

2007 年度卒業論文

チェレンコフ光による
荷電粒子の測定

奈良女子大学 理学部 物理科学科 4 回生

愛知七恵・岩下友子

【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	原理	4
2.1	チェレンコフ光	4
2.2	シンチレーション光	4
2.3	宇宙線	5
2.4	宇宙線の反応	5
2.5	使用する線源	6
2.6	荷電粒子のエネルギー損失と光子数の計算	8
第 3 章	実験装置の概要	13
3.1	光電子増倍管	13
3.2	チェレンコフカウンター	14
3.3	シンチレーションカウンター	16
第 4 章	データ収集・解析装置の概略	17
4.1	camdrv	17
4.2	CAMAC 規格の概略	18
4.3	NIM 規格の概略	19
4.4	データ収集プログラムの概要	20
4.5	使用するモジュールの名称と説明	21
4.6	ADC (Analog to Digital Converter)	21
4.7	TDC (Time to Digital Converter)	22
第 5 章	^{90}Sr を使った予備実験	24
5.1	Block Diagram	24
5.2	測定結果・考察	24
5.3	放射媒体による比較	31

第 6 章 宇宙線の測定	33
6.1 Block Diagram	33
6.2 測定結果・考察	34
第 7 章 ADC と TDC による宇宙線の測定	39
7.1 TDC による宇宙線の測定	39
7.1-1 Block Diagram	39
7.1-2 測定結果・考察	40
7.2 ADC と TDC による宇宙線の測定	41
7.2-1 Block Diagram	41
7.2-2 測定結果・考察	42
第 8 章 まとめ・今後の課題	43
参考文献	44
謝辞	45

第1章 はじめに

1.1 実験の目的

高エネルギー物理学は、物質の究極的な構成要素とそれらの間に働く相互作用についての性質を明らかにする学問である。そのための高エネルギー実験では様々な物理量を精度よく検出する必要がある。検出器には様々な種類があり、実験目的によって使用する検出器は分けられる。

本実験では、昨年製作されたチェレンコフカウンターに基づき、新しい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測定を行う。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本実験の目的とする。

1.2 本論文の構成

本論文では、はじめにチェレンコフ光等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 原理

2.1 チェレンコフ光

透明物質中を通過する荷電粒子の速度 v が物質中の光速 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線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。

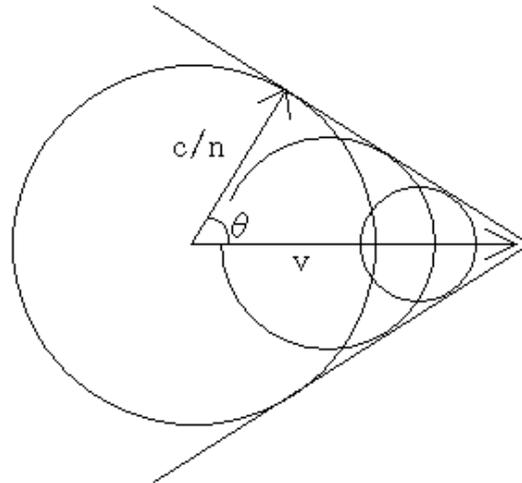


図 2.1 チェレンコフ光

光を出す条件は、

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (\beta = v/n, n = \text{屈折率}) \quad (\text{式 2.1})$$
$$\beta \geq \frac{1}{n}$$

となり、光子の数は $\sin^2 \theta$ に比例する。

また、チェレンコフ光は媒質中を粒子が発生条件を超える速度で走る間ずっと発光する。

2.2 シンチレーション光

荷電粒子が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。これをシンチレーション(Scintillation)といい、ある種の物質ではこの発光が著しい。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く、原子などが励起して元に戻るまでの間だけ発光する。

2.3 宇宙線

宇宙線には宇宙空間から直接飛来する一次宇宙線と、大気中の原子核と一次宇宙線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%は陽子で、残りはHe、C、Oなどの原子核である。陽子は大気中の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、透過力の強いミュオンは運動エネルギーの高い状態で地上に到達する。

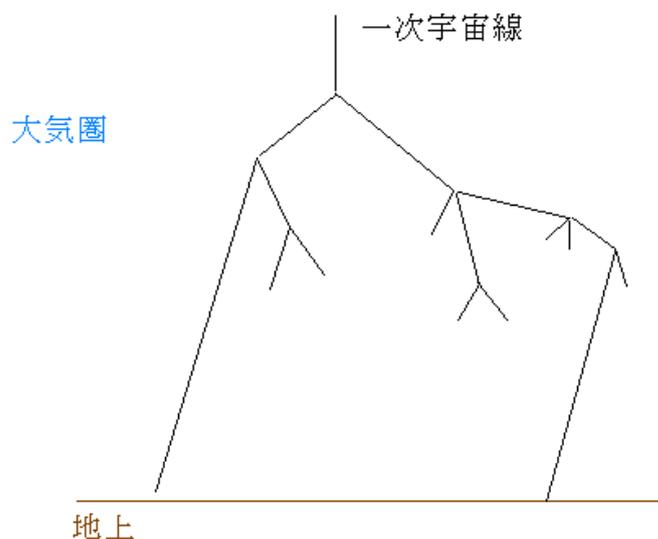
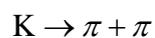
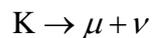


図 2.2 カスケードシャワーの様子

2.4 宇宙線の反応

一次宇宙線は大気中の原子核との相互作用で多くの π 中間子やK中間子が生成される。さらに π 中間子やK中間子は以下のように崩壊する。



静止系で π^0 の寿命は $\tau_{\pi^0} = 0.83 \times 10^{-16}(\text{sec})$ 、 π^\pm の寿命は $\tau_{\pi^\pm} = 2.6 \times 10^{-8}(\text{sec})$ 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。

$$\begin{aligned}\mu^- &\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \\ \mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu\end{aligned}\tag{式 2.3}$$

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

2.5 使用する線源

本実験では予備実験に ^{90}Sr を使用した。 ^{90}Sr 原子核は最大運動エネルギー 0.546MeV の β 線を出して ^{90}Y に崩壊する。さらに ^{90}Y は最大運動エネルギー 2.28MeV の β 線を出して ^{90}Zr に崩壊する。

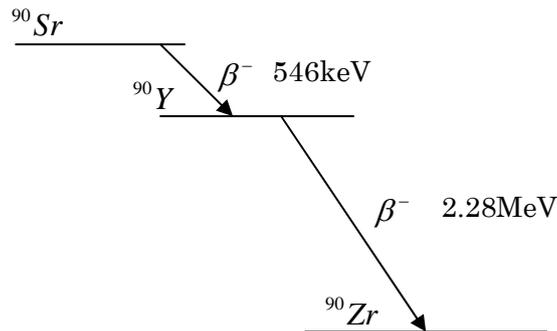


図 2.3 ^{90}Sr の崩壊図

β 線のエネルギー分布は(式 2.4)で与えられる。

$$N(E) \propto E \sqrt{E^2 - (mc^2)^2} (E_{\max} - E^2)\tag{式 2.4}$$

このとき放出される電子は運動しているため(式 2.5)を満たす。

$$E = T + mc^2\tag{式 2.5}$$

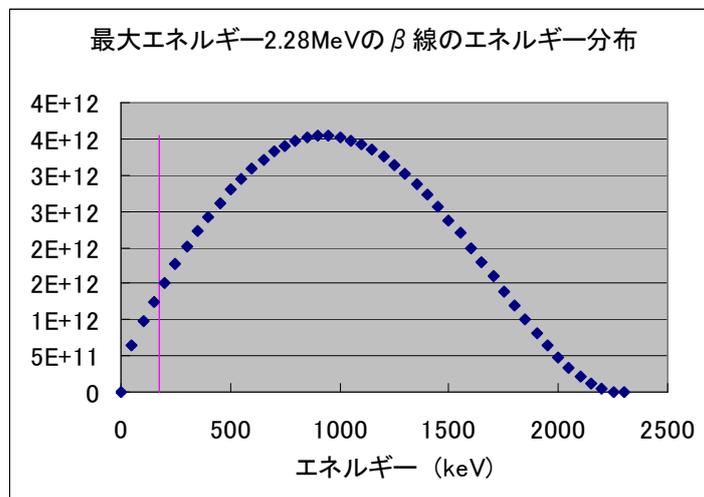
よって、

$$N(T) = (T + mc^2) \sqrt{T^2 + 2Tmc^2} (T_{\max} - T)^2\tag{式 2.6}$$

となる。

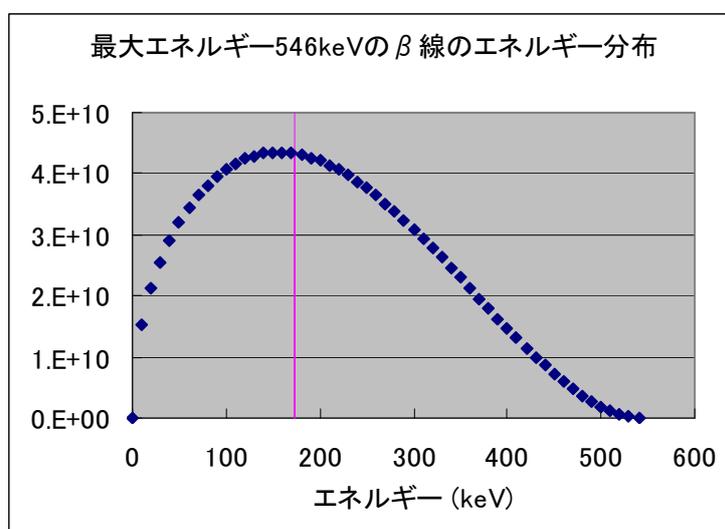
ここで、 ^{90}Sr のエネルギーで計算した結果のグラフを次に示す。

$T_{\max}=2.28\text{MeV}$ のとき



グラフ 2.1

$T_{\max}=546\text{keV}$ のとき



グラフ 2.2

縦線はチェレンコフ光の発光条件である。

2.6 荷電粒子のエネルギー損失と光子数の計算

荷電粒子がエネルギーを失う過程には制動放射によるもの(radiation loss)と衝突によるもの(collision loss)がある。物質に固有の臨界エネルギー(critical energy)が荷電粒子の入射エネルギーよりも大きいとき、エネルギー損失は Bethe-Bloch の公式(式 2.7)に従う。

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{\max}}{I^2} - 2\beta^2 \right] \quad (\text{式 2.7})$$

ここで各記号は以下の通りである。

N_a :アボガドロ数= 6.02×10^{23}

r_e :電子の古典半径= 2.817×10^{-13}

m_e :電子の質量= $0.511(\text{MeV}/c^2)$

ρ :物質の密度

A :物質の質量数

Z :物質の原子番号

z :入射粒子の電荷

I :原子一個を励起するのに必要なエネルギー

また、

$$W_{\max} = \frac{2m_e c^2 \eta^2}{1 + 2S\sqrt{1 + \eta^2} + S^2} \quad (\text{式 2.8})$$

$$\beta = \frac{v}{c}, \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, S = \frac{m_e}{M}, \eta = \beta\gamma, \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

入射粒子の質量 M とすると $M \gg m$ のとき $W_{\max} \approx 2m_e c^2 \eta^2$ となる。

また、 I は

$$\ln I_{\text{eff}} = \frac{\sum a_i Z_i \ln I_i}{Z_{\text{eff}}} \quad (\text{式 2.10})$$

$$Z_{\text{eff}} = \sum a_i Z_i$$

a_i : i 番目の原子の数

Z_i : i 番目の原子の原子番号

I_i : i 番目の原始の平均励起ポテンシャル

で与えられる。そして、各物質の臨界エネルギー E_c は以下で与えられる。

$$E_c \approx \frac{800}{Z + 1.2} (\text{MeV}) \quad (\text{式 2.9})$$

石英、アクリル、水の臨界エネルギーは各々25.6MeV、14.5MeV、86.9MeVとなる。これらが荷電粒子の入射エネルギー(予備実験では ^{90}Sr 2.28MeV)より大きいので、Bethe-Bloch の公式を使うこととする。

光子数は

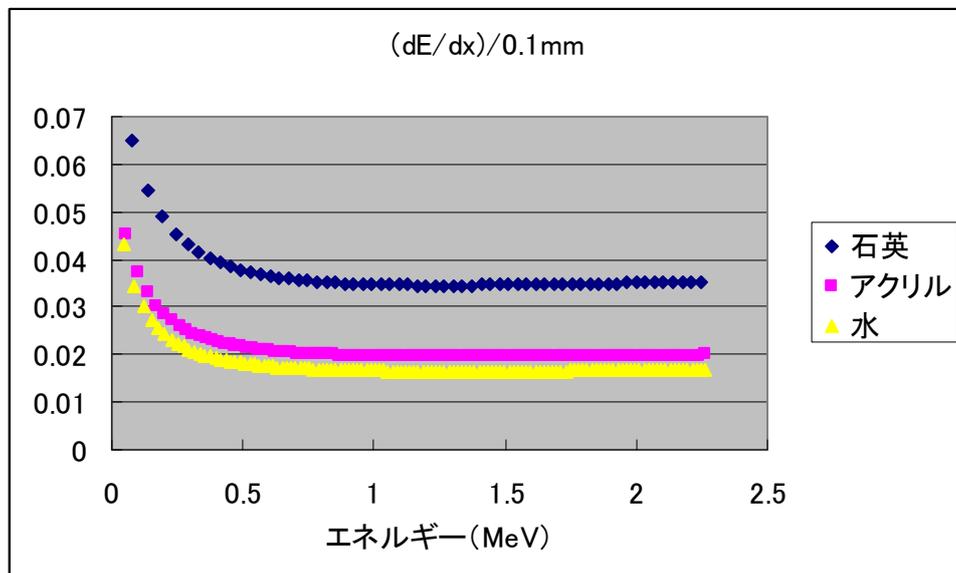
$$\frac{dN}{dx} = 2\pi z^2 \alpha \sin \theta \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{1}{\lambda^2} d\lambda \quad (\text{式 2.11})$$

で与えられ、 $\lambda_1=350\text{nm}$ 、 $\lambda_2=550\text{nm}$ 、 α は微細構造定数で $\alpha=1/137$ より

$$\frac{dN}{dx} = 475z^2 \sin \theta \quad (\text{式 2.12})$$

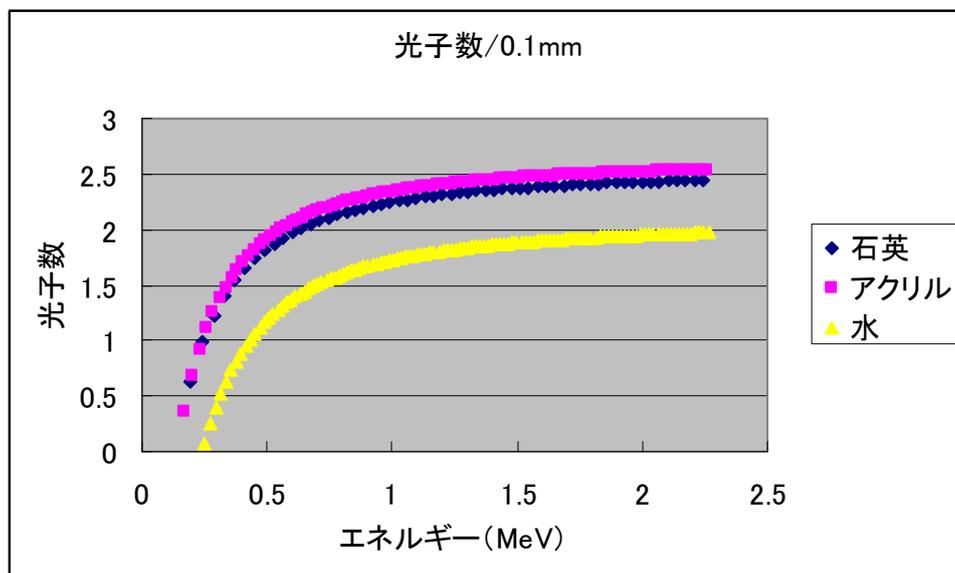
となる。ここで θ はチェレンコフ光の発光条件 $\cos \theta = 1/n\beta$ を満たす。

^{90}Sr を当てたとき放射媒体を 0.1mm ごとに区切って考える。 i 番目の放射媒体でのエネルギー損失を $(dE/dx)_i$ とすると、 i 番目の放射媒体に入射するエネルギーは $2.28 - \sum_{i=1} (dE/dx)_{i-1}$ となる。このエネルギーごとのエネルギー損失を表にすると以下のようになる。



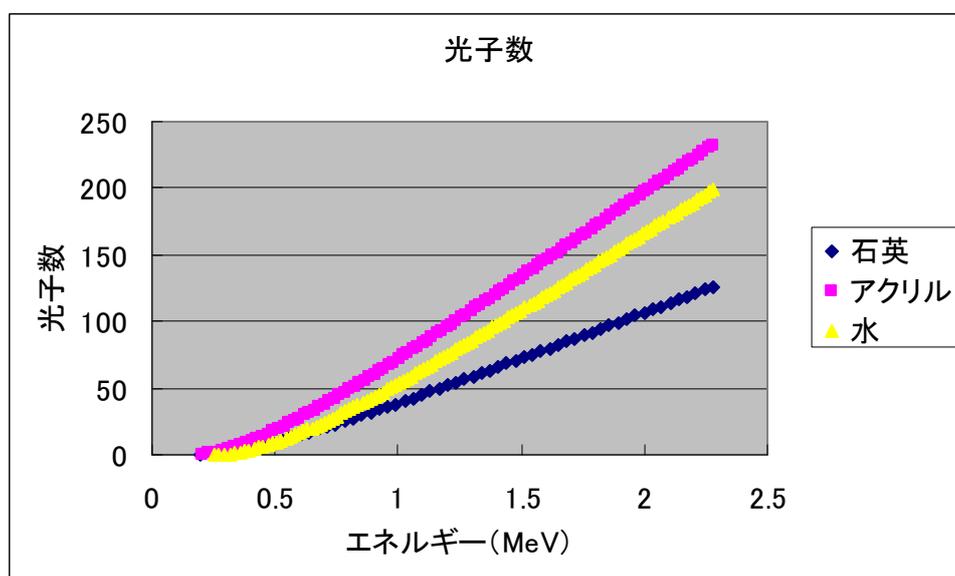
グラフ 2.3

同様にして光子数を計算すると、以下のグラフになる。

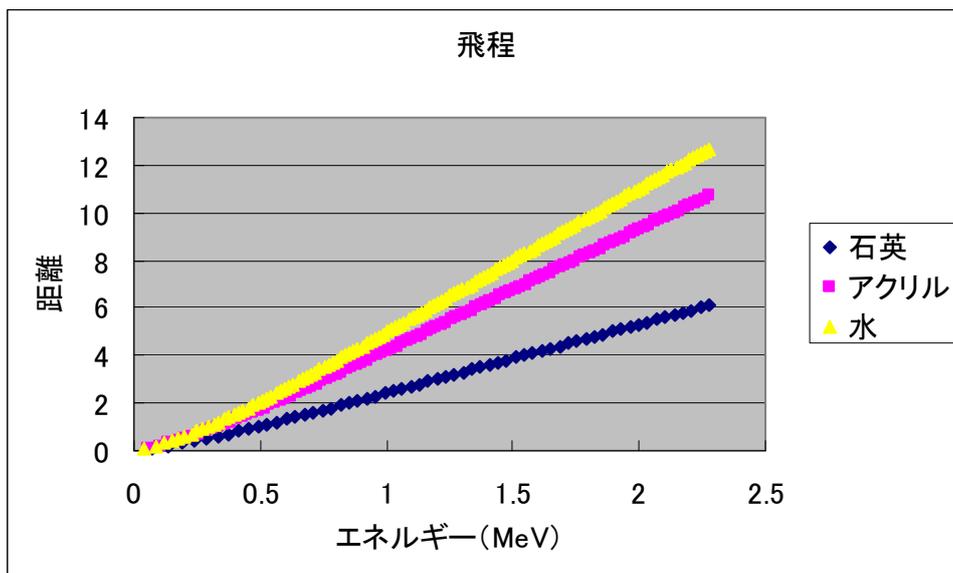


グラフ 2.4

入射エネルギーに対する光子数と放射媒体を貫く距離は以下のとおりである。



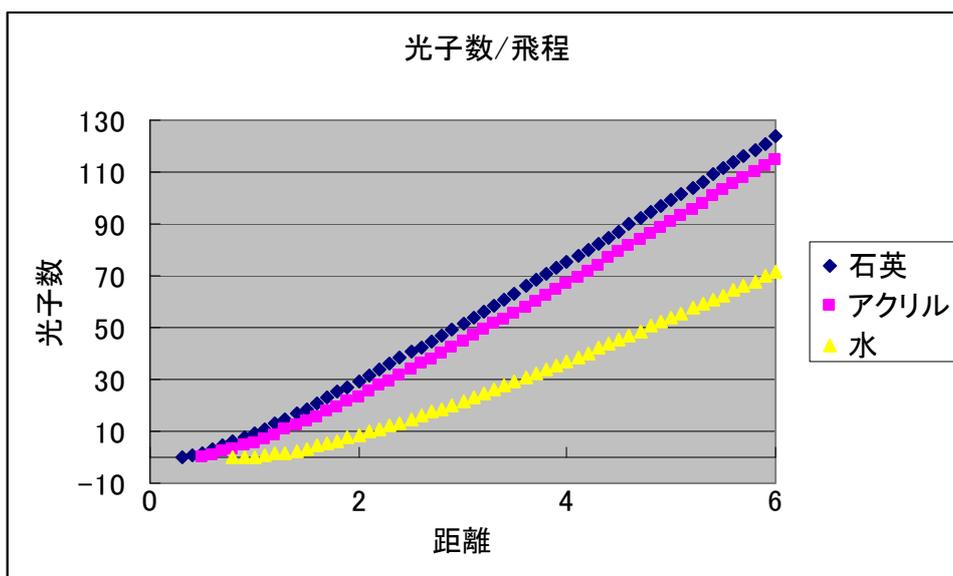
グラフ 2.5



グラフ 2.6

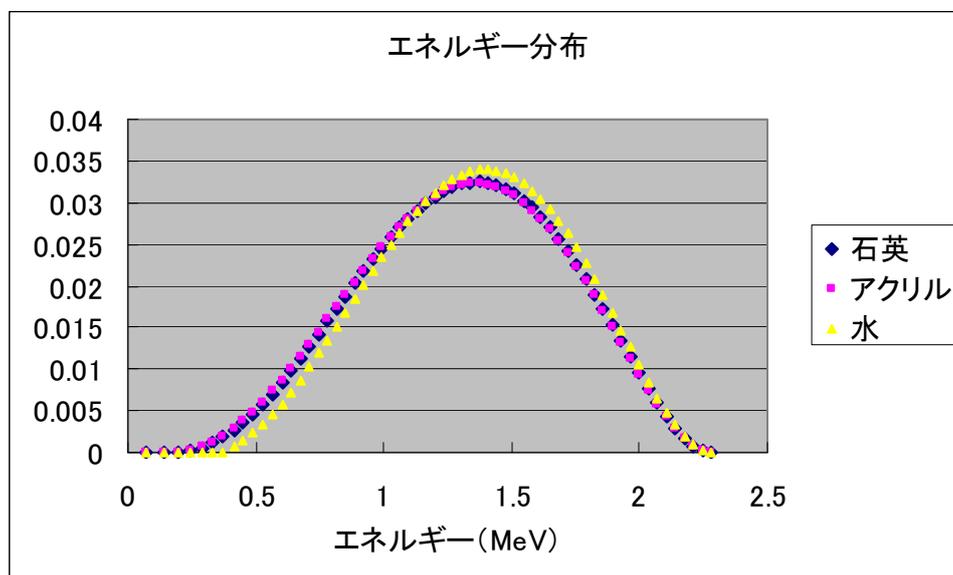
グラフ 2.5 より、入射粒子の運動エネルギーが 0.546MeV のときの光子数は、 2.28MeV のときの光子数より多いことが分かる。よって、本実験では 0.546MeV の β 線は考えないこととし、 2.28MeV のもの考える。

そして、同じ距離進んだときに発生する光子数をグラフにしたものが以下である。これらから、石英の変換効率が良いことが読み取れる。



グラフ 2.7

また、 $T_{\max}=2.28\text{MeV}$ の β 線のエネルギー分布のグラフに光子数の重みを考慮すると、以下のグラフが得られる。



グラフ 2.8

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。

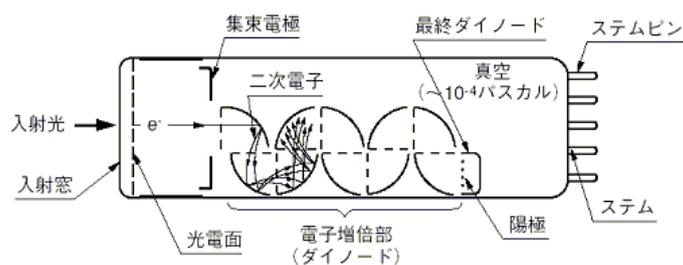


図 3.1 光電子増倍管

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として出力される。

- (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 HAMAMATSU 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

本実験では光電子増倍管にチェレンコフ放射媒体を接着したものをチェレンコフカウンターとして使用した。制作したチェレンコフカウンターは以下の通りである。

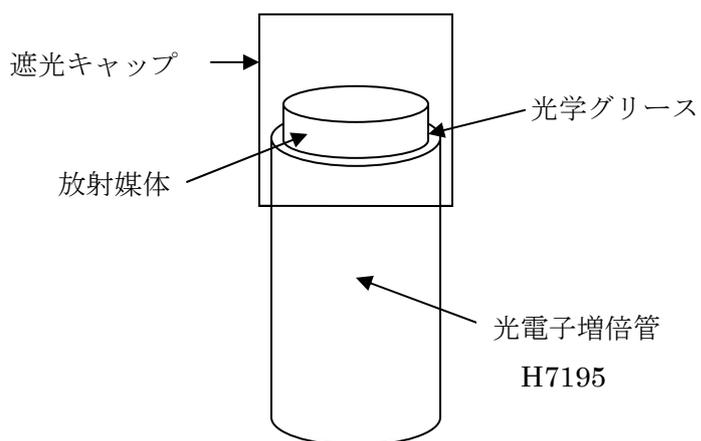


図 3.2 石英・アクリルチェレンコフカウンター

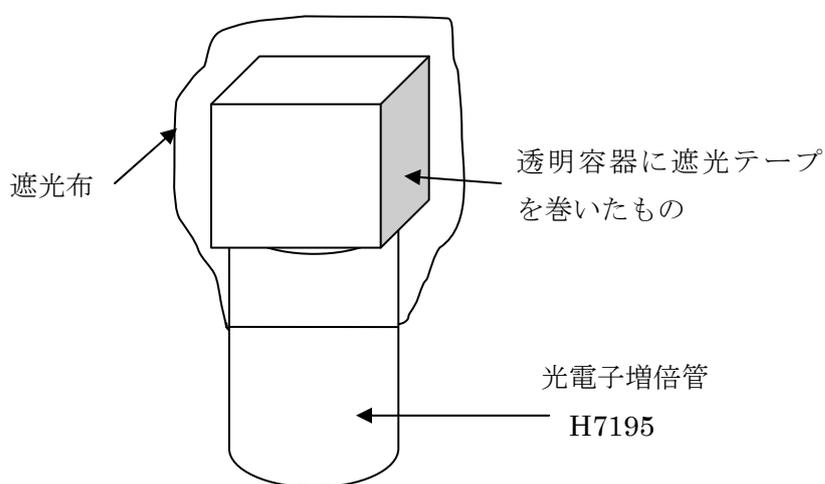


図 3.3 水チェレンコフカウンター

水容器は、遮光テープを巻いたもの、アルミホイルを巻きつけてから遮光テープで巻いたものの2種類を使い集光性を比べる。

各々、全体を遮光布でもう一度くりみ実験を行う。

それぞれ、放射媒体は

石英

{ 半径…25mm
厚さ…10mm
密度…2.20g/cm³
屈折率…1.46

アクリル

{ 半径…25mm
厚さ…20mm
密度…1.19 g/cm³
屈折率…1.49

水

{ 面積…32.5 cm²
厚さ…20mm
密度…1.0g/cm³
屈折率…1.33

また、水容器の形状は以下のとおりである。

ポリスチレン製

面積…36cm²

高さ…5.8cm

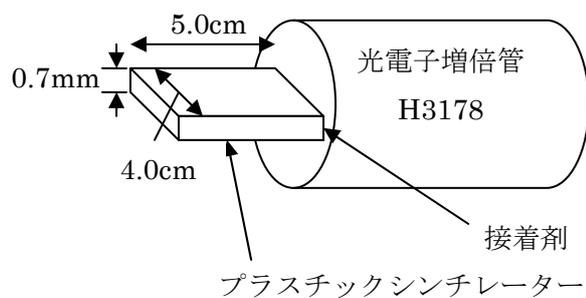
厚み…2mm

密度…1.04～1.05g/cm³

屈折率…1.59～1.60

3.3 シンチレーションカウンター

本実験では宇宙線の観測にシンチレーションカウンターを使用する。使用したシンチレーションカウンターを以下に示す。



注) 光電子増倍管の入射窓およびプラスチックシンチレーター部分には遮光テープを巻き余計な光が入らないようにする。

図 3.4 シンチレーションカウンター

プラスチックシンチレーター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、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 $\text{nsec}(10^{-9} \text{秒})$ で高速計測に適している。

第4章 データ収集・解析装置の概略

検出器からの信号はまず NIM 規格のモジュールに送られる。そしてそのアナログ信号をデジタル信号に変換するために ADC や TDC が使われる。それらは CAMAC 規格のものが広く用いられる。ADC や TDC はクレートコントローラー(C.C)の制御下にある。このクレートコントローラーと情報の授受を行う 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ものをデバイスドライバーという。

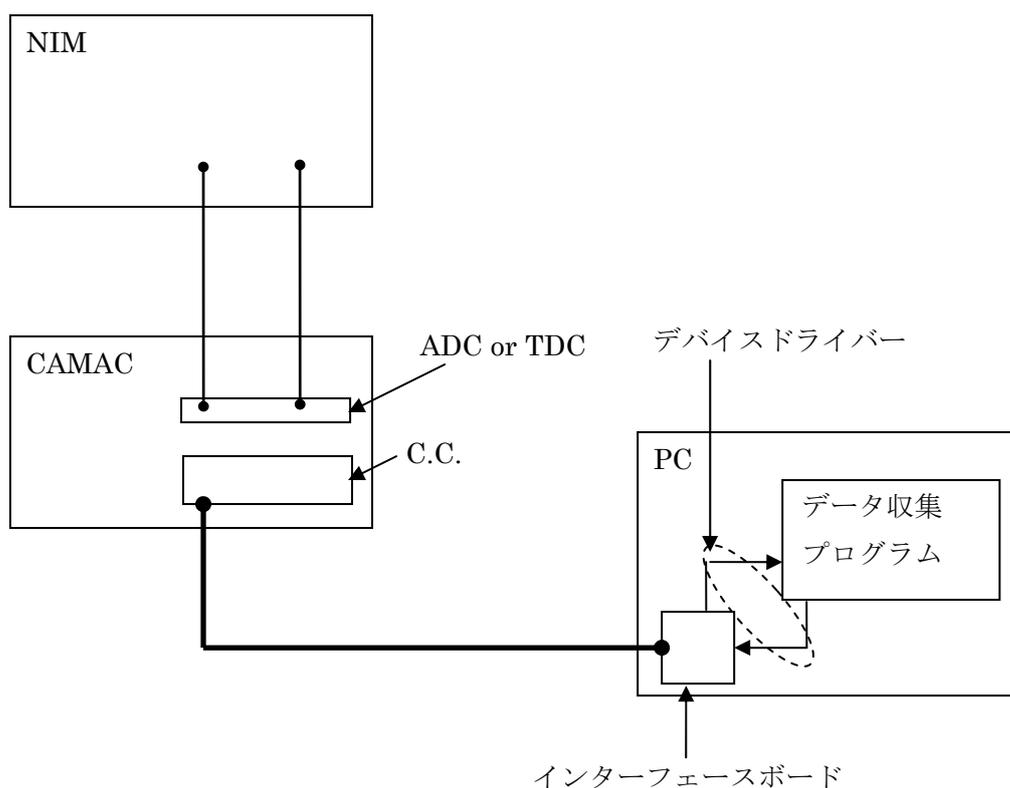


図 4.1 データ収集・解析装置の概要

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 **C/C7700**、インターフェースボードを **Linux2.4x** として使用した。

4.2 CAMAC 規格の概略

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電気信号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。

(1)クレート

クレートは標準ラックに取り付けられるようになっている。挿入できるモジュールは最大 7 個、ステーション 2 個分(スロットナンバー6、25)にクレートコントローラーを挿入している。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 1.7cm の整数倍、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。

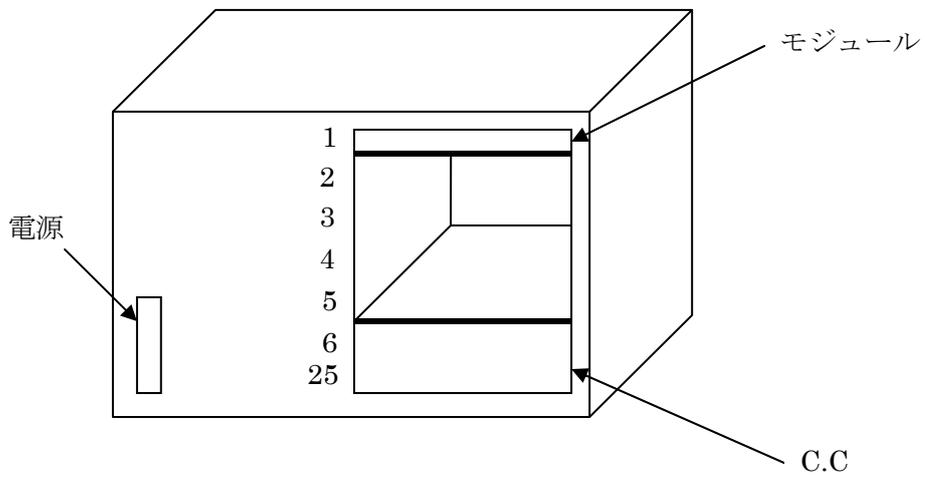


図 4.2 CAMAC 規格

4.3 NIM 規格の概略

検出器に電圧をかける HVや Discriminator などのモジュールは NIM 規格の物を用いる。スロットの数は 12 である。

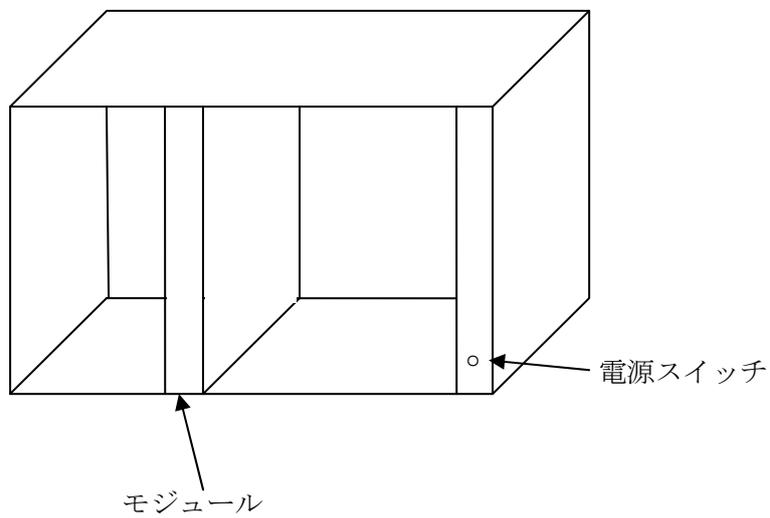


図 4.3 NIM 規格

4.4 データ収集プログラムの概要

ADC や TDC で数値化されたデータは、媒体に入射した荷電粒子の電離損失に比例する量である。その分布は、CAMAC から読み込みファイルに保存したデータを UNIX で PAW を用いてヒストグラムにして出力することで得られる。

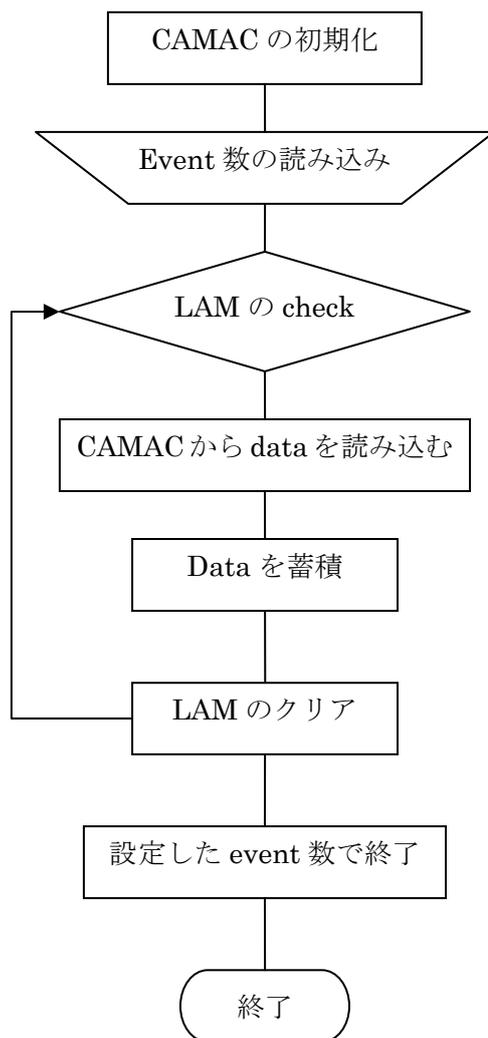


図 4.4 データ収集プログラムの概要

プログラムは 2006 年度卒業論文を参考とする。

4.5 使用するモジュールの名称と説明

Clock Generator	: 規則正しいパルスが発生させる装置
Discriminator	: 入力信号が設定した threshold を越えたときにパルスを出力する装置
Gate Generator	: 入力信号を必要な波高と幅に形成する装置
Coincidence	: 複数の信号が同時にきたときに出力する装置
Signal Divider	: 信号を分ける装置
Attenuator	: 信号を小さくする
Amp	: 信号を増幅する
Scaler	: 信号の数を数える
ADC	: 4.6 ADC 参照
TDC	: 4.7 TDC 参照

4.6 ADC (Analog to Digital Convertor)

ADC とは、アナログ電気信号をデジタル電気信号に変換する装置である。

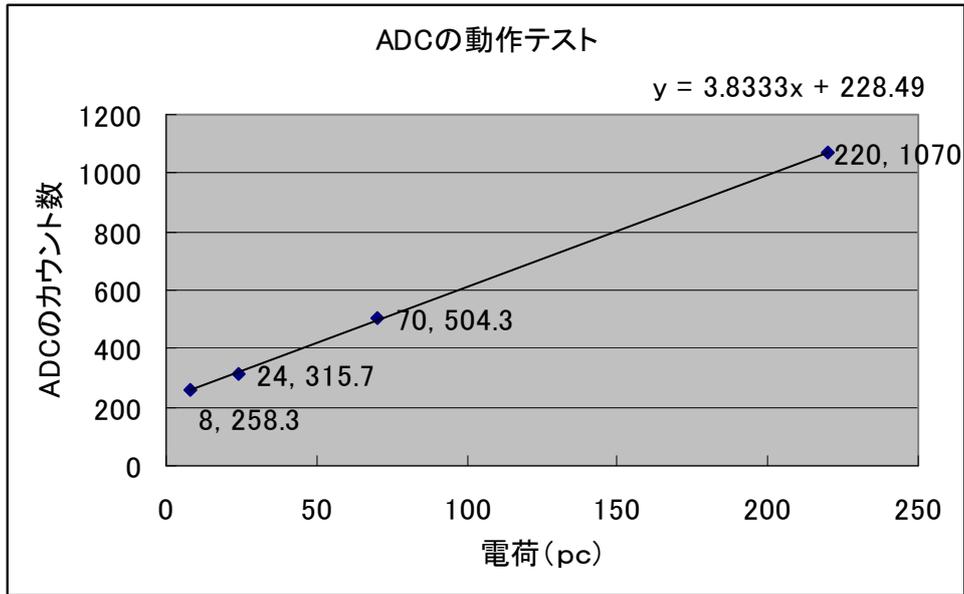
動作テスト

ADC (2249W) を Signal Divider を用いて Clock Generator からの入力信号を変化させ電荷と ADC のカウント数を計った。電荷はオシロスコープを見ながら電圧と width(nsec) を見積もり以下の計算を行った。なお、ケーブルの特性インピーダンスは 50Ω、width は t=50nsec である。

$$I = \frac{V_i}{R} = \frac{V_i}{50} [A] \quad (i=1,2,3,4) \quad (\text{式 4.1})$$
$$Q = I \times t [c]$$

電圧[V]	電荷[pc]	ADC カウント数
$V_1 = 0.22$	220	1070
$V_2 = 0.07$	70	504.3
$V_3 = 0.024$	24	315.7
$V_4 = 0.008$	8	258.3

表 4.1



グラフ 4.1

よってペダスタルは 228.49[counts]である。

4.7 TDC (Time to Digital Converter)

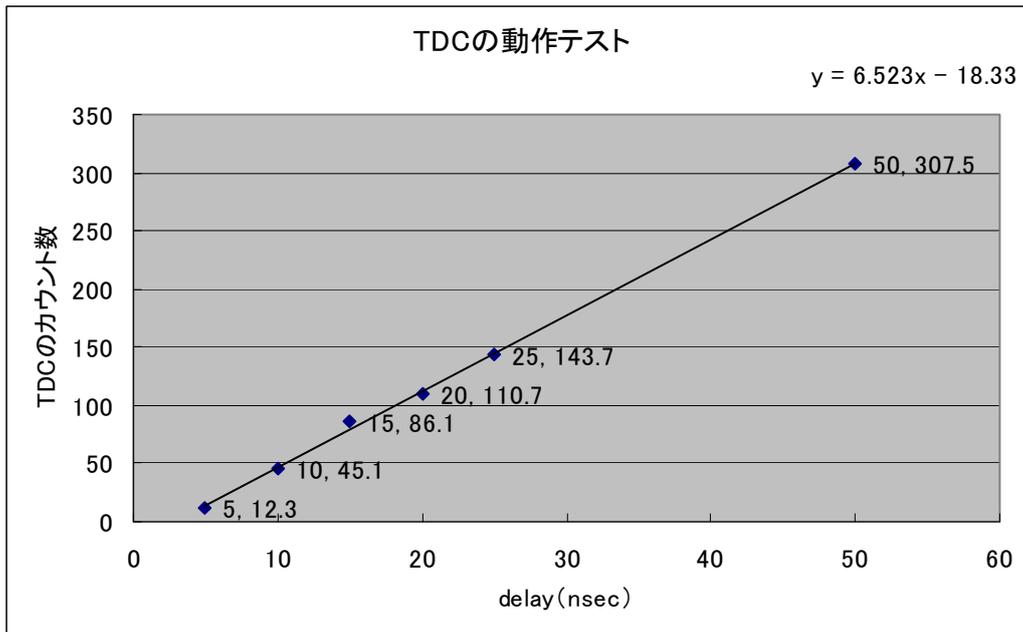
TDC (2228) は、アナログ信号の非常に短い時間間隔をデジタル出力する装置である。

動作テスト

Cock Generator からの入力信号を start からの信号はそのままにし、stop までの時間を delay させ、TDC のカウントを取った。

Delay[nsec]	TDC のカウント数
5	12.3
10	45.1
15	86.1
20	110.7
25	143.7
50	307.5

表 4.2



グラフ 4.2

よってペダスタルは $-18.33[\text{counts}]$ である。また、式の傾きが 6.523 なので、 $1[\text{count}]$ 当たり $0.15[\text{nsec}]$ になる。

第 5 章 ^{90}Sr を使った予備実験

5.1 Block Diagram

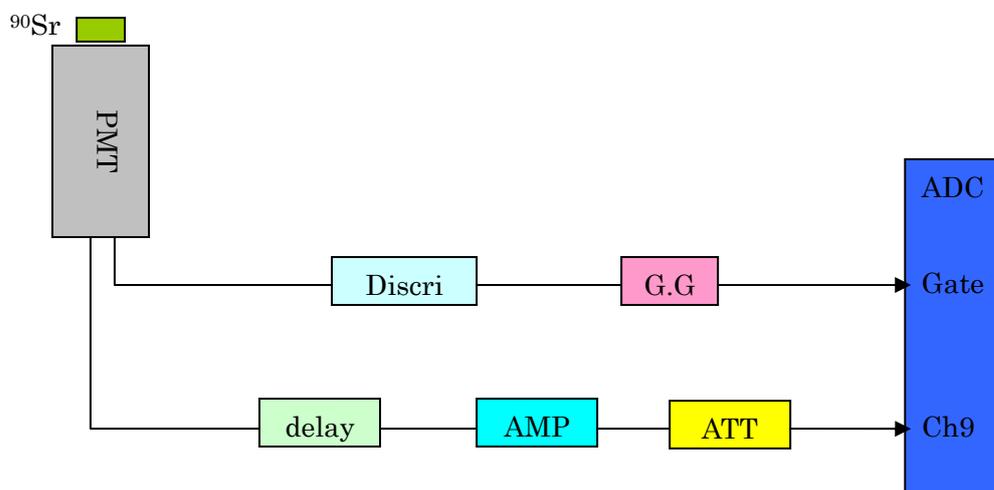
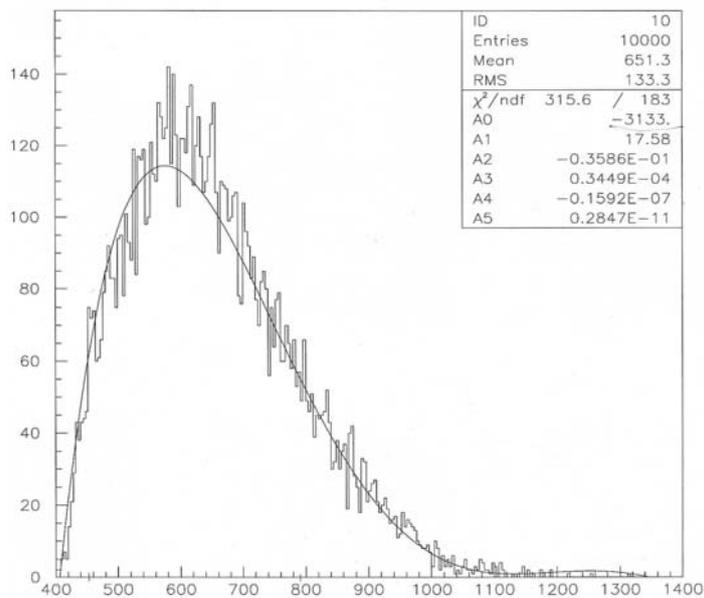


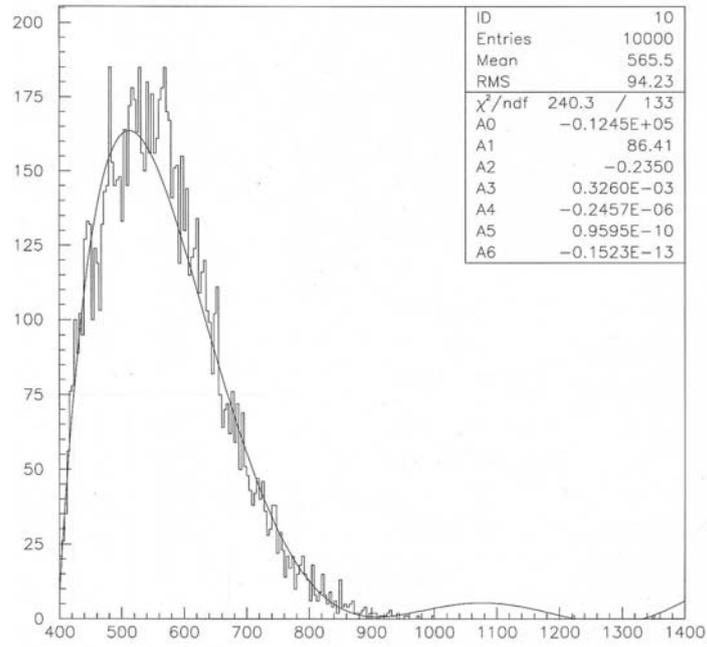
図 5.1 Block Diagram

石英に使った PMT には 1900 [V]、アクリルに使用したものには 2100 [V]、水に使用したものには 1900 [V] の電圧をかける。

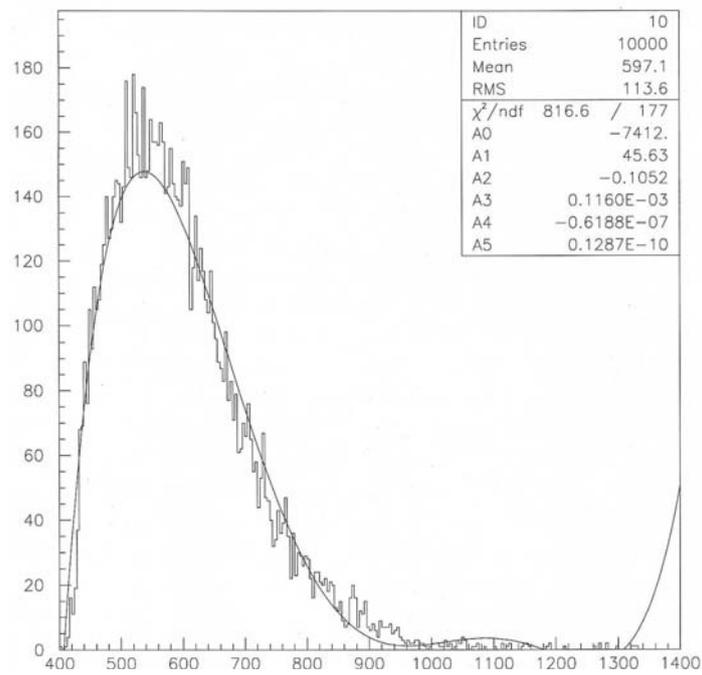
5.2 測定結果・考察



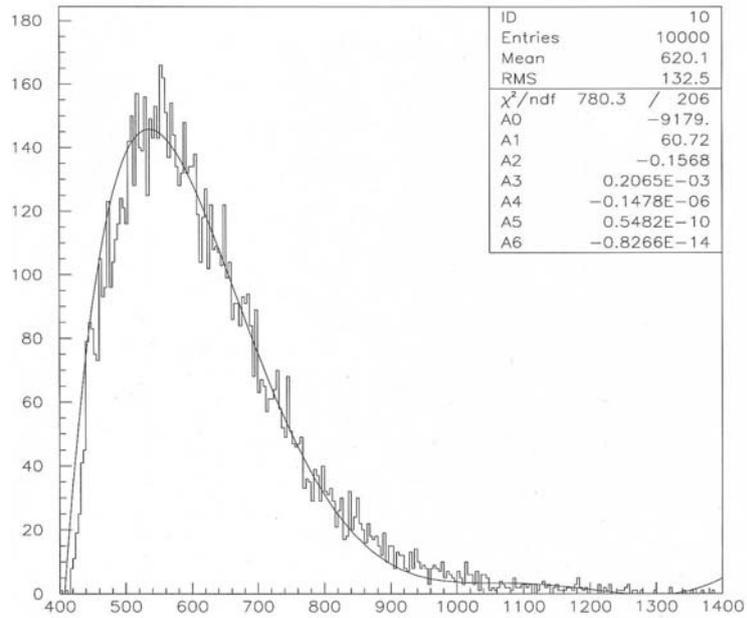
グラフ 5.1 石英 1cm



グラフ 5.2 アクリル 2cm



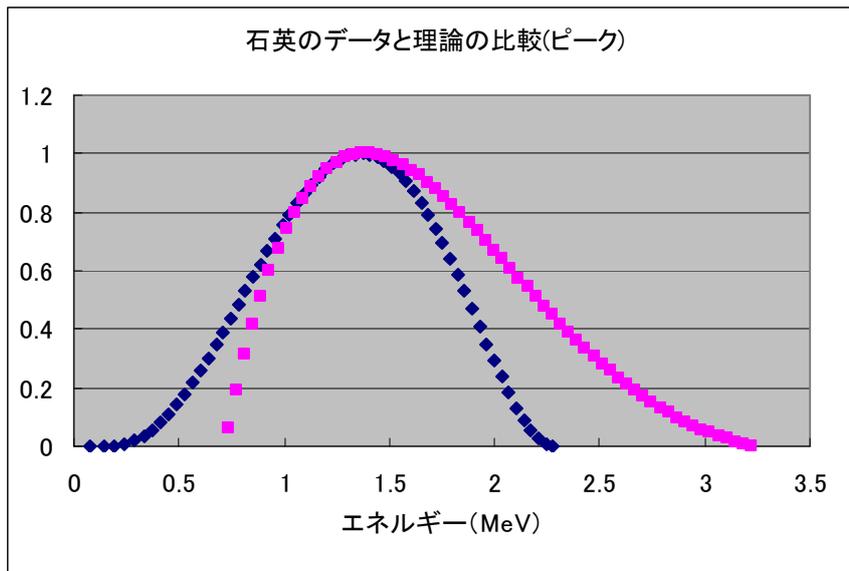
グラフ 5.3 水 2cm



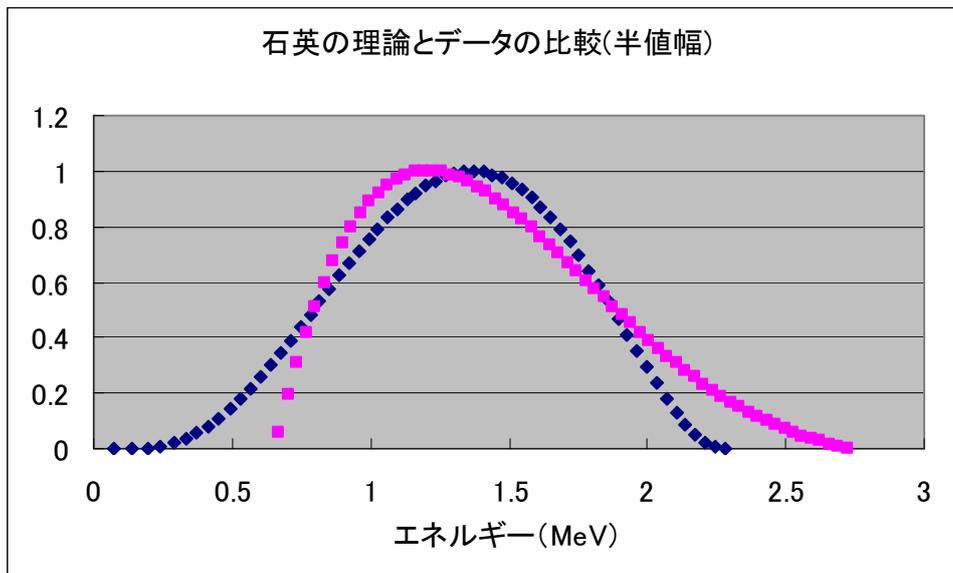
グラフ 5.4 水(アルミ) 2cm

水の容器の側面にアルミホイルを巻いて変化をみたところ、オシロスコープで見たときの周波数が増え ADC 分布の右側が増えていることがわかった。よってアルミホイルを巻いたほうが光の収量が増えたことがわかる。しかし、劇的な変化はなかったのでチェレンコフ光には方向性があることがわかる。

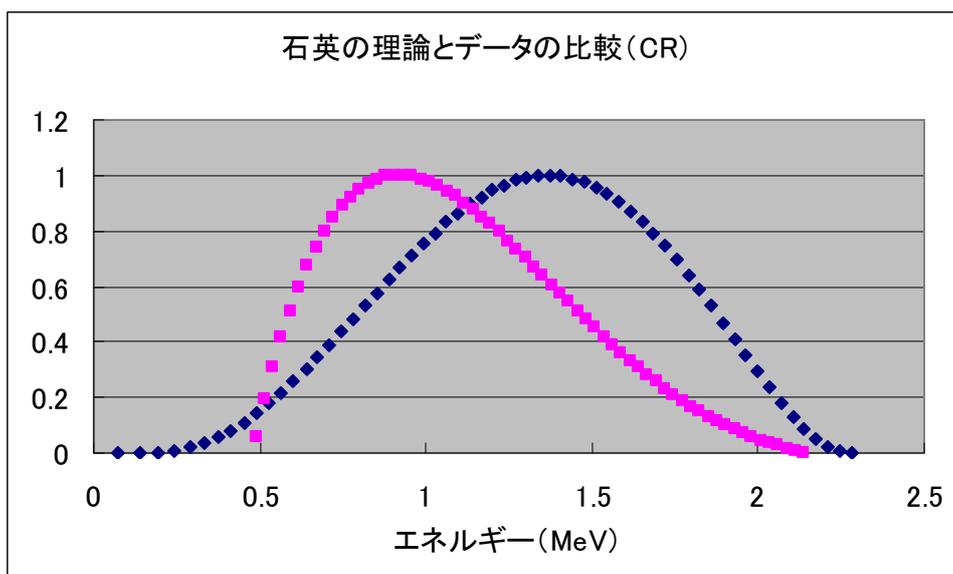
以下に理論値と、データにフィットした関数の比較を示す。



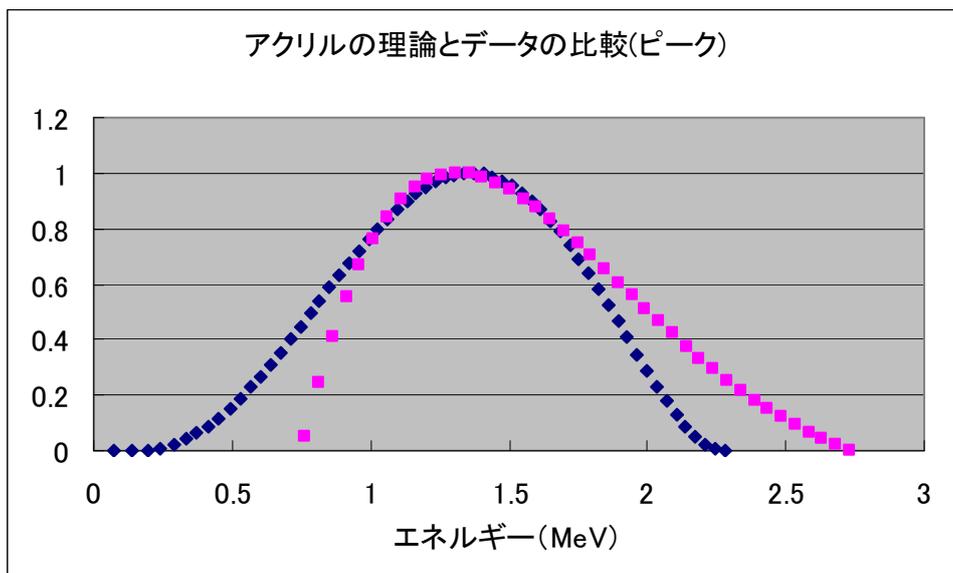
グラフ 5.5-1



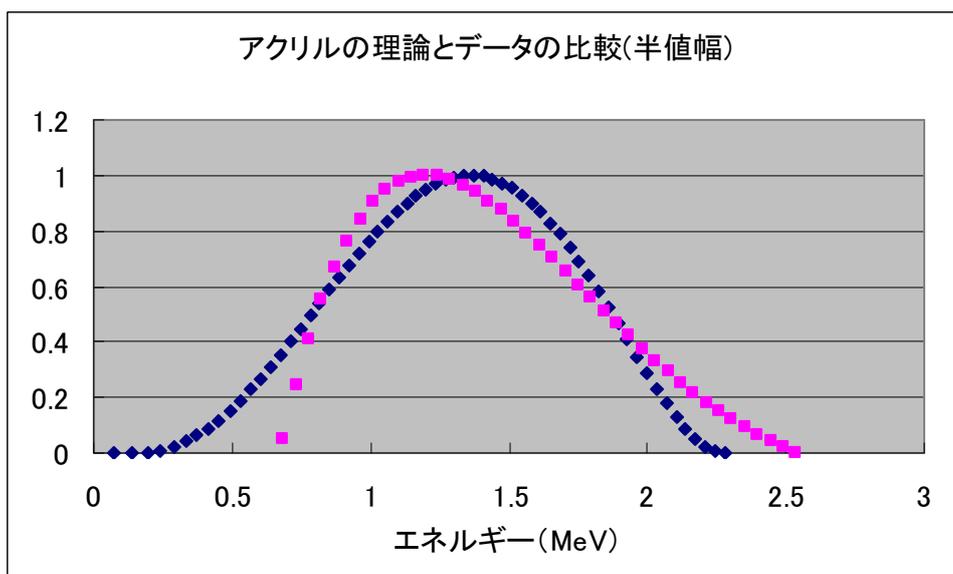
グラフ 5.5-2



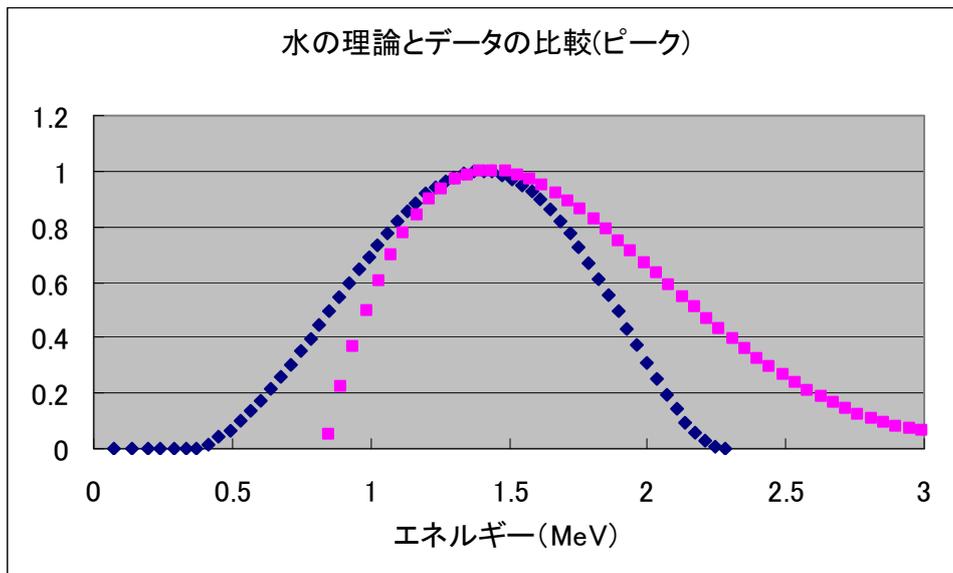
グラフ 5.5-3



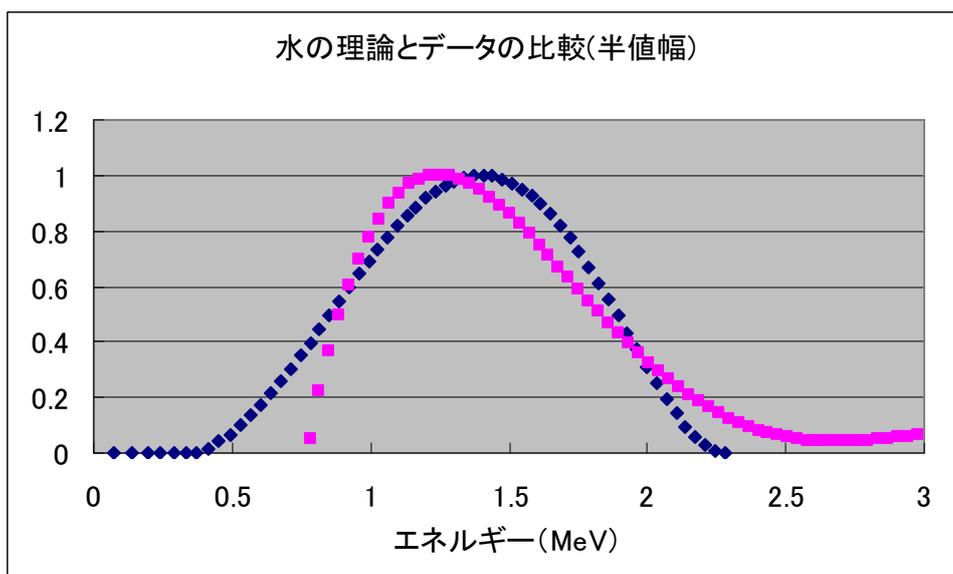
グラフ 5.6-1



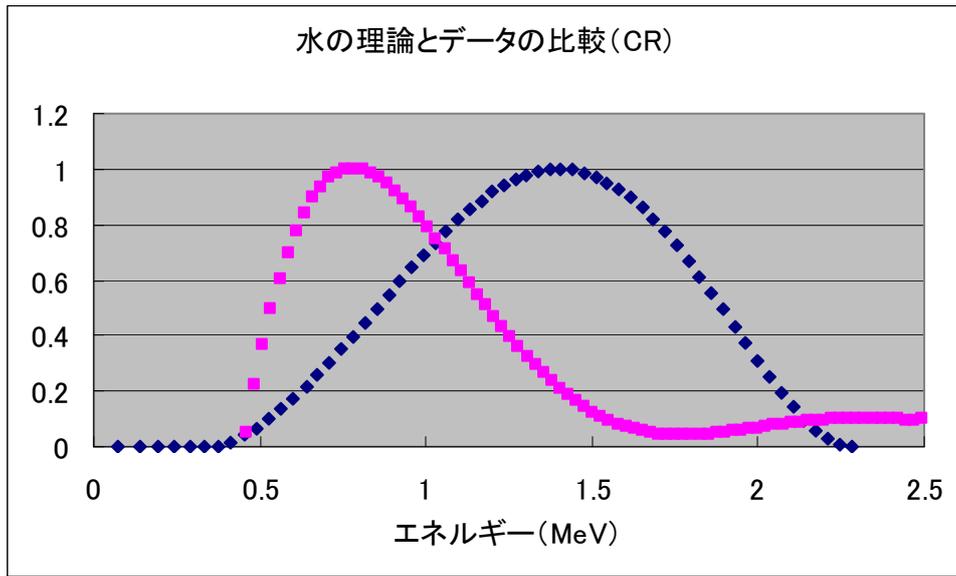
グラフ 5.6-2



グラフ 5.7-1

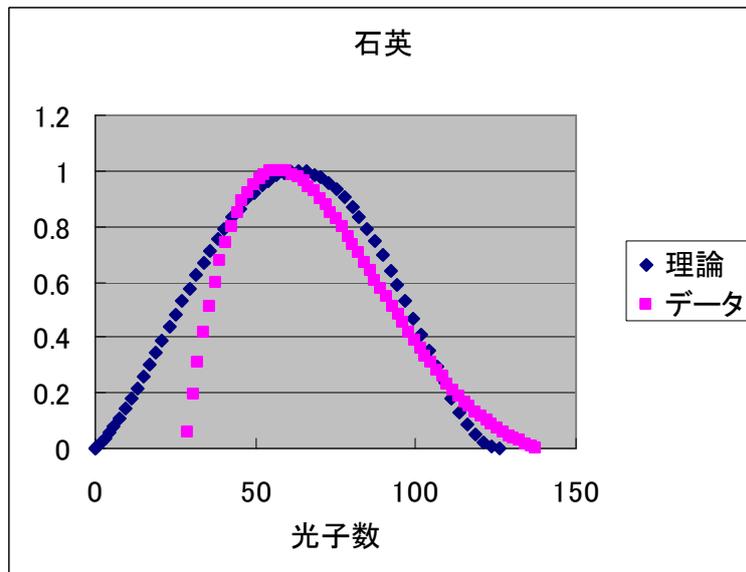


グラフ 5.7-2

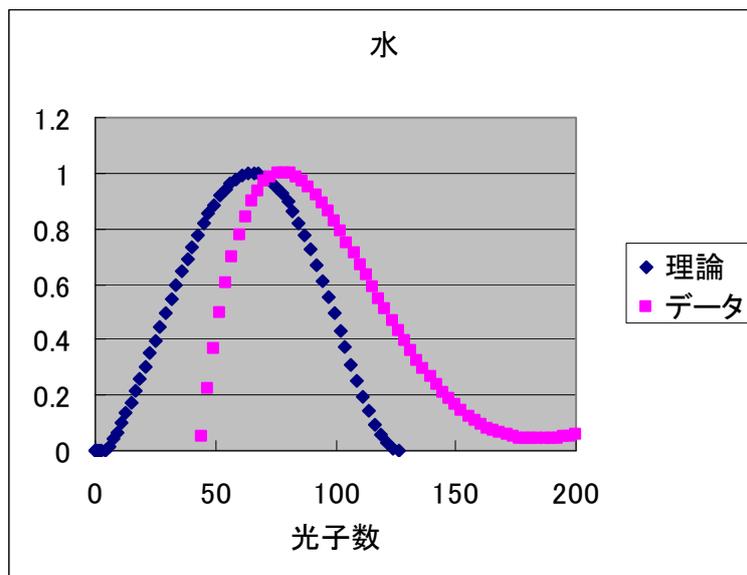


グラフ 5.7-3

ここまで ADC のカウント数をエネルギーで考えてきたが、 ^{90}Sr の場合エネルギーが全て光子になるわけではないので ADC のカウント数を光子数に変換した。宇宙線が通ったときの光子数を基準に ADC のカウント数を光子数に変換すると以下のようなになる。データブックにアクリルのデータがなかったため石英と水のデータのみを示す。



グラフ 5.8-1



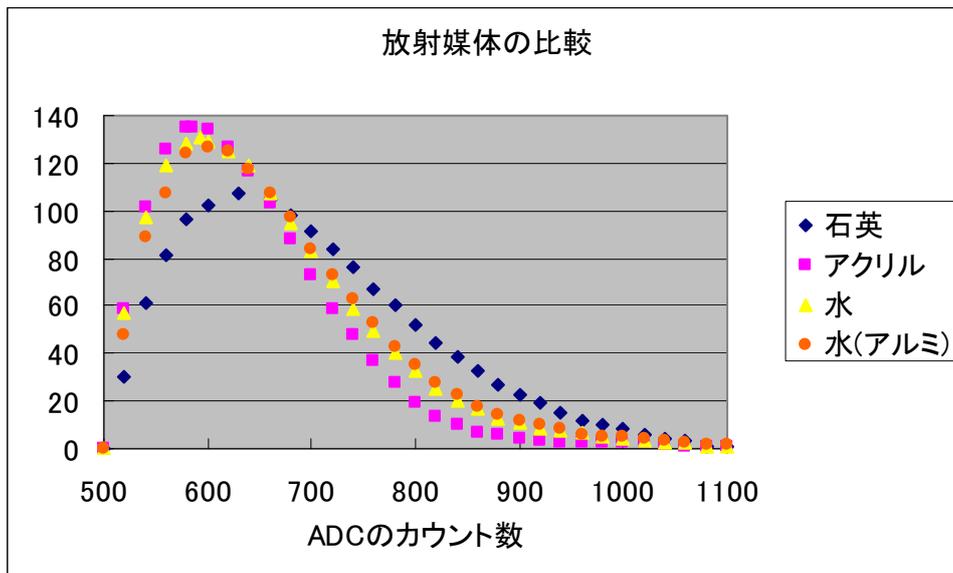
グラフ 5.8-2

グラフ 5.8-1、石英を見ると良く一致していることがわかる。データの左側が急になっているのは **threshold** による。

水もグラフの形は一致していることがわかる。しかしデータのほうが全体に右にずれている。

5.3 放射媒体による比較

今までそれぞれの放射媒体に対して、別の **PMT** を使用し **HV** も統一されていなかったの
でそれぞれの結果を比較することが難しかった。そこで、測定条件を統一し媒体による変
化をしてみることにした。その結果を次に示す。このときの条件は **HV1900(V)**、**AMP2** 段、
ATT11db である。また、このとき不具合により **ADC** をかえている。新しい **ADC** の動作テ
ストは **P37** 参照。



グラフ 5.9

石英はグラフの右側が他の媒体のときより、大きくなっていることから先に原理で述べたように変換効率が一番良いことがわかる。

また、水容器にアルミホイルを巻いたものと巻かないものではアルミホイルを巻いたときのほうが、光の収量がわずかに増えていることが確認できる。

第 6 章 宇宙線の測定

6.1 Block Diagram

PMT 1,2 はシンチレーションカウンター、PMT 3 はチェレンコフカウンターを使用している。PMT1,2 をトリガーカウンターとした。

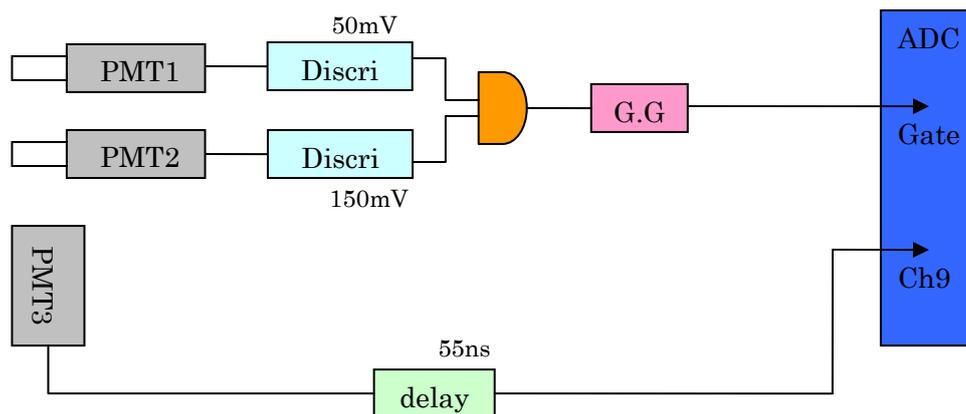


図 6.1 Block Diagram

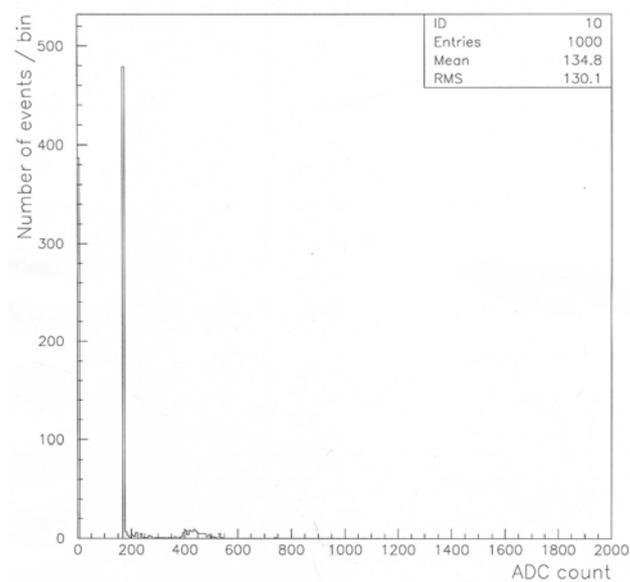
このとき PMT1・2 には 1400[V]

PMT3 には 石英 1900[V]、アクリル 2100[V]、水 1900[V]の電圧をかけた。

また、このとき Delay の値は Clock 信号を使ってオシロスコープで信号を確認して決定した。

6.2 測定結果・考察

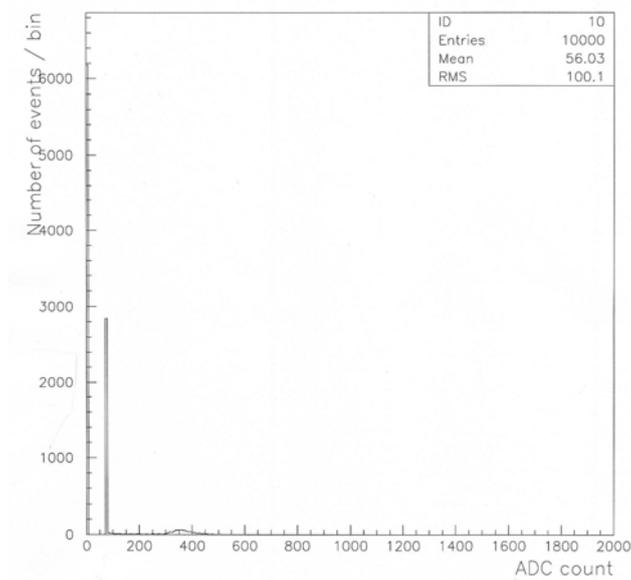
はじめに、媒体に 1cm の石英ガラスを用いた時の結果を示す。
1000[events]データを収集した結果は次のようになった。



グラフ 6.1

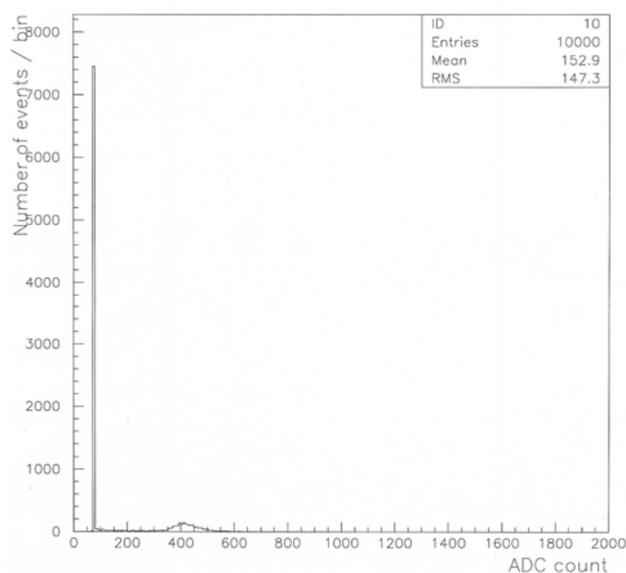
200[counts]あたりに立っているのはトリガー仕切れなかった空イベントであるが、0[counts]にもピークがある。このピークと空イベントで全イベント数の 9 割にもなるので、次では 0[counts]のピークを消すことを考える。

まずはチャンネルの不具合を確かめるためにADCのチャンネルをch9からch8に変えた結果以下ようになった。



グラフ 6.2

まだ、0[counts]にピークが立っている。そこでADCを別のものに換えてデータを取った結果が次のようになった。



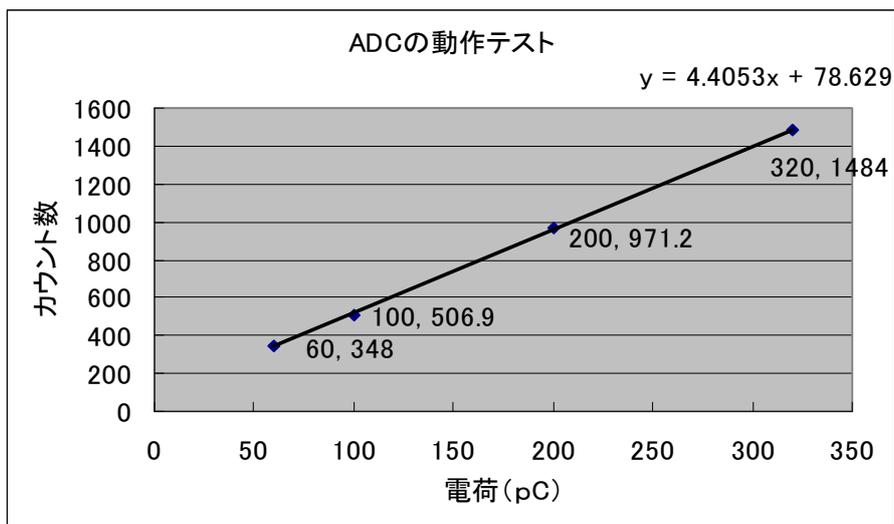
グラフ 6.3

0[counts]のピークがなくなったので、ADCによるものだったと考えられる。そこで、ADCを変えて実験をすることにした。

ADC の動作テストを改めて行った結果を以下に示す。今回は Attenuator を使用した。

Att(dB)	高さ(mV)	ADC counts
0	640	1940
6	320	1484
10	200	971.2
16	100	506.9
20	60	348

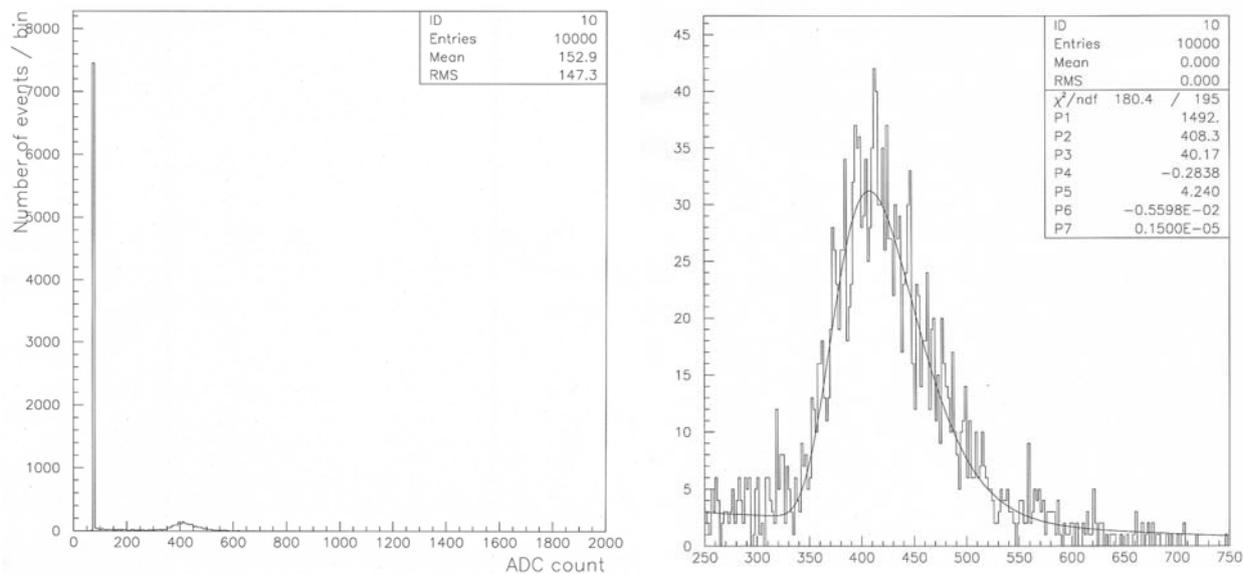
表 6.1



グラフ 6.4

ペDESTALは 78.6 となった。

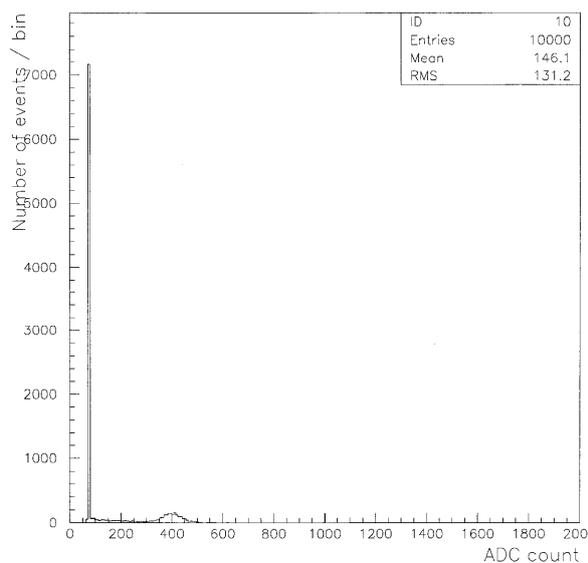
この ADC を使って 10000[events]データを収集したグラフを次に示す。



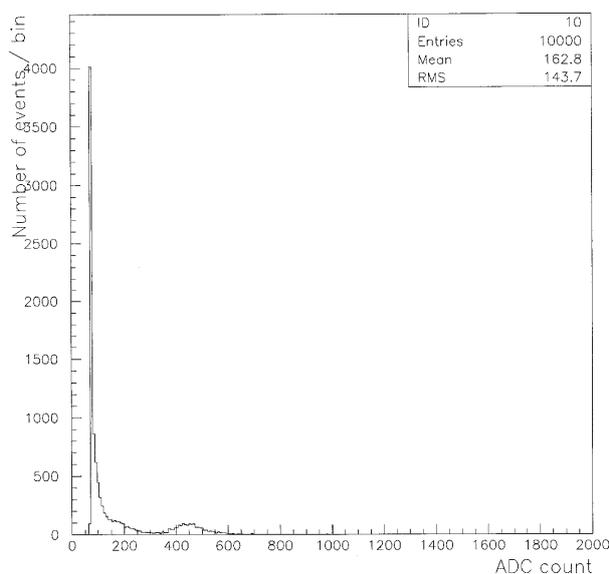
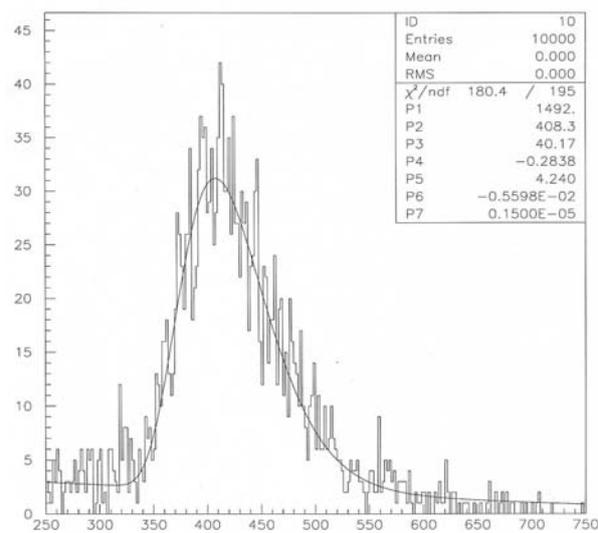
グラフ 6.5 石英

ここで、グラフが右にテールを引くランダウ分布になっているのは、宇宙線が放射媒体中で止まらずに突き抜けていることを示している。また、グラフ中の 100[counts]付近に立っているのはトリガー仕切れなかった空イベントである。400[counts]付近にあるのが宇宙線なので、250~750[counts]の範囲だけを見てみたものが右のグラフである。

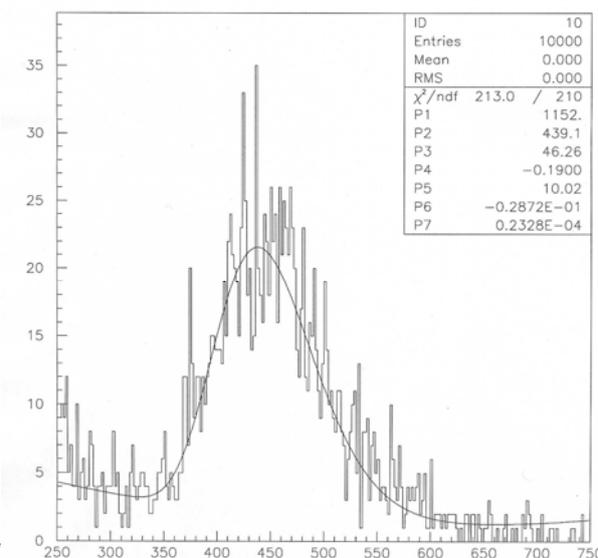
次に、アクリル、水での結果を示す。



グラフ 6.6 アクリル



グラフ 6.7 水



石英と同様にランダウ分布になっているので、宇宙線が媒体を突き抜けていることがわかる。また、水のグラフにおいて、空イベントの部分からグラフが連続的に分布している原因については後述する。

第7章 ADC と TDC による宇宙線の測定

7.1 TDC による宇宙線の測定

7.1-1 Block Diagram

PMT1,2 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を使用している。PMT1,2 をトリガーカウンターとした。また、上の Coincidence は PMT2 で下の Coincidence は PMT3 でなるように設定した。

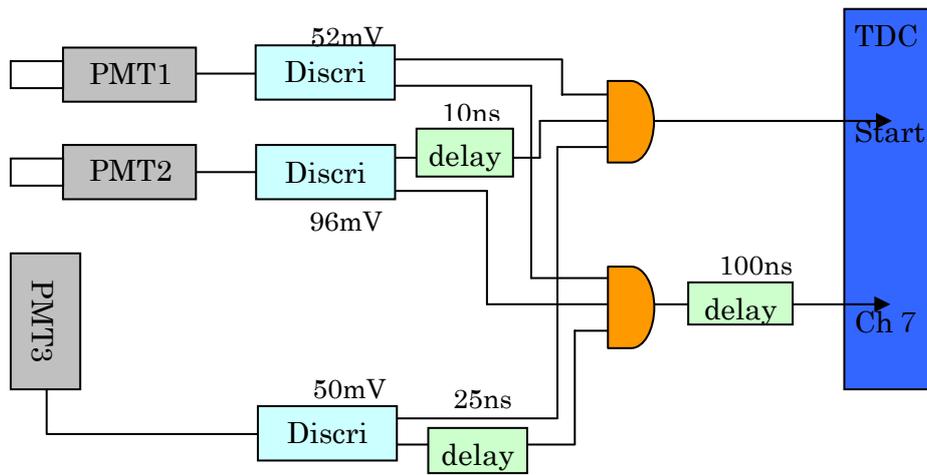


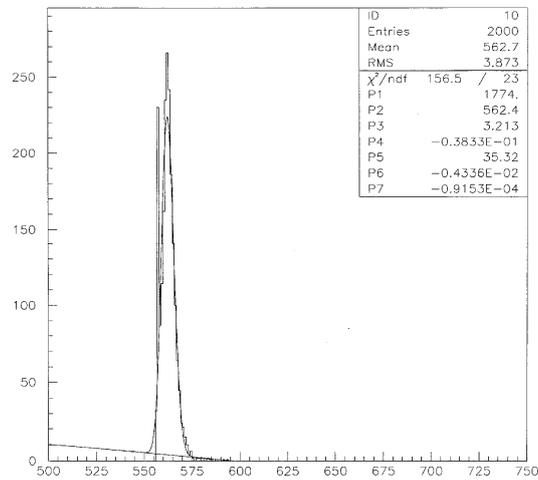
図 7.1 Block Diagram

このとき PMT1・2 には 1400[V]

PMT3 には 石英 1900[V]、アクリル 2100[V]、水 1900[V]の電圧をかけた。

7.1-2 測定結果・考察

媒体を石英 1cm としたときの結果は次のようになった。



グラフ 7.1

555 counts あたりに 1 bin に立つピークがある。このピークは PMT3 で start と stop をしてしまったことによるものではないかと考えられる。そこで、確実に start が PMT2 で stop が PMT3 となるように配線をやり直したが、このピークは消えなかった。その原因を解明するために 2 次元プロットを取ることにした。

7.2 ADC と TDC による宇宙線の測定

7.2-1 Block Diagram

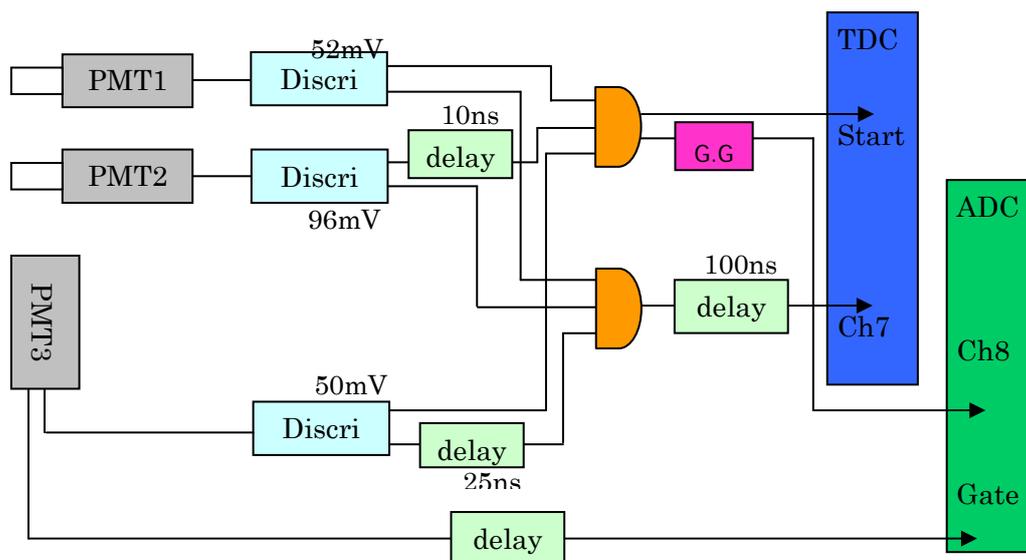
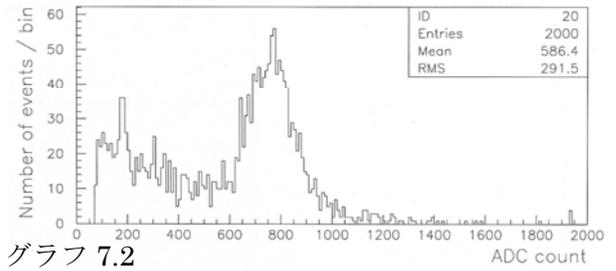
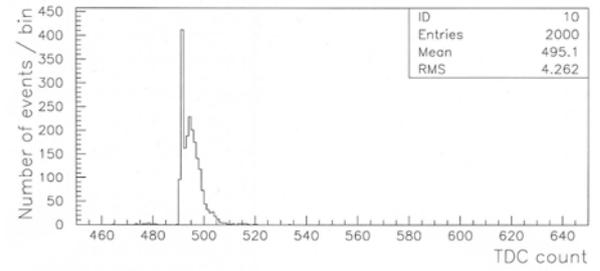
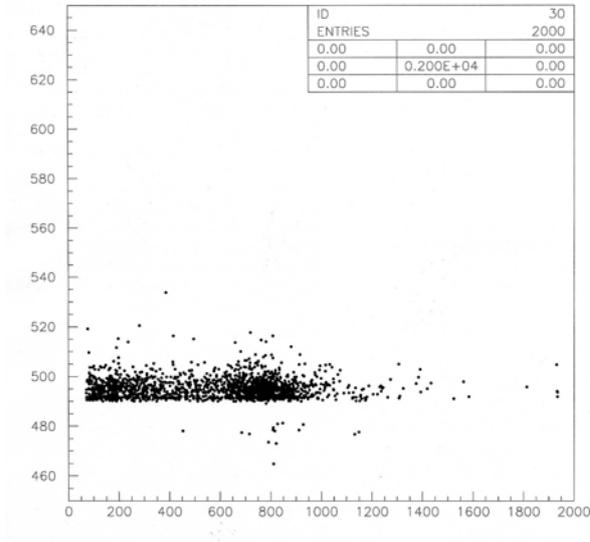


図 7.2 Block Diagram

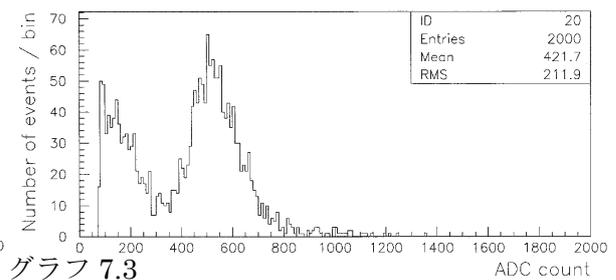
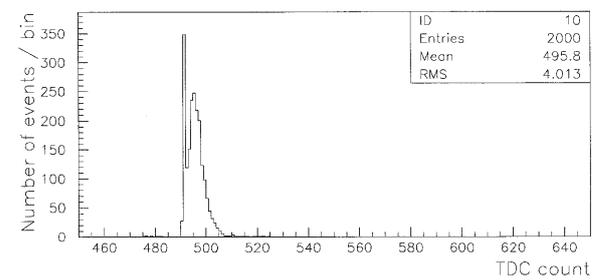
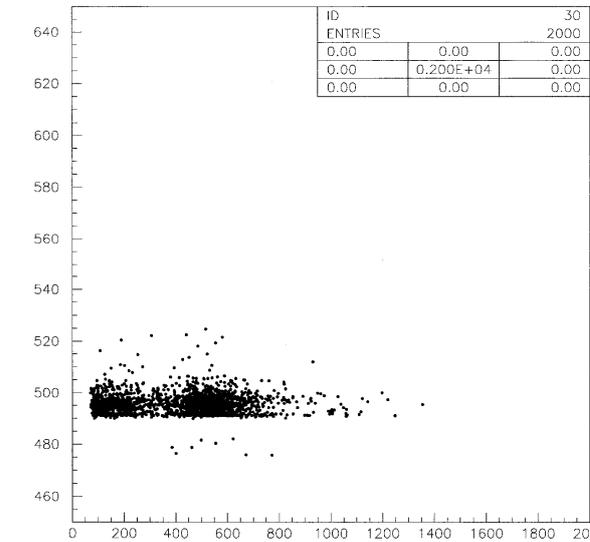
7.2-2 測定結果・考察

石英 2cm



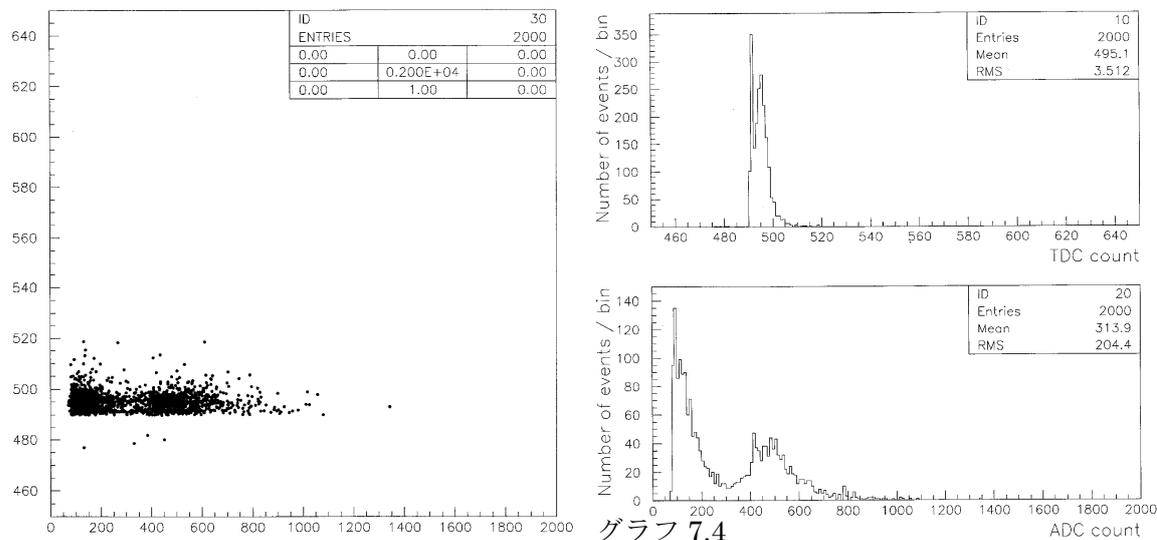
グラフ 7.2

アクリル 2cm



グラフ 7.3

水 2cm



水のグラフを見ると左側の山の分布が他よりも高いことがわかる。これは第 6 章での分布と同じ理由で、水の容器が PMT の受光面よりも大きいので、斜めに入った宇宙線が容器の端をかすめたものである。

また、2006 年度卒論と違い今回のグラフではタイムウォークが見られない。これは、昨年使用した TDC(RPC_060)は 1[count]当たり 26.5[psec]だったのにたいし、本年使用した TDC(2228)は 1[count]当たり、153[psec]と性能が悪いためである。

以下には各放射媒体による時間分解能の違いを示す。

放射媒体	時間分解能 (psec)
石英 (1cm)	514
石英 (2cm)	431
アクリル (2cm)	487
水 (2cm)	477

表 7.1

この結果から、石英 1cm よりも石英 2cm の分解能がよいことが分かる。よって、発光量が多いほうが分解能がよくなる。

また、水の分解能が石英に続きよいことが分かる。水の高さを増やし、発光量を増やすことによってさらによりよい分解能を得ることが期待できる。

第 8 章 まとめ・今後の課題

まず、水、アクリルなど様々な物質でチェレンコフ光が観測できたことにより、媒質による違いを見ることができた。また、チェレンコフ光に方向性があることが確認できた。さらに、 ^{90}Sr の β 線の理論値を計算し、理論とデータの値を比較することができた。

今後は水容器を改善し、水によるチェレンコフ光の観測をより良いものにする必要がある。具体的には受光面と容器のサイズを同じにし、かつ受光面と接着できるようにしたい。また、条件を統一して放射媒体による違いを比較し、チェレンコフ光に適した媒体を見つきたい。その際媒体の値段と必要な量を考慮する必要がある。そして今回 TDC の実験に時間を費やせなかったため、TDC の測定と解析をしていく必要がある。

参考文献

- 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
- Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments
William R.Leo
- アクリル樹脂の特性 <http://www.acrytec.jp/chara/index.html>
- ポリスチレンの基本物性 http://www.j-ps.co.jp/pdf/deta_02.pdf
- PHYSICAL REVIEW D PARTICLES AND FIELDS
1 JULY 2002 PART I Review of Particle Physics
THE AMERICAN PHYSICAL SOCIETY

謝辞

卒業研究を行うにあたり、助けていただいた先生、先輩方にこころより感謝申し上げます。

指導教官の野口先生、および林井先生、宮林先生にはお忙しい中ご指導いただき、大変お世話になりました。また、4回生の皆様にもアドバイスをいただきありがとうございました。

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。