FADCによる両実験のバックアップについて

平成13年3月15日

目 次

1 目的 **4**

2 SET UP 及び実験装置 **5**

2.1 SET UP 5
2.2 実験装置 6
2.3 ロジック回路 9
2.4 ロジック回路の説明 10
2.4.1 π^+ が TARGET 内で止まった場合の波形の推移 . . 10
2.4.2 π^+ が TARGET を通り抜ける場合の波形の推移 . . 11

3 解析の準備 **12**

3.1 FADC で実際見られる波形 12
3.2 得られたデータ 13

4 データ解析 **14**

4.1 FADC を使った μ^+ の寿命測定 14
4.1.1 μ^+ decay のヒストグラム 14
4.1.2 μ decay のヒストグラムに使ったデータ 15
4.2 TARGET 内で止まった π^+ の個数 (1) 17
4.3 FADC を使った π^+ の寿命測定 19
4.3.1 データについて 19
4.3.2 π^+ decay のヒストグラム 20
4.3.3 π^+ の寿命 20
4.3.4 寿命の補正 22
4.4 TARGET 内で止まった π^+ の個数 (2) 24
4.4.1 25ns から 100ns 間に崩壊した π^+ の総数 24
4.4.2 TARGET 内で止まった π^+ の全個数 26

5 考察 **28**

5.1 μ^+ の寿命について 28
5.2 π^+ の寿命について 28
5.3 TARGET で止まった π^+ の個数について
—branching ratio 測定実験との比較 29
5.3.1 BR 実験における個数の見積もり 30
5.3.2 個数の比較、結論 30

6 参考文献 **31**

図 目 次

1 SET UP 5
2 FADC の波形の一例 7
3 FADC の回路図 8
4 実験のロジック回路 9
5 ロジック回路の波形 10
6 ロジック回路の波形 2 11
7 FADC で見られる $\pi - \mu - e$ decay 12
8 μ decay のヒストグラム (全 momentum) 14
9 2,3PEAK の波形の種類 15
10 2PEAK のヒストグラム 16
11 3-peak の波形 19
12 π^+ の崩壊数 (全 momentum) 20
13 関数の fit 21
14 μ^+ の崩壊 22
15 300MeV/c の π^+ の崩壊数 24

表 目 次

1 2,3PEAK のイベント数 13
2 2,3PEAK のイベント数 / 10000 13
3 μ^+ の寿命 16
4 3-peak のイベント数 21
5 ヒストグラムの補正 23
6 π^+ の寿命 24
7 2-peak も含めた π^+ の崩壊数 26
8 μ^+ の寿命 28
9 π^+ の寿命 29

1　目的

我々は今回主に 2 つの実験を行った．その 1 つは π^+ の崩壊における branching ratio を求めるもので、その実験では、

$$BR = \frac{\pi - e \ event \text{の数}}{\pi - \mu - e \ \ event \text{の数}}$$

よりそれぞれの event 数を直接求めて BR 値を測定しようと試みたわけであるが、それと同様の set up で TARGET シンチにつないだ FADC を使って BR 実験とは別に、FADC がどんなものなのかということを知る意味でも、π^+、μ^+ の寿命を測定し、それを使って TARGET シンチ内で起こる $\pi - \mu - e$ event の数を求めてみた。

またもう 1 方の CPT 保存確認の実験では、シンチレーションファイバーを使って、はしっている π^+、π^- からその崩壊数を見積もり、そこから π^+,π^- の寿命を測定し、それらの比較を行ったわけであるが、π^+ を止めて測ったものとの比較、また上と同様に FADC の精度との比較の意味でも別に、π^+ の寿命を FADC を使って求めてみた。

2 SET UP及び実験装置

2.1 SET UP

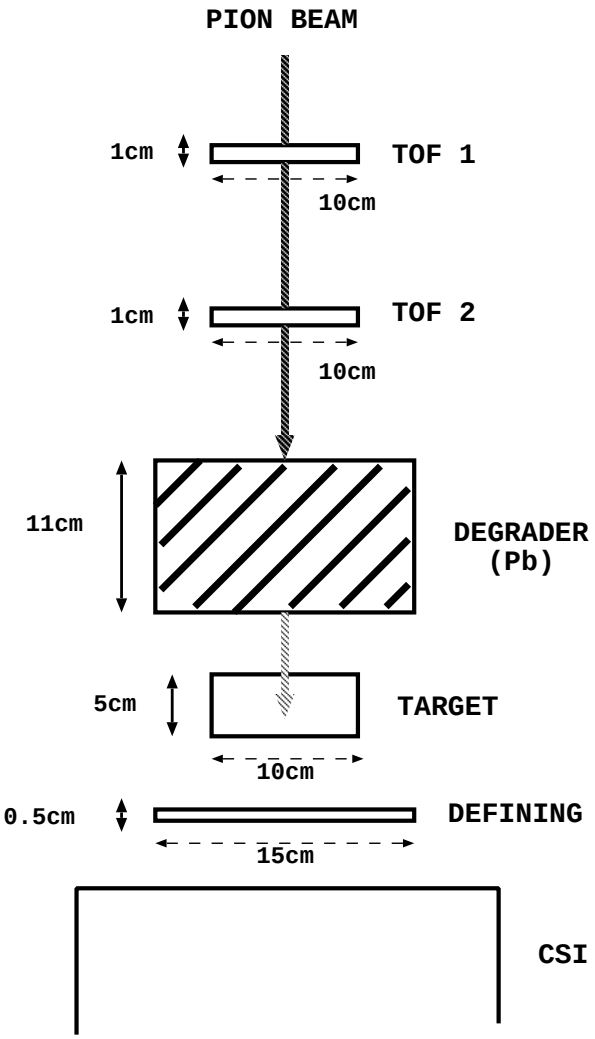

図 1: SET UP

図1は、図の上から入ってくるπ^+ビームを、TOF 1、2をトリガーとして、DEGRADER(Pb)で減速してからTARGETシンチで止め、その崩壊の様子をTARGETシンチにつないだFADCで見るためのSET UPである。

2.2 実験装置

使用した実験装置について説明を加えると共に、おおまかな実験原理についてもふれておきたい。また、当初耳慣れない装置であった FADC とはどのようなものであるか、その利点などを述べる。

ビームの上流から順に次に挙げる。branching ratio 測定の実験と同じ set up で行っているため、装置の説明は重複しない程度にとどめておく。配置および寸法については前節の図 1 を参照。

1. TOF
   ビームライン上に置かれた 2 つのシンチレータ (TOF1、TOF2) であり、後述のロジック回路からも分かるように、粒子がこの両方を通ることを条件付けている。それによりビームから直接得られた粒子であるという確証を得ている。

2. TARGET
   DEGRADER を経てエネルギーを 100MeV 程度まで落とした π^+ 粒子は、この TARGET シンチレータ内で止まり、崩壊する。
   また、それによって生じた μ^+ も、そのエネルギーが 4MeV 程度と小さいためにすぐに止まり、TARGET 内で e^+ へと崩壊する。
   この際に得られる信号を後に述べる FADC を通して見ることで、π^+、μ^+ の崩壊の様子を観測することができる。

3. DEFINING
   上の 2 つと同様、プラスチックシンチレータである。branching ratio を測定する上で CsI を用いており、この DEFINING カウンターを通った粒子は全て CsI に入る設計になっている。FADC による本解析においても CsI に入る事象のみをデータとして扱っている。

4. FADC (flashADC)
   TARGET 内では π^+ 粒子や、その崩壊によって生成した μ^+、e^+ 粒子がシンチレータを構成している原子と相互作用し、励起させて自身のエネルギーを落としている。励起された原子が基底状態に戻る際に発する光が、すなわち各粒子が落としたエネルギーに対応していると考えることができる。
   この光量は photomultiplier tube によって電圧に置き換えられ、それ

をデジタル信号へと変換するものが ADC 一般である。
本実験で我々が用いた FADC は、このデジタル信号が 2 ns ごとに、さらには連続的に得られるという利点があり、この信号をプロットすると、横軸が時間、縦軸が電圧に対応するオシロスコープのような波形を得ることができる。その波形の一例を図 2 に示す。

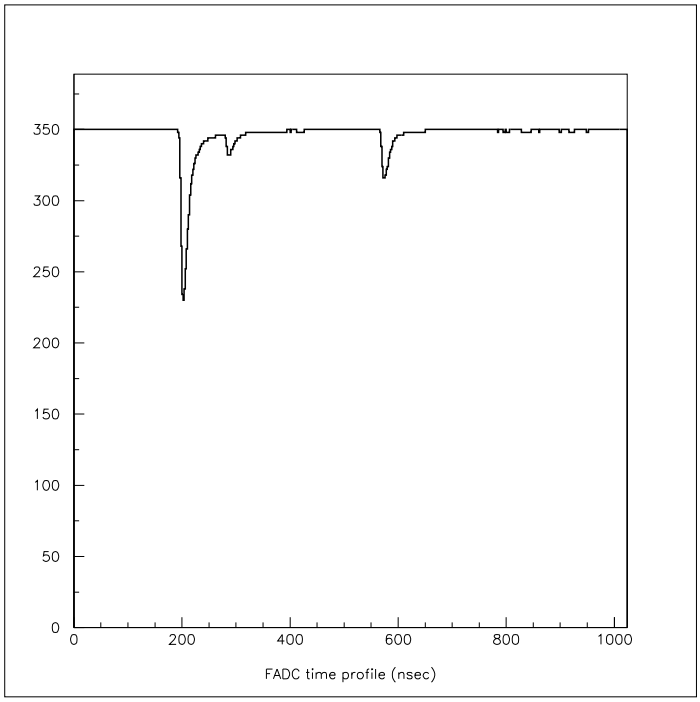

図 2: FADC の波形の一例

また参考までに、図 3 にその回路図を示す。
本実験では、2.4 節で改めて詳しく述べるが、TARGET に粒子が入った時刻を START、その 1μs 後を STOP とし、実際の波形を 200ns 遅らせたものを CH0 へと入力することにより、200ns のデバッグの後、粒子が入ってから 800ns 間の波形を観測することができる。
この波形を基に、π^+、μ^+ が崩壊した時刻を記録し、寿命を求める。
波形と崩壊時刻の対応については 3.1 節に譲る。

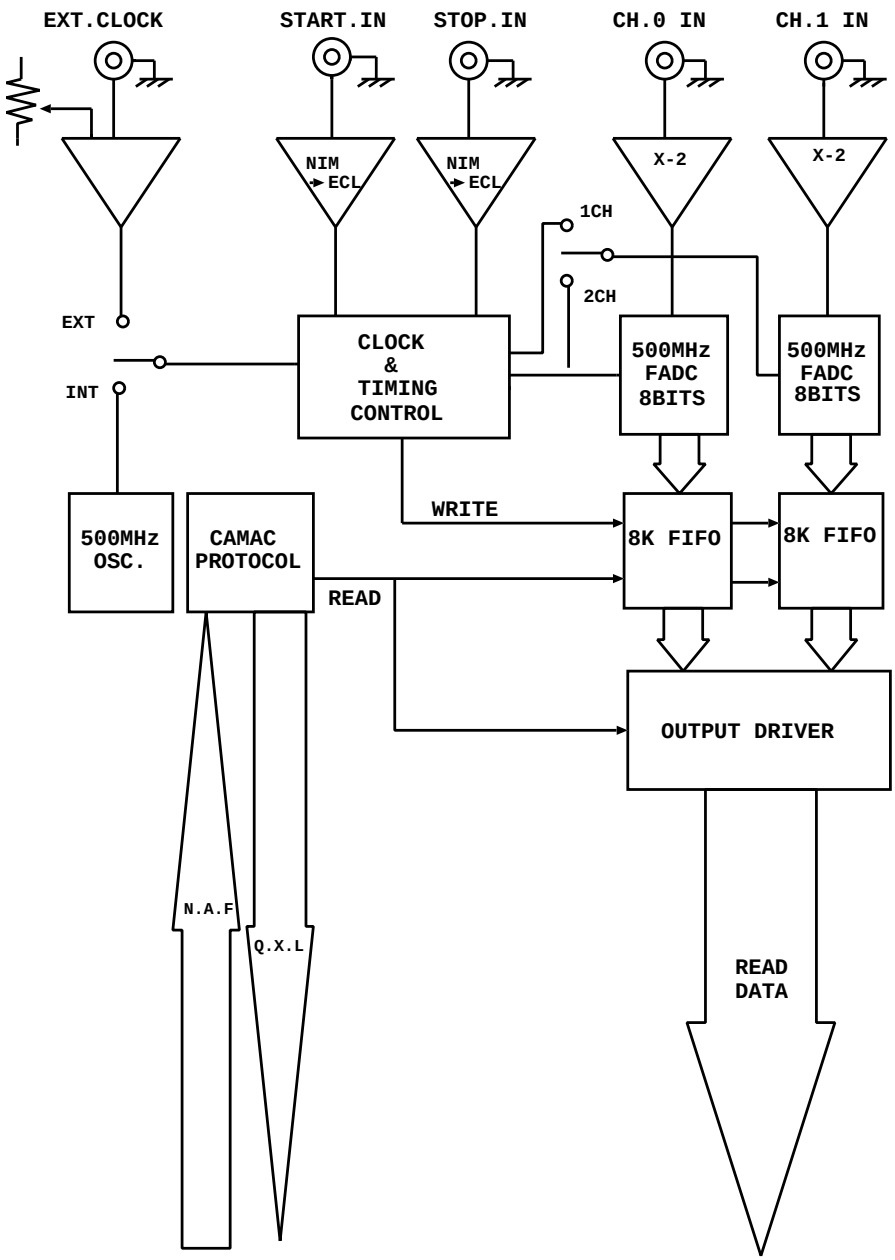
EXT.CLOCK
START.IN
STOP.IN
CH.0 IN
CH.1 IN
NIM
ECL
NIM
ECL
X-2
X-2
1CH
2CH
EXT
INT
CLOCK
&
TIMING
CONTROL
500MHz
FADC
8BITS
500MHz
FADC
8BITS
500MHz
OSC.
CAMAC
PROTOCOL
WRITE
READ
8K FIFO
8K FIFO
OUTPUT DRIVER
N.A.F
Q.X.L
READ
DATA

図 3: FADC の回路図

2.3 ロジック回路

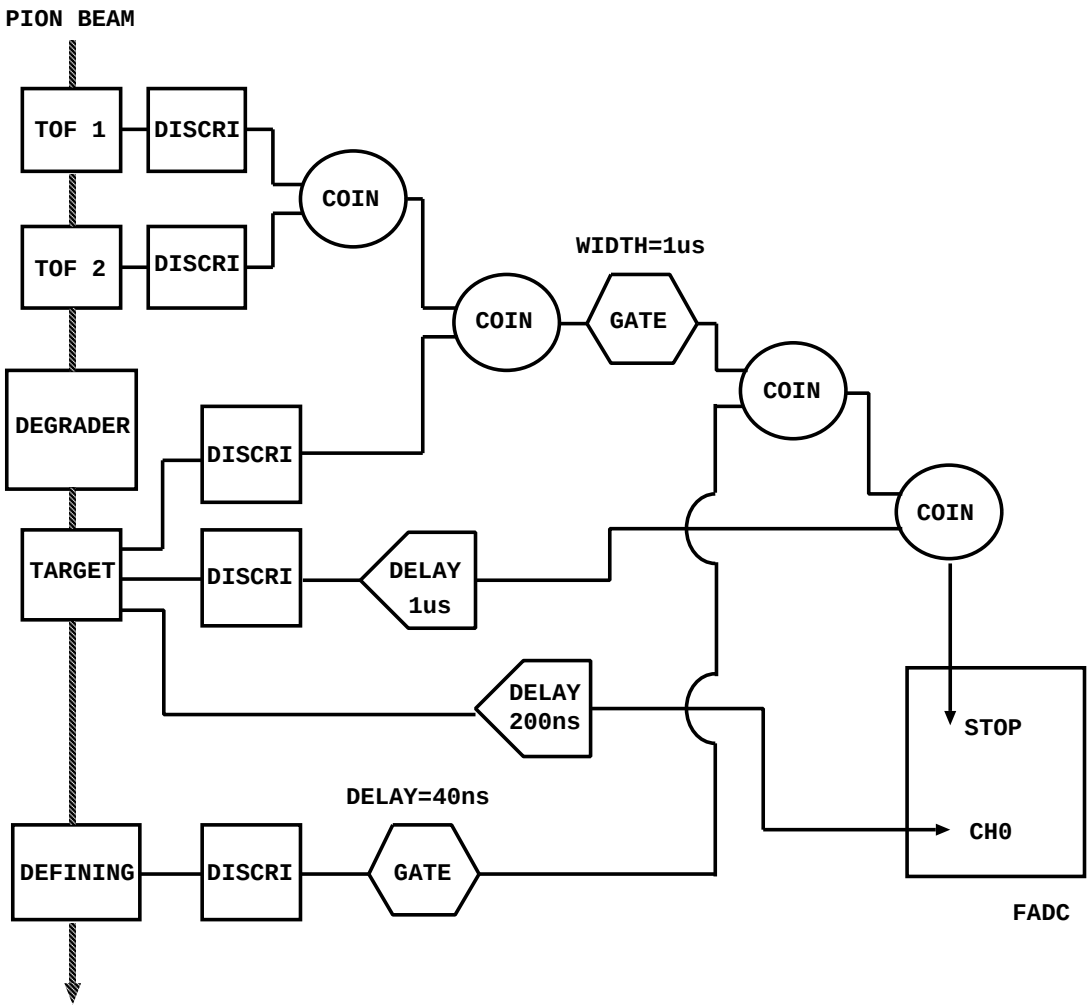

図 4: 実験のロジック回路

図4は図1のように設置された各種シンチレーターを、どのようにFADCにつないでいるかを表すロジック回路である。

2.4 ロジック回路の説明

2.4.1 π^+ が TARGET 内で止まった場合の波形の推移

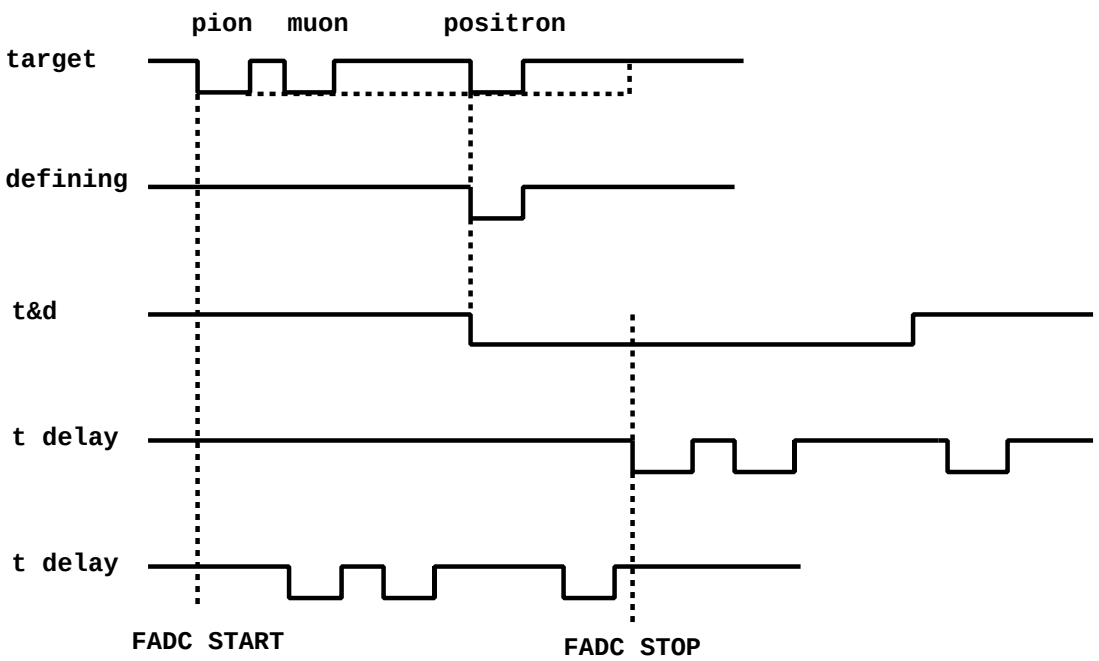

図 5: ロジック回路の波形

図 5 は図 4 のロジック回路から得られる波形を、π^+ が TARGET 内で止まった場合に順々に追っていったものである。

1. TOF と TARGET の coincidence をとり π^+ が TARGET で止まり $\pi - \mu - e$ decay をおこした波形を gate で 1μs に広げる
2. decay した e^+ が TARGET で止まらずに DEFINING に入ってくる
3. 1 と 2 の coincidence の波形を 1μs に広げる
4. discri からでた TARGET の波形を delay で 1μs 遅らせ、それと 3 との coincidence の波形を FADC の STOP につなぐ
5. TARGET の生の波形を 200ns 遅らせその波形を FADC で見る

結果この場合には 3 つの PEAK が FADC で見える。

2.4.2 π^+ が TARGET を通り抜ける場合の波形の推移

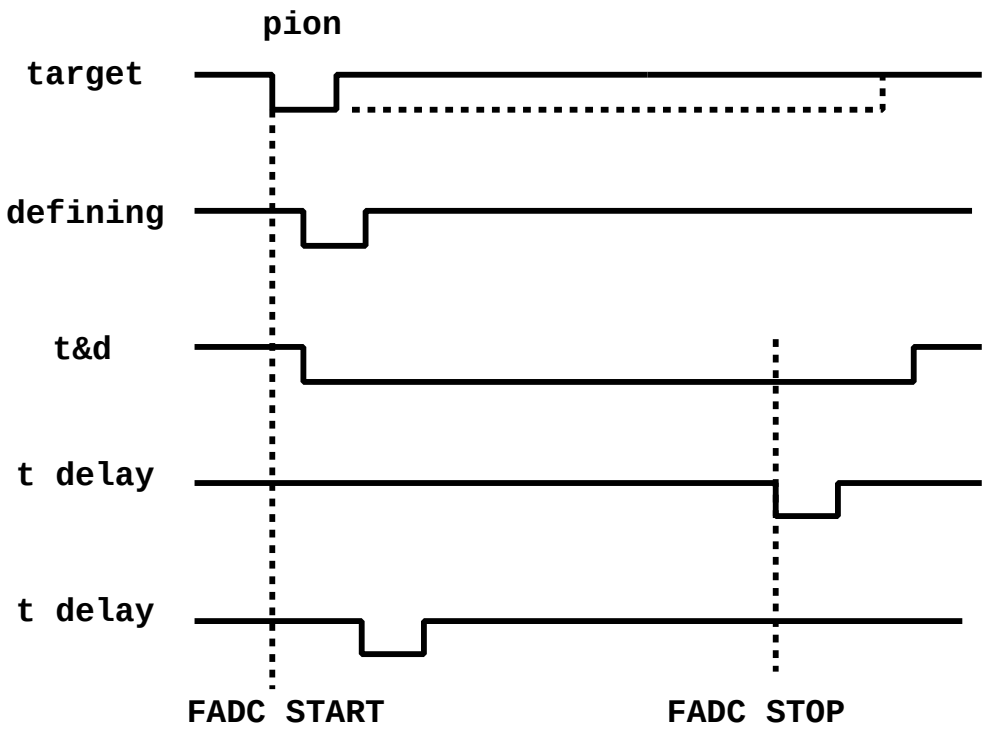

図 6: ロジック回路の波形 2

図 6 は図 4 のロジック回路から得られる波形を、π^+ が TARGET を通り抜ける場合に順々に追っていったものである。

1. TOF と TARGET の coincidence をとる。π^+ が TARGET を通り抜けるため波形は 1 つしかたたない
2. TARGET を通り抜けた π^+ が DEFINING に入ってくる
3. 1 と 2 の coincidence の波形を 1μs に広げる
4. discri からでた TARGET の波形を delay で 1μs 遅らせ、それと 3 との coincidence の波形を FADC の STOP につなぐ
5. TARGET の生の波形を 200ns 遅らせその波形を FADC で見る

結果この場合には 1 つの PEAK が FADC で見える。

3　解析の準備

3.1　FADC で実際見られる波形

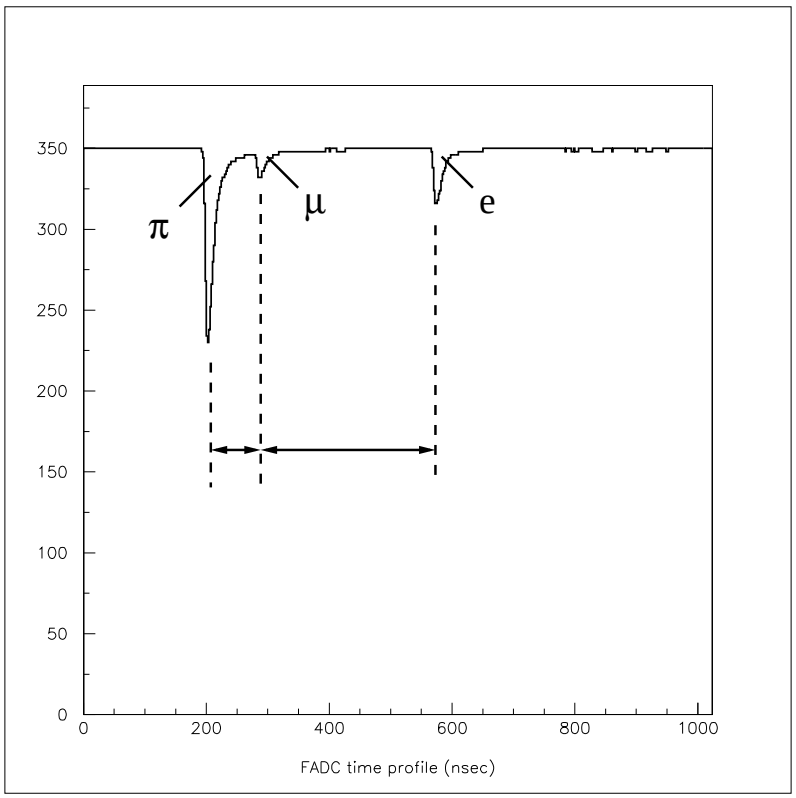

図 7: FADC で見られる $\pi - \mu - e$ decay

図 7 の 1 つ目の PEAK は π^+ がエネルギーをおとして止まったことを表し、2 つ目の PEAK は π^+ が μ^+ に decay し、その μ^+ がエネルギーをおとして止まったことを表し、3 つ目の PEAK は μ^+ が e^+ に decay し、その e がエネルギーをおとして止まったことを表している。

また 1 つ目と 2 つ目の PEAK 間は、π^+ が止まって μ^+ に decay するまでの時間を表し、2 つ目と 3 つ目の PEAK 間は、μ^+ が止まって e^+ に decay するまでの時間を表している。

3.2 得られたデータ

我々はBR実験とは別に、π^+ついて300MeV/c,305MeV/c,310MeV/c,315MeV/c,の各momentumでデータをとった。

得たデータを見てみると、大きく分けて1つピークがたつもの、2つピークがたつもの、3つピークがたつものに分類できる。そこでそれぞれのmomentumにおける2ピークの数、3ピークの数を比べてみたのが表1である

表 1: 2,3PEAKのイベント数

	2PEAK	3PEAK	SUM	TOTAL
300MeV/c	1651	356	2007	10000
305MeV/c	87	13	100	1000
310MeV/c	57	11	68	1000
315MeV/c	158	14	172	5000

このままでは見にくいので、すべて10000個中の2、3ピークイベントの数に直したのが表2である。

表 2: 2,3PEAKのイベント数 / 10000

	2PEAK	3PEAK	SUM
300MeV/c	1651	356	2007
305MeV/c	870	130	1000
310MeV/c	570	110	680
315MeV/c	316	28	344

表2を見ると300MeV/cのときに最もTARGETシンチ内でπ^+が止まる割合が高いことが分かる.

4　データ解析

以上述べてきたようなデータを基に、π^+、μ^+ の寿命を求める。さらに、それにより 300MeV/c のビームにおいて、TARGET 内で止まった π^+ の個数を見積もり、BR 実験で求めたものと比較し、その検証を試みる。

4.1　FADC を使った μ^+ の寿命測定

4.1.1　μ^+ decay のヒストグラム

μ^+ の崩壊時間を 40ns ごとのヒストグラムにしたのが以下の図である。その際に粒子の崩壊数は、粒子の崩壊数を y、寿命を τ_μ、崩壊時間を t、とすると y=A exp(-t/τ_μ)(A=const) に従うので、この関数に以下のヒストグラムを fit すると μ^+ の寿命が分かる。なお fit は、この関数の log を取ってやると、1 次式の最小 2 乗法に帰着する。

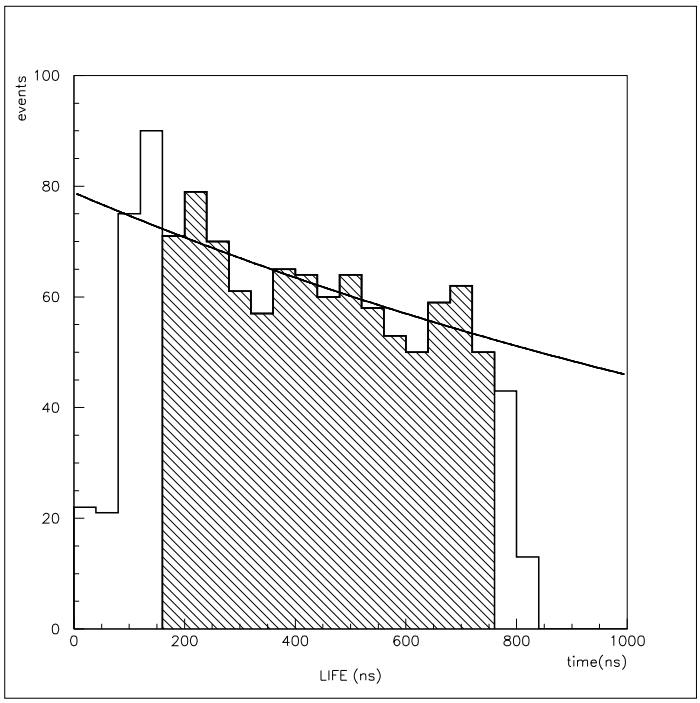

図 8: μ decay のヒストグラム (全 momentum)

4.1.2 μ decay のヒストグラムに使ったデータ

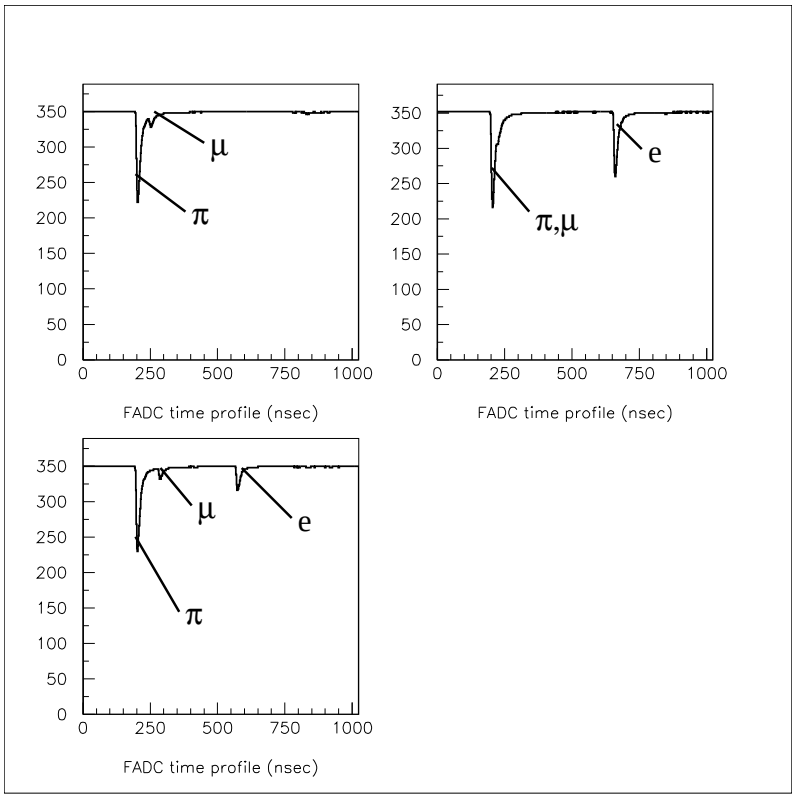

図 9: 2,3PEAK の波形の種類

図 9 を見ると、図 8 のヒストグラムをつくるにあたって FADC の波形から μ の崩壊時間と判断されるものには以下の 2 種類があることが分かる。

- 3 つ PEAK があるものの、2 つ目と 3 つ目の PEAK の時間幅 (図 9 の左下)
- π^+ が止まってからすぐ μ^+ に崩壊するため,π^+, μ^+ の波形が重なり 2 つ目の PEAK が e^+ の波形になっているもの (この場合は 1 つ目と 2 つ目の PEAK の時間幅を μ^+ の崩壊時間とする。)(図 9 の右上)

しかし PEAK が 2 つたつものの中には図 9 の左上のように 1 つ目の波形が π^+、2 つ目の波形が μ^+ で、e^+ の波形がウインドウの外にでているというものもあるので、単純に 2 つ PEAK がたつものを使うわけには行かない。

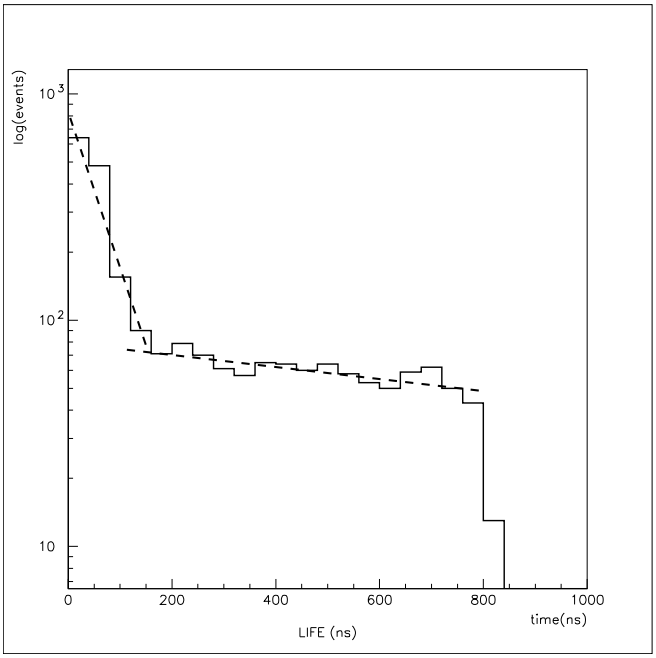

図 10: 2PEAK のヒストグラム

そこでそれらを区別するために 2 つ PEAK がたつもののヒストグラムをみたのが図 10 である。この図を見ると 160ns ぐらいまでは π^+, μ^+ の崩壊が混ざっているが、それ以降はほぼ μ^+ の崩壊の分布になっていることが分かる。

計算によると π^+ が 160ns 以降に崩壊する割合は 0.2%程度なのでこれを無視し 160ns 以降は全て μ^+ の崩壊としてこれを fit した。fit の終りは、今回使用した FADC ではウインドウの見える範囲があったため、それを考慮に入れて決めた。
以上のことを考慮に入れて μ^+ の寿命をだしたのが表 3 である。(ここで fit に使用したイベント数とは μ^+ が 160-760ns に崩壊した数である。)

表 3: μ^+ の寿命

	μ^+ の lifetime	χ^2/ndf	fit に使用したイベント数
300MeV/c	2081±906.3	11.47/15	741
全 momentum	1847±645.7	9.101/15	923

4.2 TARGET 内で止まった π^+ の個数 (1)

次に、先程求めた μ^+ の lifetime から TARGET 内で止まった π^+ の個数を見積る。我々は π^+ について 300MeV/c,305MeV/c, 310MeV/c,315MeV/c, の各 momentum でデータをとったが、表 1 を見てもらうと分かるように、305MeV/c、310MeV/c、315MeV/c は使えるイベント数が少ないので、300MeV/c の π^+ 10000 個の内の何個が TARGET 内で止まったかを求める.

TARGET 内で μ^+ が崩壊しているということは、TARGET 内で π^+ が止まって μ^+ に崩壊して、その μ^+ が崩壊しているということなので、

μ^+ の全崩壊数=TARGET 内で止まった π^+ の総数

として、μ^+ の全崩壊数を求める。

160ns-760ns に μ^+ の崩壊がおこった個数を n とすると

$$n = \int_{160}^{760} A\ exp(-t/\tau_\mu)\, dt \tag{1}$$

(A=const、t=崩壊時間、$\tau_\mu = \mu^+$ の寿命)

であるが、それ以外の時間に μ^+ の崩壊がおこったものもあるので、μ^+ の全崩壊数を N とすると

$$N = \int_{0}^{\infty} A\ exp(-t/\tau_\mu)\, dt \tag{2}$$

式 1, 式 2 より A を消去すると

$$N = \frac{n}{exp(-160/\tau_\mu) - exp(-760/\tau_\mu)} \tag{3}$$

μ^+ の lifetime は表 3 の全 momentum の時のものを使うとして、その値と 300MeV/c の時の 160-760ns の崩壊数を式 3 に入れてやると、 N=2914 となる。ここで式 3 の τ_μ と n の誤差を考慮に入れると誤差は 781(寿命か

らの誤差=774、個数からの誤差=107) となり、TARGET 内で止まった π^+ の総数は

$$N = \ 2914 \pm 781 \ / \ 10000 \tag{4}$$

またデータブックの値から $\tau_\mu = 2.2(\mu s)$ として計算して見ると

$$N = \ 3338 \pm 122 \ / \ 10000 \tag{5}$$

が得られた。

4.3 FADC を使った π^+ の寿命測定

μ^+ と同様、π^+ の寿命を測定する。

π^+ の寿命は、今回 branching ratio の測定と平行して行っている CPT 保存確認の実験においても異なった set up で測定されており、それとの比較も興味深い。

4.3.1 データについて

下の図にあるような、3-peak の波形のみを扱う。

前述したように peak1、peak2、peak3 はそれぞれ、π^+ 、μ^+、e^+ が落としたエネルギーに対応しており、peak1 と peak2 の時間差を π^+ が崩壊するまでの時間と見ることができる。

2-peak のものはこの対応が明確でなく、先の μ^+ の寿命測定の場合のように寿命差を利用して選定することも困難なため、ここでは扱わないこととする。それに対する補正を 4.3.4 節で行う。

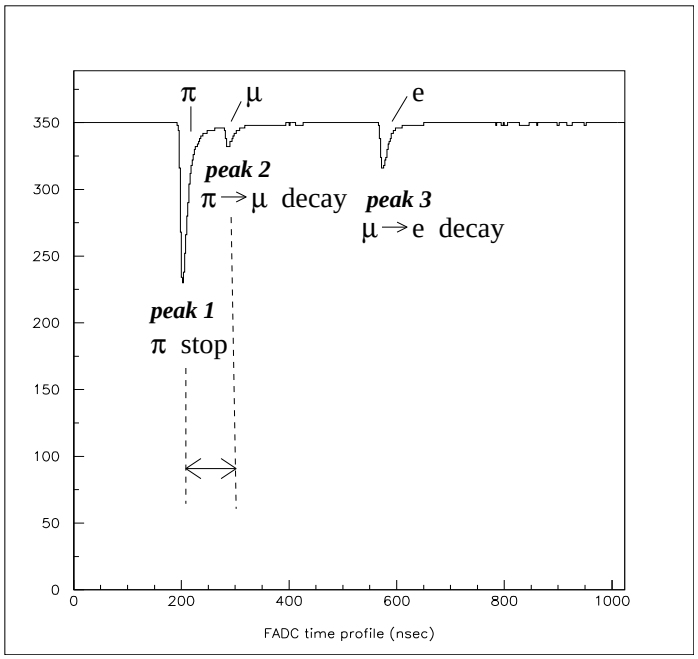

図 11: 3-peak の波形

4.3.2 π^+ decay のヒストグラム

3-peak の波形のみにおいて peak1 と peak2 の時間差を測り、5ns ごとのヒストグラムにしたものが図 12 である。
また、各 momentum における 3-peak のイベント数を次頁の表 4 に示す。扱ったデータ数は 394 イベントである。

時間差が 25ns 以下の部分でイベント数が減っているが、この領域では peak1 と peak2 の波形が重なり判別できないものがあるため、3-peak として数えられるイベントが減ると考えられる。1 つの peak の幅はその中腹において 15ns 程度であり、その時間差が 25ns 以上であれば peak は十分に判別できる。

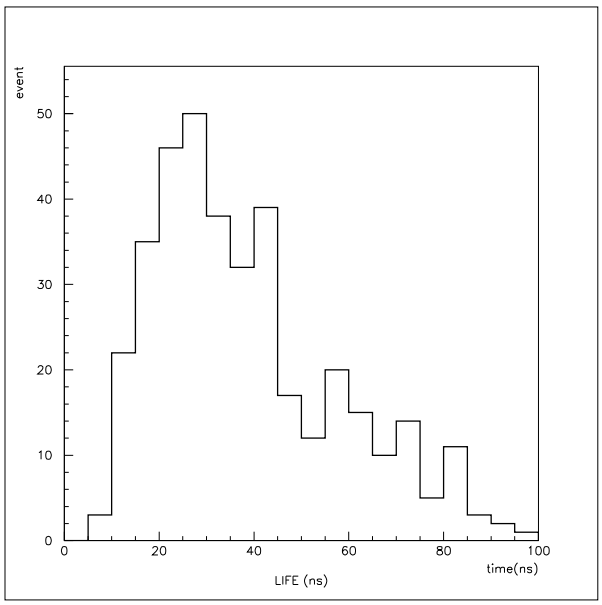

図 12: π^+ の崩壊数 (全 momentum)

4.3.3 π^+ の寿命

時刻 t における π^+ の崩壊数を $n(t)$ とすれば、$n(t)$ は次式に従う。

$$n(t) = B\ exp\ (-t/\tau_\pi) \tag{6}$$

ただし B、τ_π は共に定数で、τ_π は π^+ の寿命である。

表 4: 3-peak のイベント数

	3PEAK	TOTAL
300MeV/c	356	10000
305MeV/c	13	1000
310MeV/c	11	1000
315MeV/c	14	5000
SUM	394	17000

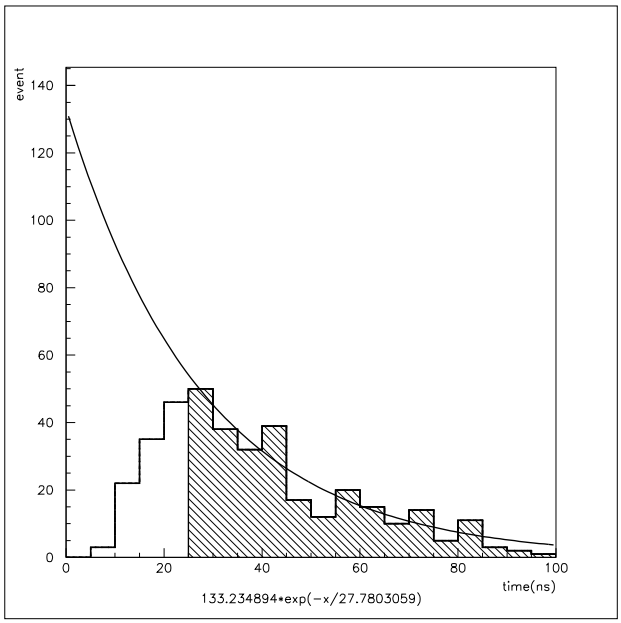

図 13: 関数の fit

図 12 のヒストグラムにおいて $n(t)$、t がそれぞれ縦軸と横軸に対応しており、25ns から 100ns の範囲でこの関数を fit[1]したものが図 13 である。fit した範囲に斜線を施してある。その結果、次を得る。

$$\tau_\pi = 27.78 \pm 2.72 \tag{7}$$

[1]両辺の対数をとり、1 次式の最小 2 乗法に帰着させ fit を行った。

4.3.4　寿命の補正

3-peak の事象のみを扱ったことにより、得られた寿命はそのままでは正しい値とは言えない。理由と共に以下にその補正について述べる。

3peak になるためには、π^+ の崩壊によってできた μ^+ が、FADC の timewindow 内でさらに e^+ に崩壊しなければならない。従って、π^+ が早く崩壊したものに比べて、遅く崩壊したものは 3peak になる割合が少なくなると考えられる。

π^+ が止まった時刻を 0 にとり、π^+ が崩壊した時刻を $t(ns)$ とすると、timewindow の端までの時間は $800 - t$ である。図 14 のように μ^+ の崩壊数のグラフを考えれば、各 t について、window の残り時間に μ^+ が崩壊する割合は、斜線部の面積比に置き換えることができる。

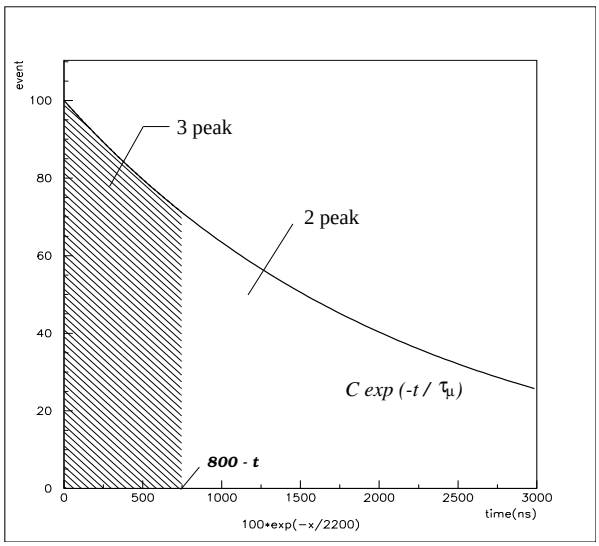

図 14: μ^+ の崩壊

斜線部の面積を $S(t)$ とおけば、$S(t)$ は次式で表される。

$$S(t) = \int_0^{800-t} C\ exp\ (-t'/\tau_\mu)\, dt' \tag{8}$$

C は定数、τ_μ は μ^+ の寿命であり、データブックの値 $\tau_\mu = 2.2(\mu s)$ を用いる。ここで、$S(t)$ を、$t = 27.5$ のとき 1 となるように規格化したものを $P(t)$ とおく。すなわち、

$$P(t) = \frac{S(t)}{S(27.5)} \tag{9}$$

である。図 12 のヒストグラムにおいて、bin ごとに以下の補正を行った。

$$n'(t) = \frac{n(t)}{P(t)} \tag{10}$$

結果を表 5 に示す。

この $n'(t)$ に対し、先程の fit を改めて行い、次を得る。

$$\tau'_{\mu} = 28.63 \pm 2.84 \tag{11}$$

表 5: ヒストグラムの補正

t	$P(t)$	$n(t)$	$n'(t)$
27.5	1	50	50
32.5	0.995	38	38
37.5	0.989	32	32
42.5	0.984	39	40
47.5	0.978	17	17
52.5	0.973	12	12
57.5	0.967	20	21
62.5	0.962	15	16
67.5	0.956	10	10
72.5	0.951	14	15
77.5	0.945	5	5
82.5	0.940	11	12
87.5	0.934	3	3
92.5	0.929	2	2
97.5	0.923	1	1

表 6: π^+ の寿命

	π^+ の lifetime	χ^2/ndf	fit に使用したイベント数
τ_π	27.78±2.72	32.55 /15	241
τ'_π	28.63±2.84	35.54 /15	246

4.4 TARGET 内で止まった π^+ の個数 (2)

4.2 節と同様、上で求めた π^+ の寿命 τ'_π とその崩壊数から、300MeV/c の π^+ 粒子 10000 個に対し、そのうちいくつが TARGET 内で止まったかを見積もる。

4.4.1 25ns から 100ns 間に崩壊した π^+ の総数

図 15 は、300MeV/c の momentum のみについて、3-peak イベントの peak1 と peak2 の時間差をヒストグラムにしたものである。イベント数は 356 である。

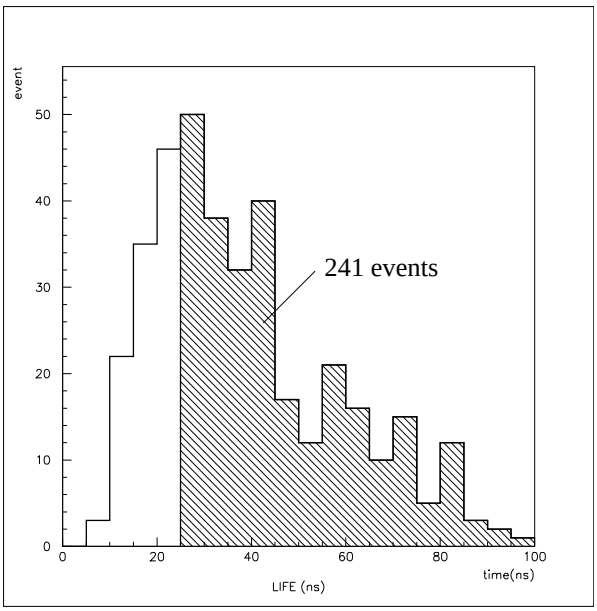

図 15: 300MeV/c の π^+ の崩壊数

ここでは 4.3.4 節で行ったような個数の補正は考えない。補正部分は誤差の範囲内であることから、崩壊した個数を議論する上では実際に得られたデータを使う方がよいと判断した。

斜線部に含まれる個数は 241 であり、これは π^+ が止まってから 25ns∼100ns 間に崩壊したもののうち、3-peak となった、すなわち timewindow 内で e^+ まで崩壊したものの個数である。

25ns∼100ns 間に π^+ が崩壊したものには他に、μ^+ が timewindow 外で崩壊し、2-peak の波形となったものが考えられる。
時刻 t で π^+ が崩壊してから、window の端までの $800 - t(ns)$ 間に μ^+ が崩壊したものが 3-peak、それ以降に崩壊したものが 2-peak になると考えれば、時刻 t における π^+ の全崩壊数 $n_{all}(t)$ は、4.3.4 節と同じ面積比を使って次のように書くことができる。(ただし、この場合は $S(t)$ に対するグラフの全面積の比)

$$n_{all}(t) = n(t)\ \frac{\int_0^{\infty} C\ exp\ (-t'/\tau_\mu)\, dt'}{\int_0^{800-t} C\ exp\ (-t'/\tau_\mu)\, dt'} \tag{12}$$

ここでの $n(t)$ は 300MeV/c の momentum における値とし、μ^+ の寿命にはデータブックの値、$\tau_\mu = 2.2(\mu s)$ を用いる。

これにより、次頁の表 7 を得る。
従って、25ns から 100ns 間に崩壊した π^+ の総数は、831 と見積もられる。

表 7: 2-peak も含めた π^+ の崩壊数

t	$n(t)$	$n_{all}(t)$
27.5	46	155
32.5	36	122
37.5	29	99
42.5	35	120
47.5	15	52
52.5	11	38
57.5	18	63
62.5	12	42
67.5	9	32
72.5	12	42
77.5	3	11
82.5	10	36
87.5	3	11
92.5	1	4
97.5	1	4
SUM	241	831

4.4.2 TARGET 内で止まった π^+ の全個数

300MeV/c の momentum において、π^+ の寿命 τ'_π と、25ns∼100ns 間に崩壊した π^+ 粒子の個数から、TARGET 内で止まった π^+ 粒子の総数を見積もることができる。

π^+ の時刻 t における崩壊数 $n(t)$ は、B を定数として

$$n(t) = B\ exp\ (-t/\tau'_\pi) \tag{13}$$

と表されるが、前節により

$$831 = \int_{25}^{100} n(t)\,dt \tag{14}$$

である。
一方、TARGET 内で止まった π^+ の総数を N とすれば

$$N = \int_{0}^{\infty} n(t)\,dt \tag{15}$$

であると考えることができる。
従って、B が消去できて

$$N = 831\ \frac{\int_0^\infty exp\ (-t/\tau'_\pi)\,dt}{\int_{25}^{100} exp\ (-t/\tau'_\pi)\,dt} \tag{16}$$

$$= \frac{831}{exp\ (-25/\tau'_\pi) - exp\ (-100/\tau'_\pi)} \tag{17}$$

$\tau'_\pi = 28.63 \pm 2.84$ であるから、求める個数 N は

$$N = 2146 \pm 198\ /\ 10000 \tag{18}$$

となる。
(誤差 $\sigma_N = 198$ に対する、$\sigma_{\tau'_\pi}$、$\sigma_{n(t)}$ の寄与はそれぞれ 142、138 程度)
また、τ'_π の代りにデータブックの値 $\tau = 26.033$ を用いれば

$$N = 2299 \pm 148\ /\ 10000 \tag{19}$$

を得る。

5　考察

5.1　μ^+ の寿命について

表 8: μ^+ の寿命

	μ^+ の lifetime(ns)	χ^2/ndf	fit に使用したイベント数
300MeV/c	2081±906.3	11.47/15	741
全 momentum	1847±645.7	9.101/15	923
†databook	2197.03±0.04	—	—

表 8 を見ると μ^+ の寿命がデータブックの値よりも多少小さくなっていることが分かる。この原因としては以下の 2 つが考えられる。

- π^+ の崩壊がまだ多少 160ns 以降に入ってきているため、μ^+ の寿命を小さくするように働いている。
- ウインドウに限りがあるため、3 つの波形の内、μ^+ の波形が現れる場所によって e^+ の波形の見える範囲が異なる。つまり、比較的時間が経って μ^+ の波形が現れるものは、e^+ の波形の見える時間範囲も小さくなるのでその分、図 8 の μ decay のヒストグラムの最後の方 (760ns あたり) の μ^+ の崩壊数が少なくなり、それが μ^+ の寿命を小さくするように働いている。

次に μ^+ の寿命の誤差が非常に大きいのでそれについて触れる。
300MeV/c は寿命の誤差 43%、全 momentum を併せたものは寿命の誤差 35%、と 300MeV/c のときの誤差が大きいが、fit に使用したイベント数を見れば
その数が少ない方が誤差が大きいことが分かる。従って今の場合の誤差の大きさはイベント数に依るところが大きいと推測される。

5.2　π^+ の寿命について

次に、π^+ の寿命について考察する。(表 9 を参照)
μ^+ の寿命に比べて π^+ の寿命は非常に短いため、3-peak 波形のみの少ないデータ数でも、誤差は比較的小さく抑えられている。

表 9: π^+ の寿命

	π^+ の lifetime	χ^2/ndf	fit に使用したイベント数
τ_π(全 momentum)	27.78±2.72	32.55 /15	241
τ'_π(全 momentum)	28.63±2.84	35.54 /15	246
†databook	26.033±0.005	—	—

データブックの値と比較してみると、その差が 2∼3ns 程度あるが、この主な原因として挙げたいのが、波形を解析する時点での系統誤差である。FADC のプロットは 2ns ごとに得られたものであるため、peak を観測するにあたっての系統誤差が $\pm 2ns$ 程度あると考えられる。

しかしながら、このように短い π^+ の寿命をある程度の精度まで求めることができ、FADC の性能を活かすことができたのではないだろうか。

5.3 TARGET で止まった π^+ の個数について —branching ratio 測定実験との比較

これまでにも述べてきたように、この FADC による π^+、μ^+ 粒子の崩壊の観測は、branching ratio 測定実験 (以下 BR 実験) と同じセットアップの下で行われている。

BR 実験では、TARGET 内で π^+ が崩壊してできた e^+ を CsI を使って観測し、そのエネルギーの違いにより、それがどの崩壊 mode によるものかを判別しようと試みている。従って、これと平行して、FADC を使って直接的に TARGET 内の π^+、μ^+ の崩壊の様子を観測し、両者からの $\pi-\mu-e$ イベント (π^+ が μ^+ を経て e^+ に崩壊するイベント) 数の見積もりを比較すれば、BR 実験によるデータのバックアップをとることができる。

ところが、

$$BR = \frac{\pi - e \text{ イベント数}}{\pi - \mu - e \text{ イベント数}} \sim 10^{-4} \tag{20}$$

であるから、TARGET 内で π^+ が止まった総数を、すなわち $\pi-\mu-e$ イベント数であると近似的に見なしてよい。

$$(\pi-\mu-e \text{ イベント数}) \sim (TARGET \text{ 内で止まった} \pi^+ \text{の個数}) \quad (21)$$

そこで 300MeV/c のビームについて、TARGET 内でいくつの π^+ が止まったと見積もられたか、その値を比較してみたい。

5.3.1 BR 実験における個数の見積もり

具体的に比較に入る前に、BR 実験からどのように TARGET 内で止まった π^+ の個数を見積もったかについて、簡単に述べる。

BR 実験においては、π^+ の寿命が μ^+ に比べて非常に短いことから、TARGET に π^+ 粒子が入ってから、e^+ に崩壊して DEFINING に抜けるまでの時間差をほぼ μ^+ の崩壊時間であるとみなす。その時間差が 100ns∼500ns である場合に CsI で観測された e^+ の個数、1808 からこれを算出している。
(TARGET と DEFINING は近接しているため、e^+ が DEFINING に到達するまでの時間は十分に短い。)
ただし、ここでは momentum 300MeV/c の π^+ 粒子 55000 個中の値である。
すなわち、

$$\begin{aligned} N &= 1808\ \frac{\int_0^\infty exp\ (-t/\tau_\mu)}{\int_{100}^{500} exp\ (-t/\tau_\mu)} && (22) \\ &= 11381 \pm 1687 \quad (55000 \text{ 個中}) && (23) \end{aligned}$$

である。また、τ_μ は μ^+ の寿命であり、データブックの値 $2.2(\mu s)$ を用いた。

5.3.2 個数の比較、結論

4.2、4.4 節で求めた N の値と、上で得た値を比較する。
結果、次のようになった。

- FADC

  μ^+ の崩壊数から　　$N = 2914 \pm 781$ /10000　　(A)
  π^+ の崩壊数から　　$N = 2146 \pm 198$ /10000　　(B)

- branching ratio　　$N = 11381 \pm 1687$ /55000
  $= 2069 \pm 307$ /10000　　(C)

(A)、(B)、(C) 共に比較的近い値であると言える。(A) だけが少しかけ離れているようだが、これもその誤差が大きいことを考えればあまり問題はない。すなわち、誤差の範囲内では、これらはほぼ等しいと言って差し支えないであろう。また、この 3 つの誤差を含めた共通範囲をとってみると次のようになり、BR 実験の値はこの領域と比較的近い値をとっていることが分かる。

- 共通範囲　　$N = 2133 \sim 2344$ /10000

誤差が大きいため、ある程度までしか言及できないのが残念であるが、これにより BR 実験において、CsI を用いて行っている崩壊した粒子数の評価が信頼できるものであるという結論が得られた。

6　参考文献

- Physical Review D54　　The American Physical Society
- 計算物理　　早野龍五 高橋忠幸 著　　共立出版
- REPIC 社 製品情報 RPC-250 diagram