

2007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

高坂玲加 馳川香菜実

目次

第1章 はじめに

- 1,1 実験目的
- 1,2 実験課題
- 1,3 本論文の構成

第2章 宇宙線・ μ 粒子

- 2,1 宇宙線について
- 2,2 μ 粒子について

第3章 放射線計測の原理

- 3,1 電離損失
- 3,2 制動放射

第4章 測定原理

- 4,1 計測原理
- 4,2 μ 粒子の寿命算出
- 4,3 ADCについて
- 4,4 Qモード、Vモードでの μ 粒子の崩壊

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
- 5,2 シンチレーションカウンターのセットアップ

第6章 データ収集プログラムとCAMAC

- 6,1 CAMAC
- 6,2 データ収集プログラム

第7章 二つ山を探すプログラム

7,1 ピークを見つける

7,2 ノイズを除く

7,3 大きい山の後ろにできるオーバーシュート

7,4 ヒストグラムの作成

第8章 データ解析

8,1 全データ

8,2 FADC の時間間隔

8,3 μ 粒子の Event 選別

第9章 まとめ

9,1 μ 粒子の寿命

9,2 考察

9,3 参考文献

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に崩壊し、その過程で粒子はさまざまな寿命を持つことが分かっている。今回の実験ではCsIシンチレーターを用いて、地表にたどり着く μ 粒子を測定すること、またその結晶内で崩壊する μ 粒子を使って寿命を測定、解析することを試みる。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・CsIシンチレーター・光電子増倍管・FADCなどを用いて測定された電気信号を増幅し、AD変換上のデータ処理を行うことによって 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ことが今回の課題である。

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、そのデータを使つての解析、プログラムの説明などを組み込み、実験結果を述べていく。

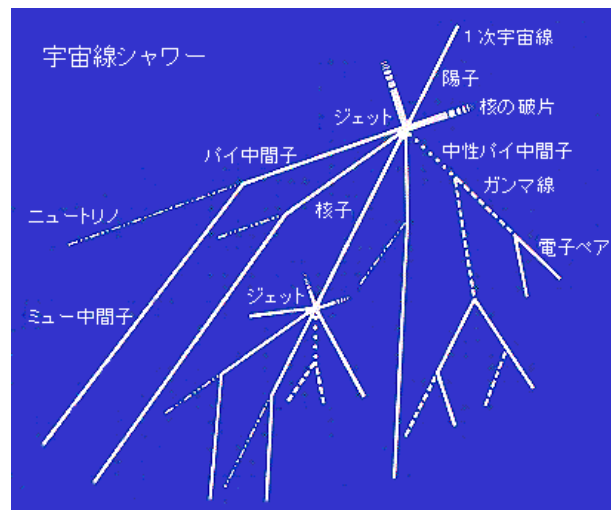
第2章 宇宙線・ μ 粒子

2, 1 宇宙線について

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（二次放射線）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、高エネルギーの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。

宇宙では、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な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、核反応を起こして放射性同位元素や π 中間子などの粒子を生成する。これらの宇宙線を二次宇宙線と呼ばれる。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 $(2.6030 \pm 0.0024) \times 10^{-8}$ 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、地上に来る大部分を μ 粒子とニュートリノが占めている。



2, 2 μ 粒子について

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’をすることによって生成される。 π 中間子には π^0 と π^\pm があり、 π^\pm は‘弱い相互作用’によって、ほぼ100%次のように崩壊する。

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

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。

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

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

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。今回はシンチレーターで粒子が崩壊するとエネルギーを失い発光し、その光を光電子増倍管で増幅させ電気信号に変えるという方法を用いている。

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、原子の電離(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(励起状態)になることもある。これを、原子、分子の励起(Excitation)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。

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi N_0 z^2 e^4 Z}{mv^2 A} \left[\ln \left(\frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)} \right) - \beta^2 \right] \text{ (Mev/g/cm}^2\text{)} \quad (3, 1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} m ; \text{電子の質量} \\ e ; \text{電子の電荷} \\ z ; \text{入射粒子の電荷} \\ v ; \text{入射粒子の速度} \\ Z ; \text{物質の原子量} \\ A ; \text{物質の原子量} \\ I ; \text{電離ポテンシャル} \\ N_0 ; \text{アボガドロ数}(6.02 \times 10^{23}) \\ \beta = \frac{v}{c} \end{array} \right.$$

電離損失 dE/dx は入射荷電粒子の質量には依存しなが、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。これは図の左の領域にあたる。この領域で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。図からも分かるように電荷が同じ粒子ならば、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、 $\beta^2 \cong 1$ となり、(3, 1)式の第2項が効くのでエネルギー損失は、

$$\frac{dE}{dx} \propto \log \left[\frac{\beta^2}{Z(1-\beta^2)} \right] \quad (3, 3)$$

となる。

電離・励起状態にある原子・分子が基底状態に遷移する時、二つに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(**Sintillation**)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

荷電粒子の中でも、電子は質量が小さいことと、物質中の電子と同じであることから、重い荷電粒子と扱いが異なる。

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、速度の時間変化、方向変化かなり受け、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 $(Z/m_e)^2$ 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。この論理式は次式のようになる。

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

$$\left[\begin{array}{l} N ; \text{物質の単位体積中の原子数} \left(N = \frac{N_0 \rho}{A} \right) \\ E ; \text{入射電子のエネルギー} \\ r_e ; \text{電子の古典半径} \\ A ; \text{物質の原子量} \\ N_0 ; \text{アボガドロ数} (6.02 \times 10^{23}) \\ \rho ; \text{物質の密度} \end{array} \right.$$

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 X_0 を放射長(radiation length)という。(2, 4)式より、

$$-\frac{dE}{E} = \frac{dx}{X_0}$$

となるので、 X_0 を求めることができる。

いま CsI シンチレーターのエネルギーロス

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

で求めることができる。

ここで

$$\frac{dE}{dx} = 1.243$$

$$\rho = 4.53$$

であるので CsI シンチレーターの 1 cm あたりのエネルギーロスは

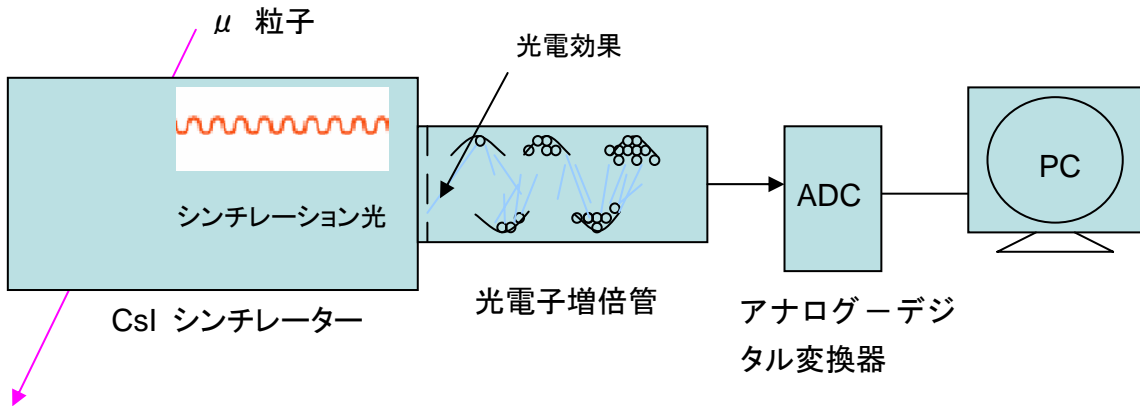
$$\Delta E = 1.243 \times 4.53 \times 1 = 5.63 \text{ MeV}$$

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、どうにかして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 を用いてデジタル信号に変換し解析をおこなう。



4, 2 μ 粒子の寿命の算出

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。 λ は粒子の年齢とは無関係である。(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と、

$$\begin{aligned}
\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} &= -\lambda \int_{t_0}^t dt \\
[\ln N]_{N_0}^N &= -\lambda [t]_{t_0}^t \\
\ln N - \ln N_0 &= -\lambda(t - t_0) \\
\ln \frac{N}{N_0} &= -\lambda(t - t_0) \tag{4, 2}
\end{aligned}$$

$t_0 = 0$ 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。

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \tag{4, 3}$$

この N 個の粒子はそれぞれ、 t よりも短い寿命を持っていることになる。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絶対平均数は、平均として $N \lambda dt$ であり、これらの粒子は時間 t だけ存在する。 N_0 個すべての粒子の生存時間の和 L は $t N \lambda dt$ の $t=0$ から $t=\infty$ までの積分であり、(4, 4) 式で与えられる。

$$\begin{aligned}
L &= \int_0^{\infty} t N \lambda dt \\
&= \int_0^{\infty} t N_0 \lambda e^{-\lambda t} dt \\
&= N_0 \lambda \left[\frac{1}{\lambda^2} \right]_0^{\infty} \\
&= \frac{N_0}{\lambda} \tag{4, 4}
\end{aligned}$$

よって、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。

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{1}{\tau} \tag{4, 5}$$

これを (4, 3) 式に代入すると、

$$N = N_0 e^{-t/\tau} \tag{4, 6}$$

が得られる。

この式を用いて μ 粒子の寿命を測定する。

ここで、 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崩壊すると電子になるので、電子になるまでの 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 を算出する。

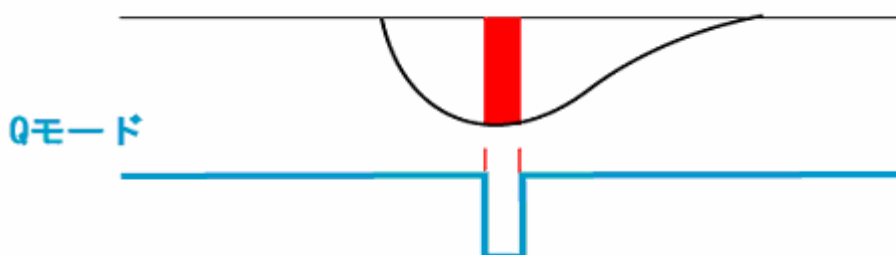
4, 3 ADC について

シンチレーターから来た光はアナログ信号のためそのままでは解析できない。そこで、ADC(アナログ・デジタル回路)を用いる。ADC は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のことである。

今回の実験では、ADC(Q モード、V モード、FADC)を用い、CsIシンチレーター内で崩壊した μ 粒子から来る信号を数値化して解析を行う。

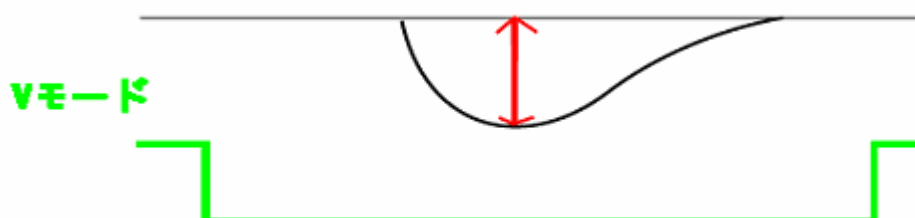
- ・ Q モード(荷電積分型 ADC)

GATE パルスが持続している間の信号を時間積分するモード



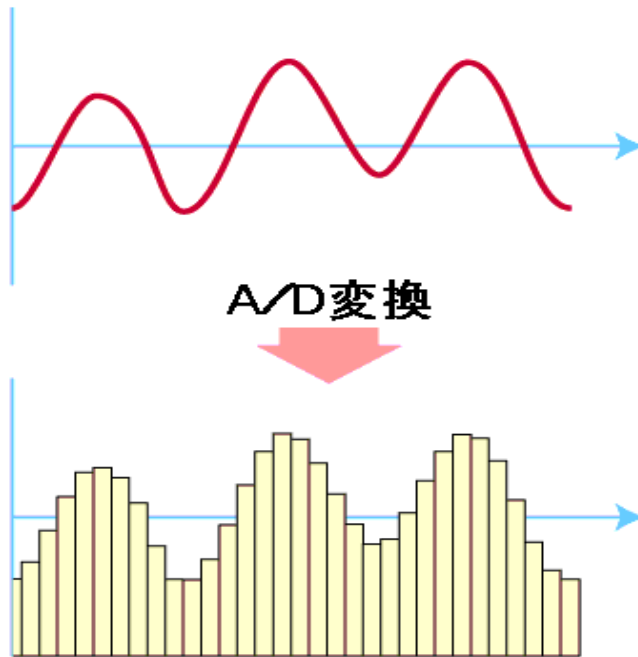
- ・ V モード(ピークホール型 ADC)

GATE パルスが持続している間のピーク電圧を数値化するモード

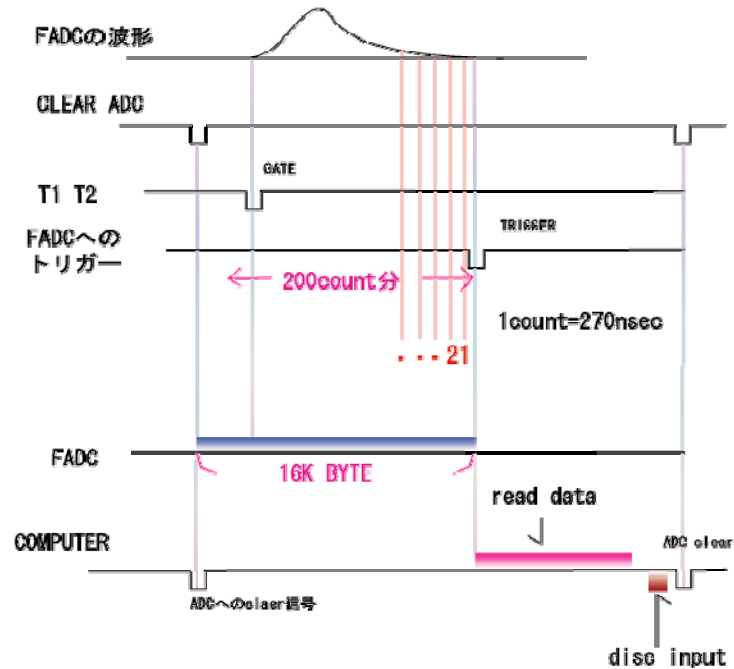


- FADC(フラッシュ ADC)

時間ごとに波高を測定するモードである。FADCは通常のADCに比べて、 \yen A-D変換速度が極めて速いので、時系列データを読み込むことが可能となり、信号の波形を細部まで観測することができる。

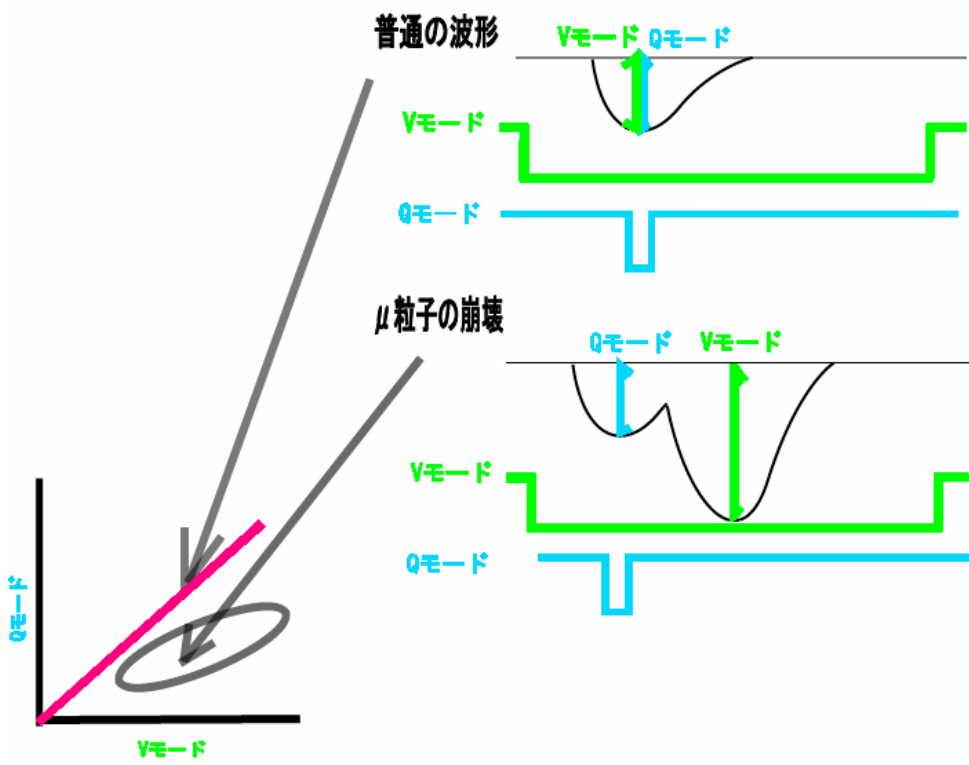


FADCには **start** モードと **stop** モードがあり、FADCのモジュール内で切り換えることができる。今回の実験では **stop** モードを使用した。波形の終わった所からさかのぼり、後ろから設定した時間ごとにシグナルの高さをプロットしていく。(下の図は設定時間が **270nsec** の場合)



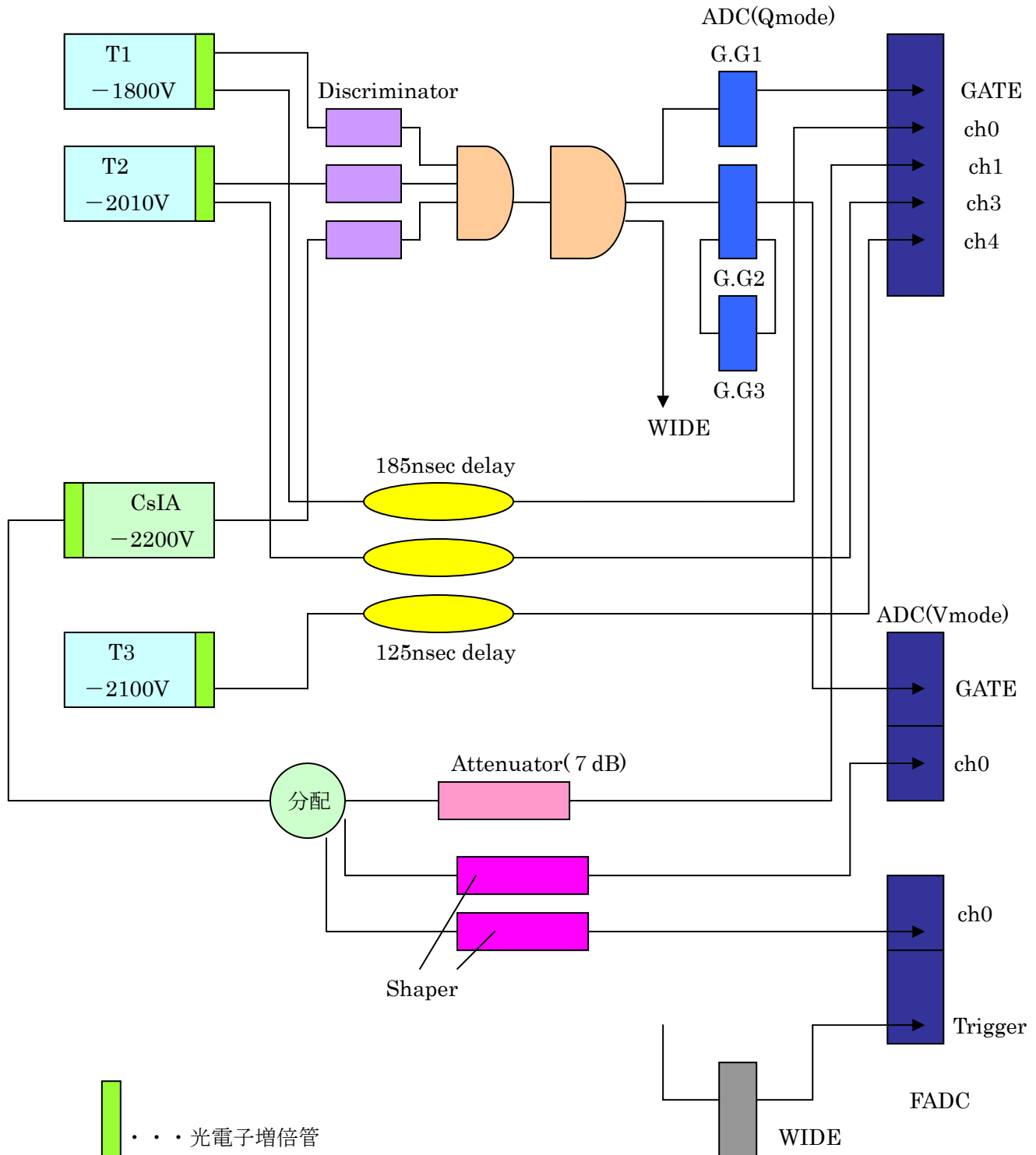
4, 4 Qモード、Vモードで見る μ 粒子の崩壊

μ 粒子が崩壊することなくシンチレーターを通過する時のエネルギー損失は、Qモード、Vモードで二次元プロットすると比例関係になる。一方、 μ 粒子が崩壊せず通過すると波形が一つ山になるので、QモードとVモードで同じ波形を測定することになる。しかし、 μ 粒子が崩壊すると波形が二つ山になるので、前の山が後ろの山よりも低い場合、QモードとVモードで異なった波形を測定することになる。したがって、 μ 粒子が崩壊すると、QモードとVモードの比例関係からは外れるものもあり、この比例関係から外れたイベントが μ 粒子の崩壊である可能性がある。



第5章 セットアップ

5.1 エレクトロニクスセットアップ



今回の実験では上図のような配線を組み、イベントを収集した。それぞれ用いた装置について説明する。

(1)シンチレーションカウンター(scintillation counter)

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である。シンチレーターに粒子が入射すると、ある波長の光が放出される。この光を光電子増倍管で電気信号に変換すると、放射線検出器として働く。

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。今回の実験では、前者のプラスチックシンチレーターと後者の CsI シンチレーターの二種類を用いる。

・プラスチックシンチレーター (T1,T2,T3)

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)。時間分解能が高いことを利用し、今回の実験では、トリガーカウンターとして、使用する。

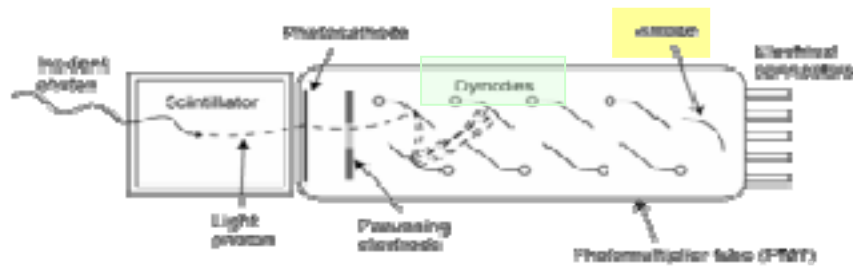
・CsI(T1)シンチレーター

入射粒子のエネルギーに応じて光り、そのエネルギー損失が1つの数値として光電子増倍管で増幅され、コンピューターで読み込まれる。プラスチックシンチレーターに比べてエネルギー分解能が高ので、トリガーカウンターの近くに置き、粒子のエネルギーを復元する。

(2)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付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。真空管の中で電極に高電圧をかけて電子を加速すると。飛び出した電子がダイノード(Dynode)に衝突し、ダイノードがいくつかの電子を放出する。この放出された電子は、次のダイノードとの間にかかる電場によって加速され、次のダイノードに衝突し、より多くの電子を放出される。これを繰り返すことで電子を倍増する。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。



(3) 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)波を出力する装置。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。

(4) コインシデンス(coincidence)

コインシデンスは複数のパルスが時間的に重複して入力された時にパルスを出力する。今回の実験では、 $T1, T2$ 同時に信号がきた時に信号がでるようにした。

(5) ゲート・ジェネレーター(Gate and delay Generators)

入力信号に対して、最小で $110nsec$ から最大で $4.0sec$ までの範囲で **delay** させたり、パルス幅を調整するためのものである。

(6) アテニュエーター (Attenuator)

ADC が読み取れる範囲にするため、入力信号を減衰させる装置。単位は **dB**。

$$dB = -20 \log_{10} \frac{V_{in}}{V_{out}}$$

V_{in} ; 入力信号の波高
 V_{out} ; 出力信号の波高

(7) シェイパー (Shaper)

波形整形をするためのもので、FADC が読み込みやすいように立ち上がり、立ち下がりを長くする。

(8) ADC (アナログ・デジタル変換回路)

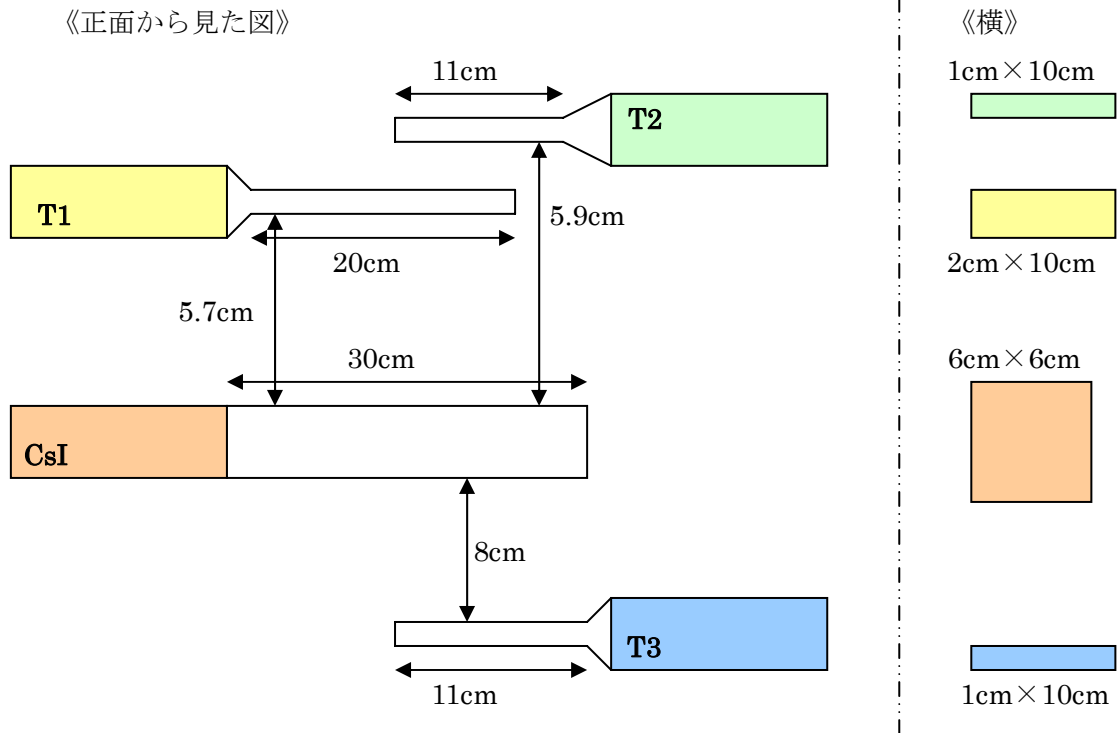
アナログ電気信号をデジタル電気回路に変換する電子回路のこと。今回の実験では **Q** モード、**V** モード、FADC を用いる。

(9) エレクトロニクスの設定

今回の実験では、それぞれの設定を以下のように決定し、測定を行った。

	HV (V)	Threshold (mV)	Width (nsec)
T1	-1800	150	40
T2	-2010	150	40
T3	-2100	150	40
CsI	-2200	150	40

5, 2 シンチレーションカウンターのセットアップ

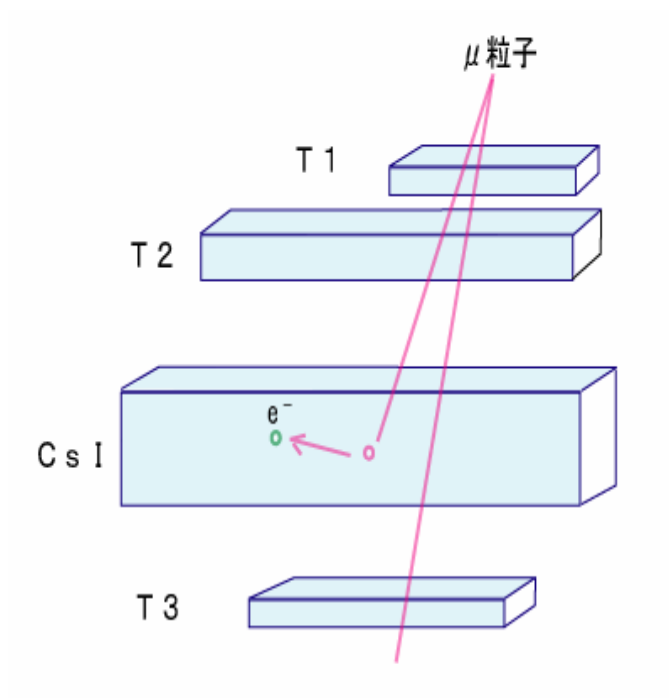


今回は上図のように、プラスチックシンチレーター(T1,T2,T3)と CsI シンチレータを配置し、実験を行った。

(1) 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。CsI(TI)にはあらゆる方向から μ 粒子が入射してくる。そのため、CsI(TI)中で μ 粒子が崩壊したかどうか難しい。そこで、T1,T2をCsI(TI)の上に置き、T3を下に置くことで、CsI(TI)にHitの条件を与える。そうすることによって、余分なデータが削られ、必要とするデータのみを取り出すことが可能となる。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,T2,CsIのコインシデンスをON、T3をOFFにして測定する。また、T1,T2をトリガーカウンターとして使用する。



第6章 CAMAC と データ収集プログラム

6, 1 CAMAC (computer aided measurements and control)

CAMAC はモジュール化されたデータを処理するシステムで、世界中のほとんどの物理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 は計算機周辺でのデジタル化された情報の処理を各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ングイン・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。この情報はプラングインの中で処理されると、裏面のプリント基板エッジを利用したコネクタでクレートと呼ばれるプラン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。プラングイン・ユニットは回路配線に使われたプリント基板自身のエッジが 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、アドレスの指定であり、CNAF で指定する。

C ; crate controller の数。今は crate は 1 つだけ使っているので、C=1

N ; station number

A ; subaddress;モジュール内のアドレス。ADC においては 12 個の信号を読める。

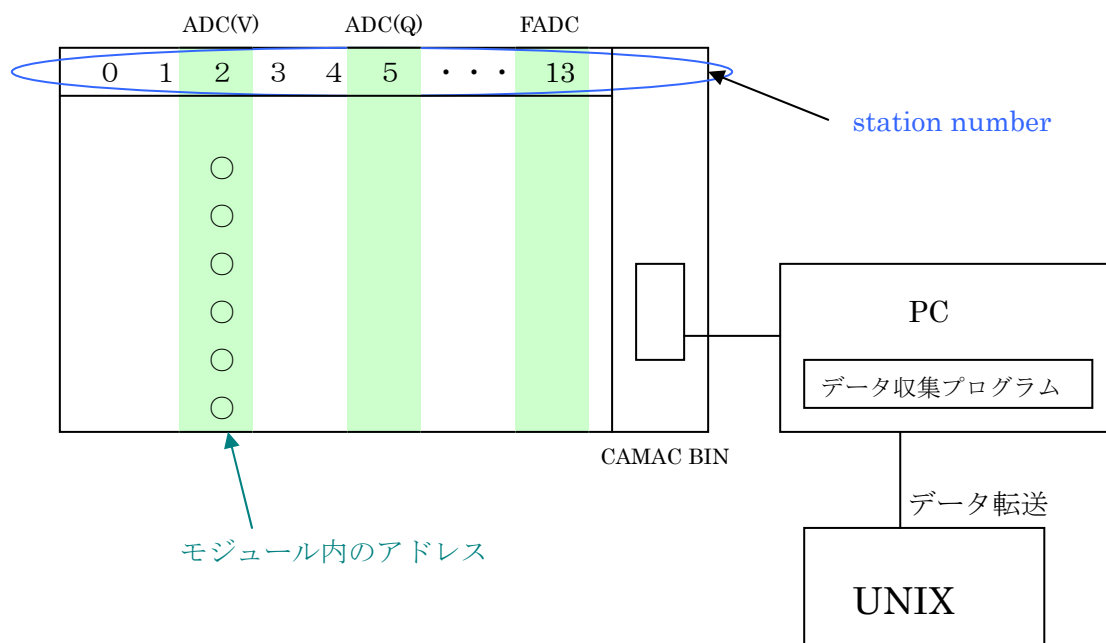
F ; function;コンピューターからの命令。

LAM;Look At Me のこと。LAM がたつと ADC から computer にデータが送られ、computer がモジュールのデータを読み込むことができるようになる。

F(0),F(2) ; Read Data
F(8) ; Test LAM
F(9) ; Clear LAM

F(24) ; Disable LAM

F(26) ; Enable LAM



6, 2 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 Microsoft Visual Basic.NET を用いる。Visual Basic では、ボタンやメニューなどといったアプリケーションを作成するのに必要な部品やそれらを機能させるための処理があらかじめ用意されている。アプリケーションの開発者はそれらをどう組み合わせるか、を考え、必要最低限の処理を記述するだけで簡単にプログラムを完成することができる。

Visual Basic の中でも最新バージョンである .NET では、より効率的にプログラムを開発できるように機能が拡充されている。

この Visual Basic 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。

<データ収集プログラム>

Friend Class Form1

・宣言文

<Timer1_Tick>

- ・ CNAF の指定
- ・ 初期値の代入、Text Box への書き込み

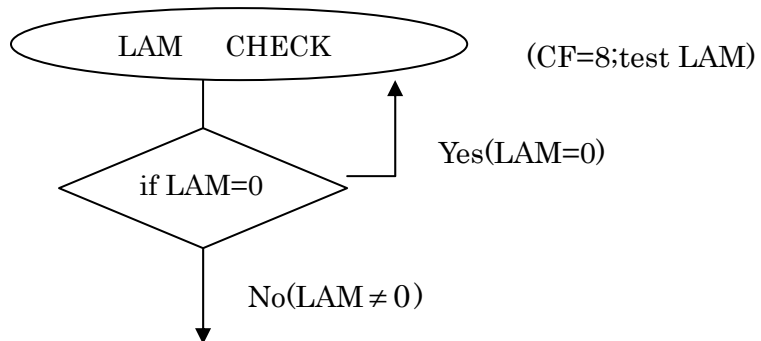
<Button1_Click>

- ・ File 名を Text Box9 に入力
- ・ File 名を読み込む
- ・ File を開く
- ・ 入力された値を読み込む (初期値から変更のある場合)

i の初期化

Do ループ

- ・ $i = \text{Total Event}$ とし、 i を Do ループで1つずつ増やしていく
- ・ アドレスクリア (CF=9 ; clear module and LAM)
- ・ LAM のクリア (CF=10 ; clear LAM)



- ・ データの読み込み
(CF= 2 ; Read registers and clears module and LAM)

・出力

・ Nrec の初期化

FADC 読み出し Do ループ

Nrec はイベント一つにつき読み込んだ値

・ Nrec は一つずつ増やす

・ Nrec > 32099 ならば Do ループを出る

➡ 1 シグナルで読み込める値の最大は 32100
それより多い値を読みこむデータはおかしいの
で、Cut を入れる

・ データの読み込み

・ 読み終わってから 200 個前までの分のみ印刷

・ LAM の Clear

・ i を 1 ずつ増やしてループをまわす

・ もし、`interapt <> 0` ならばループ終了

・ ファイルを閉じる

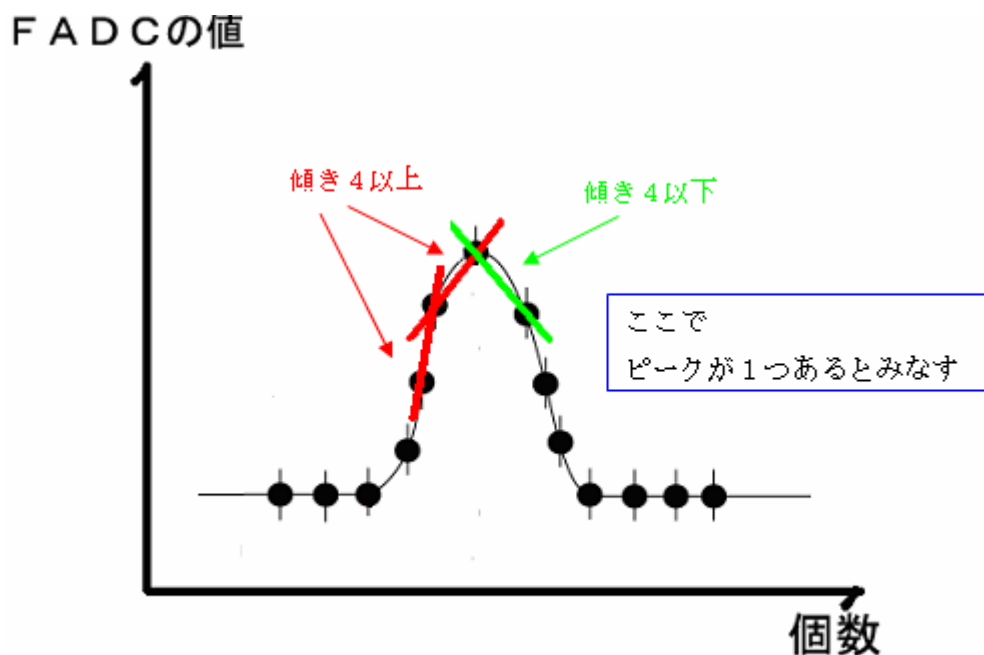
End class

第7章 二つ山を探すプログラム

Visual Basic プログラムで収集したデータを UNIX コンピュータに転送し、データ解析を行った。ミュー粒子崩壊の場合 FADC の波形が二つ山になるので、この二つ山を探すプログラムを作成した。

7. 1 ピークを見つける

FADC は 1 event あたり 200 個値を出して波形を構成する。まずこの各値を読み込んで 1 間隔ごとの傾きを出す。この傾きが正(4以上)が 2 回以上続いた後に負(-4以下)に変わった時点でピークがあるとみなす。そうすることで一瞬あがってすぐ下がるようなノイズでピークをカウントしてしまう事を防ぎピークの数に正確に数えることができる。このピークの数にカウントし、カウント数が 2 の時のイベント番号と FADC の値を書き出すようなプログラムを作成した。



7. 2 ノイズをのぞく

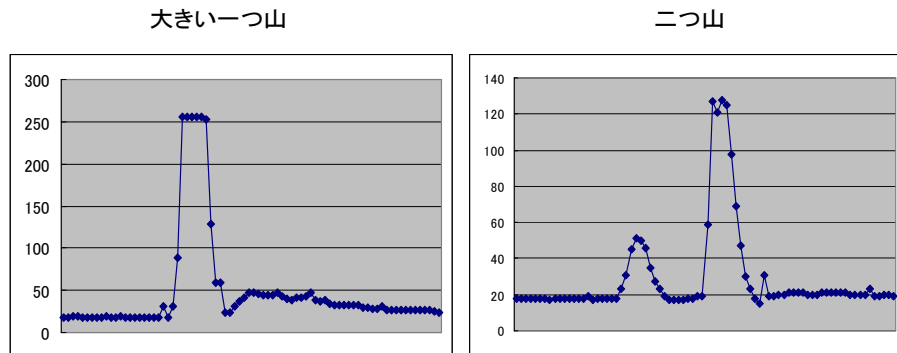
小さい山はノイズとみなせるので除くために **threshold** を決めた。今回は 20 とする。また、1 つめのピークと 2 つめのピークの間隔があまりにも狭いものは 2 つ山と判断

しづらいので、間隔が3未満のものは除くような条件をつける。

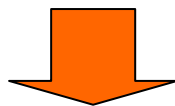
7. 3 大きい山の後ろにできるオーバーシュート

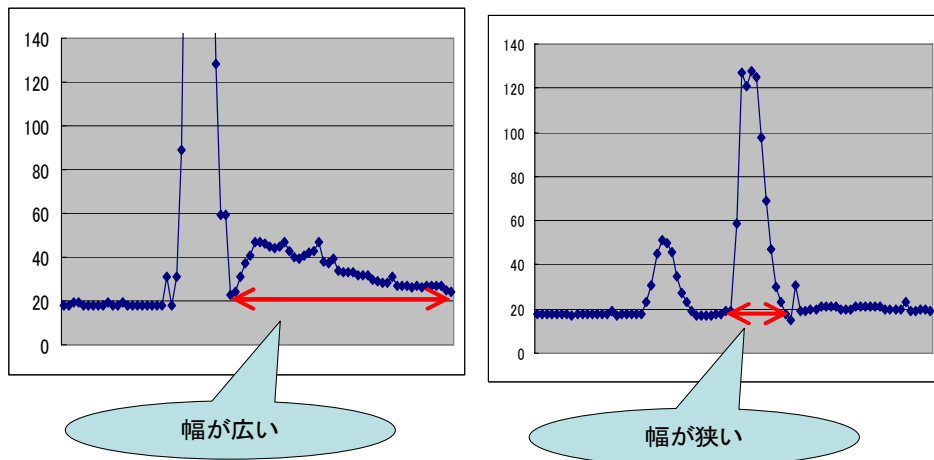
FADCで観測できる値の範囲は決まっている。今回使用しているFADCは8bitなので最大256までしか測定出来ない。これよりも大きいような山のうしろにはどうしても大きいオーバーシュートがおきてしまう。このような山を2つめの山と判断することを防ぐようなプログラムも追加した。

二つの山を見比べてみて考えてみる



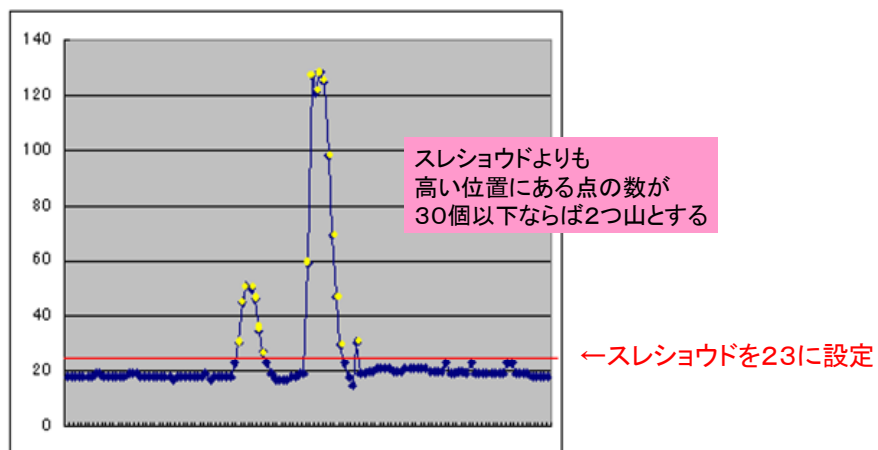
分かりやすいように縦軸のスケールをあわせると



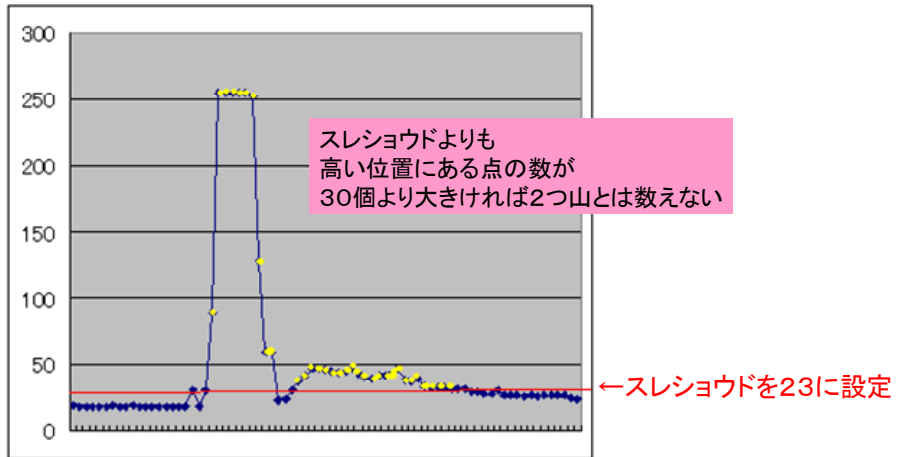


まず、オーバーシュートと実際の山との違いは山の幅である。実際の山の幅に対してオーバーシュートの山の幅はかなり広い。

そこで、プログラム中で threshold を決めて、それよりも高い位置にある点の数が 30 個以下ならば 2 つ山、30 よりも大きければ 2 つ山ではないというプログラムを追加した。



今、スレショウドよりも高い点の数は16個 ≤ 30個
→これは2つ山とはみなす！！



今、スレショウドよりも高い点の数は36個 > 30個
 →これは2つ山とはみなさない！！

《二つ山を探すプログラム》

Main function

開くファイルの指定

If ファイルが開けなかったら → 『txt-file can not open !』

↓開けたら

1 行目(i=0)は項目が書かれているのでその文字を読み込む

While(i=event 番号を1ずつ増やしていく。データが終わるまで) ←

ADC データの読み込み

If iflag=-1

ifadc=0

for (j=FADC データ番号 1 から 200 まで 1 ずつ増やす)

↳ 値を読み込み、その値を fadc[j] と置く → ↑

→ Sub function peak_search

for (j=FADC データ番号 1 から 200 まで 1 ずつ増やす)

↳ diff[j] = fadc[j] - fadc[j-1] → ↑

傾きの threshold → vthdif=4

ノイズを取り除くための波形の $\text{threshold} \rightarrow \text{vthsig}=20$
 $\text{pedestal}=28$
for (j=FADC データ番号 1 から 200 まで 1 ずつ増やす)

```

statdif=0
if diff[j] ≥ vthdif      → statdif = 1
if diff[j] ≤ -1 × vthdif → statdif = -1
if fadc - pedestal ≥ vthsig → statsug=0
if fadc - pedestal ≤ vthsig → statsug=-1
if statsig=0 → positive=0
if statsig=1 → positive を 1 増やす
if statdif=0 かつ fadc[j]>200 → ifind=0
if fadc[j] - pedestal > 30 → k を 1 増やす
if k > 30 ならば → ifind=-2 (二つ山ではない)
if positive ≥ 2 かつ statdif=-1
ifind(ピークの数)を 1 増やす
positive=0 に戻す
ピークが 2 回目のときは
1 回目と 2 回目のピークの時間差を j2 とおく。
j2 が 4 未満のとき
→ 2 つ山と判断しづらいのでピークのリセット。

```

→ ピークの数が 2 のとき j2 の値を書き出す。 →

7. 4 ヒストグラムの作成

ピークの数 が 2 のときに、一つ目の山がきたときと二つ目の山がきたときの時間差を書き出し、横軸が時間差、縦軸が頻度のヒストグラムを作成する。

第8章 データ解析

8, 1 全データ

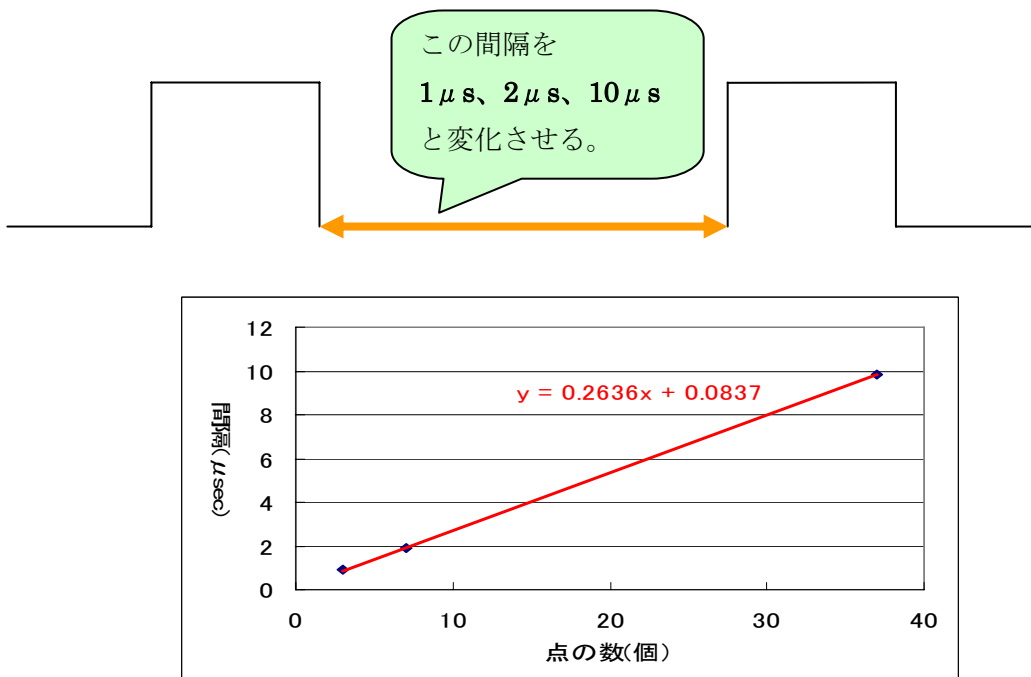
今回の実験で得られたイベントは

	Event 数
去年のデータ	492854
今年のデータ	169689
合計のデータ	662543
二つ山崩壊と考えられる Event	1375

μ 粒子の崩壊と考えられる 1375Event を用いて寿命を測定する。

8, 2 FADC の時間間隔

μ 粒子の寿命を測定するために、FADC の時間間隔を測定する。まず clock genetater からの信号の間隔を $1 \mu s$ 、 $2 \mu s$ 、 $10 \mu s$ と変化させてその間にどのくらいの点があるかを確認、横軸が点の数、縦軸が信号の間隔にすると傾きが FADC の時間間隔なので近似直線で傾きを出した。



傾き = $0.2636 \mu sec$

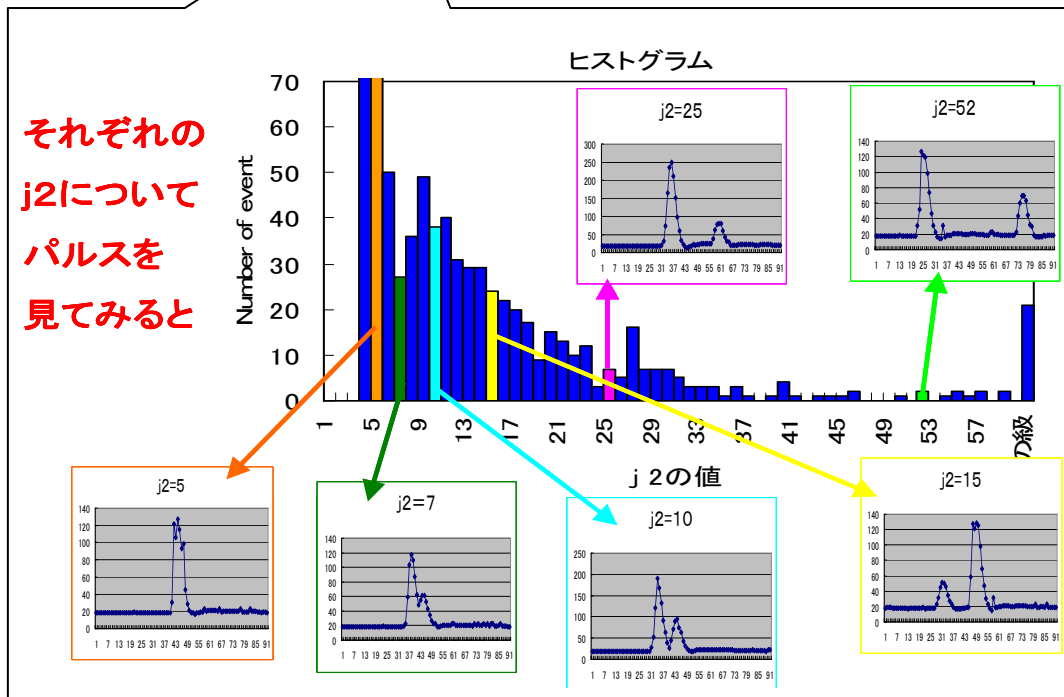
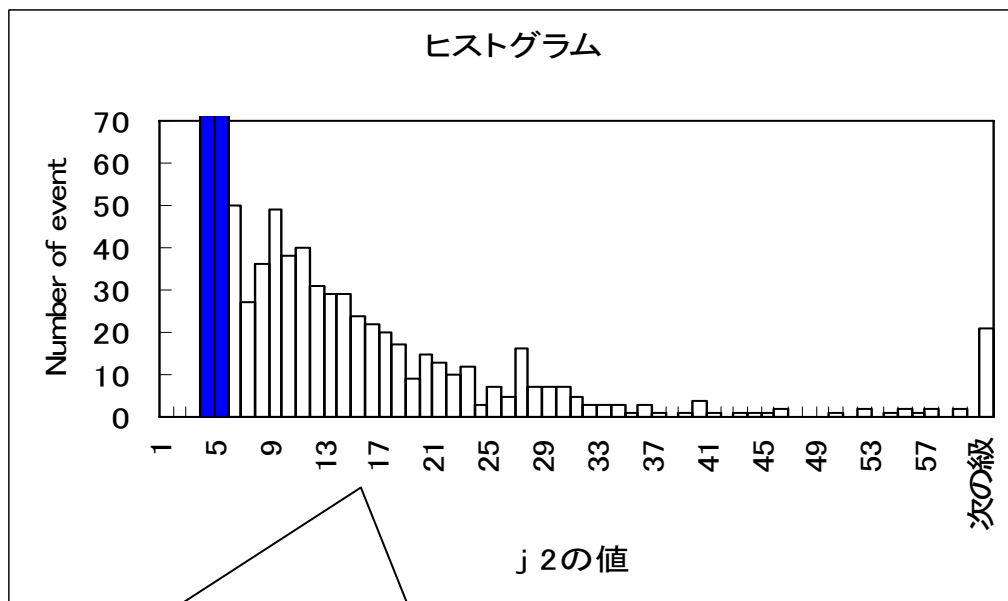
したがって FADC の時間間隔を 264nsec として計算する。

8, 3 μ 粒子の Event 選別

(1) 寿命は、
$$y = P_1 \exp\left(\frac{P_2 - x}{P_3}\right) \quad (8, 1)$$

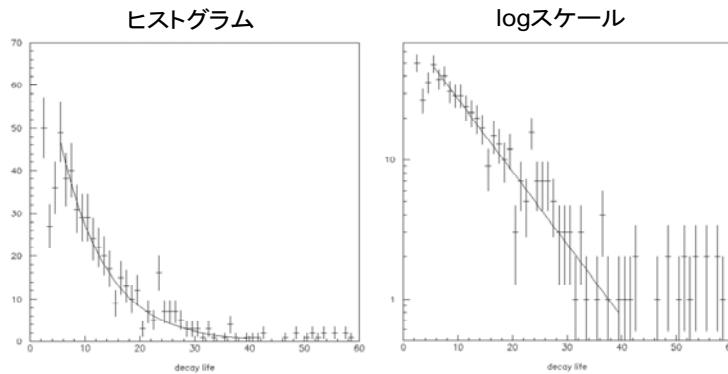
という式で表される。 j_2 の値を Event 数ごとに選別するとこの形になることが予想される。ここで(8,1)式の P_3 の値が寿命に対応しているので、 P_3 にサンプリング周波数の 246nsec をかけると寿命を算出できる。

今回の実験のデータを用いると次のようなグラフになる。



(2) このグラフを(8, 1)式で Fit すると、下のようになる。

Fit (10-44)



ここでは P_3 の値が 8.3279 ± 0.70698 なのでこれにサンプリング周波数の 246 nsec をかけると

$$\begin{aligned} \tau &= P_3 \times 246 \text{ nsec} \\ &\doteq \underline{\underline{2.20 \pm 0.19 \mu \text{ sec}}} \end{aligned}$$

(3) FIT の範囲

FIT の範囲を変えることによって P_3 の値も変わってくる。

いまこの範囲を変えて、それぞれの寿命を求めてみた。

ここで χ^2 検定は 1 に近いほど精度が良いといえる。

範囲	χ^2 検定	寿命 [$\mu \text{ sec}$]
6 ~ 20	0.49	2.27 ± 0.39
6 ~ 30	1.12	2.23 ± 0.26
6 ~ 40	0.97	2.20 ± 0.19
6 ~ 50	0.92	2.24 ± 0.19
6 ~ 60	0.98	2.28 ± 0.16
7 ~ 20	0.52	2.33 ± 0.50
7 ~ 30	1.17	2.27 ± 0.30
7 ~ 40	1.00	2.21 ± 0.22
7 ~ 50	0.94	2.26 ± 0.15
7 ~ 60	0.99	2.31 ± 0.26

第9章 まとめ

9, 1 μ 粒子の寿命

今回算出した μ 粒子の寿命は $2.20 \pm 0.19 \pm 0.11 \mu \text{ sec}$ である。
ここで ± 0.19 は寿命の誤差、 ± 0.11 は Fit の範囲を変えたことによるばらつきを表している。

9, 2 考察

Particle Data Book に記載されている μ 粒子の寿命は $2.19703 \pm 0.00004 \mu \text{ sec}$ であるので、今回の実験結果は良く一致しているといえる。

昨年度は ADC の Qmode と Vmode の関係から比例関係から外れたイベントが μ 粒子の崩壊のイベントとして解析したのに対し、今年度は FADC のデータを解析に用いて、すべての 2 つ山を探すプログラムを作成した。そして、Qmode と Vmode の関係を見ても、2 つ山のイベントも比例関係の上に乗っていた。よって、比例関係から外れたイベントが 2 つ山であるとはいえないことが分かった。

9,3 参考文献

- ・奈良女子大学理学部物理科学科 2003年度卒業生 藤川美幸希、余川真純
『2003年度卒業生 シンチレーションカウンターを用いた Muon の寿命測定』
- ・奈良女子大学理学部物理科学科 2004年度卒業生 藤野智美、岡田知佳
『2004年度卒業生 シンチレーションカウンターの基本特性の研究とミュオンの寿命の測定』
- ・奈良女子大学理学部物理科学科 2005年度卒業生 生田繭子、大江絵梨子
『2005年度卒業生 ミュー粒子の寿命測定～フラッシュ ADC を用いて～』
- ・奈良女子大学理学部物理科学科 2006年度卒業生 徳廣志保、横山友香
『2006年度卒業生 CsI カウンターを用いた FADC 読み出しによる μ 粒子の寿命測定』

謝辞

私たちの卒業研究のために、お忙しい中多くの時間を割いてくださった林井先生をはじめ、ゼミや日々の実験で熱心にご指導いただいた野口先生、宮林先生、諸先輩方に心より感謝しています。おかげさまで、この一年を充実して過ごすことができました。この一年で学んだことを生かし、大学院でもさらに勉強や研究を重ねたいと思います。本当にありがとうございました。