2004年度 卒業論文

シンチレーションカウンターの基礎特性の研究とミューオンの寿命の測定

奈良女子大学
理学部物理科学科
藤野智美　岡田知佳

目 次

第 1 章　はじめに **1**
1.1　実験の目的 1
1.2　本論文の構成 1

第 2 章　放射線計測の原理 **3**
2.1　電離と発光 3
2.2　電離損失 3
2.3　制動放射 5

第 3 章　宇宙線 **7**
3.1　宇宙線とは 7
3.2　Muon について 9

第 4 章　Muon の寿命の測定の原理 **11**
4.1　寿命の算出 11

第 5 章　セットアップ **13**
5.1　トリガーカウンター 13
5.2　CsI(Tl を含む) カウンター 14
5.3　ADC 14
5.4　エレクトロニクスの設定 16

第 6 章　データ収集プログラムと CAMAC **25**
6.1　Visual Basic について 25

第 7 章　データ解析 **29**
7.1　各カウンターの ADC 分布 29
7.2　事象選別の様子 30

第 8 章　まとめ **43**
8.1　結果と考察 43
8.2　参考文献 47

第1章　はじめに

1.1　実験の目的

私たちの身の回りには、宇宙から絶えず降り注ぐ原子核や素粒子がある。それらは宇宙線と呼ばれ、それぞれの粒子が固有の寿命を持ち、その崩壊の過程も粒子により様々である。本実験では、Muon が CsI 結晶中で崩壊した際に得られるエネルギースペクトルについて測定、解析し、その結果から Muon の寿命を算出する。その過程において、素粒子物理学の実験的研究を行なう学問である高エネルギー物理学の基礎的な実験技術を習得することを目的とする。

1.2　本論文の構成

本論文では、始めに放射線計測の原理や宇宙線について述べ、次に Muon の寿命の測定の原理や装置のセットアップについて述べる。さらに、データ収集の方法について説明し、それらをふまえて収集されたデータの解析を行ない、最終的に Muon の寿命の算出を行う。

第2章　放射線計測の原理

放射線 (荷電粒子) は我々の五感で直接感じとることができない。したがって、放射線を検出するためには、放射線と物質との相互作用を介して放射線のもつ情報を電気信号や化学的変化などに変換しなければならない。放射線の検出には、電離過程と発光過程が利用される。

2.1　電離と発光

荷電粒子が物質中を通過する際、原子は電子と陽イオンに分離される。これは、入射荷電粒子と物質を構成する原子との電磁相互作用によるもので、これを原子の電離 (Ionization) と呼ぶ。

また、電離作用を起こすばかりでなく、荷電粒子の通過により、原子や分子が励起状態 (エネルギーの高い状態) になる場合もある。励起された原子は短時間ののち、再び基底状態にもどる。この際に、原子はエネルギーの差を光として放出する。これを発光 (Sintillation) と呼ぶ。

2.2　電離損失

高速の荷電粒子は、物質を通過するときに物質を構成する原子内の電子と連続的に衝突を起こし、原子を励起したり電離したりして持っていたエネルギーを失っていく。このエネルギー損失を電離損失という。物質 1 g/cm^2 通過するときエネルギー損失は Bethe-Bloch の式によって次のように与えられる。

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi N_0 Z z^2 e^4}{mv^2 A}\left[ln\left(\frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)}\right) - \beta^2\right] \tag{2.1}$$

$$\begin{cases} I : \text{電離ポテンシャル} \\ v : \text{入射荷電粒子の速度} \\ z : \text{入射荷電粒子の電荷} \\ e : \text{電子の電荷} \\ N_0 : \text{アボガドロ数} \\ Z : \text{物質の原子番号} \\ A : \text{物質の原子量} \\ m : \text{電子の質量} \\ \beta = v/c \end{cases}$$

以下のグラフは、入射荷電粒子のエネルギーと電離損失の関係を示したものである。

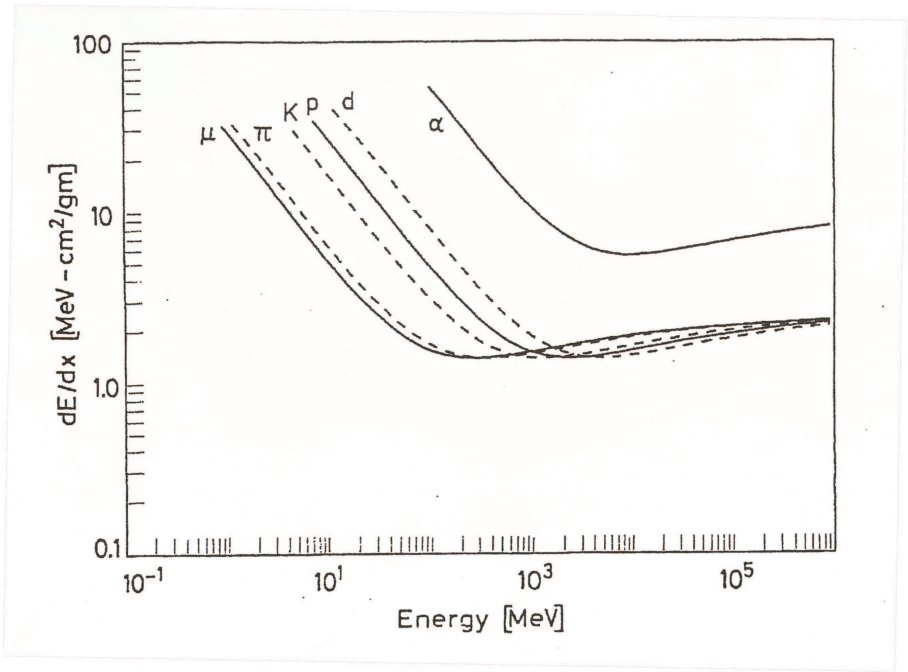

図 2.1: 入射荷電粒子のエネルギーと電離損失の関係

入射荷電粒子のエネルギーが低く、βが小さいとき,Bethe-Bloch の式は、

$$\frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{\beta^2} \tag{2.2}$$

となる。これは、上図の左側の領域にあたる。この領域では入射粒子の運動量が大きくなるにつれて $\mathrm{dE/dx}$ のグラフは $1/\beta^2$ に従って急激に減少

し、やがてその最小値に達していることが確認できる。この領域における電離を Minimum ionization と呼ぶ。下図からも分かるように、dE/dx の最小値は、電荷が同じ粒子ならば、ほぼ同じ値をとることが分かる (図 2.1)。

入射荷電粒子のエネルギーが高くなると、$\beta^2 \backsimeq 1$ となり、(2.1) 式の第 2 項が主に効くようになり、エネルギー損失は、

$$\frac{dE}{dx} \propto \log[\beta^2/Z(1-\beta^2)] \tag{2.3}$$

となる。先程の図を見てみると、dE/dx のグラフが最小値を越えた点から運動量とともにゆるやかに増加していることが確認できる。本実験では、原子が励起状態から基底状態に遷移する際に放出する Scintillation 光により電離損失を測定する。

2.3 制動放射

荷電粒子が原子核のクーロン場によって曲げられると、粒子は法線方向に加速度を受ける。このとき荷電粒子は電磁波の形でエネルギーを放出し、自らのエネルギーを失っていく。このような制動放射によるエネルギー損失は近似的に次式で表される。

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = \frac{4Z^2}{137}(\frac{e^2}{mc^2})^2 ENln\frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}} \tag{2.4}$$

$$\begin{cases} Z : \text{吸収体の原子番号} \\ m : \text{入射粒子の質量} \\ E : \text{入射粒子のエネルギー} \\ N : \text{物質の単位体積中の原子数 } (N = \frac{N_0\rho}{A}) \\ N_0 : \text{アボガドロ数 } (6.02 \times 10^{23}) \\ \rho : \text{物質の密度} \\ A : \text{物質の原子量} \end{cases}$$

ただし、上式は $E \gg mc^2 Z^{\frac{1}{3}}$ の条件の下で成立する。この式を見てみると、制動放射によるエネルギー損失の割合は入射粒子の質量の 2 乗に反比例するので、質量の大きい α 線や陽子線の場合にはほとんど無視することができ、質量の小さい電子による場合のみが問題となることがわかる。また、吸収物質の原子番号の 2 乗に比例することに加えて、入射粒

子のエネルギーにも比例するので、原子番号の大きい物質に高いエネルギーの電子線が入射した場合には、この制動放射による寄与はかなりの値となる。制動放射によるエネルギー損失と電離 · 励起によるエネルギー損失との比はおよそ EZ/800 となるので、制動放射の程度を知るときにはこの式を活用すると便利である。ただし、ここで E の単位は Mev である。たとえば、鉛 (Z=82) に 1Mev の電子線が入射した場合には、この比は約 10% にも達することが導かれる。

第3章　宇宙線

3.1　宇宙線とは

地球上には、宇宙空間に存在する高エネルギーを持った原子核や素粒子が絶えず降り注いでいる。これらの粒子を宇宙線と呼ぶ。私たちの身の回りにはいつも宇宙線が降り注いでおり、1 秒間に 200 回以上も私たちの身体を突き抜けている。

宇宙では、超新星の爆発や太陽表面の爆発などで発生した高エネルギーの粒子がいつも飛び交っている。これらは一次宇宙線と呼ばれ、約 90 %が陽子 (水素の原子核)、約 8 %がアルファ粒子 (ヘリウム原子核)、その他の粒子が約 1 %含まれる。そのエネルギーは 500MeV 程度のものが多く、数 GeV から数 TeV のものもある。

一次宇宙線 (粒子数 / $m^2 \cdot$ sec)

p	1300
He	88
C,O	6

これらの一次宇宙線が大気圏に突入すると、高度数十 km で空気中の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を生成させたり、中性子や陽子をはじき飛ばしたり、π 中間子などの粒子を発生させたりする。このように一次宇宙線の衝突で発生した二次粒子を二次宇宙線と呼ぶ。二次粒子はさらに原子核と相互作用し、新たな二次粒子を生成する。これらが何回か繰り返されて多くの二次宇宙線が生成される。これをカスケード シャワー (cascade shower) と呼んでいる。その様子を次ページ図 1 に示す。二次宇宙線のうち、電子やガンマ線は大気中で吸収されて減り、地中まで来るのは Muon とニュートリノがほとんどである。

二次宇宙線 (粒子数 / $m^2 \cdot$ sec)

μ	100
e	60
γ	10
p	1

超新星の爆発によって、沢山の光子やニュートリノが地球に届いている。これらのことから、宇宙の色々な星の爆発が宇宙線の起源の一つであると考えられる。さらに、この宇宙が Big Bang によって創られたとすれば、宇宙線はこの宇宙の成り立ちの情報を握る重要な手がかりとなる。宇宙線はこの宇宙の活動の象徴と言える (図 3.1)。

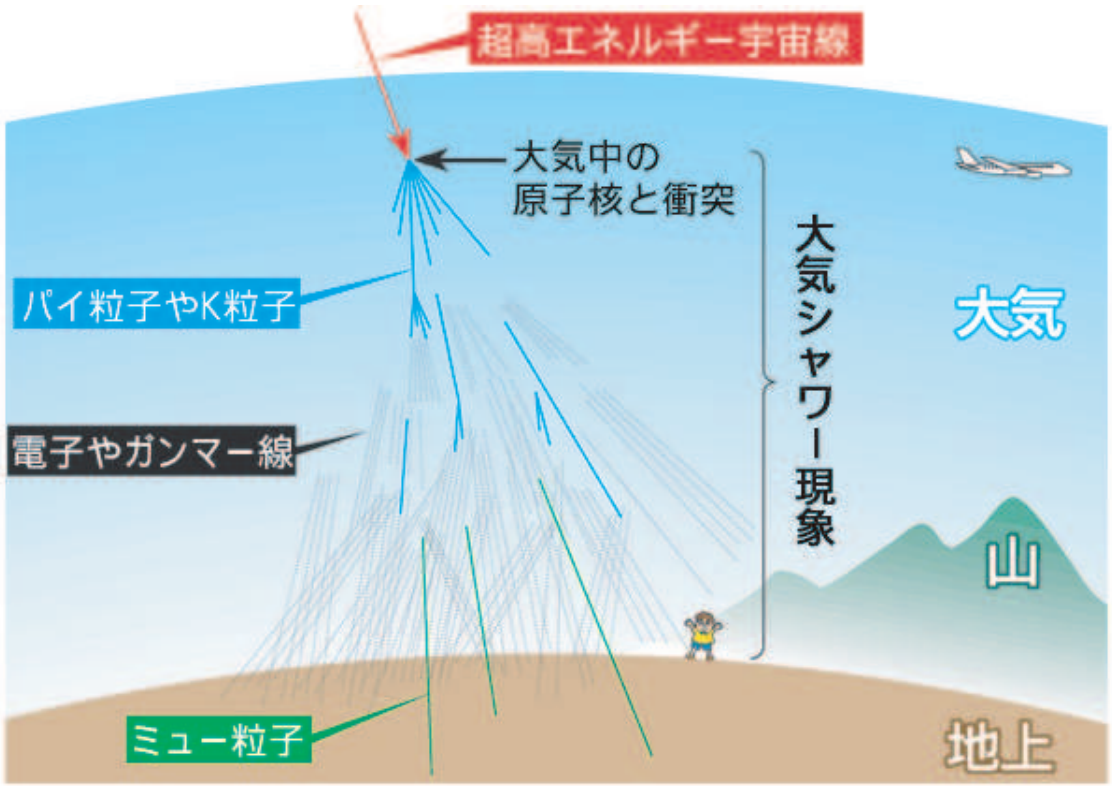

図 3.1: 宇宙線

3.2 Muonについて

地上に到達する宇宙線の大部分を Muon が占めている。Muon は宇宙から飛来する陽子と大気中の空気の原子核との強い相互作用で生成された π 中間子や K 中間子が崩壊して出来たものである。Muon は第二世代のレプトンであり、二次宇宙線中の荷電粒子の約 $3/4$ を占める。物質との相互作用が弱いため、そのほとんどは地上深くまで貫通するが、一部電離によってエネルギーが低くなることで第一世代の電子とニュートリノに崩壊する。Muon の質量は $105\mathrm{MeV}/c^2$(電子の質量は $0.51\mathrm{MeV}/c^2$) であり、その寿命は $2.2\mu\mathrm{sec}$ である。本実験では、この Muon の寿命を求めることを目的とする。

第4章　Muonの寿命の測定の原理

4.1　寿命の算出

一般に、放射性崩壊の指数関数法則を用いることにより Muon の寿命が求められる。
それぞれの粒子が単位時間に崩壊する確率が λ(ただし、λ は粒子の年齢とは無関係)である独立な粒子の集合を考える。ある時刻 t に存在する粒子の数を N(t) とすると、微小時間 dt の間に崩壊する数は次式で与えられる。

$$dN = -\lambda N(t)dt \tag{4.1}$$

この式を積分する。ある時刻 t_o に存在する粒子の数を N_o とすると、

$$\int_{N_o}^{N} \frac{dN}{N} = \lambda \int_{t_o}^{t} dt$$

$$[lnN]_{N_o}^{N} = \lambda [t]_{t_o}^{t}$$

$$(lnN - lnN_o) = \lambda(t - t_o)$$

$$\ln(N/N_o) = -\lambda(t - t_o) \tag{4.2}$$

t_o=0 の場合、(4.2) 式は以下のように書き換えられ、これは放射性崩壊の指数関数法則として知られている。

$$N = N_o e^{-\lambda t} \tag{4.3}$$

時刻 t と t+dt との間の無限に小さい微少時間 dt の間に崩壊する粒子の絶対数の平均値は Nλdt で表される。これらの粒子が時間 t の間だけ存在するので、時間 t の間に生存する粒子の生存時間の和は tNλdt となる。

従って、N_0 個の粒子すべての生存時間の和 L は tNλdt を t=0 から t=∞ まで積分した値に等しくなり、(4.4) 式で与えられる。

$$\begin{aligned} L &= \int_0^\infty tN\lambda dt \\ &= \int_0^\infty tN_0\lambda e^{-\lambda t} dt \\ &= N_0\lambda \left[\frac{1}{\lambda^2}\right]_o^\infty \\ &= A_0/\lambda \end{aligned} \tag{4.4}$$

よって、粒子の平均寿命 τ=L/A_0 は (4.5) 式で与えられる。

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \Longleftrightarrow \lambda = \frac{1}{\tau} \tag{4.5}$$

これを (4.3) に代入すると、

$$N = N_0 e^{-t/\tau} \tag{4.6}$$

が得られる。
本実験では、FADC を用いて (4.4) 式の t を測定することで寿命 τ を算出する。

第5章　セットアップ

本実験では、トリガー (T1,T2,T3) としてプラスチックシンチレーターを、そして CsIA として CsI(Tl を含む) シンチレーターを用いて以下の図のように設置して実験を行うものとする。左は装置を横から見たもの、右は縦から見た時の図である。
単位は cm で表す (図 5.1)。

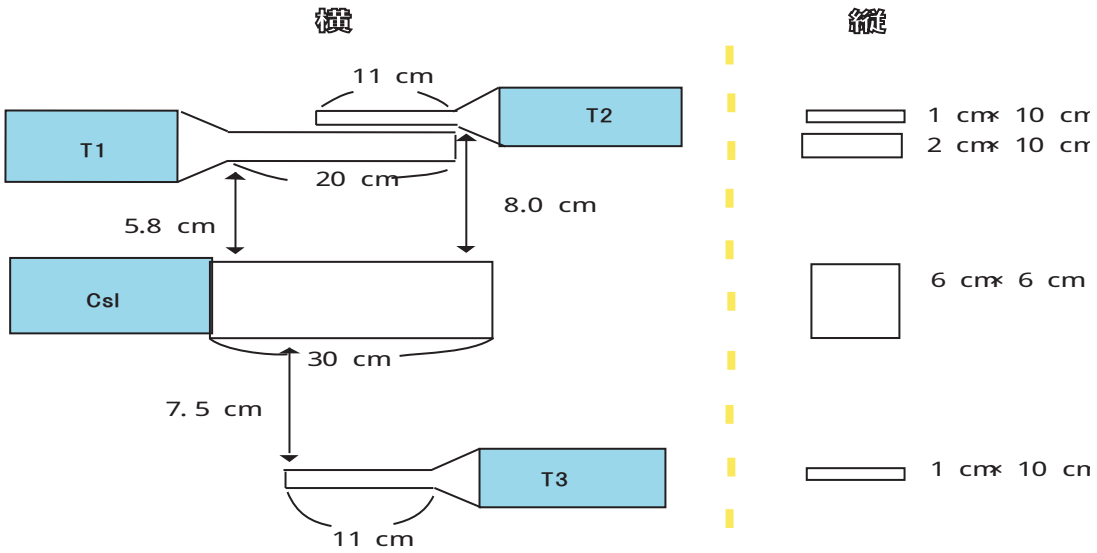

図 5.1: セットアップの図

5.1　トリガーカウンター

ここでは T1,T2,T3 のこと。宇宙線であるミューオンは宇宙から絶え間なく、地球上に降り注ぐ。その中でも CsIA にはあらゆる方向からミューオンはやってくるため、CsIA 中でミューオンが止まったかどうかは一般的

には判断しにくい。そこで CsIA の上に T1,T2 を, 下に T3 を置き、CsIA に T1,T2,T3 の hit の条件を与えることで余分な (膨大な) データが削られ、私たちが必要とするデータのみを取り出すことができる。この作業をするのが、トリガーカウンターである (図 5.2)。

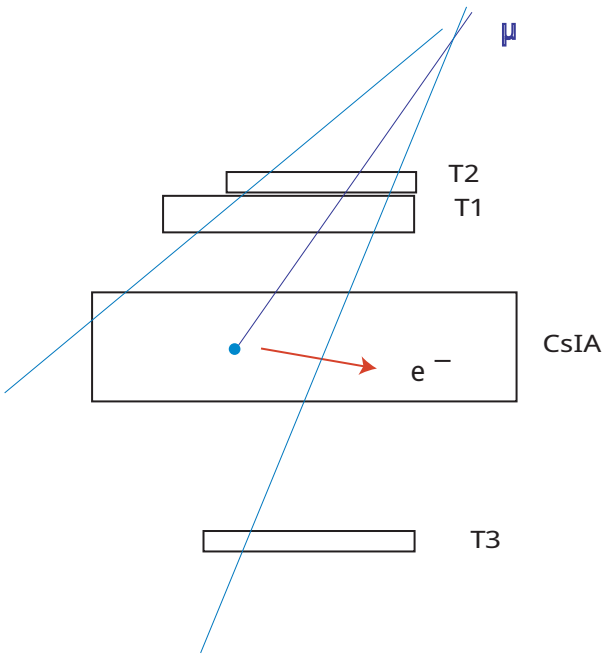

図 5.2: 宇宙線ミューオンの様子

5.2　CsI(Tl を含む) カウンター

CsI 中にミューオンが来た時、その粒子のエネルギーに応じてピカッと光り、そのエネルギー損失が一つの数値として、光電子増倍管で増幅され、コンピューターに読み込まれる。

5.3　ADC

本実験では、ADC として Q モードと V モードと FADC の三種類を使った。以下、その説明を行う。

ミューオンが CsI 中で止まって崩壊 ($\mu^- \rightarrow e^- \nu_e \nu_\mu$) したとすると、ミューオン崩壊による電子に対応する信号がある。
Q モード (電荷積分型 ADC) とは Gate パルスが持続している間の信号を時間積分することであり、一方 V モード (ピークホール型 ADC) とは Gate パルスが持続している間のピーク電圧を数値化することである (図 5.3)。

次に FADC(フラッシュ ADC) についての説明を行う。
(1) 基本回路構成
FADC は A-D(アナログ-デジタル) 変換器のひとつである。
A-D 変換の分解能を n ビットとすると、(2^n - 1) の比較器 (コンパレータ) を入力段に並列に接続し、入力電圧範囲を 2^n 等分した電圧にしたがって基準電圧を分解する。この値が各比較器における比較用基準電圧値となる。そして、アナログ信号が入力されると、一斉に各比較器が動作し、'H"L' のデジタル信号を出力する。このデジタル信号は、デコーダを通して'1' もしくは'0' のデジタル信号に変換され、出力される。
FADC は、通常の ADC に比べて A-D 変換速度が極めて速い。時系列データを読み込むことが可能なため、信号の波形を細部まで観測することができる。本実験では、FADC のこのような特徴を利用し、信号の波形を確認する。FADC の基本回路構成を後ほどのページに示す (図 5.4)。

(2) 測定の原理
FADC には、start モードと stop モードがあり、FADC のモジュールの中で切り換えできる。ここでは stop モードを使う。原理としては FADC の周波数 f=20MHz なので、プロット間の時間 ΔT=1/f=50nsec。よって初めの設定では FADC の TRIGGER をトリガー (T1,T2) の Gate パルスから 3μsec delay させたので、この時 N=3μsec /50nsec =3000/50=60。一つのシグナルあたり 60 個プロットできることが分かる。しかし、実際に発振器を使って FADC のプロット間の時間 ΔT を測った所 ΔT は 50nsec ではなく、270nsecだった。よって、delay を 20μsec delay に変えることで N=20μsec /270nsec=20000/270=74.07=約 74 個。一つのシグナルあたりプロットできる個数を増やすことで、よりシグナルの形を見やすくした。今、stop モードなので、後ろから 270nsecごとにシグナルの高さをプロットしていく (図 5.5)。
収集データは、一つ前のシグナルが終了 (Q=0 で LAM=2) してから次のシグナルがくるまでの時間データを取りつづけるので、シグナル一つ一

つのデータ量は異なる。

5.4　エレクトロニクスの設定

ここでは、実験でどのように T1,T2,T3,CsIA を配線し、ADC(Q モード),ADC(V モード),FADC でデータを読み込むまでを説明していく (図 5.6)(図 5.7)。

discriminator:あらかじめ設定しておいた threshold(しきい値) 以上の大きさのシグナルがきた時、方形波 (パルス) を出す装置 (図 5.8)。

coincidence:NOT と AND と OR がある。実験では AND を使う。同時に Hit した時に信号を出すようにした (図 5.9)。
T1,T2 については以下のようになる (図 5.10)。T1 の threshold(しきい値) は 44mV,T2 の threshold(しきい値) は 35mV に設定した。

G.G.(Gate and delay Generators):入力信号に対して数 nsec から数秒までの範囲で delay させたり、pulse 幅を調整するためのもの (図 5.11)。

Attenuator:ADC が読み取れる範囲にするため、シグナルの電圧を減衰させる装置。単位は dB(デシベル)(図 5.12)。

$$dB = -20 \log_{10} \frac{V_{out}}{V_{in}} \tag{5.1}$$

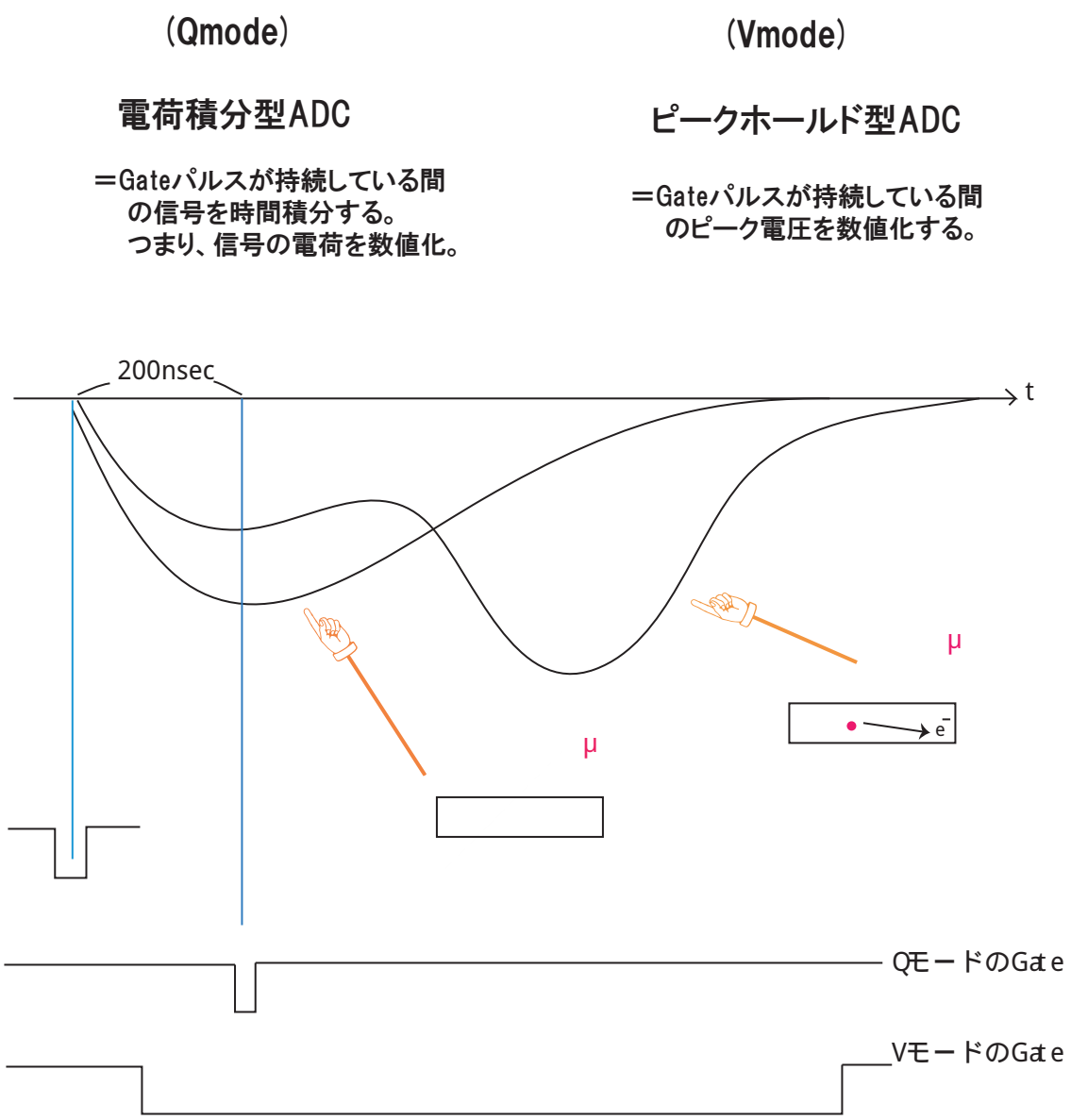

図 5.3: Q モードと V モードについて

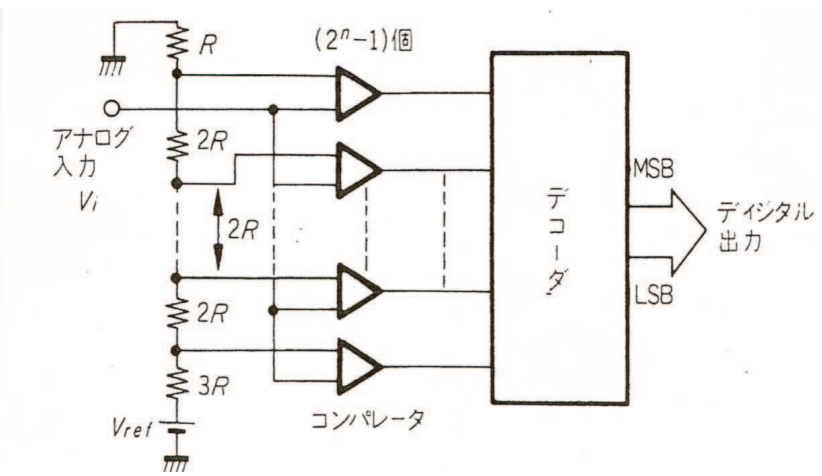

図 5.4: FADC の基本回路構成

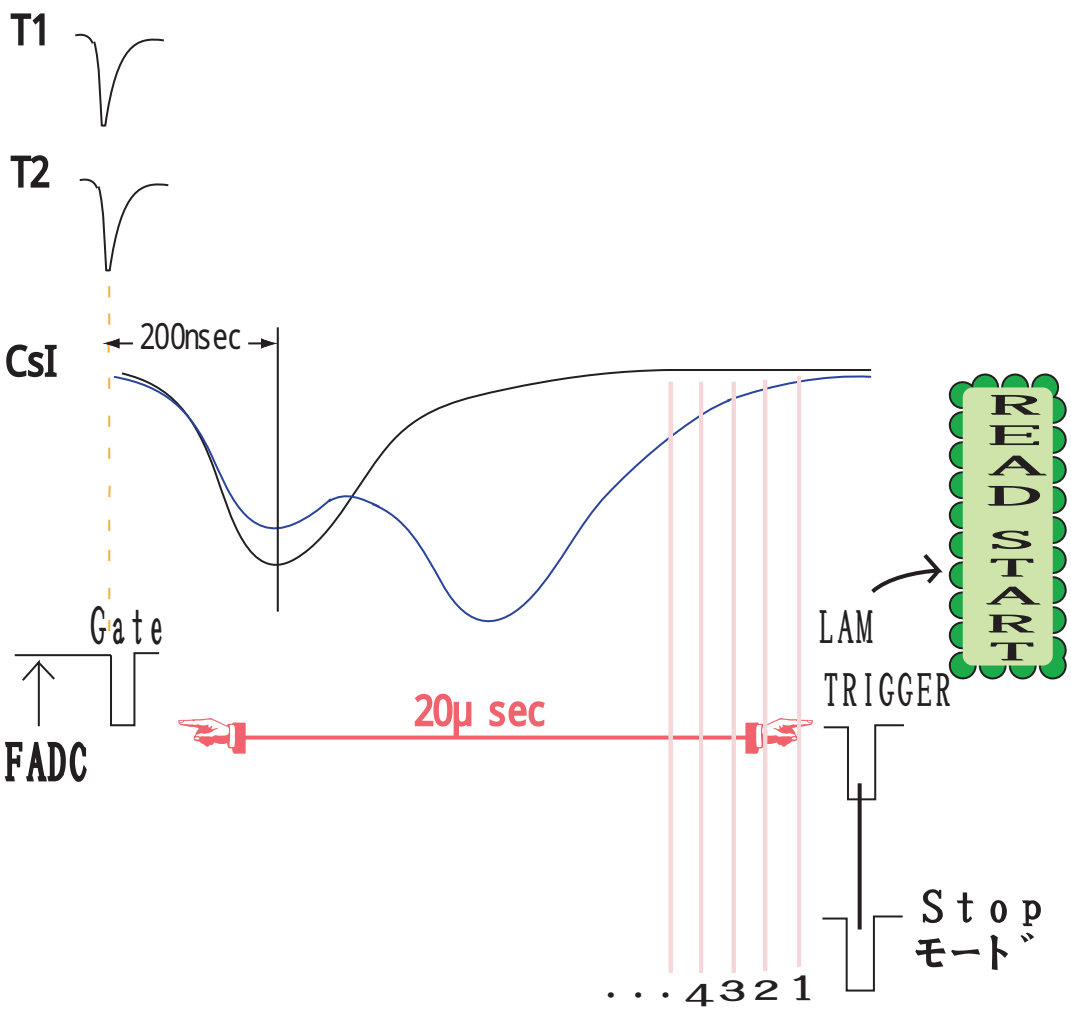

図 5.5: FADC について

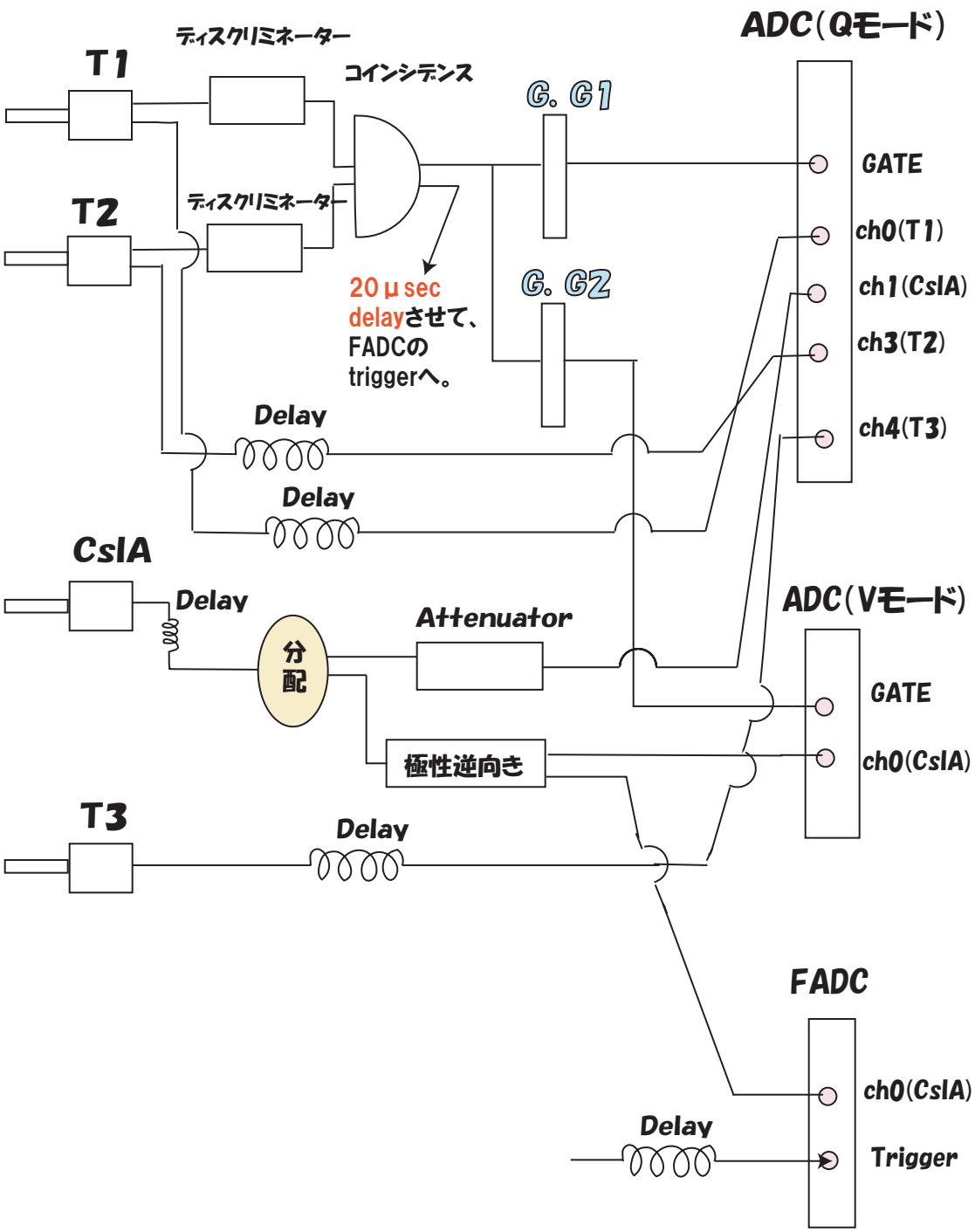
ADC(Qモード)
ディスクリミネーター
T1
コインシデンス
G. G1
GATE
T2
ディスクリミネーター
ch0(T1)
ch1(CsIA)
20μsec
delayさせて、
FADCの
triggerへ。
G. G2
ch3(T2)
Delay
ch4(T3)
Delay
CsIA
Delay
Attenuator
ADC(Vモード)
分
配
GATE
極性逆向き
ch0(CsIA)
T3
Delay
FADC
ch0(CsIA)
Delay
Trigger

図 5.6: 配線図

	H.V.(MeV)	Threshold(mV)	Width(ns)	delay(ns)	ペデスタル
T1	-1600	44	140	Gate内にシグナルのピークがくるようdelayさせた。	251
T2	-1650	35	130		1
T3	-1700	35			14
CsIA(Qmode)	-1500	36	130		207
CsIA(Vmode)					168

ペデスタルとは、データをヒストグラムにした時の、横軸の一番低い目盛りの値。
これが、エネルギー０Vに対応！

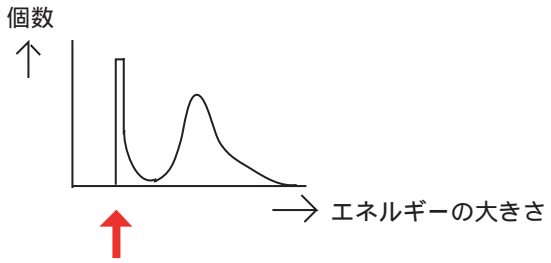

図 5.7: 表

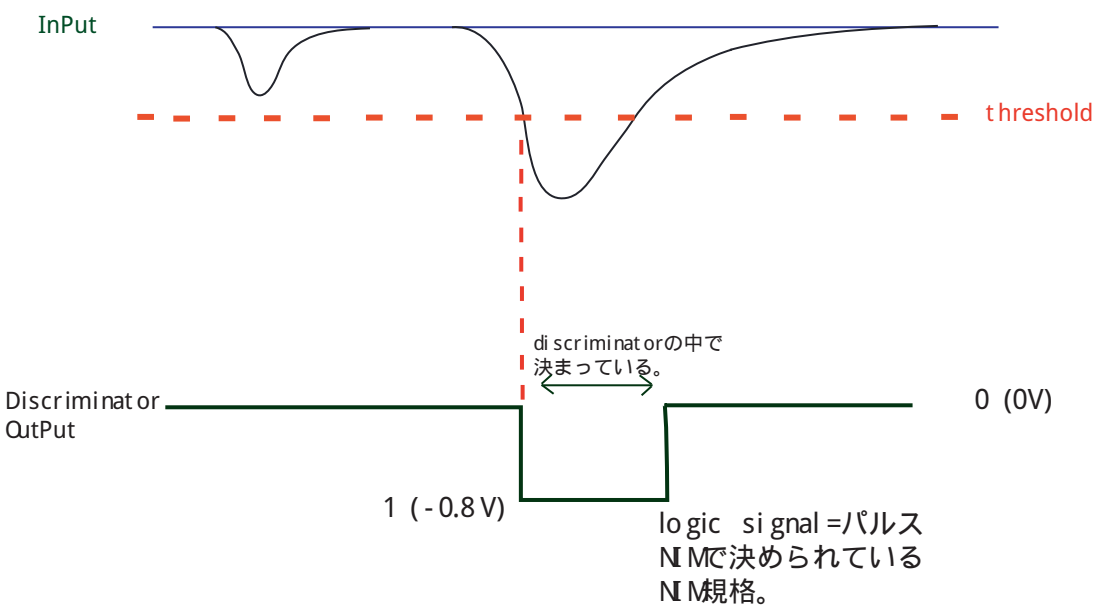

図 5.8: discriminator

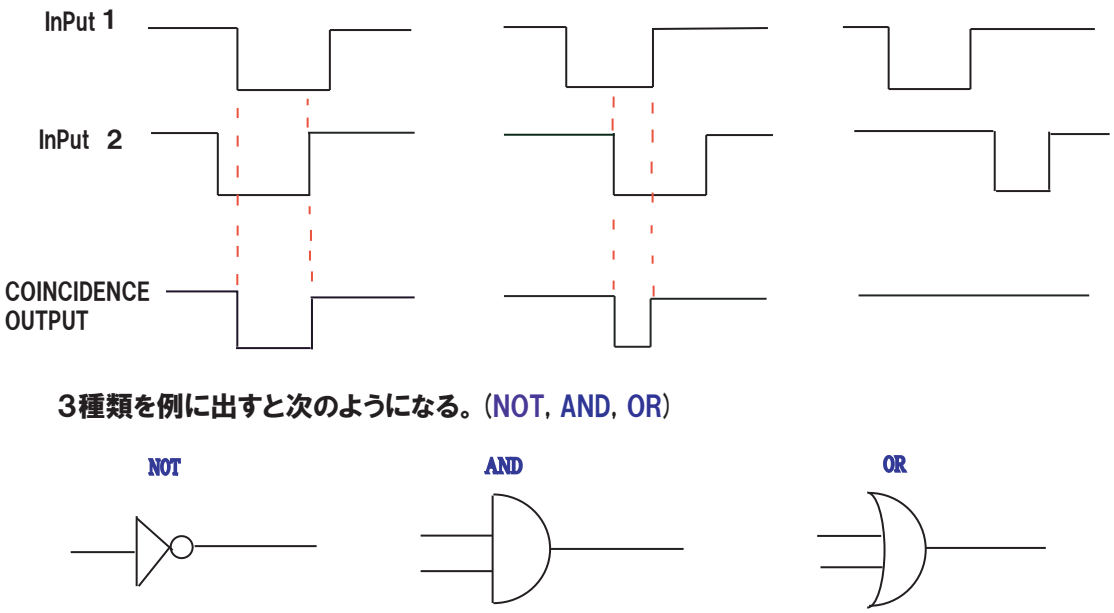

図 5.9: coincidence

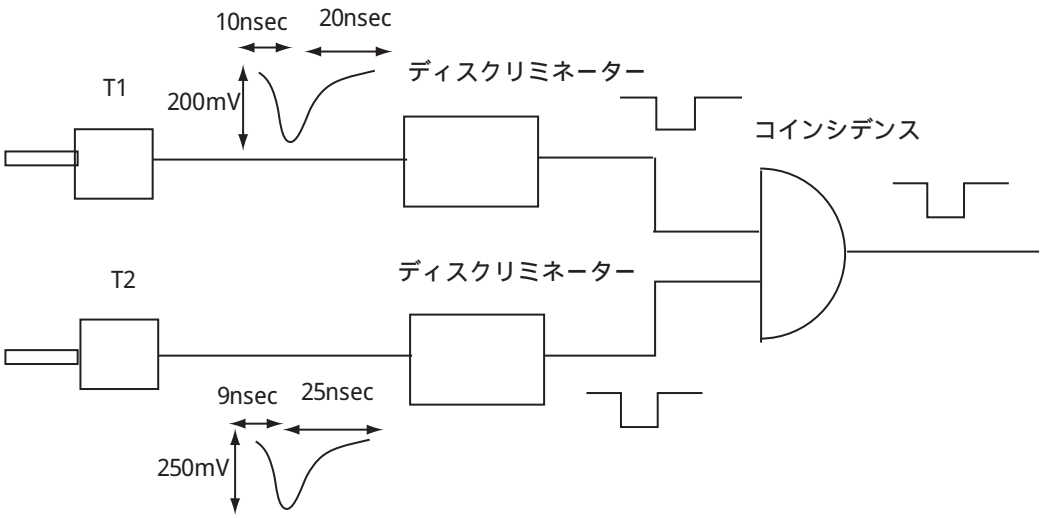

図 5.10: T1 と T2 について

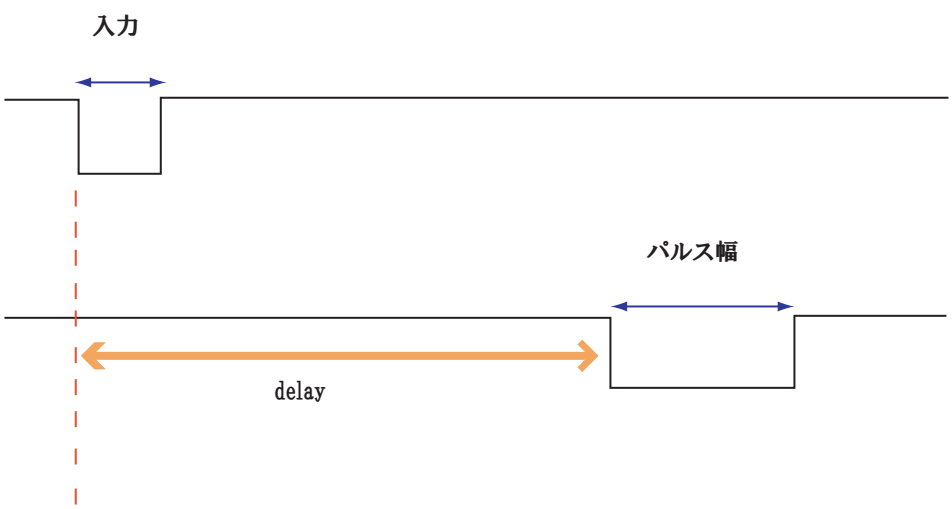

図 5.11: G.G.

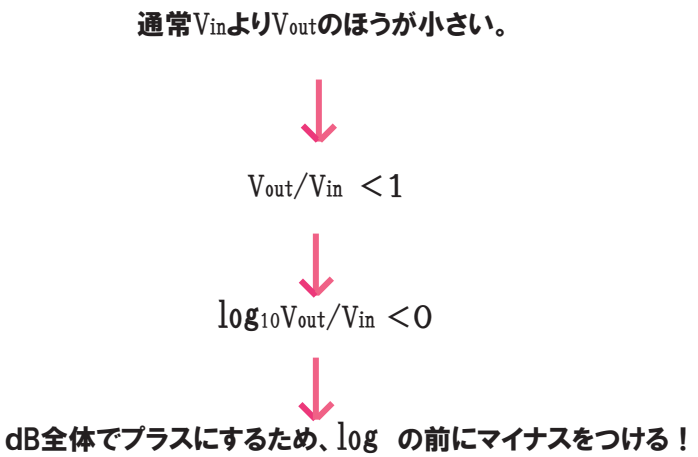

図 5.12: attenuator

第6章　データ収集プログラムとCAMAC

データ収集プログラムは、Visual Basic で書かれている。以下のように、C.C.(Crate Controler) には ADC(Q モード),ADC(V モード),FADC のモジュールが指定されたアドレスにさしこんである。そこで得たデータを、C.C.(Crate Controler) の右端に付いてある CAMAC BIN から P.C.(コンピューター) に送っている。そして、絵を作ったり論文を書いたりとデータ解析を行う時は UNIT コンピュータに Data 転送し、行う (図 6.1)。

次に CAMAC の規則について説明する。これはアドレスの指定のことで、CNAF で指定をする。
C:crate controler の数。今は crate は一つ使っているだけなので、C=1
N:station ナンバー (ヨコ)
A:モジュール内のアドレス (タテ),ADC においては 12 個の信号を読める。
F:function
F(0) と F(2) は Read Data
F(8) は Test LAM
F(9) は clear LAM
F(24) は disable LAM
F(26) は enable LAM
LAM とは、Look at me のことであり、LAM が立つと ADC から computer に Data が送られ、computer がデータを読み込むことができるようになる。

6.1　Visual Basic について

私たちは Visual Basic でデータ収集プログラムを作り、ディバック開始でプログラムを実行し、収集するイベントの個数を指定しデータ収集を行った。以下、フローチャートを使って、作ったプログラムの説明を行う (図 6.2)(図 6.3)。なお、プログラム内の i は Total Event のことであ

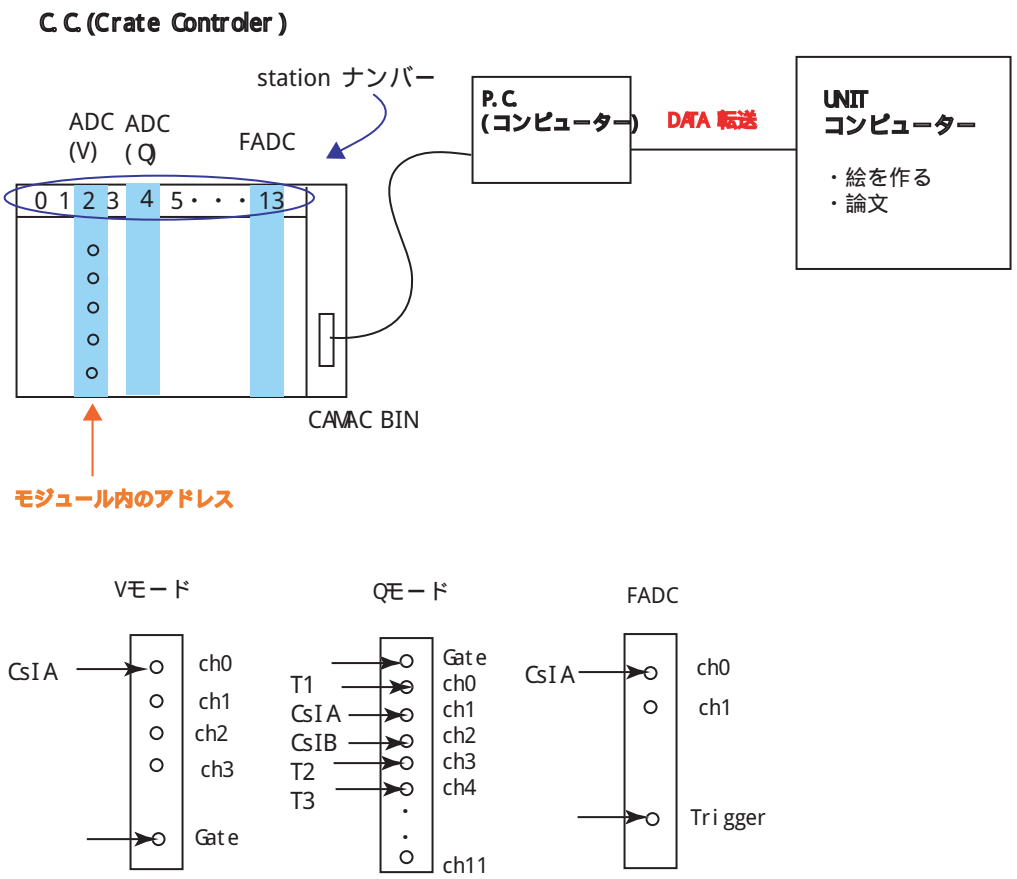

図 6.1: CAMAC について

り、NeV は一つのシグナルにつき読み込んだ値を指す。NeV は FADC について新しく追加したプログラムの中で取り扱っている。

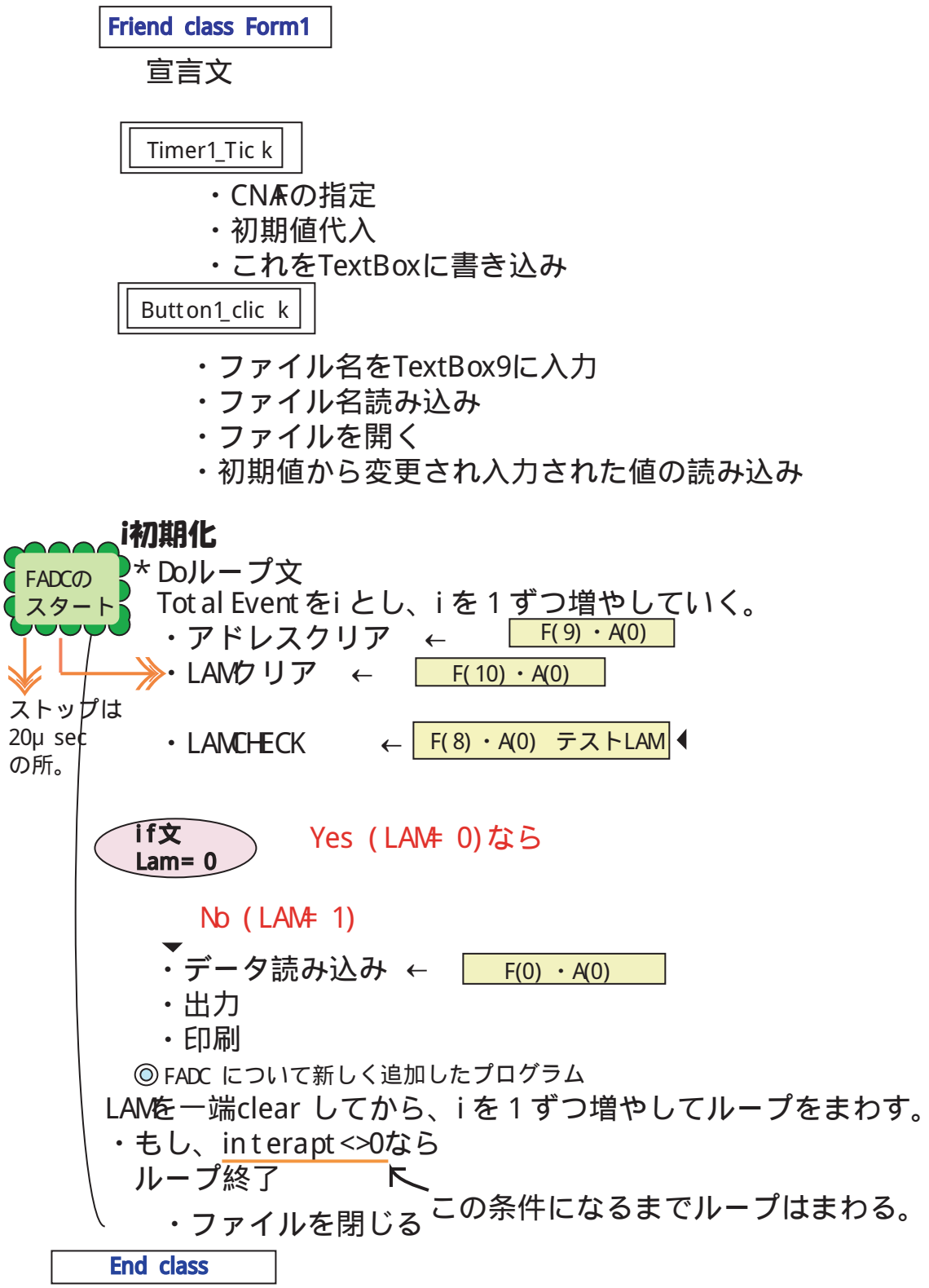
Friend class Form1
宣言文
Timer1_Tick
・CNAの指定
・初期値代入
・これをTextBoxに書き込み
Button1_click
・ファイル名をTextBox9に入力
・ファイル名読み込み
・ファイルを開く
・初期値から変更され入力された値の読み込み
i初期化
FADCの
スタート
* Doループ文
Total Event をi とし、i を 1 ずつ増やしていく。
・アドレスクリア ← F(9)・A(0)
・LAMクリア ← F(10)・A(0)
ストップは
20μ sec
の所。
・LAMCHECK ← F(8)・A(0) テストLAM
if文
Lam= 0
Yes (LAM= 0)なら
No (LAM= 1)
・データ読み込み ← F(0)・A(0)
・出力
・印刷
◎FADC について新しく追加したプログラム
LAMを一端clear してから、i を 1 ずつ増やしてループをまわす。
・もし、interapt<>0なら
ループ終了
この条件になるまでループはまわる。
・ファイルを閉じる
End class

図 6.2: フローチャート

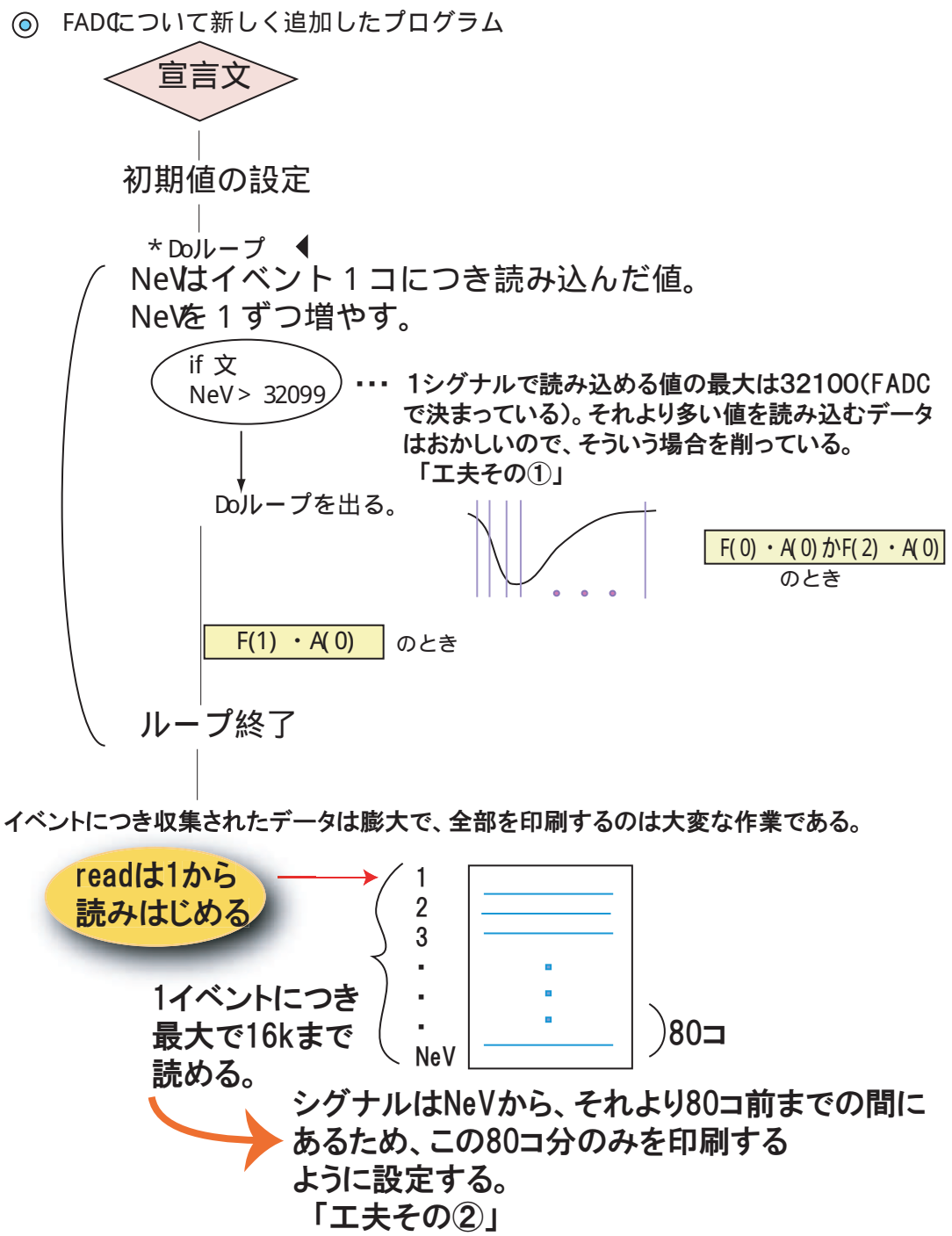

図 6.3: FADC について追加したプログラム

第7章　データ解析

私たちは Visual Basic プログラムで収集したデータを UNIT コンピューターに転送し、データの解析を行った。Paw にテキストファイルを読み込ませ nt/pl 10 で T1,T2,T3,CsIA(Q モード),CsIA(V モード),FADC のうち指定されたもののヒストグラムを出すことができる。

7.1　各カウンターの ADC 分布

ADC(Q モード) では、T1,T2,T3,CsIA を測った。ADC(V モード) では、CsIA のみを測っている。これは 20 万個のデータを集めて、ヒストグラムにしたものである。ここで取り扱う t1q は T1 を ADC(Q モード) で、t2q は T2 を ADC(Q モード) で、t3q は T3 を ADC(Q モード) で測っている。これを拡大して、それぞれのノイズカットをする位置を定めて、hit の条件とした。(図 7.1)
新しいノイズカット

$$\begin{cases} t1q > 332 \\ t2q > 22 \\ t3q > 65 \end{cases}$$

これが hit の条件である。

次に CsIA(Q モード) と CsIA(V モード) のヒストグラムを作る。以下これを caq,cav とする。二次元プロットの横軸は caq、縦軸は cav である。2005 年 2 月 27 日に 2 万個データを取ったものを解析する。1 イベントにつき約 6.5 秒かかる。以下のように条件を絞っていくと hit するイベントの数も減っていくことがわかる。
CsI hit(条件なし)　　13501 個のイベント
T1T2 を通って CsI hit　　8782 個のイベント
T1T2 を通って T3 は通らなかったという条件で CsI hit　　7805 個のイ

ベント
T1T2T3 を通って CsI hit　　977 個のイベント

(1)T1T2T3 を通ったという条件で CsIA を hit したものを考える。Hit したのは 2 万個のうち 977 コ (図 7.2)。
(2) 次に、T1T2 を通って T3 は通らなかったという条件で CsIA を hit したものを考える。Hit したのは 2 万個のうち 29227 コ。この中に、(a) ミューオン崩壊のもの。(b)T1,T2,CsIA を通って T3 は通らずに斜めに突き抜けたもの。が含まれる。二次元プロットでは (a) と (b) を区別できる (図 7.3)。

♢ CsI 6cm 通過した時のエネルギー loss を計算で求める。
$dE/dx = 1.5\,MeV/g/\,cm^2$ なので、エネルギー損失=1.5×(CsI の密度)×(CsI の厚さ) で求めることができる。よって今 CsI の密度は 4.53 で、厚さは 6cm であるから、求めるエネルギー loss は 40.770(MeV) である。このエネルギー loss が CsIA(V モード) のヒストグラムのピークの値に対応。
そして崩壊したものは最大でもミューオンの質量 $105MeV/c^2$ の半分なので、これはヒストグラムの横軸 (つまりエネルギーの大きさ) が $52.5MeV/c^2$ の所に対応する。以下は T1T2 を通って T3 は通らなかったという条件で CsIA を Hit したヒストグラムである。
着目するのは 3 箇所である。ペデスタル、ピークの位置、そしてミューオン崩壊の部分である。それぞれの目盛りは 168,207,?である。対応するエネルギーは 0MeV,40.77MeV,52.5MeV である。比を使って、ミューオン崩壊がどの目盛りにあるかを調べる。
207-168=39(目盛り)
(39/40.77)×52.5=2047.5/40.77=50.22075(目盛り)
よってミューオン崩壊があるのは、168+50.2=218.2 目盛り付近である (図 7.4)。

7.2　事象選別の様子

先程のヒストグラムのうち (2)T1T2 を通って T3 を通らなかったという条件で CsIA に hit したものに着目する。二次元プロットの縦軸は CsIA(Q モード)、横軸は CsIA(V モード) である。これらを領域 (ア)、領域 (イ), 領域 (ウ), 領域 (エ) に分け、それぞれの粒子番号が分かるので FADC で

形を調べる (図 7.5)。

♢ 一般的な形を FADC で見る。(領域ア)
縦軸が FADC の値、横軸が時間である。1bin が 270nsec に対応する (図 7.6)(図 7.6)(図 7.7)(図 7.7)(図 8.1)。横軸のはじめから終わりまでが 20μsec に対応。

♢ 例外を FADC で見る。
二次元プロットの直線よりも上に外れた所にある μ 粒子について FADC で形を調べてみた。領域イと領域ウで分けて考える (図 7.9)(図 7.9)(図 7.10)(図 7.10)。

♢ 直線の式: Y=aX+b を求める。
(180,210) (200,220) → 傾き=(220-210)/(200-180)=10/20=0.5
Y=0.5X+b
220=0.5×200+b
b=120
よって求める直線の式は Y=0.5X+120 であることが分かる。したがって先程のヒストグラムに新しく $Y < 0.5X + 116$ の条件を加えると次のようになる。これを FADC で見る (図 7.11)。
♢ 直線の式を除いて残った粒子を FADC で見る。
私たちは T1T2 を通って T3 を通らなかったという条件で CsIA に Hit したものに注目し、その二次元プロットに新しく $Y < 0.5X + 116$ の条件を加えてカットした。今 1 イベントが残り、これを FADC で波形を見た (図 7.12)。

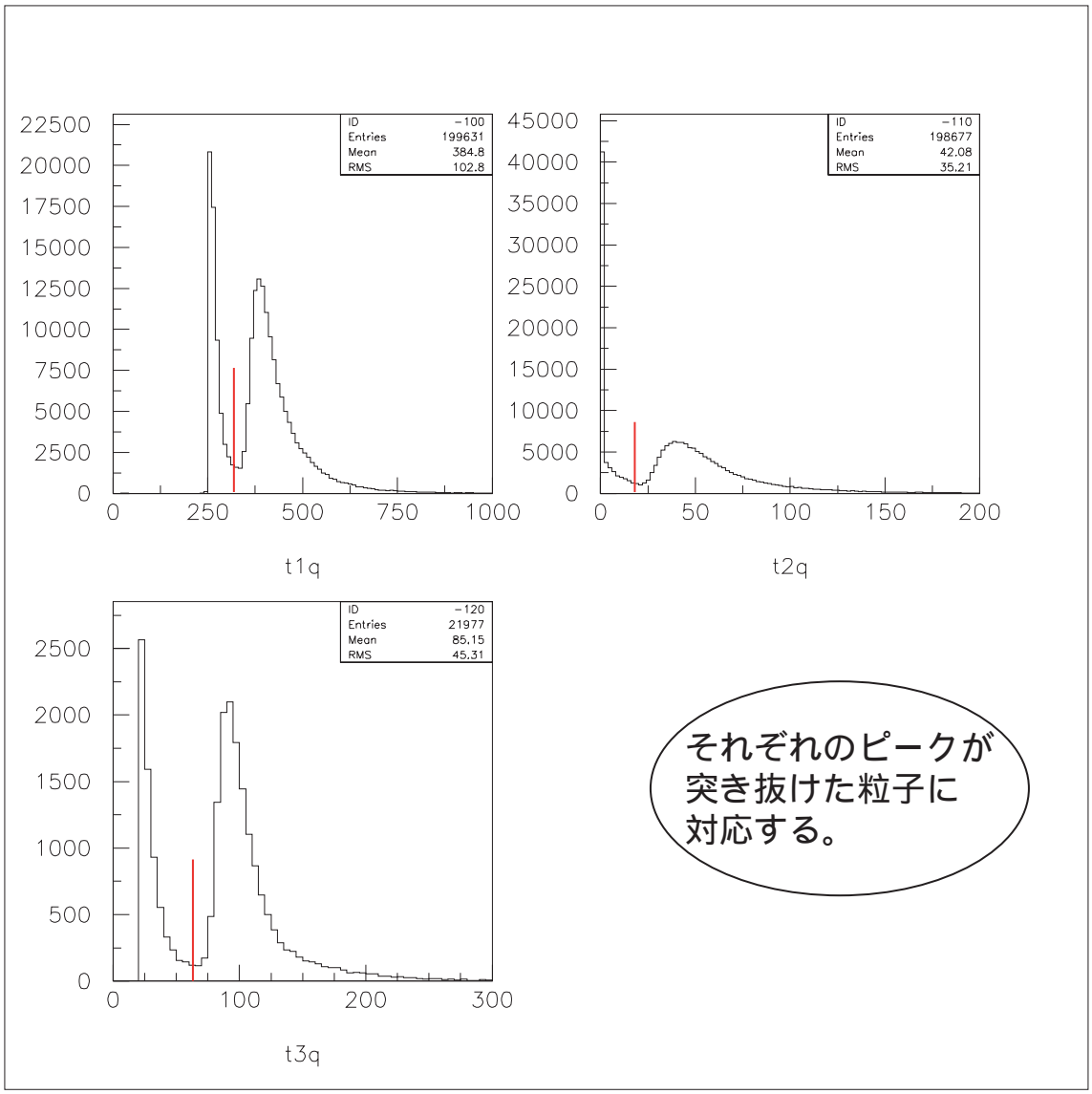

図 7.1: トリガー T1,T2,T3 の様子

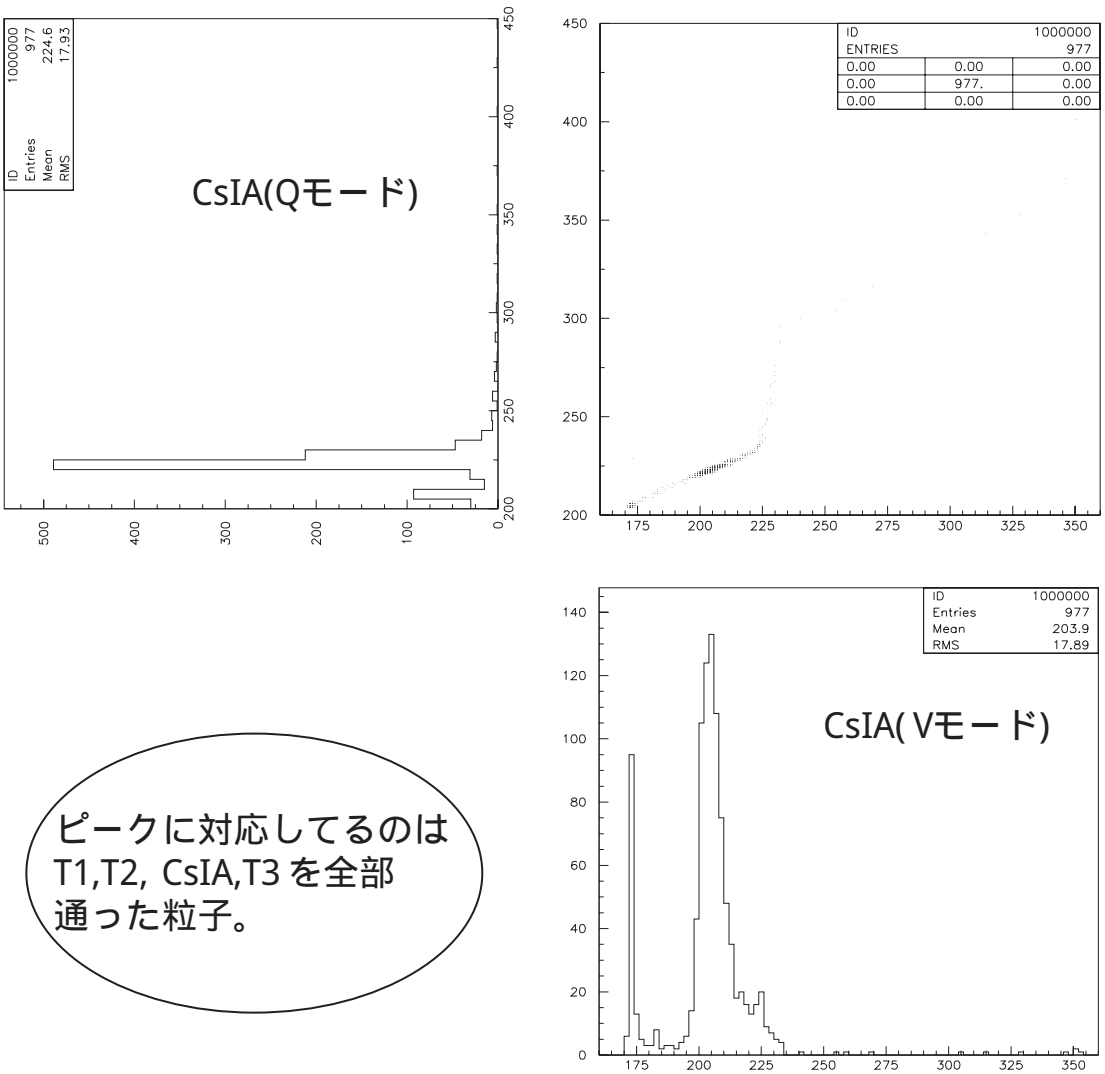

図 7.2: T1T2T3 を通ったもの

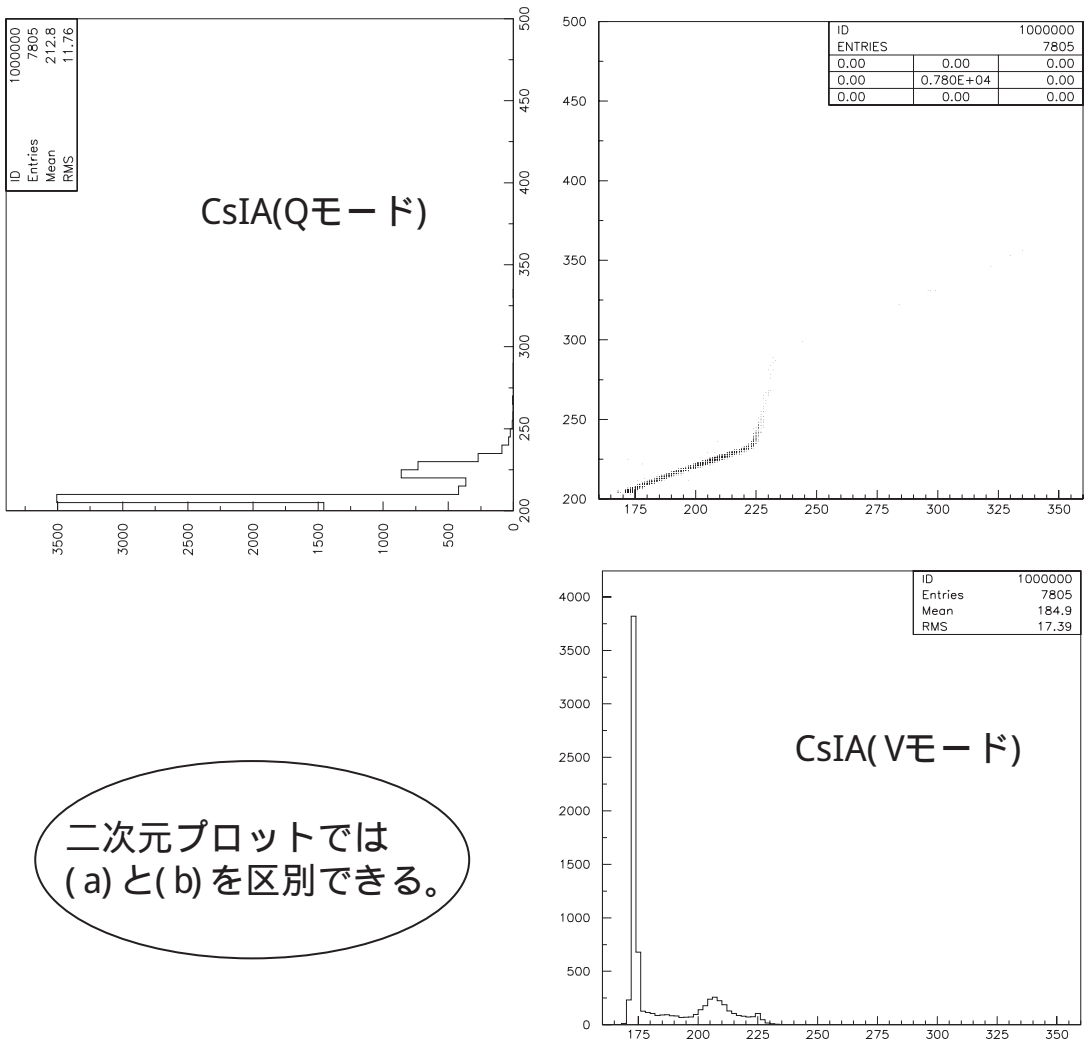

図 7.3: T1T2 を通って T3 は通らなかったもの

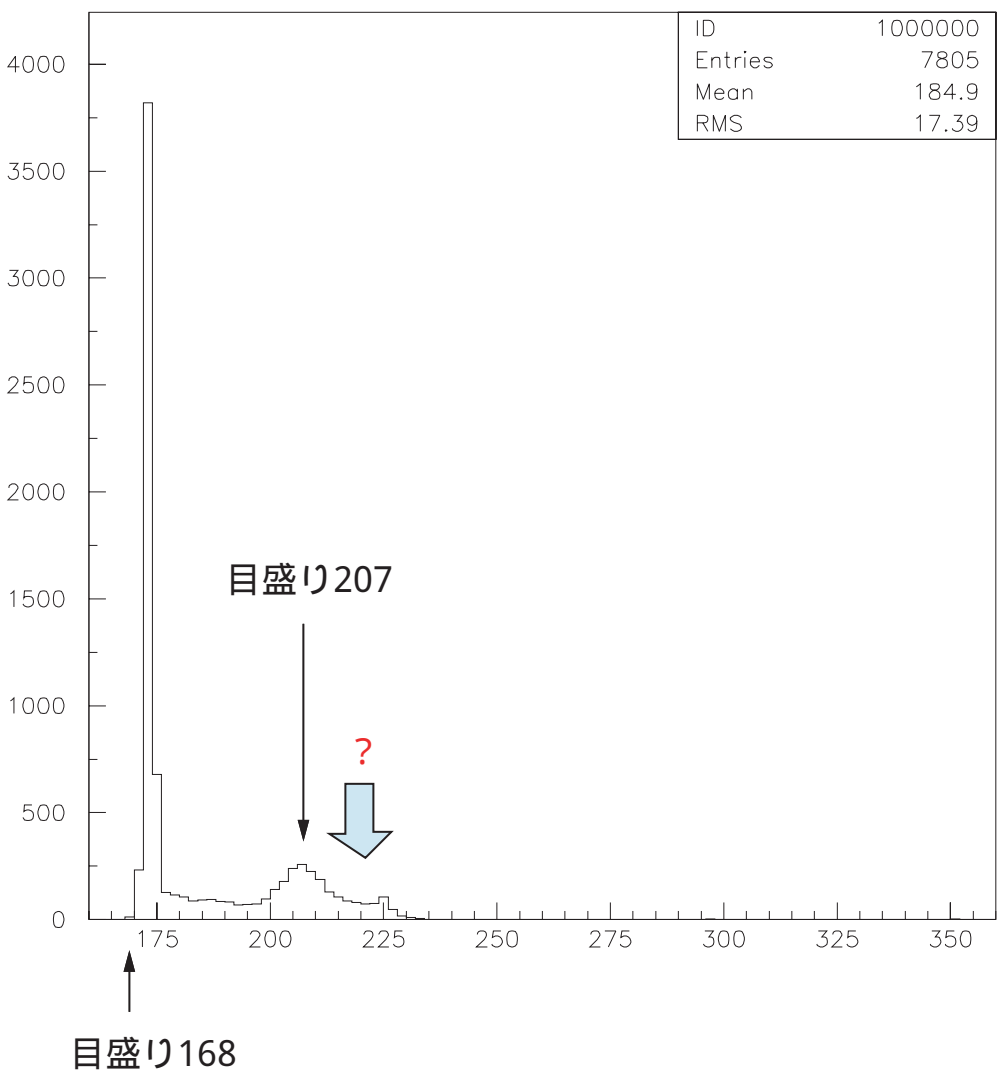

図 7.4: CsIA(V モード)

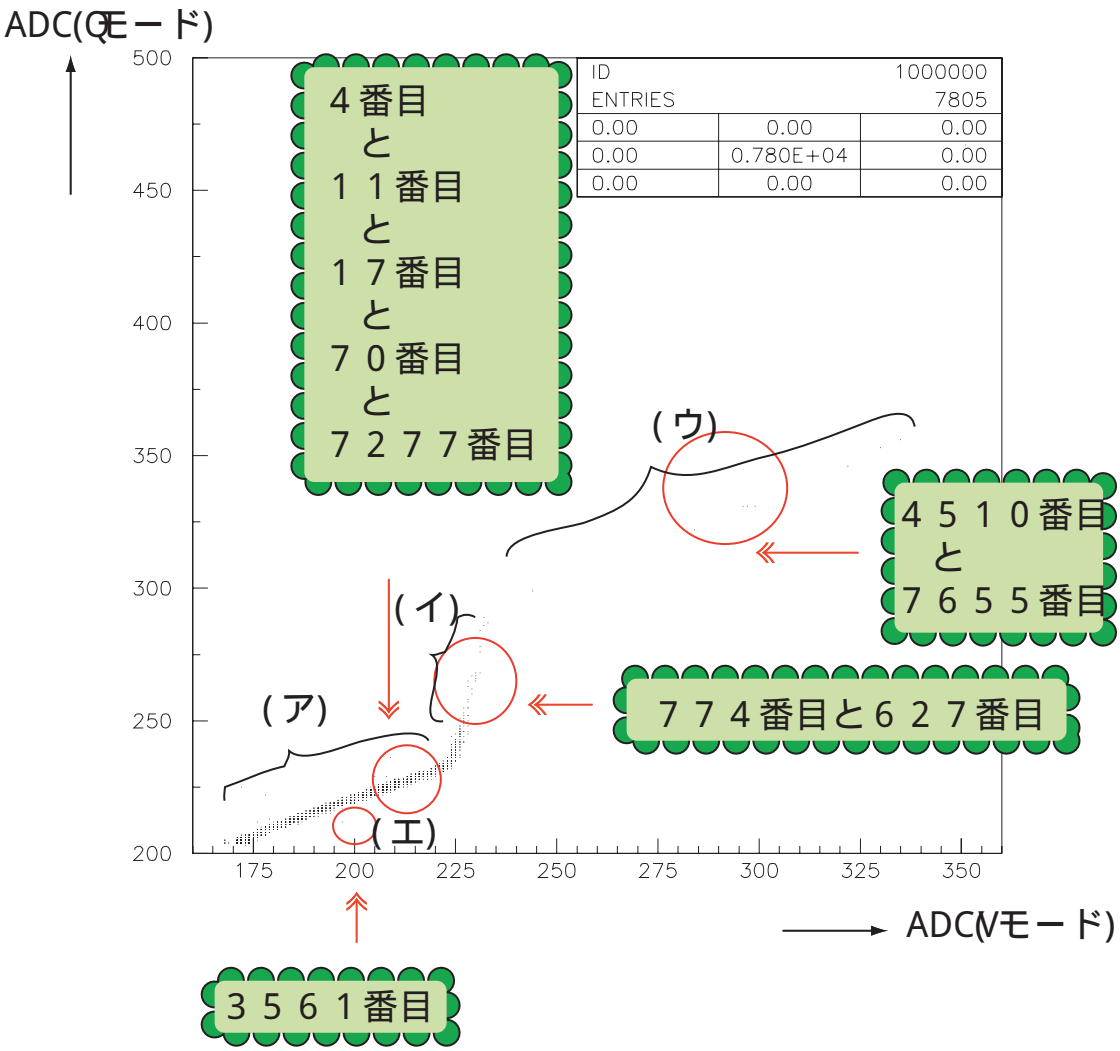
ADC(Qモード)
500
450
400
350
300
250
200
175
200
225
250
275
300
325
350
ADC(Vモード)
ID 1000000
ENTRIES 7805
0.00 0.00 0.00
0.00 0.780E+04 0.00
0.00 0.00 0.00
４番目
と
１１番目
と
１７番目
と
７０番目
と
７２７７番目
(ウ)
４５１０番目
と
７６５５番目
(イ)
(ア)
７７４番目と６２７番目
(エ)
３５６１番目

図 7.5: 二次元プロット

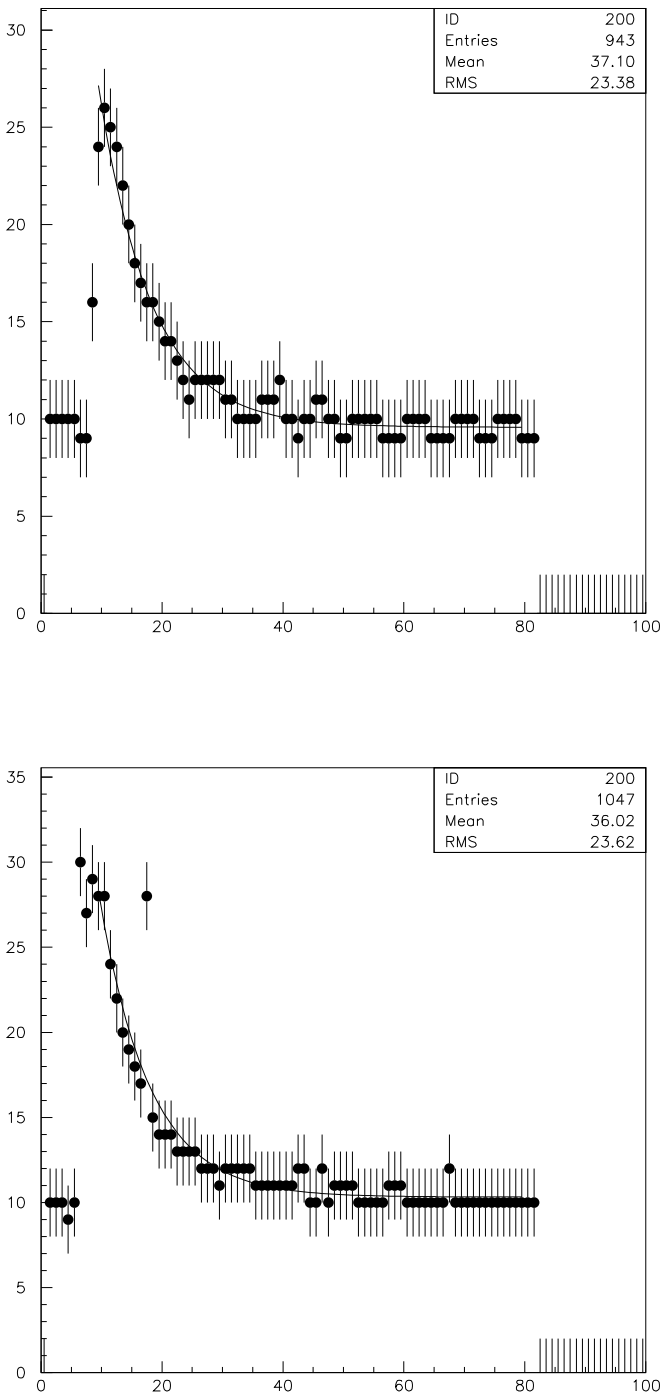

図 7.6: 領域ア その 1(上から 4 番と 11 番)

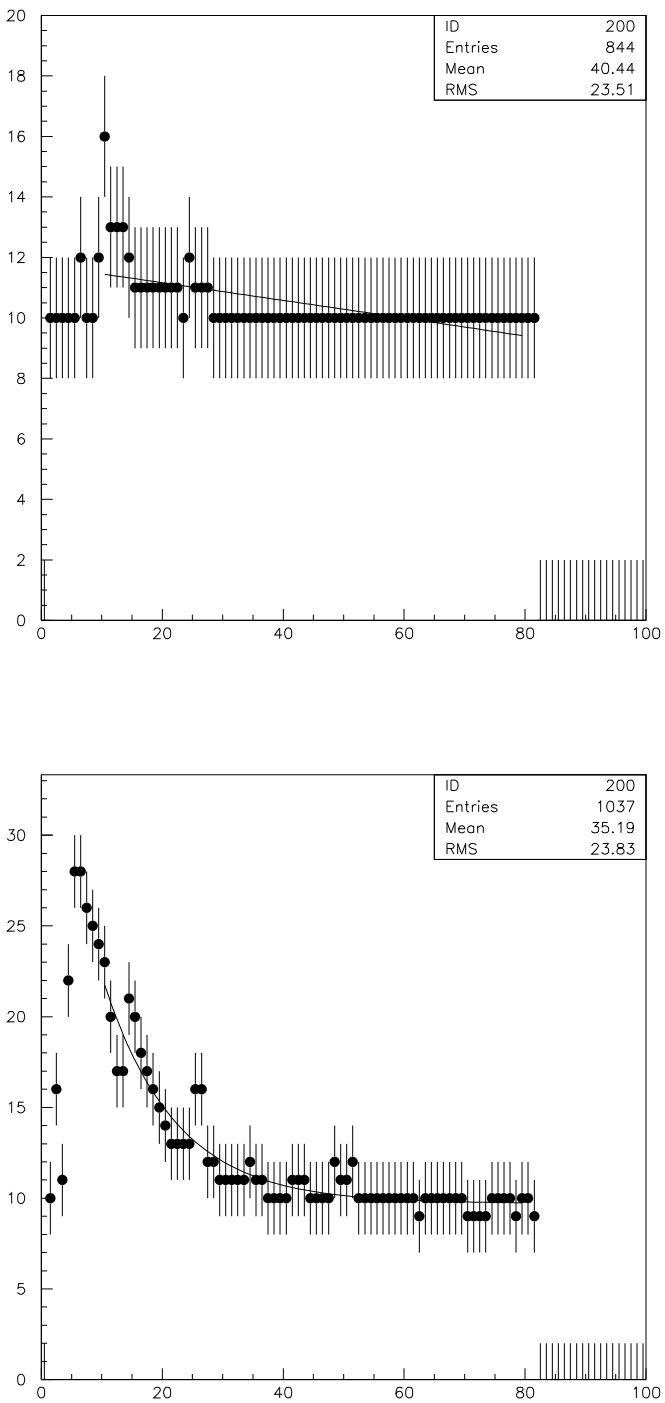

図 7.7: 領域ア その 2(上から 70 番と 17 番)

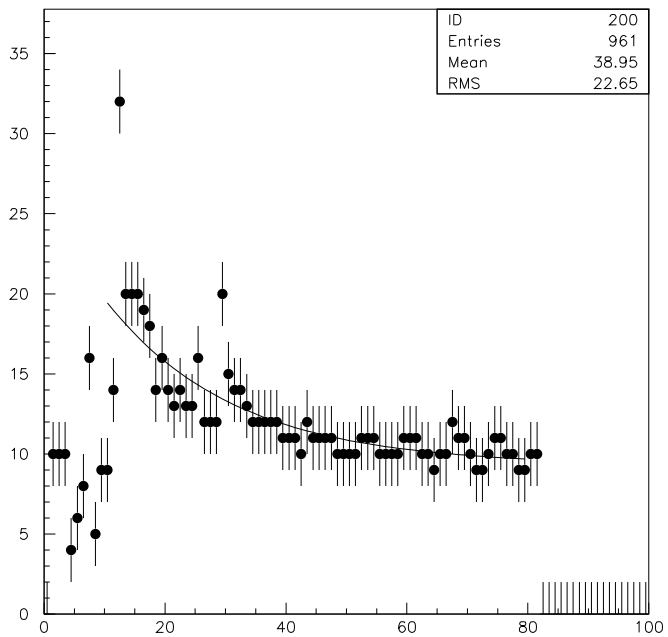

図 7.8: 領域ア その 3(7277 番)

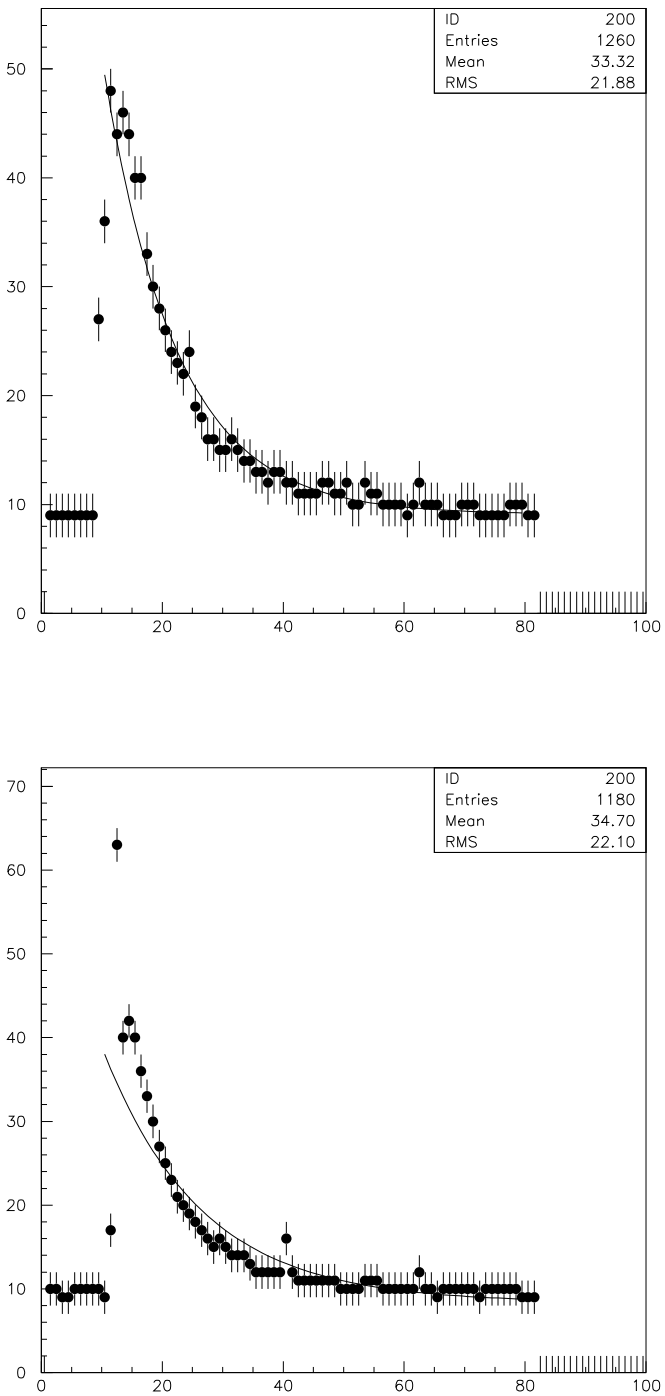

図 7.9: 領域イ (上から 774 番と 5446 番)

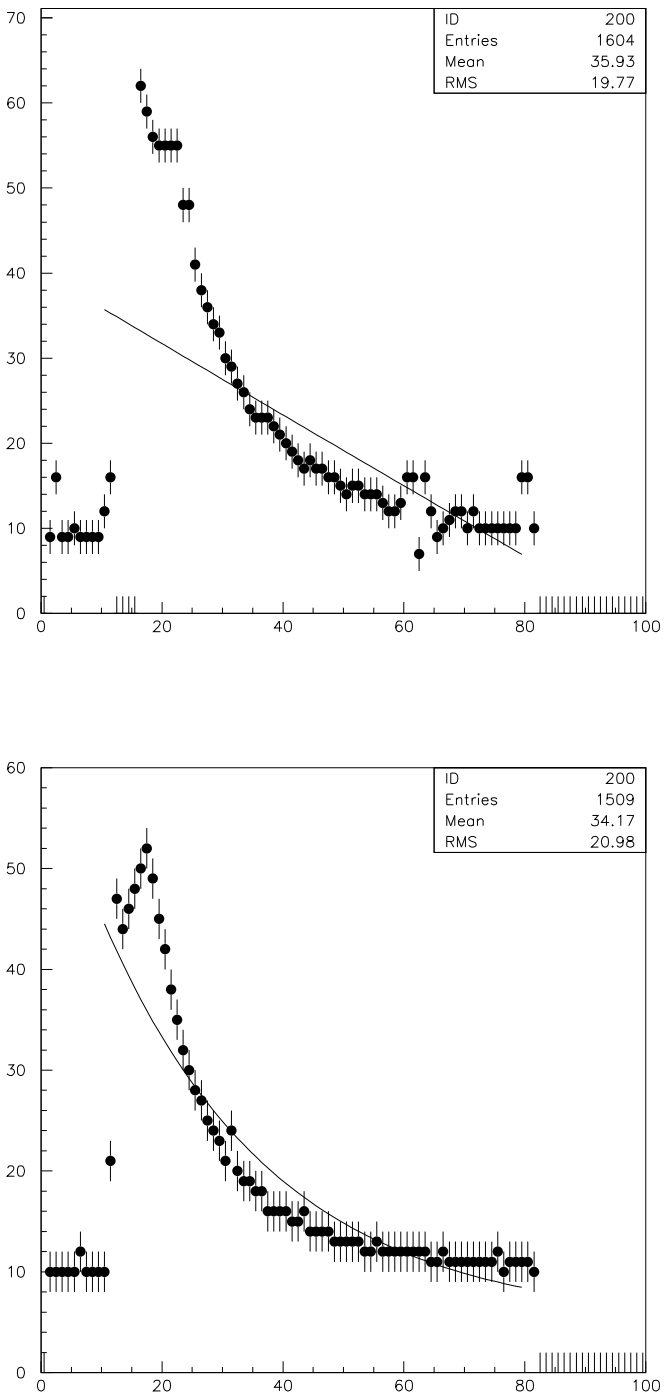

図 7.10: 領域ウ (上から 4510 番と 7655 番)

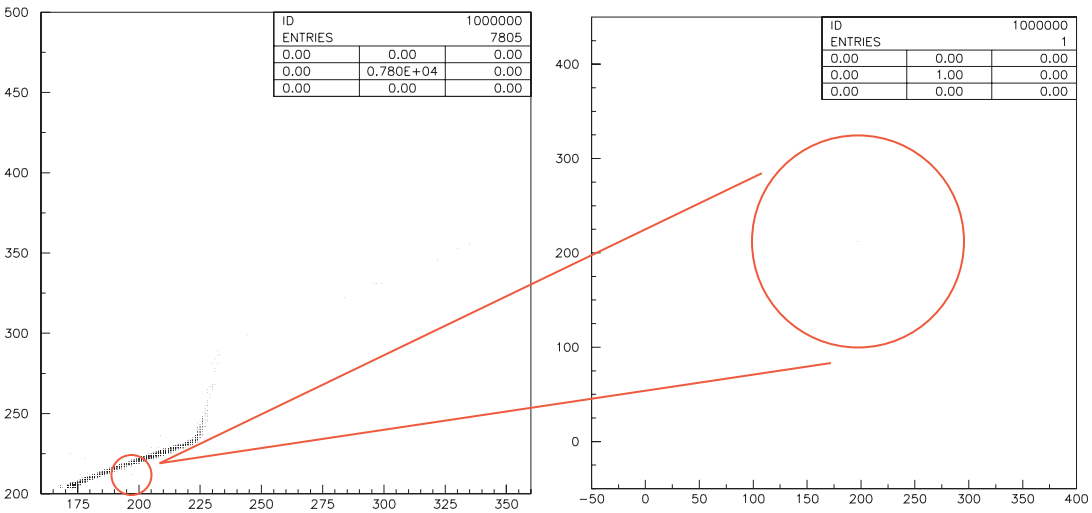

図 7.11: 一個残った様子

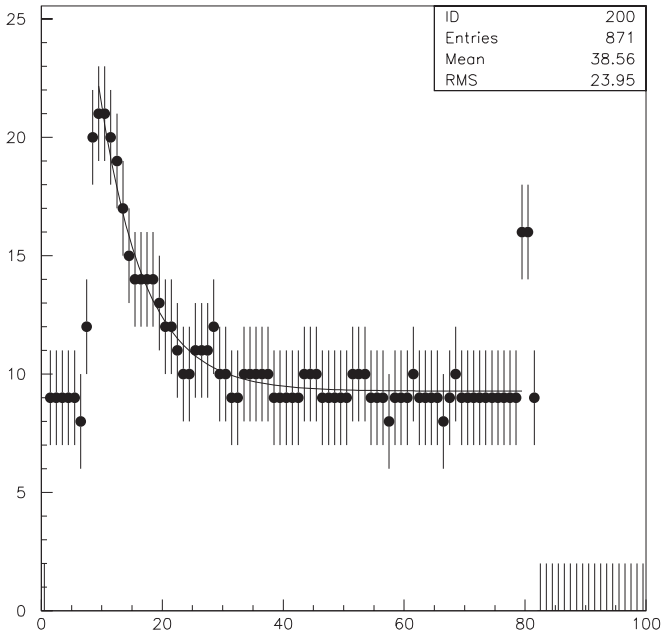

図 7.12: 領域工 (3561 番)

第8章　まとめ

8.1　結果と考察

本実験では、FADC を用いて CsI カウンターをヒットしたミュー粒子の波形を確認することができた。さらに、データ解析のところで示したように、CsI-A の Q モードと V モードの 2 次元プロットの領域アにおいて、崩壊している可能性の高い以下のようなミュー粒子の波形を 1 個確認することができた (図 8.1)。

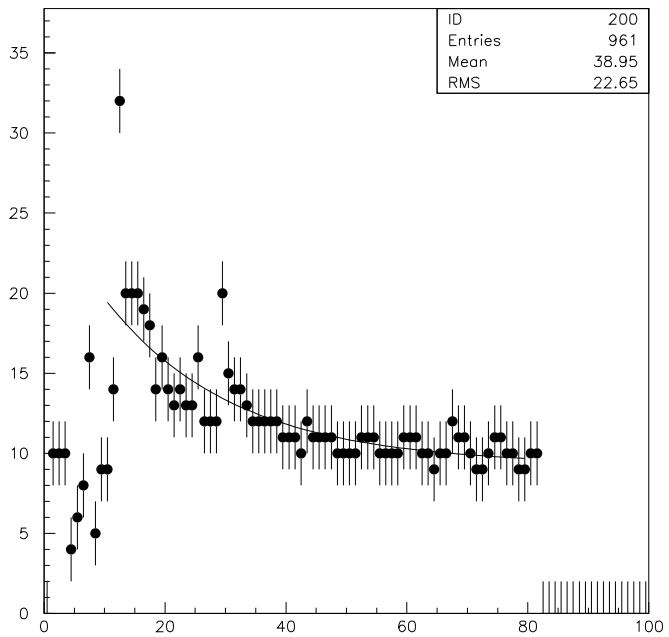

図 8.1: 崩壊している可能性の高いミュー粒子の波形 (領域アの Event number7277 の粒子)

ここで、本実験のいくつかの点について考察してみたいと思う。

まず、CsI の Q モードと V モードの 2 次元プロットについて考える。この二次元プロットは、本来ならばきれいな比例関係になると予測していたが、本実験では、途中で段ずれを起こしていた。この原因として、ADC の Q モードもしくは V モードに異常が考えられる。そこで、横軸にそれぞれ Q モードの値と V モードの値をとり、縦軸に FADC のピークの値をプロットしたグラフを作成した (図 8.2)(図 8.3)。

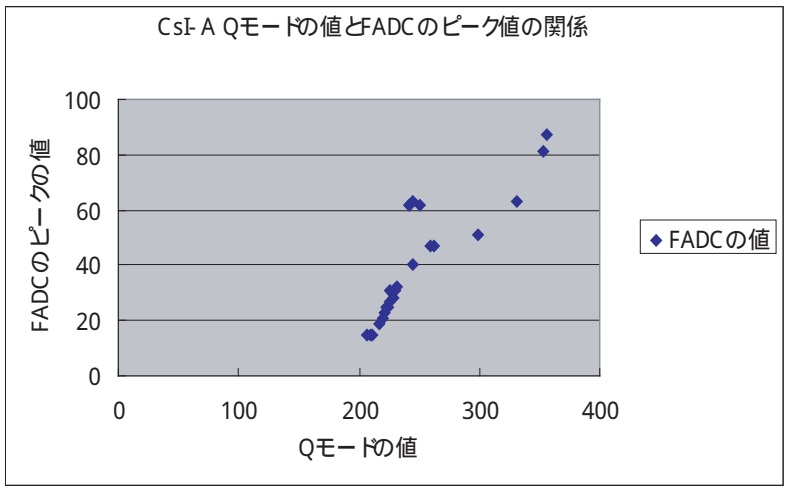

図 8.2: CsI-A Q モードの値と FADC のピーク値の関係

まず、図 8.1 を見てみると、Q モードのグラフが途中から比例関係がくずれていることがわかる。これらは、先程のデータ解析のところで、CsI の Q モードと V モードの 2 次元プロットを調べたときの、領域イと領域ウの粒子にあたる。つまり、先程の 2 次元プロットが途中で段ずれを起こしている部分から Q モードの値と FADC のピーク値の比例関係がくずれていることになる。これより、Q モードの異常があるのではないかと考えられる。

次に、図 8.2 を見てみる。このグラフを見ると、V モードの値と FADC のピーク値がほぼ比例関係をなしているが、いくつかの点だけが比例関係から外れていることがわかる。これらの例外的な粒子は、先程のデータ解析のところで、CsI の Q モードと V モードの 2 次元プロットを調べたときの、領域イの粒子のひとつである。領域イの粒子の FADC で測定

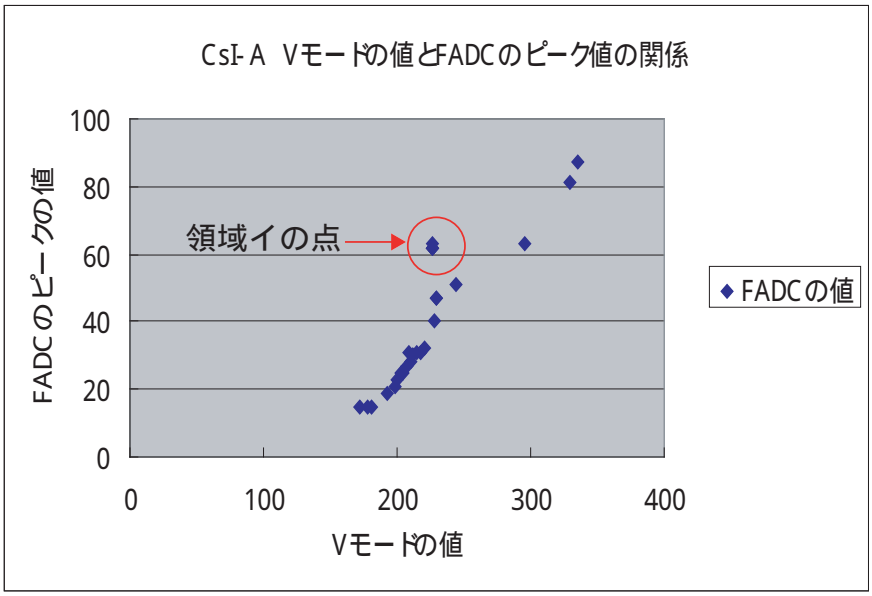

図 8.3: CsI-A V モードの値と FADC のピーク値の関係

された波形には、大きく分けて 2 種類の波形があった。(図 8.4)(図 8.5)。

この 2 つの波形を比べてみると、図 8.4 は一般的な波形であるのに対して、図 8.5 の波形については、そのピークの値がほかの値に比べて非常に大きく、一般的な粒子の波形から外れたところにあることがわかる。このピークの一点を無視して、次に大きい FADC のピーク値、すなわち、きれいな波形の上に乗っている点のうち最も値が大きいものを選ぶと、図 8.3 の比例関係に従うようになる。

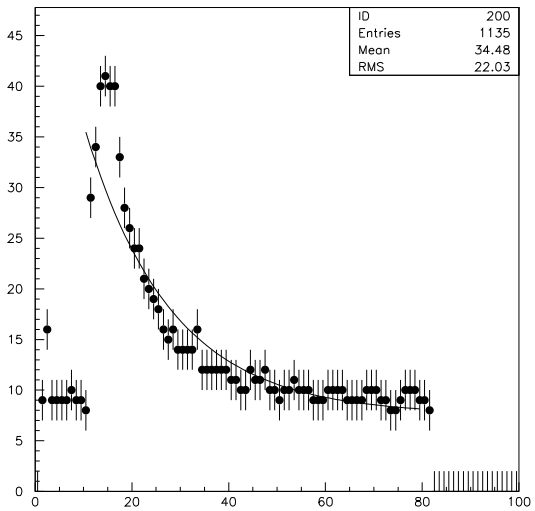

図 8.4: 領域イの波形その 1

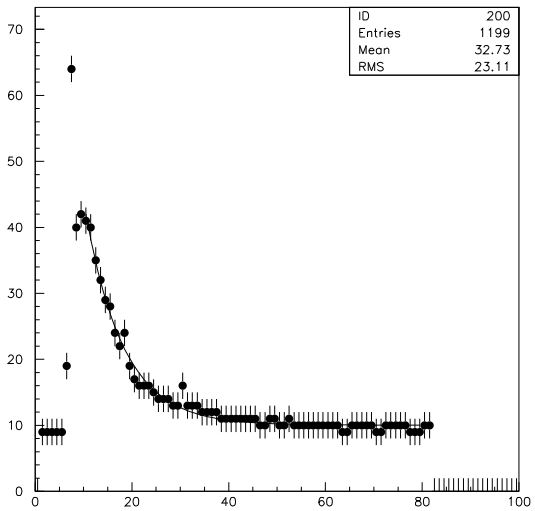

図 8.5: 領域イの波形その 2

次に、より多くの崩壊したミュー粒子の波形を厳密に確認するために、以下の工夫が考えられる。

(1)FADC でのデータ取得間隔が長すぎた点

本実験では、FADC の周波数を２０ MHz に設定した。従って、その周期 (=データ取得間隔) の理論値は５０ nsec となる。しかし、実際の測定では、データ取得間隔は２７０ nsec であった。この理論値と測定値の違いの原因として、FADC 内部の発信器の異常が考えられる。

(2) カウンターとしてタリウムを含む CsI 結晶を用いた点

本実験では、ミュー粒子の崩壊を調べるカウンターとしてタリウムを含む CsI 結晶を用いた。しかし、この結晶中では信号の立ち上がりまでの時間や鳴り終わるまでの時間が比較的長い。そのため、ADC で測定する際にミュー粒子の波形を確認するための十分な時間を確保するこができなかったのではないかと考えられる。信号の立ち上がりまでの時間が比較的速いプラスチックシンチレーター等をカウンターとして用いることが適しているのではないかと考えられる。

(3) データ量が少なかった点

より多くのデータを収集することで、実験の精度を上げる必要があると考えられる。

8.2 参考文献

♠東京大学出版会 河田 燕 著 『物理工学実験 9 放射線計測技術』

♠CQ 出版社 長橋 芳行 著 『A-D/D-A 変換回路の設計』

♠Springer-Verlag 『Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments A How-to Approach』
♠奈良女子大学 理学部物理科学科 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 の寿命の測定』

♠奈良女子大学 物理学特別実験『宇宙線中のミューオンの測定』配布資料
♠KEK 高エネルギー加速器研究機構「宇宙線を見る 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中多くの時間をさいて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いただいた野口先生、宮林先生、諸先輩方に心より感謝しております。この一年を大変充実して過ごすことができました。この研究室で学んだ様々なことをこれからの生活の糧とし、毎日を過ごしていきたい考えています。
すばらしい日々を本当にありがとうございました。