

2008年度 課題研究P1
Lepton Flavor Violationの探索

小野田秀樹、川口維男、横倉祐貴

平成21年3月23日

目次

0.1	実験目的	1
0.2	実験の原理	2
0.2.1	$\mu \rightarrow e + \gamma$	2
0.2.2	$\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \gamma$	3
0.2.3	エネルギー測定器の calibration	4
0.3	実験方法	5
0.3.1	実験機具	5
0.3.2	合成 TDC の作成	6
0.3.3	NaI シンチレーターの calibration	7
0.3.4	プラスチックシンチレータの calibration	8
0.3.5	μ の崩壊の測定 (本実験)	8
0.4	シミュレーション	10
0.5	データ解析	11
0.5.1	NaI シンチレータの calibration	11
0.5.2	本実験に関する測定データ	12
0.5.3	TDC の解析	15
0.5.4	γ の探索	17
0.5.5	2つの NaI シンチレータの相関	19
0.6	実験結果および考察	21
0.6.1	TDC の overflow	21
0.6.2	$\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \gamma$ の branch ratio	22
0.6.3	$\mu \rightarrow e + \gamma$ の branch ratio	22
0.6.4	結論と課題	23
0.7	謝辞	23

0.1 実験目的

standard model では lepton flavor が保存している。しかし、standard model を越える物理を考慮に入れると、その保存則が破れていても不思議ではない。そこで、そのうちの一つの現象である $\mu \rightarrow e + \gamma$ を探索した。

一方で、lepton flavor が保存しているが生じづらい反応を調べることも、standard model を見直すためには必要と思われる。そこで同時に $\mu \rightarrow e + \gamma + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ の branch ratio を求めることも行った。

0.2 実験の原理

0.2.1 $\mu \rightarrow e + \gamma$

$\mu \rightarrow e + \gamma$ という反応は μ の崩壊モードとしては唯一の 2 体崩壊である。2 体崩壊は 3 体以上への崩壊と異なる性質を持っている。崩壊粒子の静止系における崩壊粒子の持つエネルギーは一意的であり、それらの運動方向は互いに逆向きになる。特に今回の反応に関わってくる粒子、 μ と e と γ の静止質量はそれぞれ $m_\mu = 105.6\text{MeV}$ と $m_e = 0.511\text{MeV}$ およびゼロとなっている。従って μ の静止系における崩壊後の e と γ のエネルギーはそれぞれ $E_e = \frac{1}{2} \left(m_\mu + \frac{m_e^2}{m_\mu} \right)$ および $E_\gamma = \frac{1}{2} \left(m_\mu - \frac{m_e^2}{m_\mu} \right)$ である。数値的にはどちらも 52.8MeV である。このような結果は 3 体以上の粒子への崩壊では得られない。3 体以上への崩壊ではエネルギー運動量保存則が余り強い拘束とはならず、崩壊粒子のエネルギーは連続スペクトルをとり一般には運動量の方向にも規則性はない。

最初に $\mu \rightarrow e + \gamma$ が μ の崩壊モードとしては唯一の 2 体崩壊であると言うことの意味を詳しく述べる。これ以外に 2 体崩壊がありえないことを言うためには、エネルギー運動量保存則以外に電荷と $SU(3)$ チャージの保存則と lepton number の保存則だけで十分である。これは次のようにして分かる。 μ が崩壊するときはそれよりも軽い粒子に崩壊するはずである。これと電荷の保存則から μ は e 以外には崩壊できない。(μ よりも軽い電荷 -1 で $SU(3)$ 1 重項の粒子は e 以外に存在しない) これだけではエネルギー運動量保存則を満たさないので、全体として電荷と $SU(3)$ チャージを持たない粒子達が必要である。2 体崩壊をするためには γ か ν_e や ν_μ (ν_τ は重すぎる) のどれかしかありえない。しかしながら、これらの反応はどれも lepton flavor を保存しない。 $\mu \rightarrow e + \gamma$ は lepton number は保存するが lepton flavor は保たない。lepton number は保存するが lepton flavor は保存しないとすると、2 体崩壊としてあり得るのは $\mu \rightarrow e + \gamma$ だけである。また lepton number だけではなく lepton flavor も保存するとすると 2 体崩壊のモードは存在しない。最も単純な崩壊モードは $\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ であり、この崩壊モードの branch ratio は $1.4 \pm 0.4\%$ [1] であることが知られている。こうして standard model の仮定からは μ の 2 体崩壊は許されることが分かった。またエネルギー運動量保存則や電荷や $SU(3)$ チャージの保存則は、どれもゲージ対称性に関わる保存則なので破ることは許されない。これが $\mu \rightarrow e + \gamma$ が μ の崩壊モードとしては唯一の 2 体崩壊であると言うことの意味をである。つまり、この崩壊は standard

model に最小限の変更を加えることで可能となる μ の 2 体崩壊であり、その branch ratio は lepton flavor の破れの大きさによって抑制されている。

結局この反応が起こっていることを確認するためには、2 体崩壊が起こっていることを確認すればよいことが分かる。そのためには、2 体崩壊の特性である 2 つの点「逆向きの運動量」と「決まったエネルギー」を特定すればよい。この特性は崩壊粒子の静止系でのみ起こるので、 μ を何らかの物質に止めた上で実験する。その上で μ に対して互いに向かい合った位置に置かれた検出器にそれぞれ 52.8MeV のエネルギーを持った粒子が入射することを確認すればよい。粒子のエネルギーを測定するには calibration をしなければならない。その方法についてはこの節のあとで述べる。

0.2.2 $\mu \longrightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \gamma$

この反応は standard model で仮定されているどの保存則にも反していない。実際この反応が起こることは知られている。我々はこの反応の branch ratio を求めることを目的とする。この反応は通常の μ の崩壊モードに加えて γ が 1 つ放出されている。従ってその branch ratio は微細構造定数程度で抑制されている。これ以外の μ の崩壊モードは更に 1 つ以上の微細構造定数を因子として含むので、この実験ではそれらの存在は無視する。すなわち我々は通常の崩壊と、この崩壊を区別すればよいことになる。

通常の崩壊モード $\mu \longrightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ では、 e 以外の粒子は検出器で観測できない。しかしながら、 $\mu \longrightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \gamma$ で放出される γ は検出器に観測される。それ故 2 つの検出器が同時に反応する事を確認すれば、 μ の崩壊モードとして 2 種類しか考えないという近似の元ではこの反応が起こっていることになる。

我々は単にこの反応が起こっていることをいうだけではなく、branch ratio を測定することを目的としているのでこれだけでは不十分である。2 つの問題点があることに気付く。1 つ目は $\mu \longrightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \gamma$ が起こったにもかかわらず、2 つの検出器がならないという問題である。例えば、 e か γ が検出器のない方向にとんでいった場合がある。あるいは 2 つの粒子が同じ検出器に入るということも考えられる。2 つ目は検出器に崩壊粒子が入っていないにもかかわらずこれが反応するという問題である。例えば、 $\mu \longrightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ の反応で生じた e が検出器に入った瞬間に、別の検出器に宇宙線が入るということがあり得る。

これら 2 つの問題点を回避する方法を考えよう。まず 1 つ目の問題に関してはできる限り広い立体角をできるだけ小さな検出器で囲うというのが最も直接的である。前者によって取り逃しをできるだけ減らし、後者によってできるだけ位置

分解能を上げる。しかし検出器が大量に準備できないか、できたとしても大量のデータを読み出すのが難しい場合もある。その場合には計算によって実測値から実際の branch ratio を求める必要がある。その計算の詳細は 0.4 節で述べる。2 つ目の問題の対処方法は単純である。これはそれぞれの検出器が accidental に鳴る確率を求め、それらをまとめて back ground として引き去ることで対処する。これについても 0.5 節で詳しく述べる。

0.2.3 エネルギー測定器の calibration

我々は粒子のエネルギーを直接に知ることができないわけではない。測定器が返す値と粒子のエネルギーには線型な関係があるが、具体的な関数形は様々な要素の影響を受ける。それは例えば検出器や ADC の個体差であったり、検出器にかけている電圧や途中に使ったケーブル等も factor となる。そこで我々はエネルギー測定をするときはいつも両者の関係を求めることから始めなければならない。

今回我々は 52.8MeV に現れる signal を見たいので、数十 MeV あたりで有効な calibration をしたい。上で測定器が返す値と粒子のエネルギーには線型な関係があると言ったが、この関係は近似的なものである。したがってできるだけ正確な calibration のためには、見たいエネルギーの近くで calibration をする必要がある。このために、我々は宇宙線を用いた。以下で計算するように宇宙線が検出器に落とすエネルギーの平均値は 82.0MeV なので、これと宇宙線が検出器を貫通した時の ADC の出力を等しいと置くことで calibration を行う。(1 次関数の決定のためにはもう一つ入力が必要であるがこれには pedestal を使う。)

さて貫通宇宙線が検出器に落とすエネルギーを求めよう。このためには荷電粒子が検出器 (NaI) の中を単位長さ進む際に落とすエネルギーと、宇宙線が検出器の中を通る平均飛行距離を知ればよい。前者については 4.79MeV/cm[1] である。後者は検出器の形状や配置に依存する。calibration 時の検出器の形状と配置およびどの様なタイミングでエネルギーを測定するかは 0.3 節で述べる (図 34 参照)。このような set up に対して平均飛行距離を求めるためには以下のようにすればよい。宇宙線が検出器 1 と 4 を鳴らしていることから、検出器 2 の上面から入って来て検出器 3 の下面から出て行ったことが分かる。したがって粒子の軌道は 4 つの値 (検出器 2 の上面の位置と検出器 3 の下面の位置) で指定される。それらの変数を図 1 の様に置きシンチレータの大きさを $L \times L \times H$ とすると、粒子の飛行距離は $\frac{1}{2}((2L)^2 + (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2)^{1/2} = L(1 + (x_1/2L - x_2/2L)^2 + (y_1/2L - y_2/2L)^2)^{1/2}$ である。

したがってこれを $0 \leq x_1, x_2 \leq L$ と $0 \leq y_1, y_2 \leq H$ で平均すれば平均飛行距離が得られる。ただしここで宇宙線の天頂角分布を無視した。結果は、 $L = 5.5\text{cm}$

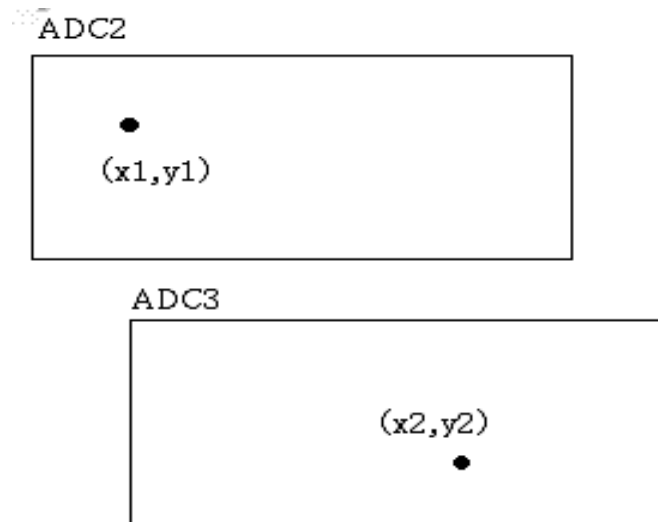


図 1: 平均飛行距離

と $H = 17.0\text{cm}$ から 17.14cm である。こうして、貫通宇宙線が検出器に落とす平均のエネルギー 82.0MeV を得る。

0.3 実験方法

0.3.1 実験機具

始めに検出機器について述べる。

機器	数	大きさ		
光電子増倍管 (PMT)	4 個			
プラスチックシンチレータ (大)	2 個	985	$\times 485$	$\times 10$
		985	$\times 485$	$\times 10$
プラスチックシンチレータ (中)	2 個	205	$\times 205$	$\times 35$
		204	$\times 195$	$\times 50$
プラスチックシンチレータ (小)	1 個	170	$\times 55$	$\times 55$
NaI シンチレータ	4 個	170	$\times 55$	$\times 55$

また論理回路を組むためのモジュールとその他の機材は以下である。

機器	数
discriminator	1 個
divider	1 個
coincidence	1 個
fan in/out	1 個
gate generator	3 個
ADC	2 個
attenuator	2 個
high voltage	2 個
oscilloscope	
delay cable	
High-Vol cable	

0.3.2 合成 TDC の作成

始めに TDC として機能する回路 (図 2 参照) の作り方を述べる。start 信号と stop 信号をそれぞれ lanch mode に設定した gate generator の start 端子と stop 端子に入力する。gate generator は start 信号が入ってから stop 信号が入るまでの間 nim 信号を出力し続ける。この信号を ADC に入れると ADC の出力は start 信号が入ってから stop 信号が入るまでの時間と 1 次関数の関係にあるはずである。これを TDC として用いる。ただし、そのままの信号を ADC に入れてしまうと信号が大きすぎて目的とする数 μscc の時間は測れない。そこで latch mode の出力を attenuator を経て ADC に入力することをにより目的の時間スケールにあった TDC を作成した。

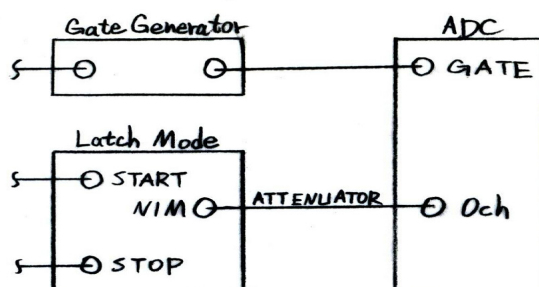


図 2: TDC 回路図

0.3.3 NaI シンチレーターの calibration

横にした NaI シンチレーター 4 個を図 3 のように積み重ねた。μ が間に挟まれた 2 つの NaI を貫通したときの各シンチレーターからの出力を ADC で測定した。このためには図 4 の様に回路を組めばよい。

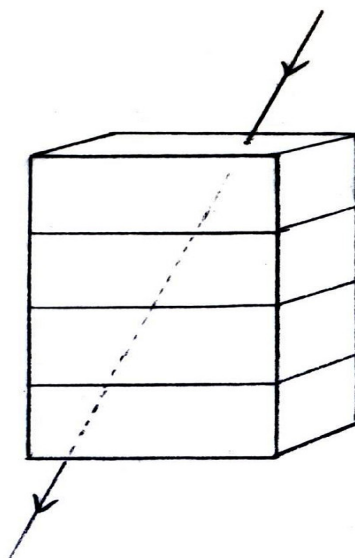


図 3: NaI キャリブレーションの配置

この方法では間の 2 つの NaI しか calibration ができない。そこで 1 度この配置で calibration をした後に上下の NaI と間に挟まれた NaI を入れ替えて同じ事を繰り返す。表にキャリブレーションを行った設定を示す。もちろん以降の実験でもこの設定は変更しない。またそれぞれの NaI の後に括弧つきで書かれているのは本実験における各 NaI の通称である。

NaI	HighVoltage	Threshold
IV-297 (adc1)	650V	10mV
IV-281 (adc2)	820V	10mV
IV-280 (adc3)	700V	10mV
IV-207 (adc4)	820V	10mV

表 1: NaI の設定

得られたデータと calibration の結果については 0.5 節で述べる。

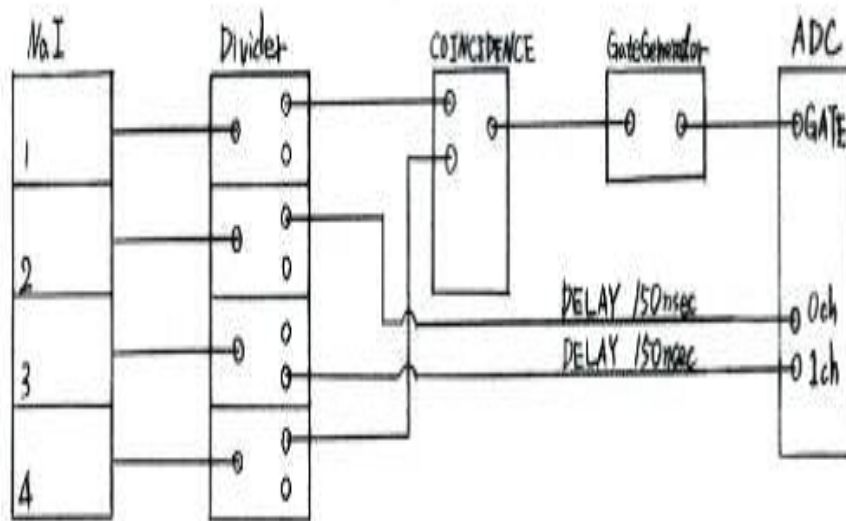


図 4: NaI キャリブレーションの回路図

0.3.4 プラスチックシンチレータの calibration

我々は NaI シンチレータの直前にプラスチックシンチレータ（小）を置く。そのプラスチックシンチレータは反応しなかったが、NaI は反応したとき γ の放出があったということができる。このためにはプラスチックシンチレータの pedestal の範囲を調べなければならない。これについては、本実験時のプラスチックシンチレータの出力から求めることができる。その結果については後の 0.5 節で述べる。

0.3.5 μ の崩壊の測定（本実験）

各測定器の幾何学的配置については図 5 および 6 の様になっている。また、これらの測定器からの出力を図 7 のような回路に組んだ。原理的にはプラスチックシンチレータ③に μ が止まった場合にのみ測定器が TDC と NaI シンチレータの出力を取るようになっている。もちろん、例えばプラスチックシンチレータ④がたまたま鳴らなかったなどの場合もある。従って、得られたデータの中には μ 崩壊ではないイベントも存在する。詳細はデータ解析のところで述べるが、そのようなデータを排除するために TDC が必要となる。

プラスチックシンチレータと NaI シンチレータの設定は表 1,2 にまとめてある。なお表 2 におけるプラスチックシンチレータの番号は図 5 において、上から何番目にあるかを表している。つまり、②と④が大サイズのもの、①と③が中サイズのものである。また⑤が図 6 の小サイズのものになっている。

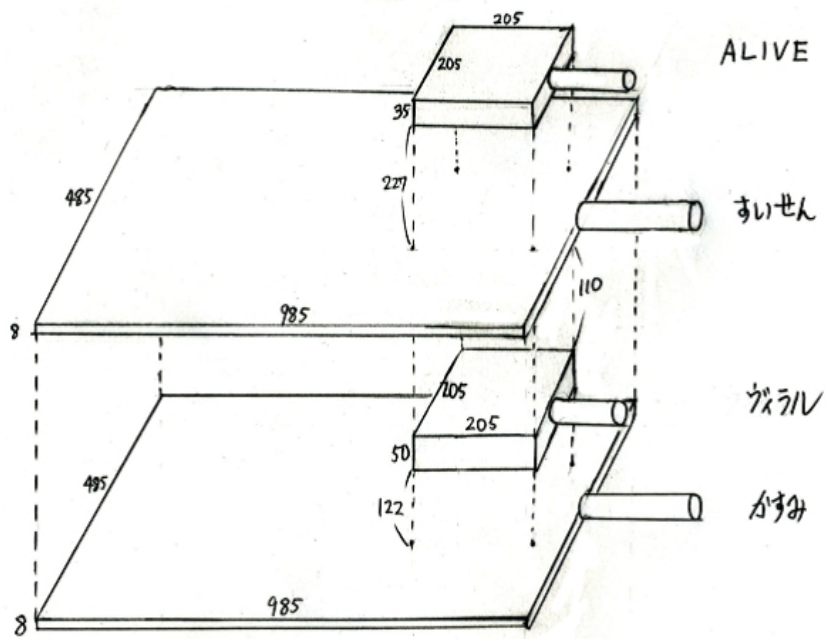


図 5: 本実験の装置配置

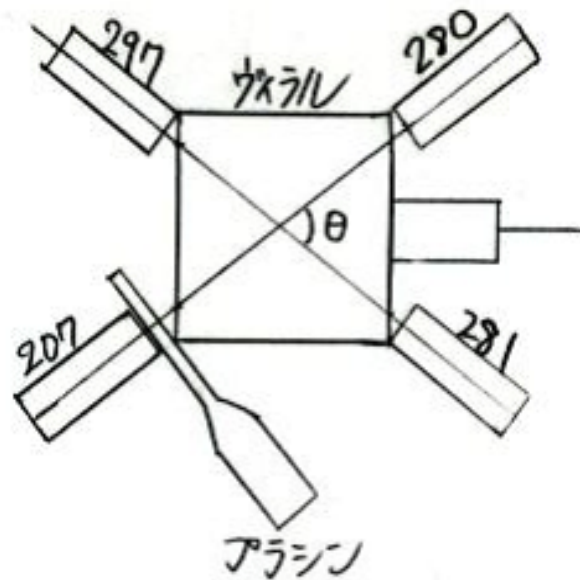


図 6: absorber とその周りの NaI の配置

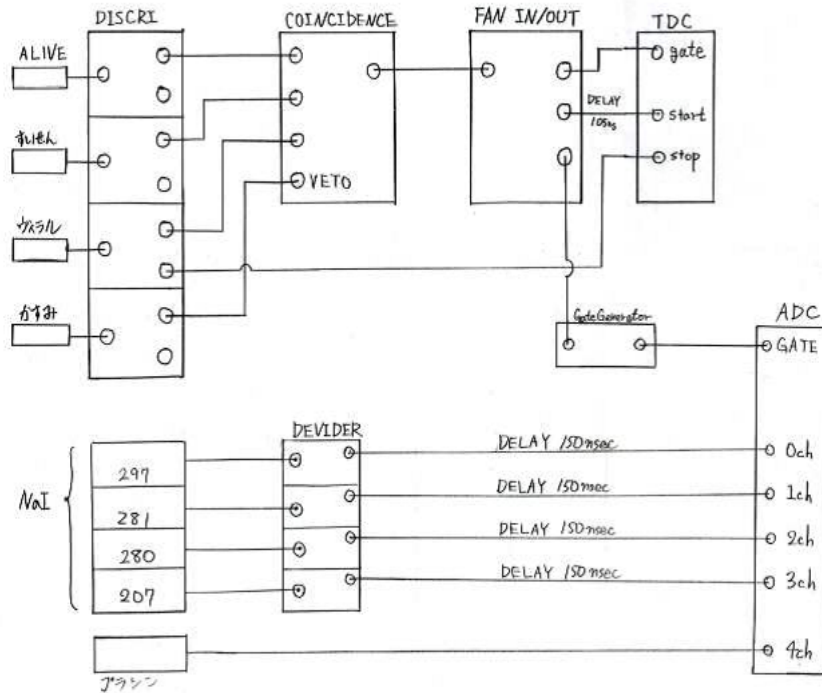


図 7: 本実験の回路図

0.4 シミュレーション

実験原理の節で述べたように、 $\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \gamma$ の反応の branch ratio を直接計測することはできない。これは生じたすべての $\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \gamma$ という反応を検出できないためである。そこで我々はこの装置の検出率（この反応が起こったときに二つの検出器が同時に反応する確率）を求める必要がある。

はじめにどのような設定で計算を行うかを説明しよう。absorber は直方体であり、それぞれの辺の長さを L_x, L_y, L_z とする。まず absorber 中のどこに μ が止まったのかを指定しなければならない。このために3つの変数 x, y, z を用意する。これらはそれぞれ一様乱数に従う。具体的には $x/L_x - 0.5$ と $y/L_y - 0.5$ と z/L_z が 0 と 1 の間で一様分布するようにする。つぎに崩壊によって生じた e と γ の飛行方向を指定しなければならない。このために全立体角へ等方的に分布する乱数を作る必要がある。これは polar angle を θ , azimuth を ϕ として $\cos \theta$ と $\phi/2\pi$ が 0 と 1 の間の一様乱数であるとすればよい。こうして e と γ は独立に等方的に飛んでいくとする。ここで1つ注意する点がある。それはここでは μ の偏極を無視しているという点である。本来宇宙線の μ は偏極していて、この反応がパリティを破る弱い相互作用であることからその偏極は e や γ の出て行く方向に影響する。しかしな

プラスチックシンチレータ	High Voltage	Threshold
①	1400V	30mV
②	2400V	30mV
③	1000V	100mV
④	1800V	50mV
⑤	1300V	

表 2: プラスチックシンチレータの設定

がら、ここでは簡単のためにそれらの影響を考慮しなかった。

こうして $\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \gamma$ の反応を多数回起こして、周りの検出器に入るかどうかを判定する。具体的には $(x, y, z) + \lambda(\sin \theta_e \cos \phi_e, \sin \theta_e \sin \phi_e, \cos \theta_e)$ と $(x, y, z) + \lambda(\sin \theta_\gamma \cos \phi_\gamma, \sin \theta_\gamma \sin \phi_\gamma, \cos \theta_\gamma)$ が検出器内部に入るかどうかを 0 から十分大きな値までの λ に対して調べる。こうして得られた検出率は $0.96\% \pm 0.05\%$ である。この値は後のデータ解析に置いて用いられる。

また $\mu \rightarrow e + \gamma$ の反応の検出率も求めておく。この反応では二つの崩壊粒子は互いに逆向きに放出されることだけが変更点である。この場合の検出率は $2.14\% \pm 0.08\%$ である。

0.5 データ解析

0.5.1 NaI シンチレータの calibration

それぞれの NaI シンチレータの 0.0MeV と 82.0MeV に対応した ADC の出力は以下の表 3 にまとめられている。

NaI	0.0MeV	82.0MeV
IV-297(ADC1)	149	1611
IV-281(ADC2)	111	1170
IV-280(ADC3)	172	2207
IV-207(ADC4)	162	2073

表 3: NaI シンチレータの calibration

これより ADC 出力からエネルギーの値を求められる。以下では全てエネルギーに換算している。

0.5.2 本実験に関する測定データ

実際に得られた生データは、各 NaI シンチレータは図 8~9 に、プラスチックシンチレータ (小) と TDC は図 10 のようになった。NaI の ADC 出力と TDC の出力は calibration 結果に基づいてエネルギー [MeV] に換算してある。

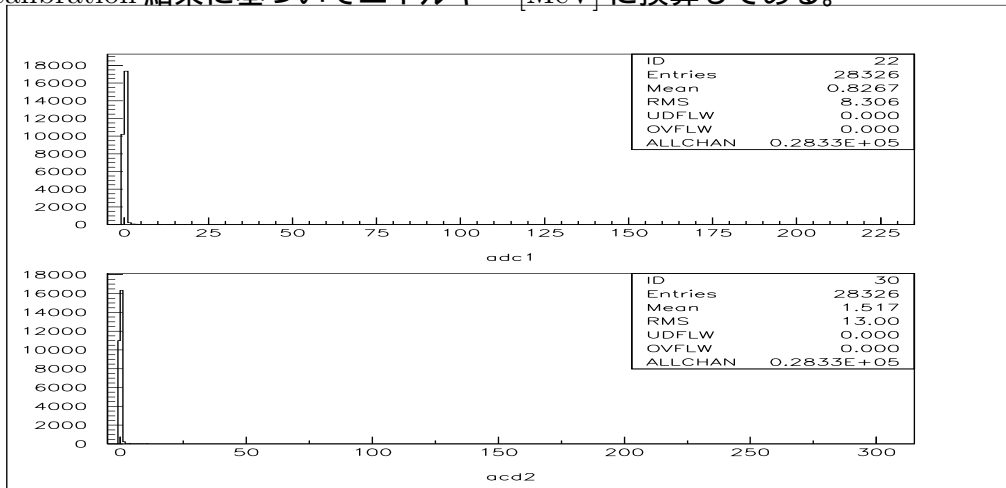


図 8: adc1 と adc2 の生データ (横軸:MeV)

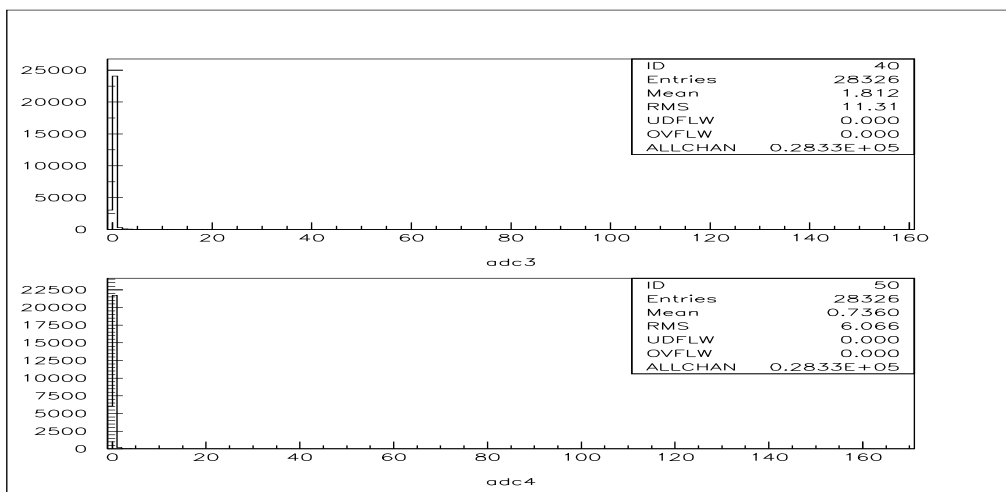


図 9: adc3 と adc4 の生データ (横軸:MeV)

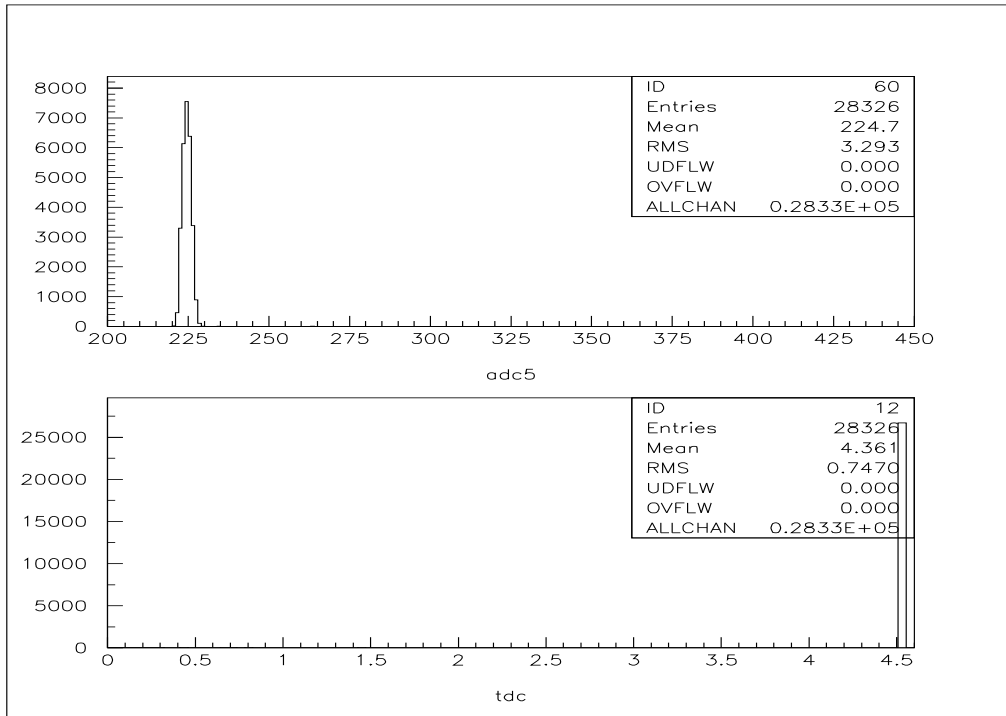


図 10: adc5 の生データ (横軸:ADC のチャンネル数) と tdc の生データ (横軸: μsec)

すぐに述べるがこれらのデータのほとんどは μ 崩壊ではない。これは TDC のデータが overflow ($tdc > 4.5\mu\text{sec}$) であることから明らかである。また NaI のデータの多くは、たとえ μ が崩壊したときでさえも pedestal の値しか返さない。これは崩壊によって出てきた e が NaI に入るとは限らないことから明らかである。そこで pedestal の部分を除き $tdc < 4.4\mu\text{sec}$ の条件を課したデータを以下の図 11 ~ 13 に示す。

以下ではこれらのデータに基づいて本実験の解析を行う。

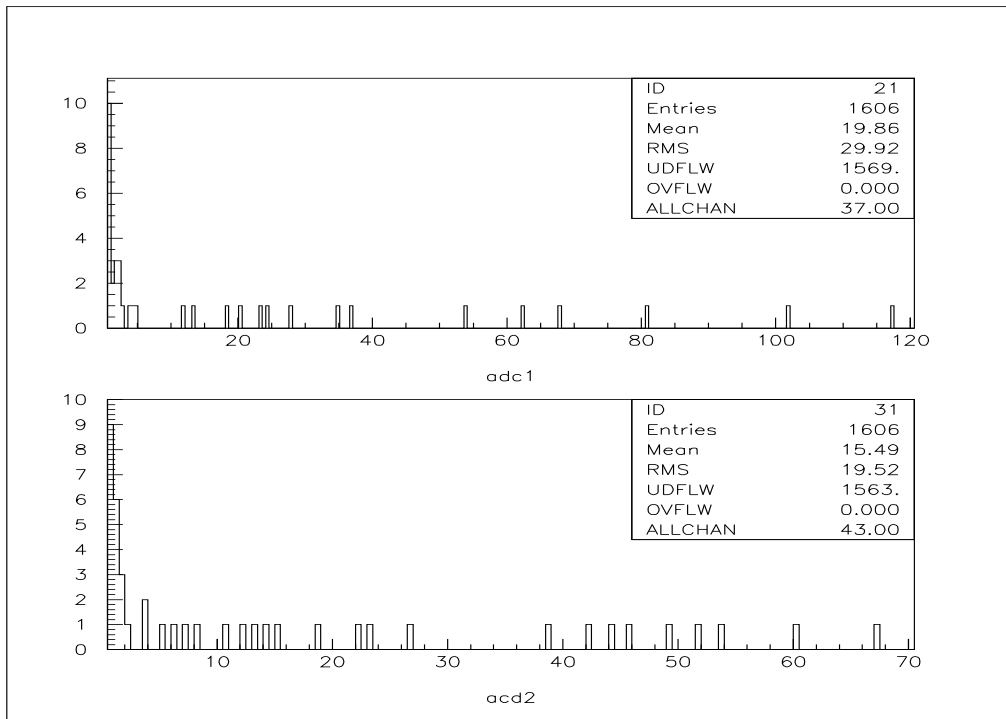


図 11: pedestal を切り $tdc < 4.4\mu\text{sec}$ の条件を課した adc1 と 2 のデータ (横軸:MeV)

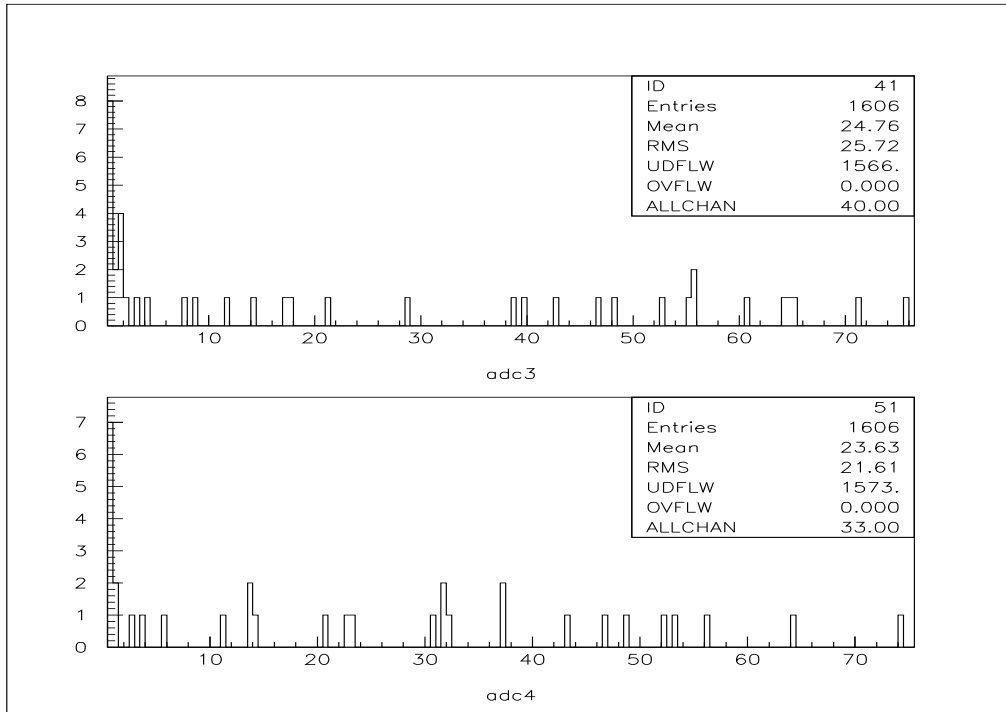


図 12: pedestal を切り $tdc < 4.4\mu\text{sec}$ の条件を課した adc3 と 4 のデータ (横軸:MeV)

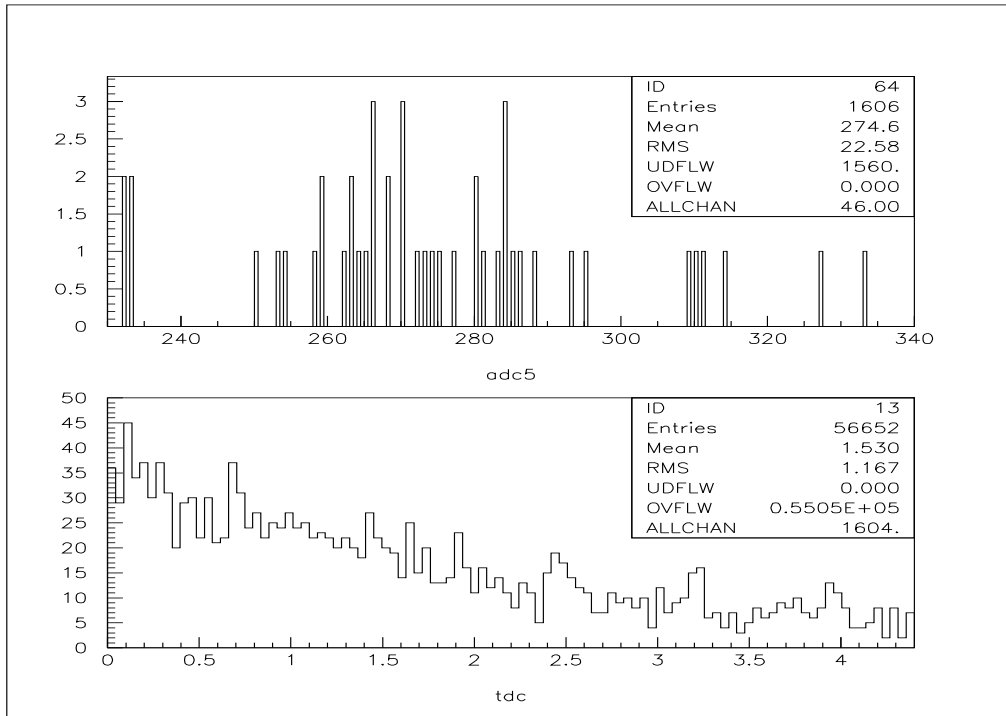


図 13: pedestal を切り $tdc < 4.4\mu sec$ の条件を課した $adc5$ (横軸:MeV) と tdc (横軸: μsec)

0.5.3 TDC の解析

図 10 のデータを見れば分かるがほとんどのデータは TDC の限界 (約 $4.5\mu sec$ 以上) を超えている。これが意味しているのは、実験方法のところでも述べたようにデータの多くが μ 崩壊以外のイベントを見ていることを意味している。そこで今回の実験において μ 崩壊イベントだけを取り出すために、TDC のデータが必要となる。はじめにすべきことは、overflow を除いたデータが本当に μ なのかどうかということである。

μ の崩壊イベントは指数関数的な振る舞いをするので時刻 t におけるイベント数を $N(t)$ とすると $N(t) = N_0 \exp(-t/\tau_\mu) + B$ となる。ここで τ_μ は μ の寿命であり、その値は $2.19703 \pm 0.00004[1]$ である。また N_0 は全エントリー数に比例した定数であり、 B はバックグラウンド (accidental なプラスチックシンチレータの反応などに由来) である。この関数を用いて上のデータを fit した様子が図 14 であり、結果は表 4 である。

この表における τ_μ の値は既知の値と合致している。これより overflow を除いたデータは μ であると同定する。したがって、以下の解析では我々は $tdc < 4.4\mu sec$ のデータを使うことにする。

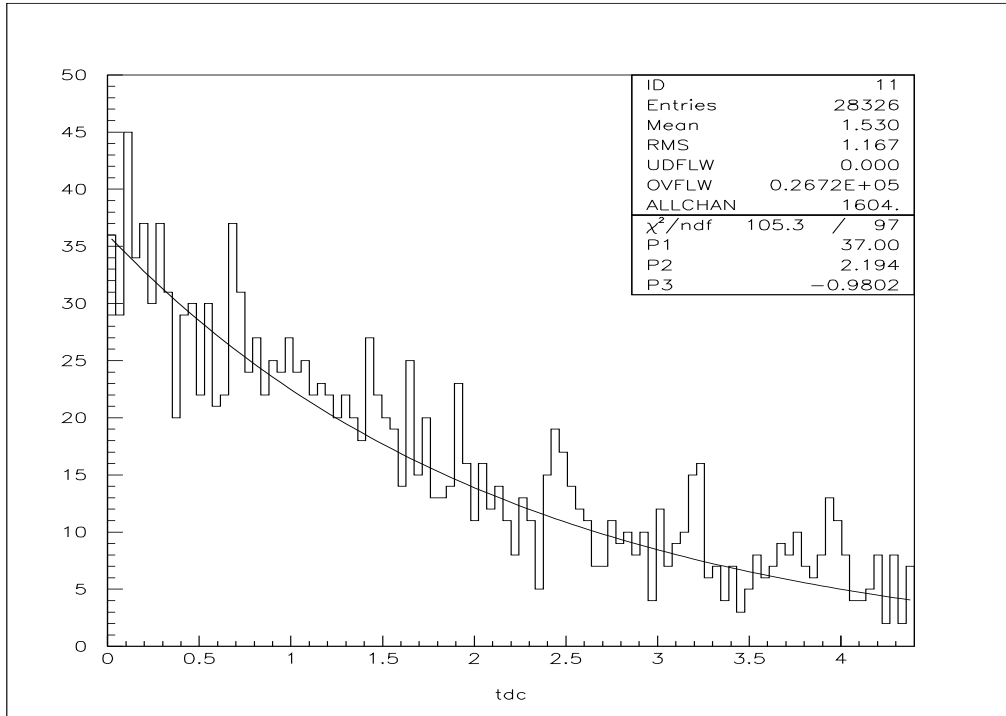


図 14: 条件 $tdc < 4.4\mu sec$ を課した tdc データを $N(t) = N_0 \exp(-t/\tau_\mu) + B$ で fitting した図

N_0	37.001 ± 1.7479
τ_μ	2.1942 ± 0.31367
B	-0.98017 ± 1.8755

表 4: μ の寿命

0.5.4 γ の探索

γ を探すには、薄いプラスチックシンチレーター (adc5) が反応せずに後ろの NaI シンチレーター (adc4) が反応するものを探せばよい。しかしここで一つ悲しいお知らせがある。それは実験の最中に使用していた薄いプラスチックシンチレーターがお亡くなりになりなした。なのでここでの解析はそれまでに得られた adc4 と adc5 のデータを用いることにする。

まずこの二つの相関と adc4 のデータを比べてみると図 15 になっている。

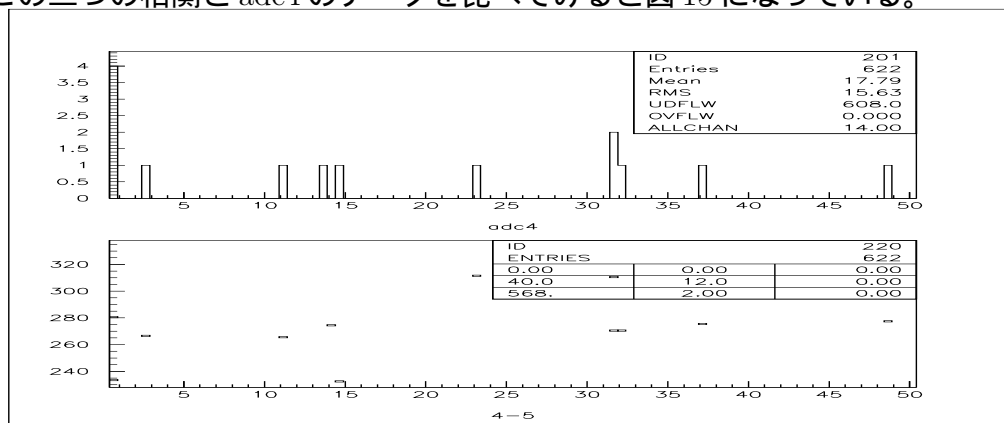


図 15: adc4 のデータと adc4-adc5 の相関の比較

この図 15 では pedestal 付近があやしい。そこでそれぞれの pedestal をまずはきちんと評価してみよう。pedestal 部分を Gaussian で fit した様子は図 16 である。このグラフを利用して pedestal の平均値及び分散が求められる。

これより、pedestal の範囲は adc4 は -0.001640 ± 0.17647 であり、adc5 は 224.45 ± 1.7327 である。(注: confidence level 90% は 1.645σ の範囲にある。以下に出てくる pedestal の範囲の決定もこれに従う。)

では先ほどの図 15 の pedestal 付近を拡大した図 17 を見てみよう。ゆえに図 17 より、adc4 の 0.42MeV と 0.56MeV のところにある 2 つは γ である。

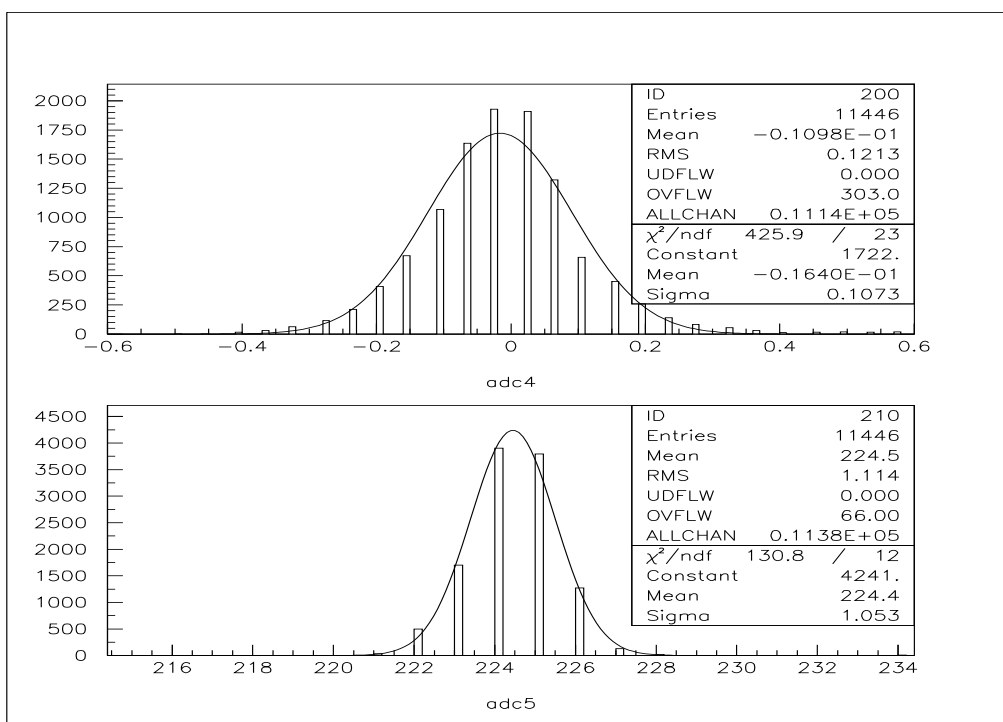


図 16: adc4 と adc5 の pedestal

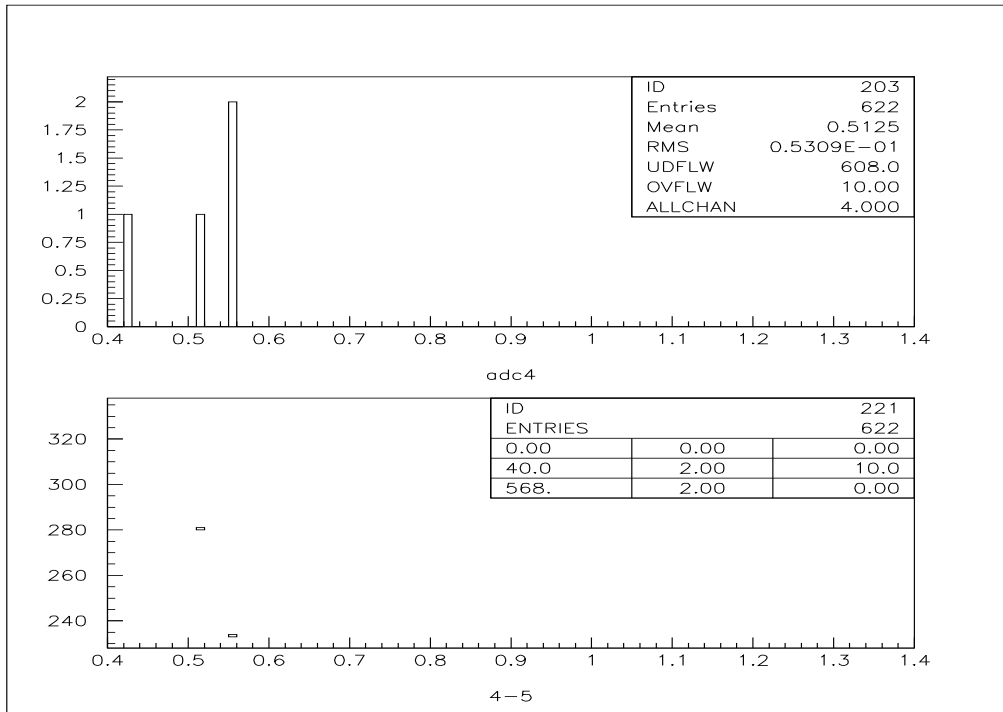


図 17: pedestal 付近の adc4 のデータと adc4-adc5 の相関の比較

0.5.5 2つのNaIシンチレータの相関

上で得られたNaIのデータの相関を見ていく。以下の図18と図19は異なるNaIシンチレータのデータを与えたものである。

(注:図は「1-2」と書いてあるものは、横軸がadc1(MeV)であり縦軸がadc2(MeV)を表す。)

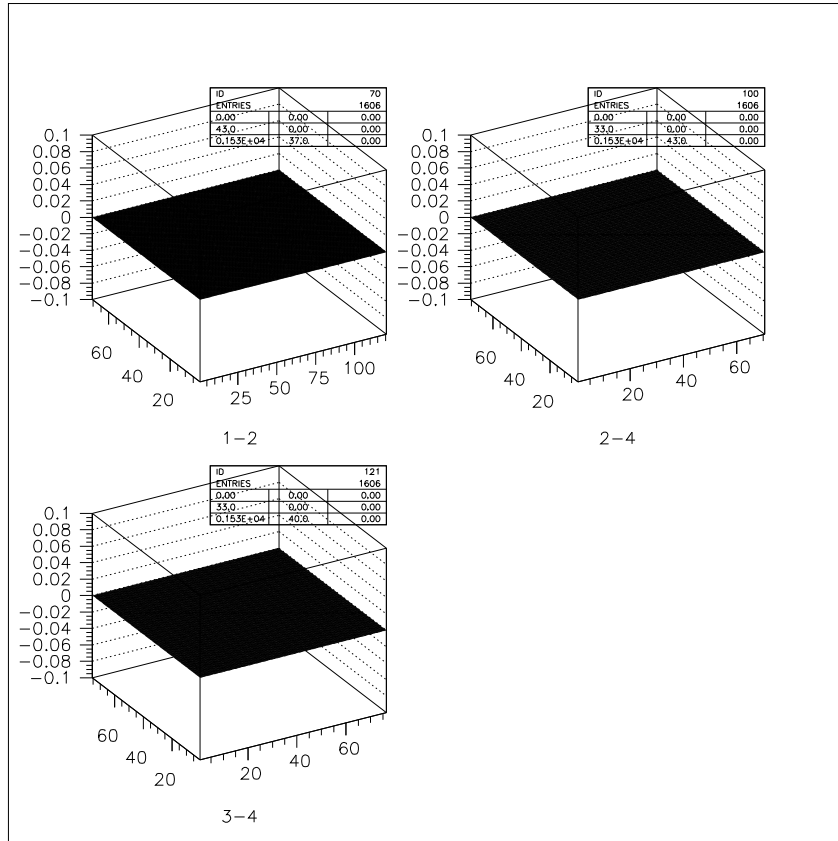


図18: 相関 adc1-2、adc2-4、adc3-4

図18より、adc1-2,adc2-4,adc3-4は全く相関がない。一方図19より、adc1-3、adc1-4、adc2-3は同時に反応しているデータがある。これをきちんと評価するために各NaIのpedestalの調べると、図20と図21のようになる。

これより pedestal の範囲は

adc1 : -0.000018490 ± 0.15167

adc2 : -0.019810 ± 0.14442

adc3 : 0.014881 ± 0.14905

adc4 : -0.0097693 ± 0.17284

である。

ゆえに図19に見える4つのデータは $\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \gamma$ である。

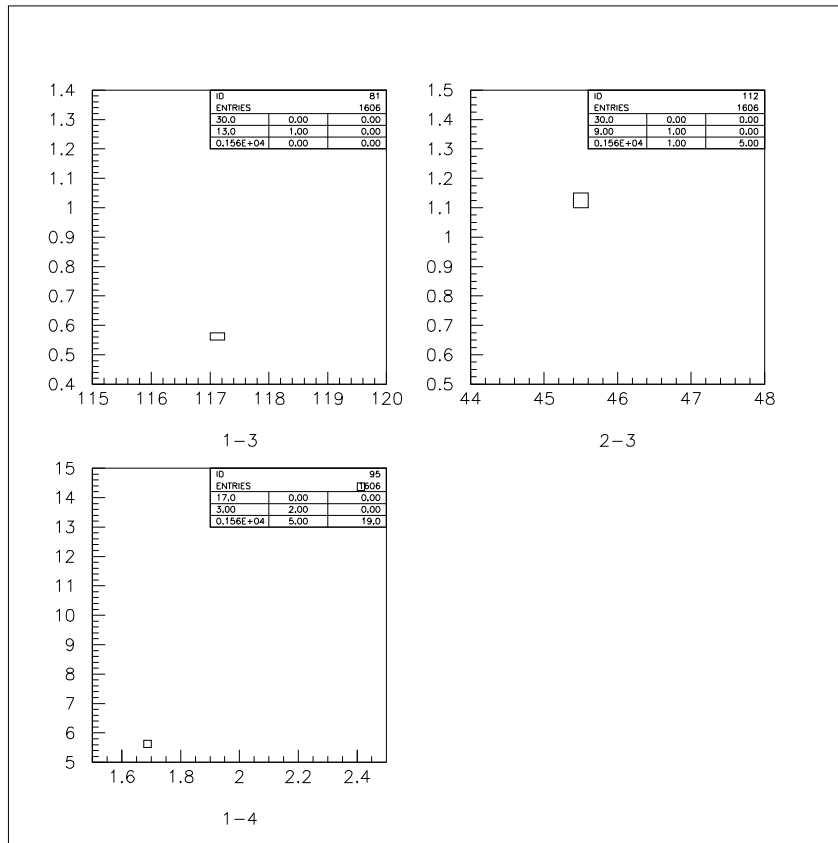


図 19: 相関 adc1-3、adc1-4、adc2-3

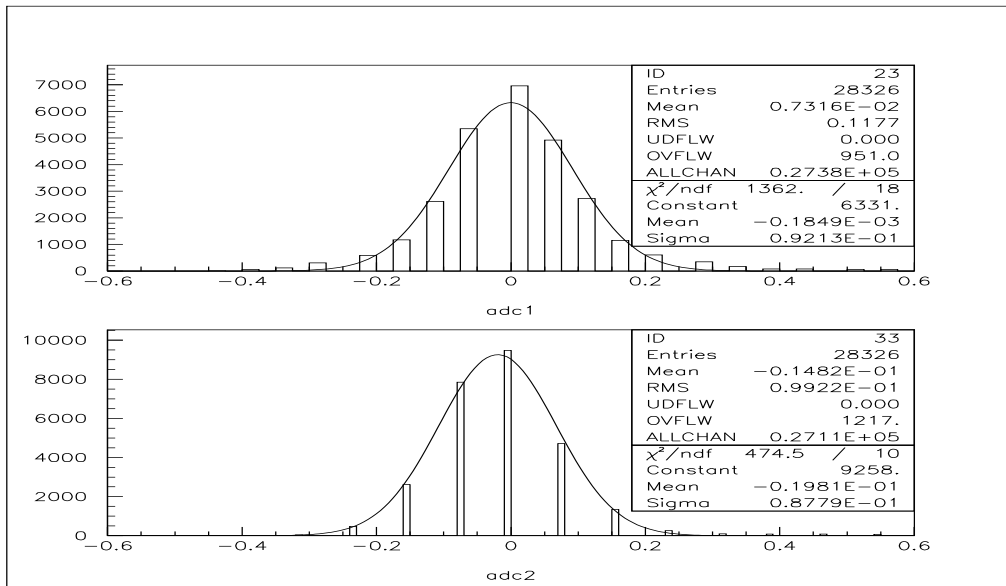


図 20: adc1 と adc2 の pedestal

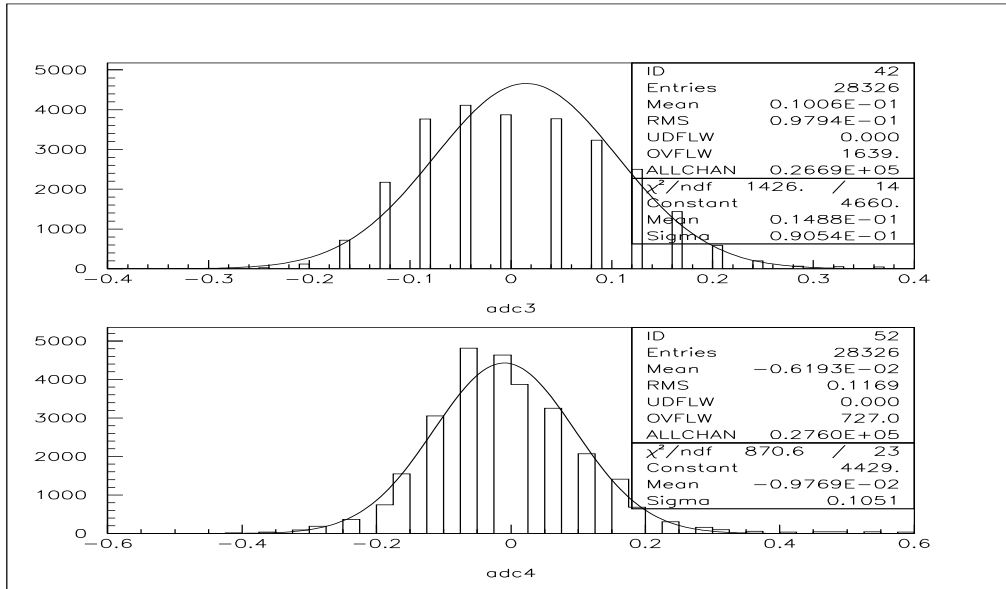


図 21: adc1 と adc2 の pedestal

0.6 実験結果および考察

0.6.1 TDC の overflow

TDC のほとんど (94.33%) のイベントは overflow (signal が $4.5\mu\text{sec}$ 以上たってから出ている) であった。上のデータ解析のところでは触れなかったがこの理由について考えたい。その理由としては、大きく次の二つが考えられる。一つは μ が止まっていないにもかかわらず gate が開いた場合で、もう一つは μ が崩壊したにもかかわらず overflow とみなされた場合である。それぞれについて更に詳しく理由を考えると、前者については以下の二つが考えられる。一つは accidental coincidence であり、もう一つは ④ がなかったというものである。後者についても二つの理由が考えられる。一つは overflow 扱いになるようなタイミングで μ が崩壊したというものであり、もう一つは ③ がなかったというものである。以下でそれぞれの影響がどの程度寄与しているのかを評価していく。

まずは accidental coincidence である。これはそれぞれの single rate およびそれぞれの signal の幅から評価できる。

これより、accidental coincidence の rate は $4.3 \times 10^{-9}\text{Hz}$ 以下であり、この影響は無視できる。

次に ④ による VETO がうまく働かなかったものを考える。まず①と②と③の coincidence の 3 時間測定したときと、①と②と③の coincidence に④の VETO を加えて 3 時間測定したときのカウンタ数はそれぞれ 168 イベントと 5627 イベントであった。これより、①と②と③がなったもののうち 2.99% は stopped μ として

	single rate	signal の幅
①	7.0Hz	50nsec
②	17000Hz	50nsec
③	5.1Hz	20nsec

表 5: single rate とシグナルの幅

カウントされることになる。その一方で④の efficiency は 98.97% であった。これより①と②と③がなったもののうち 1.03% は VETO が効かなかったことが原因で gate が開く。よって gate が開いた全体のうち 34.5% はこれが原因であることが分かった。

overflow 扱いとなるタイミング ($tdc > 4.5 \mu\text{sec}$) で μ が崩壊する事による影響を考える。この確率は 12.9% なので、今 μ 崩壊だと思っているイベントの 1.15 倍の μ 崩壊イベントが存在する。

最後に ③ がうまく働かなかったものを考える。③の efficiency は 92.6% なので、今 μ 崩壊だと思っているイベントの 1.08 倍の μ 崩壊イベントが存在する。上の factor とあわせて 1.24 倍に μ 崩壊イベントは増える。

overflow しなかったデータは全体の 5.67% なので、上のすべての factor を考慮に入れると全データの 41.5% についてはその原因が分かったこととなる。

0.6.2 $\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \gamma$ の branch ratio

全部で 1606 回の崩壊イベントがあったが、 $\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \gamma$ と思われるイベントは 4 個あった。従って、この崩壊モードの branch ratio は $2.6\% \pm 2.4\%$ である。

また adc4 と adc5 の相関から γ の存在を確認できるのではないかと考えた。実際 γ と思われる signal が 2 つ見つかった。

0.6.3 $\mu \rightarrow e + \gamma$ の branch ratio

全部で 1606 回の崩壊イベントがあったが、 $\mu \rightarrow e + \gamma$ と思われるイベントは存在しなかった。従ってその branch ratio の上限値は 2.1% である。

0.6.4 結論と課題

$\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \gamma$ の branch ratio の値 $2.6\% \pm 2.4\%$ は文献の値 $1.4\% \pm 0.4\%$ [1] と一致している。しかしながら、今回のデータは相対誤差が 92.3% と文献の誤差 28.6% と比べて 3 倍以上の誤差がある。あと 10 倍の統計をためることができれば勝負になったことを考えると、もっと早くから実験に取り掛かるべきであった。

また $\mu \rightarrow e + + \gamma$ の反応は見つからず、その branch ratio の上限値は 2.1% であった。これは現在のこの反応の branch ratio の上限値 $1.2 \times 10^{-9}\%$ [1] とくらべて 9 桁負けている。こちらに関してはもっと別の方法でアプローチしなければ勝負にならないと思われる。

0.7 謝辞

今回の P1 での活動は大変楽しく自分たちを大いに成長させるものでした。川合先生、市川先生、横山先生、TA の森井さん及び素粒子実験の院生の皆さんには大変お世話になりました。ありがとうございました。

関連図書

[1] Phys. Let. B **592** 2004 33