

ミューオニウム・反ミューオニウム変換実
験のための Anti-Mu 検出器の開発

臼井宗一郎 小黒桂 谷口七重 J.A.Hutasoit

目次

第 1 章	実験の動機	2
1.1	introduction	2
第 2 章	目的	3
2.1	実験の概略	3
第 3 章	測定	5
3.1	観測装置	5
3.1.1	セットアップ	5
3.1.2	NiM 処理系	7
3.1.3	Camac データ蒐集系	9
3.1.4	動作確認と予備実験	9
第 4 章	μ ビーム照射	11
4.1	原理	11
4.2	実験	13
4.2.1	原理	13
4.2.2	施設・装置	13
4.2.3	beam study	14
第 5 章	解析	22
5.1	energy calibration	22
5.2	cutting	24
5.3	Ta decay spectrum	26
第 6 章	結果	30
6.1	result	30
第 7 章	考察	31
第 8 章	謝辞	32
第 9 章	appendix	33
9.1	Source code	33

第1章 実験の動機

1.1 introduction

ミュオニウムとは正の電荷を持ったミュオンと電子の束縛状態であるミュオニウムからアンチミュオニウムへの変換は標準理論では禁止されている。。なぜならば、標準理論においては、全レプトン数保存則 $\sum(L_e + L_\mu + L_\tau) = const$ 、および、各世代ごとのレプトン数のパリティ類似保存則 $\sum L_l = const(l = e, \mu, \tau)$ (一つの世代においてレプトン数が保存される) という二つの保存則を満たさなければならないからである。ミュオニウムからアンチミュオニウムへの変換ではレプトン数は以下のようになる。

$$\begin{array}{rcccl} & \mu^+ e^- & \rightarrow & \mu^- e^+ & \\ \hline L & +1 -1 & \rightarrow & -1 +1 & \\ L_e & +1 0 & \rightarrow & -1 0 & \\ L_\mu & 0 -1 & \rightarrow & 0 +1 & \end{array}$$

ここでは世代ごとのレプトン数は保存されていない。従ってミュオニウムとアンチミュオニウムの変換が検出されることは、標準理論を上回るより進んだ理論的枠組みの存在を証明することにつながる。そのためには何らかの方法で アンチミュオニウムの生成を証明しなければならない。過去の実験ではアンチミュオニウム中の負ミュオンを W にキャプチャーさせ、そこで生成された Ta の崩壊を検出することによって証明している。そこで、我々は Ta decay のための検出器を開発することにした。この実験では Ta \rightarrow W 崩壊の検出器を作成し、その性能を試験した。

第2章 目的

2.1 実験の概略

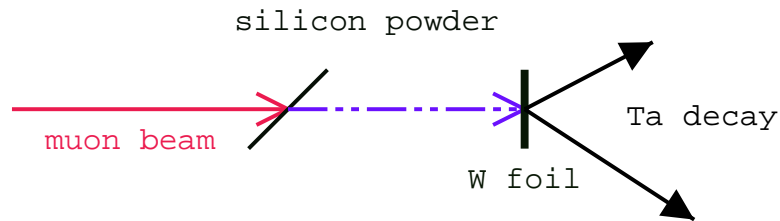


図 2.1: muonium

最終的に目的とされる実験では μ^+ のビームをシリコンパウダーに当て、反ミュオニウムを生成する。ミュオニウムへのコンバージョンが起これば、タングステンのホイルで μ^- がキャプチャーされ Ta ができる。Ta の崩壊スペクトルを観測する事で、反ミュオニウムからミュオニウムへの変換が起こる確率の上限を決定する。

我々の実験では負ミュオンビームを W ターゲットに照射し、生成された Ta の decay を測定する。decay して 414KeV の γ 線を出すイベントの数 ($N(414)$) は W 内で止まったミュオンの数 (N_{μ^-}) と detection efficiency を用いて以下のように表される。今回の測定で求める数値は $f(\text{nuclear})$ である。

$$N(414) = N_{\mu^-} fgh$$

symbol	Description
$f(\text{nuclear})$	Nuclear capture
$f(184)$	^{184}Ta production
$g(\text{decay})$	^{184}Ta branching ratio
$g(\beta)$	β efficiency
$g(\gamma)$	γ efficiency
$g(\gamma_{del})$	Delayed γ efficiency
h	^{184}Ta decay correction

$$f = f(\text{nuclear}) f(184)$$

$$g = g(\text{decay}) g(\beta) g(\gamma) g(\gamma_{del})$$

$$h = h(\text{beam}) h(\text{counting}) h(\text{busy})$$

$$h(\text{counting}) = \exp(-\lambda t_i) - \exp(-\lambda t_f)$$

$$h(\text{beam}) = [1 - \exp(-\lambda t_b)] / \lambda t_b$$

t_b : beam time

$$\lambda = \ln 2 / \tau \quad (\tau = 8.7 \text{ h half-life of } ^{184}\text{Ta})$$

t_i, t_f : starting and stopping counting time

第3章 測定

3.1 観測装置

3.1.1 セットアップ

図 (3.1.1) のような装置を作成し、図 (3.1.1) のようなセットアップを用いた。ここでは、その実験装置の要点について説明する。

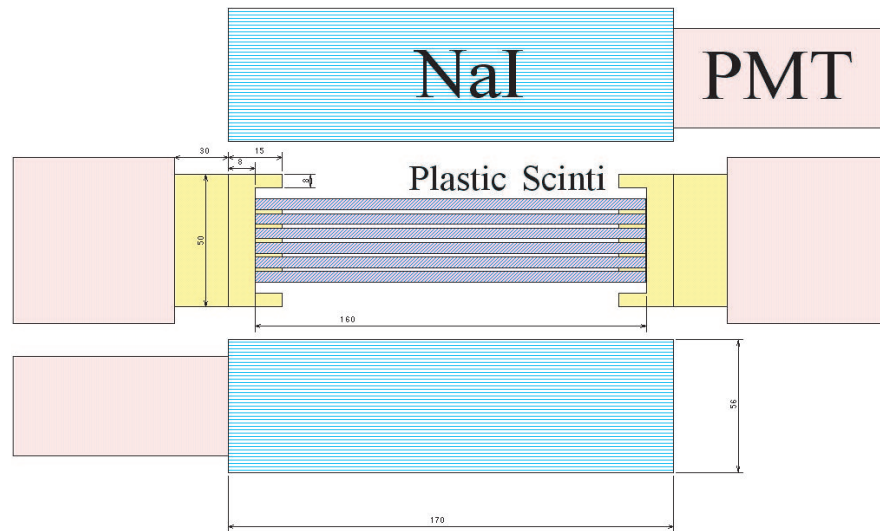


図 3.1: Detector

スリット型シンチレータを中心として、その両側に NaI シンチレータ 3 段で挟んだ。その上で、装置全体を口の字型アルミケースでシールドした。測定は装置に暗幕を重ねた上で行った。全体の大きさとしては幅 250mm、高さ 220mm、奥行き 250mm である。

まず、スリット型シンチレータについて説明をする。スリット型シンチレータの概形は図 (3.1.1) に示したとおり、3mm 厚の薄型シンチレータを 1mm 間隔で 6 層 5 スリット持っている。この多段スリット構造を用いることでほぼ全立体角を覆うことができ、三体崩壊などの角度依存性が少ない崩壊過程をとらえられるようにした。ここでは、 $W + \mu^- \rightarrow Ta$ の過程によって生成

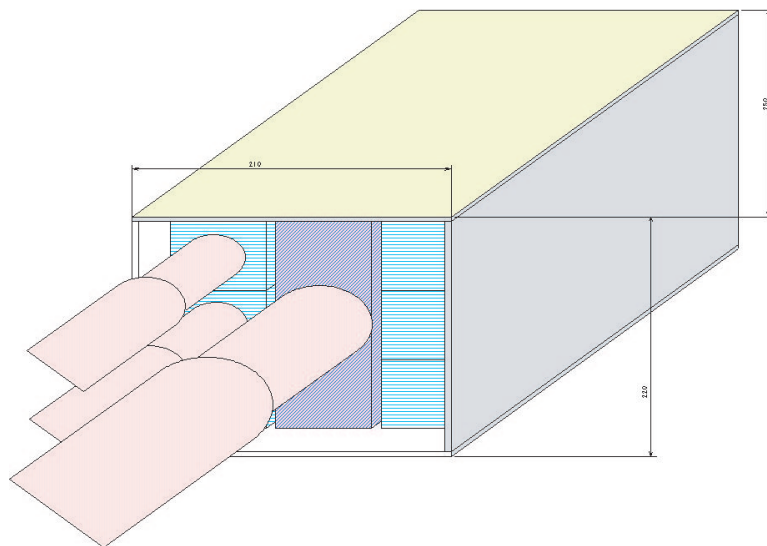


図 3.2: Setup

されたタンタル Ta の崩壊 $Ta \rightarrow W + e^-$ の検出が最適となるように、シンチレータの厚さと、段数を決定した。シンチレータの厚さ 3mm は、Beta 崩壊の低エネルギー電子をソースに隣接するシンチレータで検出するのに必要十分な厚さである。また、集光効率を上げるために各段のシンチレータそれぞれに対してアルミホイルを巻いて、反射材とした。このアルミホイルは電子と光子に対してほとんど影響を与えないことを確認した (詳しくは後述)。

スリット型シンチレータは構造上外部に露出面があることが避けられず、スリット型シンチレータ用の内部ケースを作成することで遮光することにした。ただ、煩雑さを避けるために内部ケース下部はスリット型シンチレータと不可分とし、その上で上蓋のみを取り外せるようにした。内部ケースは羅紗紙で外形を作り、内部にアルミホイルを貼った。また、糊付けした部分は遮光テープを巻くことで補強した。最後に Beta 崩壊の前後に放出される Gamma 線は内部ケースを含めてスリット型シンチレータに影響されずに両脇の NaI シンチレータに到達することを確認した。これらの検出効率については後述する。

信号強度

薄いシンチレータを用いなければならないため、信号の減衰を気にしなければならない。従って、シンチレータの表面をアルミホイルを巻いたもの、反射材を塗ったもの、加工をしていないものの 3 種類を用意し、正面の各点での出力信号強度を調べた。その結果、加工していないものはライトガイド

付近の信号しか捕れず、反射材を塗るかアルミホイルを捲かなければならないことが分った。しかしながら、反射材は塗るときに不均一になってしまい、厚さも不ぞろいになってしまうので、スリット型に用いるのは不適當だと判断した。アルミホイルはターゲットを挿入するときに破れてしまうというおそれがあるが、気をつければふせげること、また、最高の集光成績を示したことなどからこれを採用した。このときの信号強度を図(3.1.1)に示す。ここ

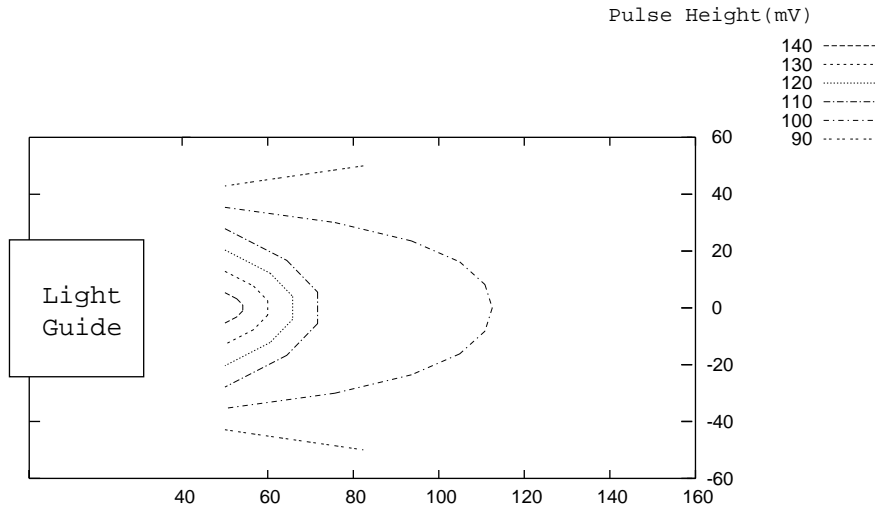


図 3.3: Signal Intensity

で分る通り PMT の近くの角の信号強度が非常に弱い。従って PMT による信号の読み出しはシンチレータの両側からの対面読み出しを採用し、その論理和をトリガーとする。

3.1.2 NiM 処理系

NiM 処理系の回路図と信号のタイムラインは図(3.1.2)である。ここでは、回路の設計方針と特徴について説明する。さて、まず注意しなければならないのはビーム照射によって得られるタンタル Ta が少ないために、タンタルの崩壊は稀なイベントであるということである。従って、機械的なデッドタイムによって信号を取り逃すことはないかと仮定した上で、ノイズについて考えればよい。ノイズが完全にホワイトノイズであると仮定すればエネルギーカットと時間相関を取ることで、ノイズフリーとすることができるであろう。この方針の元に回路を設計した。ただし、データに対するそのような条件はどちらも計算機上でより厳密に取ることができるので真の信号を取り逃さない程度に厳しい条件であればよい。まず、NaI シンチレータからの信号を FanIn

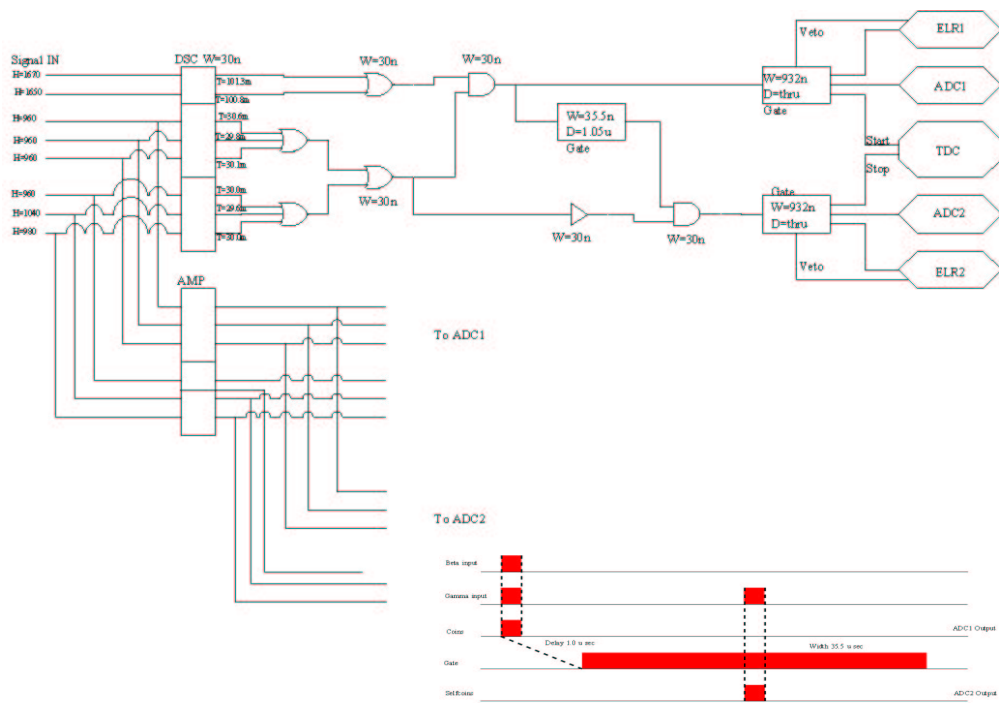


图 3.4: Logic Circuit and Time Line

/ FanOut で一つにまとめる。また、スリット型シンチレータからのそれぞれの面からの信号も同様に一つにまとめる。さて、 $Ta \rightarrow W + e^-$ の崩壊モードはまず Gamma 線 γ_p と、Beta 線 β がほぼ同時に放出され、その後十分な時間をおいた後、 $W^* \rightarrow W$ となる Gamma 線 γ_d が放出されることが知られている。従って、 $\gamma_{p,\beta}$ のコインシデンスを取り、それを遅延させたものと γ_d とのコインシデンスをもってトリガーとした。データを取るべき対象は $\gamma_{p,\beta,\gamma_d}$ のエネルギー、および、 $\gamma_{p,\beta}$ と γ_d との時間差である。従って ADC を 2 つ TDC を 1 つ用いた。

3.1.3 Camac データ蒐集系

NiM 処理系から出力をゲート、もしくは、トリガーとして Camac データ処理系でデータを計測した。Camac Module は電子計算機から制御し、OS として Linux 2.2、デバイスドライバとして KEK 配布の ccp driver for Linux ver 1.24 を用いた。データ収集プログラムのソースは付録に、シーケンシャル図は図(3.1.3)に示す。ここでの注意点としては SDL ライブラリを用いて 10msec 程度の Wait を取っていることである。これは、TDC が古いために残念なことだがトリガー周波数が高いと TDC 自体が HungUp してしまい電源をいったん落とすまで復旧しないことに起因する。そこで Ta の崩壊が稀なイベントであることから、同時にイベントが発生するということはないと仮定して、TDC が HungUp しないぎりぎりの Wait を取ったのである。

3.1.4 動作確認と予備実験

以上の機器で Ta の崩壊を観測することができることを確かめるために以下の予備実験を行った。

- 観測装置の動作確認
- NiM Camac の動作確認
- バックグラウンドラン

観測装置の動作確認としてポジトロニウムの 2γ Decay を測定した。具体的には NaI シンチレータの動作確認として Back to Back コインシデンスをとり、511keV のスペクトルを観た。つぎに、 ^{22}Na の崩壊と同時に放出される 1275keV の γ 線と β 線をトリガーとして、1275keV と 511keV の γ 線のスペクトルを観た。さらに宇宙線が検出されないことを確かめるために、同一のセットアップでデータを捕り確認した。

NiM Camac の動作確認として、ポジトロニウムの 3γ 崩壊を検出した。6本の NaI シンチレータのうち 1 つを 1275keV の γ 線にたいするトリガとし、

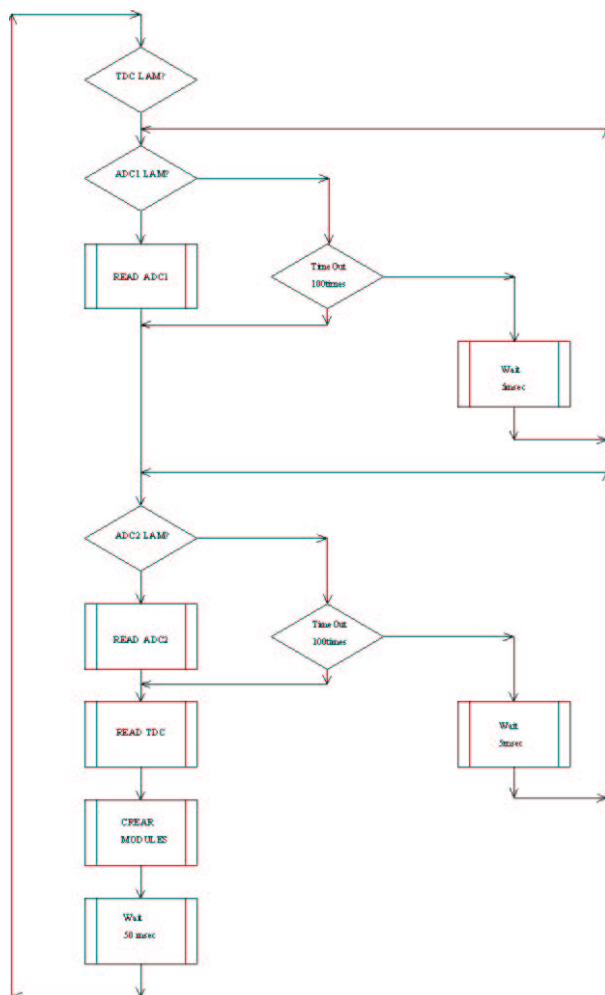


図 3.5: Sequential

残り 5 本を二つの二つの組に分けてその両方の組から出力があったときにデータを捕るようにした。この組み合わせを様々に変えて動作を確認した。更に、 β 線もコインシデンスに組みこんで正常に働くことを確認した。続いて TDC についても確認をしたが原因不明の遅延信号が発生しており、Na を用いて確認したのは誤りであったことが後に判明した。本番の実験では $1\mu\text{sec}$ 以下の崩壊は Veto としておりここからも Na を用いた試験は不適切である。

バックグラウンドランについては後述する。

第4章 μ ビーム照射

4.1 原理

μ がある物質内に入り込むと、弱い相互作用で電子に崩壊するほか、物質の原子核に捕獲される。捕獲により、観測される μ がより早く減少し、“見かけの寿命”が変化する。この捕獲率は原子に特有のものなので、崩壊により発生した電子を観測し、量と見かけの寿命の変化とを調べることで、原子に μ が捕獲されたことを示すと同時に、どの原子にどれだけ捕獲されたかがわかる。

μ が 1 パルスにつきターゲットに n_0 個入射するとする。ターゲット原子にキャプチャーされずに電子に崩壊していく過程で、 τ を μ の静止時の寿命 ($2.2\mu\text{sec}$) とし、 λ をターゲット原子の μ キャプチャー定数とすると、ターゲット中の μ 数 $n(t)$ は

$$\begin{aligned}\frac{dn}{dt} &= -\frac{1}{\tau}n - \lambda n = -\frac{1}{\tau'}n & \left(\tau' = \frac{\tau}{1 + \tau\lambda}\right) \\ n(t) &= n_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau'}\right)\end{aligned}\quad (4.1)$$

キャプチャーされずに崩壊し、検出器にかかる電子数 $e(t)$ は、検出器の acceptance を η として

$$\begin{aligned}\frac{de}{dt} &= \frac{\eta}{\tau}n = \frac{\eta n_0}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau'}\right) \\ e(t) &= \frac{\eta n_0 \tau'}{\tau} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau'}\right)\right]\end{aligned}\quad (4.2)$$

となる。

今、ビームの周波数 f 、ビームの照射時間を T 秒とする ($1/f \gg \tau'$)。 b をビン幅として、 m 番目のビンの高さ $B(m-1)$ ($=b(m-1) \sim bm$ 間の総イベント数) は以下のようなになる。

$$fT \int_{b(m-1)}^{bm} \frac{de}{dt} dt = fT \int_{b(m-1)}^{bm} \frac{\eta}{\tau} n dt = \int_{b(m-1)}^{bm} \frac{\eta N_0}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau'}\right) dt \quad (N_0 = fTn_0)$$

実際、図 4.1 のようなスペクトルが得られる。横軸は t 、縦軸はイベント数である。 T 秒のビーム照射で得られた実際の電子のスペクトルは $B(m)$ (実際

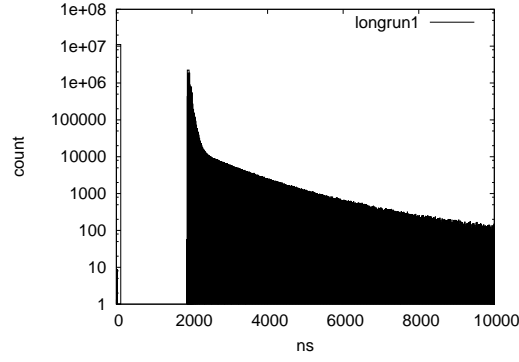


図 4.1: 生データのスペクトル

のスペクトルのゼロ点と、イベントのゼロ点は違うので、今の場合イベントのゼロ点に合わせる) を使い、指数関数で fitting した時に得られる関数を $G(t) = G_0 \exp(-t/\tau')$ とする。全イベント数 $I = \sum B(m)$ は、ビン幅が積分範囲に比べて十分小さいとすれば

$$\begin{aligned}
 I &= \sum B(m) = f T e(\infty) = \frac{\eta N_0 \tau'}{\tau} \\
 &\simeq \frac{1}{b} \int_0^\infty G(t) dt = \frac{G_0 \tau''}{b} \\
 N_0 &= \frac{G_0 \tau \tau''}{b \tau' \eta} \simeq \frac{G_0}{b \eta \tau} \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

と求められる。 $N_0/T \equiv F$ は単位時間にターゲット原子に衝突した μ 数である。

ターゲットが数種類の原子からなる場合、

$$G(t) = \sum G_i \exp\left(-\frac{t}{\tau'_i}\right) \quad (\tau'_i; \text{各原子のキャプチャー定数に対応する見かけの寿命})(4.4)$$

として、各々のゼロ点が各原子に入射した μ の個数に対応すると考えられる。

一方、キャプチャーされる μ 数 $c(t)$ は

$$\begin{aligned}
 \frac{dc}{dt} &= \lambda n = \lambda n_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau'}\right) \\
 c(t) &= \lambda \tau' n_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau'}\right)\right] \quad (4.5)
 \end{aligned}$$

である。これから、 μ キャプチャーレートは $\lambda \tau'$ で与えられる。

今回の実験では、タングステン (W) に μ がキャプチャーされてタンタル (Ta) に遷移する。

Wに単位時間に入射する μ 数 F_W は $F_W = G_W / (b\eta r T)$ である。
 μ をキャプチャーしたWが、Taに変わる割合を r とすると、Taの個数 $Ta(t)$ は、Taの寿命を κ とすると

$$\begin{aligned} \frac{dT_a}{dt} &= rF_W - \kappa T_a \\ T_a(t) &= F_W r \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\kappa}\right) \right] \end{aligned} \quad (4.6)$$

となる。

4.2 実験

4.2.1 原理

1. 陽子が金属に衝突にすることにより π 粒子を生成し、その崩壊で生じた μ をえる。
2. μ の電荷及び運動量を、磁場により調節する。今回の実験では60MeVの μ^- を用いた。
3. μ をターゲットにぶつける。このターゲットからでてくる崩壊電子をシンチレータで検出、TDCのストップになる。ストップ信号はばらばらにたくさんあるので、multi stop TDCを使い、一つ一つがストップ信号になるようにする。TDCのスペクトルから、見かけの寿命、フラックスがわかり、キャプチャーされた μ 数がわかる。
 なお、TDCのstart signalは、 μ がtargetに入射した時間ではないので注意を要する。

4.2.2 施設・装置

1. 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所
 中間子科学研究施設 (KEK-MSL) 第一実験室 μ -port (appendix)
2. target foil [W] ; 50mm×100mm×0.1mm
3. folder [Al] ; W foilをはさみこんで固定するためのもの
4. プラスチックシンチレータ (図 4.3) ; 検出効率 $\eta \sim 0.38$

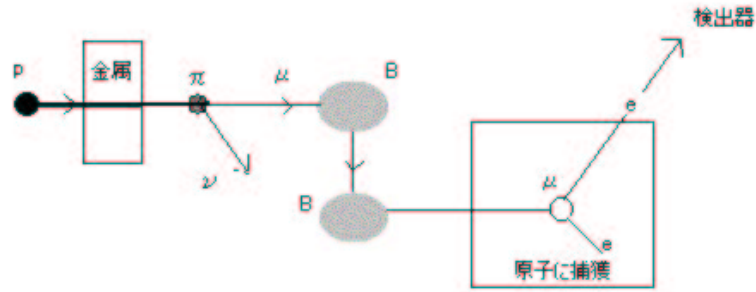


図 4.2: 実験の概略

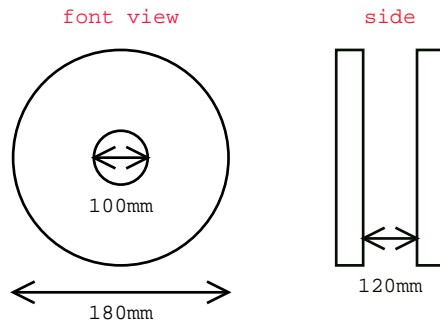


図 4.3: プラスチックシンチレータ

4.2.3 beam study

実験

1. ビームフラックスを最大化する。
 μ の経路上に何箇所か磁場をかけて軌道を調整する。そのうち一つは μ の運動量を決めるために磁場の強さは固定されているが、他の箇所の磁場の強さを実験前に調節して最大化を行う。
 実際には、キャプチャーレートが良く知られている、60MeV の μ を十分に止めるだけの厚さを持つ Al 板 16mm をターゲットにし、10 秒間の照射でのイベント数をみながら調節する。
2. Al16mm に 5 分程度ビームを当ててスペクトルを見る (Al 16mm)。
3. ターゲットなし (nothing), foil folder のみ (folder only) でビームを当

てる。

4. ビームに対し、初めは手前に W 0.6mm+Al 16mm、以後 W を 0.2mm ずつ 2.0mm まで増やし、各々5分程度ビームを照射してスペクトルを見る。(W 0.6mm ~ W 2.0mm)
5. ビームに対し、手前に Al 2mm+W 2.0mm として、長時間ビームを当てる。(longrun1~7)
手前に Al を置くのは、Beam study から、 μ は W 2.0mm では十分に止まっていないのではないかと判断したためである。

評価方法について

- ”イベントのゼロ点”について

得られたスペクトルにおける、イベントのゼロ点を 2060ns に設定する。これは、2000ns 前後で、途中で崩壊した電子が検出器にかかることによるノイズがあるからである。以後、このゼロ点を修正したスペクトルを用いる。(図 4.4)

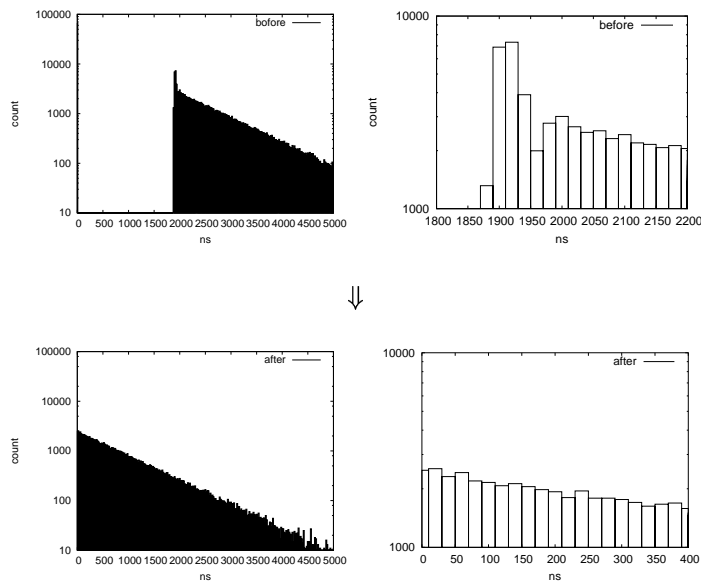


図 4.4: イベントのゼロ点の修正

- fitting について

イベントのゼロ点をあわせた TDC のスペクトルを、指数関数で fitting する。二種類の金属があれば、二つの指数関数で fitting する。二つの指数関数の fitting から求まる見かけの寿命から、他のデータと

比較することにより、金属の種類をある程度同定することができる。
そのゼロ点の比が、各々の金属に止まった μ の数の比である。

- 単位時間当たりの event count について

全ての粒子が完全に Al+W でとまり、全ての崩壊電子が検出されるのであれば、グラフのゼロ点はターゲットに止まった数を表しているもので、それはターゲットの量によらないはずである。しかし、現実としてグラフのゼロ点は Al のみ 16mm と W 0.6mm+Al 16mm で最大であった (図 4.5)。ここから “ μ を全てとめることができる厚さがこの間にあるのではなのではないか” と考えることができる。

以下、W 0.6mm を基準にして考える。

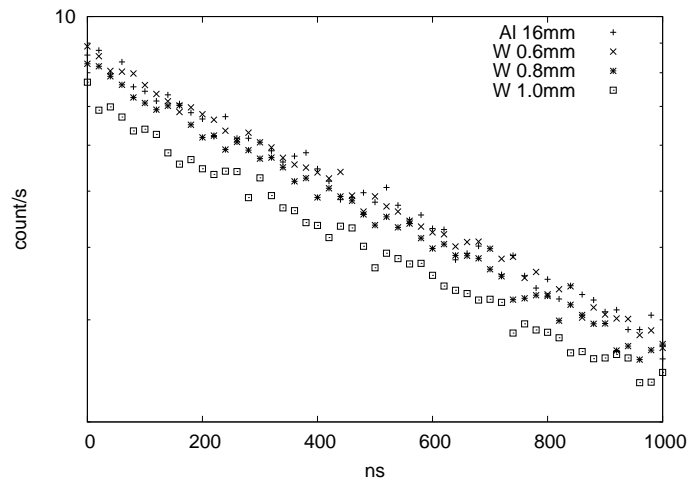


図 4.5: 総イベント数 (グラフのゼロ点) の比較

- back ground について

foil を置かなくても、W + Al に似た、二種類の金属+定数というスペクトルの形が最もよく合う (図 4.6)。

バックグラウンドでも μ 崩壊電子を測定する機器中の金属に μ が止まって崩壊した電子、途中で崩壊して生じた電子がある。

上で述べた back ground はターゲットを置いたときは、置かない時と同じように観測されない。なぜなら上で考えた back ground に方向性がありターゲットにより遮断され検出されない部分が出る。すなわち、ターゲットを置かなかったときの全てを back ground として差し引くことはできない。

”W 0.6mm+Al 1.6mm ~ W 1.0mm+Al 1.6mm までは、back ground

を引く前のスペクトルにおいて、2exp で fitting した時に、W に止まったと思われる flux は大差がなかった (表 4.1)。ということは、このままでは現実として W には止まっていなかったことになる。

W[mm]	$G_W(0)$ [s^{-1}]	τ_W [ns]
0.6	0.485 ± 0.022	55.78 ± 0.29
0.8	0.455 ± 0.025	95.93 ± 0.59
1.0	0.667 ± 0.027	45.25 ± 0.20
1.2	1.056 ± 0.020	100.86 ± 0.20

表 4.1: 修正前のスペクトルの fitting parameters

以上から推測すると、ターゲットを置いた時に引くべき”back ground”は、”W 0.6mm の時に、W に止まっているようにみえた量”であると考えられることができる。

W 0.6mm+Al 1.6mm のスペクトルを 2exp でフィットして、”W と同じように見える部分”を打ち消すように、ターゲットを置かなかった時のスペクトルのファクターを調整すると、40 パーセントとなった。直感的にも、ビームに対して後方の検出器のほうが、よくビームのノイズを捕らえると考えられるので妥当であると考えられる。また、図 4.6 からも、差し引く Back Ground として適当である。

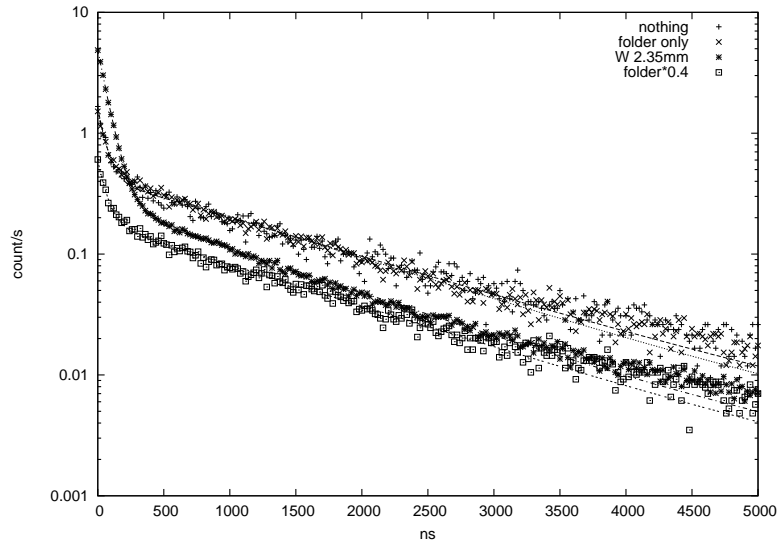


図 4.6: Back Ground, folder のみ, longrun, folder×0.4 の比較

- みかけの flux (グラフのゼロ点の総和) が減ることについて

グラフのゼロ点の総和は単位時間にターゲットに入射する総 μ 数である。しかし W が増えるにつれ、それが減る。これは、“ターゲットが beam の進行方向に対して”厚く”なったからである”と考えるのが妥当である。ここから以下の仮定をする。

”W 0.6mm の時に、Al 中に全ての μ が止まり、グラフのゼロ点が全 flux を表している。”

”W の増加による見かけの flux の減少は、W の厚みの増加のみによる。減少分は W に止まっている。”

よって、W の増加によって減ったと考えられる見かけのフラックスの分は、全て W に止まっているとして、その分を足してやる必要がある。

以上から、生のデータから、何枚目にどれだけの割合が止まったかということとを導き出す手順は

1. 生スペクトルのイベントのゼロ点を 2060ns にし、スペクトルを修正する。
2. 生データをビーム照射時間で割る。
3. スペクトルから、ターゲットをおかないで図ったスペクトルの 40 パーセントを差し引く
4. 1exp もしくは 2exp で fitting。
5. W 0.6mm の時の全体のゼロ点と、各々の場合の全体のゼロ点の差を取り、(見かけのフラックスが減った量) その分を W のグラフのゼロ点に加える。
6. Al 2mm + W 2.0mm \rightarrow W 2.35mm と換算して、同様に求める。(はじめの 0.6mm には止まってないと仮定)。
7. こうして longrun の時の W のグラフの補正したゼロ点を 100 パーセントとして、各々の補正したゼロ点の割合を求める。
8. 後は Al の換算量 0.35mm の分を引いて、longrun の時にどれだけの割合が止まったかを知ることができる。

9. 誤差の評価

W 0.6mm の時の W の補正したグラフのゼロ点を G_1 などとする。 $G_0 = 0$ である。

タングステンの何枚目に止まったかという割合は

$$A_i = \frac{G_i - G_{i-1}}{\sum_j G_j} \tag{4.7}$$

$$\frac{\partial A_i}{\partial G_k} = \frac{(\delta_{i,k} - \delta_{i-1,k}) (\sum G_j) - (G_i - G_{i-1})}{(\sum G_j)^2} \quad (4.8)$$

以上から *fitting* の誤差を ΔG_i とし、 A_i の誤差 ΔA_i は以下のように求まる。

$$(\Delta A_i)^2 = \sum_k \left(\frac{\partial A_i}{\partial G_k} \right)^2 (\Delta G_k)^2 \quad (4.9)$$

評価

1. fitting (表 4.2, 図 4.7)

$\tau_W = 72 \sim 79 ns$; , $\tau_{Al} = 864 \sim 905 ns$, $\tau_{Fe} = 201 \sim 207 ns$; とされている。W=0.8 ~ 1.2mm に関しては、図 4.7 からわかるように、Al 以外の成分はわかりにくく、W が大きくなると、Al の成分がわかりにくくなるが、W と Al のに成分であるとして成分を同定する。

W[mm]	$G_W(0) [s^{-1}]$	$\tau_W [ns]$	$G_{Al}(0) [s^{-1}]$	$\tau_{Al} [ns]$	$G'_W [s^{-1}]$
0.6	-	-	8.203±0.007	895.3±0.1	-
0.8	-0.036±0.027	50.0±7.62	8.204±0.016	895.3±0.1	0.425±0.027
1.0	-0.798±0.019	288.4±0.5	7.369±0.010	840.7±0.8	0.831±0.020
1.2	0.621±0.002	133.2±0.5	6.658±0.020	900.5±0.1	1.543±0.007
1.4	0.929±0.021	63.63±0.15	4.803±0.014	886.5±0.1	3.397±0.021
1.6	2.262±0.016	73.23±0.05	2.824±0.010	888.7±0.2	5.377±0.017
1.8	3.279±0.011	79.83±0.03	1.023±0.007	904.9±0.3	7.178±0.013
2.0	3.486±0.010	82.30±0.02	0.276±0.006	1050.0±1.31	7.924±0.012
2.35	4.201±0.005	75.74±0.01	0.088±0.003	948.2±1.8	8.112±0.008

表 4.2: fitting parameters

2. long run の際に foil 何枚目にどれくらいの割合がとまったか (表 4.3, 図 4.8)

3. 1 秒あたりに longrun1 の際に W に止まった全体の量は、

$$\begin{aligned} F_W &= (\text{補正した } W \text{ のグラフのゼロ点}) \times \tau/b\eta \\ &= 2348.2 \pm 5.0 \text{ 個/sec} \end{aligned}$$

4. 全 longrun の平均

longrun1 の時は、ビームスタディ時のフラックスと同じであると考ええる。

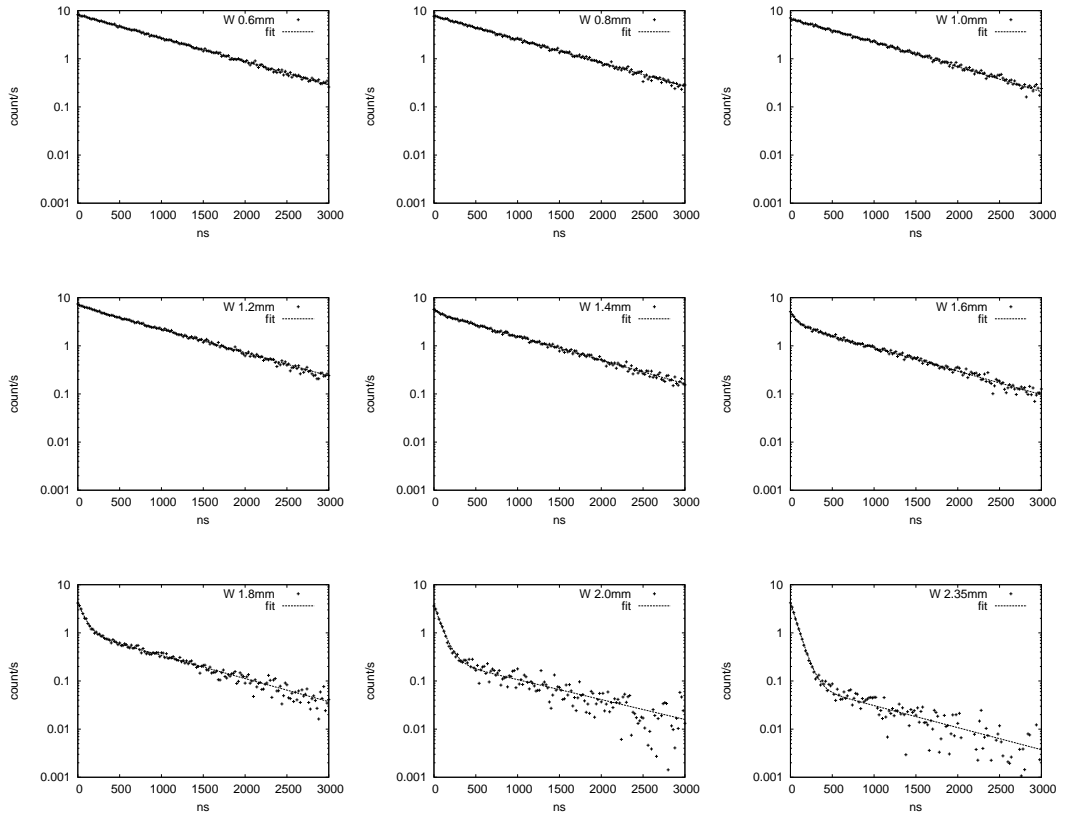


図 4.7: 修正したスペクトルと fitting

生データの 2060ns 以降の総イベント数から、全 longrun と longrun1 とのフラックスの比を考え、そこから、longrun のフラックスを出す

	単位時間当たりのイベント数	longrun1 との比
longrun1	32.0796	1
全 longrun	31.0607	0.96824

よって、全 longrun 時の W に入射するフラックスは

$$F_W = 2273.6 \pm 4.9 \text{ 個/sec} \quad (4.10)$$

と求まる。

$W [mm]$	rate	誤差	longrun1 の μ 数/sec	誤差
0	0	0	0	0
0.35	0.05234	0.02528	122.904	59.3600
0.55	0.05009	0.03351	117.610	78.6978
0.75	0.08776	0.02153	206.076	50.5483
0.95	0.22861	0.01807	536.812	42.4321
1.15	0.24403	0.02898	573.016	68.0563
1.35	0.22202	0.02277	521.339	53.4781
1.55	0.09203	0.01588	216.093	37.2950
1.825	0.02313	0.01178	54.3115	27.6649

表 4.3: longrun における、全体に対するフォイルごとの μ の割合

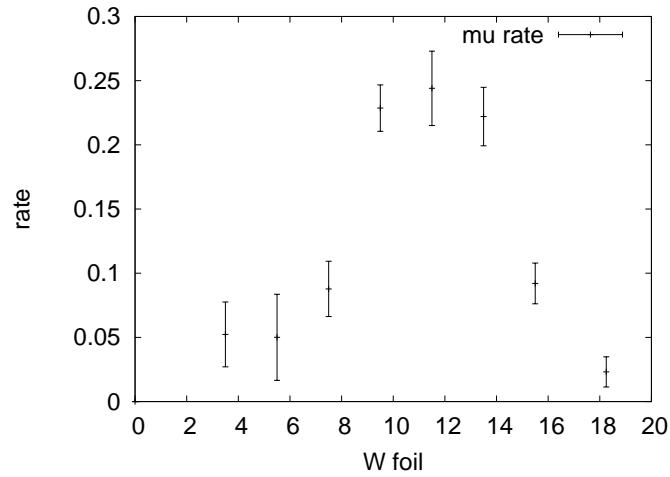


図 4.8: 同上

第5章 解析

5.1 energy calibration

ガンマ線の energy calibration には ^{22}Na (511KeV,1275KeV)、 ^{137}Cs (662KeV) を用いた。検出器をつきぬける高エネルギー宇宙線はエネルギー損失が最小電離損失とほぼ等しいと考えられ、厚さ 18mm のプラスチックシンチレーターでのエネルギー損失は 3.6MeV と計算できる。これに attenuator を入れて、ベータ線の energy calibration に用いた。

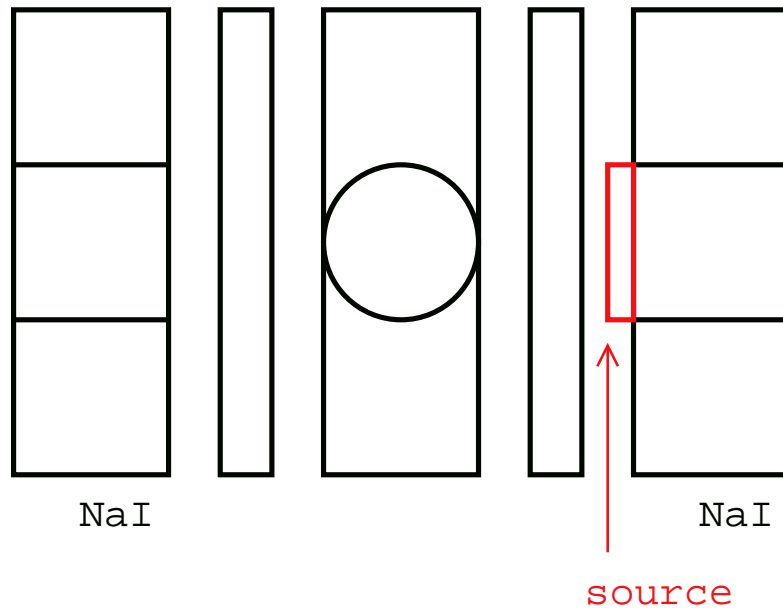


図 5.1: ガンマ線の energy calobration セットアップ

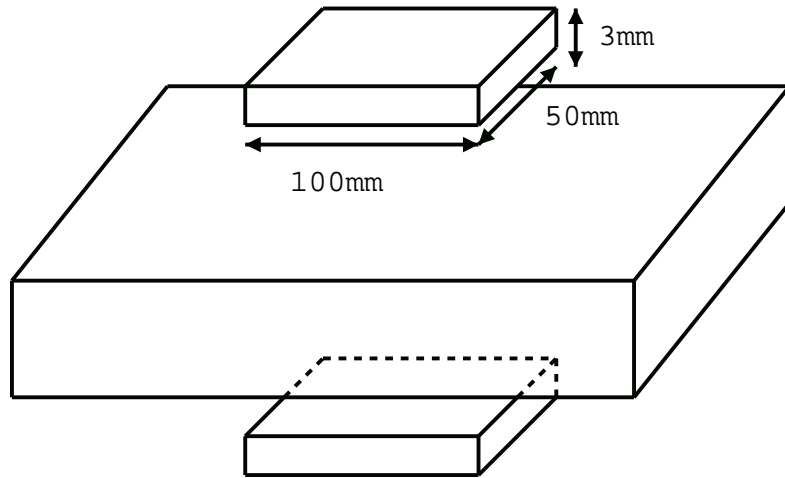


図 5.2: ベータ線の energy calibration セットアップの図

実験に使う検出器の上下に薄いシンチレーターを 10cm 離して置き、ふたつ同時に信号があった時に ADC の読みだしを行った。

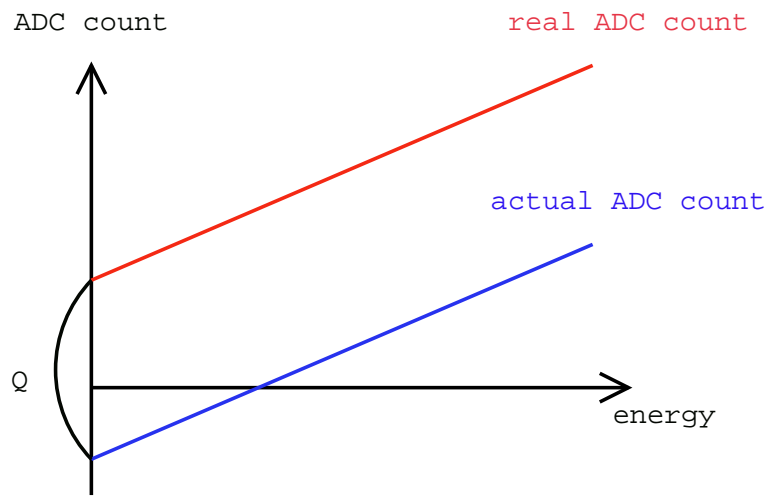


図 5.3: ADC correction

ベータの calibration の際に、signal の offset がプラス側にずれていたため、ペDESTAL の ADC count がゼロであった。全体の ADC count がずれ、その値は attenuator の設定値によって変わるため、その補正をした。Q は、ずれた分を gate width の間だけ積分した電荷に相当する ADC count。

5.2 cutting

第一のカットの条件は、第一に TDC が time up していない、ADC が over flow していないもの。NaI 中で 1.4MeV 以上のエネルギーを落して ADC が over flow するイベントは宇宙線によって起こったと考えられる。

タングステンフォイルを抜いた状態でデータを取り (empty run)、アクシデンタルなイベントを調べた。スタートシグナルの ADC が over flow した時に delayed gamma の background となるスペクトルにエネルギー 400keV のピークが現れた。このイベントは prompt signal で大きなエネルギーを落とし、TDC で 3 μ sec 以下に集中している。これは宇宙線が NaI 中で落すエネルギーが大きいため、signal の width が gate delay を上回り自分自身でコインシデンスをとることによるものである。

stop signal の timing で ADC をとると宇宙線のエネルギー損失がほぼ単一なため、その一部分のエネルギーを見ていることになり、ピークが現れると考えられる。gate の delay を 1 μ sec から 3 μ sec にかえて同じように background の data をとったところ、このピークは消えたので、原因は宇宙線であったことがわかる。

さらに delayed gamma には prompt gamma のイベントが 414keV の光電ピークの 3σ 以内にあるという条件をつけた。ベータ線の threshold の位置がわからないため、今回はベータのエネルギーが 300keV 以上というカットにした。以下の図は empty run のデータに全てのカットをほどこす前後でのスペクトルの変化。

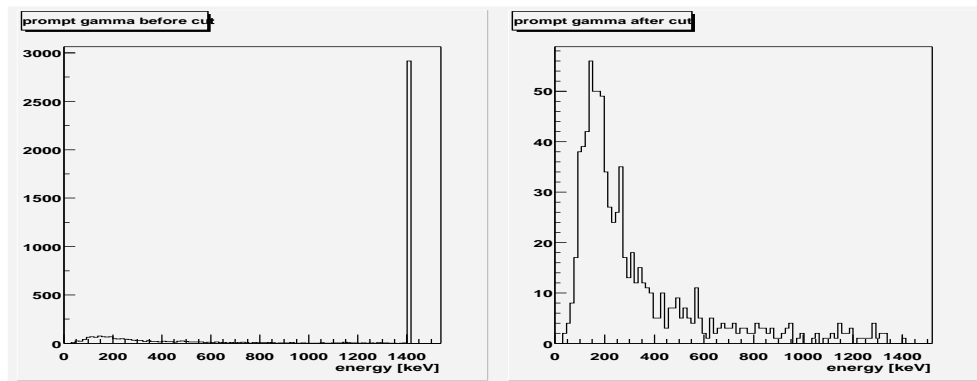


図 5.4: prompt γ 左: cut 前 右: cut 後

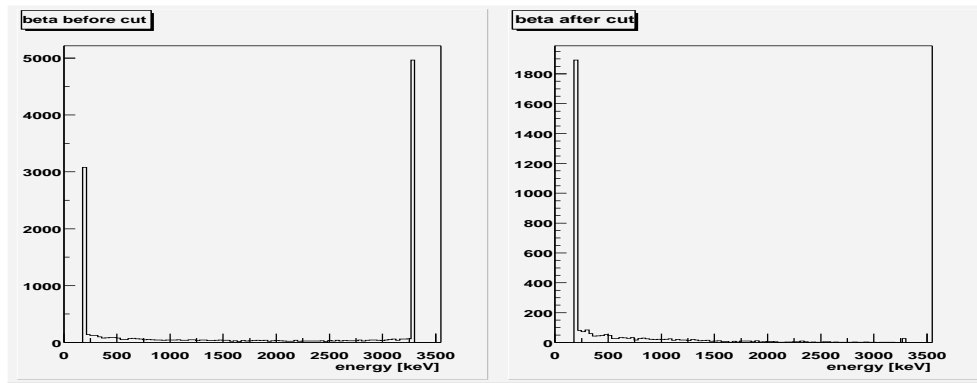


图 5.5: beta 左: cut 前 右: cut 後

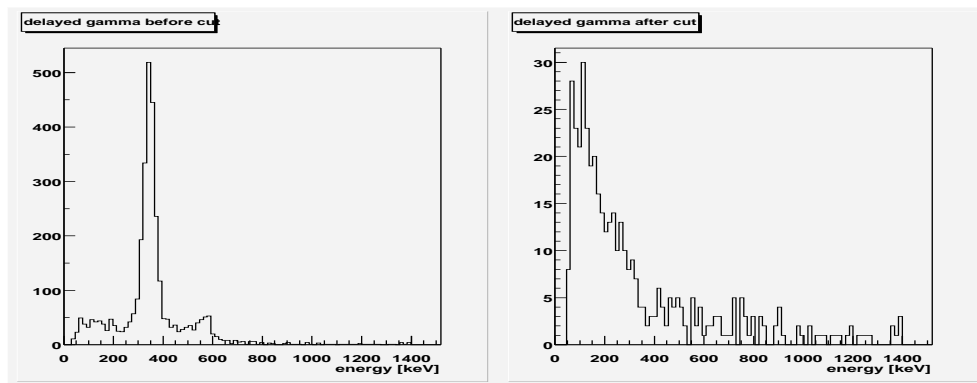


图 5.6: delayed γ 左: cut 前 右: cut 後

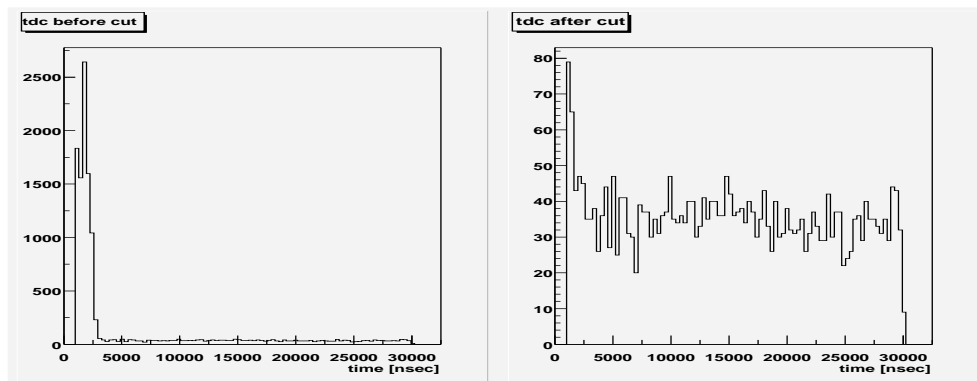


图 5.7: tdc 左: cut 前 右: cut 後

5.3 Ta decay spectrum

前節の条件でデータをカットすると prompt gamma については 414KeV の光電ピークとコンプトン散乱のイベントが見えている。

delayed gamma では割合の多い 921、537KeV のピークが見られる。エネルギーがそれ以下のイベントの TDC データから得られる半減期の値は $8.2\mu\text{sec}$ となるため、タングステンの励気状態から 921 や 537KeV の γ 線を放出してさらに基底状態に落ちる時に出る γ 線であると考えられる。

その間の時間はどの場合も psec 単位であるので、一回の data taking で観測され得る。delayed gamma のエネルギーごとの TDC データから得られる半減期は Ta の半減期 $8.3\mu\text{sec}$ と比べて妥当な値である。

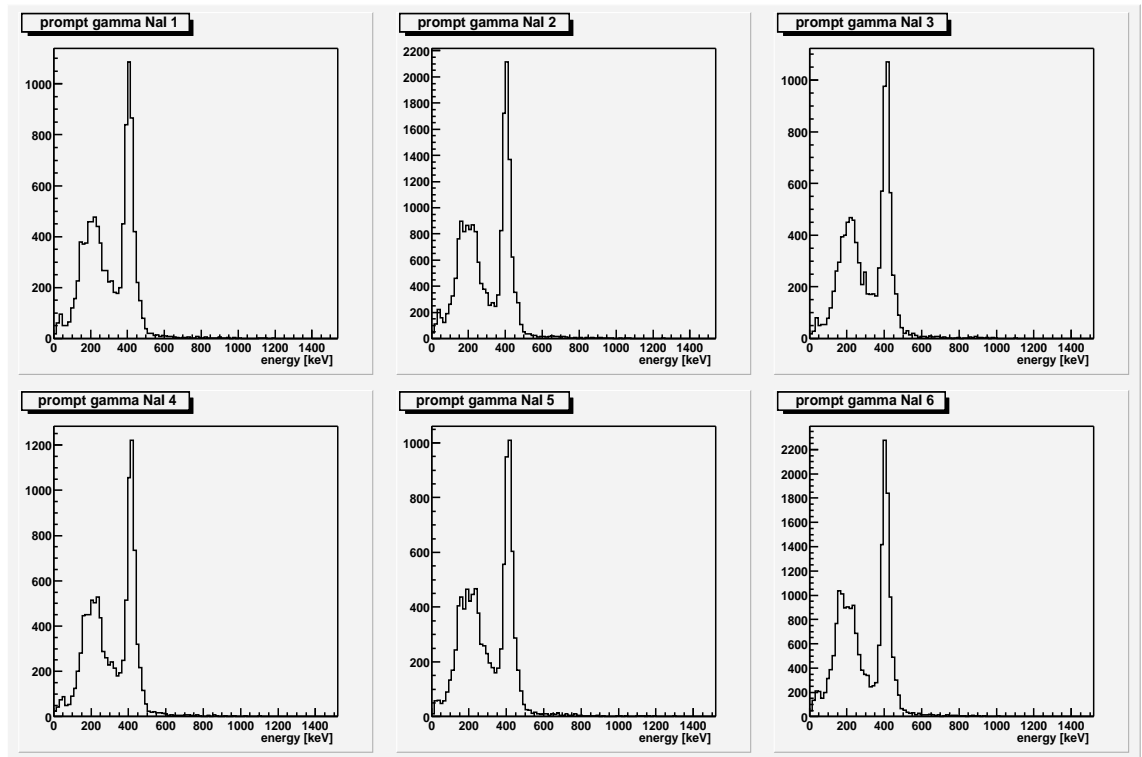


図 5.8: prompt γ

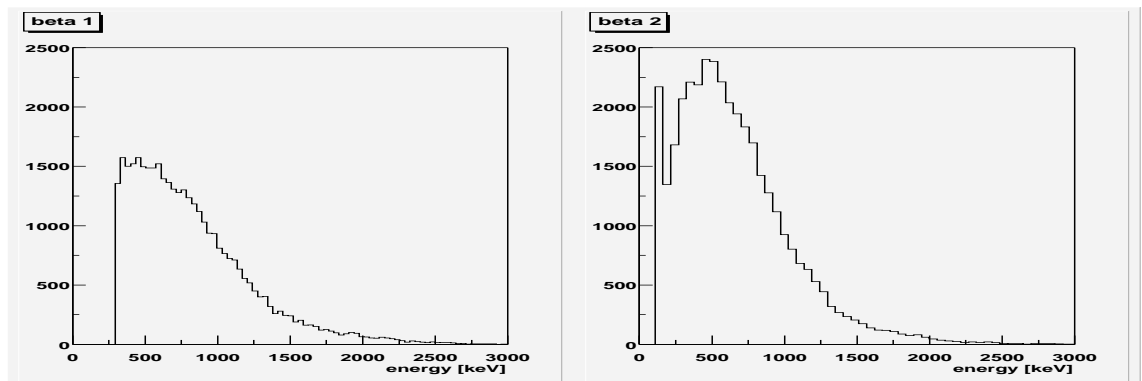


图 5.9: beta

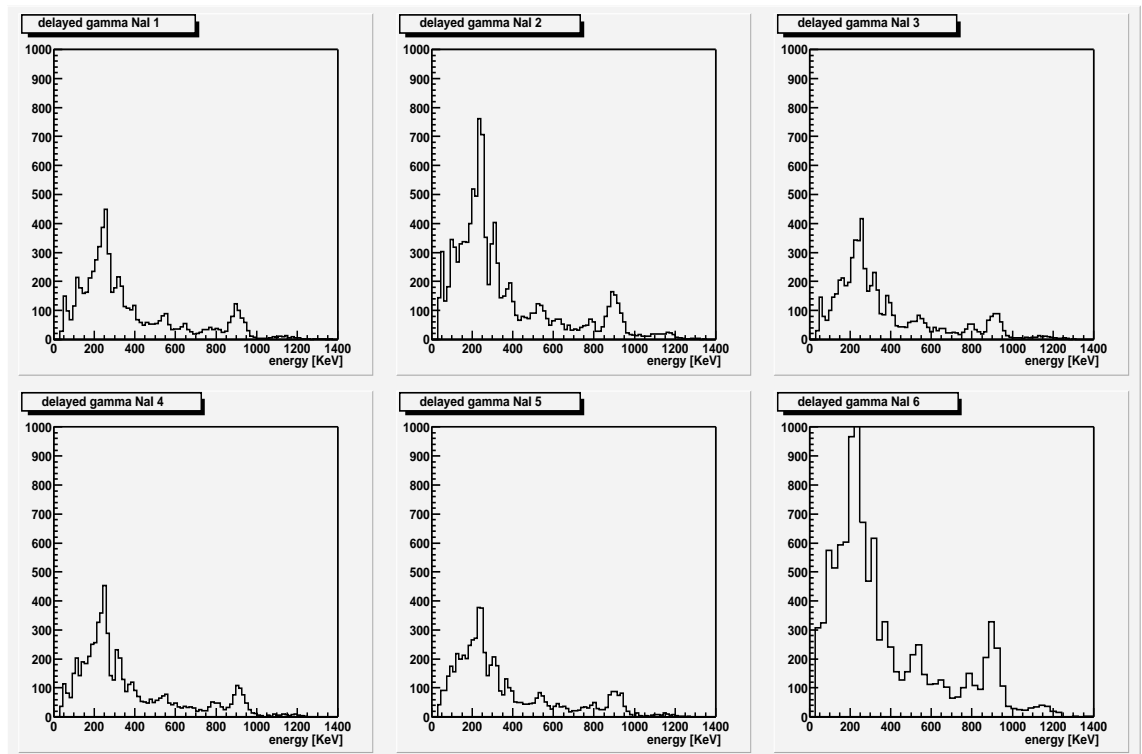
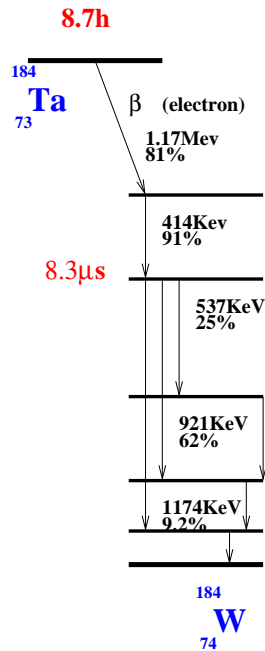


图 5.10: delayed γ



エネルギーごとの半減期

total	$8.1 \pm 0.1 \mu\text{sec}$
921keV	$8.0 \pm 0.2 \mu\text{sec}$
537keV	$7.5 \pm 0.2 \mu\text{sec}$
1173keV	$8.7 \pm 0.4 \mu\text{sec}$
low energy	$8.2 \pm 0.1 \mu\text{sec}$

図 5.11: Ta decay scheme

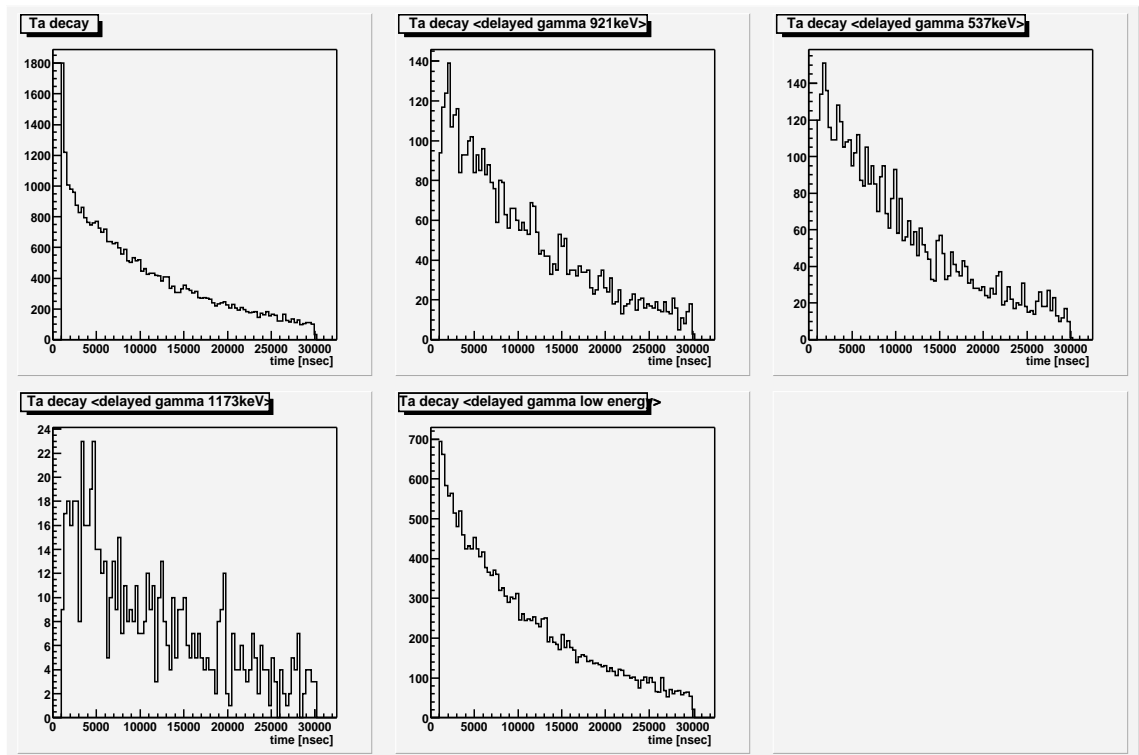


図 5.12: 各エネルギーでカットした tdc

delayed gamma の中で 1173KeV のピークとなるものは数が少なかった。コンプトン散乱を複数の NaI 中で起こしてエネルギーを失うことも考えられるため、2つの NaI での energy deposite の和をとり、それが 1173KeV となるイベントを選んだ。さらに 921KeV と 252KeV の光電ピークの和によって 1173KeV になるものは除いた。その条件でカットした TDC のデータからは半減期は $8.18 \mu \text{ sec}$ となり Ta の Decay によるイベントだと言える。

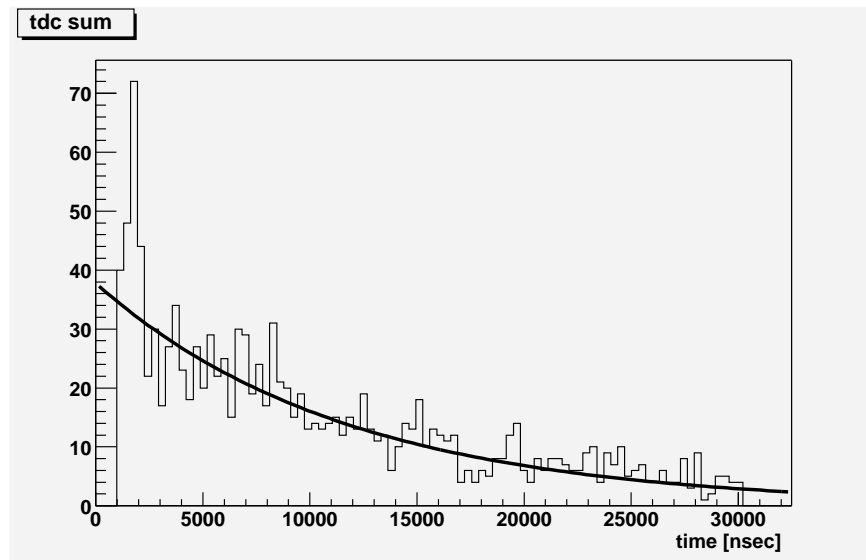


図 5.13: summention tdc

第6章 結果

6.1 result

以下の値から $f(184)$ を求める。

$$flux=4199124.60\pm 28609 \text{ /hour}$$

$$D=0.9355\pm 0.0383$$

$$f(\text{nuclear})=0.9671\pm 6.8382\times 10^{-5}$$

$$g(\text{decay})=0.79\pm 0.01$$

$$g(\beta)=0.5968\pm 0.014$$

$$g(\gamma)=0.2153\pm 0.041$$

$$g(\gamma_{del})=0.3494\pm 0.01$$

$$N(414)=36409\pm 191$$

$$f(184)=0.0677\pm 0.00058$$

第7章 考察

β 線と prompt,delayed の二つの γ 線の 3coincidence を要求することで T_a の崩壊をとらえることができた。

TDC のデータから計算される半減期も期待される値に近いものを得ることができた。

μ の beam study について

評価において、もっとも重要なのは、イベントのゼロ点である。今回は 2060ns 以降のスペクトルで fitting し、イベントのゼロ点も 2060ns としたが、グラフを見ると 2000ns 程度から比較的連続的な分布をしている。

trigger の座標と μ の運動量が決めれば、2000ns 以前のピークを途中崩壊した電子によるものであるとすれば、予測されるイベントのゼロ点が決まるのであるが、今回はそれが得られなかったため、不確定性は否めない。

その場合、fitting の結果を 2000ns まで単純に引き伸ばすと、W のフラックスがほぼ倍になるので、かなり重要であると言える。BG をどう引くかなどの因子も変わってくるので、評価については、一概には言えない。

時間の関係で、得られた study の情報は多くは無かったので、さらに、beam study の間に、フラックスが変わってしまっていたら、イベント数が減るのは金属を増やしたためか、それともフラックスが減ったせいなのかという区別がつかなくなる。この状況を回避するには、毎回 study の間に Al16mmなどを置いて、そのイベント数をみてフラックスの変化を調べなければいけないだろう。しかし結果として長時間の longrun の間の平均フラックスが、W20mm とほとんど変わりが無いので、短時間の study の間のフラックスの変化は小さいと考えられる。

β 線の energy calibration において、threshold の位置が分からなくなってしまったり、補正が必要になってしまったことが、反省点として挙げられる。また解析において β 線の情報があまり活用されなかった。 $f(184)$ の値は TRIUMF の実験値 (0.107 ± 0.003) から大きく離れてしまった。立体角や各 γ 線の efficiency の評価や low energy の background 対策が課題。

第8章 謝辞

畑先生には理論、笹尾、野村両先生には実験について熱心なご指導を頂きありがとうございました。また西本さん、髭本さんをはじめとする KEK 中間子施設の皆様、ミュオンビームを通して貴重な体験の機会を与えていただき感謝しています。

高エネルギー研究室の方々にも度々お世話になりました。ありがとうございます。

第9章 appendix

9.1 Source code

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <time.h>
#include <sys/types.h>
#include <sys/time.h>
#include <sys/errno.h>
#include "camlib.h"
#include "SDL.h"

extern FILE      *stderr;
extern int       NAF(int n, int a, int f);

#define TRUE 0

#define ENLAM 8
#define CLR 9
#define LAM 8
#define READ 0
#define READCL 2
#define WRITE 16

int             camac_initialize(int crete);
int             camac_terminate();

SDL_Surface *screen;
SDL_Surface *image;
SDL_Event event;

int
```

```

main(int argc, char *argv[])
{
    // crate number
    const int     crate = 0;
    // station number (address)
    const int     elr = 1;
    const int     adc_f = 7;
    const int     adc_d = 5;
    const int     tdc = 11;
    // take channel (subaddress)
    const int     adc_f_ch[] = { 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 15 };
    const int     adc_d_ch[] = { 0, 1, 2, 3, 4, 5 };
    const int     tdc_ch = 0;
    // data conversion wait time
    const long    trial = 100;
    const long    wait = 10; // mili second

    // data temporary
    int           data = 0;
    int           q = 0;
    int           x = 0;

    int           i = 0;
    int           j = 0;
    int           k = 0;

    int           fin = 0;
    char          logo[] = "logo.bmp";

    time_t       tp;
    char         outfile[19];
    FILE         *fp;

    // How to loop
    time_t       startTime = 0;
    time_t       continueTime = 600;
    time_t       limitTime = 0;
    long         loopCount = 0;

```

```

        // check argument value
        if (argc == 0) {
i = 0x001;
fprintf(stderr, "%d \t Select how long to continue DAQ\n", i);
exit(i);
        }
        continueTime = atoi(argv[1]);

        // open SDL driver
        if (SDL_Init(SDL_INIT_AUDIO | SDL_INIT_VIDEO) < 0) {
i = 0x100;
fprintf(stderr, "%d \t SDL OPEN ERROR :%s\n", i, SDL_GetError());
exit(i);
        }
        atexit(SDL_Quit);

        screen = SDL_SetVideoMode(1024,480,16,SDL_SWSURFACE);
        if(screen == NULL){
i = 0x200;
fprintf(stderr, "%d SDL SCREEN ERROR :%s\n", i, SDL_GetError());
exit(i);
        }
        SDL_WM_SetCaption("Now DAQ",logo);
        image = SDL_LoadBMP(logo);
        if(image == NULL){
i = 0x400;
fprintf(stderr, "%d SDL LOAD LOGO ERROR :%s", i, SDL_GetError());
exit(i);
        }
        SDL_BlitSurface(image,NULL,screen,NULL);
        SDL_UpdateRect(screen,0,0,0,0);

        // open driver
        if ((i = camac_initialize(crate)) {
fprintf(stderr, "%d \t Camac Initialize Error\n", i);
exit(i);
        }

```

```

        // output file open
        for (i = 0; i <= 19; i++)
outfile[i] = 0;
        startTime = time(&tp);
        strftime(outfile, 18, "%m%d%H%M%S.dat", localtime(&tp));
        if ((fp = fopen(outfile, "w")) == NULL) {
i = 0x010;
fprintf(stderr, "%d \t File: %s open error!!\n", i, outfile);
exit(i);
        }
        // initialize all channels of all modules
        CAMAC(NAF(adc_f, 0, CLR), &data, &q, &x);
        CAMAC(NAF(adc_d, 0, CLR), &data, &q, &x);
        CAMAC(NAF(tdc, 0, CLR), &data, &q, &x);
        CAMAC(NAF(elr, 1, CLR), &data, &q, &x);
        CAMAC(NAF(elr, 0, CLR), &data, &q, &x);

        // main loop
        fprintf(stderr, "# Start DAQ for %6d seconds \n", (int) continueTime);
        fprintf(stderr, "# Start at %6d\n", (int) startTime);
        limitTime = startTime + continueTime;
        fin = 0;
        while (fin == 0){
// end check
if ((i = time(&tp)) > limitTime) fin = 1;
if (SDL_PollEvent(&event)){
        switch (event.type){
                case SDL_QUIT:
fin = 1;
break;
                case SDL_KEYDOWN:
if (event.key.keysym.sym == SDLK_ESCAPE) fin = 1;
break;
                }
}

        CAMAC(NAF(tdc, 0, LAM), &data, &q, &x);
if (q == 1) {
        loopCount++;

```

```

    printf("%d, ", i);
    fprintf(fp, "%d, ", i);

    // get data from adc_fast
    j = 0;
    while (1) {
CAMAC(NAF(adc_f, 0, LAM), &data, &q, &x);
if (q == 1) {
    for (k = 0; k < (sizeof adc_f_ch) / sizeof(int); k++) {
CAMAC(NAF(adc_f, adc_f_ch[k], READ), &data, &q, &x);
printf("%6d, ", data);
fprintf(fp,"%d, ", data);
    }
    break;
}
// time out
if (j > trial) {
    for (k = 0; k < (sizeof adc_f_ch) / sizeof(int); k++) {
printf("%d, ", -1);
fprintf(fp,"%d, ", -1);
    }
    break;
}
j++;
SDL_Delay(wait/2);
}

    // get data from adc_delay
    j = 0;
    while (1) {
CAMAC(NAF(adc_d, 0, LAM), &data, &q, &x);
if (q == 1) {
    for (k = 0; k < (sizeof adc_d_ch) / sizeof(int); k++) {
CAMAC(NAF(adc_d, adc_d_ch[k], READ), &data, &q, &x);
printf("%6d, ", data);
fprintf(fp,"%d, ", data);
    }
    break;
}

```

```

}
// time out
if (j > trial) {
    for (k = 0; k < (sizeof adc_d_ch) / sizeof(int); k++) {
printf("%d, ", -2);
fprintf(fp,"%d, ", -2);
    }
    break;
}
j++;
SDL_Delay(wait/2);
}

// get data from tdc
CAMAC(NAF(tdc, tdc_ch, READ), &data, &q, &x);
printf("%6d, ", data);
fprintf(fp,"%d, ", data);
// printf("%d \n", (int) loopCount);
printf("\n");
fprintf(fp,"\n");

// clear
CAMAC(NAF(adc_f, 0, CLR), &data, &q, &x);
CAMAC(NAF(adc_d, 0, CLR), &data, &q, &x);
CAMAC(NAF(tdc, 0, CLR), &data, &q, &x);
CAMAC(NAF(e1r, 1, CLR), &data, &q, &x);
CAMAC(NAF(e1r, 0, CLR), &data, &q, &x);

SDL_Delay(wait);
SDL_Delay(wait);
SDL_Delay(wait);
SDL_Delay(wait);
SDL_Delay(wait);
}

}
fprintf(stderr,"# Finish at %6d\n", i);
fprintf(stderr,"# total count %6d\n", (int) loopCount);

```

```

        // Termination
        SDL_FreeSurface(image);
        fclose(fp);
        if ((i = camac_terminate())) {
fprintf(stderr, "%d \t Camac Terminate Error\n", i);
exit(i);
        }
        return 0;
}

int
camac_initialize(int crete)
{
    if (CAMOPN())
return 0x100; // open driver
    if (CSETCR(crete))
return 0x200; // set crete
    if (CGENZ())
return 0x300; // generate Z
    if (CGENC())
return 0x400; // generate C
    if (CREMI())
return 0x500; // generate I
    return 0;
}

int
camac_terminate()
{
    if (CAMCLS())
return 0x0800; // close driver
    return 0;
}

```


高エネルギー加速研究機構 物質構造科学研究所
中間子科学研究施設 第一実験室

