

2011年度 卒業論文
 μ 粒子の寿命測定

奈良女子大学
理学部 物理科学科
中川真菜美
藤田朋美

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・ μ 粒子

- 2.1 宇宙線についてp. 4
- 2.2 μ 粒子について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

第4章 測定原理

- 4.1 計測原理p. 10
- 4.2 μ 粒子の寿命算出p. 11
- 4.3 電子のエネルギー分布p. 13
- 4.4 光電子増倍管p. 16
- 4.5 シンチレーターp. 16
- 4.6 シンチレーションカウンターp. 17

第5章 セットアップ

- 5.1 エレクトロニクスの設定p. 18
 - 5.1.1 NIM (Nuclear Instrument Module) 規格
 - 5.1.2 CAMAC (Computer Aided Measurements And Control)
 - 5.1.3 各CAMACモジュールについてのセットアップ
- 5.2 エレクトロニクスの設定p. 25
- 5.3 シンチレーションカウンターのセットアップp. 26
 - 5.3.1 シンチレーションカウンターの配置
 - 5.3.2 シンチレーションカウンターの形状
 - 5.3.3 トリガーカウンター
 - 5.3.4 Vetoカウンター

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. 30 |
|----------------------|-------|

第7章 データ解析

| | |
|----------------------------------|-------|
| 7.1 全データ | p. 33 |
| 7.2 Event選別..... | p. 33 |
| 7.2.1 μ 粒子の崩壊と考えられる条件 | |
| 7.2.2 電子が全エネルギーを結晶内で放出したと考えられる条件 | |
| 7.3 μ 粒子の寿命 | p. 33 |
| 7.4 電子のエネルギー分布 | p. 34 |

第8章 まとめ

| | |
|-----------------------|-------|
| 8.1 μ 粒子の寿命 | p. 42 |
| 8.2 電子のエネルギー分布 | p. 43 |
| 8.3 考察 | p. 43 |
| 8.3.1 μ 粒子の寿命 | |
| 8.3.2 電子のエネルギー分布 | |
| 8.4 参考文献 | p. 44 |
| 8.5 謝辞 | p. 44 |
| 8.6 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、 μ 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ーを用いて、地表にたどり着く μ 粒子を測定する。またその結晶内で崩壊する μ 粒子を使い、 μ 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 μ 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ー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、 μ 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 μ 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・ μ 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%、 α 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 π 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、 π 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 γ 線は大気中で吸収されるため、地上に来る大部分は μ 粒子とニュートリノが占めている。

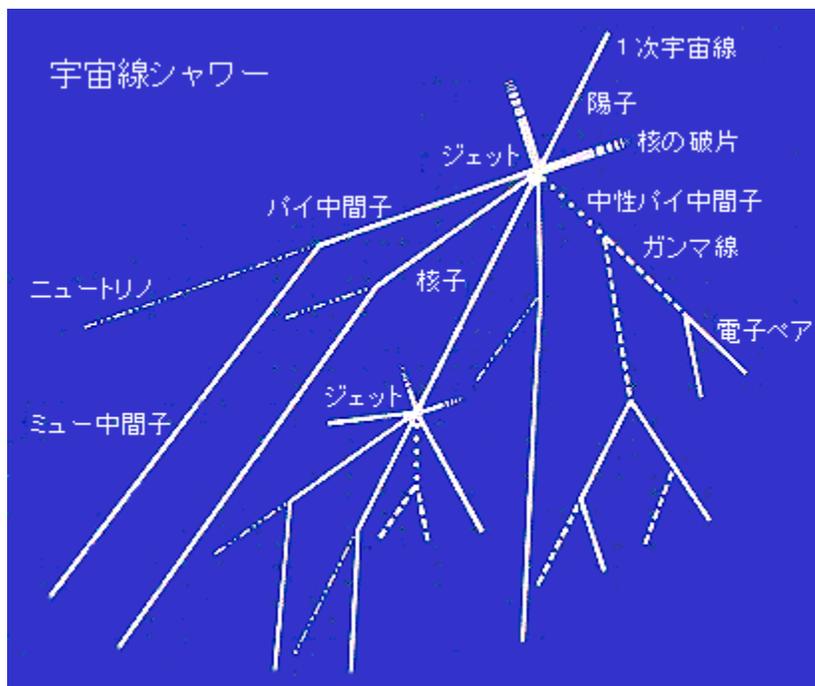
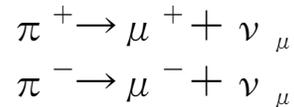


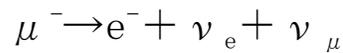
図 2.1: 宇宙線シャワーの模式図

2.2 μ 粒子

μ 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、 μ 粒子は π 中間子が崩壊して生成される。 π 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。 π 中間子には中性の π^0 と荷電の π^\pm があり、荷電 π 中間子は100%、次のように崩壊する。



一方中性 π 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。 μ 粒子は第2世代のレプトンで、質量 $105.7 \text{ MeV}/c^2$ 、電荷 ± 1 、スピン $1/2$ の粒子である。そして、 μ 粒子は弱い相互作用によって、次のように崩壊する。



また、 μ 粒子の寿命はほぼ $2.2 \mu \text{ sec}$ 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。

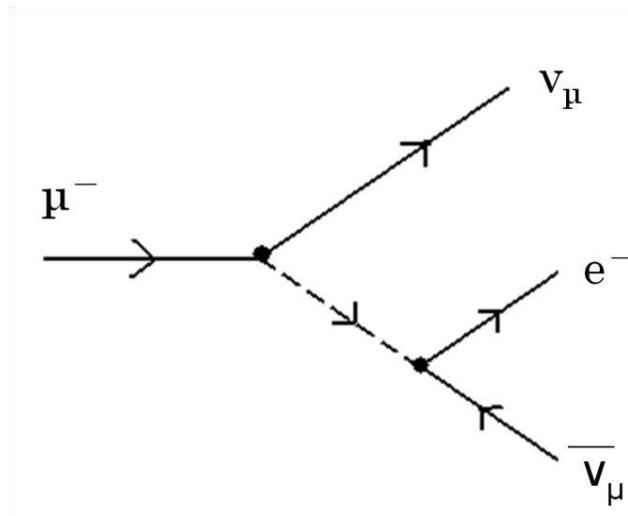


図 2.2: μ^- の崩壊のファインマン図

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。

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

ここで、 N_0 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、 β 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 $1/\beta^2$ に従って急激に減衰し、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。

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

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 ($=6.02 \times 10^{23}$)、 ρ 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

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

で求めることができる。

ここで

$$\rho = 1.03 g / cm^2$$

であり、プラスチックシンチレーターの1 c mあたりのエネルギー損失は

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

第4章 測定原理

4.1 計測原理

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。

μ 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については第5章で詳しく述べる。

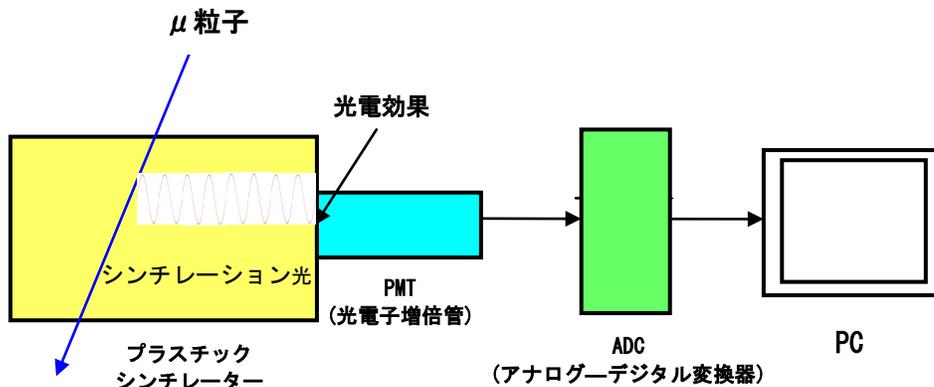


図 4.1 : μ 粒子測定の様式図

4.2 μ 粒子の寿命算出

μ 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 λ 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) 式は通常の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 τ) 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 μ 粒子の寿命を測定する。

μ 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、 μ 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、 μ 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 μ 粒子の寿命 τ を算出できる。

4.3 電子のエネルギー分布

μ 粒子の寿命の測定とともに、 μ 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。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

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

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、 μ 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° 方向を向き電子に最大の反跳を与えるときである。 μ 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。

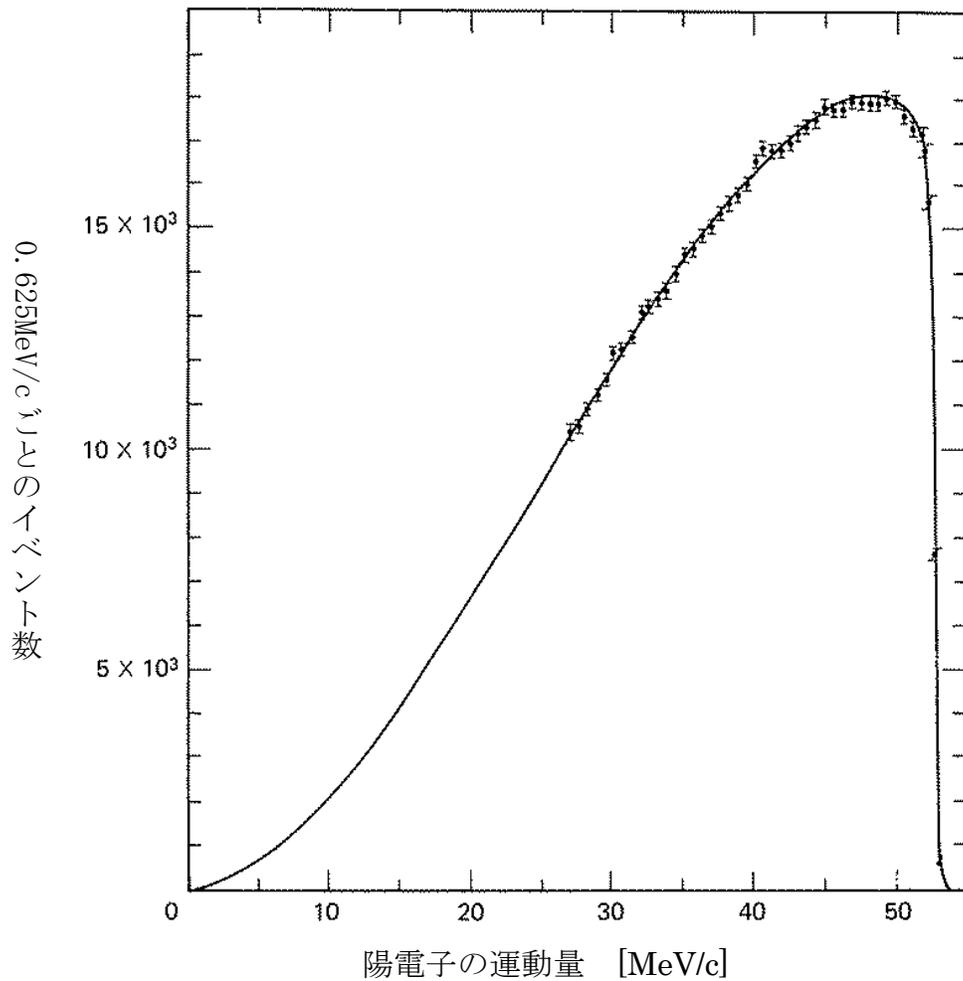


図 4.2: μ 粒子崩壊時の電子のエネルギー分布
(電子の質量エネルギーを無視した場合)

4.4 光電子増倍管 (Photomultiplier)

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。

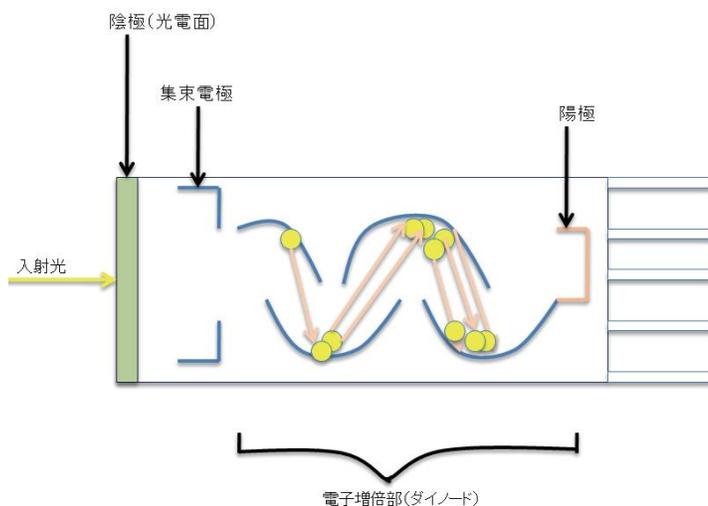


図 4.3: 光電子増倍管模式図

4.5 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ス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ある(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。

4.6 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。

第5章 セットアップ

5.1 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。

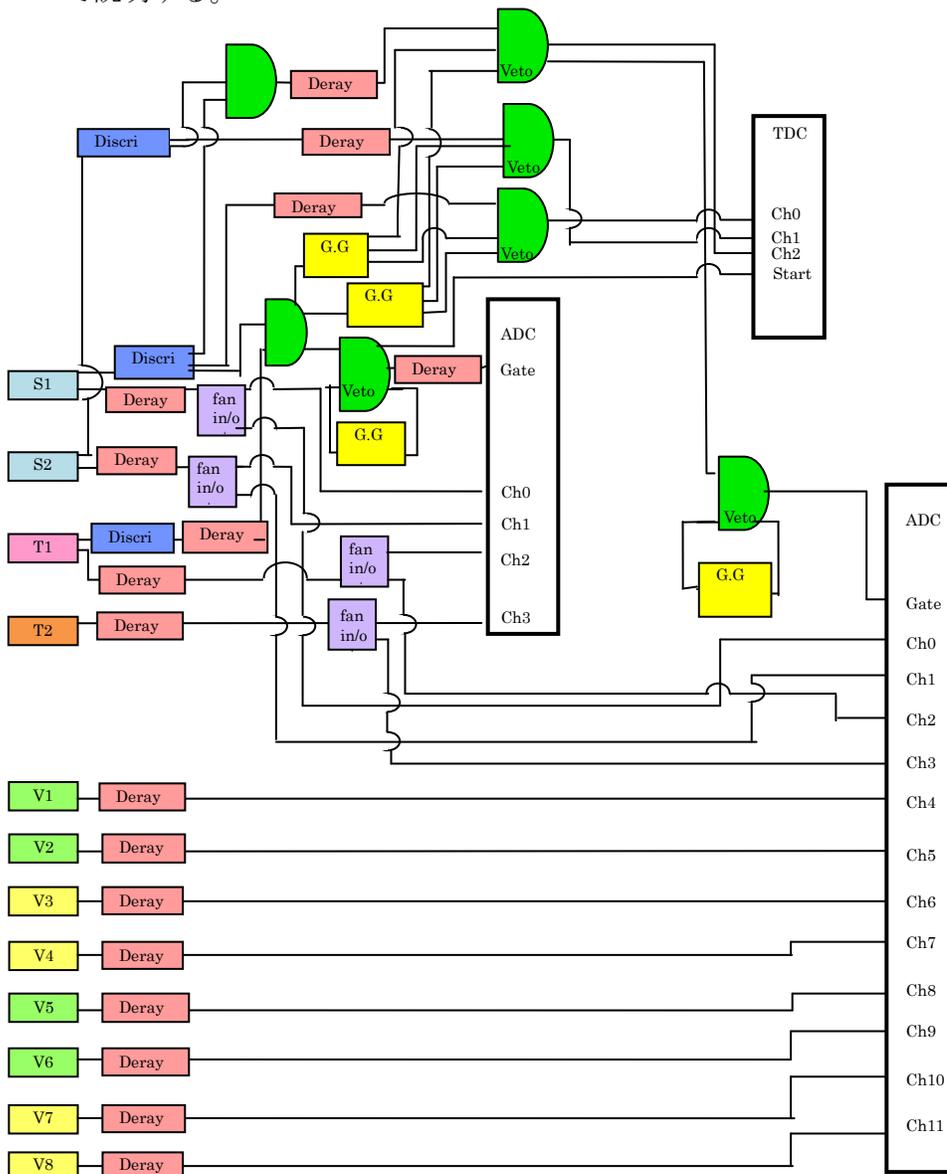


図 5.1: セットアップ図

5.1.1 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。

5.1.2 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内で崩壊した μ 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。

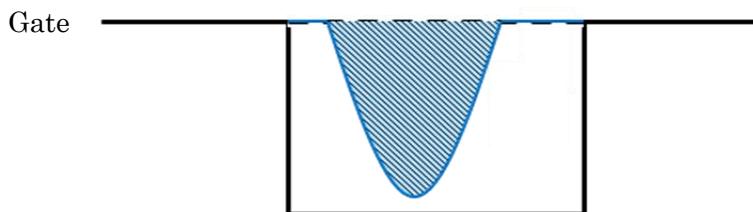


図 5.2 : ADC のしくみ

- 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。

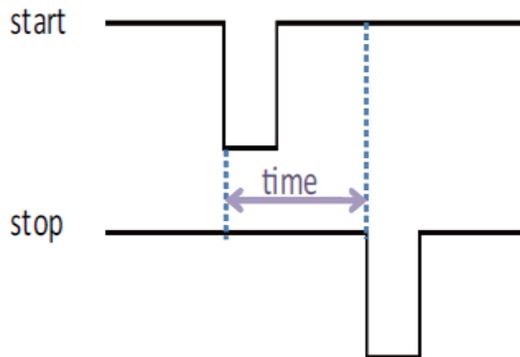


図 5.3 : TDC のしくみ

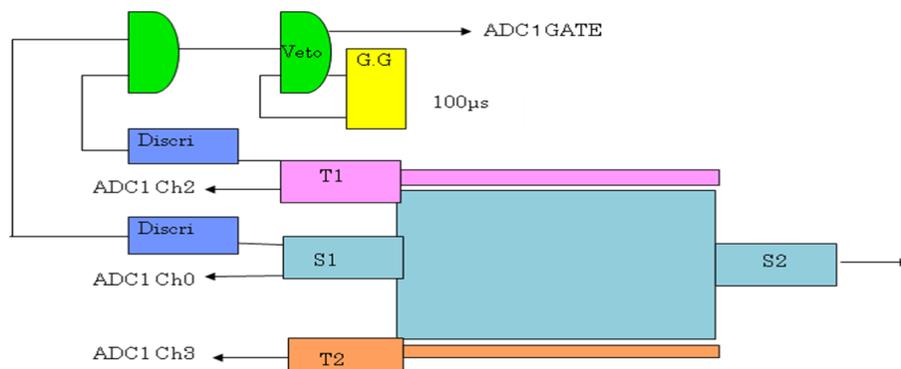
5.1.3 各 CAMAC モジュールについてのセットアップ

以上のモジュールを組み合わせたものが図 5.1 のセットアップ図であるが、このセットアップを使って行っている測定は

- (1) μ 粒子のエネルギーの測定
 - (2) 電子のエネルギーの測定
 - (3) μ 粒子が入射してから電子が放出されるまでの時間の測定
- の3つである。

この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に示す。

(1) ADC1 (μ 粒子のエネルギー測定用 ADC) のセットアップ



T1, S1 のコインシデンスで Gate を作り、T1, T2, S1, S2 を通過した μ 粒子のエネルギーについて測定する。

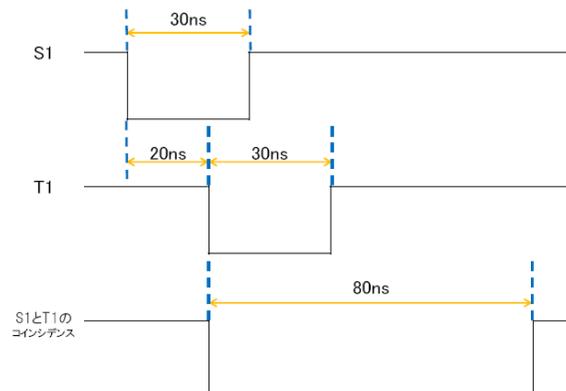
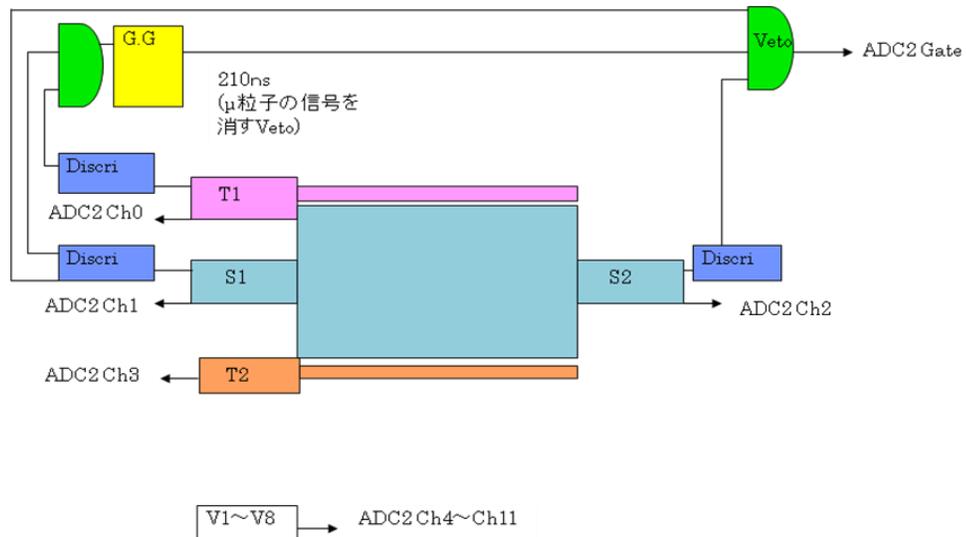


図 5.3: S1 と T1 のコインシデンス

(2) ADC2(電子のエネルギー測定用 ADC)のセットアップ



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

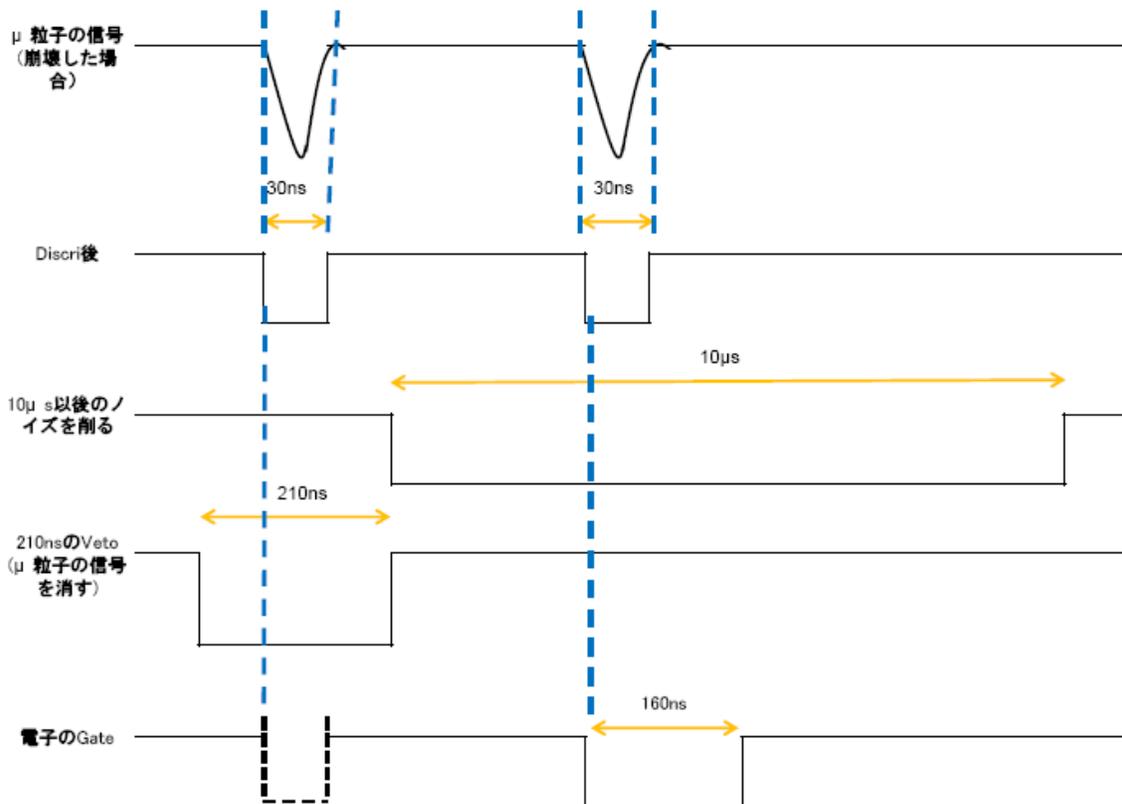
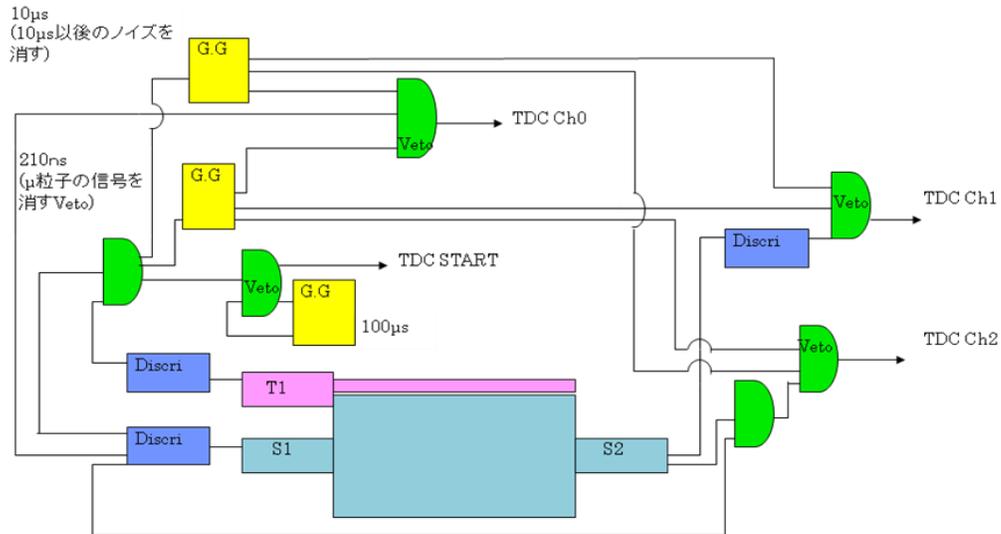


図 5.4: 電子の Gate

(3) TDC (μ 粒子入射から電子放出までの時間測定用) のセットアップ



T1, S1 のコインシデンスを START 信号とする。STOP 信号は Ch0 が S1, Ch1 が S2, Ch2 が S1 と S2 のコインシデンスである。STOP 信号にはそれぞれ μ 粒子の信号を取り除くために T1, S1 を μ 粒子が通過した時出す μ 粒子の信号を使い、210ns の Veto と $10\mu\text{s}$ 以上のノイズを消す Gate とした。

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、ディスクリミネーターを用いたあとのThreshold、Widthを以下のようにまとめる。

| カウンター | PMT 型番 | HV (V) | Threshold(mV) | Width(nsec) |
|-------|---------|--------|---------------|-------------|
| S1 | H1161 | 2250 | 550 | 30 |
| S2 | H1161 | 2010 | 550 | 30 |
| T1 | H1161 | 2000 | 700 | 30 |
| 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 シンチレーションカウンターのセットアップ

5.3.1 シンチレーションカウンターの配置

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。

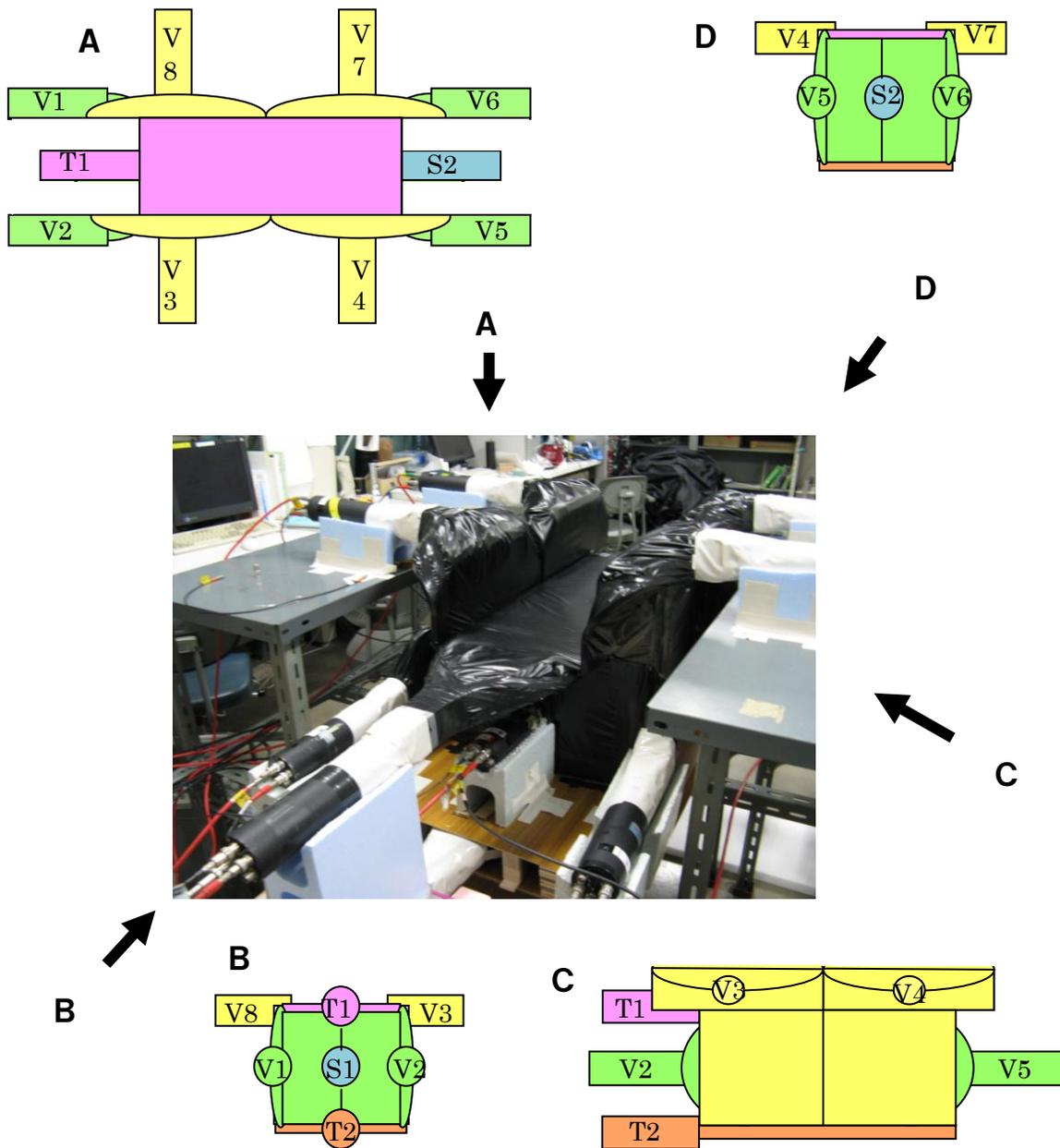


図 5.3：セットアップ後のシンチレーションカウンターの写真と各方向から見た概略図

5.3.2 シンチレーションカウンターの形状

以下の図5.4～図5.8は各PMTとシンチレーターの様子を模式的に表したものである。

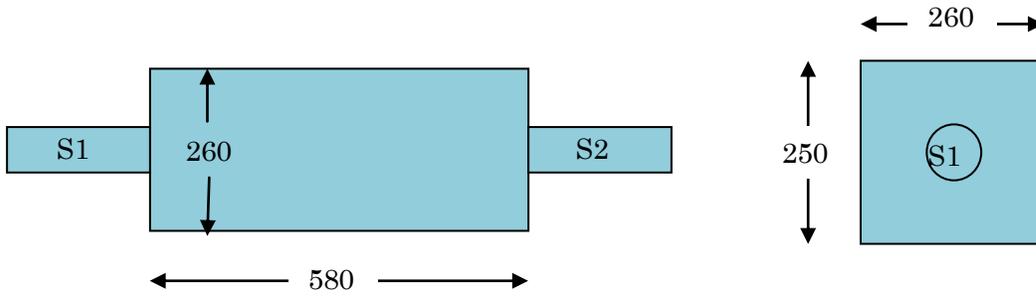


図 5.4 : S1, S2
 右:C の方向から見た図
 左:B の方向から見た図

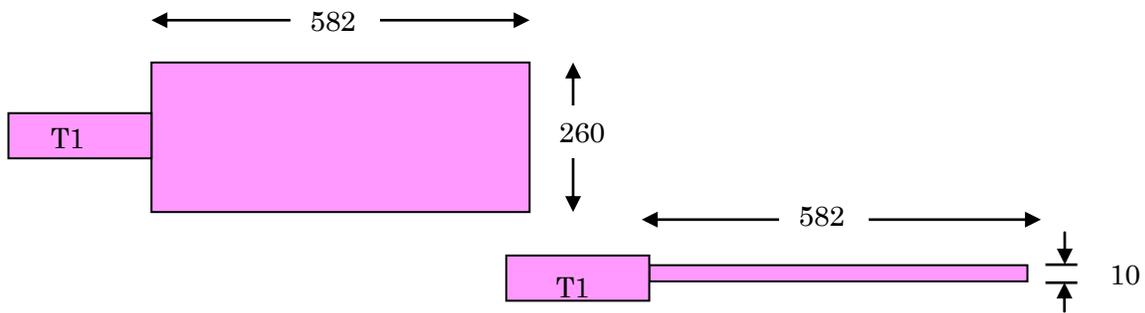


図 5.5 : T1
 右:A の方向から見た図
 左:C の方向から見た図

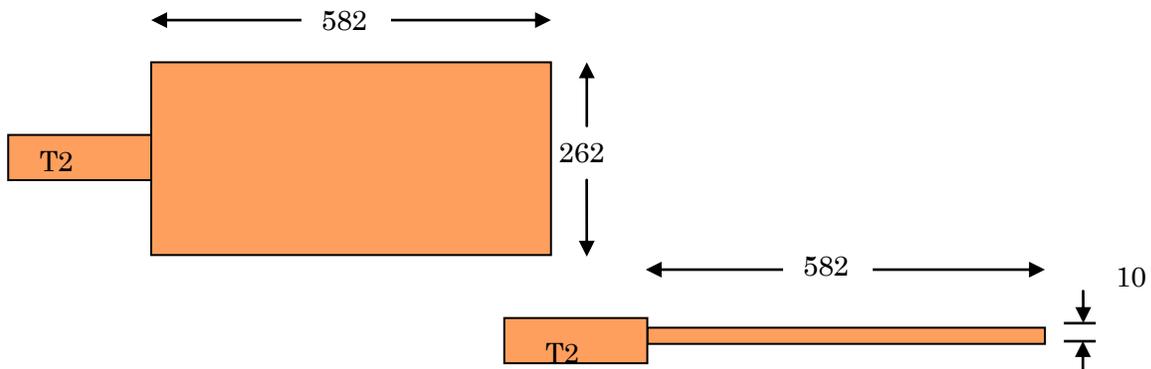


図 5.6 : T2
 右:A の方向から見た図
 左:C の方向から見た図

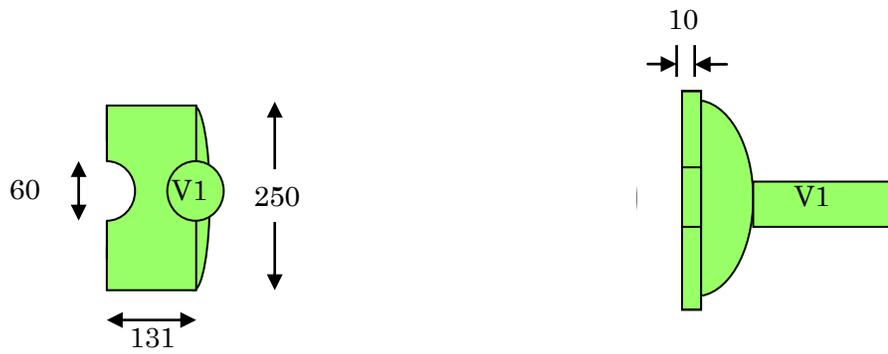


図 5.7 : V1, V2, V5, V6
 右: B の方向から見た図
 左: C の方向から見た図

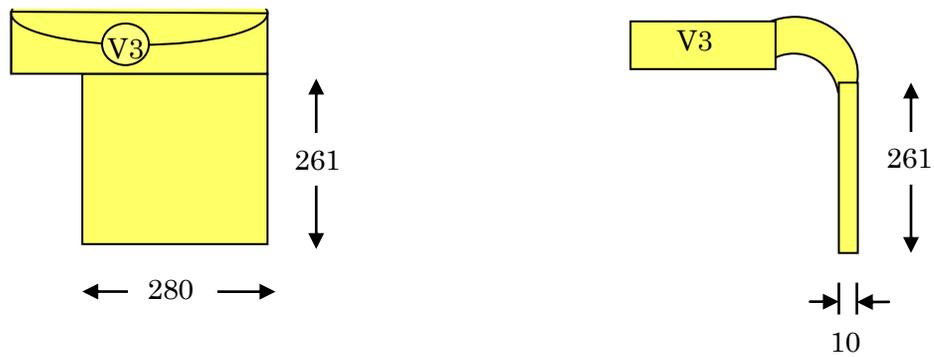


図 5.8 : V3, V4, V7, V8
 右: C の方向から見た図
 左: B の方向から見た図

※単位はすべてmm。

5.3.3 トリガーカウンター

宇宙線である μ 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 μ 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、 μ 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。

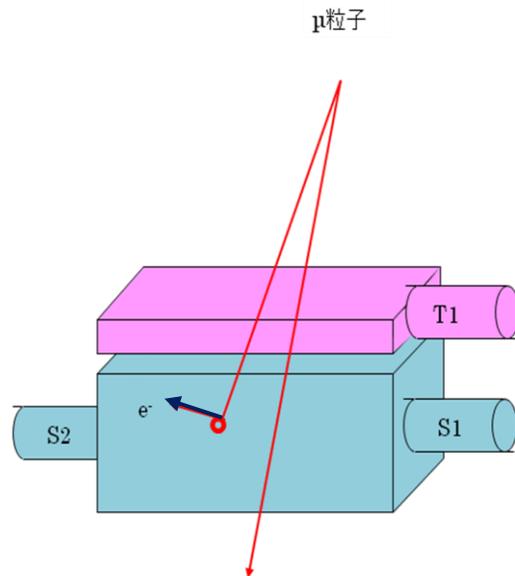


図 5.9: トリガーカウンターの模式図
図中の T1、S1 が同時に信号を出したときのみ μ 粒子がきたとする。

5.3.4 Vetoカウンター

μ 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 μ 粒子が通過したかを判断した。

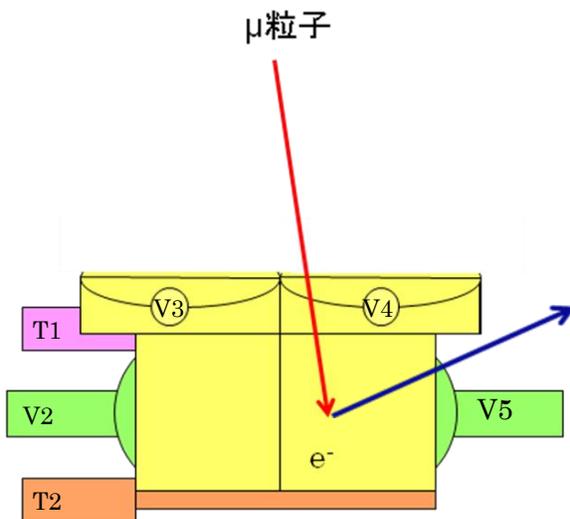


図 5.10: Veto カウンターの模式図
図中の T1、T2、V1~V2 は電子がきたかどうかを測定する。

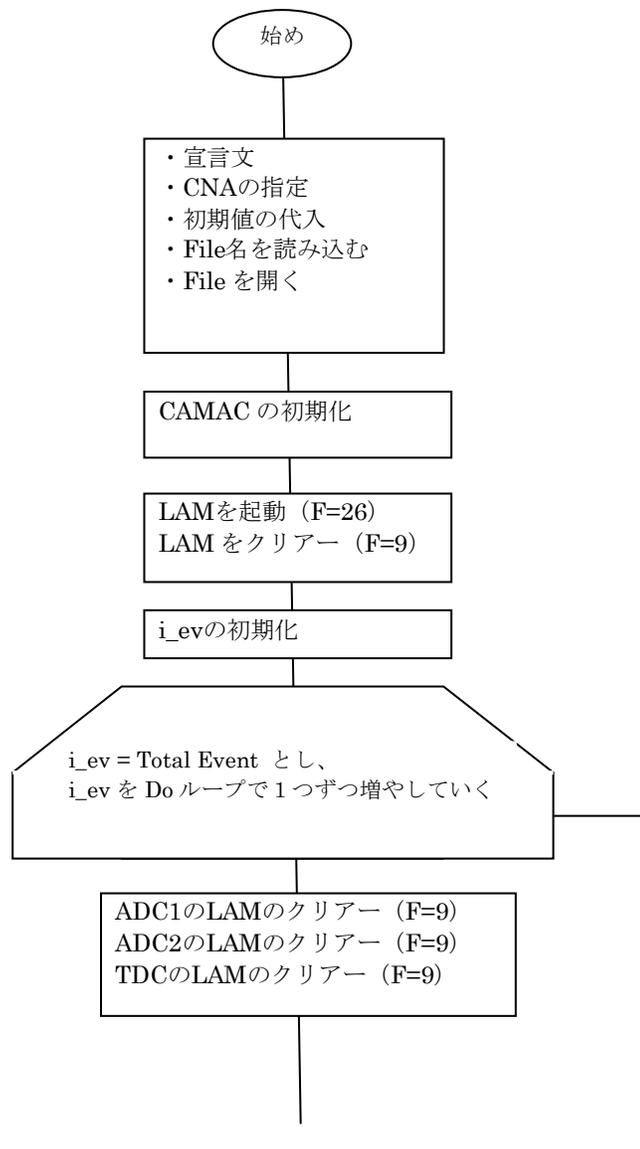
第6章 データ収集プログラム

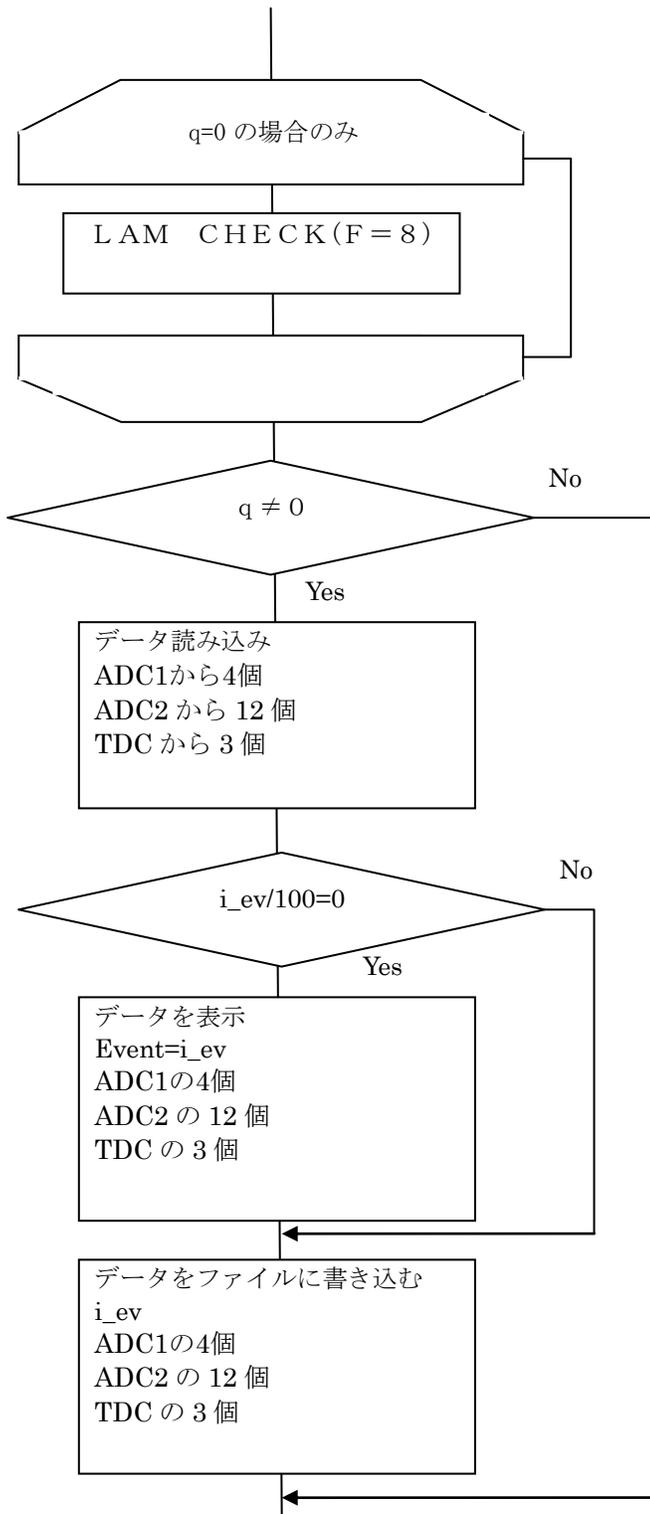
6.1 データ収集プログラム

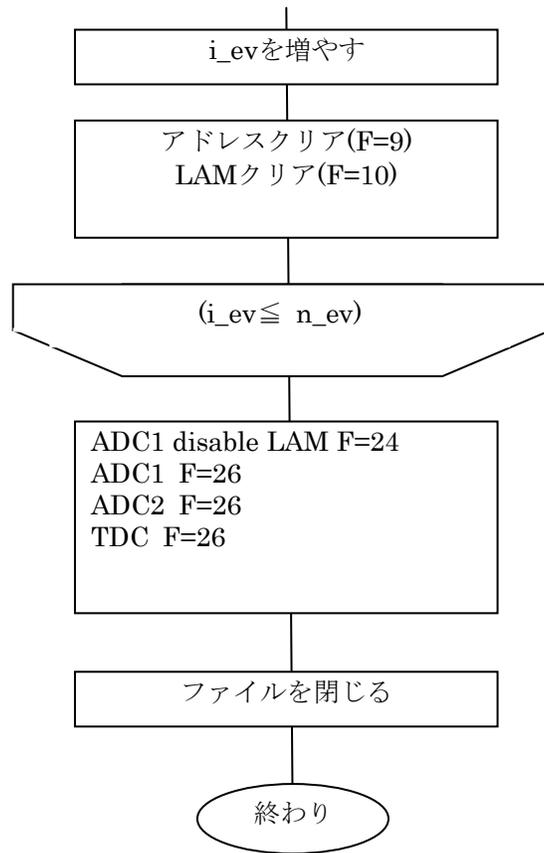
今回の実験では、CAMACからのデータ収集プログラムの言語にC言語を用いる。C言語を用いて、収集するイベントの個数を指定し、データを収集した。

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 全データ

今回の実験で得られたEvent数は

| | | |
|--------------------------------|---------|-------|
| 全Event数 | 5500000 | event |
| μ 粒子の崩壊と考えられるEvent数 | 35972 | event |
| 電子が全エネルギーを結晶内で放出したと考えられるEvent数 | 13822 | event |

7.2 Event選別

全データ中で今回使用するの「 μ 粒子の崩壊と考えられるEvent」と「電子が全エネルギーを結晶内で放出したと考えられるEvent」である。その数については上記のとおりだが、それぞれを選別した条件については以下の通りである。

7.2.1 μ 粒子の崩壊と考えられる条件

- (1) アクシデンタルなノイズでない。
- (2) μ 粒子が通過した。
 - ・ S1とT1のADC1 (μ 粒子のエネルギーを測定)のコインシデンスがONである。
 - ・ S1とS2のACD2 (電子のエネルギーを測定)のコインシデンスがONである。
- (3) μ 粒子が結晶内で崩壊した。
 - ・ T2のADC1の信号 < 200 (μ 粒子がT2を通過していない。)
 - ・ TDC < 4000 (TDCがオーバーフローしていない。)

7.2.2 電子が全エネルギーを結晶内で放出したと考えられる条件

- (1) アクシデンタルなノイズではない。
- (2) μ 粒子が通過した。
 - ・ S1とT1のADC1 (μ 粒子のエネルギーを測定) コインシデンスがONである。
 - ・ S1とS2のACD2 (電子のエネルギーを測定) のコインシデンスがONである。
- (3) μ 粒子が結晶内で崩壊した。
 - ・ T2のADC1の信号 < 200 (μ 粒子がT2を通過していない)
 - ・ TDC < 4000 (TDCがオーバーフローしていない。)
 - ・ S1とS2の電子のエネルギーのコインシデンスがONである。
- (4) 電子が全エネルギーを結晶内で放出した(電子が逃げていない)。
 - ・ すべてのVetoカウンターのADC2値がペDESTALである。

7.3 μ 粒子の寿命

(1) TDCのデータをExponentialでFitした結果は

$$y(t) = A \exp^{(-1/\tau)t} \quad (7.1)$$

という式で表される。この式の τ の値が寿命に対応しているので、 τ に1Countあたりの時間5nsecをかけると寿命を算出することができる。

このとき、式の $-1/\tau$ はFitしたときの図7.1の右図のスロープに対応する。そのため、fitを行うことにする。

解析に使用した結果はTDCのCh2(S1とS2のコインシデンス)のTDC値である。実験結果のヒストグラムは以下のようなになる。

TDC count全体は図7.1の左図になる。ntpleに貯めることができるのは約70000イベントなので、図7.1のサンプルは70000イベントである。ここでTDCの値のうち、TDC値が0のものを取り除くために130以下を取り除いた。また 20μ (TDC値4000)以上はTDCの性能が保障されておらず、オーバーフロー (START信号後、 20μ s以上信号が来なかったイベント) だと考えられる。左図からオーバーフローしたものを取り除くとヒストグラムは図7.1の右図のようになる。

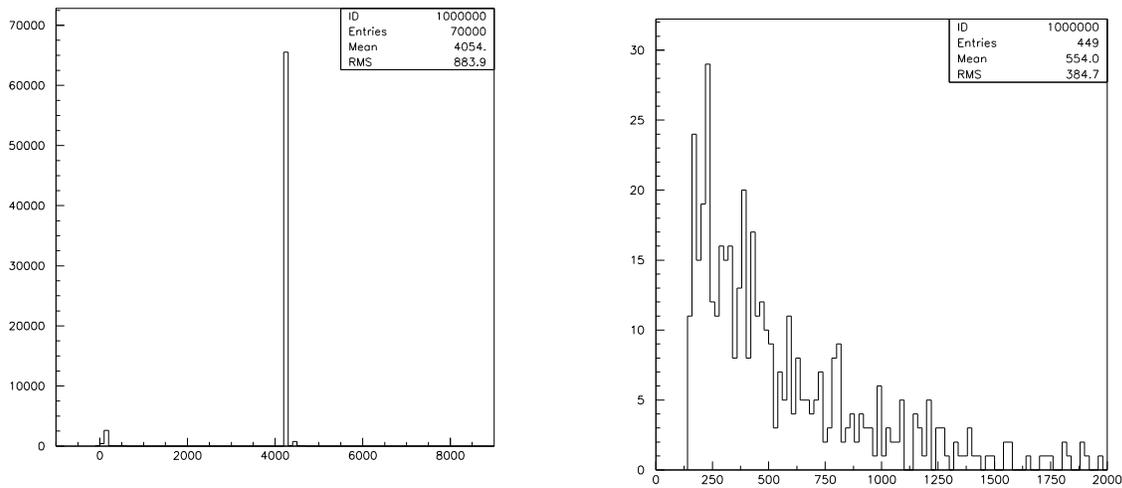


図 7.1 : TDC count(サンプル : 70000 イベント)

右図 : TDC count

左図 : 右図から TDC count<130,のイベントとオーバーフローしたイベントを取り除いたヒストグラム

さらにここで μ 粒子がシンチレーター内で崩壊した条件として μ 粒子がT2を通過していない ($T2ADC1 > 500$) という条件でCutをかけるその結果が図7.2である。

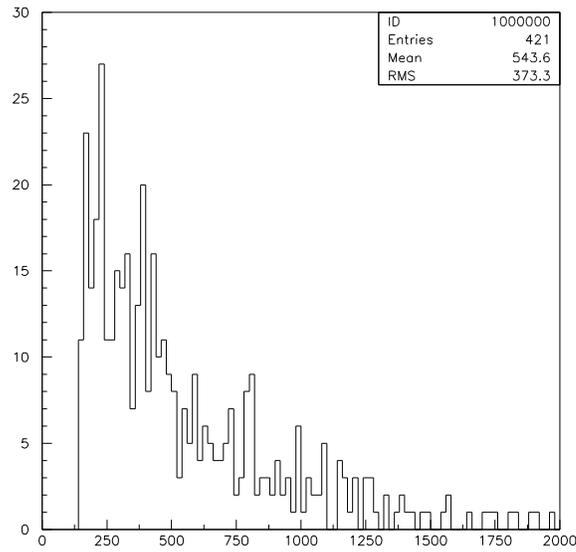


図 7.2: μ 粒子が通過したイベント
(fit の範囲: TDC count 130 以上 2000 以下)

以下に70000のサンプルイベントで各条件のイベント数をまとめておく。

| 条件 | イベント数 | 図 |
|---------------------------------------|-------|---------|
| なし | 70000 | 図 7.1 左 |
| TDC count > 150 | 67000 | |
| TDC count < 4000 | 3449 | |
| 150 < TDC count < 4000 | 448 | 図 7.1 右 |
| 150 < TDC count < 4000 & T2ADC1 > 500 | 421 | 図 7.2 |

ここで同様の処理(TDC count130以上4000以下)後のイベントをntpleに貯めることでより多くのサンプルを使用することができた。全データ5500000イベント中、この条件を満たすものは35972イベントであり、それを130以上4000以下の範囲でfitを行うと図7.3のようになる。

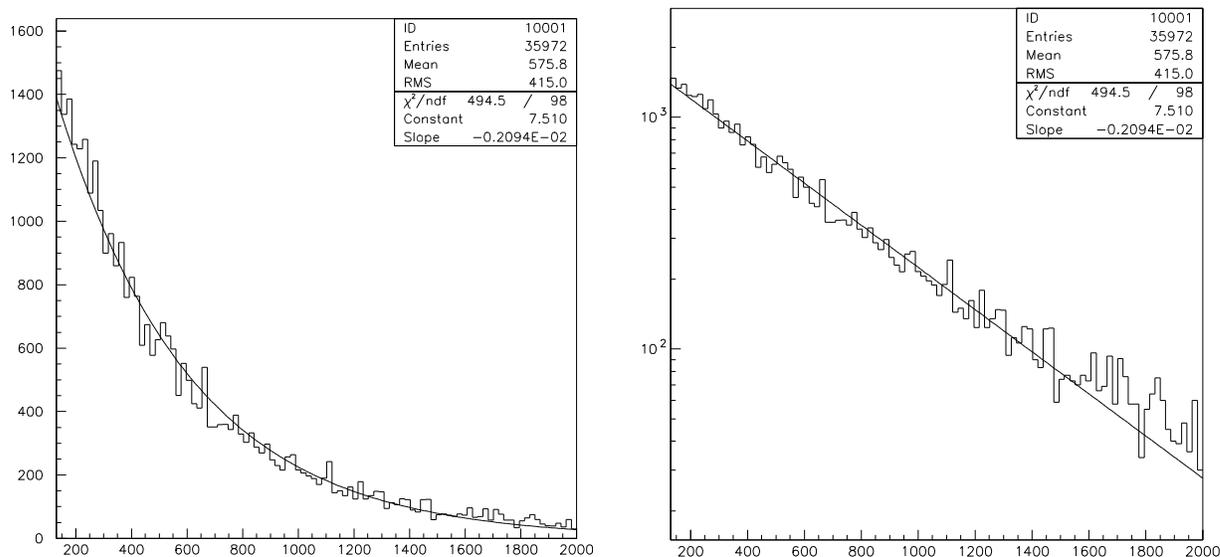


図 7.3: TDC を exp で fit した結果
(fit の範囲 : TDC count 130 以上 2000 以下)
右 : linear スケール 左 : log スケール

ここで図7.3よりSlopeは -0.2094×10^{-2} である。

ここから式 (7.1) より μ 粒子の寿命は

$$\tau = \frac{1}{0.2094 \times 10^{-2}} \times 5n$$

$$= 2.392 \mu\text{sec}$$

となる。

SlopeのErrorは 0.1629×10^{-4} であり、

誤差は

$$\delta\tau = \frac{1}{(0.2094 \times 10^{-2})^2} \times 0.1629 \times 10^{-4} \times 5n$$

$$= 0.018n\text{sec}$$

となる。

また、 χ^2/ndf は494.5/98であった。

よって、次にTDC count130以上1200以下でfitを行った。
それが次頁の図7.4である。

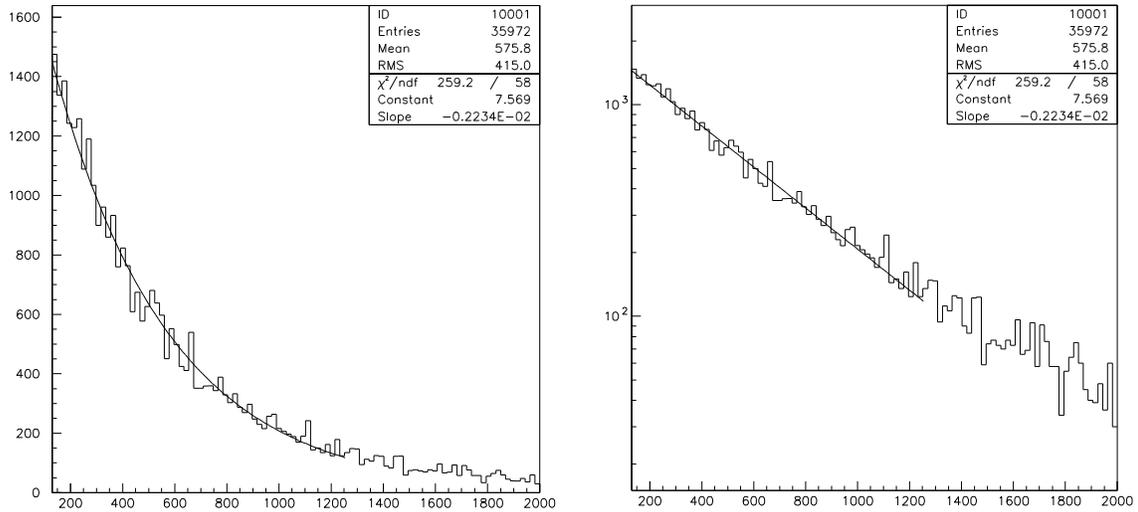


図 7.4: TDC を exp で fit した結果
(fit の範囲 : TDC count 130 以上 1200 以下)
右 : linear スケール 左 : log スケール

図 7.3 の fit のずれより fit の範囲を変更した。この範囲では linear、log とともに正しく fit 出来ている。

ここで図7.3より Slope は -0.223×10^{-2} である。
ここから式 (7.1) より μ 粒子の寿命は

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{1}{0.22335 \times 10^{-2}} \times 5n \\ &= 2.238 \mu\text{sec} \end{aligned}$$

となる。
Slope の Error は 0.23343×10^{-4} であり、
誤差は

$$\begin{aligned} \delta\tau &= \frac{1}{(0.22335 \times 10^{-2})^2} \times 0.23343 \times 10^{-4} \times 5n \\ &= 0.005 n\text{sec} \end{aligned}$$

となる。
また、 χ^2/ndf は 259.2/58 であった。
Particle Data Book に記載されている μ 粒子の寿命は、 $2.197019 \pm 0.021 \mu\text{sec}$ であるので、今回の実験結果はよく一致していると言える。

7.4 電子のエネルギー分布

電子のエネルギー分布は

$$y=b_1E^2(1-E/b_2)+b_3 \quad (7.2)$$

という式で表される。よって、電子のエネルギー分布のグラフは(7.2)式の形になることが予想される。

解析に使用した結果はADC2のCh1, Ch2の合計値である。
実験結果のヒストグラムは以下のようなになる。

ここでも μ 粒子の寿命の場合と同様に最初に70000のサンプルイベントで条件を確認した。図7.5の左図はその全ADC2countのヒストグラムである。このうちADC2 countが0付近のときは μ 粒子は来たが電子が来なかったイベントであると考えられるので、取り除く。同時に μ 粒子が崩壊して電子が放出された(TDC count0以上4000以下)という条件も加える。そのヒストグラムが図7.5の右図である。

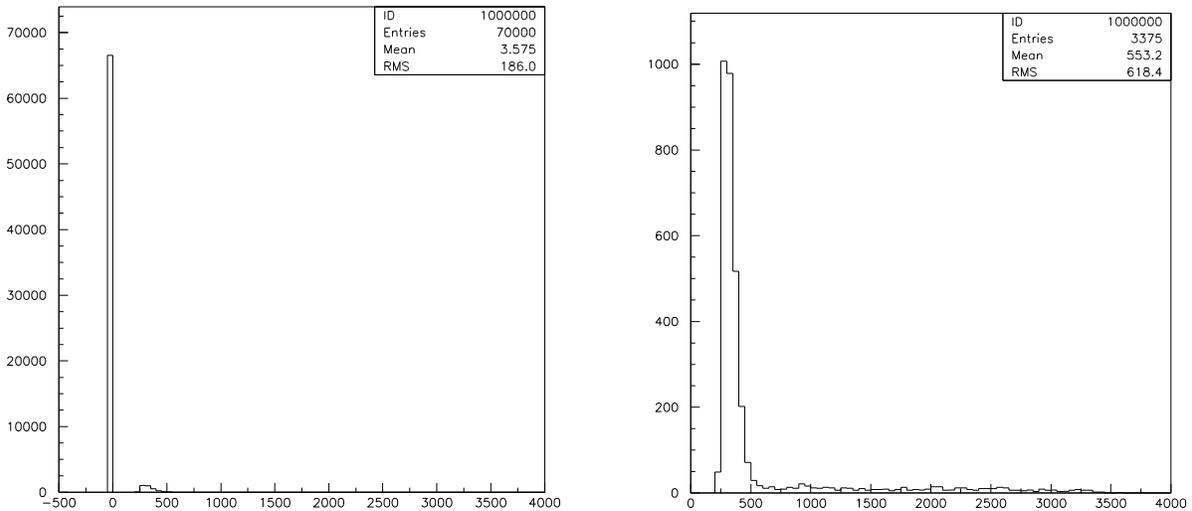


図 7.5: 電子のエネルギー分布(ADC2 count)
左 - S12 の全 ADC2 count 右 - 110 以上の ADC2 count
(TDC count 0 以上 4000 以下)

さらに電子が逃げた(T1, T2, V1~V8の全てが電子の信号を読み取った)場合のイベントも取り除いた。それが、図7.6である。

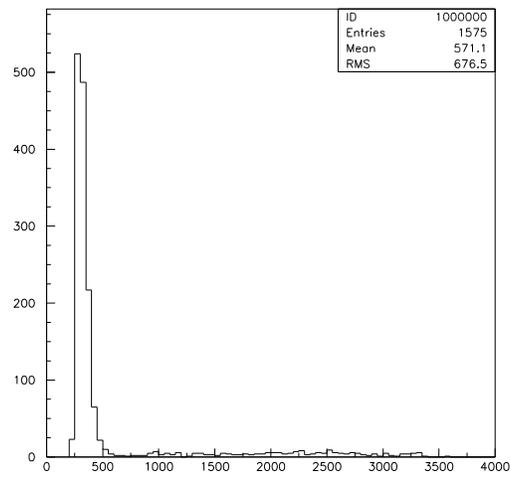


図 7.6: 電子のエネルギー分布(ADC2 count)
110 以上の ADC2 count(TDC count 0 以上 4000 以下)
& 電子が逃げていない

また図7.6の右図のTDC countが500以下のイベントに関してはスレッシュホルドで落としきれなかったノイズだと考えられる。よって今回の解析では取り除いた。その結果が図7.7である。

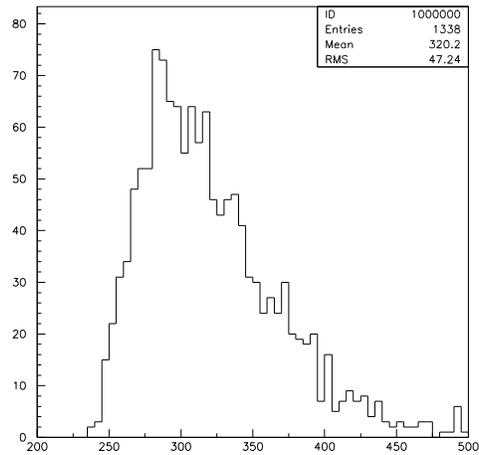


図 7.7: 電子のエネルギー分布(ADC2 count)
500 以上の ADC2 count(TDC count 0 以上 4000 以下)
& 電子が逃げしていない

以下に70000のサンプルイベントで各条件のイベント数をまとめておく。

| 条件 | イベント数 | 図 |
|---|-------|---------|
| なし | 70000 | 図 7.5 左 |
| $S12ADC2 > 110$ | 3457 | |
| $0 < TDC \text{ count} < 4000 \ \& \ 110 < S12ADC2$ | 3375 | 図 7.5 右 |
| $0 < TDC \text{ count} < 4000 \ \& \ S12ADC2 > 110 \ \& \ Veto$ | 1570 | 図 7.6 |
| $0 < TDC \text{ count} < 4000 \ \& \ S12ADC2 > 500$ | 1338 | 図 7.7 |

ここで全データ5500000イベントを同様の条件で処理し、式(7.2)でfitを行った。式(7.2)は0以上からピークまでの範囲を表す式である。よって、TDC countが2000までの範囲をfitした。の右図である。図7.8の左図は式から予想されるグラフである。

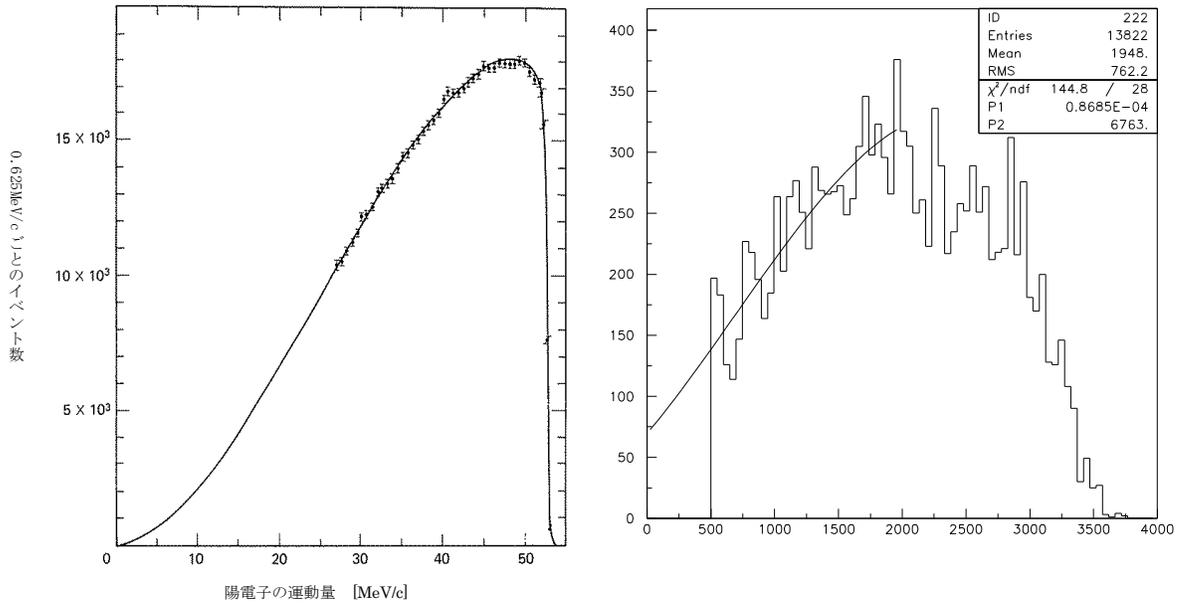


図 7.8: 電子のエネルギー分布
 左 - 式から予想されるグラフ 右 - 実験値から得られたグラフ(ADC2)
 (Fit の範囲 : TDC count 0 以上 2000 以下)

第8章 まとめ

8.1 粒子の寿命

今回算出した μ 粒子の寿命は $2.238 \pm 0.005 \mu \text{ sec}$ である。ここで、0.005は寿命の誤差を表している。

8.2 電子のエネルギー分布

(7.2)式から予想されるグラフと実験値から得られたグラフを比べると、形にかなりの差が見られた。

8.3 考察

8.3.1 粒子の寿命

Particle Data Bookに記載されている μ 粒子の寿命は、 $2.197019 \pm 0.021 \mu \text{ sec}$ であるので、今回の実験結果はよく一致していると言える。

今回、TDC count 1200以上のデータに関してはエラーが大きくなってしまい、fitの範囲から除外した。これはTDCのデータ解析時、プラスチックシンチレーター内で μ 粒子が崩壊したと判断する条件があまかったことが原因として考えられる。

今回Event選別で使用した条件はTDCの動作範囲とT2を μ 粒子が通過していない、という条件のみだった。しかし、この条件ではT1、S1を通過した μ 粒子がV1～V8のカウンターを通過して外に逃げたイベントを μ 粒子が崩壊したイベントから除くことができない。今後fittingをするためには、V1～V8のカウンターを通過した μ 粒子についてADC1でデータを集めること、そして、Event選別の条件に μ 粒子がV1～V8のカウンターを通過していないことを追加すべきであると考えられる。

8.3.2 電子のエネルギー分布

今回の実験で予想されていたグラフと実験結果のグラフに差が見られた原因は以下のように2つの範囲に分けて考えられる。

- ・ADC count 500以下の範囲：

電子のエネルギーは μ 粒子に比べて小さい。そのため、エネルギーの小さい範囲についても正確に測定することが必要である。しかし、今回、信号を増幅するためにAmpを使用すると波形が崩れるといった問題やPMTのHVの限界などがあり、これ以上増幅することはできなかった。そのため、ADC countの0と電子のエネルギーの0(質量エネルギーは除く)が一致せず、また、ADC countの小さいデータとノイズを分けることができなかった。

- ・ADC count 2000以上：

理論式上は電子のエネルギーが最大となる値以降は図4.2のように0となるはずである。しかし、今回の実験では、測定用のシンチレーションカウンターが大型であること、またそれぞれの実験器具のエネルギーの分解能が低いことなどが原因で数値上広がる結果となってしまった。

8.4 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 μ 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 μ 粒子の寿命測定』

8.5 謝辞

私たちの卒業研究のために、お忙しい中、熱心にゼミや日々の実験でのご指導をして下さった林井先生をはじめ、実験装置の相談にのり手伝って下さった宮林先生、励ましの言葉をくださった諸先輩方に心より感謝しております。この一年で学んだことを今後、活かしていけるよう努めていきます。本当にありがとうございました。

8.6 付録

付録の内容をここに示す。

P41～：データ収集プログラム(ele.c)

```

/***** 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 */
cfadc=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);
CGENZ();
CGENC();
CREMI();

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. */

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

return 0;
}

```