

宇宙線  $\mu$  粒子の速度測定

小松成亘      羽山紀生

2003年4月1日

## 概要

プラスチックシンチレーターと光電子増倍管からなる検出器を用いて、我々の検出器をつき抜ける粒子、止まる粒子それぞれの速度を測定した。結果として検出器をつき抜ける粒子の速度

$$\beta = 1.09^{+0.16}_{-0.12}, \quad 1.18^{+0.18}_{-0.14}, \quad 1.03^{+0.15}_{0.12}$$

検出器内で止まる粒子の速度

$$\beta = 0.602^{+0.049}_{-0.079}, \quad 0.634^{+0.077}_{-0.078}$$

を得た

# 目次

第1章	イントロダクション	4
1.1	背景	4
1.2	動機、目的	4
第2章	検出器	5
2.1	概略	5
2.2	実験器具	5
2.3	セットアップ	6
第3章	較正	7
3.1	検出器の電圧設定	7
3.2	TDCの較正	8
3.3	スルーイングの補正	9
3.4	電気回路やケーブルによる時間差の較正	11
第4章	ロジック	14
4.1	トリガー	14
4.2	測定量	14
4.3	ロジック図	14
第5章	データ解析	18
5.1	データ	18
5.2	イベント選択	18
5.2.1	ノイズの除去	18
5.2.2	つき抜け粒子	18
5.2.3	ストップ粒子	18
5.3	TOFの算出	19
第6章	結果・考察	20
6.1	粒子の速度分布	20
6.2	速度と分解能	21
6.3	結論	21
6.4	謝辞	23

## 目 次

2.1	検出器	5
2.2	検出器のセットアップ図	6
3.1	プラトー曲線	7
3.2	TDC 較正のロジック	8
3.3	時間と TDC の ch の関係	9
3.4	スルーイング	10
3.5	本当に測定したい時間と TDC で測定した時間の関係	11
3.6	ADC の値と TDC の値の関係	12
3.7	スルーイング補正後	13
4.1	トリガーロジック	15
4.2	ADC ロジック	16
4.3	F TDC ロジック	17
6.1	つき抜け粒子の TOF 分布	24
6.2	つき抜け粒子の $\beta$ 分布	25
6.3	ストップ粒子の TOF 分布	26
6.4	ストップ粒子の $\beta$ 分布	27

# 表 目 次

2.1	CAMAC モジュール . . . . .	6
3.1	各検出器の電圧 . . . . .	8
3.2	各検出器の $\alpha$ の値 . . . . .	11
3.3	電気回路やケーブルによる検出器間の時間差 . . . . .	13

# 第1章 イントロダクション

## 1.1 背景

地球には陽子を主とする一次宇宙線が 1 GeV から  $10^{10}$  GeV という広いエネルギー分布を持って降り注いでいる。それらは厚い大気層で核相互作用により核子、K、パイオン ( $\pi$ ) などの 2 次宇宙線を作り出す。それらのうち、主に荷電パイオンの崩壊によってミューオン ( $\mu$ ) とミューニュートリノ ( $\nu_\mu$ ) が生成される。崩壊モードは以下の通りである。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$$

生成されたミューオンはその透過性のため、地表付近における 2 次宇宙線の 7 割以上を占める。

## 1.2 動機、目的

以上のことをふまえ、以下の二つを測定、検証することにした。

- 我々の検出器を突き抜けたミューオンの速度の測定。
- 我々の検出器内で止まったミューオンの速度の測定。

## 第2章 検出器

### 2.1 概略

我々の目的は宇宙線の速度を測定することである。おおまかな手法としては、なんらかの宇宙線が通過したさいに電気信号を出すプラスチックシンチレーションカウンターを一定距離離して設置し、その電気信号の時間差とプラスチックシンチレーションカウンター間の距離から粒子の速度を求める。

以下で具体的に実験で用いた器具、それらのセットアップ、ロジック等について説明する。

### 2.2 実験器具

まず、使用した実験器具をあげる。

- プラスチックシンチレーター（大）（100cm × 33cm × 1cm） 3枚
- プラスチックシンチレーター（小）（25cm × 33cm × 1cm） 6枚
- ライトガイド 9個
- 光電子増倍管（PMT） 9本

上にあげた、プラスチックシンチレーター、ライトガイド、光電子増倍管の三部分からなる検出器を実験では用いた。検出器の模式図を図 2.1 に示す。

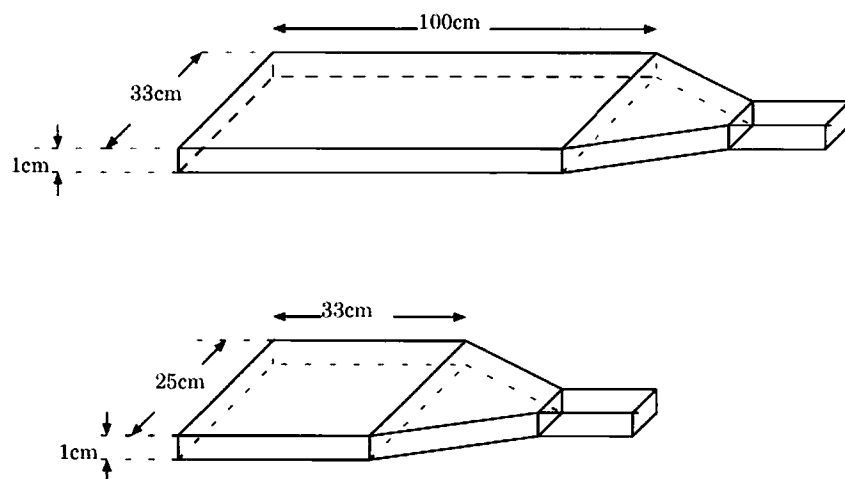


図 2.1: 検出器の模式図

次に実験に用いた CAMAC モジュールを表 2.1 にまとめる。

機種	品名	bit 数	1ch	full scale
TDC	KEK TYPE-1	16bit	44.57psec	102nsec
ADC	Le Croy 2249W	11bit	0.25pC	512pC

表 2.1: 使用した CAMAC モジュール

### 2.3 セットアップ

図 2.1 の検出器大 3 枚、小 6 枚を図 2.2 のようにセットアップした。一番上に設置した検出器 M1 を通った粒子が下部に重ねて設置した検出器 M 2 ~ 5 を通るまでの時間と各検出器間との距離から粒子の速度を求める。検出器 1、2 はノイズを減らすため。検出器 M 2 ~ 5 と検出器 3 を図のように重ねたのは、ノイズを減らすため、検出器内で止まる粒子を判別するためである。

粒子の飛行時間を長くしたほうが時間分解能が上がるので、検出器 M 1 と検出器 M 2 ~ 5 の距離はできるだけはなした。

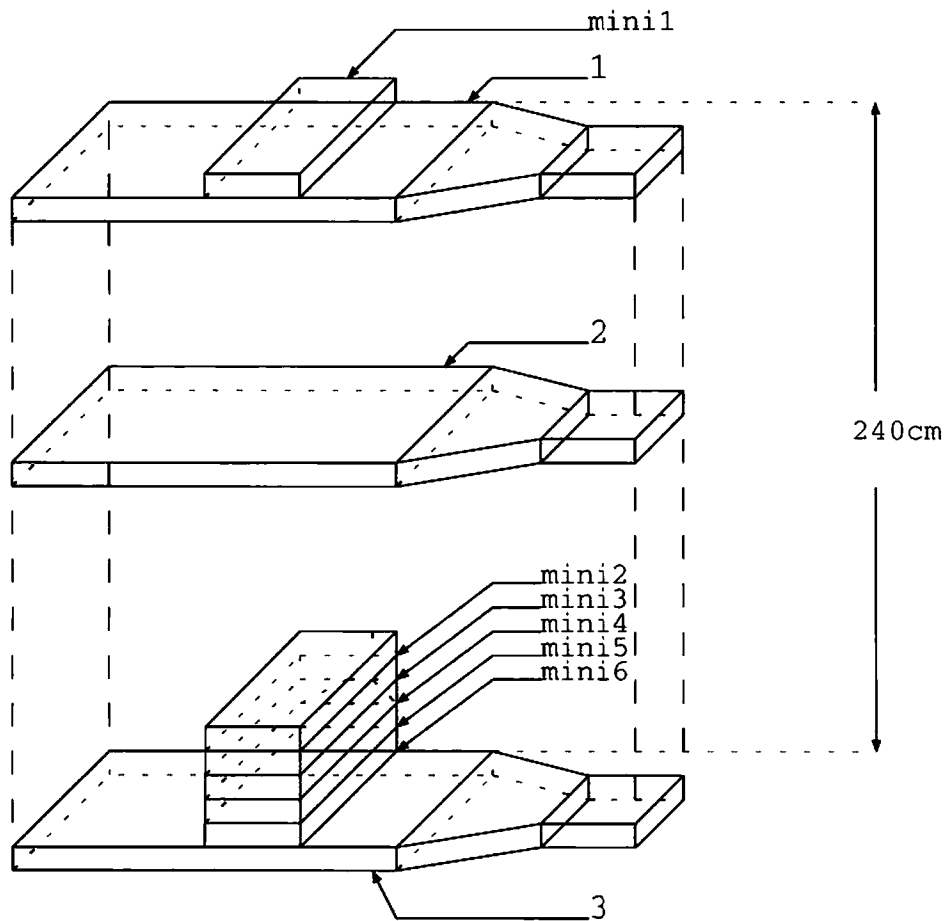


図 2.2: 検出器のセットアップ図



## 第3章 較正

この章では各器具の設定や較正について説明する。

### 3.1 検出器の電圧設定

粒子の検出を過不足なく行なうため、検出器のPMTに印加する電圧はプラトー領域にとる必要がある。また、それは各PMTごとに異なるので、各PMTについてプラトー領域を測定し、印加する電圧を決定した。

測定方法について述べる。まず4枚の検出器を重ね外側の3枚のPMTにかける電圧をプラトー領域の電圧で固定し、それらに挟まれた検出器に印加する電圧を徐々に上げていき、それぞれの電圧でのカウント数/sを測定することで、その検出器のプラトー領域を求めた。

一例を図3.1に示す。

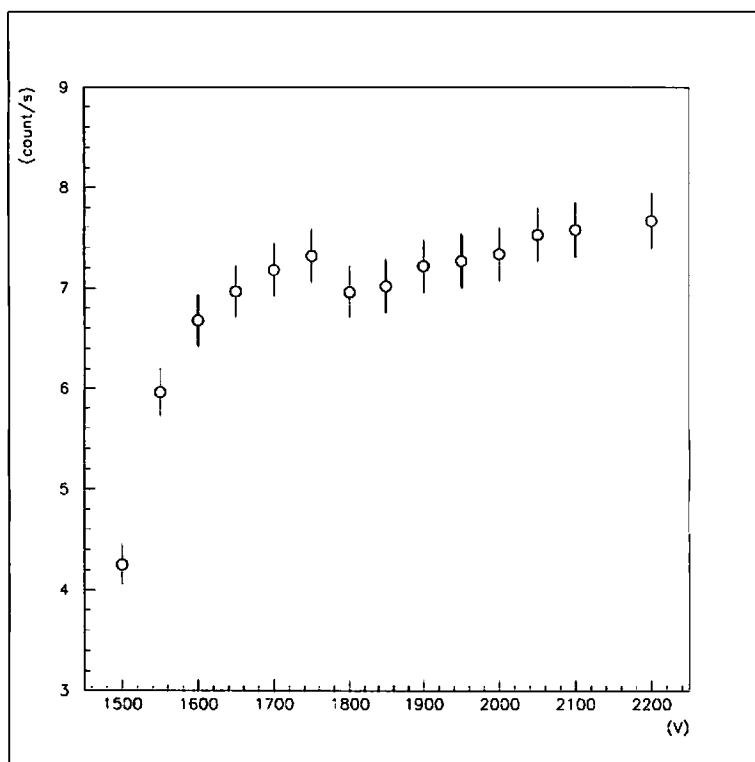


図 3.1: プラトー曲線

この図では1800V以上をプラトー領域と定め、印加する電圧を1860Vに定めた。

表 3.1 に各検出器の PMT に印加した電圧を示す。

検出器	電圧 (V)
1	2480
2	2500
3	2500
mini1	1700
mini2	1780
mini3	1700
mini4	1860
mini5	1730
mini6	1900

表 3.1: 各検出器の電圧

### 3.2 TDC の較正

TDC は時間情報を秒単位ではなく、TDC の ch 数で表示するので粒子の飛行時間をするために、この ch 数と時間の対応について、また ch 数と時間との間に線形性が成り立っているかを調べねばならない。

まずクロックジェネレータの信号を二つに分け、一方を START 信号として TDC に入れ、もう一方をケーブル等でディレイをかけ STOP 信号として TDC に入れた。

そのロジック図を下に示す。

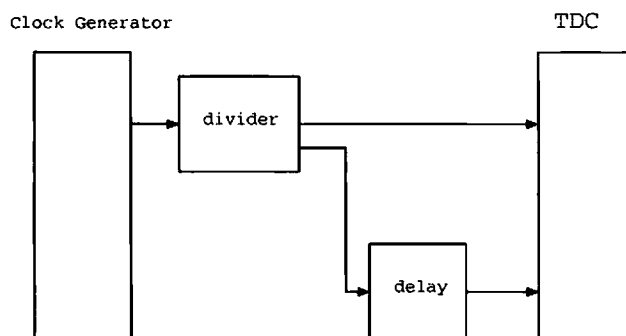


図 3.2: TDC 較正のロジック

このロジックでかけるディレイの長さを変え、その時の TDC の ch 数を測定することで、時間と TDC の ch 数の関係を調べた。

時間と ch 数の関係を表すグラフ図 3.3 に示す。このグラフから

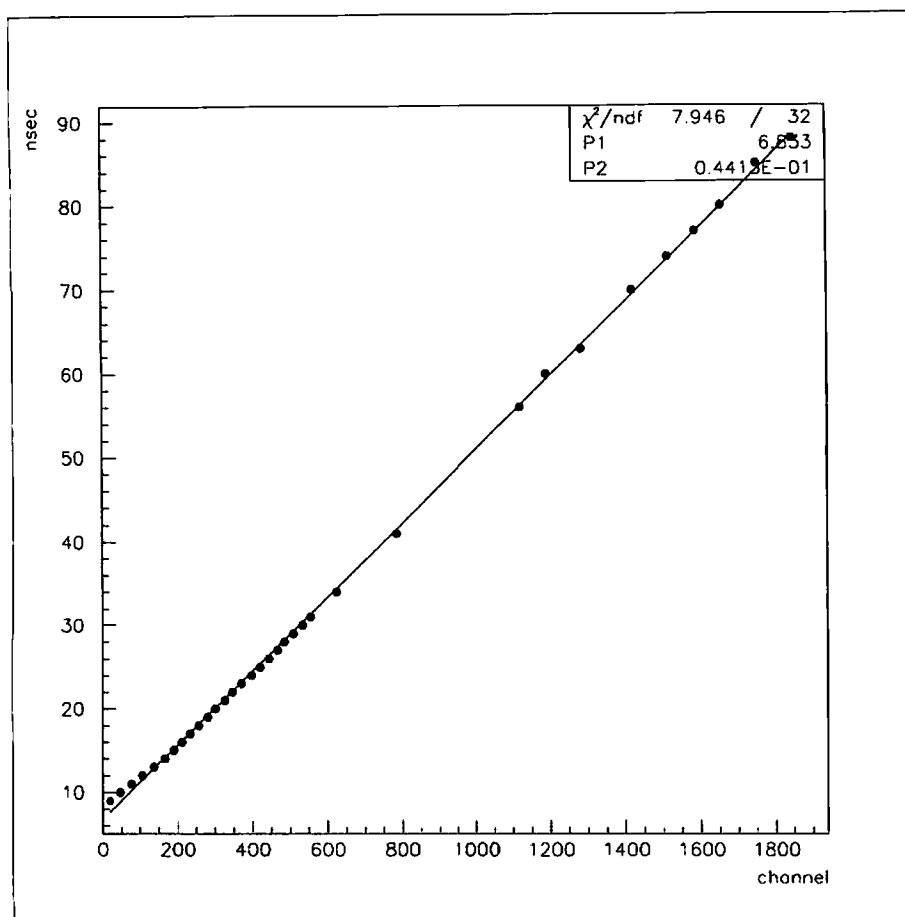


図 3.3: 時間と TDC の ch の関係

TDC : 44.15(psec/ch)

である。

また、時間と TDC の ch の間には線形性がよく成り立っていることがわかる。ただ、およそ 15nsec 以下で線形性が崩れてしまっているため、この領域は実験で使わないようにした。

### 3.3 スルーイングの補正

**概要** シンチレーションカウンターから送られてくるアナログパルスを、ディスクリミネーターで区形波に変換するさいに、ディスクリミネーターはアナログパルスが threshold を越えた時に区形波を出すので、図 3.4 のように  $\Delta t$  の時間差生じてしまう。また、アナログパルスが大きいと早く、小さいと遅く threshold にかかるので、TDC で測定した時間がパルスの大きさによって変化する。この現象をスルーイングといい、時間分解能が悪くなるので補正する必要がある。

アナログパルスが立ち上がってから threshold にかかるまでの時間を  $\Delta t$ 、アナログパルスの高さを  $h$  とする。PMT からだされるアナログパルスはパルス幅がほぼ一定なので、アナログパルスを低辺一定の三角形で近似すると、 $\alpha$  を定数として

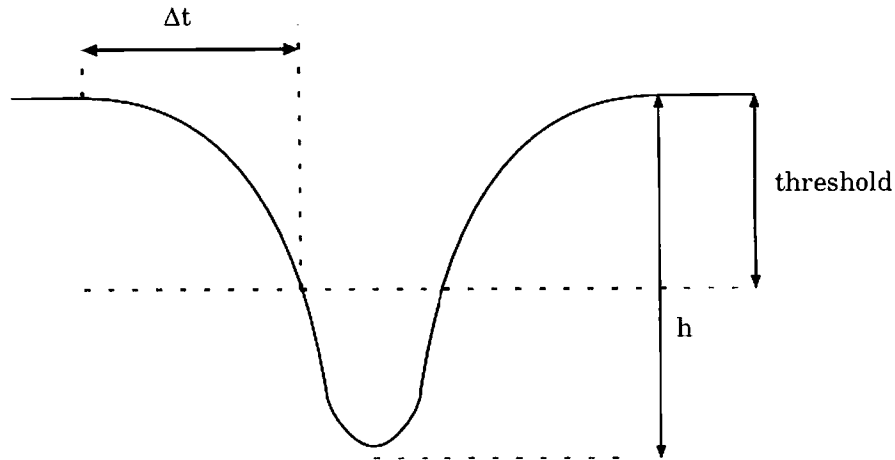


図 3.4: アナログパルスの波形による測定時間のずれ

$$\Delta t \simeq \frac{\alpha'}{h}$$

となる。hは三角形の面積つまりADCの値に被例するので、 $\alpha$ を定数として

$$\Delta t \simeq \frac{\alpha'}{ADC}$$

となる。TDCで時間を測定する時は図3.5のようにスタートパルスとストップパルスの両方がスルーイングするので本当に測定したい時間をtとしてbegincenter

$$TDC \simeq t - \frac{\alpha_{start}}{ADC_{start}} + \frac{\alpha_{stop}}{ADC_{stop}} \quad (3.1)$$

endcenter となり、この定数 $\alpha$ を求めれば、スルーイングの補正ができる。

$\alpha$ の測定  $\alpha_{start}$ を求めたいのであれば、tと $\frac{\alpha_{stop}}{ADC_{stop}}$ が一定であれば、式3.1より $\frac{1}{ADC_{start}}$ を横軸にそのADCの値に対応するTDCの値を縦軸にとって描いたグラフの傾きから $\alpha_{start}$ が求まるはずである。

まずtを一定にするために

- $\alpha$ を測定したい検出器どうしをすきまなく重ねた
- 検出器1を図2.2と同じように最上部に置き、 $\alpha$ を測定したい検出器を下部に設置し粒子がほぼ垂直に入ってくるイベントのみを取った。(重ねた検出器で粒子が通る位置を同じにし、プラスチックシンチレーション中の光の移動時間の差による測定値のずれをなくすため。)

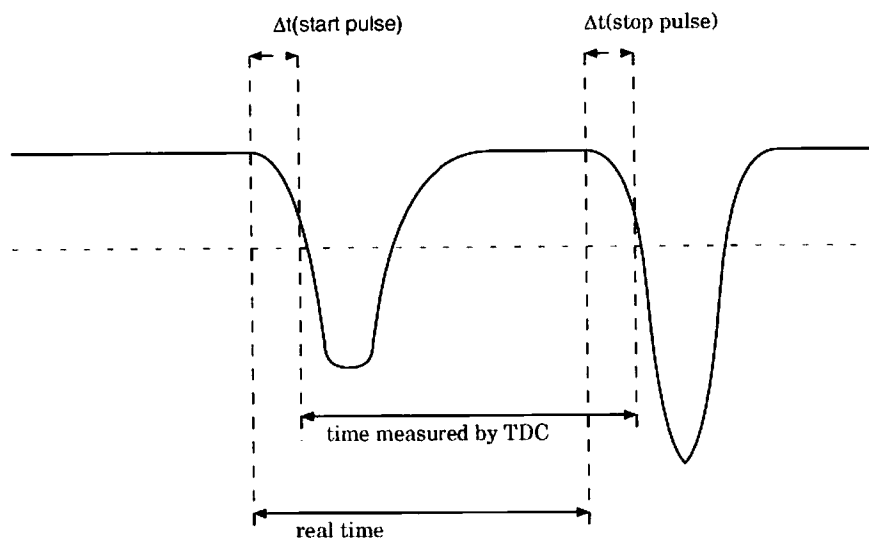


図 3.5: 本当に測定したい時間と TDC で測定した時間の関係

$\frac{1}{ADC_{top}}$  に関しては、データ測定後にパソコンで  $ADC_{stop}$  の値が指定したものであるイベントだけを選び出すことで一定とした。

そのようにして、得られたデータを実際にプロットしたものを図 3.6 に示す。

このように、 $1 / ADC$  と TDC の値には相関関係があることがわかりこのグラフを直線でフィットし、その傾きが  $\alpha$  の値となる。

次にこのようにして得られた  $\alpha$  を使って同じデータを補正したものを図 3.7 に示す。

このように TDC の値が ADC の値に関係なくほぼ一定となり補正ができていることがわかる。

このようにして、求めた各検出器の  $\alpha$  を表 3.2 にまとめる。

mini1	7327
mini2	5853
mini3	6749
mini4	5466
mini5	7223
mini6	5841

表 3.2: 各検出器の  $\alpha$  の値

### 3.4 電気回路やケーブルによる時間差の較正

我々が得る TDC から得るスターとパルスとストップパルスの時間差は

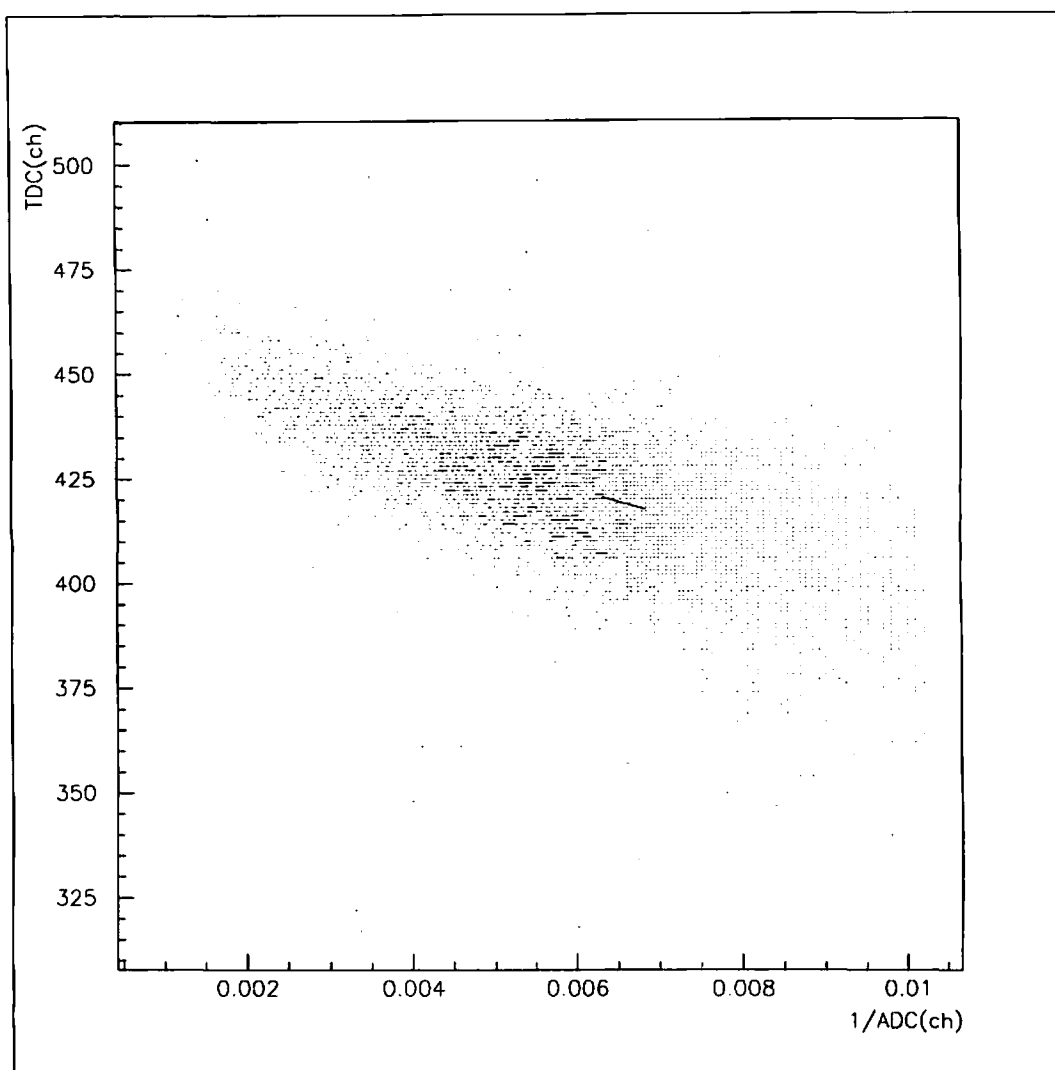


図 3.6: ADC の値と TDC の値の関係

TDC の値 = (粒子の飛行時間) + (スタートパルスとストップパルスが通る電気回路やケーブルの長さによる時間差)

となっているので、粒子の飛行時間を知るにはこの電気回路やケーブルによる時間差を測定して TDC の値から引かなくてはならない。

時間差を測定したい検出器を二枚すきまなく重ね、粒子の飛行時間を 0 とした時の TDC の値がこの電気回路やケーブルによる時間差に当たる。

このようにして測定した、検出器 mini1 と mini2,4,5,6 の時間差を表 3.3 にまとめる。

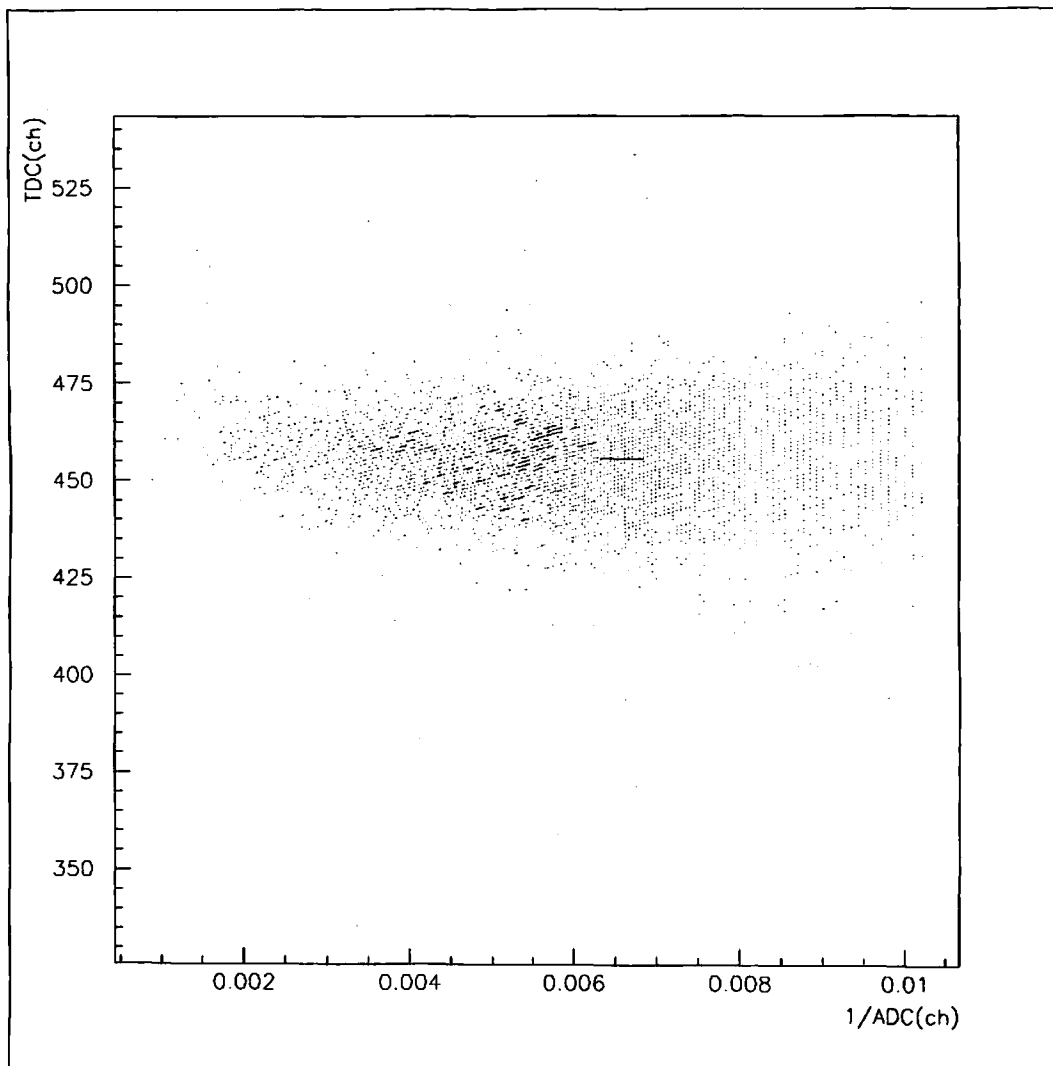


図 3.7:  $\alpha$  を使って補正したデータ

検出器	TDC/ch	分解能 ( $\sigma$ )/ch
<i>mini2</i>	1491	8.5
<i>mini4</i>	1505	8.8
<i>mini5</i>	1678	7.6
<i>mini6</i>	1665	10.9

表 3.3: 電気回路やケーブルの長さによる *mini1* と *mini2,4,5,6* の時間差

## 第4章 ロジック

### 4.1 トリガー

トリガー条件は以下のようにした。

$$\text{mini 1} \cap 1 \cap 2 \cap \text{mini 2}$$

### 4.2 測定量

この実験では、上記のトリガーで以下の量を測定した。

- ADC (mini 1～6) …CAMACモジュールのADCを8チャンネル用いてとったデータ。トリガーの信号をゲートに用いて、その中に入ったPMTからのアナログパルスの面積にあたる量をカウントしたもの。オフライン解析時にイベントの選択に用いた。
- FTDC (mini 2、4～6) …CAMACモジュールのFTDCを4チャンネル用いてとったデータ。トリガーの信号をスタートに用いて、mini 2、mini 4、mini 5、mini 6の信号がくるまでの時間をカウントしたもの。

### 4.3 ロジック図

以上の量を測定したロジックを図に示す。

まず、トリガー条件を満たすロジックがあり、そこからトリガー信号を2つに分け、それぞれADCのゲート信号、FTDCのスタート信号として用いる。

- 図はトリガー信号が出るまでのロジックである。コインシデンスをとるモジュールでは入力する信号が重なるようにタイミングをあわせた。また、mini 1の信号が一番最後にコインシデンスに入るようにすることで、mini 1の入るタイミングでトリガー信号がでるようにしてある。



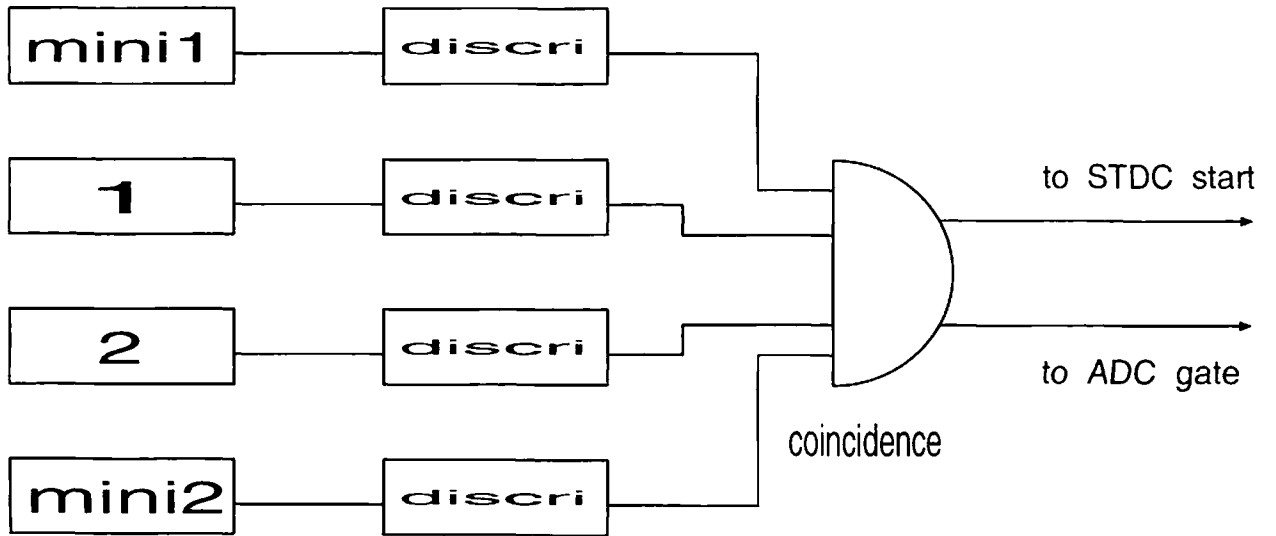


図 4.1: トリガーロジック

- 図はADCを測定するロジックである。トリガーをかけたPMTからのアナログパルスがすべてゲートに入るようにケーブルでタイミングをあわせた。

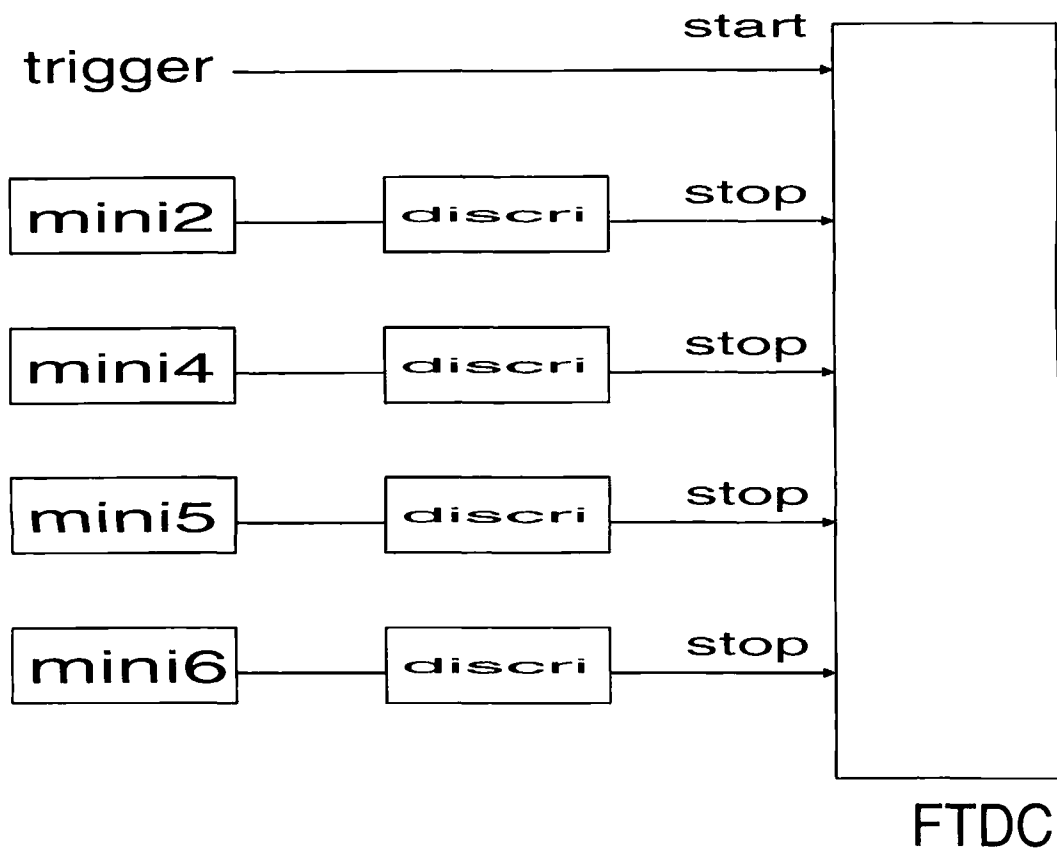


図 4.2: ADCロジック

- 図はFTDCを測定するロジックである。トリガー信号をスタート信号に用いて、それより遅くストップ信号がくるようにケーブルでタイミングをあわせた。トリガー信号は mini 1 の入るタイミングで出るようになっている。

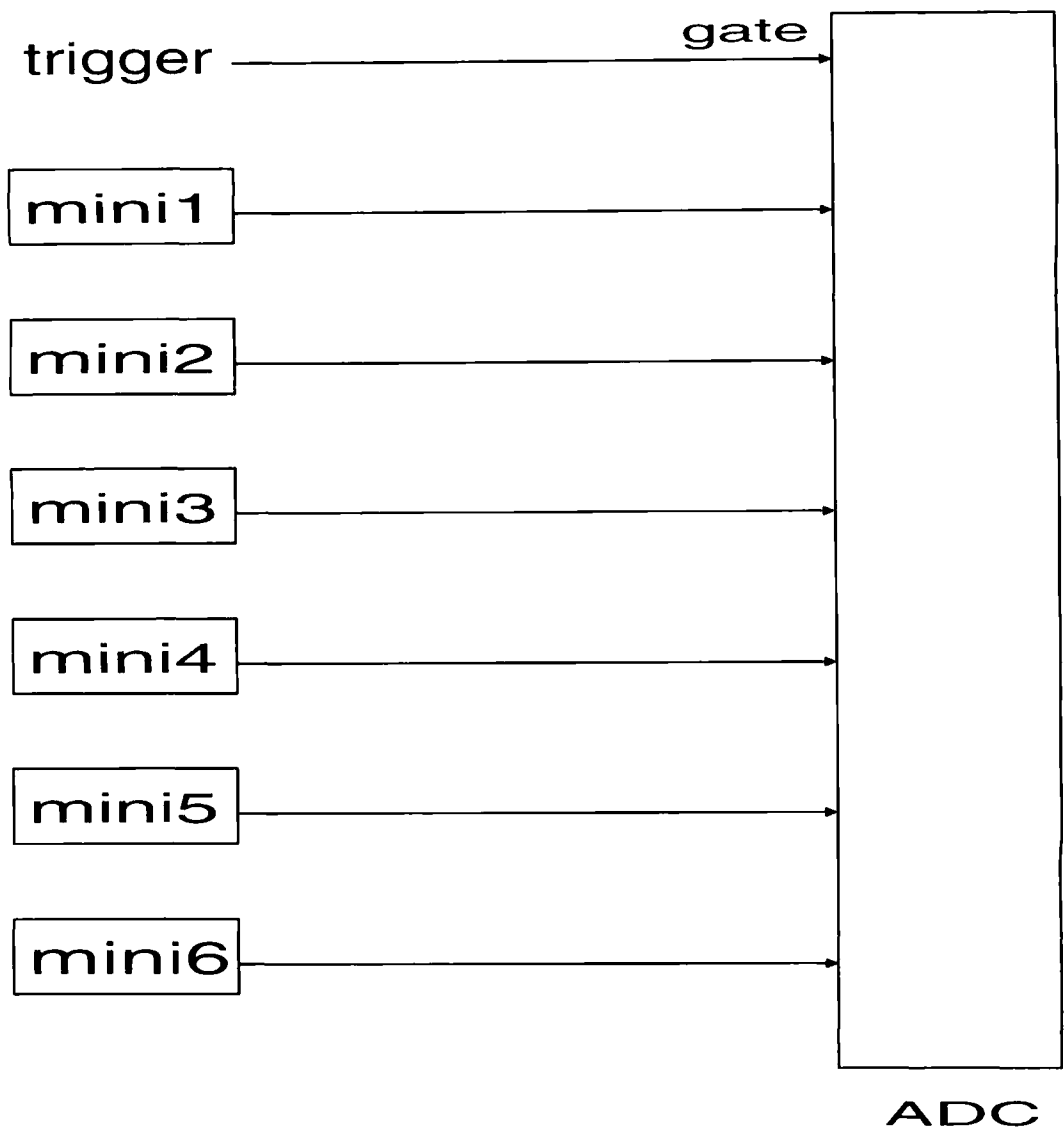


図 4.3: FTDCロジック

## 第5章 データ解析

この章ではデータ数、オフラインでのイベント選択、TOFを算出する方法について述べる。

### 5.1 データ

今回の実験のデータは2003年2月24日から3月2日までの527940秒で測定した。総トリガーイベント数は49737イベントで、そのうち、つき抜け粒子のイベント数は22127イベント、ストップ粒子のイベント数は653イベントであった。

### 5.2 イベント選択

まず、各イベントがどのようなイベントかをオフライン解析で判断し、粒子がすべてのシンチをつき抜けたイベントと、粒子がシンチ mini 4でストップしたイベントを選択する。

#### 5.2.1 ノイズの除去

以下の条件を1つでも満たすものは除外した。

- FTDCの値が0である。
- mini 2、mini 4のFTDCがオーバーフローしている。
- ADCの値がペDESTALより小さい。
- ADCの値がスルーイング補正の条件にした範囲外。

#### 5.2.2 つき抜け粒子

除かれなかったもののうち、以下の条件を満たすものをつき抜け粒子のイベントとした。

- mini 2～6のADCの値がペDESTALよりも大きい

#### 5.2.3 ストップ粒子

除かれなかったもののうち、以下の条件を満たすものをストップ粒子のイベントとした。

- mini 2、mini 3、mini 4のADCの値がペDESTALよりも大きい
- mini 5、mini 6のADCの値がペDESTALの値

### 5.3 TOFの算出

得られたTDCをそのまま用いたのでは正確なTOFを求めることはできない。以下のような補正が必要である。

- それぞれのPMTの特性の補正
- スルーイングの補正

これらの補正については、三章でのべたとおりである。

#### $\beta$ の算出

測定したFTDCの値に以上の補正をすることでTOFを求める。

また、mini 2、mini 4までのそれぞれの距離Lと得られたTOFから $\beta$ も計算することができる。 $\beta$ は

$$\beta = \frac{L/TOF}{c}$$

となる。

## 第6章 結果・考察

この章では先に述べた解析方法に従って求めたTOF分布、 $\beta$ 分布を示す。そして、それらの分布と分解能、速度についての考察をする。

### 6.1 粒子の速度分布

データ解析の章で述べた方法で求めたTOF分布、 $\beta$ 分布を示す。

## 6.2 速度と分解能

この実験において、時間分解能は有効イベントのTOFの分布の $\sigma$ で与えられる。つき抜け粒子のTOF分布をGaussianでフィットしたものから、分解能すなわち $\sigma$ と分布の中心値が求められる。

これから、つき抜け粒子の速度を求めると、

$$\text{mini 1 mini 2間で測定したもの } \beta = 1.09^{+0.16}_{-0.12}$$

$$\text{mini 1 mini 4間で測定したもの } \beta = 1.18^{+0.18}_{-0.14}$$

$$\text{mini 1 mini 6間で測定したもの } \beta = 1.03^{+0.15}_{-0.12}$$

一方、ストップ粒子の $\beta$ 分布であるが、二つのピークがあらわれ、一方はつき抜け粒子の $\beta$ 分布と同じ形のものが見られる。これは、何らかの理由でストップ粒子として選択したデータの中に、つき抜け粒子のデータが含まれたものと考えられるので、もう一方の山に含まれるものをストップ粒子のデータと考えた。

このデータ数は少なく統計的に扱うのは困難であるので、すべてのイベントから求めた速度の平均値と最大値、最小値から、mini 4でストップした粒子の速度は

$$\text{mini 1 mini 2間で測定したもの } \beta = 0.602^{+0.049}_{-0.079}$$

$$\text{mini 1 mini 4間で測定したもの } \beta = 0.634^{+0.077}_{-0.078}$$

## 6.3 結論

我々は宇宙線ミュオン<sup>1</sup>の地上付近での速度、また、シンチレータ<sup>2</sup>中で停止するミュオンの速度を測定した。

つき抜けの粒子の速度

$$\beta = 1.09^{+0.16}_{-0.12}$$

$$\beta = 1.18^{+0.18}_{-0.14}$$

$$\beta = 1.03^{+0.15}_{-0.12}$$

ストップする粒子の速度

$$\beta = 0.602^{+0.049}_{-0.079}$$

$$\beta = 0.634^{+0.077}_{-0.078}$$

今回の実験では $\beta$ が1を超える結果となってしまったが、実験の精度をあげるために、より多くのデータを収集することや、セットアップの工夫などによって粒子のシンチレータを通過する位置の影響を減らすといったことが改良点として考えられる

## 関連図書

1. 1998年度長島研究室4年生卒業論文
2. 1999年度長島研究室4年生卒業論文
3. 2000年度長島研究室4年生卒業論文
4. 2001年度山中研究室4年生卒業論文



## 6.4 謝辞

まず初めに、今回このような実験を行う機会と物理学を始めとした様々な教養を我々に与えてくださった山中卓先生に深くお礼申し上げます。

秘書の杉本奈美子さんには、事務関係の事でたいへんお世話になりました。また気軽に我々に話しかけてくださり、研究生活を楽しくしていただきました。ありがとうございました。

山中研究室の博士課程に在学中の北條さん、小寺さん、三宅さん、原さん、坂下さん、修士課程に在学中の池井さん、池本さん、大場さん、竹下さん、玉井さん、柴田さん、田中さん、には実験のことから日常的なことまでお世話になりました。先輩方の手を止めてしまうことも何度もありましたが、快く教えてくださいました。本当にありがとうございました。

最後になりましたが、原隆宣先生には多忙にも関わらず、実験の基礎や物理学のことからコンピューターのことまで何も知らない我々に丁寧に教えていただき心から感謝しております。本当にありがとうございました。

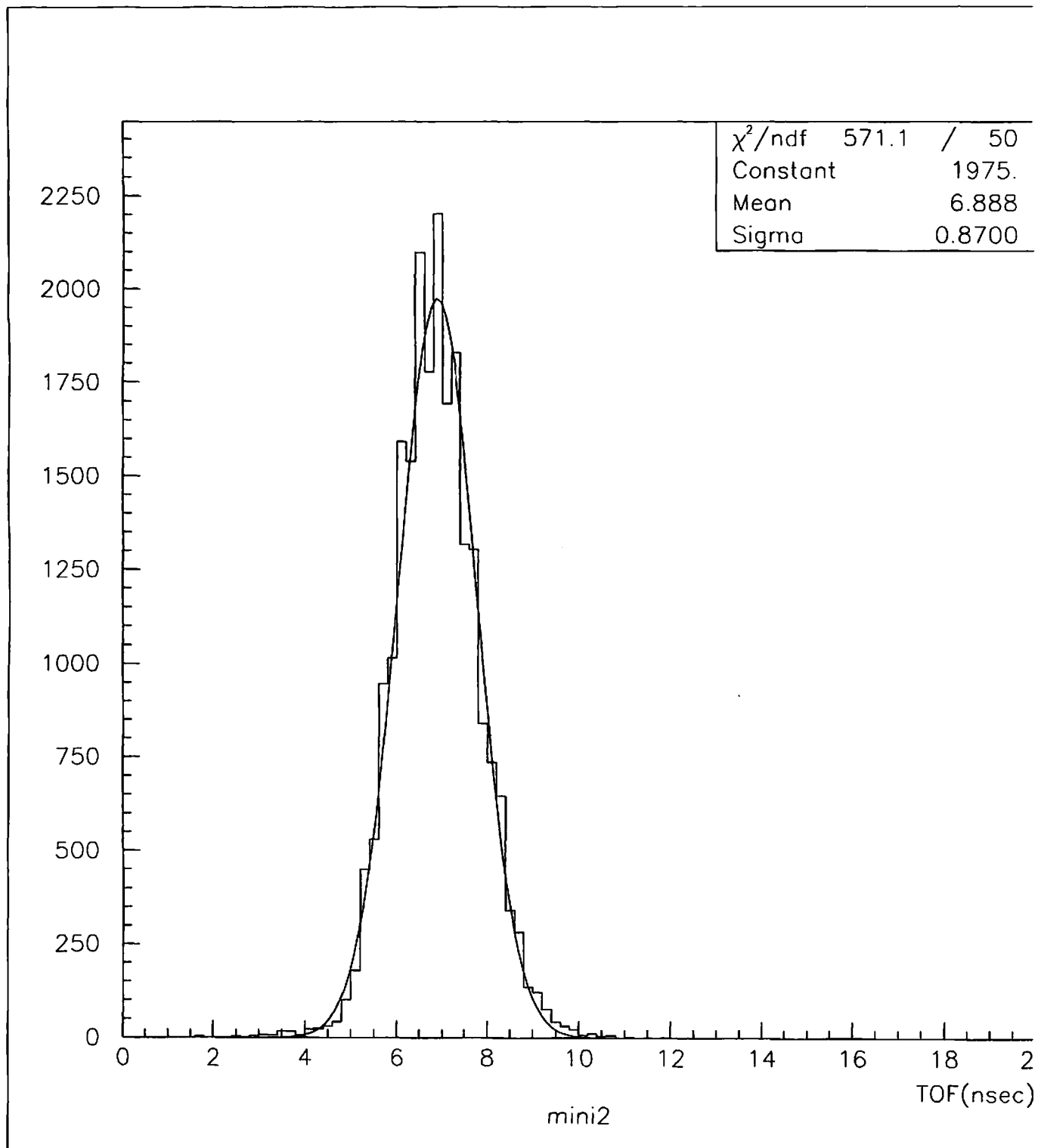


図 6.1: つき抜け粒子のTOF分布

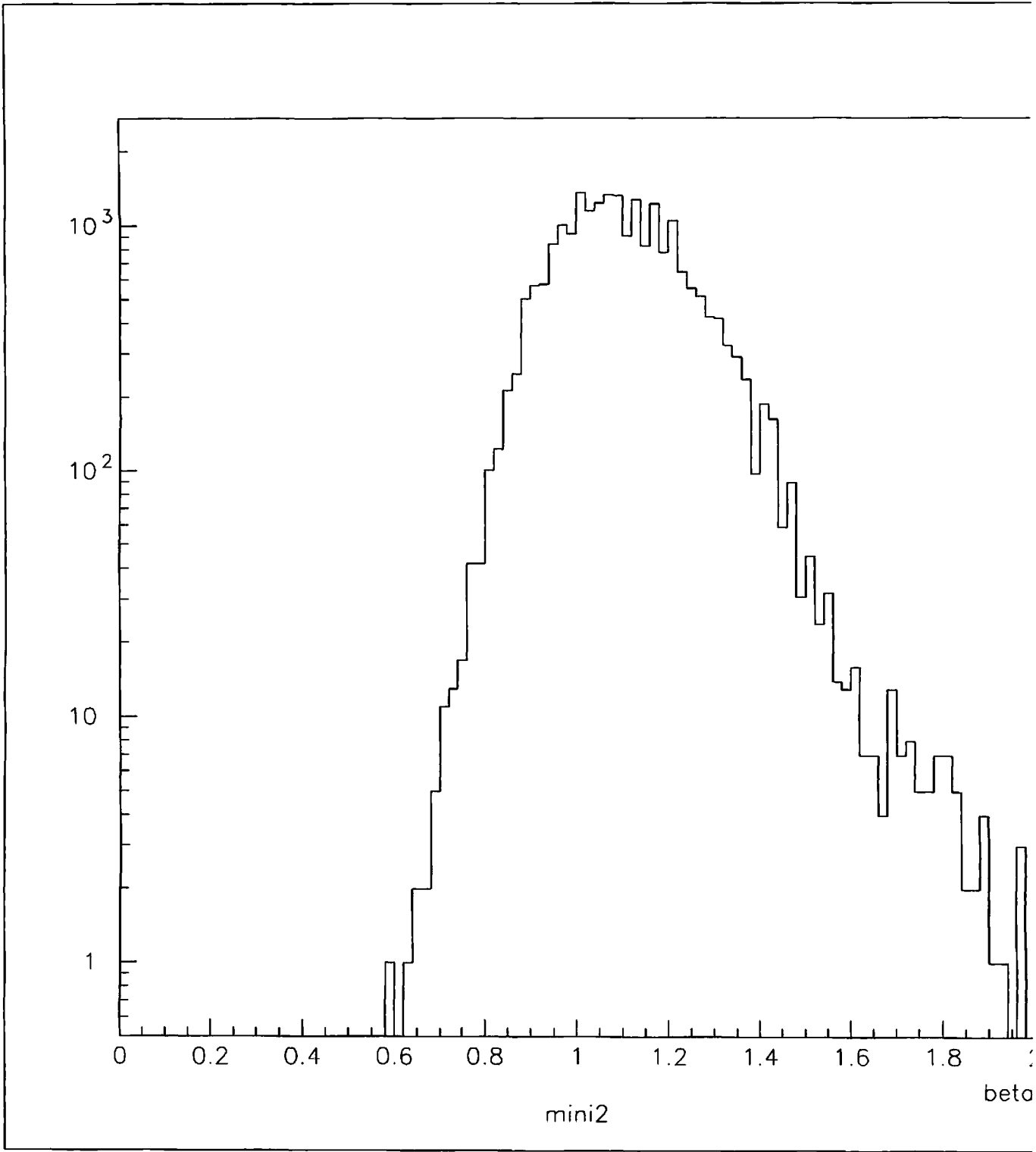


図 6.2: つき抜け粒子の  $\beta$  分布

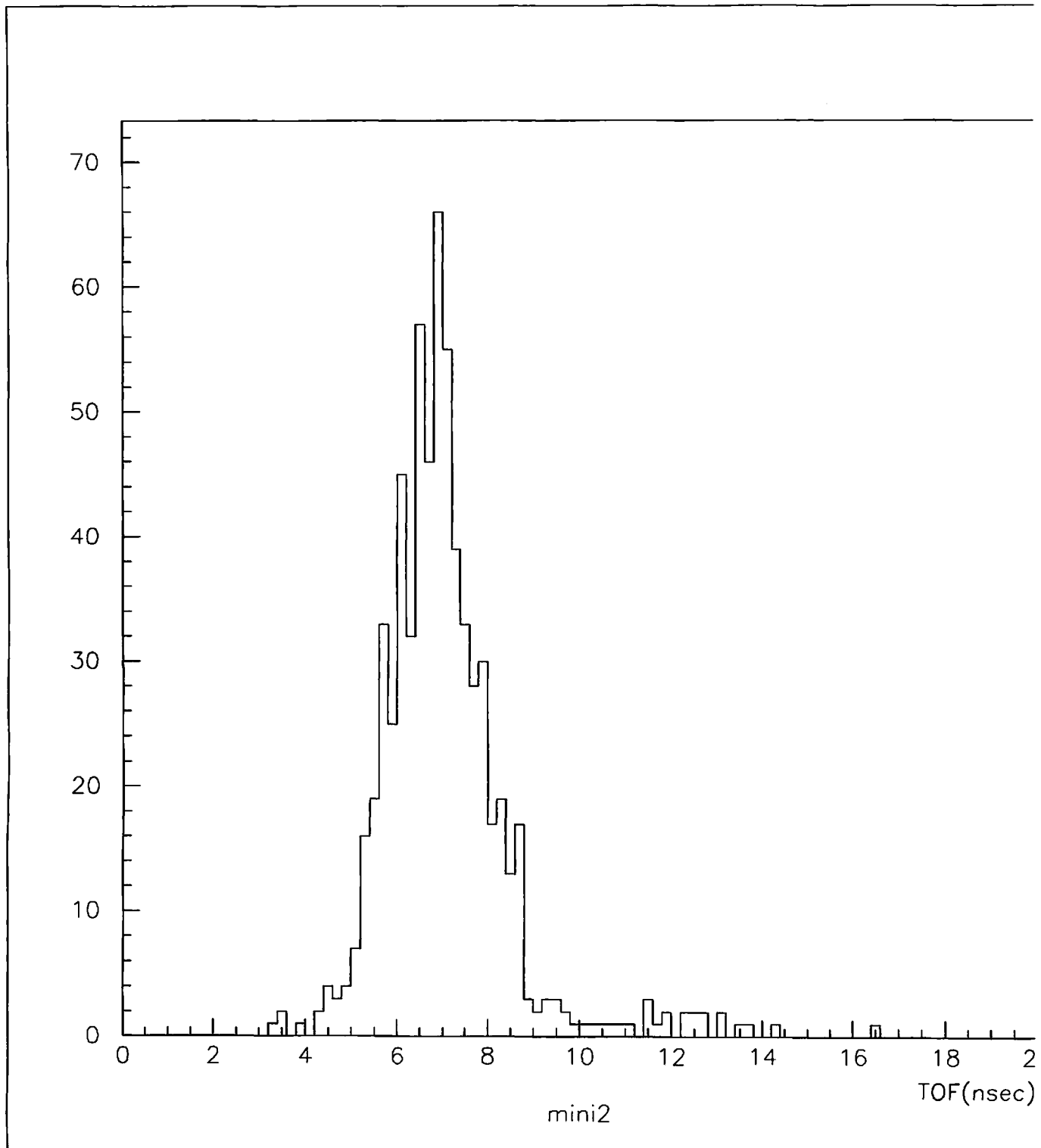


図 6.3: ストップ粒子のTOF分布

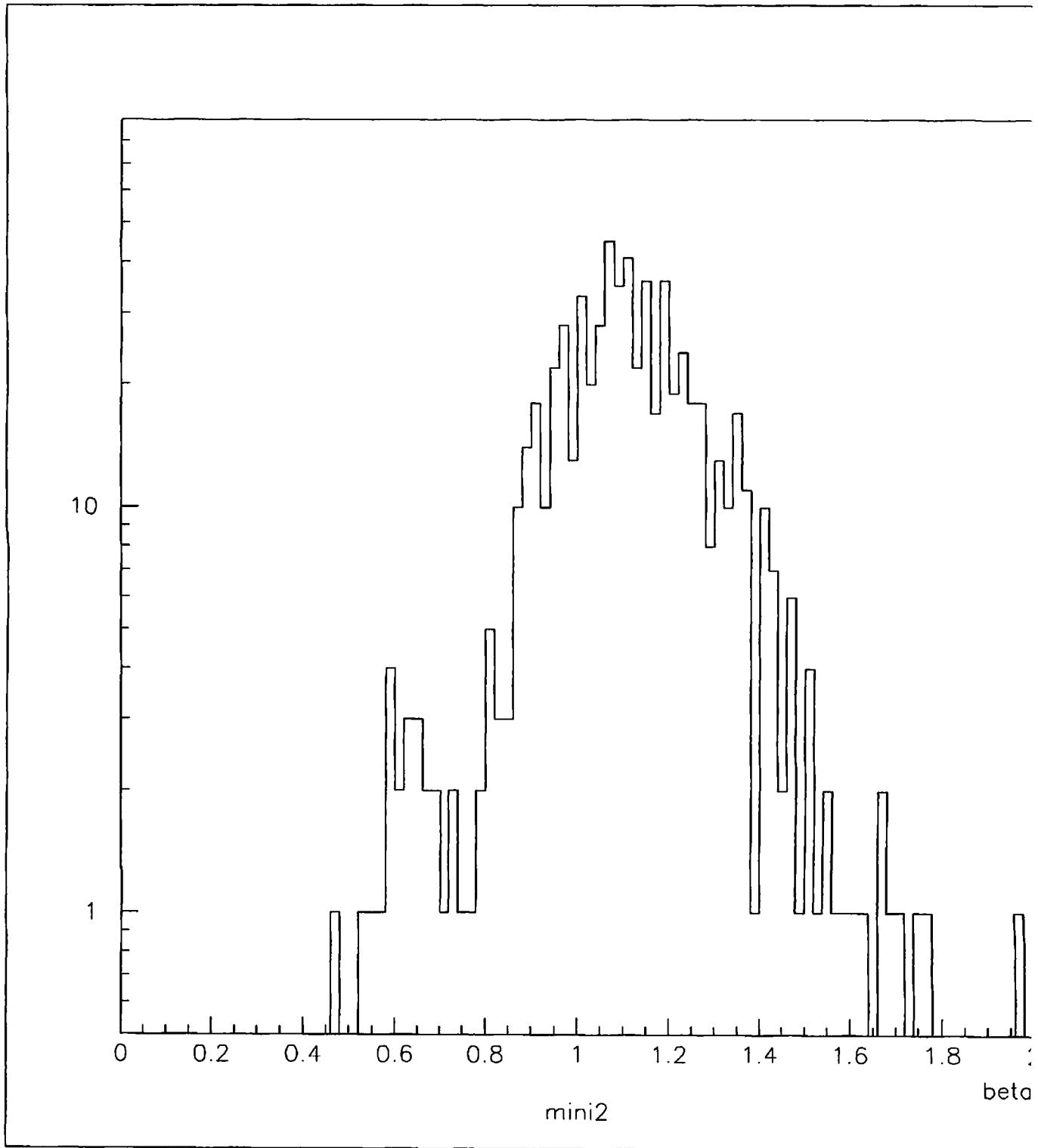


図 6.4: ストップ粒子の  $\beta$  分布