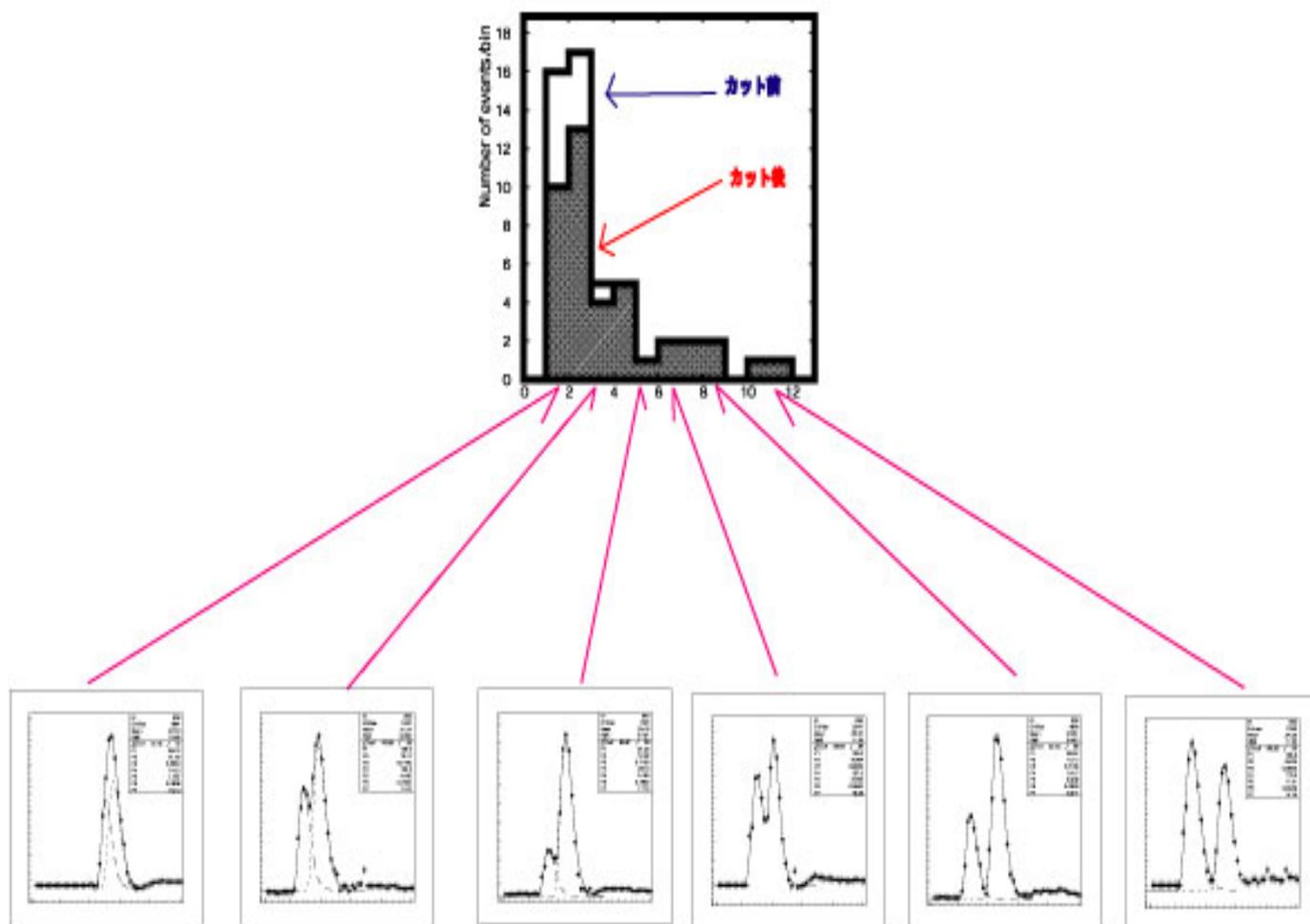
カットの条件

$$X_1 - 1 > X_2$$

$X_1$ : 1つ山用の F I T 関数で F i t したときの C H I S Q U A R E / N D F

$X_2$ : 2つ山用の F I T 関数で F i t したときの C H I S Q U A R E / N D F

### 8.3 P 5 の値ごとに見る代表的な波形



## 8.4 $\mu$ 粒子の寿命の算出

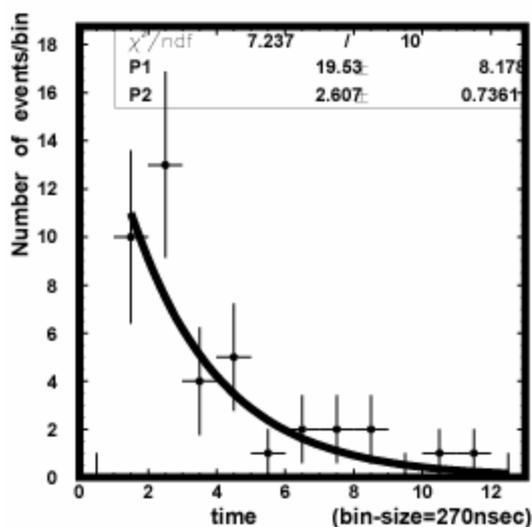
$\mu$  粒子は

$$P_1 e^{-\frac{x}{P_2}}$$

に従って崩壊していくので  $\mu$  粒子の寿命の F i t はこの関数を使う。このときの P 2 の値が寿命に対応しており

$$\text{muon life} = P_2 \times 270 \text{ nsec}$$

式で  $\mu$  粒子の寿命が算出できる



$$P_2 \quad 2.607 \times 270 = 704 \text{ nsec}$$

Error

$$\begin{aligned} -0.60 \times 270 \text{ nsec} &= -162 \text{ nsec} \\ 1.21 \times 270 \text{ nsec} &= 327 \text{ nsec} \end{aligned}$$

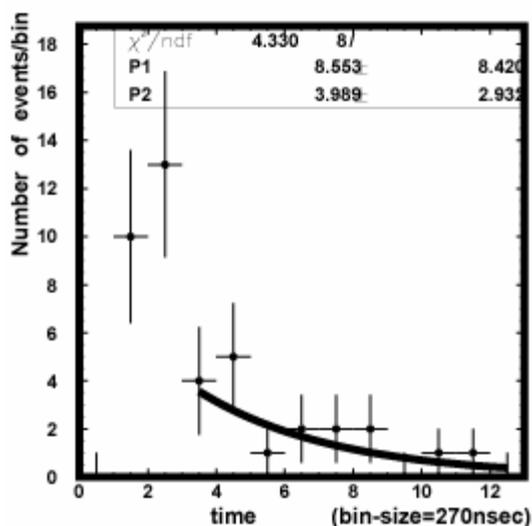
$$\text{寿命} : 704 \begin{matrix} -162 \\ +327 \end{matrix} \text{ nsec}$$

$\mu$  粒子の寿命は 2200 nsec であるので、ヒストグラムを F I T して出した寿命はかなり寿命が短くなっていることになる。これは time の 1 ~ 3 の部分が多いためとかがえられる。P 2 の値が 1 ~ 3 カウントのイベントは一つ目の波形と二つ目の波形がほとんど重なっている形状であるので、1 つ山の波形か 2 つ山の波形かを選別するのが難しく、実際より多くカウントをしてしまったためだと思われる。

よって P 2 の 2 ~ 3 の値は除いて F I T したほうが近い値が得られると予想される。

1 ~ 3 カウントの P 5 の値をカットした場合の  
μ 粒子の寿命算出

実際より多めに数えている可能性のある、P 5 の値が 1 ~ 3 までの bin 数を省いて F i t した



$P_2$   
 $3.989 \times 270\text{nsec} = 1077\text{nsec}$   
 Error  
 $-1.72 \times 270\text{nsec} = -464\text{nsec}$   
 $4.149 \times 270\text{nsec} = 1120\text{nsec}$

**寿命 :  $1077^{+1120}_{-464}$  nsec**

μ 粒子の寿命は

**$1077^{+1120}_{-464}$  nsec**

という、値がでた。これは先ほどの 1 ~ 3 カウントの部分を含めた結果と比べると μ 粒子の寿命 2 2 0 0 nsec に近い値が出ていることが分かる

## 第9章まとめと課題

### まとめ

最初の2 bin のイベントは2 山と1 山の判別の測定の精度が十分でないと予想される

3 bin 目以降でFitすることと、より統計をあげることにより、より精度の高い値が測定できると予想される

### 課題

STOPモードをやめSTARTモードにすることによって、同じ時間で測定できる数を増やす。

2 つ山と1 つ山の判別の精度を上げる。

より多くのイベントをとることにより、精度をあげる。

## 参考文献

Springer-Verlag 「Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments A How-to Approach」

奈良女子大学 物理科学科 2003 年度卒業生 藤川美幸希 余川真純  
「2003 年度卒業論文 シンチレーションカウンターを用いた Muon の寿命測定」

奈良女子大学 物理科学科 2004 年度卒業生 藤野智美 岡田知佳  
「2004 年度卒業論文 シンチレーションカウンターの基本特性の研究とミュオンの寿命測定」

KEK 高エネルギー加速器研究機構「宇宙を見る スパークチェンバーはなぜ動く」  
Homepage adress : <http://www.kek.jp/newskek/2003/sepoct/sparkchamber.html>

## 謝辞

私達の卒業研究のために、この一年間お忙しいなか多くの時間をさいてご指導くださった林井先生をはじめ、ゼミや毎日の生活の中でも熱心にご指導くださった野口先生、宮林先生、諸先輩方に心より感謝しております。この研究室で学んだ事を今後の生活に生かしていきたいと思っております。本当にありがとうございました。

