

2012年度 卒業論文  
 $\mu$  粒子の寿命と  
電子エネルギースペクトラムの測定

奈良女子大学  
理学部 物理科学科  
小林 加奈  
田中恵梨香

# 目次

## 第1章 はじめに

- 1.1 実験目的 .....p. 3
- 1.2 実験課題 .....p. 3
- 1.3 本論文の構成 .....p. 3

## 第2章 宇宙線・ $\mu$ 粒子

- 2.1 宇宙線 .....p. 4
- 2.2  $\mu$ 粒子 .....p. 5

## 第3章 放射線計測の原理

- 3.1 電離損失 .....p. 6
- 3.2 制動放射 .....p. 8
- 3.3 プラスチックシンチレーターのエネルギー損失 .....p. 9
- 3.4  $\mu$ 粒子の寿命算出 .....p. 10
- 3.5 電子のエネルギー分布 .....p. 12

## 第4章 測定方法

- 4.1 シンチレーションカウンター .....p. 14
  - 4.1.1 プラスチックシンチレーター.....p. 14
  - 4.1.2 光電子増倍管.....p. 15
- 4.2 測定原理 .....p. 16
  - 4.2.1 実験装置.....p. 16
  - 4.2.2 観測される波形の違い.....p. 17

## 第5章 セットアップ

- 5.1 シンチレーションカウンターのセットアップ .....p. 18
  - 5.1.1 シンチレーションカウンターの配置.....p. 18
  - 5.3.3 トリガーカウンター.....p. 20
  - 5.3.4 Vetoカウンター .....p. 20
- 5.2 エレクトロニクスの設定 .....p. 21
- 5.3 エレクトロニクスのセットアップ .....p. 22
- 5.4 モジュール .....p. 23
  - 5.4.1 NIM (Nuclear Instrument Module) .....p. 23

5.4.2	CAMAC(Computer Aided Measurements And Control)	p. 24
5.5	各CAMACモジュールについてのセットアップ	p. 26

## 第6章 データ収集プログラム

6.1	データ収集プログラム	p. 29
-----	------------	-------

## 第7章 データ解析

7.1	$\mu$ 粒子の寿命	p. 32
7.1.1	イベントの選別	p. 32
7.1.2	FITについて	p. 33
7.1.3	実験結果	p. 34
7.1.4	TDCの1カウントあたりの時間測定	p. 35
7.1.5	$\mu$ 粒子の寿命の算出	p. 35
7.2	電子のエネルギースペクトラムの測定	p. 37
7.2.1	イベントの選別	p. 37
7.2.2	条件③ ベトカウンターがなっていないときの具体的な数値	p. 38
7.2.3	FITについて	p. 40
7.2.4	実験結果	p. 41
7.2.5	考察	p. 42

## 第8章 まとめ

8.1	$\mu$ 粒子の寿命測定	p. 43
8.2	電子のエネルギースペクトラム	p. 43
8.3	参考文献	p. 43
8.4	謝辞	p. 43
8.5	付録	p. 44

# 第1章 はじめに

## 1.1 実験の目的

地上にはたくさんの原子核や素粒子が降り注いでおり、その粒子は宇宙線と呼ばれている。その宇宙線のほとんどはミュー粒子であり、 $\mu$ 粒子を含む素粒子は様々な寿命を持つことが分かっている。今回の実験ではプラスチックシンチレータを用いて、地表にたどり着く $\mu$ 粒子を測定する。またその結晶内で崩壊する $\mu$ 粒子を使い、 $\mu$ 粒子の寿命の測定と崩壊後の電子のエネルギー測定を試みる。その過程において、素粒子物理学の実験的研究を行うと共に、高エネルギー物理学の基本的な実験技術を習得することを目的とする。

## 1.2 実験課題

今回の実験ではシンチレーションカウンターに入射した $\mu$ 粒子が崩壊したときのエネルギースペクトルを測定する。寿命の測定にあつては、プラスチックシンチレータを用いて粒子の検出とエネルギー測定を行い、得られた信号を光電子増倍管を用いて増幅し、ADCやTDCを用いてデータ処理を行い、 $\mu$ 粒子の寿命を測定する。その過程において、寿命測定の解析プログラムを開発する。

## 1.3 本論文の構成

本論文ではまず宇宙線や放射線計測の原理について述べ、次に $\mu$ 粒子の寿命測定の原理、装置やセットアップについて述べる。さらにデータ収集の方法、そのデータを使っての解析、プログラムの説明などを行い、最後に実験結果について報告する。

# 第2章 宇宙線・ $\mu$ 粒子

## 2.1 宇宙線

宇宙線とは、宇宙空間から地球に絶えず降り注ぐ高エネルギーの放射線（一次宇宙線）とそれが大気に入射して作る放射線（二次宇宙線）のことである。宇宙線は常に私たちの身の回りに降り注いでおり、高エネルギーで透過率が高いため建物や私たちの体を突き抜けていく。そのため、屋内での観測が可能である。

宇宙には、超新星の爆発や、太陽の表面で起こる爆発などで発生した高エネルギーの粒子が飛び交っている。それらの粒子には、陽子（水素の原子核）が約90%、 $\alpha$ 粒子（ヘリウムの原子核）が約8%、その他の粒子が約1%含まれ、これらの宇宙線を一次宇宙線と呼んでいる。

一次宇宙線が大気に入射すると、大気中に含まれる窒素や酸素などの原子核と衝突し、放射性同位元素や $\pi$ 中間子などの粒子を生成する。これら二次的に生成された宇宙線を二次宇宙線と呼ぶ。二次宇宙線は原子核と相互作用し、新たな二次粒子を生成する。

ちなみに、 $\pi$ 中間子の寿命は  $(2.6030 \pm 0.0024) \times 10^{-8} \text{sec}$  である。二次宇宙線のうち、電子や $\gamma$ 線は大気中で吸収されるため、地上に来る大部分は $\mu$ 粒子とニュートリノが占めている。

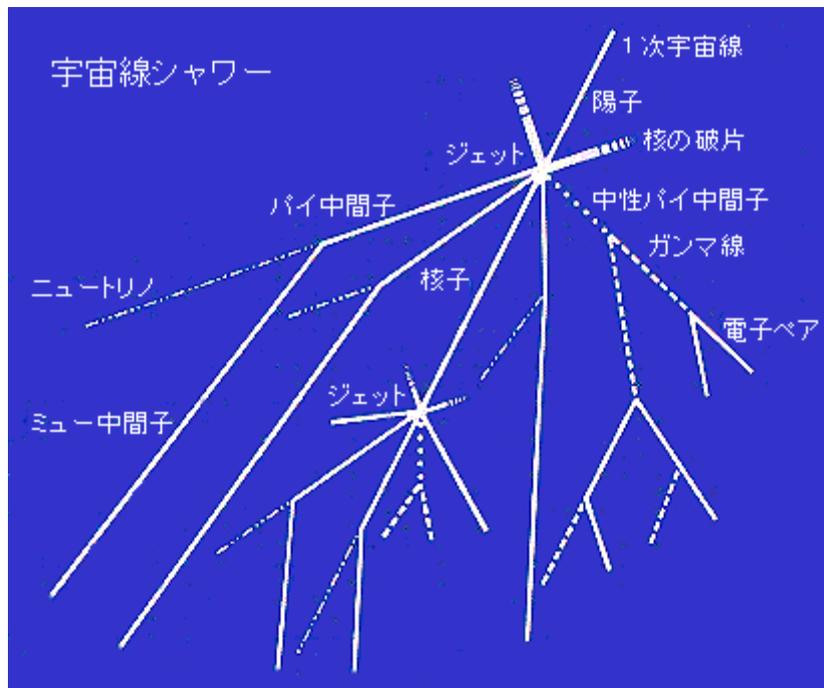


図 2.1: 宇宙線シャワーの模式図

## 2.2 $\mu$ 粒子

$\mu$  粒子は、地上に到達する二次宇宙線の荷電粒子の大部分（約3/4）を占めており、 $\mu$  粒子は  $\pi$  中間子が崩壊して生成される。 $\pi$  中間子は宇宙から降ってきた陽子が大気中の原子核と強い相互作用することによって生成される。 $\pi$  中間子には中性の  $\pi^0$  と荷電の  $\pi^\pm$  があり、荷電  $\pi$  中間子は100%、次のように崩壊する。

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \nu_\mu\end{aligned}$$

一方中性  $\pi$  中間子は、電磁相互作用によって、ほぼ100%の確立で  $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$  に崩壊する。

$\mu$  粒子は第2世代のレプトンで、質量105.7MeV/c<sup>2</sup>、電荷±1、スピン1/2の粒子である。そして、 $\mu$  粒子は弱い相互作用によって、次のように崩壊する。

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

また、 $\mu$  粒子の寿命はほぼ2.2  $\mu$  secである。今回の実験では、この寿命を測定する。

以下にこの崩壊のファインマン図を示す。

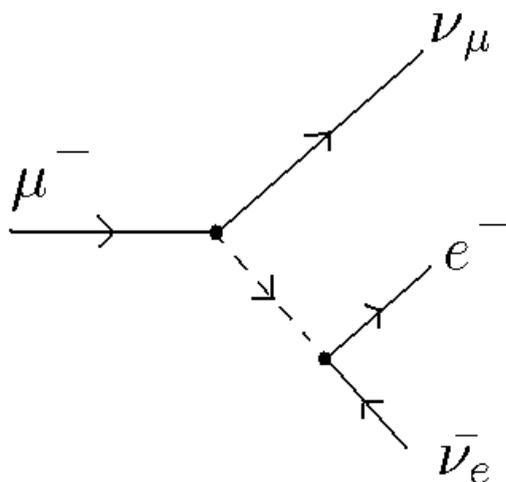


図 2.2:  $\mu^-$  の崩壊のファインマン図

# 第3章 放射線計測の原理

放射線は我々の五感では感じる事ができない。そのため荷電粒子の電離作用と発光現象を用いて放射線を検出する。荷電粒子が通過し、電離作用を起こすと発光する物質をシンチレーターと呼ぶ。今回は、シンチレーターを用いて、その光を光電子増倍管で増幅させ、電気信号に変える方法で放射線を検出する。

## 3.1 電離損失

荷電粒子が物質中を通過すると、入射荷電粒子と物質を構成する原子との相互作用によって、原子が電子と陽イオンに分離される。これを、電離 (Ionization) という。また、電離作用を起こさずに、原子や分子がエネルギーの高い状態になることもある。これを、励起 (Excitation)、その状態を励起状態と呼ぶ。

入射荷電粒子が物質を通過する時、物質中の電子と衝突し、電離や励起を繰り返しながらエネルギーの一部を失う。これを電離損失 (Ionization loss) という。電離損失によって荷電粒子が失うエネルギーはBethe - Blochの式で表される。

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m\gamma^2 v^2 W_{\max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 \right] \text{ (Mev / g / cm}^2\text{)} \quad (3.1)$$

ここで、 $N_A$ はアボガドロ数、 $I$ は電離ポテンシャル、 $Z$ は物質の原子番号、 $A$ は物質の原子量、 $v$ は入射粒子の速度、 $z$ は入射粒子の電荷、 $e$ は電子の電荷、 $m$ は電子の質量である。

電離損失  $\frac{dE}{dx}$  は入射荷電粒子の質量には依存しないが、速度  $v = \beta c$  には依存する。入射荷電粒子のエネルギーが低く、 $\beta$  が小さい時、Bethe - Blochの式は

$$\frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{\beta^2} \quad (3.2)$$

となる。入射粒子の運動量が大きくなると、電離損失は  $1/\beta^2$  に従って急激に減少し、最小値に達する。この領域での電離をMinimum ionizationという。電荷が同じ粒子ならば、粒子の質量が3倍になるところで、最小値はほぼ同じ値をとる。

入射荷電粒子のエネルギーが高くなると、 $\beta^2 \approx 1$  となり、(3.1)式の  $\log$  の中の項が効くのでエネルギー損失は、 $\log \gamma$  でエネルギーが増加するにつれて上昇する。

$$\frac{dE}{dx} \propto \log \left[ \frac{\beta^2}{1-\beta^2} \right]$$

(3.3)

$$\gamma = \frac{\beta^2}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{E}{m}$$

電離・励起状態にある原子・分子が基底状態に遷移する時、二つの状態のエネルギーの差を光として放出する。この発光をシンチレーション (Scintillation) という。今回の実験では、シンチレーション光を用いて、入射粒子の電離損失を測定する。

## 3.2 制動放射

電子は質量が小さいので、他の荷電粒子と衝突した際に、原子の励起やイオン化を行わない弾性衝突であっても、原子核の作る電場によって、速度の時間変化、方向の変化をかなり受け、加速度運動する。古典電磁気によると、加速度の二乗に比例するエネルギーを電磁波として放出する。加速度の大きさは物質内の荷電粒子の電荷 $Z$ に比例し、入射電子の質量に反比例するので、放出するエネルギーは $(Z/me)^2$ に比例する。したがって、物質内で $Z$ の大きい原子核の存在が最も制動放射に効く。

また、制動放射によるエネルギー損失は入射電子のエネルギーに比例して増していく。そのため、この損失は電子が高速になってから有効となる。この理論式は次式のようになる。

$$\frac{dE}{dx} = \frac{NEZ^2 r_e^2}{137} \left( 4 \ln \frac{183}{\frac{1}{z^3}} + \frac{2}{9} \right) \quad (3.4)$$

ここで、 $N$ は物質の単位体積中の原子数 ( $N=N_0 \rho / A$ )、 $E$ は入射電子のエネルギー、 $r_e$ は電子の古典半径 ( $r_e=e_0^2/m_e c^2=2.81 \times 10^{-13}$ )、 $A$ は物質の原子量、 $N_0$ はアボガドロ数 ( $=6.02 \cdot 10^{23}$ )、 $\rho$ は物質の密度である。

制動放射でエネルギーを失って、電子の始めのエネルギーの $1/e$ になるまでに走る物質層の長さを放射長(radiation length)という。(3.4)式より

$$-\frac{dE}{E} = \frac{dx}{x_0}$$

となるので、放射長 $X_0$ を求めることができる。

### 3.3 プラスチックシンチレーターのエネルギー損失

プラスチックシンチレーターのエネルギー損失は

$$\Delta E_{(Mev)} = \frac{dE}{dx \left( \frac{Mev}{g/cm^2} \right)} \times \rho_{(g/cm^3)} \times t_{(cm)}$$

で求めることができる。

ここで

$$\rho = 1.03 g/cm^3$$

であり、プラスチックシンチレーターの1 cmあたりのエネルギー損失は

$$\Delta E = 1.6 \times 1.03 \times 1 = 1.68 Mev$$

### 3.4 $\mu$ 粒子の寿命算出

$\mu$  粒子の寿命測定を行うにあたって、放射性崩壊の指数関数法則を用いる。今回の実験で用いた指数関数法則は以下のように導かれる。

今、それぞれの粒子が単位時間に崩壊する確率を  $\lambda$  とする、独立な粒子の集合を考える。時間  $dt$  の間に崩壊する数  $dN$  は次式で与えられる。

$$dN = \lambda N(t) dt \quad (4.1)$$

ここで、 $N(t)$  はある時間  $t$  に存在する粒子の数である。(4.1) を積分する。 $N_0$  を時間  $t_0$  に存在する粒子数とする。

$$\begin{aligned} \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} &= -\lambda \int_{t_0}^t dt \\ [\ln N]_{N_0}^N &= -\lambda [t]_{t_0}^t \\ \ln N - \ln N_0 &= -\lambda(t - t_0) \\ \ln \frac{N}{N_0} &= -\lambda(t - t_0) \end{aligned} \quad (4.2)$$

$t_0 = 0$  の場合、(4.2) 式は通常放射性崩壊の指数関数法則である次式に書き換えられる。

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (4.3)$$

時間  $t$  と  $t+dt$  との間の無限に小さい時間間隔  $dt$  の間に崩壊する粒子の数は、平均として(4.1)である。 $N_0$ 個すべての粒子の生存時間の和 $L$ は  $tN\lambda dt$  の  $t=0$ から  $t=\infty$ までの積分であり、(4.4)式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 L &= \int_0^{\infty} tN\lambda dt \\
 &= \int_0^{\infty} tN_0\lambda e^{-\lambda t} dt \\
 &= N_0\lambda \left[ \frac{1}{\lambda^2} \right]_0^{\infty} \\
 &= \frac{N_0}{\lambda}
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

以上より、平均生存時間  $L/N_0$  (平均寿命時間  $\tau$ ) は(4.5)式で与えられる。

$$\frac{L}{N_0} = \tau = \frac{1}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{1}{\tau} \tag{4.5}$$

これを(4.3)式に代入すると、

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

が得られる。

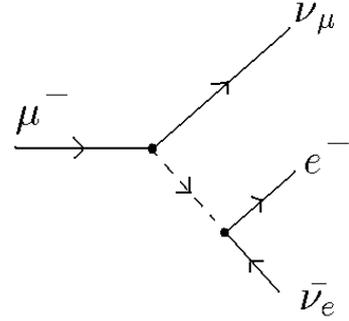
この式を用いて  $\mu$  粒子の寿命を測定する。

$\mu$  粒子がシンチレーター内を通過すると光を出し、その信号は一つ山になる。一方、 $\mu$  粒子がシンチレーター内で静止し、しばらくして崩壊すると、 $\mu$  粒子のエネルギー損失と電子のエネルギー損失でその信号は二つ山になる。

この実験では一つ山のピークが来てからと二つ山のピークが来るまでの時間差が(4.6)式の $t$ であり、この $t$ を測定することにより(4.6)式から  $\mu$  粒子の寿命  $\tau$  を算出できる。

### 3.5 電子のエネルギー分布

$\mu$  粒子の寿命の測定とともに、 $\mu$  粒子の崩壊によって生成される電子のエネルギー分布について調べる。 $\mu$  粒子の崩壊のダイアグラムと崩壊式の対応は以下の通りとなる。



$$\mu^-(p_1) \rightarrow e^-(p_4) + \bar{\nu}_e(p_2) + \nu_\mu(p_3)$$

今回の実験で用いた電子のエネルギー分布の式は以下のように導かれる。振幅は

$$M = \frac{g_w^2}{8(M_w c)^2} [u(3)\gamma^\mu(1-\gamma^5)u(1)] [u(4)\gamma_\mu(1-\gamma^5)v(2)]$$

(  $M$  : 振幅 ,  $g_w$  : 結合定数 )

このように表される。よって、

$$\langle [M^2] \rangle = 2 \left( \frac{g_w}{M_w c} \right)^4 (P_1 \cdot P_2)(P_3 \cdot P_4) \quad (4.7)$$

ここで、 $P_1 = (m_\mu c, \vec{0})$  となり、

$$P_1 \cdot P_2 = m_\mu E_2 \quad (4.8)$$

となる。また、 $P_1 = P_2 + P_3 + P_4$  より、

$$(P_3 + P_4)^2 = m_\mu^2 c^2 - 2P_1 \cdot P_2$$

よって、

$$P_3 \cdot P_4 = \frac{(m_\mu^2 - m_e^2)c^2}{2} - m_\mu E_2 \quad (4.9)$$

(4.7) 式に(4.8)式と(4.9)式を代入すると、

$$M = \left( \frac{g_w}{M_w c} \right)^4 m_\mu^2 E_2 (m_\mu c^2 - 2E_2) \quad (4.10)$$

一方、崩壊の割合は次の式で与えられる。

$$d\Gamma = \frac{\langle [M^2] \rangle c}{(4\pi)^4 h m_\mu} dE_2 \frac{d^3 \vec{p}_4}{E_4^2} \quad (4.11)$$

(4.13) 式に(4.12)式を代入して積分する。

$$d\Gamma = \left( \frac{g_w}{4\pi M_w c} \right)^4 \frac{m_\mu c}{h} \left( \frac{m_\mu c^2}{2} - \frac{2}{3} E_4 \right) d^3 \vec{p}_4 \quad (4.14)$$

$$d^3 \vec{p}_4 = 4\pi \left( \frac{E_4}{c} \right)^2 \frac{dE_4}{c}$$

より、

$$\frac{d\Gamma}{dE} = \left( \frac{g_w}{M_w c} \right)^4 \frac{m_\mu^2 E^2}{2h(4\pi)^3} \left( 1 - \frac{4E}{3m_\mu c^2} \right) \quad (4.15)$$

(4.15) 式が崩壊の時に生成される電子のエネルギー分布の式である。これを用いて電子のエネルギー分布を確かめる。

電子のエネルギーが最小となるのは、 $\mu$  粒子の静止系で電子が静止してつくられる場合で、最大となるのは2個のニュートリノの運動量がともに電子運動量の $180^\circ$  方向を向き電子に最大の反跳を与えるときである。 $\mu$  粒子の静止系では、電子の質量エネルギーを無視すると、以下の図のようになる。

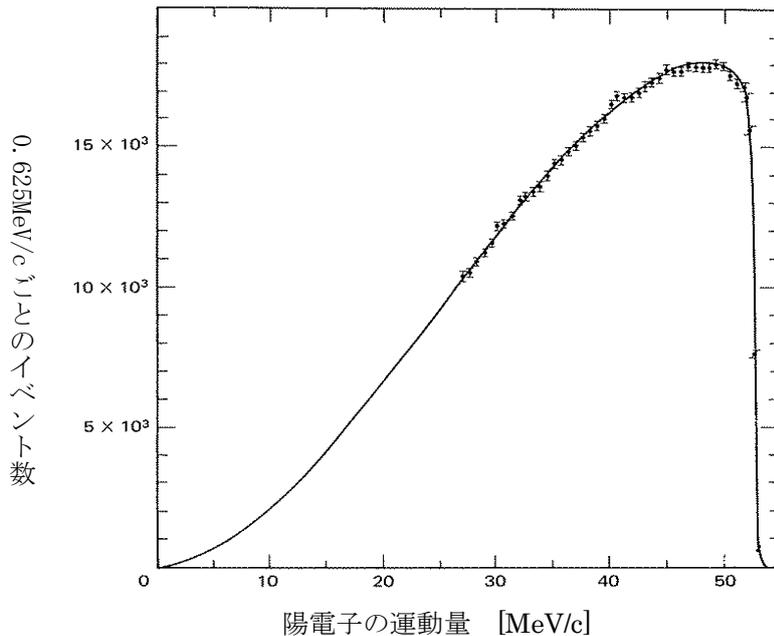


図 4.2:  $\mu$  粒子崩壊時の電子のエネルギー分布  
(電子の質量エネルギーを無視した場合)

# 第4章 測定方法

## 4.1 シンチレーションカウンター

シンチレーションカウンターは放射線検出器の一種である。シンチレーターと光電子増倍管を組み合わせ、シンチレーターの光を光電子増倍管で電気信号に変換することによって、放射線検出器として働く。

### 4.1.1 プラスチックシンチレーター

シンチレーターとは荷電粒子が通過する時にその粒子が失うエネルギーを光エネルギーに変換する物質のことであり、シンチレーターに粒子が入射すると、決まった波長の光が放出される。シンチレーターには、有機シンチレーターと無機シンチレーターがあり、それぞれ発光機構に違いがある。今回は測定用の結晶、トリガーカウンター、Vetoカウンターのすべてで有機シンチレーターであるプラスチックシンチレーターを使用した。プラスチックシンチレーターにはポリエチレン等プラスチック中に有機発光物質が溶かし込まれている。そのため、形状の加工が簡単である。また、応答が数 nsec のオーダーであり、シグナルの立ち上がり立ち下がりが非常に速い(時間分解能が高い)一方、光量が無機シンチレーターに比べると少なく、エネルギーの等しい粒子に対する発光量にばらつきがでる(エネルギー分解能が低い)。それぞれのカウンターの詳細については第5章で述べる。

## 4.1.2 光電子増倍管

光電効果を利用して光エネルギーを電気エネルギーに変換する光電管を基本とし、電流増幅、つまりは電子増幅機能をつけた高感度光検出器である。

光電面に光が入射すると光電効果によって電子が飛び出す。その電子は真空管の中で電極に高電圧をかけることで、加速される。加速した電子はダイノード(Dynode)に衝突し、ダイノードがまたいくつかの電子を放出する。この放出された電子が、次のダイノードとの間にかけて電場によって加速され、次のダイノードに衝突し、より多くの電子が放出される。これを繰り返すことで電子を増幅する。この電子がアノード(Anode)に集まり、電気信号として出力される。

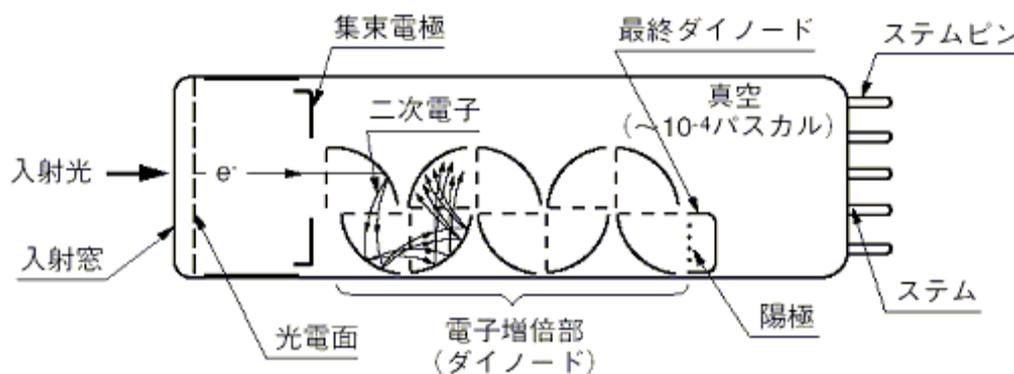


図 4.1 光電子増倍管模式図

## 4.2 測定原理

### 4.2.1 実験装置

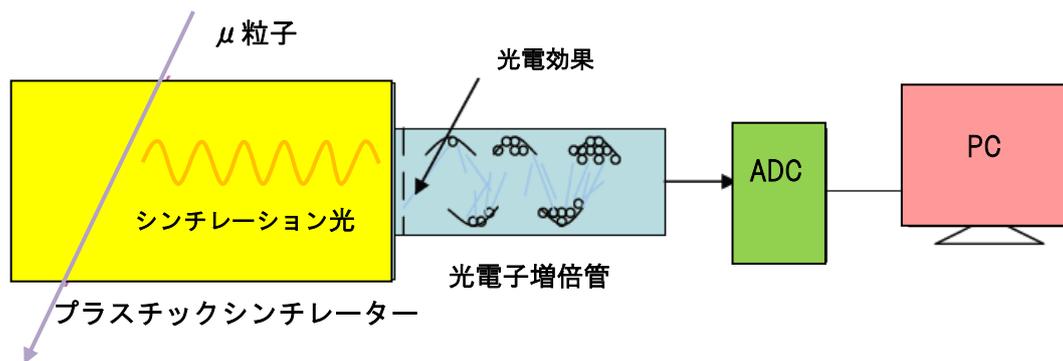


図 4.2  $\mu$  粒子測定の様式図

放射線を計測する際、放射線は五感では感じるできないため、粒子の動きを信号として計測できる形にしなければならない。そこで、荷電粒子が物質の中を通るとエネルギーを光として放出するという現象を利用して、その光を電気的信号に変換し計測を行った。

$\mu$  粒子がシンチレーター内を通ることにより光を放出する。その光は光電子増倍管の光電面に当たると、光電効果により電子を発生する。光電子増倍管でその電子を増幅させ、ADC (Analog Digital Converter) を用いてデジタル信号に変換し解析を行う。

セットアップの詳細やADCについては後で詳しく述べる。

## 4.2.2 観測される波形の違い

$\mu$  粒子のシンチレータ内での振る舞いによって信号の形に違いがある。

### (1) $\mu$ 粒子が大きなシンチレータを通過するとき

図のように  $\mu$  粒子が大きなシンチレータを通過するときは、1 つ山の信号が現れる。これは、シンチレータ内で  $\mu$  粒子が走った信号である。

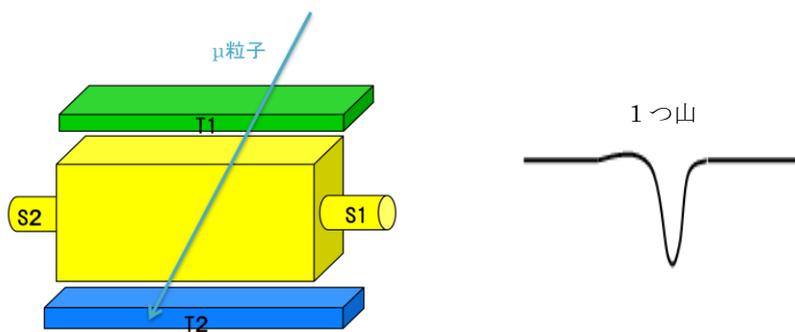


図 4.3  $\mu$  粒子通過時の装置図 (左)、波形 (右)

### (2) $\mu$ 粒子が大きなシンチレータ内で止まりその後崩壊するとき

図のように  $\mu$  粒子がシンチレータ内で崩壊をしたときは、2 つ山の信号が現れる。これは、シンチレータ内で  $\mu$  粒子が走った信号が 1 つ目の山で、崩壊してできた電子が走った信号が 2 つ目の山となって後から出る。

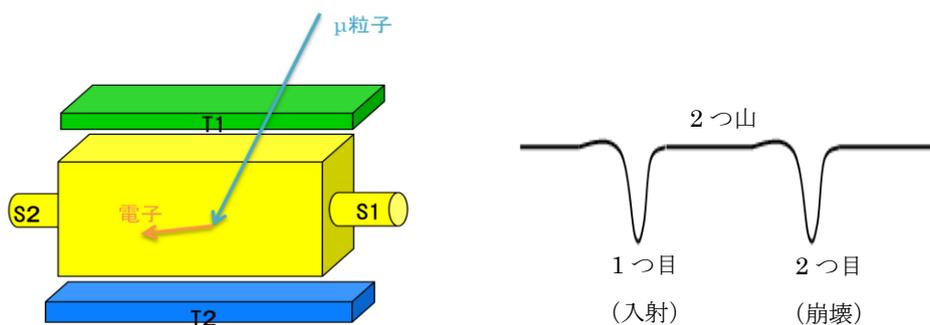


図 4.4  $\mu$  粒子崩壊時の装置図 (左)、波形 (右)

# 第5章 セットアップ

## 5.1 シンチレーションカウンターのセットアップ

### 5.1.1 シンチレーションカウンターの配置

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(580mm×250mm×260mm) 1個

プラスチックシンチレーター(582mm×260mm×10mm) 2個

プラスチックシンチレーター(250mm×131mm×10mm…直径60mmの半円の穴がある) 4個

プラスチックシンチレーター(280mm×261mm×10mm) 4個

ライトガイド 10個

光電子増倍管 12個

これらを用いたシンチレーションカウンターの配置が次の図である。

今回は下図のように、シンチレーションカウンターを配置し、実験を行った。

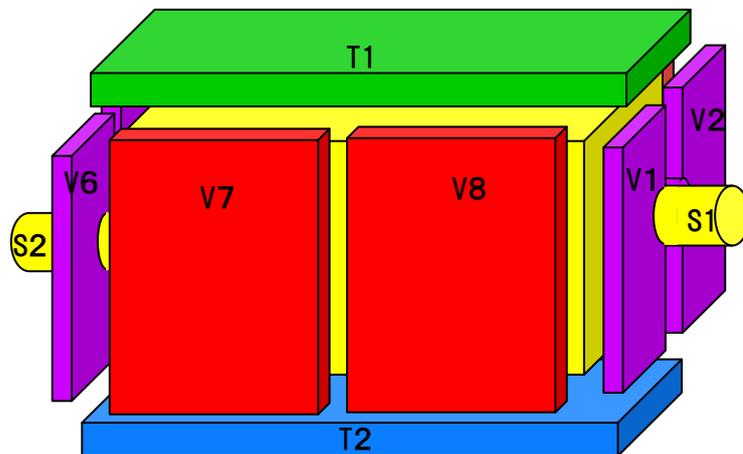


図 5.1 全体のシンチレーションカウンターのセットアップ

分解するとこの様な配置となっている。分かりやすいように S1、S2 以外はライトガイドと光電子増倍管を付けていない図となっている。また、中心となる黄色のシンチレータはサイズが大きいため2つの光電子増倍管を付けた。両端にライトガイドは使わず直接、光電子増倍管を付けた。

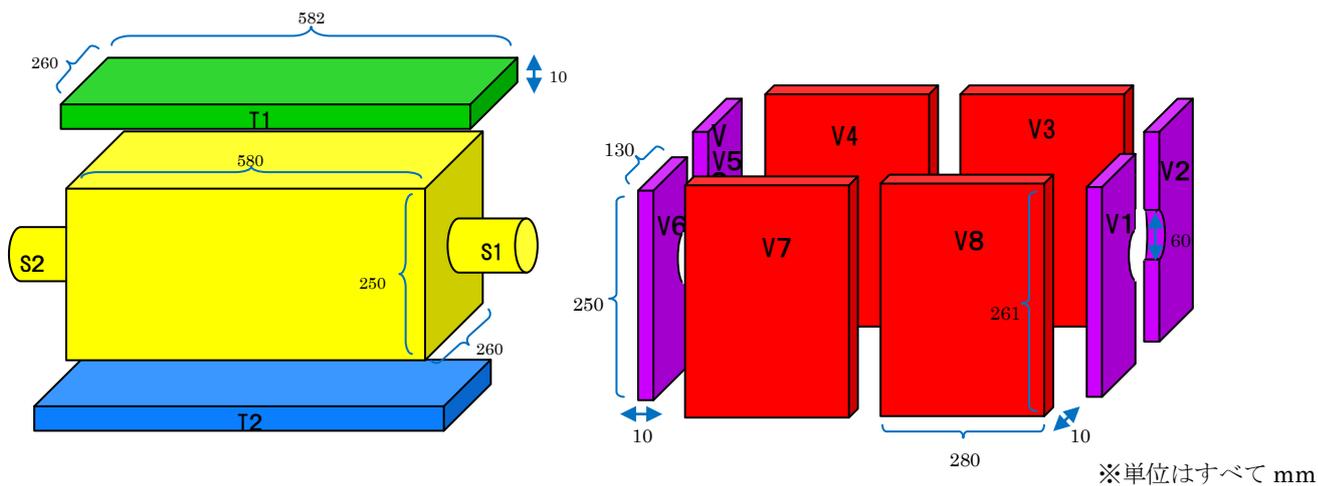


図 5.2 図 5.1 の分解図

## 5.1.2 トリガーカウンター

宇宙線である  $\mu$  粒子は宇宙から絶え間なく降り注いでいるため、シンチレーターにはあらゆる方向から  $\mu$  粒子が入射してくる。しかし、シンチレーターはノイズや電子など他の粒子にも反応する可能性があり、 $\mu$  粒子が入射したかどうか判断することが難しい。そこで、測定用のシンチレーターの上に T1 というカウンターを設置し、Hit の条件を与える。そうすることによって、余分なデータが削ることが可能となる。この作業をするのがトリガーカウンターである。

今回の実験では、T1、S1 をトリガーカウンターとして使用し、T1、S1 のコインシデンスを ON にして測定する。

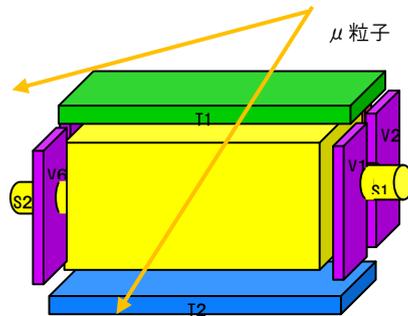


図 5.3 トリガーカウンターの模式図

図中の T1、S1 が同時に信号を出したときのみ  $\mu$  粒子がきたとする。

## 5.1.3 Vetoカウンター

$\mu$  粒子の崩壊後、電子はシンチレーター結晶内をエネルギーを放出しながら通過する。その多くはエネルギーを持ったまま結晶から飛び出す。電子のエネルギー分布を計測するために必要なイベントは電子が結晶内で全エネルギーを放出したイベントのみである。

よって、結晶から飛び出してしまった電子を測定し、そのイベントについてはデータ処理の段階で取り除く必要がある。この作業をするのが Vetoカウンターである。

今回の実験では、T1、T2、V1～V8 の 10 つのカウンターを Vetoカウンターとし、その ADC2 の値によって電子が結晶外に飛び出したかを判断し、T2 の ADC1 の値によって  $\mu$  粒子が通過したかを判断した。

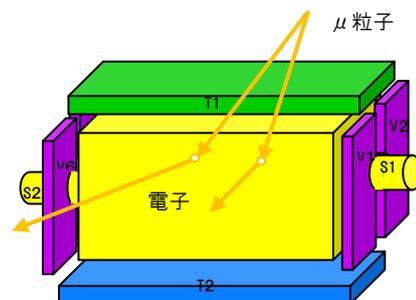


図 5.4 Veto カウンターの模式図

図中の T1、T2、V1～V2 は電子がきたかどうかを測定する。

## 5.2 エレクトロニクスの設定

今回の実験では、上記のモジュールを用いて、各々のカウンターからの信号を測定した。この時のカウンターに用いた光電子増倍管の型番、HVを以下のようにまとめる。

表5.1 各PMTの型番とHV

カウンター	PMT 型番	HV (V)
S1	H1161	2250
S2	H1161	2010
T1	H1161	2000
T2	H7195	1740
V1	H1161	2050
V2	H7195UV	1750
V3	H1161	2390
V4	H1161	1800
V5	H1161	1750
V6	H1161	1890
V7	H1161	1640
V8	H7195	1880

### 5.3 エレクトロニクスのセットアップ

今回の実験では下図のような配線を組み、データを収集した。用いたモジュールそれぞれについて説明する。

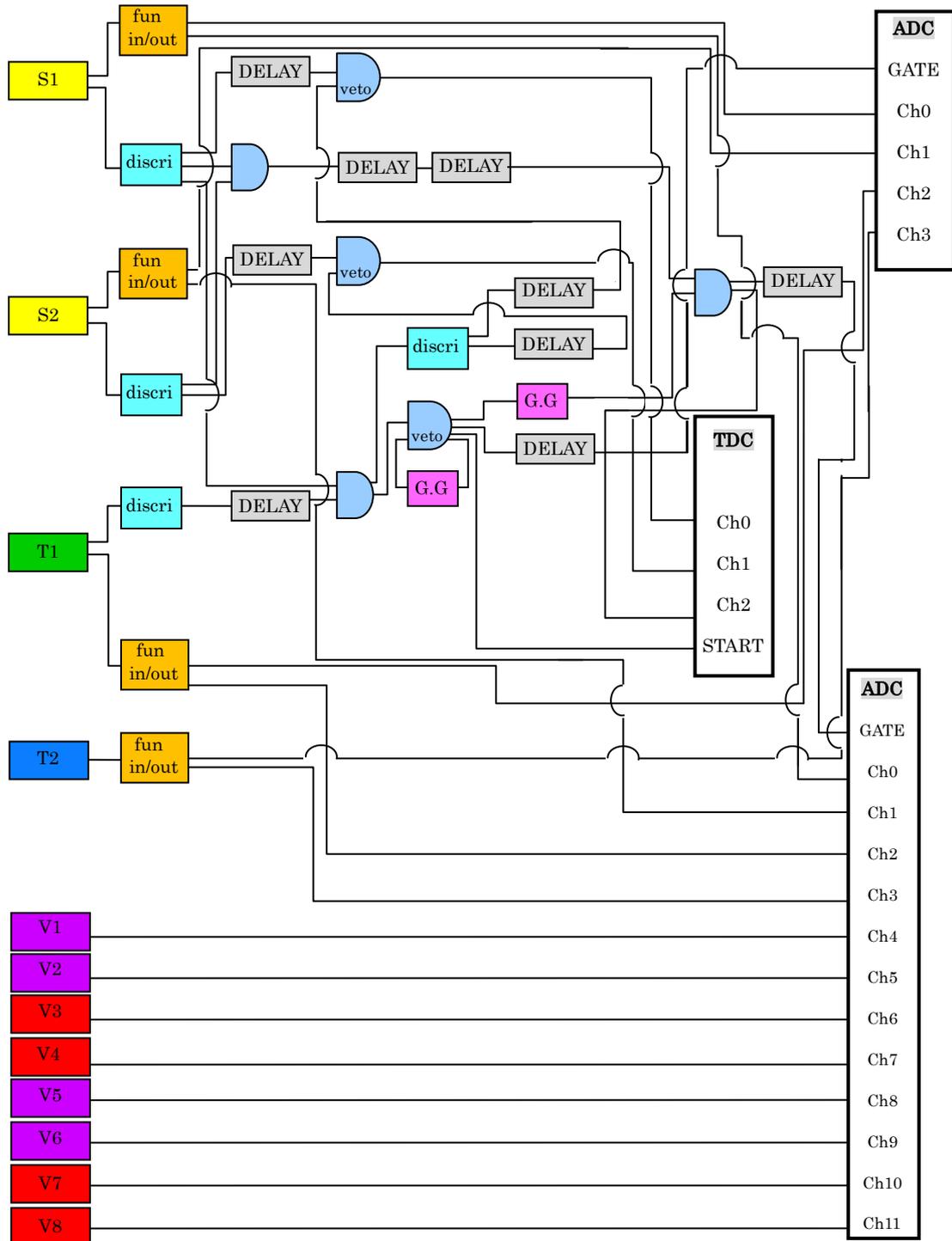


図 5.5 全体のエレクトロニクスのセットアップ図

## 5.4 モジュール

### 5.4.1 NIM (Nuclear Instrument Module)

「放射線測定モジュール標準規格TID-20893」に準拠した標準規格。信号レベル・コネクタ形状・電源・サイズなどについて規定するもので、米国原子力委員会(AEC)において1966年に制定された。この規格に準拠した回路はNIMモジュールと呼ばれ、高エネルギー加速器研究、宇宙線研究などの研究で広く活用されている。今回の実験でもいくつかのNIMモジュールを使用した。

以下では、使用したNIMモジュールについて概要を示す。

- **ディスクリミネーター(Discriminator)**

あらかじめ設定しておいたthreshold(しきい値)よりも大きなシグナルが入力された時、方形(パルス)波を出力するモジュール。放射線検出器からのシグナルの波高分析やタイミングパルスの発生などに使用されるが、今回の実験ではthreshold以下のノイズを除去するために用いた。パルスは-0.7V、140nsecとNIM規格で決められている。

- **コインシデンス(Coincidence)**

複数のパルスが同時に入力された時にパルスを出力するモジュール。

- **ゲート・ジェネレーター(Gate and delay Generator)**

波形を整形するモジュールの出力信号のパルス幅などを調節することができるモジュール。Delay機能も付いていて最小で10nsから最大で4.0secまでの範囲でdelayさせることができる。

- **ファンイン/ファンアウト(Fan-in/Fan-out)**

最大4つまでの入力信号についてアナログ和をとり、その結果として得られるパルスを最大4chまで複製して送り出すモジュール。今回はT1, T2, S1, S2それぞれからの信号を複製するためのみに使用した。

## 5.4.2 CAMAC(Computer Aided Measurements And Control)

モジュール化されたデータを処理するシステム。世界中のほとんどの素粒子・原子核研究室やたくさんの工業現場で使用されている。これはU. SのNIMとヨーロッパのESONE委員会のジョイントで提供された。

CAMACは計算機周辺のデジタル化された情報の処理を機能ごとにモジュール化して行えるようにできている。すなわち、実験装置など外からの情報はプラグイン・ユニットまたはモジュールの画面パネルからコネクタを通して入り込む。この情報はプラグインの中で処理されると、裏面のプリント基盤エッジを利用したコネクタでクレートと呼ばれるプラグインを収容する箱の裏側の配線（データウェイ）とつながれる。このデータウェイはクレートコントローラーが制御するが、たいていはクレートコントローラー自身が計算機の指示に従って制御するようになっている。クレートコントローラーはたいてい小型計算機とCAMACのインターフェースを兼ねる。プラグイン・ユニットは回路配線に使われたプリント基盤自身のエッジが86ピンのコネクタとなって飛び出しており、クレートに挿し込むと自動的にクレート裏側のコネクタを通してCAMACデータウェイと接続され、電源やデータの受け渡し、制御信号の受け渡しがされるようになっている。CAMACの規則は、アドレスの指令であり、C、N、A、Fの4つの数字で指定する。

C: crate controllerの数。今、crateは一つだけ使っているので、C=1とする。

N: station number

A: sub address (モジュール内のアドレス)

F: function

ADにおいては12個の信号を読める。ここでLAMとはLook At Meの略で、モジュールからデータを読み出し可となったことをコンピューターに知らせる信号のことである。

代表的なFunctionを以下に示す。

F(0), F(2) ; Read Data

F(8) ; Test LAM

F(9) ; Clear LAM

F(24) ; Disable LAM

F(26) ; Enable LAM

次頁では、使用したCAMACのモジュールについて概要を示す。

## • ADC (Analog to Digital Converter)

アナログ電気信号をデジタル電気信号に変換する電子回路。今回はQモードを使用し、プラスチックシンチレーター内で崩壊した $\mu$ 粒子と電子からの信号を数値化して解析を行った。

### Qモード(荷電積分型ADC)

Gateパルスが持続している間の信号を積分した値を測定するモードのこと。測定される電荷の量は $Q = \int_{\Delta t} i dt$ となる。

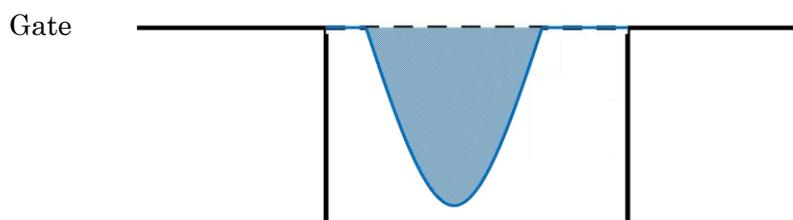


図 5.2: ADC のしくみ

## • TDC(Time to Digital Converter)

スタート信号の入力で内部のクロックをスタートさせ、ストップ信号の入力時のクロックの出力数をカウントする。下図のようにスタート信号からストップ信号までの時間を測定している。なお、今回実験で使用したTDC はREPIC 社のRpc-060 型 (25psec/countselect) である。

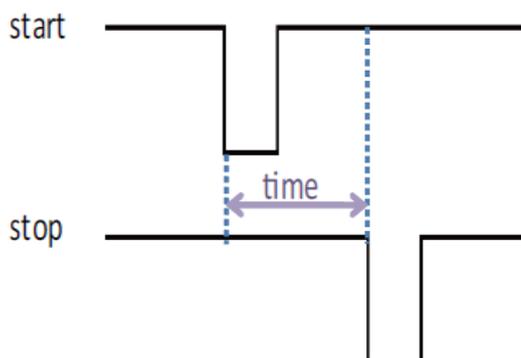


図 5.3: TDC のしくみ

## 5.5 各 CAMAC モジュールについてのセットアップ

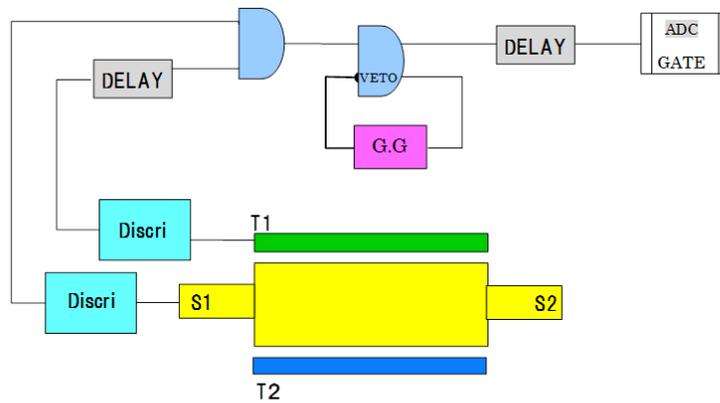
全体のセットアップをより詳しくみていくことにする。

- (1)  $\mu$  粒子が入射したときの測定
- (2)  $\mu$  粒子が崩壊したときの電子の測定
- (3)  $\mu$  粒子が入射してから崩壊するまでの時間の測定

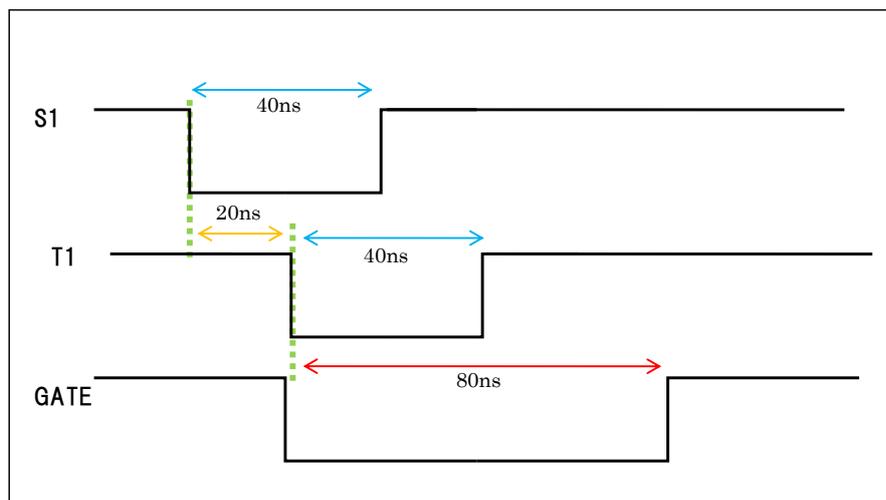
それぞれについてどのようなセットアップになっているかを以下で示す。

### (1) $\mu$ 粒子が入射したときの測定のセットアップ

T1、S1 が同時に信号を出したときに  $\mu$  粒子が入射したとみなしたので、次のような配線を組んだ。



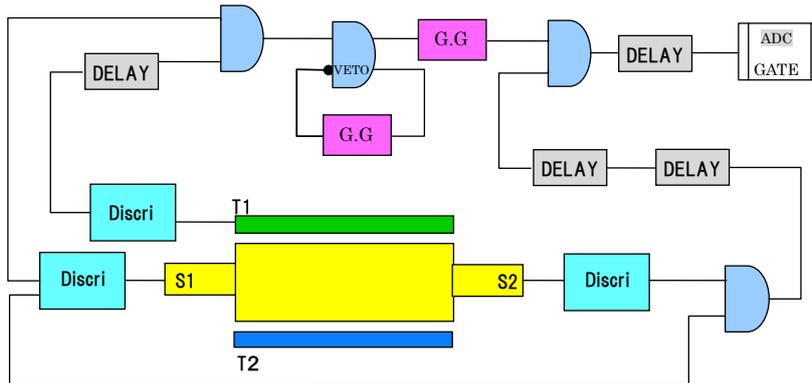
以下のように、T1 と S1 の coincidence で Gate をつくり、この Gate により  $\mu$  粒子の入射を測定した。



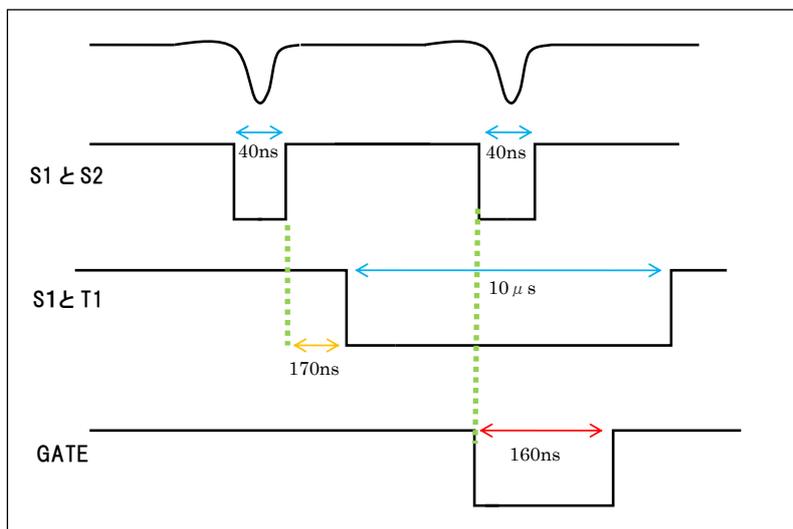
(2)  $\mu$  粒子が崩壊したときの電子の測定のセットアップ

T1、S1、S2 が同時に信号を出したときに  $\mu$  粒子が入射し崩壊したとみなしたので、次のような配線を組んだ。

S1、S2 のコインシデンスを Gate とするが、 $\mu$  粒子の信号を取り除くため、T1、S1 を  $\mu$  粒子が通過した時、出す  $\mu$  粒子の信号を 210ns の Veto とする。

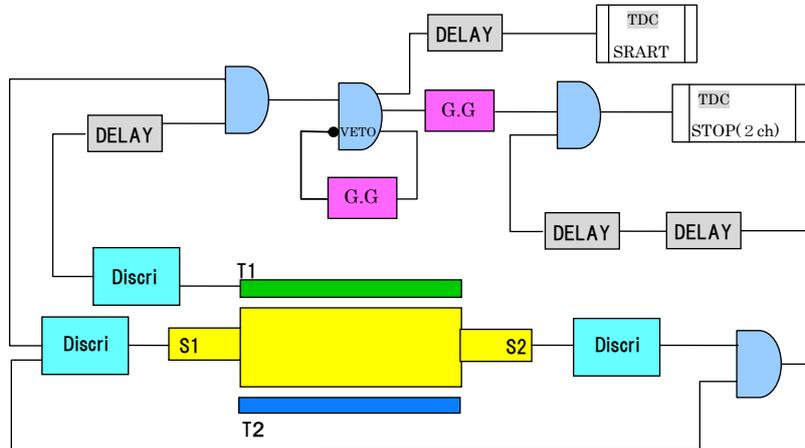


先の  $\mu$  粒子が入射した際の信号を読み込まないように、以下のように、T1 と S1 の coincidence と S1 と S2 の coincidence で Gate をつくり、 $\mu$  粒子の崩壊を測定した。

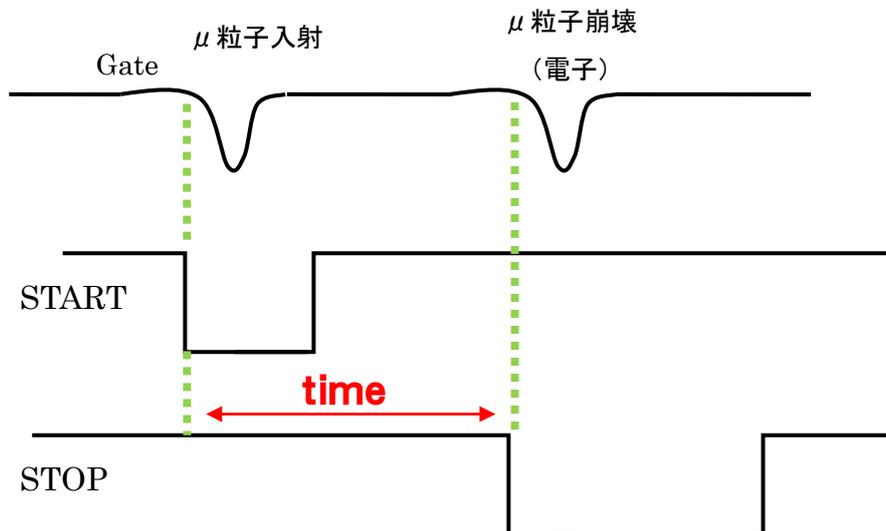


(3)  $\mu$  粒子の入射から  $\mu$  粒子の崩壊までの時間測定のセットアップ

(1)  $\mu$  粒子が入射したときの測定のセットアップと (2)  $\mu$  粒子が崩壊したときの電子の測定のセットアップを同時に用いた。



TDC はスタート信号からストップ信号までの時間を測定するので、(1) で作った Gate をスタート信号に、(2) で作った Gate をストップ信号にして、 $\mu$  粒子が入射してから崩壊するまでの間の時間、すなわち寿命を測定した。



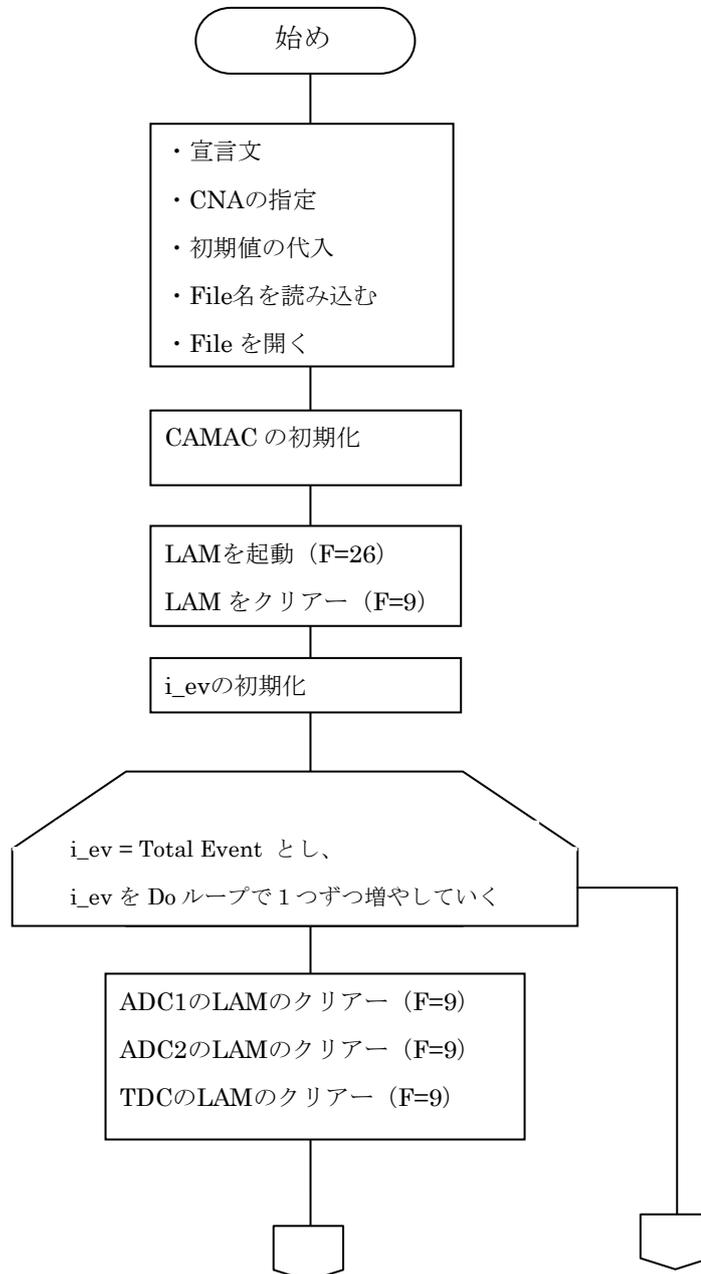
# 第6章 データ収集プログラム

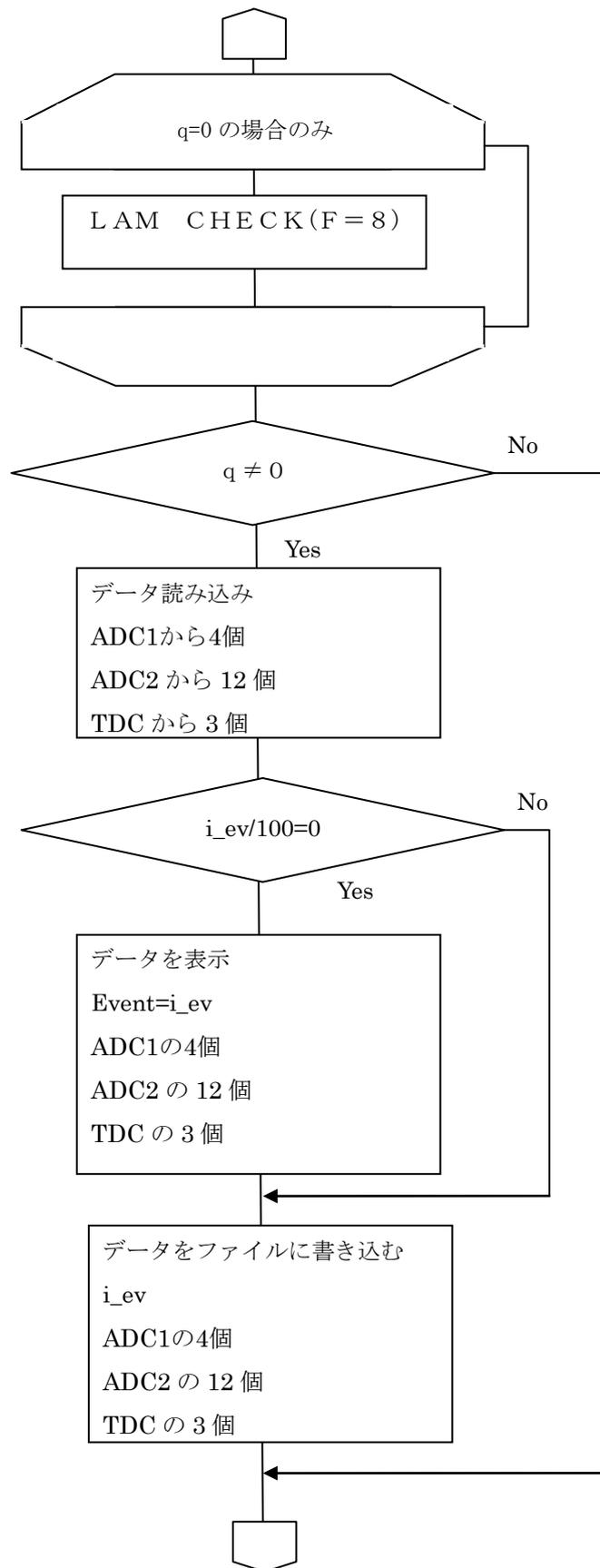
## 6.1 データ収集プログラム

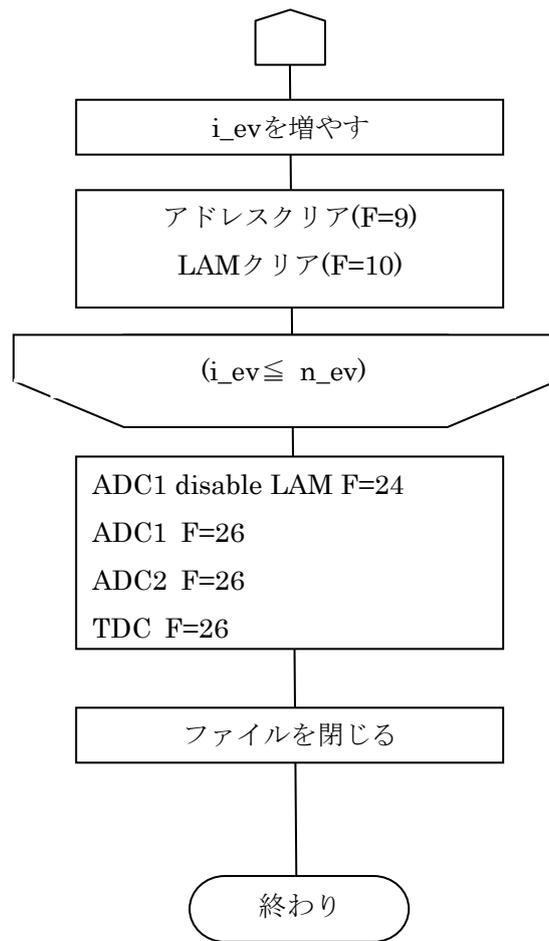
今回の実験では、CAMACからのデータ収集プログラムの言語にC言語を用いる。C言語を用いて、収集するイベントの個数を指定し、データを収集した。

プログラムについては巻末の付録参照。

以下にプログラムのフローチャートを示す。







# 第7章 データ解析

## 7.1 $\mu$ 粒子の寿命

### 7.1.1 イベントの選別

全データの中で、今回使用するイベントは、「 $\mu$  粒子が崩壊したと考えられるイベント」である。 $\mu$  粒子が崩壊したと考えられる条件は以下の通りである。

- ①  $\mu$  粒子がシンチレーターに入射した

S1 と T1(ADC1)が同時になった時、すなわち、S1 と T1 の ADC1 ( $\mu$  粒子のエネルギーを測定) のコインシデンスが ON であるということ。

- ② カロリーメーター内で崩壊した

S1 と S2 と T1 (ADC1)が同時になった時かつ T2(ADC1)がなっていない時、すなわち、S1、S2、T1 の ADC2 (電子のエネルギーを測定) のコインシデンスが ON であり T2(ADC1)が反応していないということ。

以下で各条件と、条件を満たすために与えた具体的な条件、そしてそれぞれの条件を満たすイベント数についてまとめておく。

表 7.1 各条件でのイベント数

条件	具体的な条件	イベント数
$\mu$ 粒子が大きなシンチレーターに入射した	S1 と T1(ADC1)が同時になった時	6000000
$\mu$ 粒子が大きなシンチレーター内で崩壊した	・ S1 と S2 と T1 (ADC1)が同時になった時 ・ T2(ADC1)がなっていない時	44728

この2つの条件を満たしているものを、 $\mu$  粒子が崩壊したと考えられるイベントとし、この2つが作り出す GATE から TDC の値を測定し、寿命測定を行った。

また、TDC のカウント数の値が 0 のものを省くために、TDC の値の数が 0~50 カウントをカットした。

カットする前後での比較を行う。

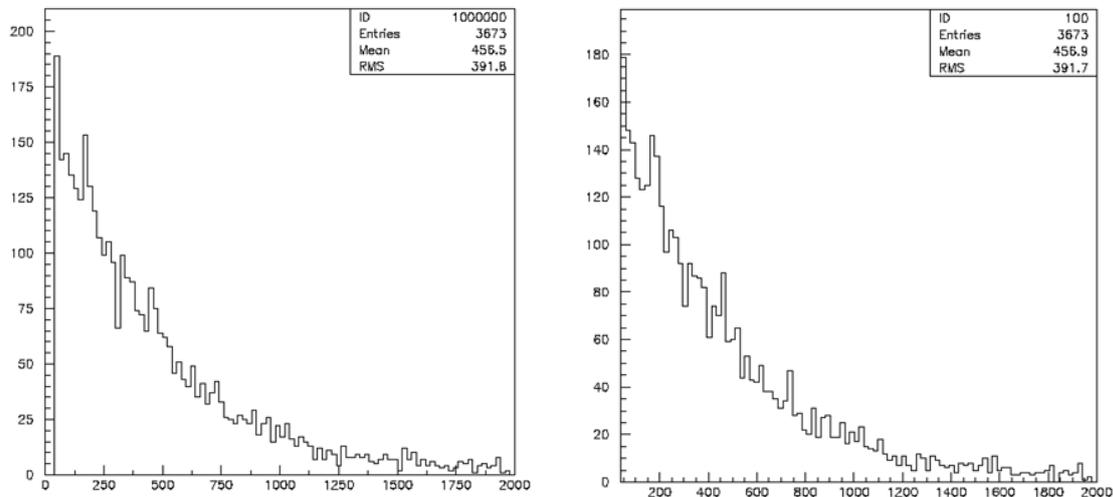


図 7.1 カット前後での比較 カット前 (左図)、カット後 (右図)

カットを行う前後で、イベント数に変化は見られないので、解析に与える影響はないと考えられる。これより、これからは TDC の値の数の 0~40 カウントをカットしたものを解析に用いる。

## 7.1.2 FIT について

寿命  $\tau$  を算出するために、以下の式で FIT を行った。

$$y(t) = P_1 \exp\left(-\frac{t}{P_2}\right) + P_3 \quad (7.1)$$

$\mu$  粒子の崩壊の式

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (7.2)$$

と比較すると、 $P_2$  が寿命  $\tau$  に対応していることがわかる。

これより  $P_2$  に TDC の 1 カウントの時間をかけることで  $\mu$  粒子の寿命を算出することができる。

### 7.1.3 実験結果

先の式を用いて、実験結果に FIT したものである。

右図は log スケールにしたものである。

結果を以下に示す。

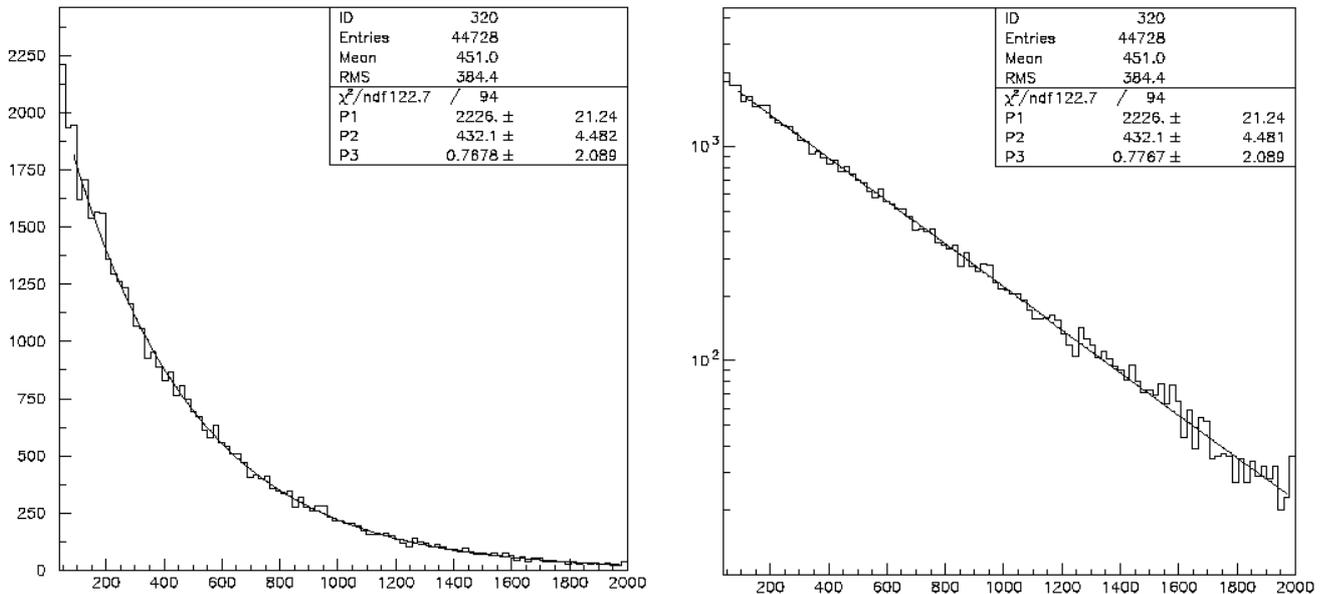


図 7.2 TDC に Fit させた実験結果  
linear スケール (右) log スケール (左)

Fit を行った図より、以下の結果が得られた。

表 7.2 実験結果

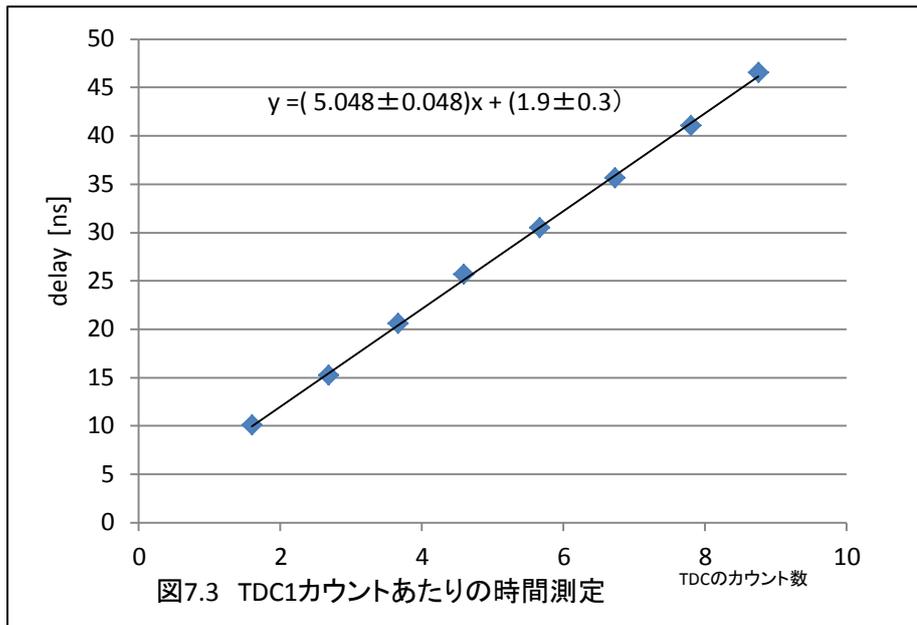
	値	誤差
P <sub>1</sub>	2206	21.24
P <sub>2</sub>	432.1	4.482
P <sub>3</sub>	0.7878	2.089

これより、P<sub>2</sub>の値は 432.1±4.5 とわかる。

$\chi^2/ndf$ は 122.7/94 であった。

## 7.1.4 TDC の 1 カウントあたりの時間測定

Clock Generator からの入力信号を start と stop に入れ、Stop へ入れる信号を delay させることで、TDC のカウントを測定した。用いたイベント数は 10000 イベントである。実験結果を以下に示す。



式の傾きが、 $5.048 \pm 0.048$  なので TDC1[count]あたり  $5.048 \pm 0.048$  [ns]になることがわかる。

## 7.1.5 $\mu$ 粒子の寿命の算出

これより、 $\mu$  粒子の寿命の算出を行う。

$$\begin{aligned}
 (\text{寿命 } \tau \text{ の値}) &= P_2 \times (\text{TDC の 1 カウントあたりの時間 : } a) \\
 &= 432.1 \times 5.049 [\text{ns}] \times 10^{-3} \\
 &= 2.1817 \\
 &= 2.182 \quad [\mu\text{s}]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (\text{寿命 } \tau \text{ の誤差}) &= \tau \times \sqrt{\left(\frac{\Delta P_2}{P_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2} \\
 &= 2.182 \times \sqrt{\left(\frac{4.5}{432.1}\right)^2 + \left(\frac{0.048}{5.048}\right)^2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 2.182 \times \sqrt{(0.010)^2 + (0.0095)^2} \\ &= 0.0308 \\ &= 0.031 \text{ [\mu s]} \end{aligned}$$

これより、私たちの実験結果から得られた  $\mu$  粒子の寿命は次のようになることが分かった。

実験から得られた  $\mu$  粒子の寿命は  $2.182 \pm 0.031 \text{ [\mu s]}$  となる。

Particle Data Book に記載されている  $\mu$  粒子の寿命は、 $2.197034 \pm 0.000021 \text{ [\mu s]}$  なので、今回の実験結果は良く一致していると言える。

## 7.2 電子のエネルギースペクトラムの測定

### 7.2.1 イベントの選別

全データの中で、電子のエネルギースペクトラムを測定するために用いた条件を次に示す。

- ①  $\mu$  粒子が入射した  
S1 と T1(ADC1)が同時になった時、すなわち、S1 と T1 の ADC1 ( $\mu$  粒子のエネルギーを測定) のコインシデンスが ON であるということ。
- ② 測定用シンチレータ内で崩壊した  
S1 と S2 と T1 (ADC1)が同時になった時かつ T2(ADC1)がなっていない時、すなわち、S1、S2、T1 の ADC2 (電子のエネルギーを測定) のコインシデンスが ON であり T2(ADC1)が反応していないということ。
- ③ 電子が全エネルギーを結晶内で放出した  
全てのベトーカーンターが反応していないとき、すなわち veto カウンターが pedestal の値であるということ。

以下で各条件と、条件を満たすために与えた具体的な条件、そしてそれぞれの条件を満たすイベント数についてまとめておく。

表 7.3 各条件でのイベント数

条件	具体的な条件	イベント数
① $\mu$ 粒子が大きなシンチレータに入射した	S1 と T1(ADC1)が同時になった時	6000000
② $\mu$ 粒子が大きなシンチレータ内で崩壊した	・S1 と S2 と T1 (ADC1)が同時になった時 ・ T2(ADC1)がなっていない時	44728
③ 電子が全エネルギーを大きなシンチレータ内で放出した	全てのベトーカーンターがなっていない時	20306

この3つの条件を満たしているイベントを選別して、電子のエネルギースペクトラムを測定した。

## 7.2.2 条件③

### ベトーカーがなっていない時の具体的な数値

条件③「電子が全エネルギーを大きいシンチレーター内で放出した」ときの具体的な条件「全てのベトーカーがなっていない時」についてみていく。始めに、全てのベトーカーがなっていない時とはどのような状態のことかを決める。

そのために、 $\mu$  粒子が崩壊したときの各カウンターの ADC 分布を確認した。

条件①と条件②を加えたときの分布を確認し、ベトーカーがなっていない具体的な数値を決めた。

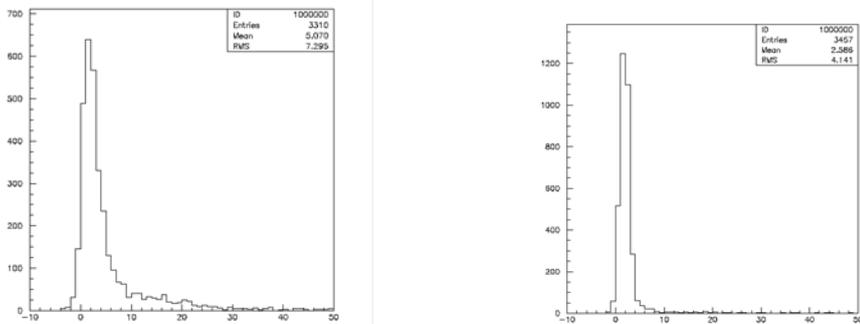


図 7.4 条件①②のみを与えたグラフ T1(左) T2(右)

T1、T2 は ADC の値が 10 カウント以下のとき反応していないものとした。

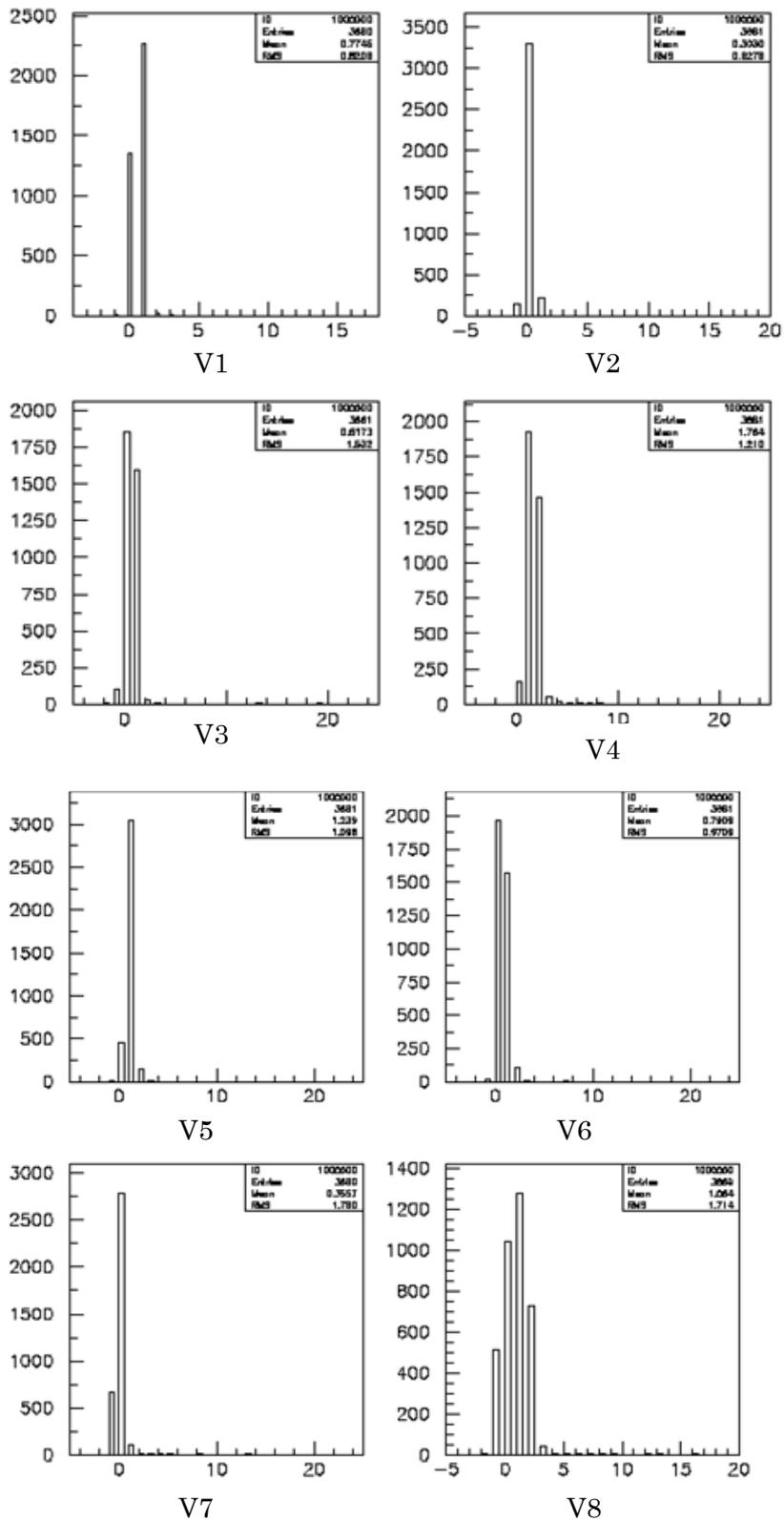


図 7.5 条件①②のみを与えたグラフ

V1 から V8 は ADC の値が 5 カウント以下のとき反応していないものとした。

ここで、 $\mu$  粒子が大きなシンチレーターに入射したイベント（50000 イベント）に条件③を加える前と加えた後で比較を行う。解析に使用した結果は ADC2 の ch1 と ch2 の合計値である。

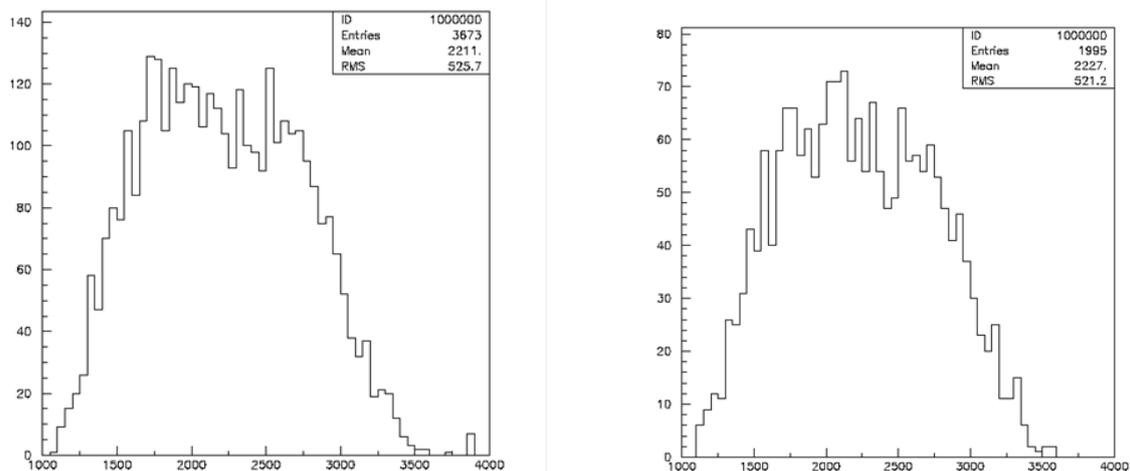


図 7.6 条件有無の比較 条件①②のみ(左) 条件①②③(右)

イベント数を比較すると、条件①と条件②のみを加えたイベント数は 3673 イベント、条件①と条件②、条件③を加えたイベント数は 1995 イベントであり、ベトーカーがなっていないという条件を加えたことで、イベント数が減り、データの選別ができているとみなすことができる。

### 7.2.3 FIT について

電子のエネルギー分布の式は、

$$y = b_1 E^2 \left(1 - \frac{E}{b_2}\right) + b_3 \quad (7.3)$$

という式で表せられる。求めたグラフに Fit させて、理論式から求められるグラフと比較を行った。

## 7.2.4 実験結果

実験結果から得られたグラフは以下の通りである。

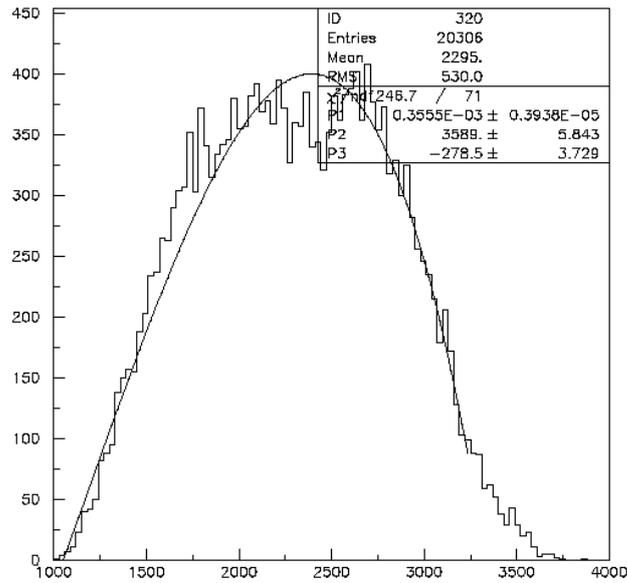


図 7.7 エネルギースペクトラムの実験結果

これを理論式から予想されるグラフと比較をする。

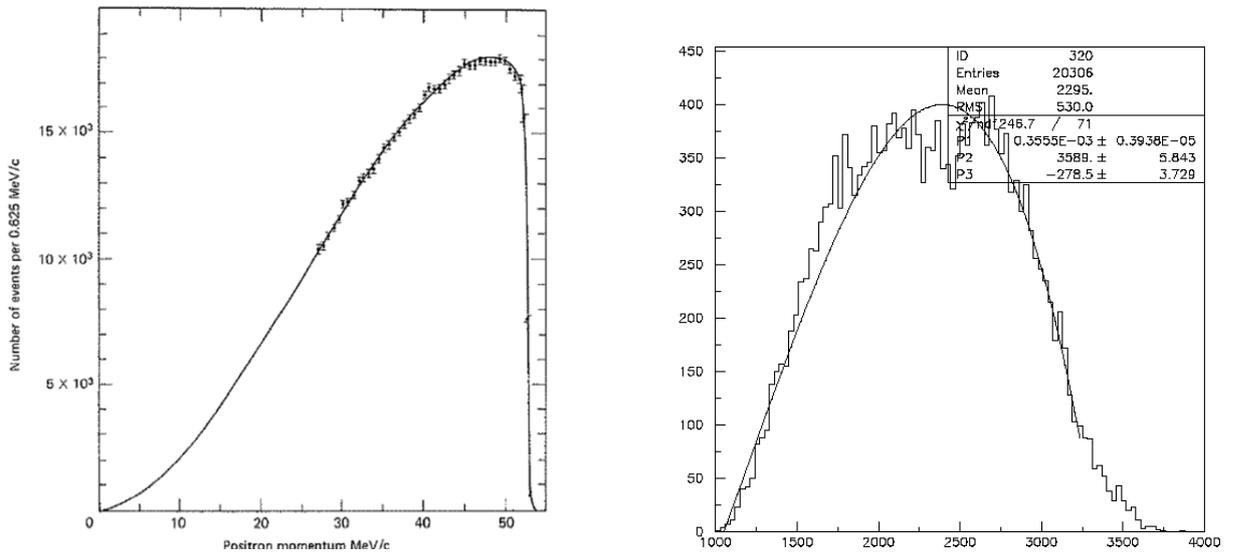


図 7.8 エネルギースペクトラムの比較

式から予想されるグラフ(左) 実験値から得られたグラフ(右)

これより、2つのグラフには違いがみられた。

## 7.2.5 考察

観測された結果と  $\mu$  粒子が静止し崩壊したときのエネルギー分布の計算値に違いがみられた。原因としては以下のことが考えられる。

(1)一部のベトーカーの ADC 分布がおかしいこと

条件②から条件③へのイベントの選別がうまくいかなかったと思われる。

(2)光の減衰の効果

大きいシンチレーター内での減衰を考慮することでよりよい結果が得られると考えられる。

(3)電子の飛程 (R) の影響

崩壊によって生成された電子はシンチレーター原子を励起しながらエネルギーを失い、ついには止まってしまう。電子が止まるまでに走る距離 (飛程) は、物質の種類によっても異なるが、Feather の式より

$$R = 0.542E - 0.133 \text{ (但し } E > 0.8\text{MeV)}$$

と表される。ここで、電子のエネルギー  $E$  は (MeV) で、飛程  $R$  は質量厚さ ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) である。プラスチックシンチレーターの密度 =  $1.03 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、ミューオン崩壊から放出される電子・陽電子の平均エネルギーは  $37\text{MeV}$  であることから、

$$R = 0.542 \times 37 - 0.133 = 19.921 \text{ g}/\text{cm}^2$$

$$19.921 \div 1.03 = 19.34 \text{ cm}$$

これより、平均飛程は  $19.34 \text{ cm}$  とわかった。

電子の飛程距離に関しては、ほぼ測定できていると考えられるが、大きなシンチレーターから逃げ出したものもあると考えられる。

# 第 8 章 まとめ

## 8.1 $\mu$ 粒子の寿命測定

今回算出した  $\mu$  粒子の寿命は、 $2.177 \pm 0.030$  [ $\mu\text{s}$ ] であった。

Particle Data Book に記載されている  $\mu$  粒子の寿命は、 $2.197034 \pm 0.000021$  [ $\mu\text{s}$ ] なので、今回の実験結果は良く一致していると言える。

FIT の範囲を変えることによって、 $P_2$  の値も変わってくる。この範囲を変えて寿命を測定することで、より精度の良い結果が得られると考えられる。

## 8.2 電子のエネルギースペクトラム

観測からエネルギースペクトラムの測定結果は得られた。しかし、実験値から得られたグラフと  $\mu$  粒子の計算値からのグラフには違いがみられた。原因としては、一部のベトーカーカウンターの動きがよくなかった可能性や光の減衰の効果が考えられる。

## 8.3 参考文献

- ・奈良女子大学理学部物理科学科 2009 年度卒業生 上田玲奈 岡本枝里香 貴志佳代  
『2009 年度卒業論文 FADC を用いた  $\mu$  粒子の寿命測定』
- ・奈良女子大学理学部物理科学科 2010 年度卒業生 近藤麻由 山西菜月  
『2010 年度卒業論文  $\mu$  粒子の寿命測定』
- ・奈良女子大学理学部物理科学科 2011 年度卒業生 中川真菜美 藤田朋美  
『2011 年度卒業論文  $\mu$  粒子の寿命測定』

## 8.4 謝辞

私たち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割いて熱心に指導してくださった林井先生をはじめ、ゼミなどで指導してくださった宮林先生、数々の相談にのっていただいた諸先輩方に心より感謝しています。この一年で学んだことを今後も活かしていきたいと思います。本当にありがとうございました。

## 8.5 付録

付録の内容をここに示す。

```
/***** ele.c *****/ created 2012/Feb./1th*****  
* Original version was written by S.Ono 2002/Jan./27th  
* This is simplified version having only CAMAC control/IO part.  
* LAM clear was moved to outside of "if(q!=0)". 2003/Jul./9th  
*****/  
/**** original title comment *****/  
Data taking test program  
2000/ 1/27 S.Ono & A.Tango  
*****/  
#include <fcntl.h>  
#include <sys/time.h>  
#include <unistd.h>  
#include <sys/types.h>  
#include <stdio.h>  
#include <string.h>  
#include <stdlib.h>  
#include <math.h>  
#include <sys/errno.h>  
#include "camlib.h"  
#include <time.h>  
#include <netinet/in.h>  
  
FILE *fp; /* The file to save the taken data.*/  
  
int main(){  
    int i_ev, n_ev;  
    int q,x,data21,data22,data23,data24,data31,data32,data33;  
    int data1,data2,data3,data4,data5,data6,data7,data8,data9,data10,data11,data12;  
    int cadcqn1,cadcqn2,ctdcqn,cfadc;  
    int ch1,ch2,ch3,ch4,ch5,ch6,ch7,ch8,ch9,ch10,ch11,ch12;  
    int Nrec,fadcdata[32100],j;  
    int chfadc;
```

```

int lamsrc;
int lamch;

char fname[36];

    int qq;
    int head;
const int Nmax=500;
int fadcbuf[Nmax];

cadcqn1=1; /* muon ADC-Qmode module number */
cadcqn2=2; /* electron  ADC-Qmode module number */
ctdcqn=3; /* TDC  module number */
cfadcn=5; /* FADC module address */
ch1=0;
ch2=1;
ch3=2;
ch4=3;
ch5=4;
ch6=5;
ch7=6;
ch8=7;
ch9=8;
ch10=9;
ch11=10;
ch12=11;

/*=====
 * Ask the file name to save the taken data.
 * Also open the data file.
 *=====*/

printf("File name to save data?¥n");
scanf("%s",fname);

```

```

fp=fopen(fname, "w");

/*=====
 * How many events do you take?
 *=====*/
printf("Number of events?¥n");
scanf("%d",&n_ev);

/*=====
 * Open CCP interface device file.
 * If it fails, exit.
 *=====*/
if(COPEN()){
    printf("ccp open error¥n");
    exit(-1);
}

/*=====
 * Initialize CAMAC.
 *=====*/
CSETCR(0);
CGENZ0;
CGENC0;
CREMI0;

    lamsrc=cadcqn1;
    lamch=ch1;

printf("LAM source: %d, %d¥n",lamsrc, lamch);
/*=====

```

```

* Enable LAM and Clear it.
*=====*/
CAMAC(NAF(lamsrc,lamch,26),&data1,&q,&x); /* F=26 is enable. */
CAMAC(NAF(lamsrc,lamch, 9),&data1,&q,&x); /* F=9 is clear. */

CAMAC(NAF(cadcqn2,ch1,26),&data1,&q,&x); /* F=26 is enable. */
CAMAC(NAF(ctdcqn,ch1,26),&data1,&q,&x); /* F=26 is enable. */
CAMAC(NAF(cadcqn2,ch1,9),&data1,&q,&x); /* clear LAM. */
CAMAC(NAF(ctdcqn,ch1,9),&data1,&q,&x); /* clear LAM */
/*=====
* Again send enable command to prepare the first event.
*=====*/
CAMAC(NAF(lamsrc,lamch,26),&data1,&q,&x);
CAMAC(NAF(cadcqn2,ch1,26),&data1,&q,&x); /* F=26 is enable. */
CAMAC(NAF(ctdcqn,ch1,26),&data1,&q,&x); /* F=26 is enable. */

/*=====
* send message to the user.
*=====*/
printf("CAMAC initilize done.¥n");
printf("Number of event = %d¥n",n_ev);

/*=====
* Event loop.
*=====*/
i_ev = 1;
while( i_ev <= n_ev )
{
/*---
* Address clear for FADC
---*/
CAMAC(NAF(cadcqn1,ch1,9),&data1,&q,&x); /* F=9 LAM clear. */
CAMAC(NAF(cadcqn2,ch1,9),&data1,&q,&x); /* F=9 LAM clear. */
CAMAC(NAF(ctdcqn,ch1,9),&data1,&q,&x); /* F=9 LAM clear. */

```

```

/*-----
* Test LAM.
*-----*/

do {
CAMAC(NAF(lamsrc,lamch,8),&data1,&q,&x); /* F=8 is test LAM.*/
} while ( q==0);

/*-----
* If no event comes yet, q is set to be 0,
* otherwise, the digitized event is there!
*-----*/

/*-----
* Read the digitized data from the register.
*-----*/
CAMAC(NAF(cadcqn1,ch1,2),&data21,&qq,&x);
CAMAC(NAF(cadcqn1,ch2,2),&data22,&qq,&x);
CAMAC(NAF(cadcqn1,ch3,2),&data23,&qq,&x);
CAMAC(NAF(cadcqn1,ch4,2),&data24,&qq,&x);

CAMAC(NAF(cadcqn2,ch1,2),&data1,&qq,&x);
CAMAC(NAF(cadcqn2,ch2,2),&data2,&qq,&x);
CAMAC(NAF(cadcqn2,ch3,2),&data3,&qq,&x);
CAMAC(NAF(cadcqn2,ch4,2),&data4,&qq,&x);
CAMAC(NAF(cadcqn2,ch5,2),&data5,&qq,&x);
CAMAC(NAF(cadcqn2,ch6,2),&data6,&qq,&x);
CAMAC(NAF(cadcqn2,ch7,2),&data7,&qq,&x);
CAMAC(NAF(cadcqn2,ch8,2),&data8,&qq,&x);
CAMAC(NAF(cadcqn2,ch9,2),&data9,&qq,&x);
CAMAC(NAF(cadcqn2,ch10,2),&data10,&qq,&x);
CAMAC(NAF(cadcqn2,ch11,2),&data11,&qq,&x);
CAMAC(NAF(cadcqn2,ch12,2),&data12,&qq,&x);

CAMAC(NAF(ctdcqn,ch1,2),&data31,&qq,&x);

```

```
CAMAC(NAF(ctdcqn,ch2,2),&data32,&qq,&x);
```

```
CAMAC(NAF(ctdcqn,ch3,2),&data33,&qq,&x);
```

```
/*-----
```

```
 * Update the event counter(i_ev), and send message for
```

```
 * every 100 events.
```

```
 *-----*/
```

```
if( i_ev%100 == 0 )
```

```
{
```

```
  printf("Event= %d\n",i_ev);
```

```
  printf("data21= %d\n",data21);
```

```
  printf("data22= %d\n",data22);
```

```
  printf("data23= %d\n",data23);
```

```
  printf("data24= %d\n",data24);
```

```
  printf("data1= %d\n",data1);
```

```
  printf("data2= %d\n",data2);
```

```
  printf("data3= %d\n",data3);
```

```
  printf("data4= %d\n",data4);
```

```
  printf("data5= %d\n",data5);
```

```
  printf("data6= %d\n",data6);
```

```
  printf("data7= %d\n",data7);
```

```
  printf("data8= %d\n",data8);
```

```
  printf("data9= %d\n",data9);
```

```
  printf("data10= %d\n",data10);
```

```
  printf("data11= %d\n",data11);
```

```
  printf("data12= %d\n",data12);
```

```
  printf("data31= %d\n",data31);
```

```
  printf("data32= %d\n",data32);
```

```
  printf("data33= %d\n",data33);
```

```
}
```

```

        head=-1;

Nrec=0;

/*-----
 * The read data is written into the file.
 *-----*/

fprintf(fp, " %d",head);
fprintf(fp, " %d",i_ev);

fprintf(fp, " %d",data21);
fprintf(fp, " %d",data22);
fprintf(fp, " %d",data23);
fprintf(fp, " %d",data24);

fprintf(fp, " %d",data1);
fprintf(fp, " %d",data2);
fprintf(fp, " %d",data3);
fprintf(fp, " %d",data4);
fprintf(fp, " %d",data5);
fprintf(fp, " %d",data6);
fprintf(fp, " %d",data7);
fprintf(fp, " %d",data8);
fprintf(fp, " %d",data9);
fprintf(fp, " %d",data10);
fprintf(fp, " %d",data11);
fprintf(fp, " %d",data12);

fprintf(fp, " %d",data31);
fprintf(fp, " %d",data32);
fprintf(fp, " %d¥n",data33);

```

```

/*-----
 * Clear LAM to wait for the next event.
 *   fuc=9 ; LAM clear for usual module
 *   FADC
 *   fuc=9 ; address clear
 *   =10 ; LAM clear
 *-----*/
i_ev++;
CAMAC(NAF(lamsrc,lamch,9),&data1,&q,&x);
CAMAC(NAF(lamsrc,lamch,10),&data1,&q,&x);

} // end of event loop

/*=====
Instructions for termination.
*=====*/
CAMAC(NAF(lamsrc,lamch,24),&data1,&q,&x); /* F=24 is desable lam.*/
CAMAC(NAF(cadcqn1,ch1,24),&data1,&q,&x); /* F=26 is enable. */
CAMAC(NAF(cadcqn2,ch1,24),&data1,&q,&x); /* F=26 is enable. */
CAMAC(NAF(ctdcqn,ch1,24),&data1,&q,&x); /* F=26 is enable. */

CCLOSE0; /* CAMAC close. */
fclose(fp); /* Close data file.*/

return 0;
}

```