

2006 年度 卒業論文

石英ガラスで発生する
チェレンコフ光を用いた
荷電粒子の検出

物理科学科奈良女子大学 理学部

高エネルギー物理学研究室

玉木 智子・平井 珠生

【目次】

第1章	はじめに	3
1.1	実験の目的	3
1.2	本論文の構成	3
第2章	測定の原理	4
2.1	宇宙線	
2.2	チェレンコフ光	4
2.3	使用する線源 Sr^{90}	5
2.4	荷電粒子のエネルギー損失	6
2.5	光電効果	7
第3章	実験装置の概要	8
3.1	光電子増倍管	8
3.2	チェレンコフカウンター	9
3.2	シンチレーションカウンター	10
第4章	データ収集・解析装置の概要	11
4.1	camdrv	12
4.2	CAMAC	12
4.2.1	CAMAC 規格の概略	12
4.3	データ収集プログラムの作成	14
4.3.1	tdcad.c	15
4.3.2	plottdcad.c	21
第5章	ADC による Sr^{90} の測定と結果	24
5.1	Block Diagram	24
5.2	ADC の動作テスト	26
5.3	測定結果・考察	27
第6章	ADC による宇宙線の測定	2

8			
6.1	Block Diagram	2 8	
6.2	測定結果・考察	2 9	
6.3	ピーク値とガラスの厚さの関係	3 1	
6.4	光子数の計算	3 4	
第7章	TDCによる宇宙線の測定	3	
7			
7.1	Block Diagram	3 7	
7.2	TDC(RPC-060 ch1)の動作テスト	3 8	
7.3	測定結果・考察	3 9	
7.3.1	チェレンコフカウンターにおける宇宙線の測定結果・考察	3 9	
7.3.2	時間差(delay)での比較	4 0	
7.3.3	改善策	4 2	
7.4	TDC(RPC-060 ch5)の動作テスト	4 4	
7.5	測定結果・考察	4 5	
第8章	ADCとTDCによる宇宙線の測定	4 7	
8.1	Block Diagram	4 7	
8.2	測定結果・考察	4 8	
8.3	分解能の比較	5 0	
第9章	まとめ・今後の課題	5 2	
参	考	文	献
5 3			
謝辞			5 4

第1章 はじめに

1. 1 実験の目的

高エネルギー物理学とは、物質の究極の構成要素とそこに働く相互作用について研究する学問である。その研究は加速器を使い衝突反応により生成した粒子を検出器で捉え、その信号をエレクトロニクスとコンピューターで記録、解析する、という手法を用いている。生成された粒子の種類、方向、エネルギー、運動量の識別に用いられている検出器の中に、荷電粒子が物質中の光速を超える速度で走るときに生成されるチェレンコフ光を用いるチェレンコフカウンターがある。

本実験ではこのチェレンコフカウンターを実際に製作し、線源や宇宙線を用いて荷電粒子の検出を行う。また、その過程において高エネルギー物理学の基礎的な実験技術を習得することをこの実験の目的とする。

1. 2 本論文の構成

本論文では、始めに放射線計測やチェレンコフ光の原理について述べ、次に実験装置やデータ収集解析装置の概要について述べる。そしてその上で実験を行い得られた結果・考察を述べる。

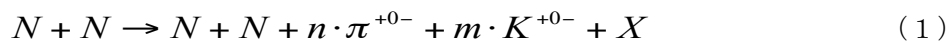
第2章 測定の原理

2. 1 宇宙線

宇宙線には直接飛来する一次宇宙線と、一次宇宙線と大気中の原子核との相互作用で作られる二次宇宙線がある。一次宇宙線の90%は陽子（p）で、残りはHe、C、Oなどの原子核である。陽子は大気中で空気の原子核との相互作用で二次粒子を生成する。二次粒子はさらに原子核と相互作用し新たな二次粒子を生成する。これが何回か繰り返されて多くの二次宇宙線が生成される。これをカスケードシャワー（cascade shower）と呼ぶ。多くの粒子は空気中で吸収されるが、透過力の強いミューオン（ μ ）は運動エネルギーの高い状態で地上に到達する。

2. 2 一次宇宙線の反応

一次宇宙線の中の核子（陽子・中性子：N）は空気中の原子核中の核子（N）と衝突し、以下のような反応を起こす。



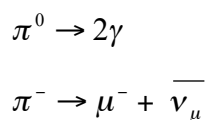
その結果、多くの π 中間子やK中間子が作られる。

さらにK中間子は崩壊し、



となる。寿命はKの静止系で $\tau_K = 1.24 \times 10^{-8}(\text{sec})$ である。

π 中間子は



$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (3)$$

の崩壊をする。

π^0 の寿命は π^0 の静止系で $\tau_{\pi^0} = 0.83 \times 10^{-16}(\text{sec})$ 、 π^\pm の寿命は π^\pm の静止系で

$\tau_{\pi^\pm} = 2.6 \times 10^{-8}(\text{sec})$ である。

ミューオンはさらに電子、ニュートリノ、反ニュートリノに崩壊する。

$$\begin{aligned} \mu^- &\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \\ \mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \end{aligned} \quad (4)$$

寿命は $2.2 \times 10^{-6}(\text{sec})$ と π に比べて長い。また高エネルギーなので相対論的効果により寿命が $1/(\sqrt{1-\beta^2})^2$ 倍長くなる。

したがって大部分のミューオンは崩壊せずに地上に到達する。

2. 3 チェレンコフ光

物質中を通過する荷電粒子の速度 v が、その物質中の光速 c/n を超える速度で走るとき、粒子の飛跡に沿って物質が発する弱い光のことをチェレンコフ光という。チェレンコフ光は、可視光から紫外線領域の光で、粒子の進行方向に角度 θ をなして円錐状に放出される(下図)。

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (\beta = v/c, n = \text{屈折率}) \quad (5)$$

光を出す条件は、 $\beta \geq 1/n$ である。光子の数は $\sin^2 \theta$ に比例する。

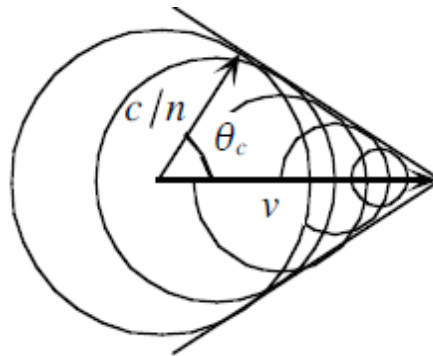


図 2. 1 : チェレンコフ光

2. 4 使用する線源

本実験では予備実験に ^{90}Sr を使用した。

原子核 ^{90}Sr は β 線を出して原子核 ^{90}Y の 524keV の励起状態に崩壊する。この状態の ^{90}Y は、さらに 2.28MeV の β 線を出して原子核 ^{90}Zr に遷移する。

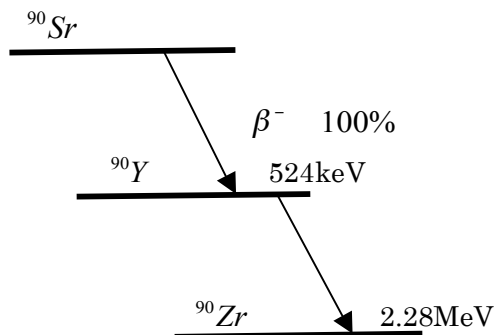


図 2. 2 : ^{90}Sr の崩壊図

2. 5 荷電粒子のエネルギー損失

荷電粒子が物質中を通ると、入射粒子と物質を構成する原子との電磁相互作用により原子が電子と正イオンに分離する。これを電離という。また、荷電粒子の通過により原子が励起状態になる場合もある。この励起状態から基底状態に遷移するとき光を放出し、この過程をシンチレーションと呼ぶ。電離や励起を繰り返し入射粒子はエネルギーを失う。

電荷 Ze 、速度 βc の荷電粒子が、電荷 ze 、質量数 A 、原子番号 Z の物質を通過する間に失う単位長さあたりの平均エネルギー損失は

$$-\frac{dE}{dx} = 0.3070 \cdot \rho \cdot \frac{A}{Z} \cdot \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I} \right) - \beta^2 \right] \left(\frac{\text{MeV}}{\text{cm}} \right) \quad (6)$$

で与えられる。ここで I は、原子 1 個を電離するのに必要なエネルギーで、

$$\frac{I}{Z} = (9.76 + 58.8 \cdot Z^{-1.19}) \text{eV} \quad (\text{for } Z \geq 13) \quad (7)$$

で表される。また、 $D = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.3071 \left(\frac{\text{MeV} \cdot \text{cm}^2}{\text{g}} \right)$ で、 $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ である。

δ は密度効果と呼ばれるもので、 $\ln(\gamma)$ の速度依存性を持つが、数%の補正である。

2. 6 光電効果

エネルギー $h\nu$ の光子の衝突により、電子が光子を吸収し原子の電子を放出する現象を光電効果という。そのとき放出されるエネルギー E は、 $E = h\nu - W$ となる。 $(W$:電子の束縛エネルギー) となる。

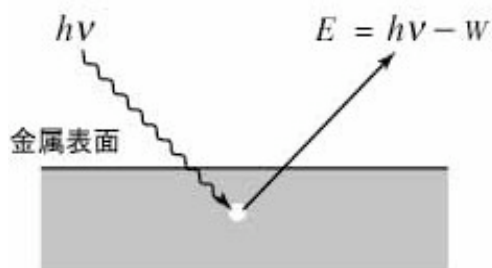


図 2, 3 : 光電効果

第3章 実験装置の概要

3.1 光電子増倍管

光電子増倍管とはガラス管に封じられた真空管で、入射窓、光電面、電子増倍部より構成されている。その構造を以下の図に示す。

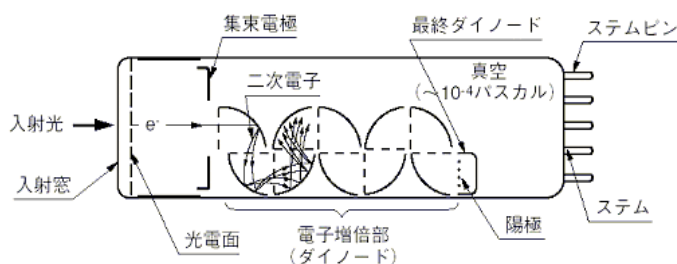


図2. 4 : 光電子増倍管

光電子増倍管に入射した光は以下に示す過程を経て信号出力される。

- (1) ガラス窓を透過する。
- (2) 光電面内の電子を放出し、真空中に光電子を放出する。
- (3) 光電子は集束電極により第一ダイノード上に誘導され、二次電子増倍された後、引き続き各ダイノードで二次電子放出を繰り返す。
- (4) 最終ダイノードより放出された二次電子は陽極より取り出される。

本実験で使用する光電子増倍管は HAMAMATU の H3178 と H7195 である。

それぞれの仕様は以下を参照。

・ H3178

<http://jp.hamamatsu.com/products/node.do?dir=/division/etd/pd001/pd002/pd394/H3178-51&lang=ja&ext=html>

・ H7195

<http://jp.hamamatsu.com/products/node.do?dir=/division/etd/pd001/pd002/pd394/H7195&lang=ja&ext=html>

3. 2 チェレンコフカウンター

本実験で製作したチェレンコフカウンターを下図に示す。

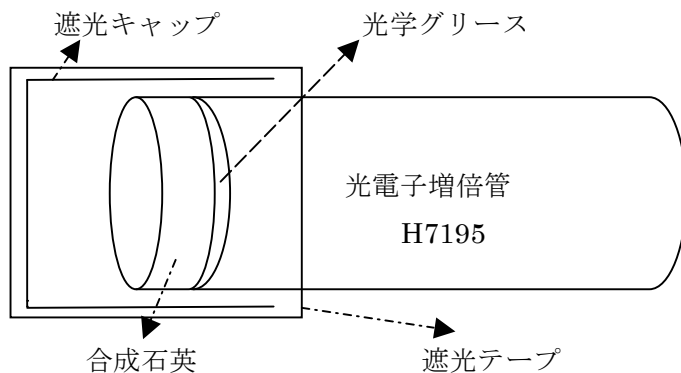


図3. 1 : チェレンコフカウンター

このカウンターは放射媒体である合成石英と光電子増倍管が一体となったものである。接着剤には光学グリースを用いた。合成石英内で発生したチェレンコフ光が外部に透過するのを防ぐため遮光キャップをし、さらにキャップの上から遮光テープを巻いた。合成石英の仕様は以下の通りである。

- 半径…25 mm
- 厚さ…10 mm
- 質量…43.176g
- 密度…2.20g/cm³
- 屈折率…1.5
- 波長領域…250nm～400nm

3. 3 シンチレーションカウンター

荷電粒子は物質中を通ると原子または分子を励起して光を発生させる。ある種の物質では特にこの発光（Scintillation）が著しいので、光を捕える装置と組み合わせれば粒子の検出ができる。これをシンチレーションカウンターと呼ぶ。

（シンチレーション光はチェレンコフ光に比べて、発光量が多いが発光時間は短い。これはチェレンコフ光は粒子が媒質中を条件を超える速度で走る間ずっと発光するのに対して、シンチレーション光は原子などが励起して元に戻る間だけ発光するからである。）

本実験で製作したシンチレーションカウンターを下図に示す。

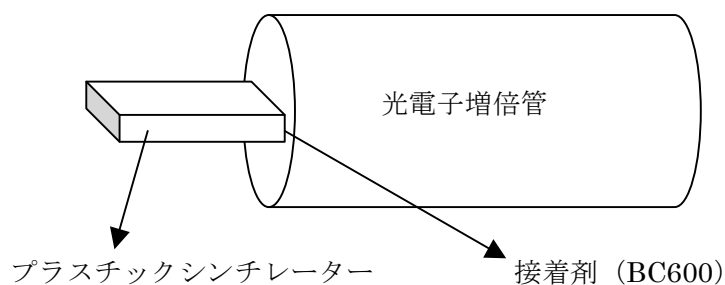


図3. 2 : シンチレーションカウンター

シンチレーションカウンターはプラスチックシンチレーターと光電子増倍管が一体となったものである。接着材（BC600）を用いて接着し、上から遮光テープを巻きつけた。シンチレーションカウンターの内、トリガーに使用したものの光電子増倍管は H3135 で、チェレンコフカウンターとの比較に使用したものの光電子増倍管は H7175 である。

プラスチックシンチレーターとはプラスチック母材に微量の蛍光物質を流し込んだものである。荷電粒子が通過すると蛍光物質を励起して光が発生する。プラスチックシンチレーターは減衰時間がナノ秒（ 10^{-9} 秒）で高速計測に適している。

第4章 データ収集・解析装置の概要

検出器からのアナログ信号をデジタルデータに変換するために用いる ADC や TDC には CAMAC 規格のものが広く用いられる。これらの ADC や TDC はクレートコントローラーの制御下にある。このクレートコントローラーとの情報の授受を行う PC 側のインターフェースと PC 内のデータ収集プログラムの仲介を行うのがデバイスドライバーである。

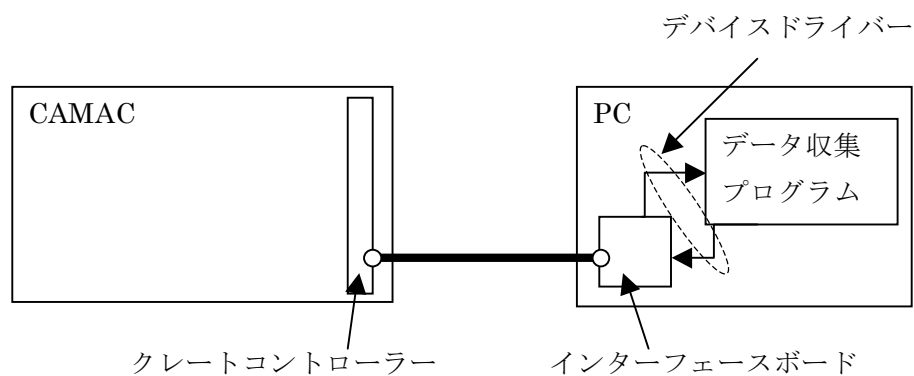


図 4. 1 : データ収集・解析装置の概要

4. 1 camdrv

デバイスドライバーとして `camdrv` を使用する。`Camdrv` は高エネルギー実験・原子核実験のための汎用データ収集ソフトウェアである `KiNOKO` の一部として作成されており、そのホームページからダウンロードした。

*参照 <http://www.awa.tohoku.ac.jp/~sanshiro/kinoko/camdrv/>

本実験ではクレートコントローラーを東陽テクニカの `CC/7700-PCI`、インターフェースボードを `Linux2.4x` として使用した。

4. 2 CAMAC

`CAMAC` (Computer Automated Measurement and Control) とは放射線検出器のアナログ電気信号をデジタル量に数値化するエレクトロニクスの規格名である。計測や制御を目的とする装置を作成するのに、独立の単位機能を持つモジュール・ユニットを適当に組み合わせ合わせて構成することが行われる。このような複雑な装置を比較的単純なユニットの組み合わせで実現できる利点を持っている。

4. 3 CAMAC 規格の概略

(1) クレート

クレートは 19 インチの標準ラックに取り付けられるようになっており、最大 25 個のモジュールが挿入できるよう 25 個のステーションを 17.2 mm 間隔で持っている。それぞれのステーションは、モジュールをデータウェイ・コネクタに導き入れるために 86 ピンのデータウェイ・コネクタのソケット、モジュールを固定するためのねじ穴が設けられている。

(2) データウェイ

モジュールの相互間の信号の授受はデータウェイを通して行われる。この受動多線式のハイウェイはクレート内部に組み込まれており、全てのステーションのデータウェイ・コネクタ・ソケットに接続されている。

(3) モジュール

モジュールは幅約 1.7 cm の整数倍が許され、裏側の半分にはモジュールの回線配線に使われるプリント基板ヘッジが 86 ピンのコネクタとなっている。クレートに差し込むと自動的にクレートの裏側のコネクタを通して CAMAC データウェイに接続され、電源、データや制御信号の受け渡しが行われるようになっている。

(4) クレート・コントローラー

クレートの右端の 25 番目のステーションは特別な配線になっており、クレート・コントローラーと呼ばれる。クレート・コントローラーは 25 番目以外の通常の配線をされたステーションを少なくとも一つ占拠し、データウェイを監視する。

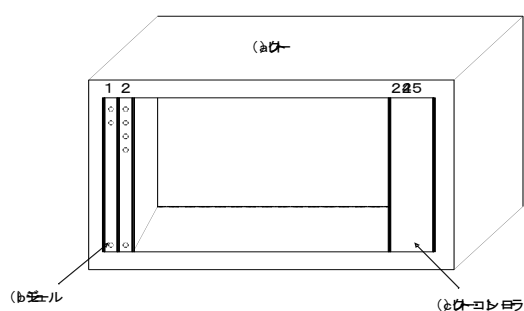


図 4. 2 : CAMAC 規格

4. 4 データ収集プログラムの作成

ADC や TDC で数値化されたデータは、石英やシンチレーターに入射した荷電粒子の電離損失に比例する量である。その分布を出し、ピーク値を出すことが本実験において重要である。

全体の流れとしては、まず数値化されたデータを CAMAC から読み込みファイルに保存する。次に UNIX で PAW を用いてヒストグラムにして出力する。

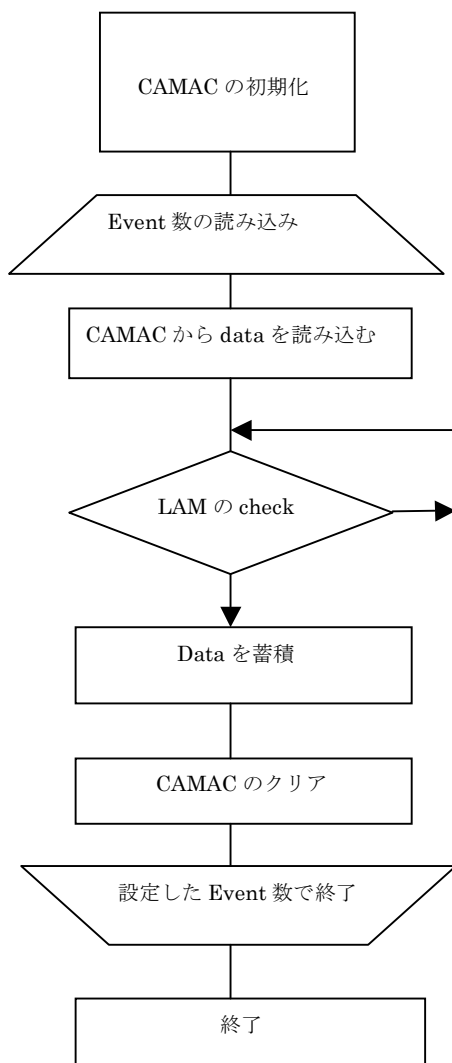


図 4. 3 : データ収集プログラムの概要

CAMAC に関する命令は以下のように書く。

CAMAC(NAF(N,A,F),&data,&q,&x)

N はステーションナンバー、A はアドレスナンバー、F は命令番号で、NAF (N,A,F) でのモジュールのどの部分にどのような命令をするかが決まる。

Data は CAMAC から送られたデータが入力される。

q、x はある NAF を指定した命令が出されたとき、早期に各プラグインがこの信号をデコードして、アドレスされたプラグインが実際指定された F を実行できるものかどうか (x=1 で実行可能)、そしてこの F に関係したデータは予想されるものかどうか (q=1 データは正しい) を判定した結果として、データウェイに掲示される。

作成したプログラムは以下の通りである。

4. 4. 1 tdcadc.c(daq01.c)

```
1  /***** tdcadc.c *****/ created 2007/Feb./23th Kenkichi Miya. *****/
2  * Read out both TDC(RPC-060) and ADC(LRS2249W).
3  *****/
4  #include <fcntl.h>
5  #include <sys/time.h>
6  #include <unistd.h>
7  #include <sys/types.h>
8  #include <stdio.h>
9  #include <string.h>
10 #include <stdlib.h>
11 #include <math.h>
12 #include <sys/errno.h>
13 #include "camlib.h"
14 #include <time.h>
15 #include <netinet/in.h>
16
17 FILE *fp; /* The file to save the taken data.*/
18
19 int main() {
20     int i_ev, n_ev;
```



```

21     int data_adc, data_tdc, q, x;
22     char fname[36];
23
24     /*=====
25      * TDC and ADC slot number and channel number.
26      * 2006 Tamaki&Hirai setup; TDC slot=11 & ch.=5, ADC slot=5 & ch.=7.
27      *=====*/
28     const int islot_tdc = 11;
29     const int ichan_tdc = 5;
30     const int islot_adc = 5;
31     const int ichan_adc = 7;
32
33
34     /*=====
35      * The filename to save raw data is "test.dat".
36      * Renaming it is taken care by an appropriate shell script.
37      *=====*/
38     fp=fopen("test.dat", "w");
39
40     /*=====
41      * How many events do you take?
42      *=====*/
43     /* printf("Number of events?%n");
44      * scanf("%d", &n_ev); */
45     /* n_ev is fixed to be 500 */
46     n_ev=500;
47     fprintf(fp, "%d%#n", n_ev);
48
49     /*=====
50      * Open CCP interface device file.
51      * If it fails, exit.
52      *=====*/
53     if(COPEN()) {
54         printf("ccp open error%#n");
55         exit(-1);
56     }
57

```

```

58  /*=====
59  * Initialize CAMAC.
60  *=====*/
61  CSETCR(0);
62  CGENZ();
63  CGENC();
64  CREMI();
65
66  /*=====
67  * Enable LAM and Clear on TDC
68  *=====*/
69  CAMAC(NAF(islot_tdc, ichan_tdc, 26), &data_tdc, &q, &x); /* F=26 is enable. */
70  CAMAC(NAF(islot_tdc, ichan_tdc, 9), &data_tdc, &q, &x); /* F=9 is clear. */
71  /*=====
72  * Enable LAM and Clear on ADC
73  *=====*/
74  CAMAC(NAF(islot_adc, ichan_adc, 26), &data_adc, &q, &x); /* F=26 is enable. */
75  CAMAC(NAF(islot_adc, ichan_adc, 9), &data_adc, &q, &x); /* F=9 is clear. */
76
77  /*=====
78  * Again send enable command to prepare the first event.
79  *=====*/
80  /* CAMAC(NAF(adc, ia, 26), &data, &q, &x); */ /* 20070223 KM. */
81
82  /*=====
83  * send message to the user.
84  *=====*/
85  printf("CAMAC initilize done.¥n");
86  printf("Number of event = %d¥n", n_ev);
87
88  /*=====
89  * Event loop.
90  *=====*/
91  i_ev = 0;
92  while( i_ev < n_ev )
93  {

```

```

94      /*-----
95      * Test ADC' s LAM.
96      *-----*/
97      CAMAC (NAF (islot_adc, ichan_adc, 8), &data_adc, &q, &x);
98
99      /*-----
100     * If no event comes yet, q is set to be 0,
101     * otherwise, the digitized event is there!
102     *-----*/
103     if( q!=0 )
104     {
105         /*-----
106         * Read the digitized data from the register.
107         *-----*/
108         CAMAC (NAF (islot_tdc, ichan_tdc, 0), &data_tdc, &q, &x);
109         CAMAC (NAF (islot_adc, ichan_adc, 0), &data_adc, &q, &x);
110         printf("i_ev, TDC, ADC, q, x = %d %d %d %d %d\n",
111             i_ev, data_tdc, data_adc, q, x);
112
113         /*-----
114         * The read data is written into the file.
115         *-----*/
116         fprintf(fp, "%d %d\n", data_tdc, data_adc);
117
118         /*-----
119         * Update the event counter(i_ev)
120         *-----*/
121         i_ev++;
122
123         /* and send mesage for every 100 events.
124         ...tempolary commented out. 20070223 KM.*/
125         /*-----
126         * if( i_ev%100 == 0 )
127         *{
128         *printf("Event= %d\t", i_ev);
129         *printf("data= %d\n", data);

```

```

130         *}-----*/
131     /*-----
132         * Clear LAM to wait for the next event.
133         *-----*/
134     CAMAC(NAF(islot_tdc, ichan_tdc, 9), &data_tdc, &q, &x);
135     CAMAC(NAF(islot_adc, ichan_adc, 9), &data_adc, &q, &x);
136     }
137
138 }
139
140 /*=====
141     * Instructions for termination.
142     *=====*/
143 CAMAC(NAF(islot_tdc, ichan_tdc, 24), &data_tdc, &q, &x); /* F=24 is desable.*/
144 CAMAC(NAF(islot_adc, ichan_adc, 24), &data_adc, &q, &x); /* F=24 is desable.*/
145 CCLOSE(); /* CAMAC close. */
146 fclose(fp); /* Close data file.*/
147
148 return 0;
149 }
150 (END)

```

《tdcadc.cの説明》

tdcadc.c

- L 4 ~ 1 5 ファイル、ライブラリの読み込み
- L 1 7 ファイルオープン
- L 1 9 ~ 2 2 パラメータの型宣言
- L 2 9 ~ 3 2 TDC と ADC のスロット番号とチャンネル番号の宣言
- L 3 8 ファイル名の入力
 - test.dat に保存できるようにしてあり、入力はコメント文
- L 4 3 ~ 4 7 イベント数の入力
- L 5 3 ~ 5 5 クレート・コントローラーがエラーで開かなかった場合、
エラーメッセージの表示
- L 6 1 ~ 6 4 クレートの初期化
- L 6 9 ~ 7 0 CAMAC への命令
 - F=26、は LAM 信号を受け取れる状態にする。
 - F=9 はデータの削除
- L 7 4 ~ 7 5 CAMAC への命令
 - LAM 信号を受け取れる状態にする。
- L 8 5 ~ 8 6 データを取り始めていることを伝える。
- L 9 1 現在のイベント数に 0 を代入する。
- L 9 2 データをとったイベント数が入力したイベント数より少ない間繰り返す。
 - L 9 7 CAMAC への命令
 - LAM 信号をコンピュータの方から探しに行く。この命令に対し、
LAM 信号があれば Q=1、なければ Q=0 を返す。
 - L 1 0 3 q=0 でない場合以下を行う
 - L 1 0 8 ~ 1 0 9 CAMAC への命令
 - L 1 1 0 ~ 1 1 1 データの出力
 - L 1 1 6 ファイルにデータのみを保存
 - L 1 2 1 イベント数を 1 増やす。
 - L 1 3 4 ~ 1 3 5 CAMAC への命令 データの削除
- L 1 4 3 ~ 1 4 4 CAMAC への命令
 - F=24 は機能の停止
- L 1 4 6 CAMAC、ファイルを閉じる。

4. 4. 2 plottdcadc.c(plot.kumac)

```
1 * macro plot file=test
2 * Created 2007/Feb./26th
3 macro plot file=test
4
5 mess file name =[file]
6
7 fortran/file 66 [file].ps
8 meta 66 -111
9 hi/del *
10
11 opt utit
12 fortran/file 1 [file].dat
13 call tdrtdcadc.f
14 close 1
15
16 opt soft
17 set *
18 igset txfp -130
19 *set xsiz 18
20 *set ysiz 10
21 set asiz 0.4
22 opt nbox
23
24 set dmod 1
25 opt stat
26 opt fit
27
28 zone 1 2
29 hi/pl 10
30 atitle 'TDC count' 'Number of events / bin'
31 hi/pl 20
32 atitle 'ADC count' 'Number of events / bin'
```

```
33
34 zone 1 1
35 igset mtype 20
36 igset mscf 0.5
37 hi/pl 30
38
39 close 66
40
41 mess [file].ps is created
```

《plottdcadc.kumac (plot.kumac) の説明》

plottdcadc.kumac

- L3～L9 グラフの範囲・ファイル名の指定
- L11～L14 .dat に保存されているデータを読み出し、tdrtdcadc.f を呼び出してデータの
 プロットの実行
- L16～L22 グラフの外枠の作成
- L24～L32 右上のデータが書かれた枠の作成
- L34～L37 縦軸・横軸の名前の表示の実行
- L39 クローズの実行
- L41 プロットしたグラフができたことを表示

第5章 ADC による Sr^{90} の測定と結果

5.1 Block Diagram

以下に、Block Diagram を示す。

チェレンコフカウンタに線源 Sr^{90} をあて、ADC を用いて β 線を測定した。

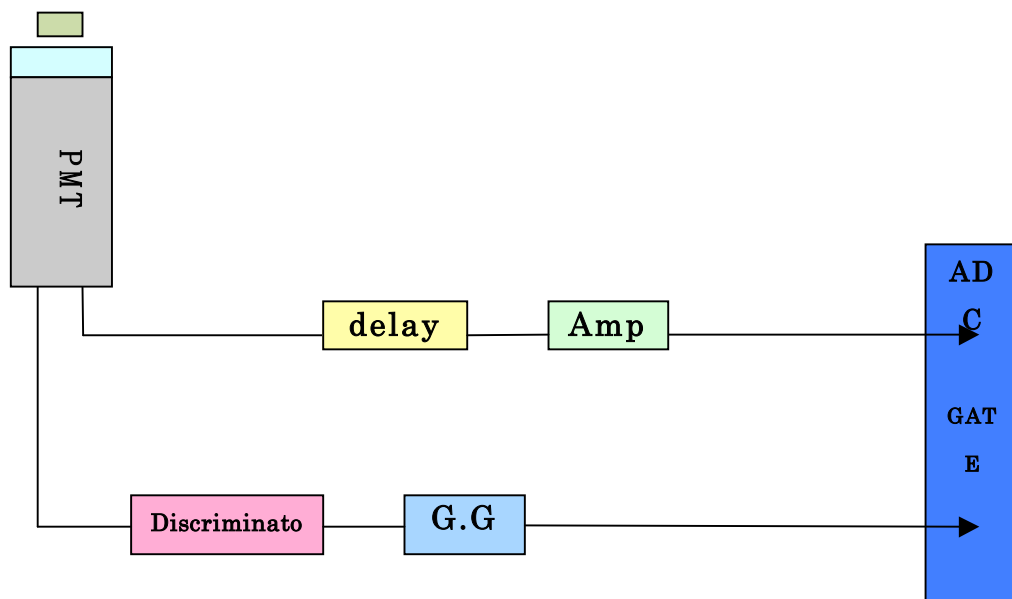


図 5. 1 Block Diagram

このとき、PMT には 2000[V]の電圧をかけた。

Clock Generator : 規則正しいクロックパルスを発生させる装置。

Discriminator : 入力信号が設定した **threshold** を超えたときにパルスを出力する装置。また、このモジュールを通過するのに要する時間は、11[ns]である。

Gate Generator (G.G) : 入力信号を必要な波高と幅に形成する装置。また、このモジュールを通過するのに要する時間は、48[ns]である。

Coincidence : 複数の信号が同時にきたときに出力する装置。また、このジュールを通過するのに要する時間は 13[ns]である。

ADC : アナログ電気信号をデジタル電気信号に変換する装置。

TDC : アナログ信号の非常に短い時間間隔をデジタル出力する装置。

Amp : 前置増幅器

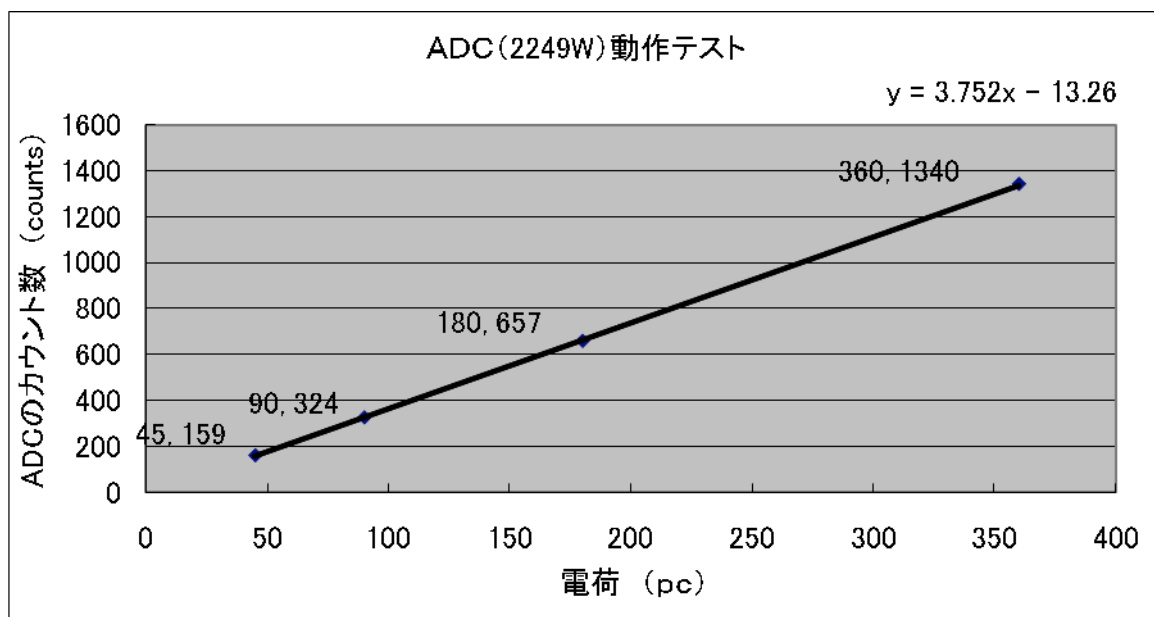
5.2 ADC の動作テスト

Clock Generator の信号を Signal Divider を用いて入力信号を変化させ、電荷と ADC のカウント数を測った。

電荷[pC]	ADC の count 数
45	159
90	324
180	657
360	1340

表 5. 2

下記のようなグラフ 5. 3 になり、ペダスタルは -13.261 [counts] と判断できる。



グラフ 5. 3

5.3 測定結果・考察

グラフ 5. 4

Sr^{90} によるチェレンコフ光の観測により、結果から最大で約 600 まで信号が来ていることがわかる。今は Amp を用いて信号を 10 倍しているので実際は約 60 のところまで信号はきていることになる。

第6章 ADCによる宇宙線の測定

6.1 Block Diagram(ADC)

PMT 1・2 はシンチレーションカウンター、PMT3 はチェレンコフカウンターとなっている。PMT 1.2 をトリガーカウンターとしADC を用いて測定した。

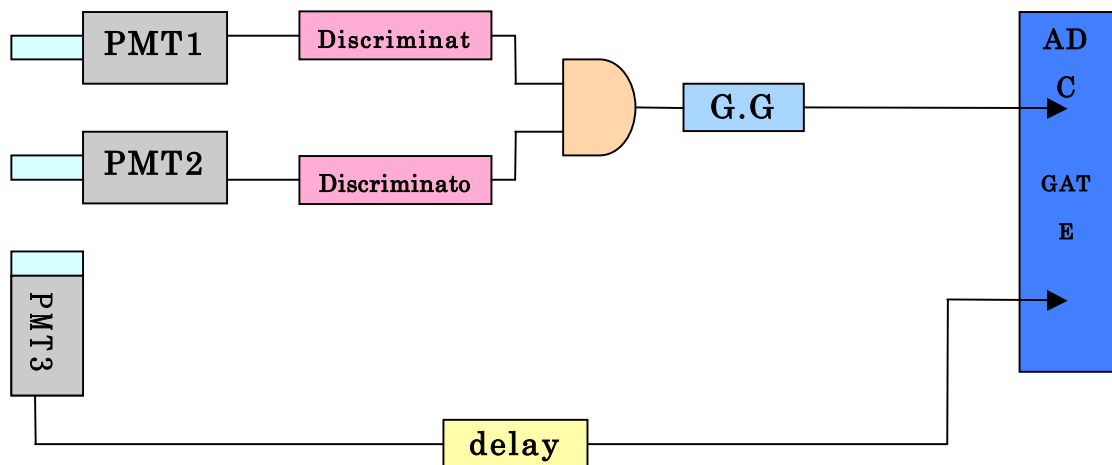
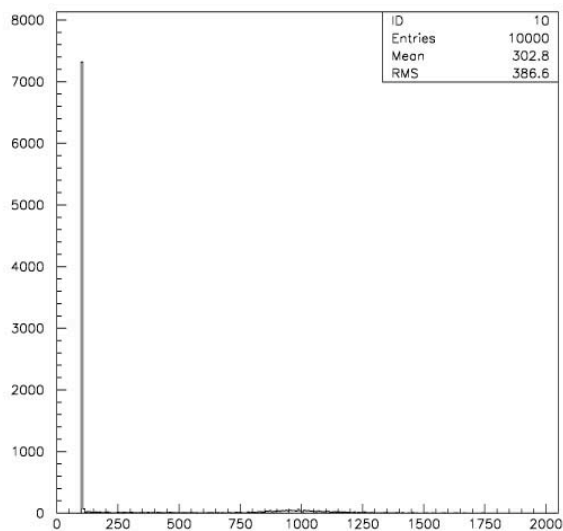


図6. 1 Block Diagram

このとき、PMT1・2には1400[V]、PMT3には2000[V]の電圧をかけた。

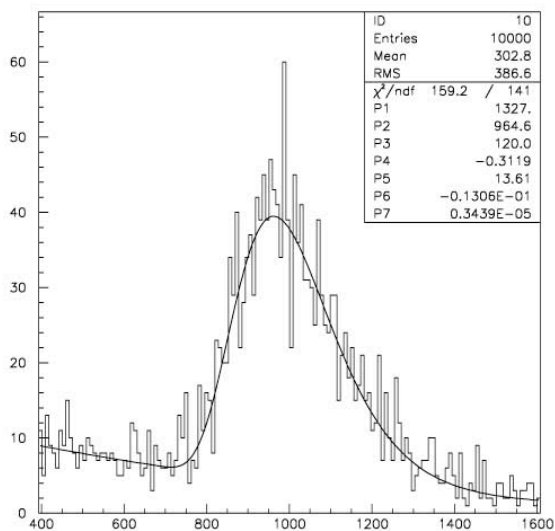
6.2 測定結果・考察

10000[events]データを収集した結果、グラフは以下ようになった。



グラフ 6. 2

100[counts]のあたりに立っているピークは、トリガーしきれなかった信号(空イベント)と思われる。そこで、グラフ 6. 3にグラフ 6. 2の細かく信号が来ている 400—1600[counts]部分をピックアップしたグラフを示す。



グラフ 6. 3

ピーク = 964.6[counts]

ここでグラフ 6. 3 は、本当に石英ブロックに μ 粒子が入って発生したチェレンコフ光を測定できているのか疑問に思う。そこで、以下の 2 つの影響について考察する。

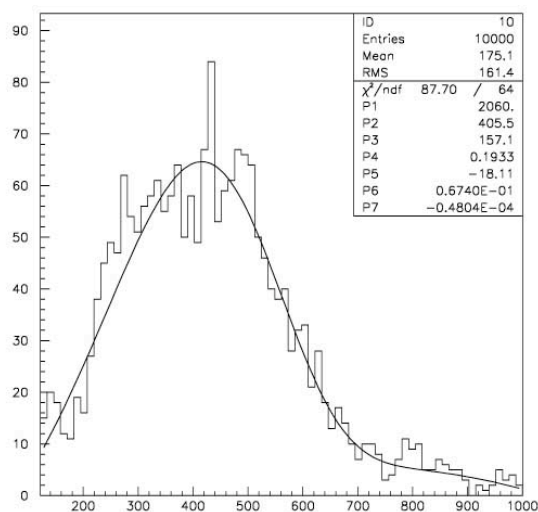
① 今回の実験では、PMT と石英はグリースで接着されているが、その境界面でのエネルギー損失の影響を調べるため、PMT にのせる石英のブロック数をかえ、ピーク値とガラスの厚さの関係について調べる

② 宇宙線は、 Sr^{90} の β 線と違い、石英を通り抜けるが、その際 PMT のダイノードからたたき出されたの影響を調べるため Sr^{90} の β 線と宇宙線それぞれのチェレンコフ光発生時の発生光子数を計算する。そして、それぞれのピーク値を比較する

6.3 ピーク値とガラスの厚さの関係

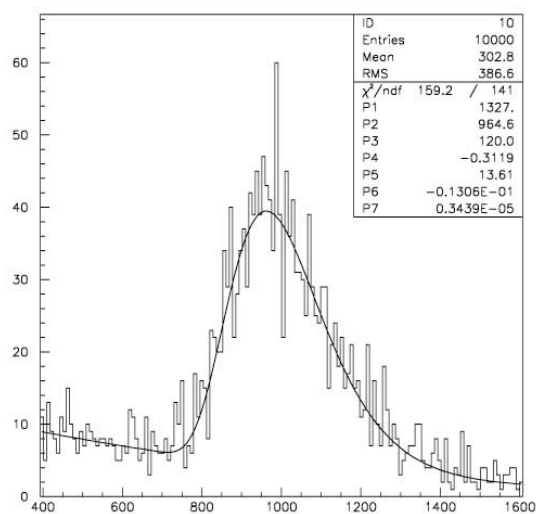
以下は、石英のブロック数を0個・1個・2個と変え、それぞれ10000[events]データを収集したグラフである。

《石英0個》 ピーク=405.5 [counts]



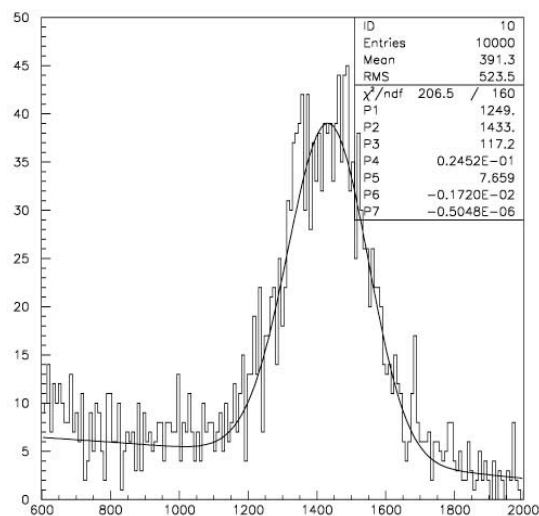
グラフ 6.4

《石英1個》 ピーク=964.6 [counts]



グラフ 6.5

《石英 2 個》 ピーク = 1433 [counts]



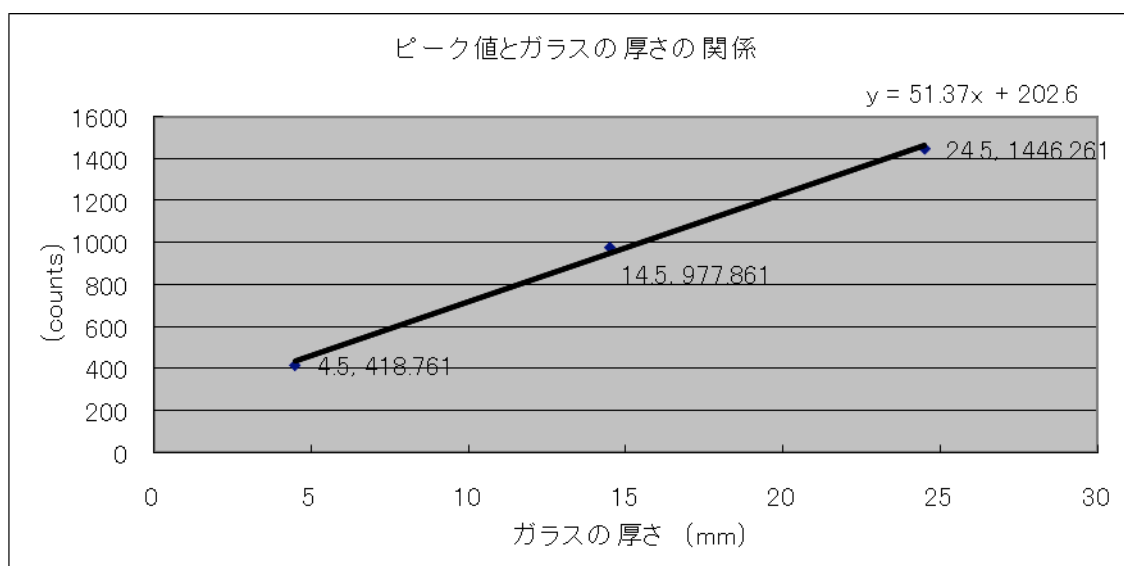
グラフ 6. 6

以上の結果より、ピーク値とガラスの厚さの関係についての表とグラフは、以下のようになる。

※以下の結果には、PMT の窓の厚さ : 4.5mm、ペDESTAL : -13.261[counts]を考慮してある。

ガラスの厚さ [mm]	ピークの位置 [counts]
4.5	418.8
9.5	977.9
14.5	1446.3

表 6. 7



グラフ 6. 8

グラフ 6. 8 は、ピーク値はガラスの厚さに比例して大きくなっており、グラフが直線になっている。よって、境界面でのエネルギー損失は非常に少なく、影響は考慮しなくてよいことが確認できる。

6.4 光子数の計算

光子数を計算するに当たり、以下の式を用いる。

$$-\frac{dE}{dx} = D\rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I} \right) - \beta^2 \right] \left[\text{Mev/cm} \right] \quad \text{ベーテ・ブロッホの式}$$

$$\frac{dN}{dx} = 475 z^2 \sin^2 \theta_c \left[\frac{\text{photons}}{\text{cm}} \right]$$

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$$

$$\beta = \frac{P}{E} = \frac{\sqrt{E^2 - m_e^2}}{E}$$

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

ここで、

ρ : density of absorbing material = 2.2[g/cm³]

Z : atomic number of absorbing material = 10[g]

A : atomic weight of absorbing material = 60.08[g]

z : charge of incident particle = - 1

m_e : electron mass = 0.511[Mev/c²]

c : 3.0×10⁸[m/s]

I = 135.6

D = 0.3071

とする。

【 Sr^{90} について】

チェレンコフカウンターを作成するのに用いたのは、厚さ 10mm・半径 25mm・重さ 43.176g の円柱型石英である。

β 線が厚さ 10mm の石英を突き抜ける時のエネルギー損失 ΔE は、

$$\begin{aligned} \Delta E &= \left(\frac{dE}{dx} \right) \cdot x \cdot \rho \\ &= \left(\frac{43.176}{2.5 \times 2.5 \times \pi} \right) \cdot 1 \cdot 1.699 \\ &= 3.7378 \\ &\cong 3.7 [\text{Mev}] \end{aligned}$$

Sr^{90} の β 線の最大エネルギーは 2.2[Mev]なので、 β 線は石英ブロック中で止まっていることが分かる。

そこで光子数の計算としては、チェレンコフ光の臨界エネルギーの 0.67[Mev]をきるまで、石英を 0.1[mm]ごとに区切って計算する。

入射エネルギーを $E = 2$ [Mev]として、最初に 0.1[mm]通過時の発生光子数を求める。

$$\beta = \frac{\sqrt{E^2 - m_e^2}}{E} = \frac{\sqrt{2^2 - 0.511^2}}{2} = 0.97$$

したがって、

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0.97^2}} = 5.77$$

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} = \frac{1}{1.5 \times 0.97} = 0.69$$

よって、

$$\frac{dN}{dx} = 475z^2 \sin^2 \theta_c = 475 \cdot (-1)^2 \cdot (1 - 0.69^2) = 249 \left[\frac{\text{photons}}{\text{cm}} \right]$$

今、0.1[mm]通過時を考えているので、発生光子数は 2.49 [photons]となる。

また、

$$-\frac{dE}{dx} = D \cdot \rho \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I} \right) - \beta^2 \right] = 16.25 \left[\frac{\text{Mev}}{\text{cm}} \right]$$

より、0.1[mm]通過時のエネルギー損失は 0.16 [Mev]となる。

したがって、次の 0.1[mm]通過時の入射エネルギーは $2 - 0.16 = 1.84$ [Mev]となる。

以上の計算を、0.1[mm]ずつ増やしていき臨界エネルギーをきるまでの発生光子数を算出すると、20[photons]となる。

【宇宙線について】

宇宙線のエネルギーは非常に大きいため、10[mm]の石英を突き抜ける際のエネルギー損失はないものとして考える。

$P_\mu = 1$ [Gev]、 $M_\mu = 106$ [Mev]として発生光子数を求めると、

$$\frac{dN}{dx} = 475z^2 \sin^2 \theta_c \left[\frac{\text{photons}}{\text{cm}} \right]$$

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$$

$$E_\mu = \sqrt{P_\mu^2 - M_\mu^2}$$

$$\beta = \frac{P}{E_\mu}$$

より、

$$E_\mu = \sqrt{P_\mu^2 - M_\mu^2} = \sqrt{1000^2 - 106^2} = 994.$$

したがって、

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dx} &= 475z^2 (1 - \cos^2 \theta) \\ &= 475z^2 \left\{ 1 - \left(\frac{E_\mu}{nP} \right)^2 \right\} \\ &= 475 \cdot (-1)^2 \left\{ 1 - \left(\frac{994}{1.5 \cdot 1 \times 10^3} \right)^2 \right\} \\ &= 266 \left[\frac{\text{photons}}{\text{cm}} \right] \end{aligned}$$

よって、発生光子数は **226(photons)** となる。

PMT の窓の厚みは 4.5mm なのでそれを考慮すると、実際に測定を行った時の発生光子数は、 $226 \times 1.45 = 327.7 \cong$ **328(photons)**

以上の結果を整理すると、

^{90}Sr での ADC 分布の一番高いところは約 60(counts)、発生光子数は 20(photons)。

宇宙線での ADC 分布のピーク値は約 965(counts)、発生光子数は 328(photons)。

それぞれの比をとってみると、

$$\text{『ADC 分布』} \quad \frac{965}{60} = 16.08 \cong 16.1$$

$$\text{『発生光子数』} \quad \frac{328}{20} = 16.4$$

波高の比と発生光子数の比はほぼ一致することから、グラフは石英ブロックに μ 粒子が入って発生したチェレンコフ光をみており、ダイノードにたたき出された e^- の影響は少ないと考えられる。

第7章 TDCによる宇宙線の測定

7.1 Block Diagram

◎チェレンコフカウンター+TDC

PMT 1・2 はシンチレーションカウンター、PMT3 はチェレンコフカウンターとなっている。PMT 1.2 をトリガーカウンターとしTDCを用いて測定した。

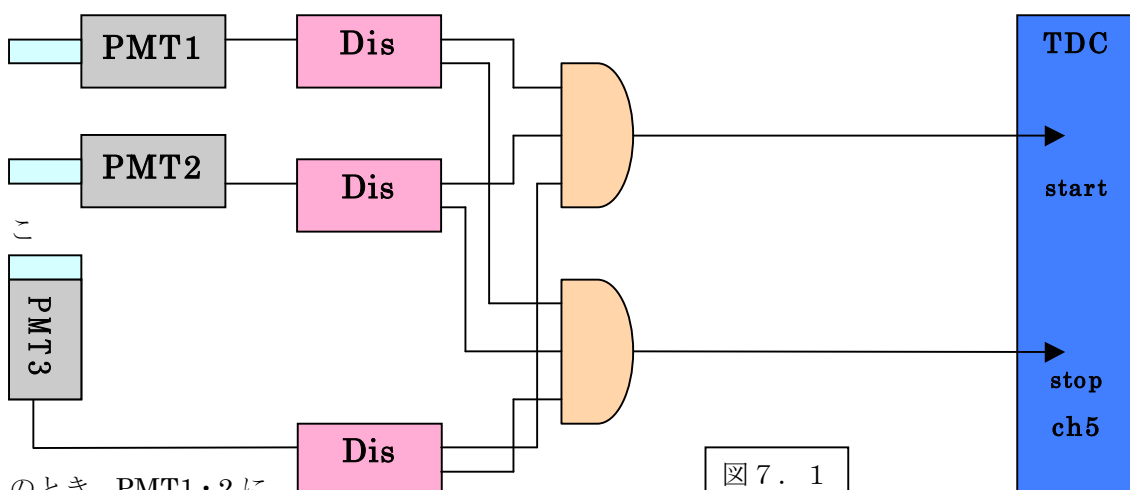


図 7. 1

のとき、PMT1・2には1400[V]、PMT3には2000[V]の電圧をかけた。

◎シンチレーションカウンター+TDC

PMT 1・2・3 はシンチレーションカウンターとなっている。PMT 1.2 をトリガーカウンターとしTDCを用いて測定した。

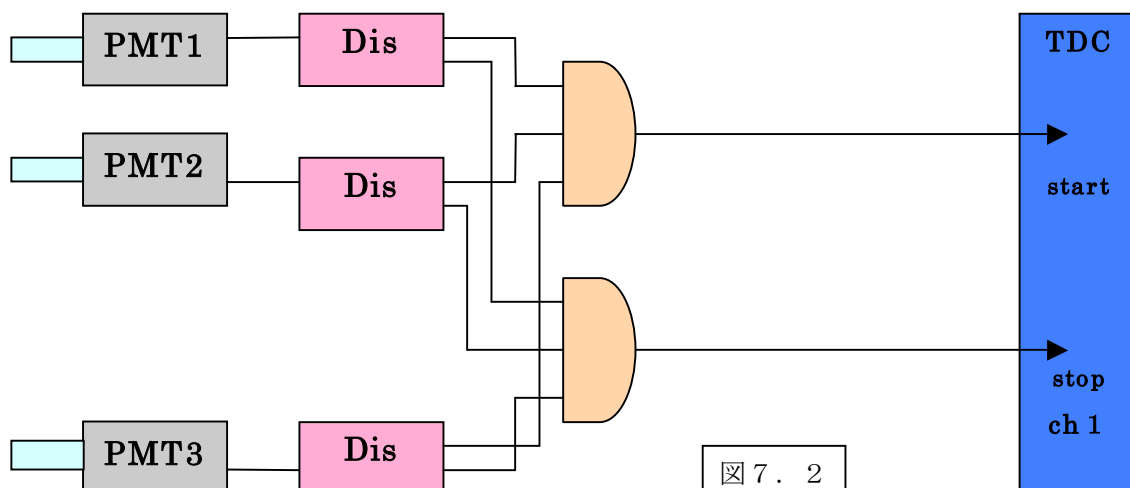


図 7. 2

このとき、PMT1・2には1400[V]、PMT3には2000[V]の電圧をかけた。

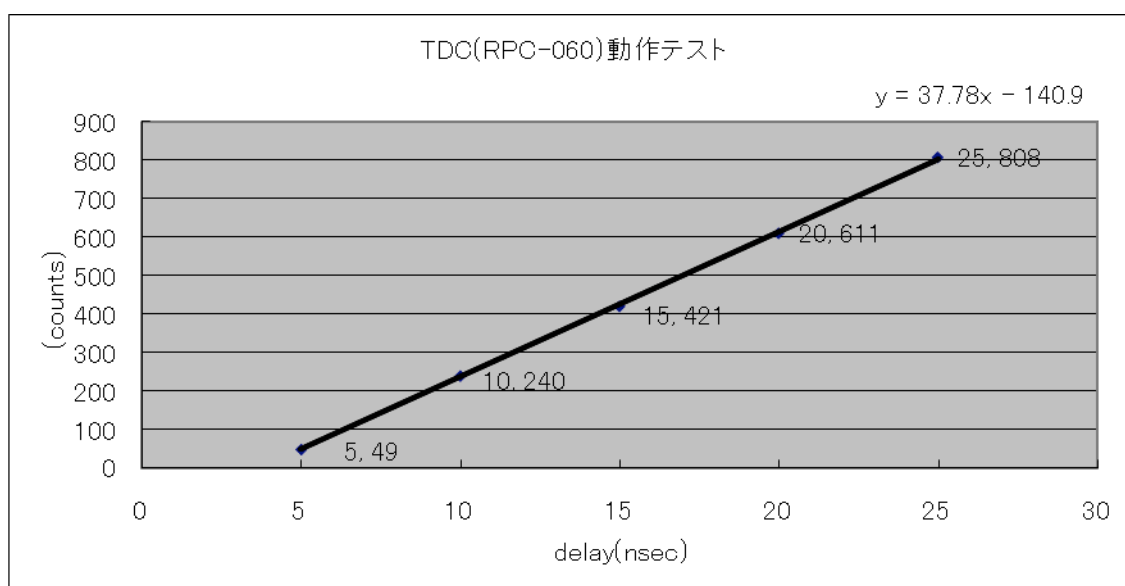
7.2 TDC(RPC-060 ch1)の動作テスト

Clock Generator の信号を用いて start までの時間と stop までの時間を変化させ、TDC のカウント数を測った。

Delay[ns]	TDC の count 数
5	49
10	240
15	421
20	611
25	808

表 7. 3

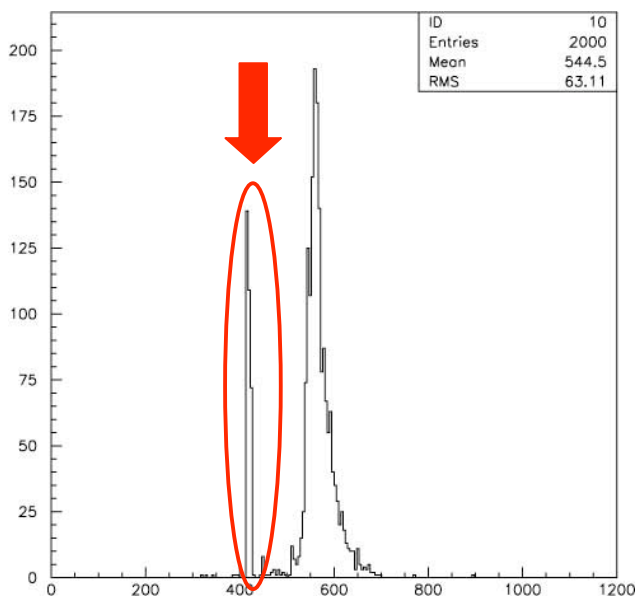
下記のようなグラフになり、ペDESTALは-140.9[counts]と判断できる。



グラフ 7. 4

7.3 測定結果・考察

7.3.1 チェレンコフカウンターによる宇宙線の測定結果・考察



グラフ 7. 5

結果より、二つのピークが出てきていることがわかる。

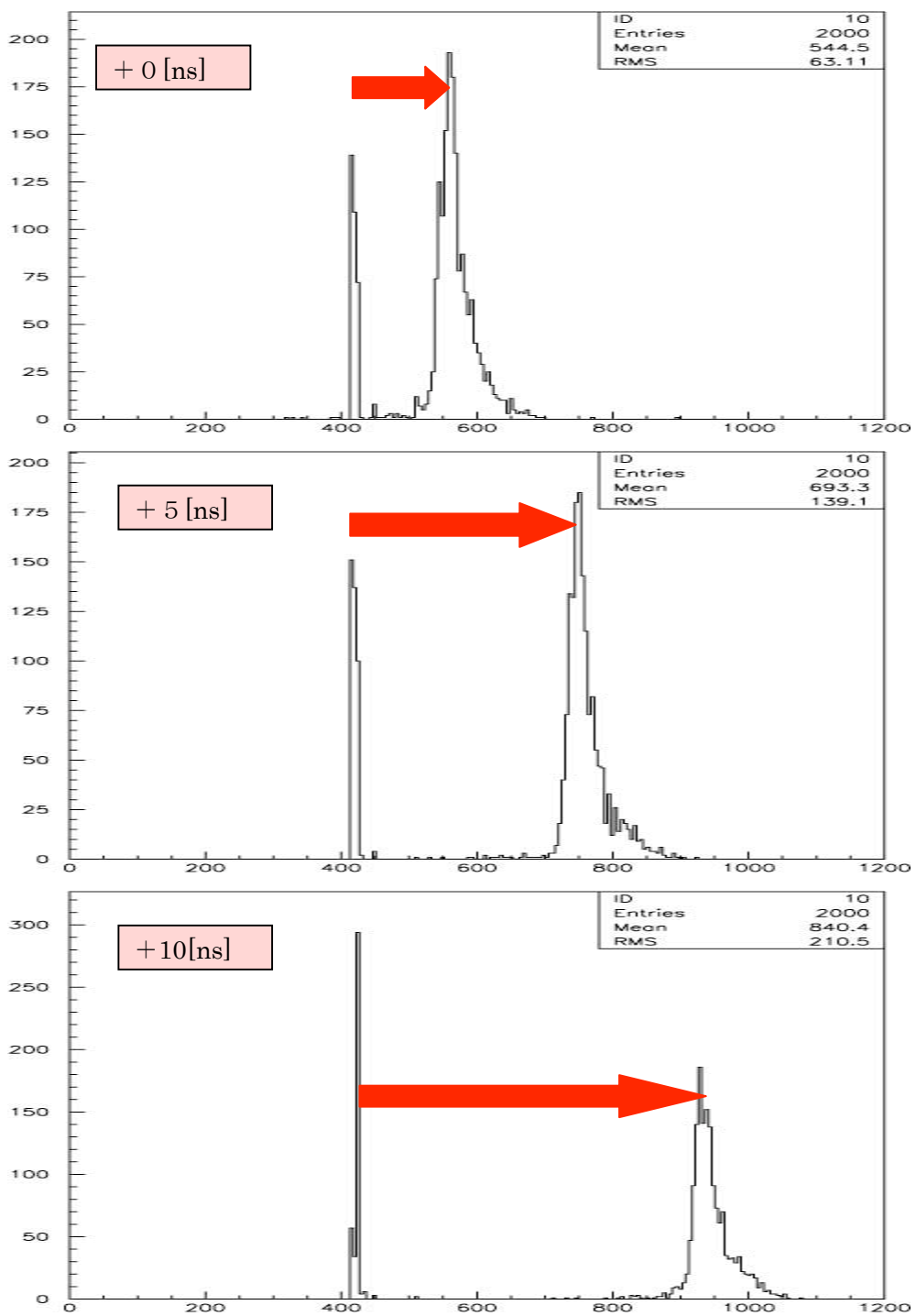
右側のピークは、目的としている宇宙線のピークと思われる。だが、左側のピークが一体なにをとらえたものなのか。

今回に実験では、三つの PMT の信号を Coincidence した信号をみているため、空のイベントが出てくるはずはない。ダイノードからたたき出された e^- による影響なのか。

次に、左側のピークが何によるものなのかを調べるため、Delay を変化させて同様のセットアップでデータを取ってみる。

7.3.2 時間差(Delay)での比較

図7. 2の Dis 3 から Coin 2 までの Delay を変化させ、同様のセットアップでデータを取った。



グラフ 7. 6

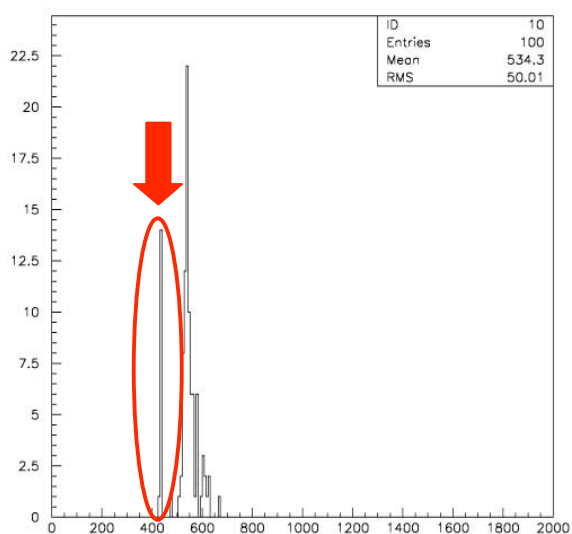
右側のピークだけが、変化させた Delay の分だけ移動した。ダイノードからたたき出された e^- の影響であれば、左側のピークにも何らかの変化がみられるはずだが、何も変化はない。

よって、ダイノードからたたき出された e^- の影響ではないことが分かった。

7.3.3 改善策

今、問題となっている左側のピークの改善策として、以下の2つの変更を行った。

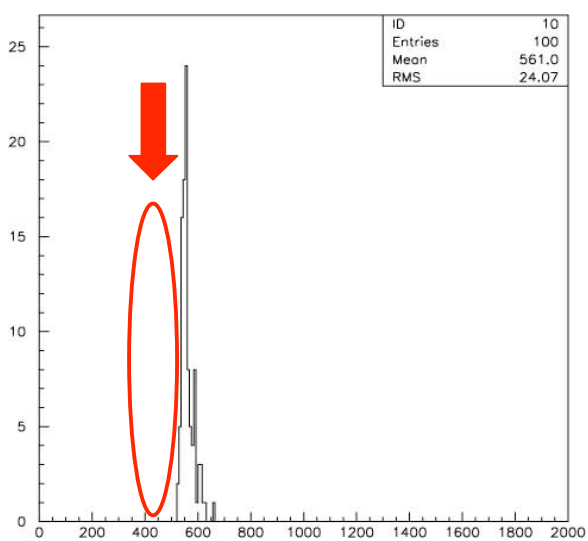
①Coincidence のモジュールを変えた



グラフ 7. 7

Coincidence のモジュールを変えてみたが、測定結果は以前と同様でピークは2つあり、左側のピークには何の変化もみられなかった。

②TDC の STOP チャンネルを変えた (ch1 から ch5 へ)



グラフ 7. 8

TDC の STOP チャンネルを変えてみたところ、ピークは1つになり問題となっていた左側のピークはなくなった。

以上の結果より、以前使用していた TDC の STOP チャンネル(ch 1)は何らかの原因により不具合を起こしていたものとみられる。そこで、以下では STOP チャンネルを ch 5 に変更して実験を行う。

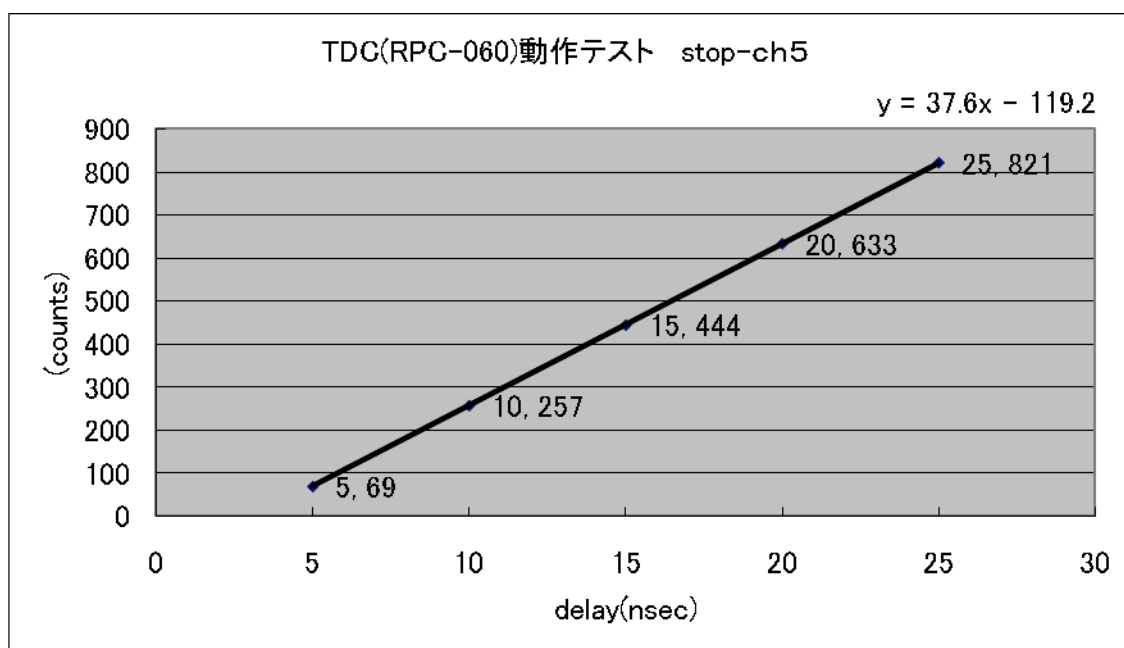
7.4 TDC(RPC-060 ch5)の動作テスト

Clock Generator の信号を用いて start までの時間と stop までの時間を変化させ、TDC のカウント数を測った。

Delay[ns)	TDC の count 数
5	69
10	257
15	444
20	633
25	821

表 7. 9

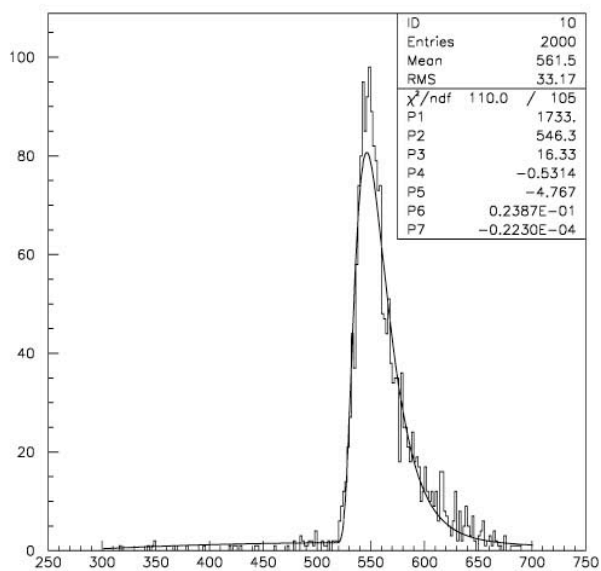
下記のようなグラフになり、ペDESTALは-119.2[counts]と判断できる。



グラフ 7. 10

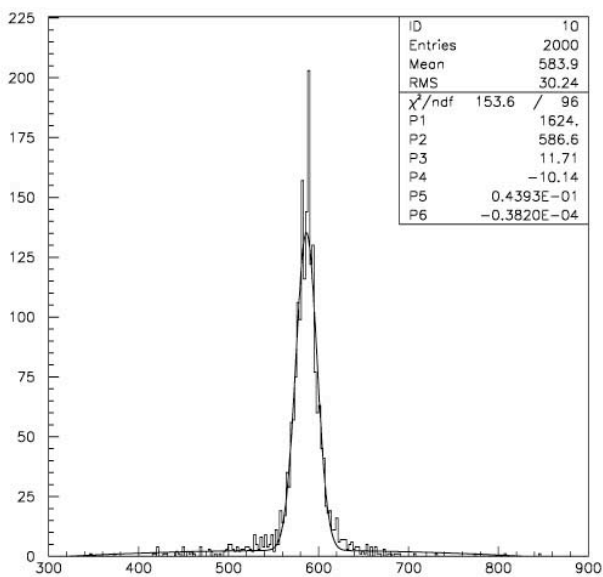
7.5 測定結果・考察

◎チェレンコフカウンター



グラフ 7. 11

◎シンチレーションカウンター



グラフ 7. 12

TDC の動作テストより、 $y = 37.75x - 140.9$ という式が得られた。式の傾き 37.75 は、1 [nsec] 当たりの count 数を表している。よって、1 [nsec] 当たり 37.8 [counts] ということになる。1 [count] 当たりでは、26.5 [psec] になる。

以上の結果から、それぞれの分解能を計算すると、

◎チェレンコフカウンター

$$16.33 \times 26.5 = 432.745$$

よって分解能は、432.7 [psec]

◎シンチレーションカウンター

$$11.71 \times 26.5 = 310.315$$

よって分解能は、310.3 [psec]

シンチレーションカウンターの方が、時間分解能は良い。

TDC のグラフを見てみると、チェレンコフカウンターの方はピークのテールが伸びている。つまり、小さいパルスは遅れてきている。ADC のグラフでもチェレンコフカウンターは、ピークの前後(特に前)に小さなパルスが多くきている。この小さなパルスが、チェレンコフカウンターでの時間分解能を悪くしているものと思われる。

そこで、次に ADC と TDC でどれくらいのパルスが早くまたは遅れてきているのかを調べ、補正を行い時間分解能をより良くする。

第8章 ADC と TDC による宇宙線の測定

8.1 Block Diagram

PMT 1・2 はシンチレーションカウンター、PMT3 はチェレンコフカウンターとなっている。PMT 1.2 をトリガーカウンターとし ADC と TDC を用いて測定した。

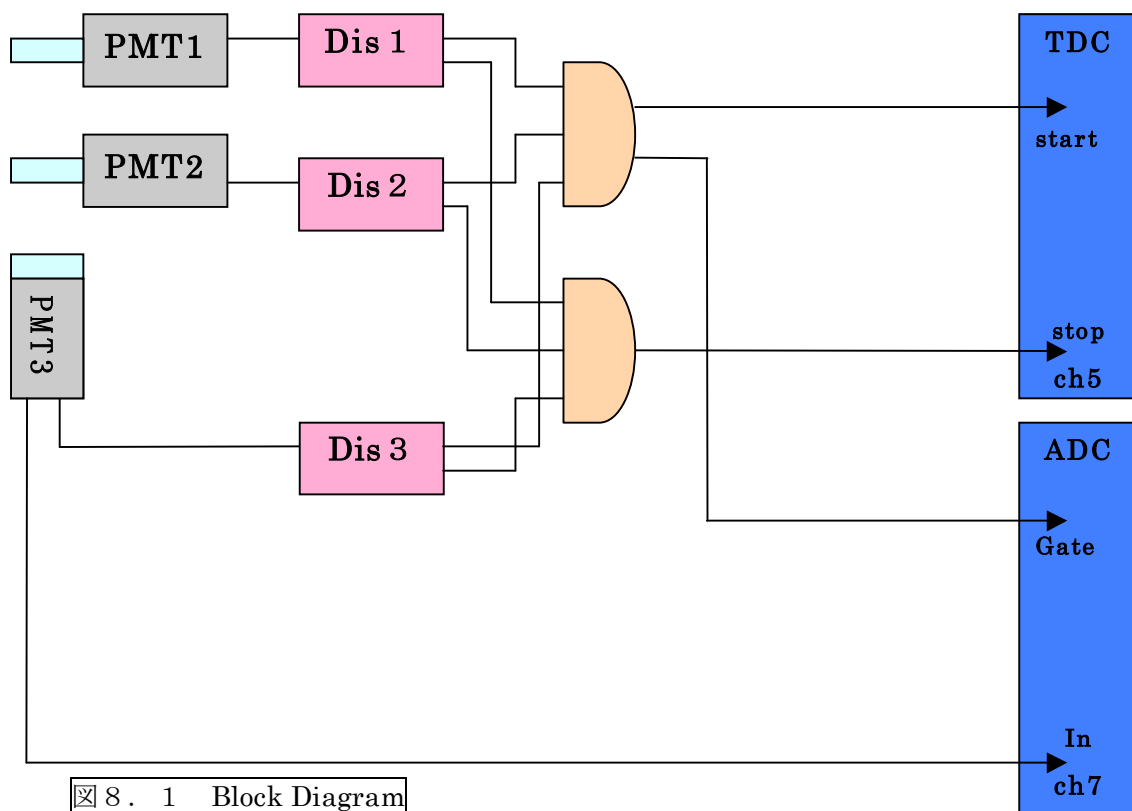
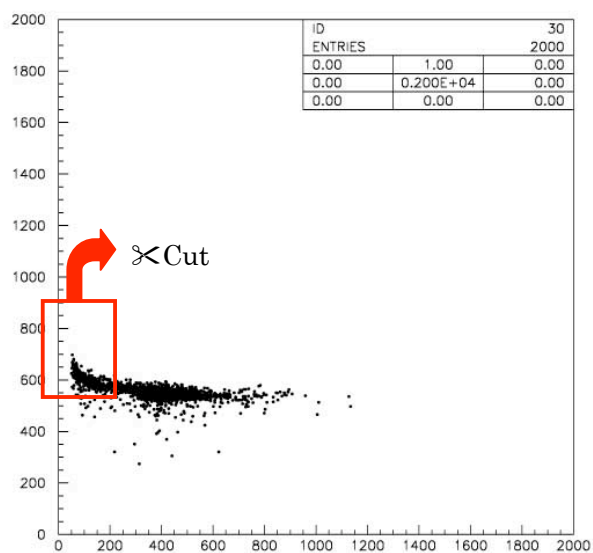


図 8. 1 Block Diagram

このとき、PMT1・2 には 1400[V]、PMT3 には 2000[V]の電圧をかけた。

8.2 測定結果・考察

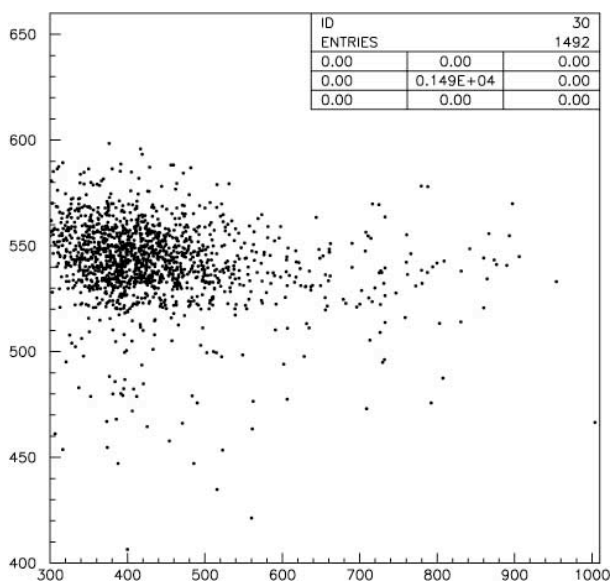
◎ 2次元プロット



グラフ 8. 2

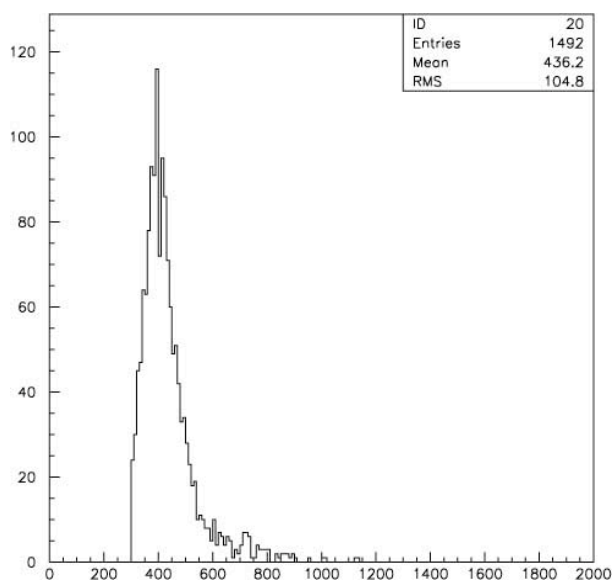
上の二次元プロットで時間分解能を悪くしていると考えられる、TDC 分布でのパルスが遅れてきている部分(ADC 分布でのパルスが早く来ている部分)を Cut したグラフを以下に示す。

◎二次元プロット(Cut)



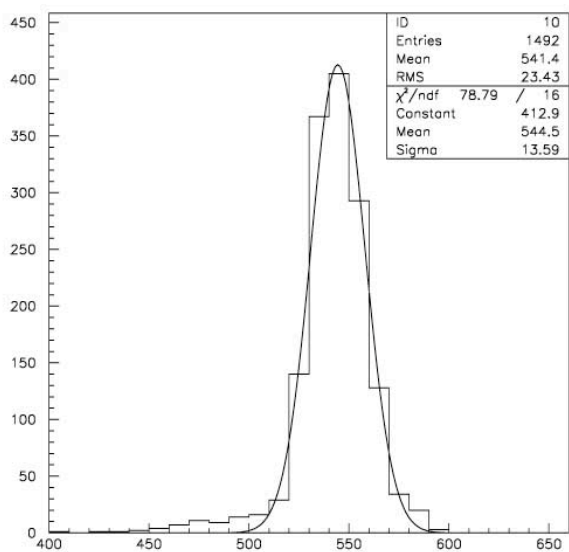
グラフ 8. 3

◎ADC プロット(Cut)



グラフ 8. 4

◎TDC プロット(Cut)

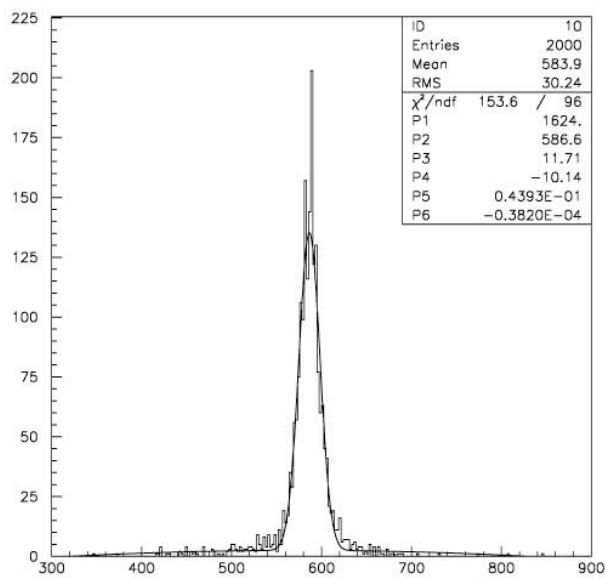


グラフ 8. 5

時間分解能を悪くしていると考えられる部分のデータを Cut することにより、より良い時間分解能を得られたと思われる。

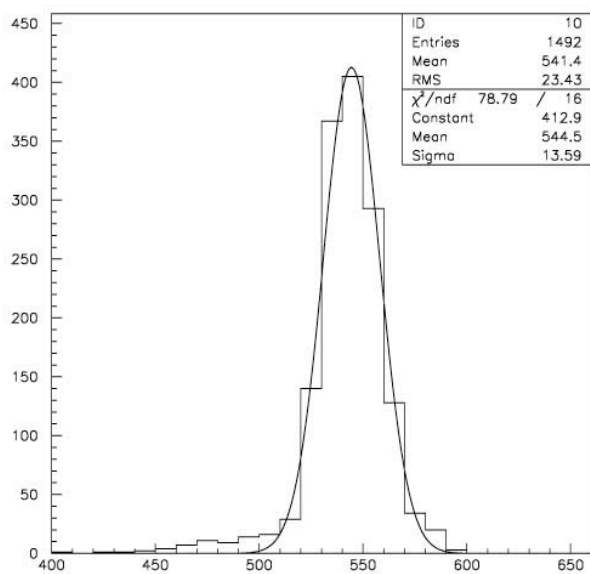
8.3 分解能の比較

◎シンチレーションカウンター



グラフ 8. 6

◎チェレンコフカウンター



グラフ 8. 7

結果から、それぞれの分解能を計算すると、

◎チェレンコフカウンター

$$13.59 \times 26.5 = 360.135$$

よって分解能は、**360.1 [psec]**

◎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の結果は変わっていない。

よって分解能は、**310.3 [psec]**

データの Cut を行うことにより、より良い時間分解能を得ることが出来た。

第9章 まとめ・今後の課題

まず、第一目標であったチェレンコフ光の観測ができた。また、チェレンコフカウンターとシンチレーションカウンターのそれぞれについて時間分解能を算出できた。さらに、本来チェレンコフカウンターの方がシンチレーションカウンターより良い時間分解能が出せることから、チェレンコフカウンターの時間分解能を良くするための実験まで持っていくことが出来た。

今後は、最後に行った ADC・TDC の二次元プロットを取る実験において、TDC 分布でのパルスが遅れてきている部分(ADC 分布でのパルスが早く来ている部分)の補正関数を考え、時間分解能をより良くしたい。実験ではチェレンコフ光がより多く発生した方がよいので、次からは石英を二つ重ねたチェレンコフカウンターで実験を行いたい。また、トリガーがどこまでできているのか、そのあいまいさも検討していきたい。

参考文献

- ・2004 年度卒業論文 「データ収集と解析システムの構築とミューオンのエネルギー損失の測定」
- ・1999 年度卒業論文 「PC-Linux を用いた宇宙線データの収集解析システムの開発と製作」
- ・2002 年度卒業論文 「Cherenkov 光の測定—2002 年度 P6 卒業研究」
城戸 証・郡司 卓・中森 健之
- ・奈良女子大学 物理学特別実験「ミューオンのエネルギー損失測定」使用教材
- ・「ベータ崩壊と弱い相互作用」培風館 著 … 藤井 昭彦・山田 勝美・森田 正人
- ・「素粒子物理入門 基本技術から最先端まで」培風館 著 … 渡邊 靖志

謝辞

卒業研究を行うに当たり、先生、先輩方にお世話になりました。心よりお礼申し上げます。特に、指導教官の宮林先生にはお忙しい中ご指導いただき、感謝の気持ちでいっぱいです。ありがとうございました。

野口先生、林井先生にはゼミやミーティングで日頃よりご指導していただきました。

お世話になった方々全員に感謝申し上げます。本当にありがとうございました。