

ポジトロニウム消滅ガンマ線対の検出と
時間分解能の研究

奈良女子大学 理学部 物理科学科 高エネルギー物理学研究室

栗林 和加 立川 晶絵 峰村さつき

平成24年3月

目次

第1章 はじめに

- 1-1 実験目的
- 1-2 本論文の構成

第2章 原理

- 2-1 γ 線
 - 2-1.1 実験に用いた線源
 - 2-1.2(a) 光電効果
 - 2-1.2(b) コンプトン効果
 - 2-1.2(c) 電子対生成
- 2-2 シンチレーション光
- 2-3 チェレンコフ光
- 2-4 時間分解能

第3章 実験装置の概要

- 3-1 シンチレーションカウンタ
 - 3-1.1 光電子増倍管
 - 3-1.2 シンチレータ
 - (a) GAGG
 - (b) BSO
 - (c) ZnO
- 3-2 エレクトロニクス
 - 3-2.1 NIM 規格
 - 3-2.2 使用するモジュール
 - 3-2.3 データ収集解析の概略
 - (a) camdrv
 - (b) CAMAC 規格
 - (c) クレートコントローラ
 - (d) ADC
 - (e) TDC
 - (f) program

第4章 光量測定

セットアップ図

4-1 GAGG 結果

4-2 BSO 結果

4-3 ZnO 結果

Mean-Sigma 法

Bethe-Bloch 式

第5章 時間分解能測定

セットアップ図

Attenuation length

5-1 GAGG 結果

5-2 BSO 結果

TDC の補正

第6章 まとめ

6-1 課題

6-2 参考文献

6-3 謝辞

第 1 章 はじめに

1-1 実験目的

本実験では、ポジトロニウムの消滅で発生するガンマ線対の飛行時間差から、シンチレーションカウンターの時間分解能を測定する。その過程で、本実験で利用する 3 種類のシンチレータの光量測定を行う。また、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 本論文の構成

本論文ではまずシンチレーション光、 γ 線、チェレンコフ光、使用する線源などの原理について述べ、さらに実験装置の概要、使用するエレクトロニクスについて説明を行う。さらに、データ収集の方法、そのデータを使っての解析を行い、最後に得られた実験結果、考察について述べる。

第2章原理

2-1 γ 線

γ 線は、ある種の放射性同位元素の原子核から放射される波長のごく短い電磁波である。

波長のごく短いために、透過力が強いことが特色の一つである。透過力が強く、また、 γ 線は荷電粒子でないために、直接には物質を電離する作用がほとんどない。しかし、 γ 線は、2-1-2で述べるようなさまざまな過程を通じて物質から高速度の電子（二次電子）をたたき出すことがある。この電子は、 γ 線と同じような経路にそって電離するので、 γ 線は間接的に物質中である程度の電離する作用を示す。

また、 γ 線の波長がひどく短いために現れるもう一つの特色は、粒子としての性質が強く出てくるということである。

2-1-1(a) 実験に用いた線源

^{22}Na

^{22}Na の半減期は2.58年で、 β^+ 崩壊により ^{22}Ne の2+励起状態に崩壊する。 ^{22}Ne はすぐ、1277 keVの γ 線を放出して崩壊する。

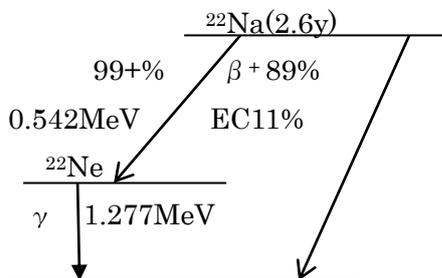


図 2-1 ^{22}Na の壊変図

^{137}Cs

^{137}Cs は、半減期2.06年で、 β^+ 崩壊により ^{137}Ba となる。この時、93.5%で $^{137\text{m}}\text{Ba}$ となる(残りの5.6%が基底状態の同位体を作る)。 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ はエネルギー662keVの γ 線を放出し、 ^{137}Ba となる。

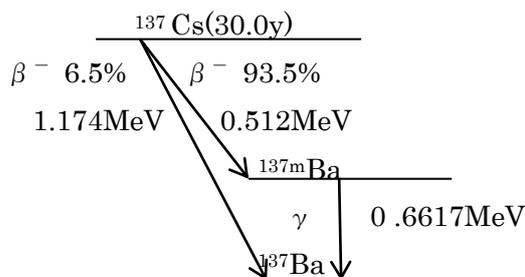


図 2-2 ^{137}Cs の壊変図

2-1-1(b) ポジトロニウム

^{22}Na の 99% の β^+ 崩壊により放出された陽電子は、電磁的引力により周囲の電子と対を形成し、互いの回りを回りつづける。この電子対を、ポジトロニウムと呼ぶ。

ポジトロニウムが静止するとき、対消滅を起こすと、光子に変わり、この際電子 2 個分の静止エネルギーが、光子のエネルギーとなる。その結果、向きが正反対で、エネルギーの等しい 2 つの γ 線放出される。この γ 線 1 つのエネルギーは約 511keV である。時間分解能測定では、この γ 線を用いた。

2-1-2(a) 光電効果

光電効果は軌道電子による光子のエネルギー吸収であって、これが起こると軌道電子は運動エネルギー $T = E_\gamma - I$ をもって原子外へ放出され、光子は消失する。放出された電子を光電子と呼ぶ。ここで、 E_γ は光子の全エネルギーであり、 $h\nu$ に等しい (h はプランクの定数、 ν は光子の振動数)。また、 I は軌道電子の束縛エネルギーである。

2-1-2(b) コンプトン効果

自由電子またはほとんど自由な電子によって γ 線が散乱を受ける現象のことを、コンプトン効果またはコンプトン散乱と呼ぶ。散乱された γ 線は方向が変わる。散乱前の光子のエネルギーを $h\nu_0$ 、散乱された光子のエネルギーを $h\nu_1$ とする。前後のエネルギー差

$$E = h\nu_0 - h\nu_1$$

は電子の運動エネルギーとなる。これが、コンプトン散乱である。

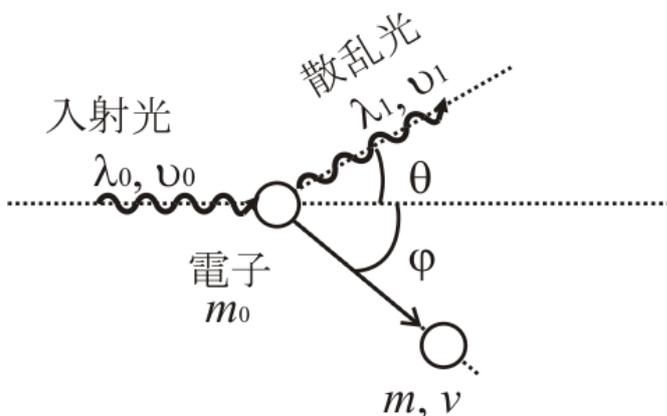


図 2-3 コンプトン散乱

2-1-2(c) 電子対生成

γ 線の量子エネルギー $h\nu$ が1~10MeV越えると図2-4で示すようなコンプトン効果の断面積は減少する。これに代わって盛んに起こり始めるのが電子対生成という過程である。

この過程では、 γ 線の光子1個が消え、陽電子と電子の電子対が生成される。

また、電子対生成の過程では、光子のエネルギー(γ 線のエネルギー) $h\nu$ の一部は二つの電子対の静止エネルギー $2mc^2$ に、残りは運動エネルギー(E_+ および E_-)にかわり、全体のエネルギーは変わらない。つまり、

$$E_+ + E_- = h\nu - 2mc^2$$

が成り立つ。式からもわかるように量子エネルギー $h\nu$ が $2mc^2=1.02\text{MeV}$ より大きくなければ、電子対生成は起こらない。

この過程でつくられた電子対のうち、電子は物質中を進む間に運動エネルギーを失って止まるだけであるが、陽電子は減速して止まる寸前に、付近の普通の電子と合体し、対消滅してしまう。このときの電子2個分の静止エネルギーは、光子のエネルギーとなる。対消滅が起こる際、とまりかけの陽電子が付近の電子と1対をなし、互いに相手のまわりをまわり続けるという現象が起こりうる。このような電子対をポジトロニウムという。

電子対生成の全断面積は、 $h\nu < 1.02\text{MeV}$ では、ゼロである。それ以上では、下記の図のように $h\nu$ とともに増加する。断面積は物質の原子番号 Z の2乗にほぼ比例しているため、この過程は重い物質であるほど盛んに起こる。

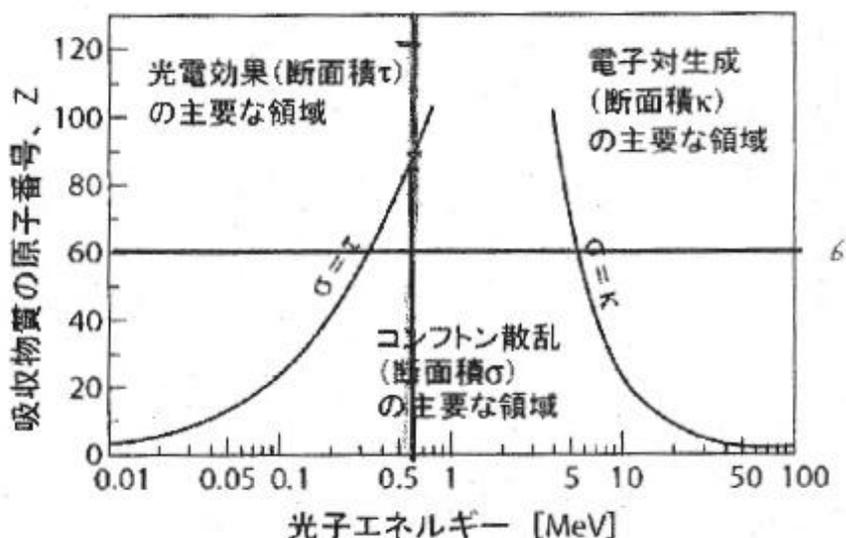


図 2-4 支配領域

2-2 シンチレーション光

物質中を放射線が通過したあとには、多くの励起原子（または分子）が残されるが、これらの励起原子の一部はすぐにその励起エネルギーを光の形で放出して低いエネルギー状態に移る。このとき、放出された光のことをシンチレーション光と呼ぶ。

2-3 チェレンコフ光

物質中で光速を上回るようなきわめて速い荷電粒子が通過するときに放射される光のことをチェレンコフ光と呼ぶ。図において、粒子は速度 v_p で物質中を通過する。粒子の速度と真空中の光速との比を $\beta = v_p / c$ とすると、 n を物質の屈折率とすると、放射されるチェレンコフ光の伝播速度は $v_{em} = c / n$ となる。

三角形の左の頂点は、ある初期時点 ($t = 0$) における粒子の位置をあらわす。右の頂点は、ある時間 t における粒子の位置をあらわす。ある時間 t の間、粒子の移動距離は

$$x_p = v_p t = \beta ct$$

であり、放射電磁波の移動距離は

$$x_{em} = v_{em} t = \frac{c}{n} t$$

となる。ゆえに、放射角は

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (\beta = \frac{v}{c})$$

また、

$$n\beta \geq 1$$

より、 $\beta \geq \frac{1}{n}$ でなければ、チェレンコフ光は発生しない。

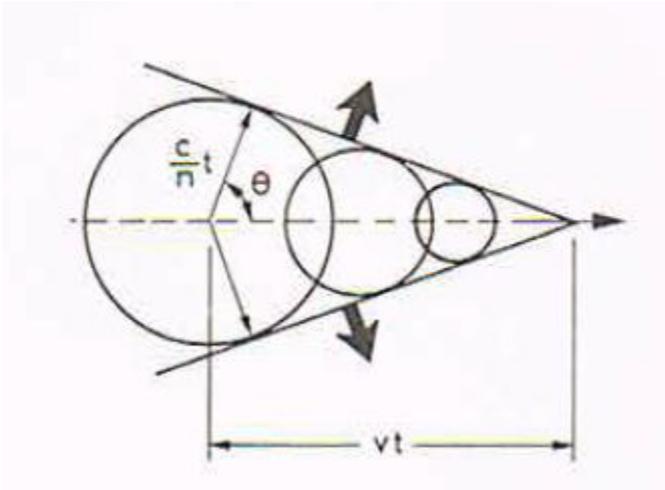


図 2-5 チェレンコフ光生成の概念図

2-4 時間分解能

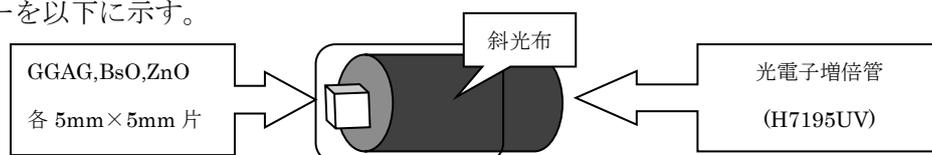
時間分解能とは、粒子が検出器に入射した時間の計測における精度を表す。本実験では ^{22}Na 線源を用いて、放出された陽電子が近くにある電子と対消滅を起こし、代わりに γ 線が2本、互いに反対方向へ飛び去り、直線状に置かれたシンチレーションカウンターがそれぞれの γ 線を検出し、2つの γ 線の飛行時間差を算出することで求められる。

第3章 実験装置の概要

本実験では光電子増倍管(PMT)とシンチレータを用いてシンチレーションカウンターを製作した。以下各々についてまとめる。

3-1 シンチレーションカウンター

本実験では、まずシンチレーションカウンターを製作した。製作したシンチレーションカウンターを以下に示す。



光電子増倍管の受光面とシンチレータは、光学グリースを用いて粘着する。シンチレーションカウンターは遮光布で覆い、さらに段ボール、遮光布、暗幕で覆って不要な光が入らないようにする。

3-1.1 光電子増倍管

光電子増倍管 (photomultiplier) 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。

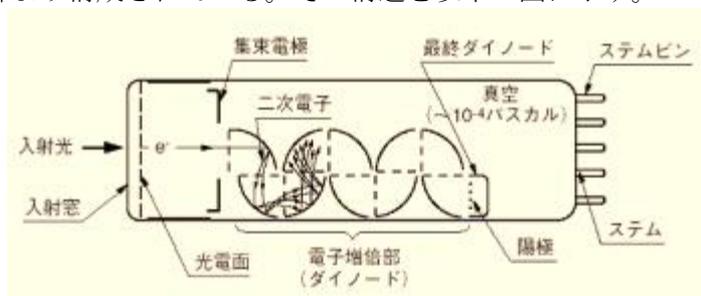


図 3-1.1.1

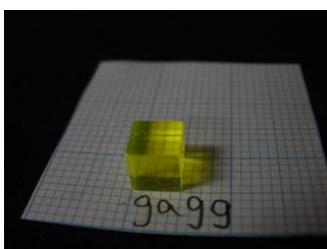
シンチレータで発光した光を効率よく検出するには、光を増幅して電気信号として取り出すデバイスが必要である。そのために使うのが光電子増倍管である。

光が金属または半導体でできた光電面に当たると光電効果によって電子が放出される。光電面で放出された電子は電界で加速されて金属で作られた二次電子面 (dynode) にあたり、電子流れにより電子が増幅される。最終ダイノードより取り出された二次電子電子束を陽極からパルス信号として取り出す。本実験では、浜松ホトニクス社の H7195UV を用いた。

3-1.2 シンチレータ

放射線が入射した際に蛍光を発する物質をシンチレータと言う。これは無機物質の結晶と有機物質に大別され、その発光機構は両者でかなり異なっている。今回は無機シンチレータを用いた。放射線が入射して結晶中でエネルギーを失うと、結晶中の電子が励起された後に脱励起すると、そのエネルギーがシンチレーション光となる。このシンチレーション光の減衰時間は励起状態の寿命によって決まり、結晶の温度に依存することも少なくない。本実験では5mm×5mm角のシンチレータを3種類用いた。詳しくは下記に記す。

3-1.2(a) GAGG (Ce 添加ガドリニウムアルミニウムガリウムガーネット)



組成式 $\text{Gd}_3\text{Al}_3\text{Ga}_{12}\text{O}_{12}:\text{Ce}$

発光元素のCeが、 Ce^{3+} の5d準位から4f準位に遷移する際発光する。これにより、高い発光強度をもつ。減衰時間は88nsと比較的短い。

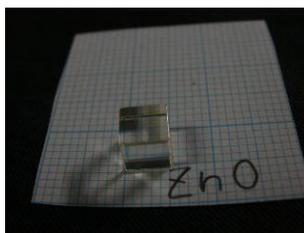
3-1.2(b)BSO (ケイ酸ビスマス)



組成式 $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$

発光量が大きく、減衰時間が100ns程度と比較的短い。

3-1.2(c)ZnO (酸化亜鉛)



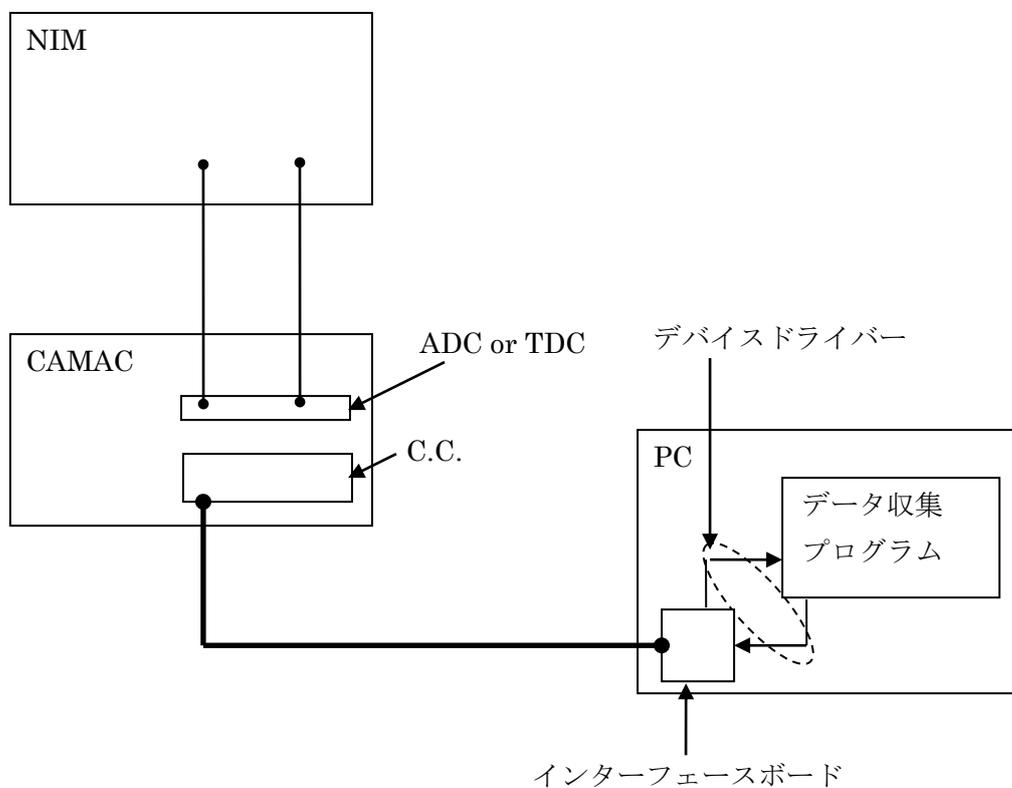
組成式 ZnO

発光強度は低いが、減衰時間が100ps程度と極めて短い。

3-2 エレクトロニクス

研究で使用した解析装置について述べる。

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。



2-2.1) NIM 規格

実験で使用したエレクトロニクス (DiscriminatorやAmpなど) は、NIM規格のものである。NIM規格 (Nuclear Instrument Modules) とは米国原子力委員会によって制定された「放射線測定モジュール標準規格TID-20893」のことである。回路モジュールの機械的・電気的使用を規定している規格であり、素粒子・原子核実験で幅広く使用されている。標準的なNIMピンはモジュールが12個挿入でき、モジュールは $\pm 6V$ 、 $\pm 12V$ 、 $\pm 24V$ の供給を受ける。

3-2.2)使用するモジュール

以下に本実験で使用するモジュールについて述べる。

- **Clock generator** : 周期的なパルスを発生させる装置
- **Discriminator** : 設定したしきい値(threshold)を超えた入力信号を、デジタル信号に変換して出力する装置。veto (否定入力) への入力があると信号は出力されない。
- **Gate Generator** : 入力信号のパルス幅を調整する装置
- **Scaler** : 入力されたデジタル信号をカウントする装置
- **Coincidence** : 複数の信号が同時に来た時に信号を出力する装置
- **Attenuator** : 入力信号を減衰させる装置。減衰率を x とおくと、

$$x = -20\log\frac{v_0}{v_i}$$

v_i :入力信号の波高値

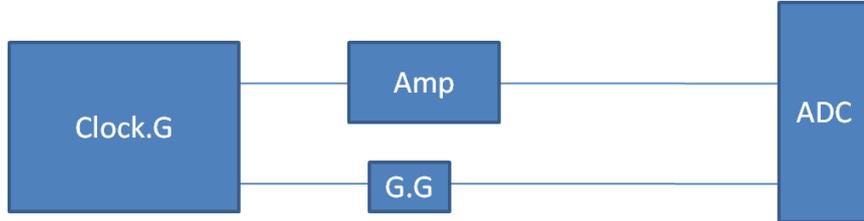
v_0 :出力信号の波高値

で定義され、単位は dB である。

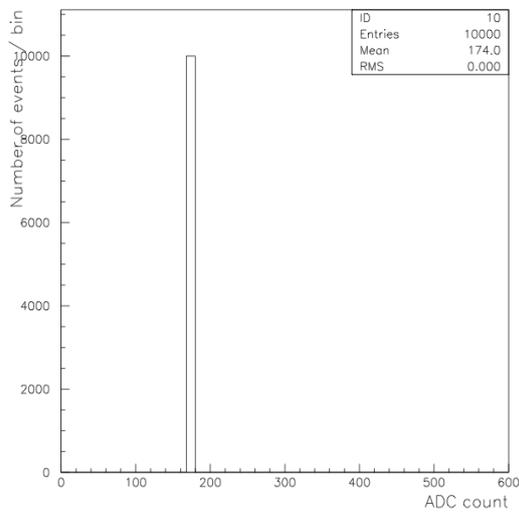
- **Amp** : 信号を増幅させる装置。

○Amp の増幅率について

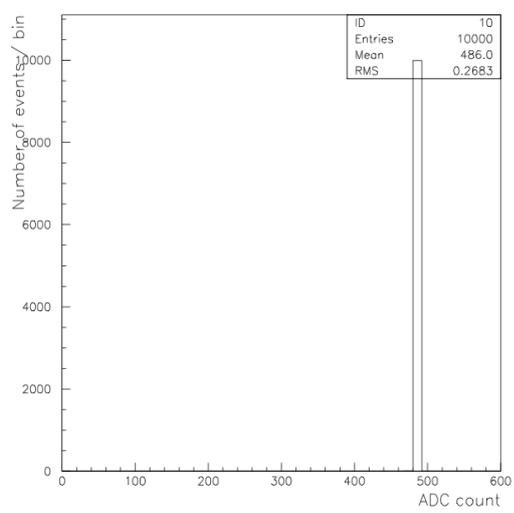
使用した Amp のチャンネルは 1 と 2 である。それぞれの増幅率を、Amp 使用前の ADC カウント数と使用後のカウント数の比較により求めた。いかにセットアップ図を示す。



● c h 1 の場合



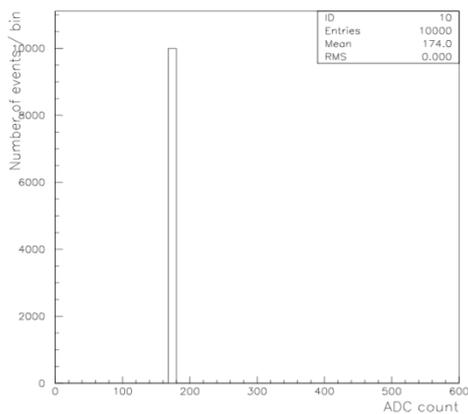
使用前 174.0 カウント



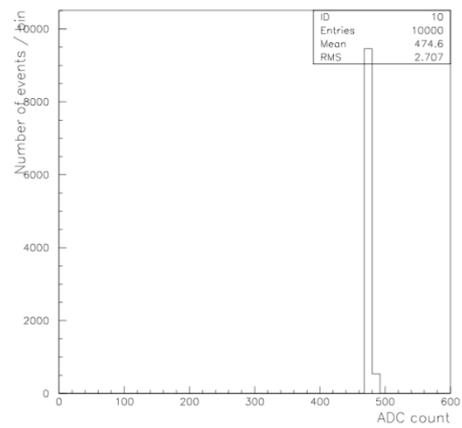
使用后 486.0 カウント

よって、 $486/174=2.79$ 増幅率は 2.79 倍である。

● c h 2 の場合



使用前 174.0 カウント



使用后 474.6 カウント

よって、 $474.6/174=2.73$ 増幅率は 2.73 倍である。

3-2.3 データ収集解析の概略

3-2.3(a) camdrv

camdrvとはデータ収集システム用Kinokoプロジェクトのソフトウェアとして開発されたCAMAC向けのLinuxデバイスドライバーである。本実験で使用するPCはOSにRedhat Linux9を搭載しているので2.4カーネル、豊伸電子製CCPクレートコントローラー+PCIバスカードの設定でインストールし、使用した。

3-2.3(b)CAMAC 規格(computerAutomated Measurement and Control)

CAMAC規格とは放射線検出器のアナログ信号をデジタル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でき、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。

3-2.3(c) クレートコントローラ

本実験で使用したクレートコントローラは豊伸電子のCCP-F型でCAMAC規格に対応した2幅のクレートコントローラモジュールである。CCP-ISAと組み合わせてPCとCAMACシステムをインターフェイス出来る。

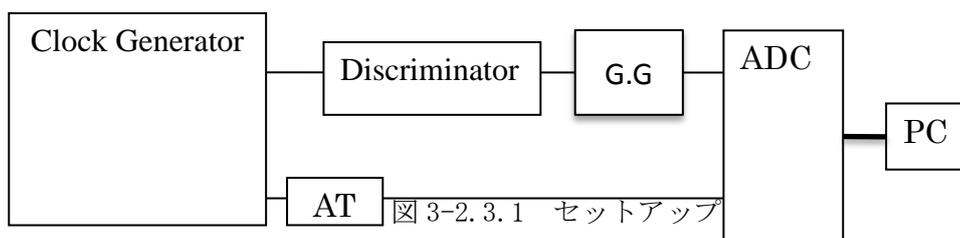
3-2.3(d) ADC(Analogue to Digital Converter)

アナログ電気信号をデジタル電気信号に変換するモジュール。
本実験ではLeCroy社の2249Wを使用した。これは積分型で、Full scaleは-500pCである。カタログ値の感度は0.25pC/countと高く、入力抵抗は50Ωである。

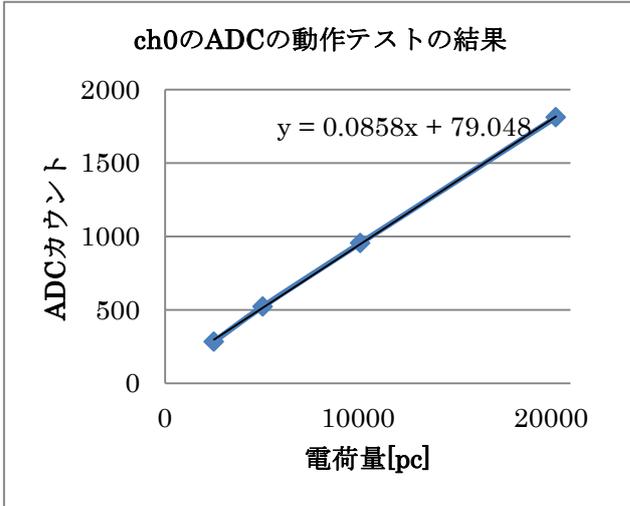
ADCの動作テストを以下に示す。

Attenuatorを用いてClockgeneratorからの信号の大きさを変化させ、ADCカウント数の変化を測定した。この時、電荷はオシロスコープから電圧とwidth(ns)を見積もり、以下の計算により求めた。この時のケーブルの特性インピーダンスは50Ωである。

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V}{50} \text{ [A]} \quad , \quad Q = I \times t \text{ [c]}$$



Ch0 の動作テストの結果

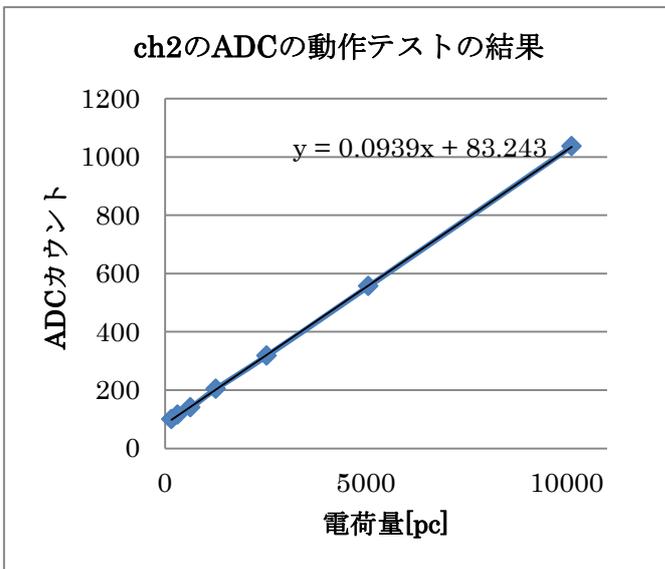


電荷量 [pc]	ADC カウント 数	減衰率 [dB]
20250	1812	12
10125	956	18
5062.5	522.5	24
2531.25	283.9	30

よって、Ch0 の pedestal は 79.04 である。また、この結果より線形性が保たれていることがわかる。

Ch0 と同様にして Ch2 についても動作テストを行った。結果について下に示す

Ch2 の動作テスト



電荷量 [pc]	ADC カウント 数	減衰率 [dB]
10125	1036	18
5062.5	556	24
2531.25	317.8	30
1265.625	204	36
632.8125	140	42
316.40625	115.7	48
158.203125	100	54

よって、Ch2 の pedestal は 83.243 である。また、この結果より線形性が保たれていることがわかる。

本実験では、PMT からの信号が Amp や Attenuator といったモジュールを通り ADC へ到達する。この時の PMT 込みの pedestal 測定の結果を以下に示す。ここで Gate 幅は 250ns で、光量測定の時と同じである。

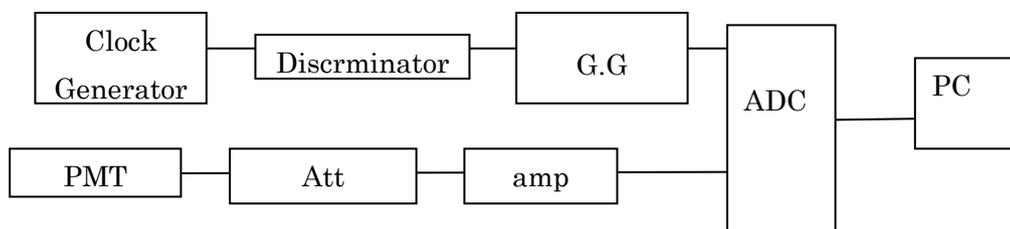


図 3-2.2.2 setup

光量測定では Attenuator は 0db である。

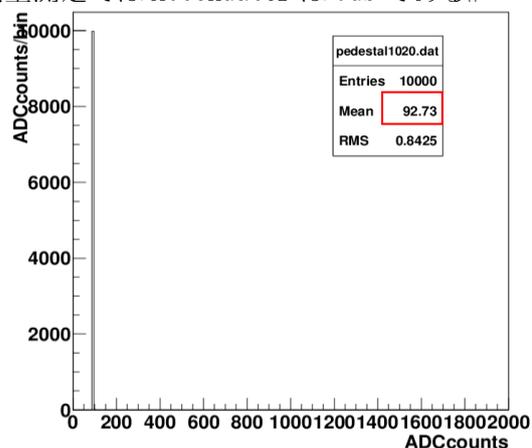


図 Ch0 の pedestal

結果、pedestal は 92.73 である。

PMT の雑音の分若干 pedestal が高くなっていることがわかる。

時間分解能測定では Attenuator は 12db である。

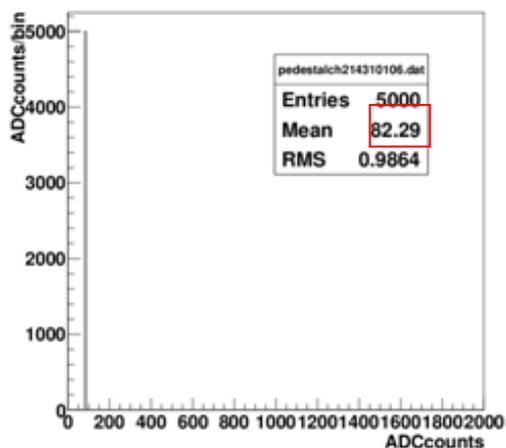


図 Ch2 の pedestal

結果、ch2 の pedestal は 82.29 である。

同様に ch0 の pedestal は 81.0 である。

3-2.3(e) TDC(Time to Digital Converter)

TDCと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モジュールである。本実験では林栄精器のRinei-PC060を使用した。Full scale 118 ns または 236 ns (モジュール上のジャンパで切替え)、時間精度 25 ps (フルスケール 118 ns) / 35 ps (フルスケール 236 ns)。本実験では 25psec の方を用いた。

TDCの動作テストを以下に示す。

ClockGeneratorの信号の片方をTDCのstartに、片方にdelayを通してstopに入れて測定した。

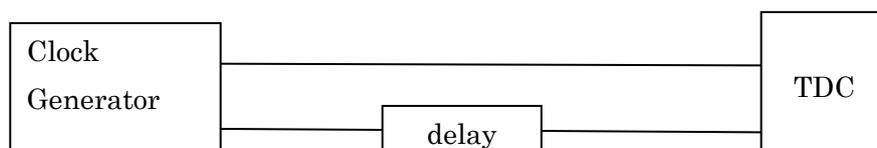
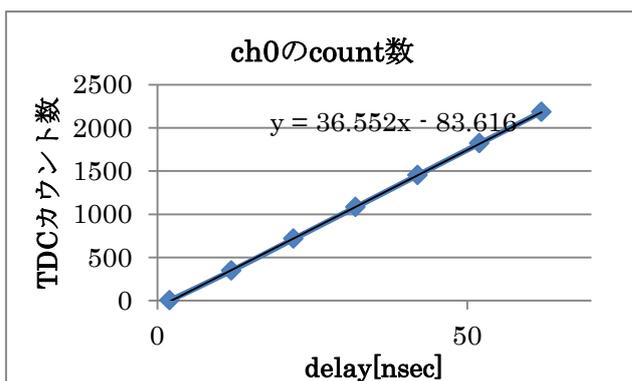


図 3-2.2.3 setup

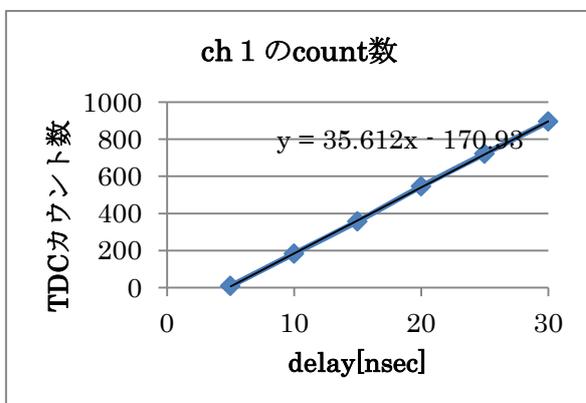
Ch0の動作テスト結果



delay[ns]	count 数
2	1.02
12	347.1
22	715.2
32	1082
42	1452
52	1820
62	2185

よって、pedestal は-83.61 である。図より線形線が保たれていることが分かる。

Ch1の動作テスト結果



delay[ns]	count 数
5	9.06
10	183.9
15	357.8
20	545.9
25	722
30	895

よって、pedestal は-170.9 である。図より線形線が保たれていることが分かる。

3-2.3(f) データ収集及び解析 program

収集、解析に使用した program を挙げる。

以下はADC を収集するプログラムである。

```
/***** daq01c *****/ created 2002/Dec/25th Kenkichi Miya. *****/
```

```
*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
```

```
*****/
```

```
#include <fcntl.h>
```

```
#include <system.h>
```

```
#include <unistd.h>
```

```
#include <sys/types.h>
```

```
#include <stdio.h>
```

```
#include <string.h>
```

```
#include <stdlib.h>
```

```
#include <math.h>
```

```
#include <sys/sem.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, es;
```

```
    int qx, data, adc, is;
```

```
    time_t time_s, time_e;
```

```
    int time_run;
```

```
    /*=====
```

```
    *Ask the user to answer the slot number and channel number
```

```
    *of the ADC module to set those integer numbers.
```

```
    *=====*/
```

```
    printf("Slot number of ADC?%n");
```

```
    scanf("%d",&adc);
```

```
    printf("Channel number?%n");
```

Camdrv のインクルード

各スロットナンバー、チャンネルナンバーの読み込み

```

scanf("%d",&ia);

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

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

fp=fopen("test.dat","w");

/*=====
*How many events do you take?
*=====*/

printf("Number of events?%n");
scanf("%d",&n_ev);
fprintf(fp,"%d%N\n",n_ev);

/*=====

*Open CCP interface device file.
*If it fails, exit.
*=====*/

if(COPEM){
printf("cp open error%N");
exit(-1);
}

/*=====
*Initialize CAMAC.
*=====*/

CSETCR(0);
/* CSETCR(1);*/

CGENZ();
CGENC();
CREMI();

/*=====
*Enable LAM and Clear it.
*=====*/

CAMACNAP(adcia,26,&data,&q,&ex);/* F=26 is enable.*/
CAMACNAP(adcia,9,&dcta,&q,&ex);/* F=9 is clear.*/

```

イベント数の読み込み

CAMAC への LAM (ADC) の確認

```

/*=====
*Again send enable command to prepare the first event.
*-----*/
CAMACNAF(adcia,23,&data,&q,&x);

/*=====
* send message to the user:
*-----*/
printf("CAMAC initialize done.\n");
printf("Number of event=%d\n",n_ev);
/*-start time.-*/
time_s=time(NULL);

/*=====
*Event loop.
*-----*/
i_ev=0;
while(i_ev<n_ev)
{
/*-----
*Test LAM.
*-----*/
CAMACNAF(adcia,8,&data,&q,&x);/* F=8 is test LAM.*/
/*-----
*If no event comes yet, q is set to be 0,
*otherwise, the digitized event is there!
*-----*/
if(q!=0)
{
/*-----
* Read the digitized data from the register:
*-----*/
CAMACNAF(adcia,0,&data,&q,&x);
printf("i_ev,data,q,x=%d%d%d\n",i_ev,data,q,x);
/*-----
*The read data is written into the file.
*-----*/
fprintf(fp,"%d\n",data);

```

以下、データの取得

データのディスプレイ表示

データのファイルへの書き出し

```

/*
 *Update the event counter(i_ev), and send message for
 *every 100 events
 */
i_ev++;
if(i_ev%100==0)
{
printf("Event=%d\n",i_ev);
printf("data=%d\n",data);
}
/*
 *Clear LAM to wait for the next event.
 */
CAMACNAF(adcia,9)&data,&q,&x);
}
}
/*end time and running time. */
time_e=time(NULL);
time_run=time_e-time_s;
printf("Running time=%d sec.\n",time_run);
/*=====
 *Instructions for termination.
 *=====*/
CAMACNAF(adcia,24)&data,&q,&x);/* F=24 is disable.*/
CCLOSE); /* CAMAC close.*/
fclose(fp); /* Close data file.*/
return 0;
}

```

以下はADC と TDC を同時読出するプログラムである。

```

/**** tdcadc *** created 2007/Feb/23th Kenkichi Miya. ***
 *Read out both TDC(RPC00) and ADC(LRS2249W).
 *****/

#include <fcntl.h>
#include <system.h>
#include <unistd.h>

```

Camdrv のインクルード

```

#include<sys/types.h>

#include<stdio.h>

#include<string.h>

#include<stdlib.h>

#include<math.h>

#include<system.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 data_adc, data_adc2, data_tdc, data_tdc2, q;

/*char fname[30];*/

/*=====

*TDC and ADC slot number and channel number:

const int slot_adc=1;

const int chan_adc=0;

const int slot_adc2=1;

const int chan_adc2=2;

const int slot_tdc=2;

const int chan_tdc=0;

const int slot_tdc2=2;

const int chan_tdc2=1;

/*=====

*The filename to save raw data is "test.dat".

*Renaming it is taken care by an appropriate shell script.

*=====*/

fp=fopen("test.dat","w");

/*=====

*How many events do you take?

*=====*/

printf("Number of events?%n");

scanf("%d",&n_ev);

/* n_ev is fixed to be 500 */

fprintf(fp,"%d\n",n_ev);

```

データ収集時の混乱を避けるため、各スロットナンバー、チャンネルナンバーをあらかじめ設定しておいた。

イベント数の読み込み

```

/*=====
* Open CCP interface device file.
* If it fails, exit.
*=====*/

if(COPEXN){
    printf("tcp open error\n");
    exit(-1);
}

/*=====
* Initialize CAMAC.
*=====*/

CSETCR0;
CGENZ0;
CGENC0;
CREMI0;

/*=====
* Enable LAM and Clear on TDC
*=====*/

CAMACNAF(slot_tdc,chan_tdc,26)&data_tdc,&q,&x);/* F=26 is enable.*/
CAMACNAF(slot_tdc,chan_tdc,9)&data_tdc,&q,&x);/* F=9 is clear.*/
CAMACNAF(slot_tdc2,chan_tdc2,26)&data_tdc2,&q,&x);/* F=26 is enable.*/
CAMACNAF(slot_tdc2,chan_tdc2,9)&data_tdc2,&q,&x);/* F=9 is clear.*/

/*=====
* Enable LAM and Clear on ADC
*=====*/

CAMACNAF(slot_adc,chan_adc,26)&data_adc,&q,&x);/* F=26 is enable.*/
CAMACNAF(slot_adc,chan_adc,9)&data_adc,&q,&x);/* F=9 is clear.*/
CAMACNAF(slot_adc2,chan_adc2,26)&data_adc2,&q,&x);/* F=26 is enable.*/
CAMACNAF(slot_adc2,chan_adc2,9)&data_adc2,&q,&x);/* F=9 is clear.*/

/*=====
* Again send enable command to prepare the first event.
*=====*/

/* CAMACNAF(adc,ia,26)&data,&q,&x); */ /* 20070223 KM */

/*=====
* send message to the user.
*=====*/

```

CAMAC への LAM (TDC) の確認

CAMAC への LAM (ADC) の確認

```

printf("CAMAC initialize done.\n");
printf("Number of event=%d\n",n_ev);

/*====
*Event loop.
*====*/

i_ev=0;
while(i_ev<n_ev)
{
/*====
*Test TDCs LAM.
*====*/

CAMACNAF(slot_tdc,chan_tdc,S,&data_tdc,&q,&x);

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

if(q!=0)
{
/*====
*Read the digitized data from the register:
*====*/

CAMACNAF(slot_ack,chan_ack,0,&data_ack,&q,&x);

CAMACNAF(slot_ack2,chan_ack2,0,&data_ack2,&q,&x);

CAMACNAF(slot_tdc,chan_tdc,0,&data_tdc,&q,&x);

CAMACNAF(slot_tdc2,chan_tdc2,0,&data_tdc2,&q,&x);

printf("i_ev:TDC,ADC,q,x=%d%d%d%d%d\n",
        i_ev,data_ack,data_ack2,data_tdc,data_tdc2,q,x);

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

fprintf(fp,"%d%d%d\n",data_ack,data_ack2,data_tdc,data_tdc2);

/*====
*Update the event counter(i_ev)
*====*/

i_ev++;

/* and send message for every 100 events.

```

以下、データの取得

データのディスプレイ表示

データのファイルへの書き出し

```

        ..temporary commented out. 20070223 KM:*/

/*--
*if(i_ev%100==0)
*{
*printf("Event=%d\n",i_ev);
*printf("data=%d\n",data);
*}-----*/

/*--
*Clear LAM to wait for the next event.
*--*/

CAMACONAF(slot_adc,chan_adc,9,&data_adc,&q,&x);
CAMACONAF(slot_adc2,chan_adc2,9,&data_adc2,&q,&x);
CAMACONAF(slot_tdc,chan_tdc,9,&data_tdc,&q,&x);
CAMACONAF(slot_tdc2,chan_tdc2,9,&data_tdc2,&q,&x);
}
}

/*=====
*Instructions for termination.
*=====*/

CAMACONAF(slot_adc,chan_adc,24,&data_adc,&q,&x); /* F=24 is desable.*/
CAMACONAF(slot_adc2,chan_adc2,24,&data_adc2,&q,&x); /* F=24 is desable.*/
CAMACONAF(slot_tdc,chan_tdc,24,&data_tdc,&q,&x); /* F=24 is desable.*/
CAMACONAF(slot_tdc2,chan_tdc2,24,&data_tdc2,&q,&x); /* F=24 is desable.*/

CCLOSE);          /* CAMAC close. */

fclose(fp);      /* Close data file.*/

return 0;
}

```

以下は TDCADC の解析プログラムである。

```

/*****2dhistpart3*****/

{
gROOT->SetStyle("Plain");

int index=0;

int ev;

char str[30];

cout<<"Input file name."<<endl;

```

```

cin>>str;
ifstream fin(str);
if(!fin)
{
    cout << "ERROR! File dosen't exist."<<endl;
    return 1;
}
// cout<<"How many events do you have?"<<endl;
// cin>>ev;
TH1F *h1 = new TH1F("h1","ADC",100,0,2000);
TH1F *h2 = new TH1F("h2","ADC2",100,0,2000);
TH1F *h3 = new TH1F("h3","TDC",100,0,4000);
TH1F *h4 = new TH1F("h4","TDC2",100,0,4000);
TH2F *g1 = new TH2F("g1","TDC/ADC",100,0,2000,100,0,4000);
TH2F *g2 = new TH2F("g2","TDC/ADC2",100,0,2000,100,0,4000);
// double tdc[ev],adc[ev];
double a,a2,t,t2;
t=a=a2=t2=0;
ifstream fin(str);
while(!fin.eof())
{
    fin>>a>>a2>>t>>t2;
    if(a>300&& a2>300)
    {
        h1->Fill(a);
        h2->Fill(a2);
        h3->Fill(t);
        h4->Fill(t2);
        g1->Fill(a,t);
        g2->Fill(a2,t);
    }
    // fin>>adc[index]>>tdc[index]>>;
    // index++;
}
fin.close();
TCanvas *c1=new TCanvas("c1","c1",0,0,700,700);

```

グラフの設定

("ラベル","タイトル","bi数","min","max")

1次元と2次元グラフについて
定めている

データの条件設定

データの読み込み

```
c1->Divide(2,3);  
c1->ed(1);  
h1->Draw0;  
c1->ed(2);  
h2->Draw0;  
c1->ed(3);  
h3->Draw0;  
c1->ed(4);  
h4->Draw0;  
c1->ed(5);  
g1->SetMarkerSize(0.5);  
g1->Draw("P");  
c1->ed(6);  
g2->SetMarkerSize(0.5);  
g2->Draw("P");  
}
```

グラフの書き出し

第4章 光量測定

^{137}Cs 線源を用いて、シンチレーターに GAGG,BSO,ZnO の光量測定を行った。

セットアップ図

下記に示したセットアップにより測定を行った。

PMT に HV をかけ、PMT からの信号を、まず AMP で増幅する。(GAGG では、この後 ATT で減衰する。) それをシグナルと Gate 信号に分ける。Gate 信号は、Discr を用いて、Threshold を設定し、G.G.に通して、ADC の Gate へ入力する。この際のゲート幅は、250(nsec)である。

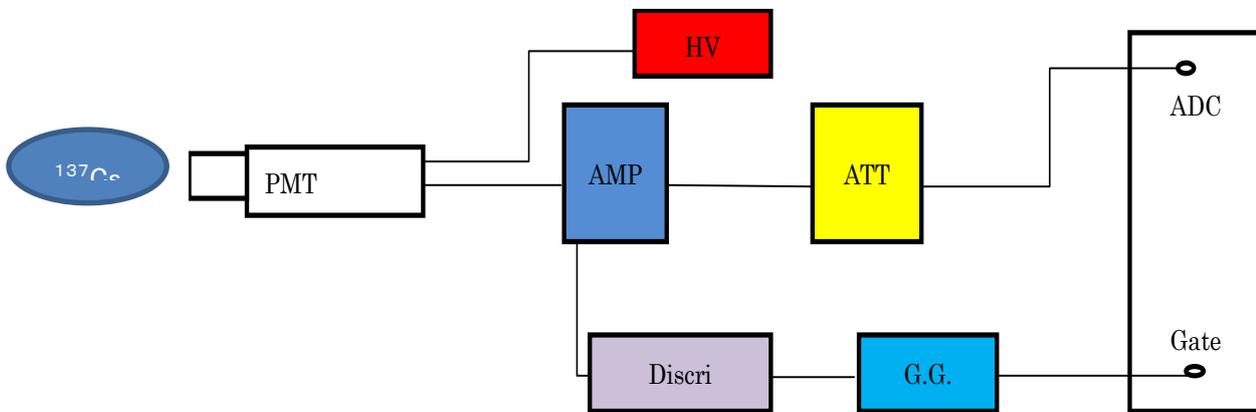


図 4-1 光量測定のセットアップ

以下に各シンチレーターでの測定条件を示す。

	GAGG	BSO	ZnO
HV (V)	1700	1700	1700
AMP (台数 増幅率[倍])	1 2.7	1 2.7	2 7.56
ATT (dB)	18	0	0
Threshold (mV)	150	45	100

表 4-1 各シンチレーターでの測定条件

4-1 GAGG 結果

GAGG について光量測定を行い、図 4-1-2 のような波高分布を得た。

さらに、図 4-1-2 を ADCcount 数 740~1500 の範囲で拡大し、ガウス分布でフィットすると図 4-1-3 を得た。

ADCcount 数 750 付近では、コンプトン端が現れ、750~1200 付近で、光電効果のピークを見ることができた。

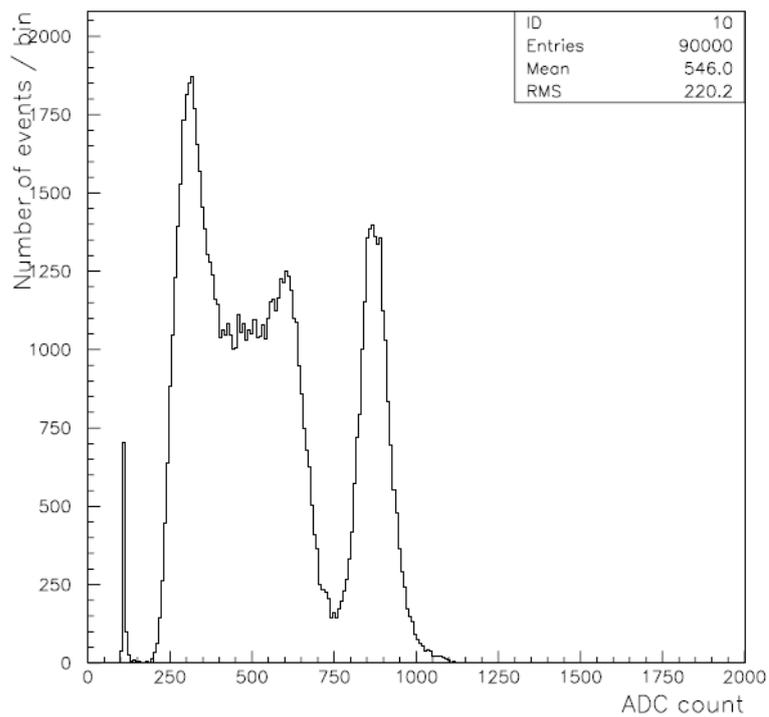


図 4-1-2 GAGG の光量測定の波高分布

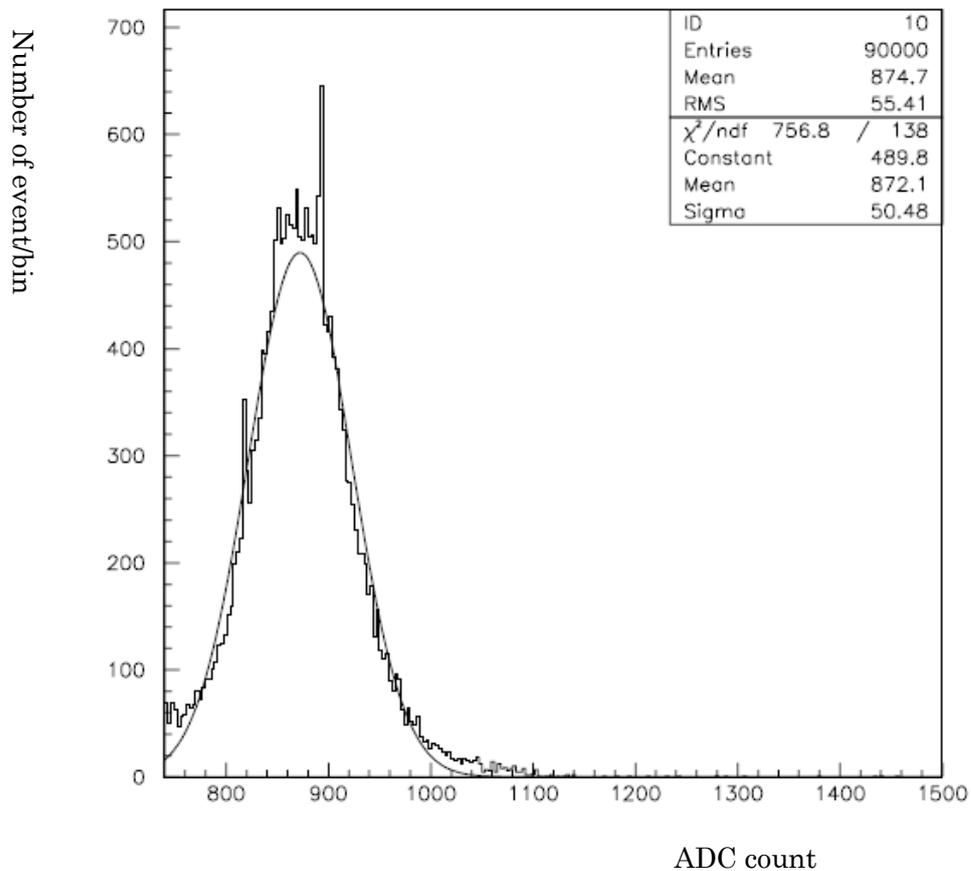


図 4-1-3 図 4-1-2 を ADCcount 数 740~1500 の範囲のみ取り出し、ガウス分布でフィットした図

光量測定の計算式は、以下に示す。

$$\{(\text{ピークのカウンツ数}) - (\text{pedestal カウンツ数})\} \times 0.25 \text{pc} \quad (4.1)$$

より、光電効果のピークが 874.7count なので、

$$(872.1 - 92.73) \times 0.25 = 194.84 \text{pc}$$

AMP の増幅率が 2.7 倍なので

$$194.84 / 2.7 = 72.16$$

ここで、ATT18dB なので、

$$18 = 20 \log_{10} A$$

$$A = 10^{\frac{9}{10}} = 7.94 \approx 8$$

となるので、ATT で 1/8 倍している。

よって、

$$72.16 \times 8 = 577.31 \approx 577.3$$

以上より GAGG の光量は、577.3pc と得られた。

4-2 BSO 結果

BSO の光量測定を行い、図 4-2-1 のような波高分布を得た。さらに、図 4-2-1 を ADCcount 数 430~800 の範囲のみ取り出し、ガウス分布でフィットすると図 4-2-2 のようなグラフが得られた。

ADCcount 数 420~430 付近でコンプトン端が現れ、440~750 付近で、光電効果のピークを見ることができた。

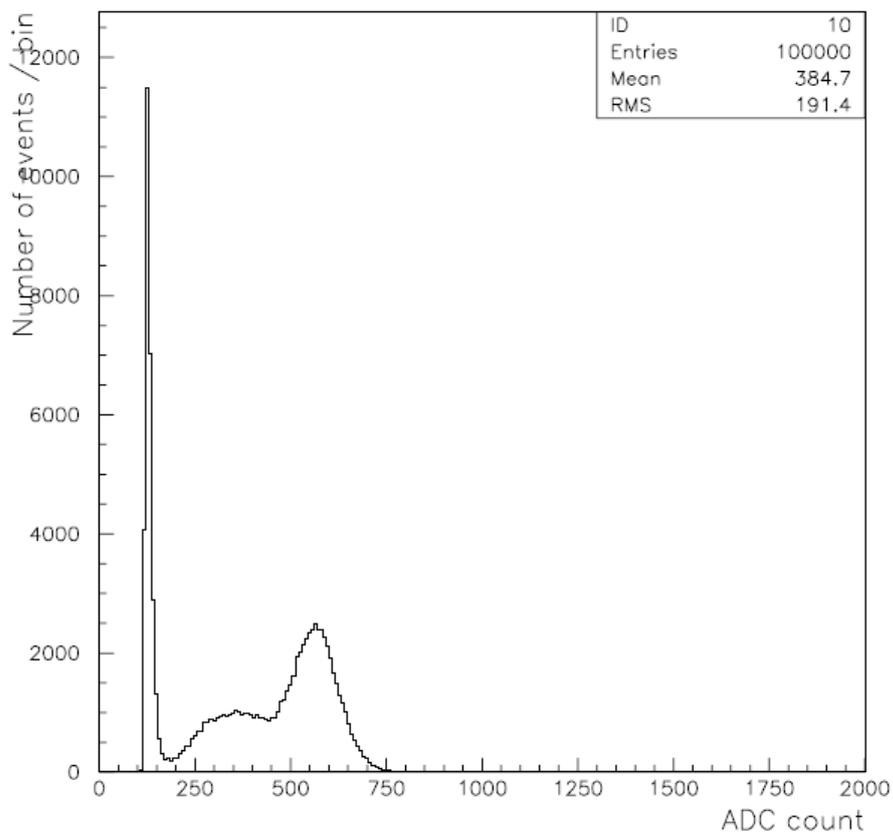


図 4-2-1 BSO の光量測定で得られた波高分布

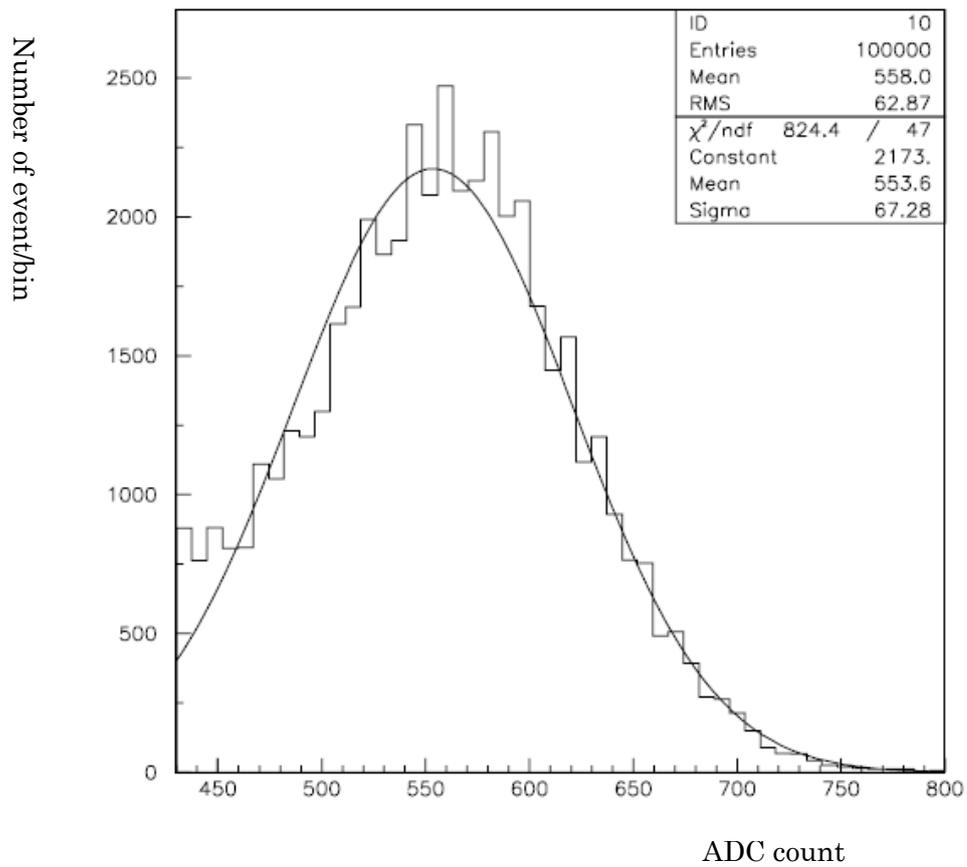


図 4-2-2 図 4-2-1 を ADCcount 数 430~800 の範囲のみ取り出し、ガウス分布でフィットした図

光量測定の計算

(4.1)より、光電効果のピークが 553.6count なので、

$$(553.6 - 92.73) \times 0.25 = \text{pc}$$

AMP の増幅率が 2.7 倍なので

$$116.32 / 2.7 = 42.67 \approx 42.7 \text{pc}$$

以上より BSO の光量は、42.7pc と得られた。

4-3 ZnO 結果

ZnO の光量測定を行い、図 4-3-1 の波高分布を得た。

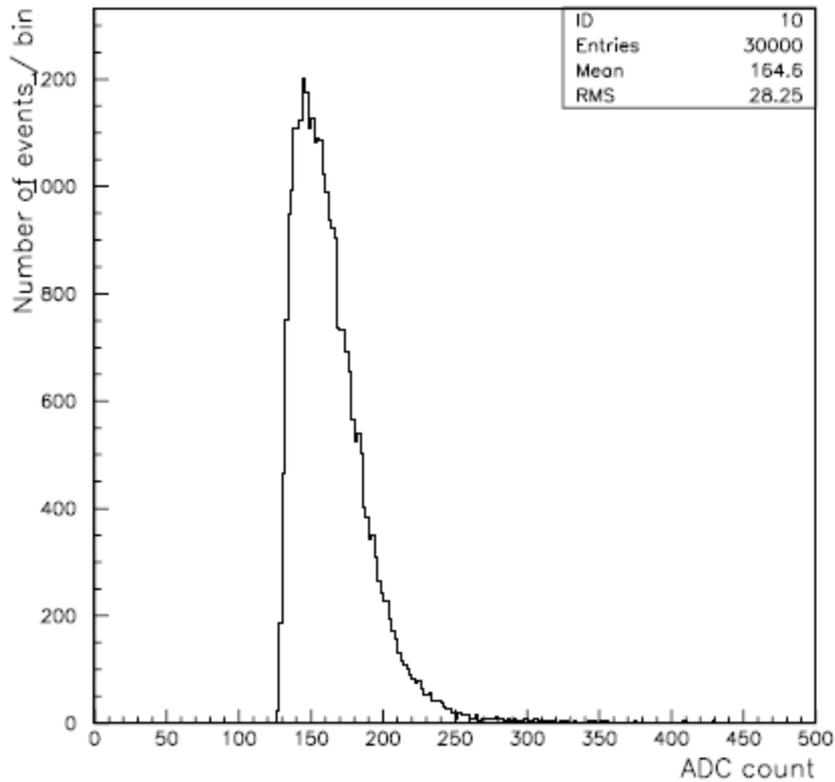


図 4-3-1 ZnO の光量測定で得られたグラフ

波高分布に光電ピーク、コンプトン散乱、およびペDESTALという構造が見受けられない。一方で屈折率が 1.9 と比較的大きな材料であるためインチレーション光の寄与とチェレンコフ光の寄与を波高分布だけでは分離できない可能性がある。

そこで、LED を点灯した場合の波高分布より信号の入射光子数を算出し、662keV の γ 線が光電効果を起こして叩き出された電子が発するチェレンコフ光子数の計算値を比較、検討してみる。

1光子が何ADCカウントに相当するのかをMean-sigma法を用いて求める。

ClockGeneratorで青色LEDを光らせ、PMTで測定した。光量はLEDに遮光テープを貼ることで調節した。遮光テープを削ることで光量を徐々に増やし、その時々において1光子が何ADCカウントに相当するのかを計算した。その平均を今セットアップにおける1光子のADCカウント数とした。

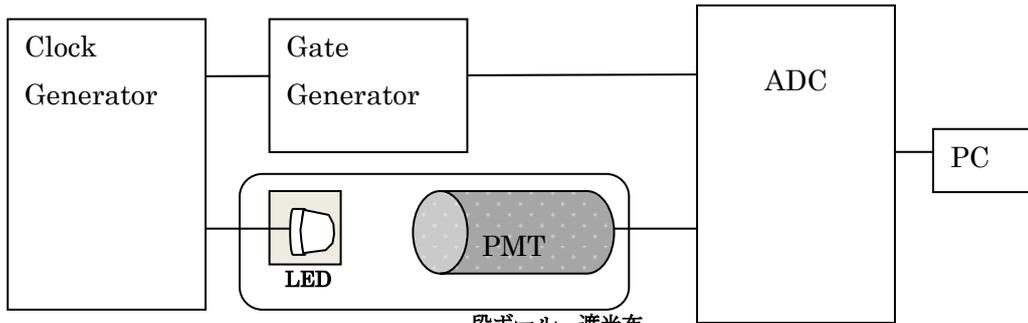
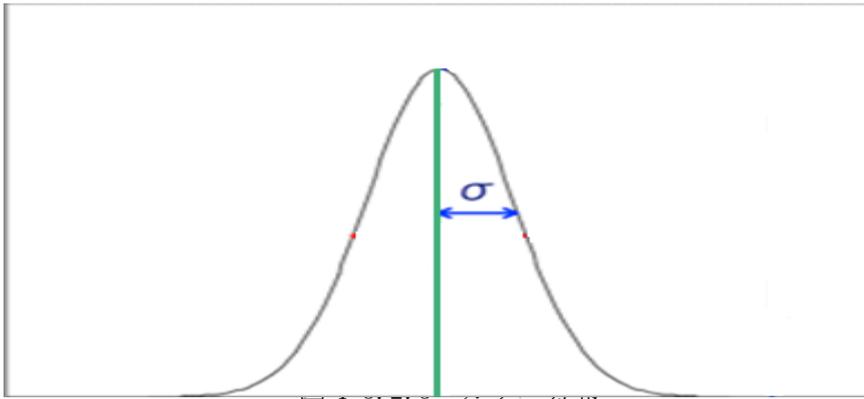


図 4-3. 2. 2 setup

計算方法



LEDからの光子数を N とすると光子の分布は上図の様になり $\sigma = \sqrt{N}$ となる。
PMTで増幅した時の光電子数を N_f 、その時の標準偏差を σ_f とすると

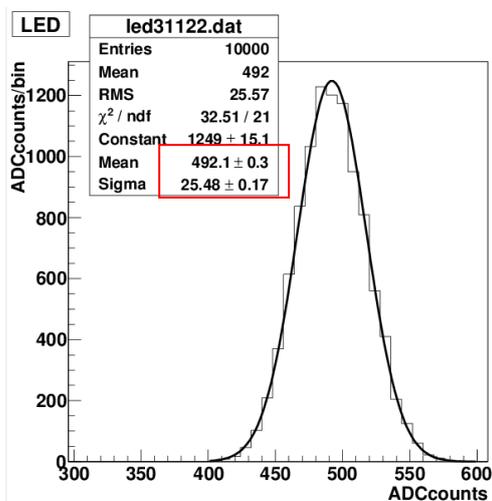
$$N : \sigma = N_f : \sigma_f$$

の関係となるはずである。これより

$$N = \frac{N_f^2}{\sigma_f^2} = \frac{(\text{Peak-pedestal})^2}{\sigma_f^2} \quad \text{---①が求められる。}$$

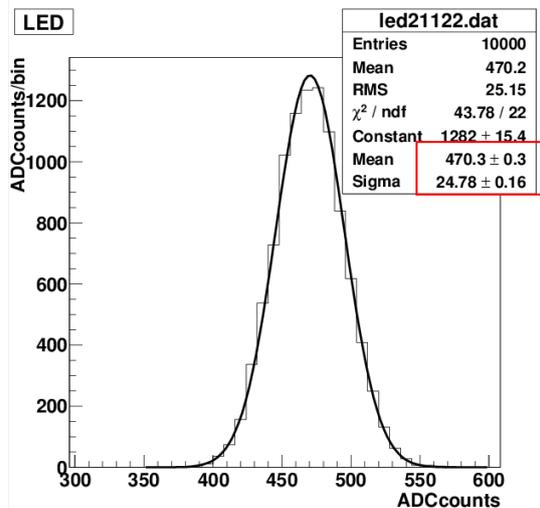
よって1光電子あたりのカウント数 $= \frac{N_f}{N}$ ---②となる。

得られたグラフ



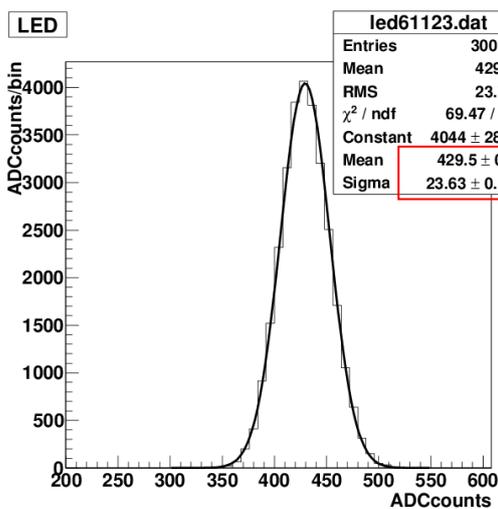
① より $N = 261.56793$

② より $\frac{N_f}{N} = 1.579169128$ — ③



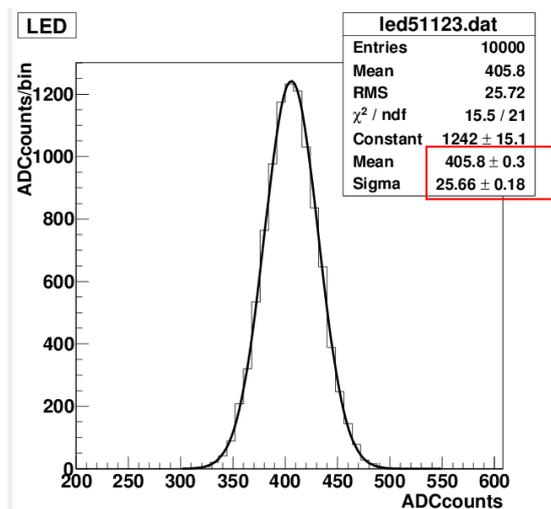
① より $N = 244.880543$

② より $\frac{N_f}{N} = 1.596941902$ — ④



① より $N = 219.9629168$

② より $\frac{N_f}{N} = 1.593268561$ — ⑤



① より $N = 162.2867399$

② より $\frac{N_f}{N} = 2.013473191$ —

⑥

$$\frac{③+④+⑤+⑥}{4} = 1.695713196$$

よって 1 光電子 = 1.7ADC カウントとなる。

チェレンコフ光子数の算出

^{137}Cs から放出されたガンマ線が ZnO 中で光電効果を起こしてたたき出した電子は、減速してその速さが c/n になるまでの間チェレンコフ光を出す。この光子数の計算について以下に述べる。

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)があるが、1MeV以下の電子では制動放射の寄与は無視してよい。荷電粒子が物質中を通過した時の単位長さ当たりのエネルギー損失は Bethe-Bloch 式で求められる。以下に Bethe-Bloch の式を示す。

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{\max}}{I^2} - 2\beta^2 \right] \quad (1)$$

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} (個/mol)

r_e :電子の古典半径= 2.817×10^{-13} cm

$m_e c^2$:電子の静止質量= 0.511 MeV

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、

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

入射粒子の質量を 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 は結晶が複数の原子から構成される為、 I_{eff} と与えられ、 I_{eff} は以下のように求めることができる。

$$\ln I_{eff} = \frac{\sum a_i Z_i \ln I_i}{Z_{eff}} \quad (2)$$

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

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 番目の原子の平均励起ポテンシャル

で与えられる。

またチェレンコフ光の光子数は、PMT の光電面の感度がある領域(300 nm ~ 650 nm)では

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi z^2 \alpha \sin^2 \theta \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{1}{\lambda^2} d\lambda \text{ photons/cm}$$

で与えられ、微細構造定数が $\alpha = 1/137$ より

$$\frac{dN}{dx} = 475 z^2 \sin^2 \theta$$

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。

これらの式を用いて、電子のエネルギー損失とチェレンコフ光子数を 10nm 刻みで計算して加算するプログラムを作成した。(プログラムは後に示す。) ^{137}Cs の光子のエネルギーは 662KeV で、これが光電効果で出てきた電子の始めの運動エネルギーである。

ここで、Bethe-Bloch 式に代入する値は、

ρ : 5.606g/cm³、 A :81.41g/mol、 Z :38、 z :-1 である。

また、Zn (原子番号 30) の平均励起ポテンシャル I_{zn} が、

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

より、 $I_{zn} \approx 324 \text{eV}$ となり、O(原子番号 8)の平均励起ポテンシャル I_o が

$$\frac{I}{Z} = 12 + \frac{7}{Z} \text{eV} \quad (Z < 13)$$

より、 $I_o = 103 \text{eV}$ となることから、(2)式より $I \approx 255 \text{eV}$ である。

チェレンコフ光の発光条件は

$$\beta \geq \frac{1}{n}$$

であり、チェレンコフ光の最低発光エネルギー E_{th} は以下で求められる。

$$\frac{1}{n} = \frac{pc}{E_{th}} = \frac{E^2 - m_e c^2}{E_{th}}$$

より、式変形すると、

$$E_{th} = \frac{n * m_e c^2}{\sqrt{n^2 - 1}}$$

となる。

ZnO の屈折率 n は 1.95 なので、これを代入すると、

$$E_{th} \doteq 0.595 \text{ MeV}$$

となり、エネルギーがこの値を下回ると、チェレンコフ光が出ない。

プログラムより、この値まで電子のエネルギーが下がるまでに発生するチェレンコフ光子数は ZnO 中を 740nm 進んだ時点で、20.2 個となった。この時のカウント数を求めると、1 光子あたりの ADC カウントは 1.7、AMP の増幅率が 7.6 倍なので、

カウント数=光子数×1 光子あたりの ADC カウント×AMP の増幅率+ペダスタル
より、

$$20.2 \times 1.7 \times 7.6 + 93.32 = 354.304 \dots \\ \doteq 354$$

よって、カウント数 354 以前はチェレンコフ光であるといえる。

これにより、ZnO では見えている光量のほとんどがチェレンコフ光であることが分かった。

```

/*bethebloch formula*/

#include<stdio.h>
#include<stdlib.h>
#include<math.h>
//#include<iostream>

//using namespace std;

#define D 0.402 /*2paiNare^2mec^2(mitudo)(Z/A)z*/
#define A1 8.031e-6 /*2(mec^2)^2/I^2*/
int main()
{
int i;

float dE; /* 0.662+0.511 */
float B; /* mec^2/(dE) */
float beta; /* beta */
float gamma; /*gamma */
float A2; /* D/beta^2 */
float A3; /* A1*beta^4*gamma^4/(1-beta^2) */
float bethe; /* bethe */
float ENi; /* bethe*dE*1e-3 */
float Co; /* 1/(beta*1.95) */
float S2; /* 1-(co*co) */
float Ni; /* N */
float Nt;

dE=1.173;
ENi=0;
Ni=0;
i=1;
Nt=0;
while(i<100)
{
beta=sqrt((dE*dE)-(0.511*0.511))/dE;
gamma=1/sqrt(1-beta*beta);
A2=D/(beta*beta);
A3=A1*beta*beta*beta*beta*gamma*gamma*gamma*gamma/(1+gamma);
betha=A2*(log(A3)-2*beta*beta);
ENi=bethe*1e-3;

Co=1/(beta*1.95);
S2=1-(Co*Co);
Ni=475*S2*1e-3;
Nt=Nt+Ni;
dE=dE+ENi;
i++;
printf("i=%d\n",i);
printf("S2=%g\n",S2);
}
}

```

```
    printf("dE=%g\n",dE);
    printf("Nt=%g\n",Nt);

    //  count << ENi << endl;

    }
return 0; }
```


^{22}Na から発した陽電子が形成するポジトロニウムの崩壊で生じる γ 線対を用いて、時間分解能の評価を行った。時間分解能の測定における条件を以下に示す。

シンチレータ	HV[v]	ATT1[dB]	AMP[台]	Th.[mV]	ATT2[dB]
BSO(1401)	2000	12	2	50	6
BSO(1431)	1800	12	2	50	6
GAGG(1401)	2000	12	1	100	12
GAGG(1431)	1800	12	1	100	12

γ 線がPMTのガラス面にあたることで、光電効果により電子が生まれ、チェレンコフ光が発生する事がある。今実験ではシンチレーション光のみの時間分解能を測定したい。鉛板で作ったコリメータを置くことで γ 線がシンチレータ以外の場所に当たる事象数を小さくすることができる。

比較のため各シンチレータにおいて次の3パターンについて測定した。

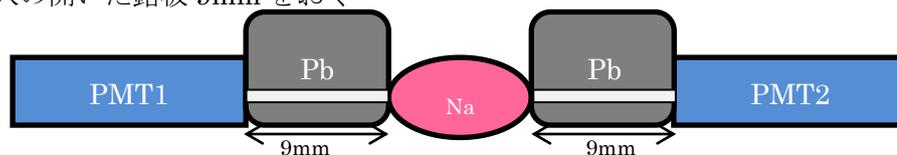
①線源に接触



②線源から各9mm 離す



③穴の開いた鉛板9mmをおく



ここで、鉛板は直径5mmの穴があいている。穴の位置は30mmの高さにある。



図 5.2 使用した鉛板の寸法。厚みは9mm。

●Attenuation length

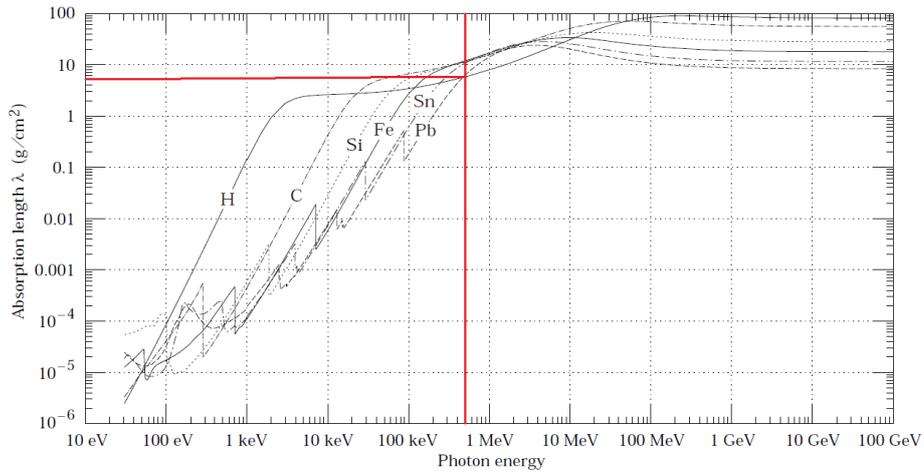


図 5.3 Attenuation Length

光子が物質中で減衰するまでの長さを **attenuation length** という。これは光子の mass と物質の密度に依存する。今実験は鉛版を使うので、鉛での **attenuation length** を求める。今、電子の入射強度は **511KeV** なので、図より $\lambda = 5[\text{g}/\text{cm}^2]$ 。

厚さ t [cm] を通過した後の光子の強度は $I = I_0 \exp(-\frac{t}{\lambda/\rho})$ で得られる。

ここで、 I_0 = 初めの強度、鉛版の厚さ = $0.3[\text{cm}] \times 3 \text{ 枚} = 0.9[\text{cm}]$ 、 $\rho = 11.35[\text{g}/\text{cm}^3]$ 。

よって $\frac{I}{I_0} = \exp(-\frac{0.9}{5/11.35}) = 0.13$ 。

鉛板コリメータを入れたあとでは、シンチレータ以外の場所に当たる γ 線の強度は入れる前の 7.7 分の 1 となる。

5-1GAGG 結果

GAGG シンチレーターを用いた場合の波高分布と TDC 分布を、線源と PMT の距離が 0mm,9mm,さらに線源と PMT の間に 9mm 厚の鉛コリメーターを挟んだ場合について示す。

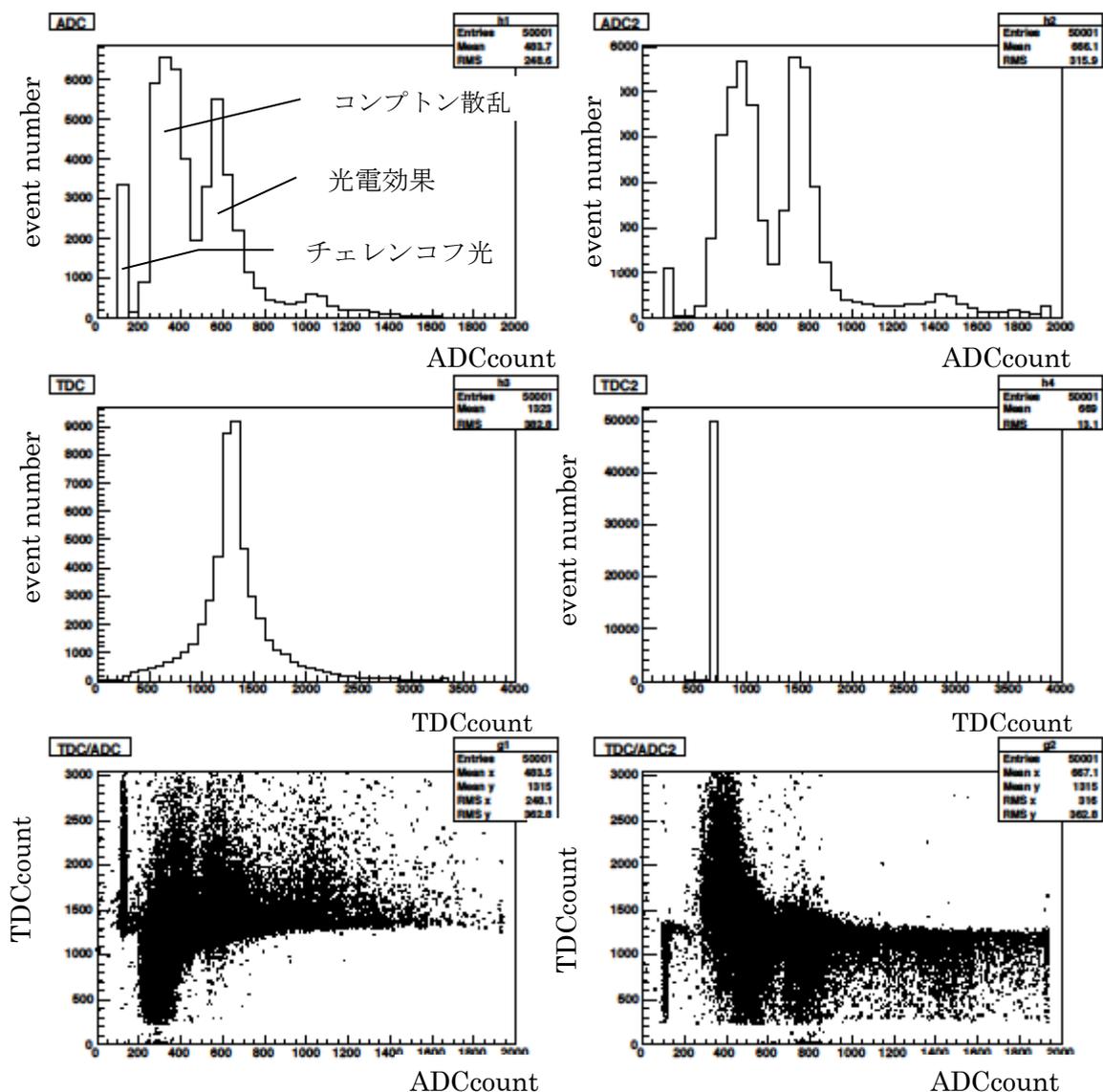


図 5-1.1 線源と PMT の距離が 0mm の GAGG のグラフ

ADC : PMT1 で計測した発光量のグラフ

ADC2 : PMT2 で計測した発光量のグラフ

TDC : coincidence を start 信号、PMT2 を stop 信号とした時の時間差のグラフ

TDC2 : coincidence を start 信号、PMT1 を stop 信号とした時の時間差のグラフ

TDC/ADC : TDC と ADC の 2次元プロット

TDC/ADC2 : TDC と ADC2 の 2次元プロット

図5-1.1を用いて、ADCでは450countから850count、ADC2では600countから1050count付近に見られるシンチレーション光のうち光電効果を起こした事象のみ選んだ分布を示す。

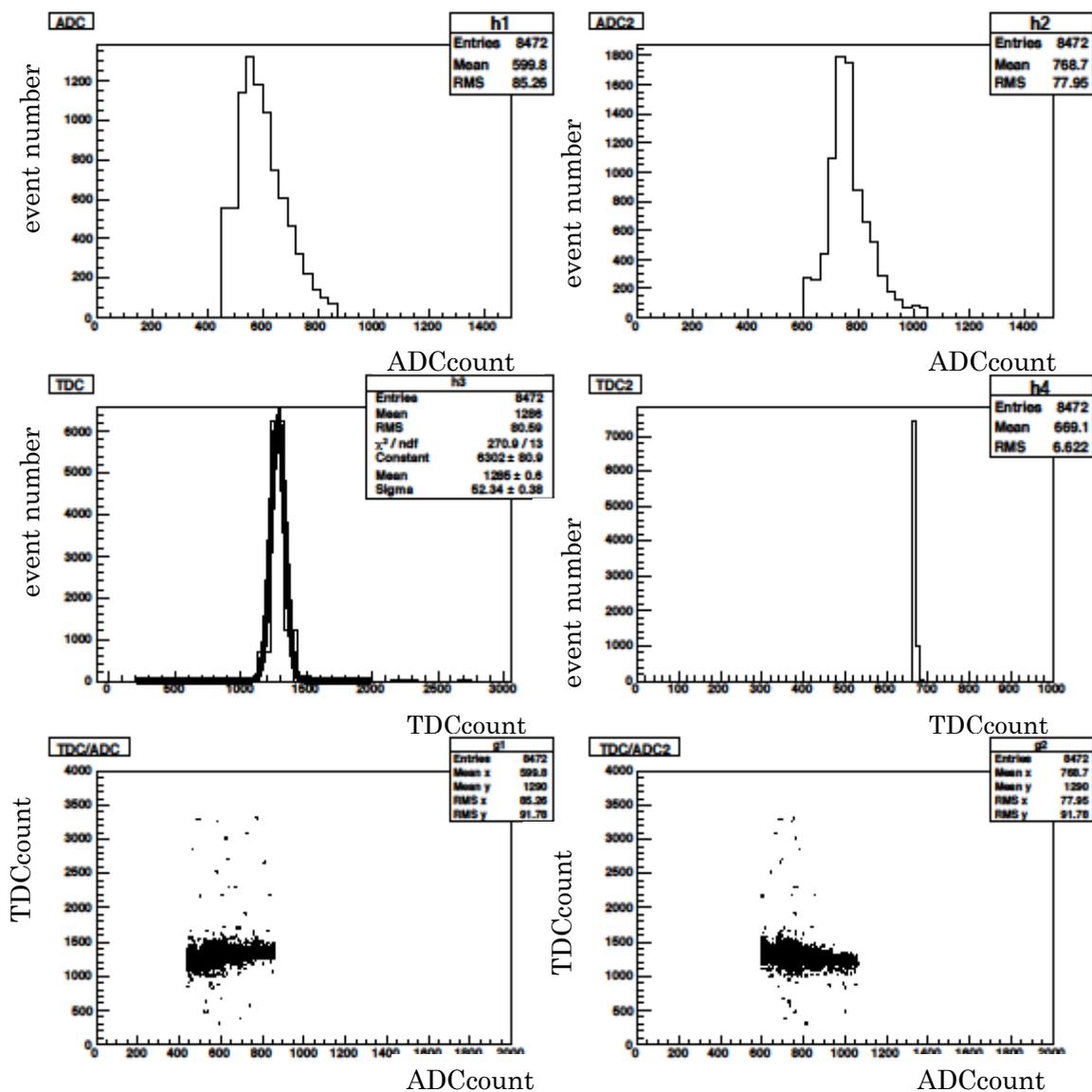


図5-1.2 図5-1.1を用いたシンチレーション光のみのグラフ

グラフから読み取れる分散(sigma)を用いて時間分解能を求める。また、時間分解能は以下のようにして求めることができる。TDCのカウントは1count当たり0.025nsより

$$\text{分散}(\sigma) \times 0.025\text{ns} = 52.34 \times 0.025\text{ns}$$

$$= 1.3085\text{ns}$$

$$\doteq 1.31\text{ns}$$

PMT1 つあたりの時間分解能は

$$1.31\text{ns} \div \sqrt{2} = 0.9263\text{ns}$$

$$\doteq 0.93\text{ns}$$

となる。

・ 9mm

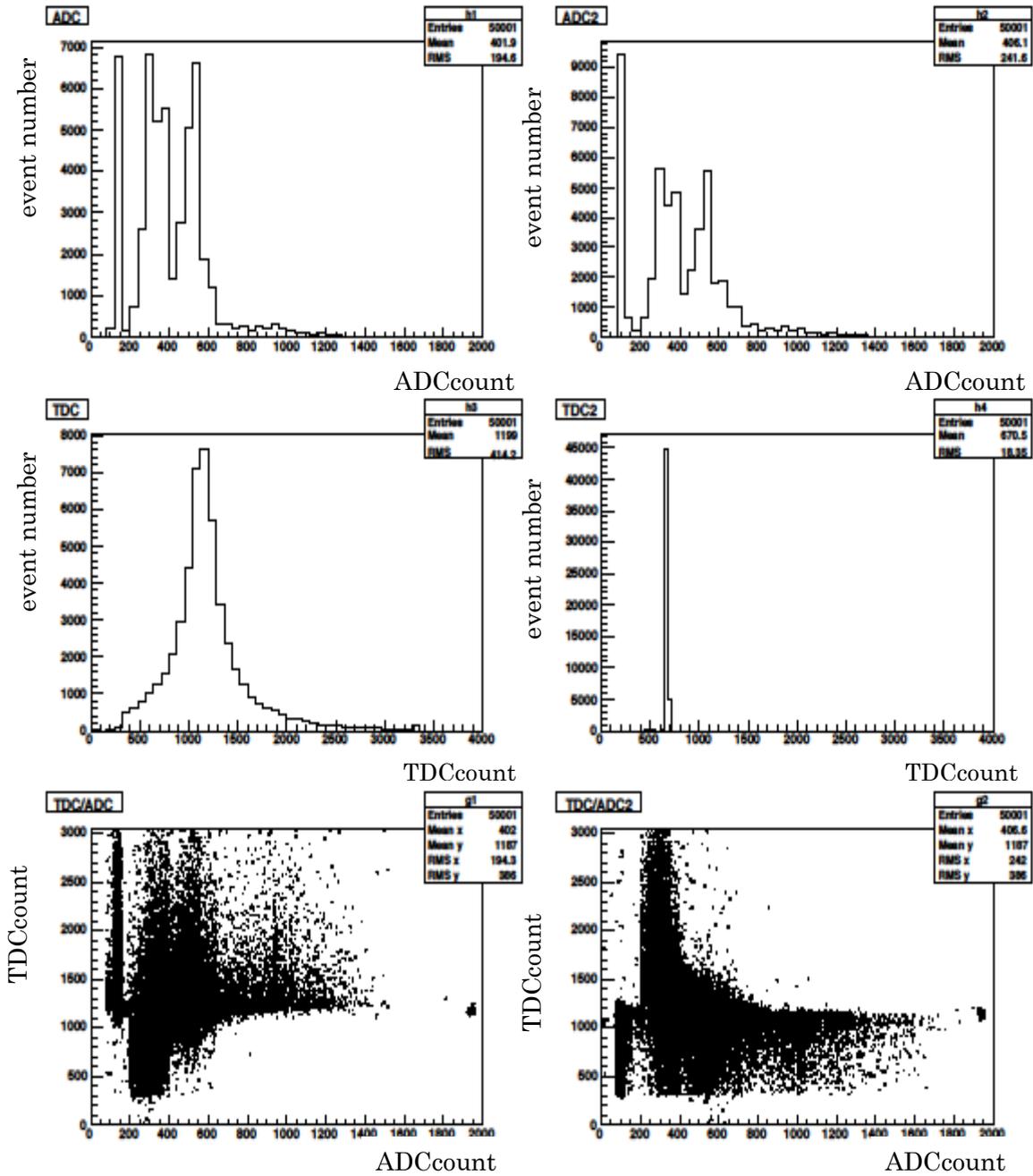


図 5-1.3 線源と PMT の距離が 9mm の時の GAGG のグラフ

図 5-1.3 を用いて、ADC では 400count から 700count、ADC2 では 400count から 850count 付近に見られるシンチレーション光のうち光電効果を起こした事象のみ選んだ分布を次ページに示す。

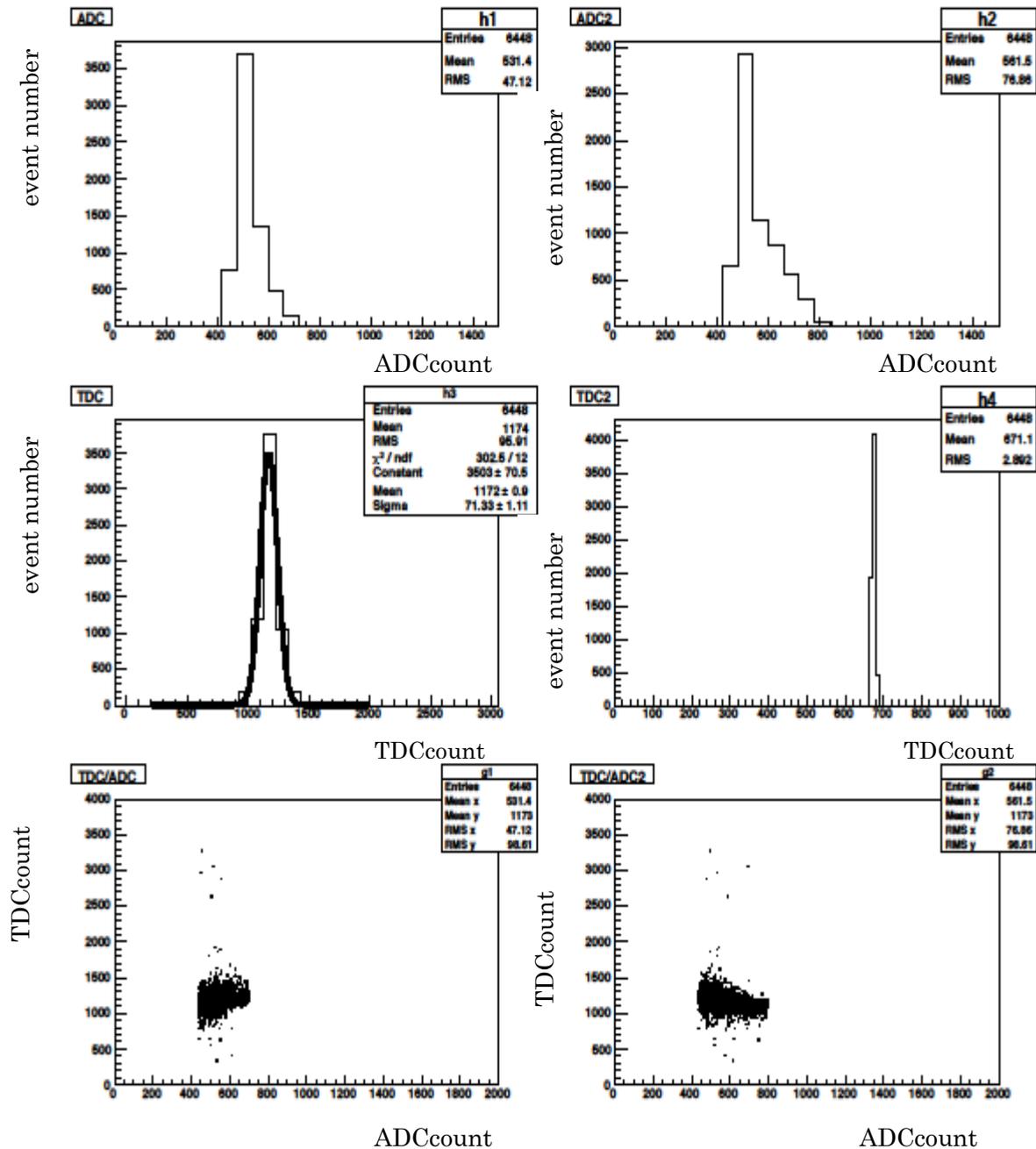


図 5-1.4 図 5-1.3 を用いたシンチレーション光のみのグラフ

同様にして時間分解能を求める。

$$\begin{aligned}
 \text{分散}(\text{sigma}) \times 0.025\text{ns} &= 71.33 \times 0.025\text{ns} \\
 &= 1.78325\text{ns} \\
 &\doteq 1.78\text{ns}
 \end{aligned}$$

PMT1 つあたりの時間分解能は

$$\begin{aligned}
 1.78 \div \sqrt{2} &= 1.2586\text{ns} \\
 &\doteq 1.26\text{ns}
 \end{aligned}$$

となる。

・ 9mm の鉛の時

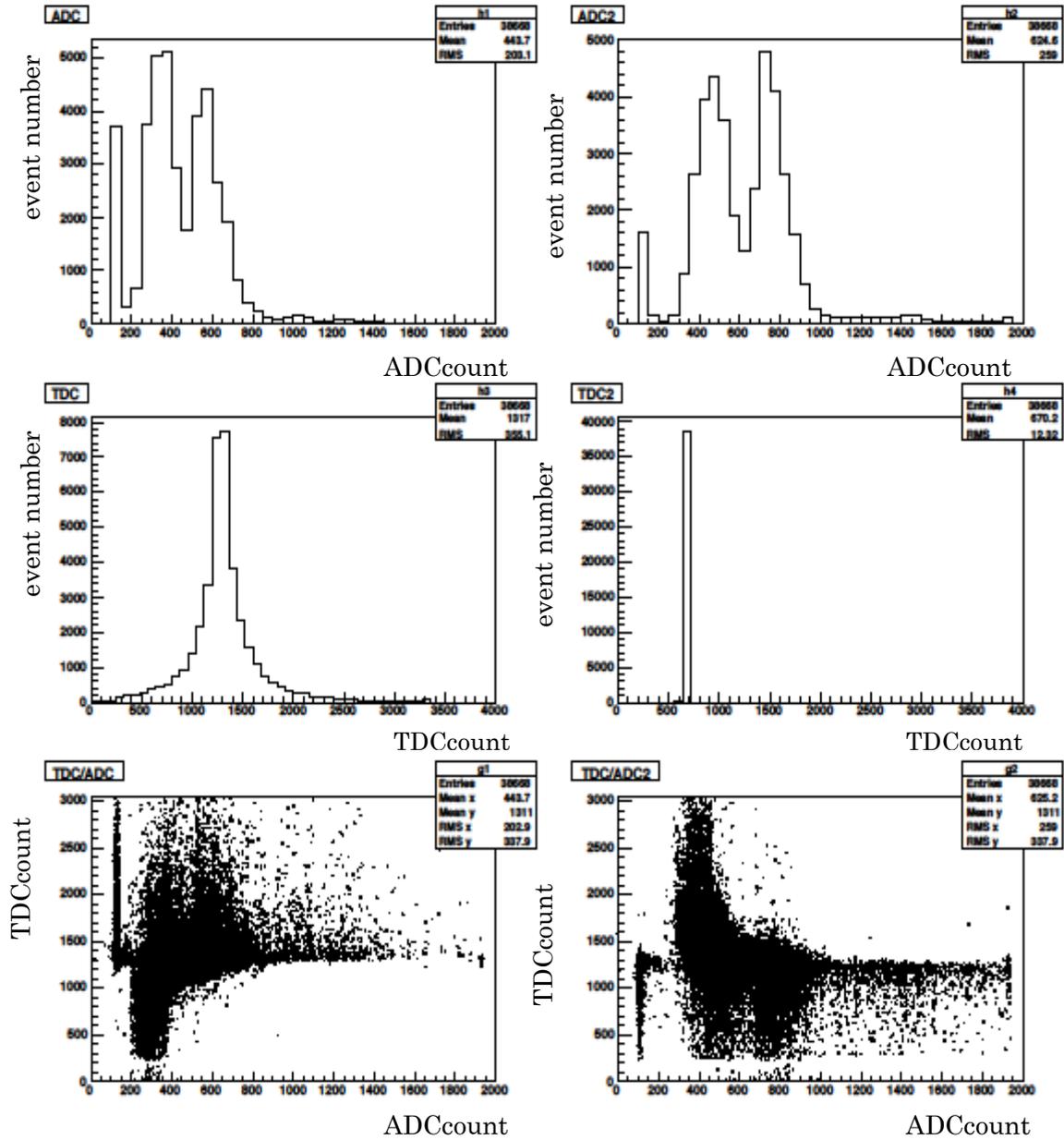


図 5-1.5 線源と PMT の間に 9mm の鉛を挟んだ時の GAGG のグラフ

図 5-1.5 を用いて、ADC では 500count から 800count、ADC2 では 600count から 1000count 付近に見られるシンチレーション光のうち光電効果を起こした事象のみ選んだ分布を次ページ示す。

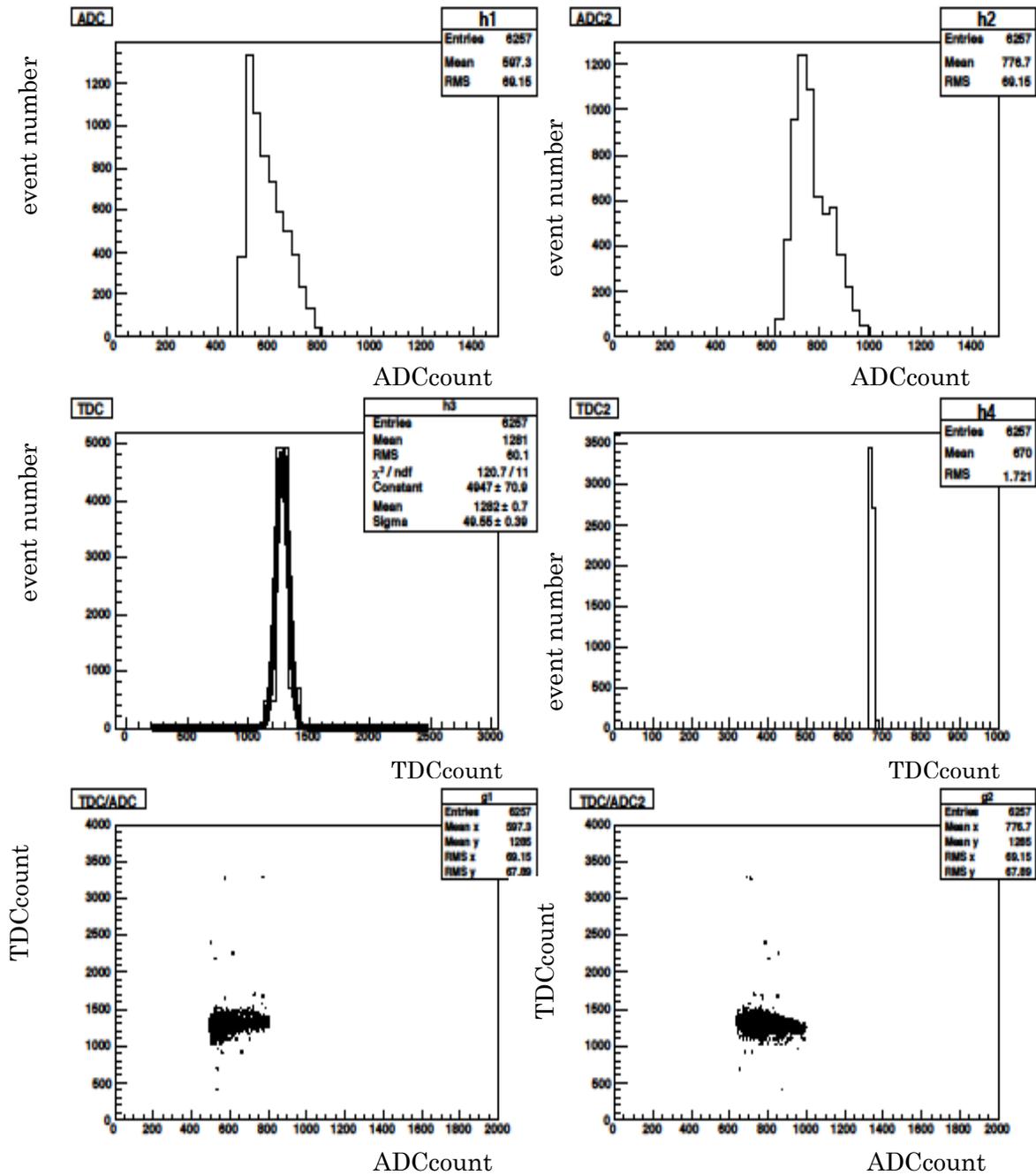


図 5-1.6 図 5-1.5 を用いたシンチレーション光のみのグラフ

同様にして時間分解能を求める。

$$\begin{aligned}
 \text{分散}(\text{sigma}) \times 0.025\text{ns} &= 49.55 \times 0.025\text{ns} \\
 &= 1.23875\text{ns} \\
 &\doteq 1.24\text{ns}
 \end{aligned}$$

PMT1 つあたりの時間分解能は

$$\begin{aligned}
 1.24\text{ns} \div \sqrt{2} &= 0.8768\text{ns} \\
 &\doteq 0.88\text{ns}
 \end{aligned}$$

となる。

5-2 BSO 結果

BSO も GAGG 同様、3つの場合について計測を行った。

5-2.1 線源から PMT までが 0mm の場合

図 5-2-1 では、ADC については 400~850ADC count 付近で、ADC2 については 600~1050 ADC count 付近で光電効果のピークを見ることができた。

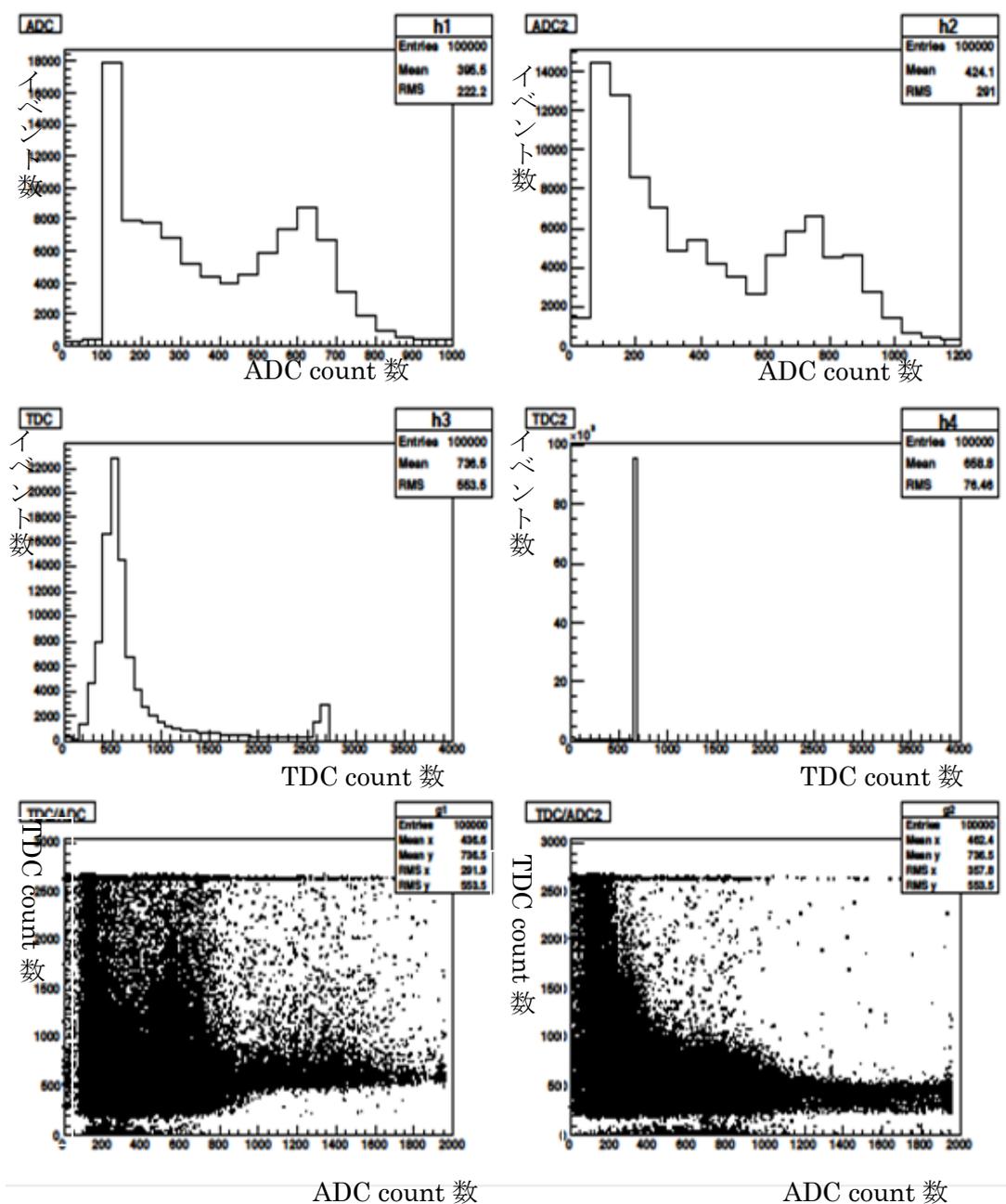


図 5-2.1 線源から PMT までが 0mm のグラフ(各々の図については、図 5-1.1 参照)

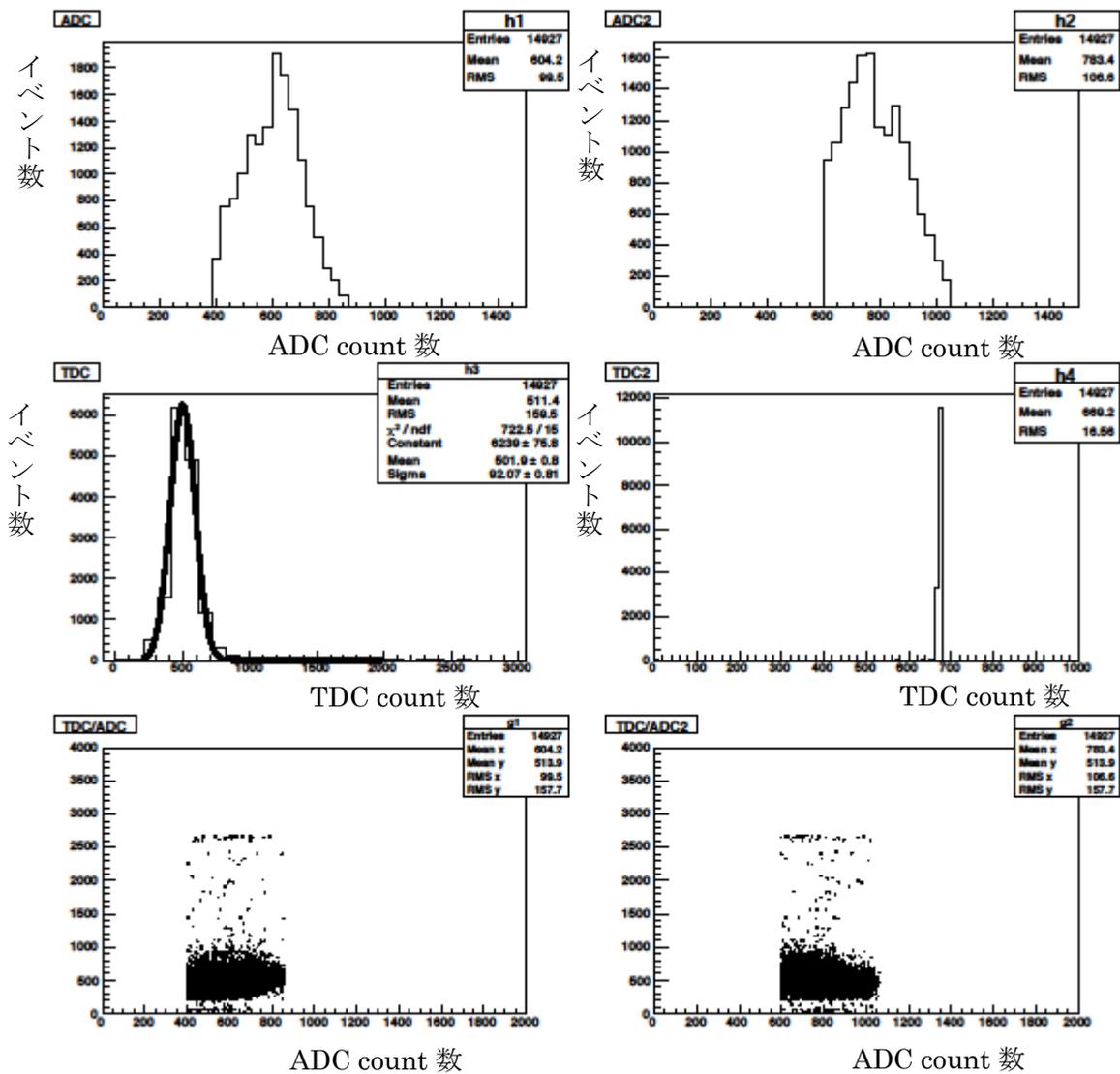


図 5-2.2 図 5-2.1TDC をガウス分布に Fitting させたグラフ

ADC:PMT1 の光量を ADC count

ADC2:PMT2 で計測した光量を ADC count

400~850 の範囲を出力したグラフ

600~1050 の範囲を出力したグラフ

時間分解能を求める計算

時間分解能 = 分散 × (TDC 1count 当たりの時間)

分散 92.07、TDC 1count 当たり 25(psec)なので、

時間分解能 = $92.07 \times 25 \times 10^{-3} = 2.30(\text{nsec})$

PMT 1つあたりの時間分解能 = $\frac{2.30}{\sqrt{2}} = 1.63(\text{nsec})$

5-2.2 線源から PMT までが 9mm の場合

図 5-2.3 では、ADC については 400~850ADC count 付近で、ADC2 については 600~1050 ADC count 付近で光電効果のピークを見ることができた。

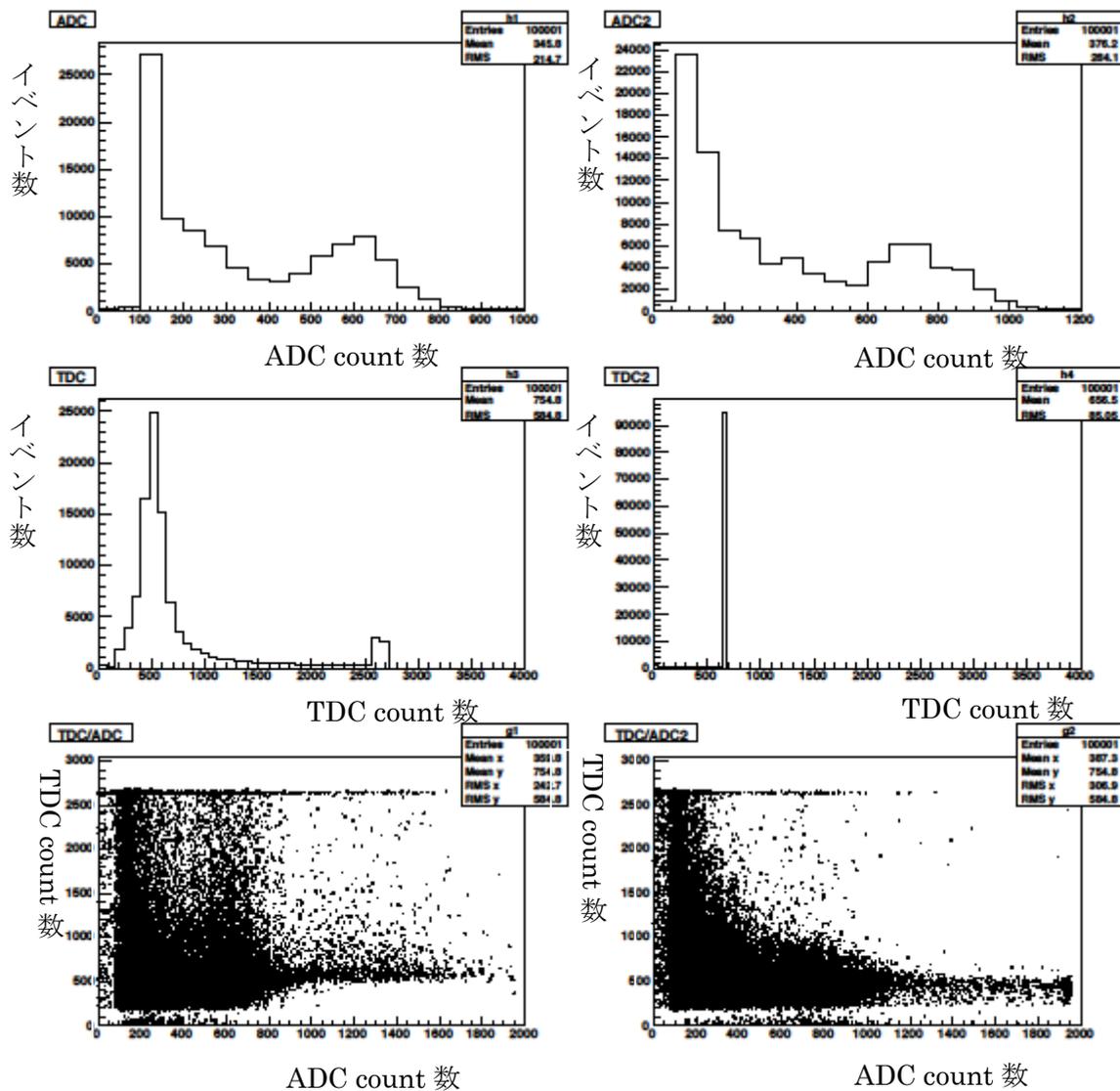


図 5-2.3 線源から PMT までが 9mm のグラフ
(各々のグラフについては、図 5-2.1 参照)

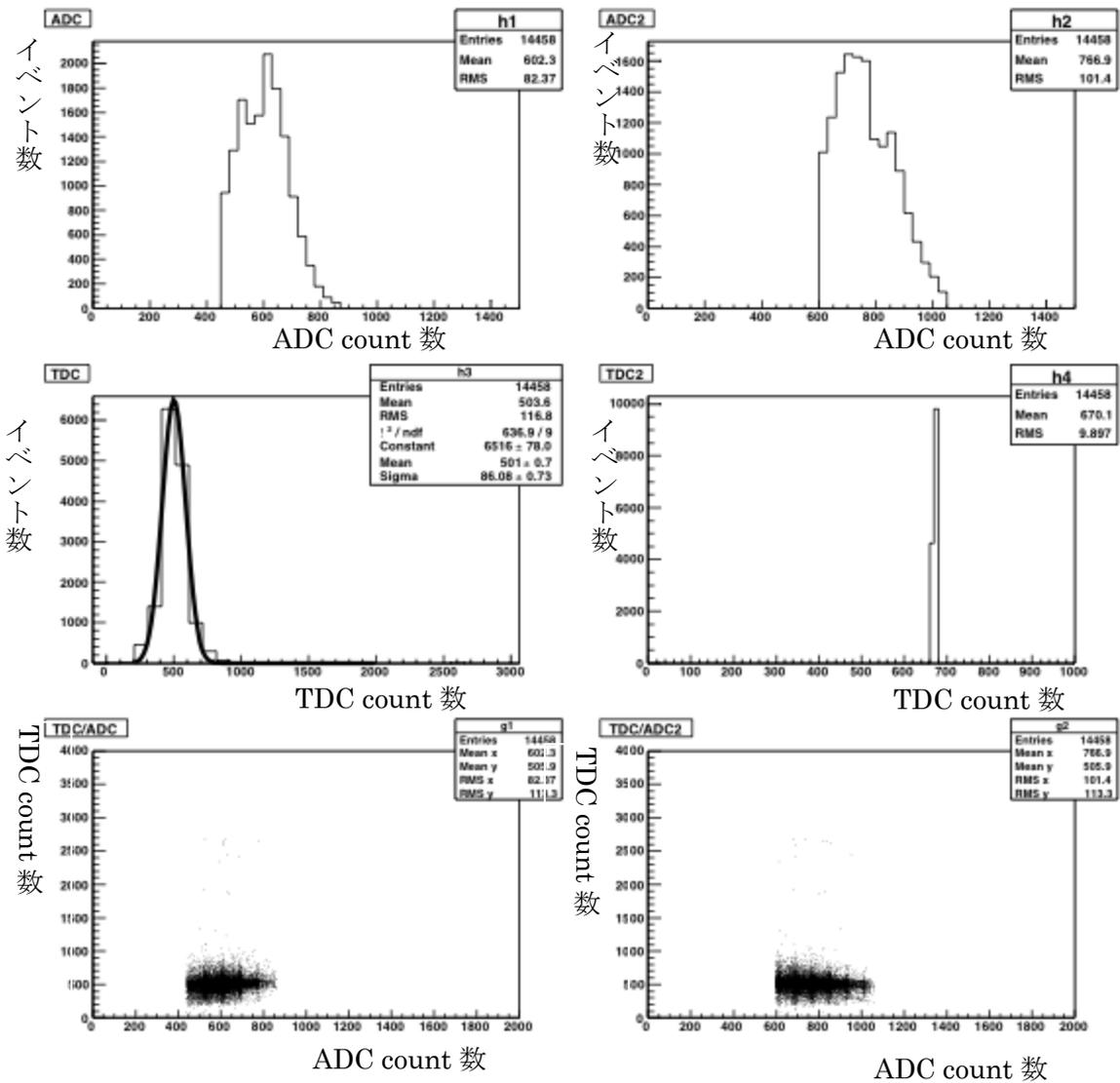


図 5-2.4 図 5-3.3 の TDC をガウス分布に Fitting させたグラフ
(各々のグラフについては、図 5-2.2 参照)

時間分解能を求める計算

時間分解能 = 分散 × (TDC 1count 当たりの時間)

分散 86.08、TDC 1count 当たり 25(psec)なので、

時間分解能 = $86.08 \times 25 \times 10^{-3} = 2.15(\text{nsec})$

PMT 1つあたりの時間分解能 = $\frac{2.15}{\sqrt{2}} = 1.52(\text{nsec})$

5-2.3 線源と PMT の間に厚さ 9mm の鉛板の場合

図 5-3.5 では、ADC については 400~850ADC count 付近で、ADC2 については 600~1050 ADC count 付近で光電効果のピークを見ることができた。

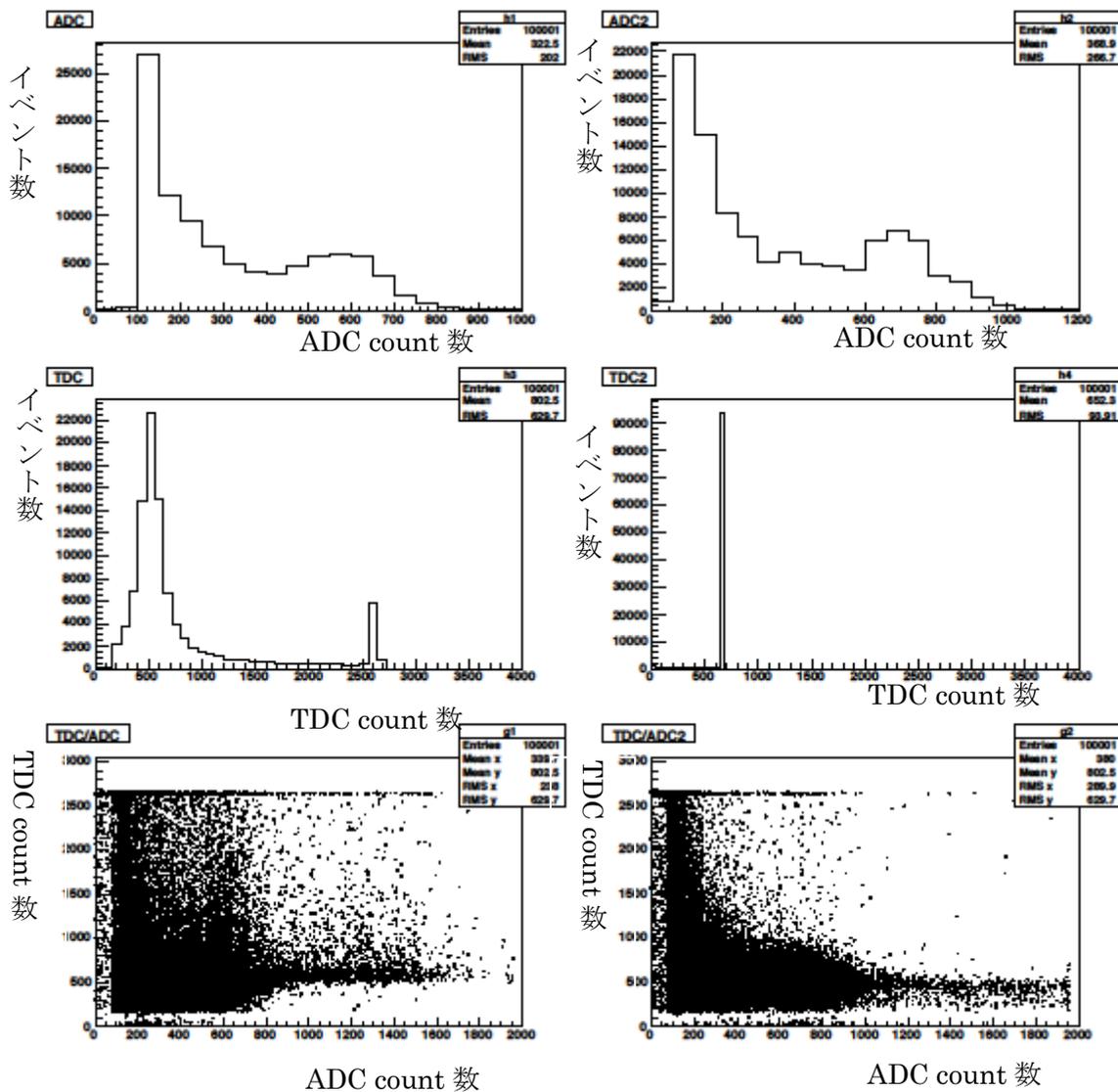


図 5-2.5 線源から PMT までが 9mm 鉛板を置いた際のグラフ (各々のグラフについては、図 5-2.1 参照)

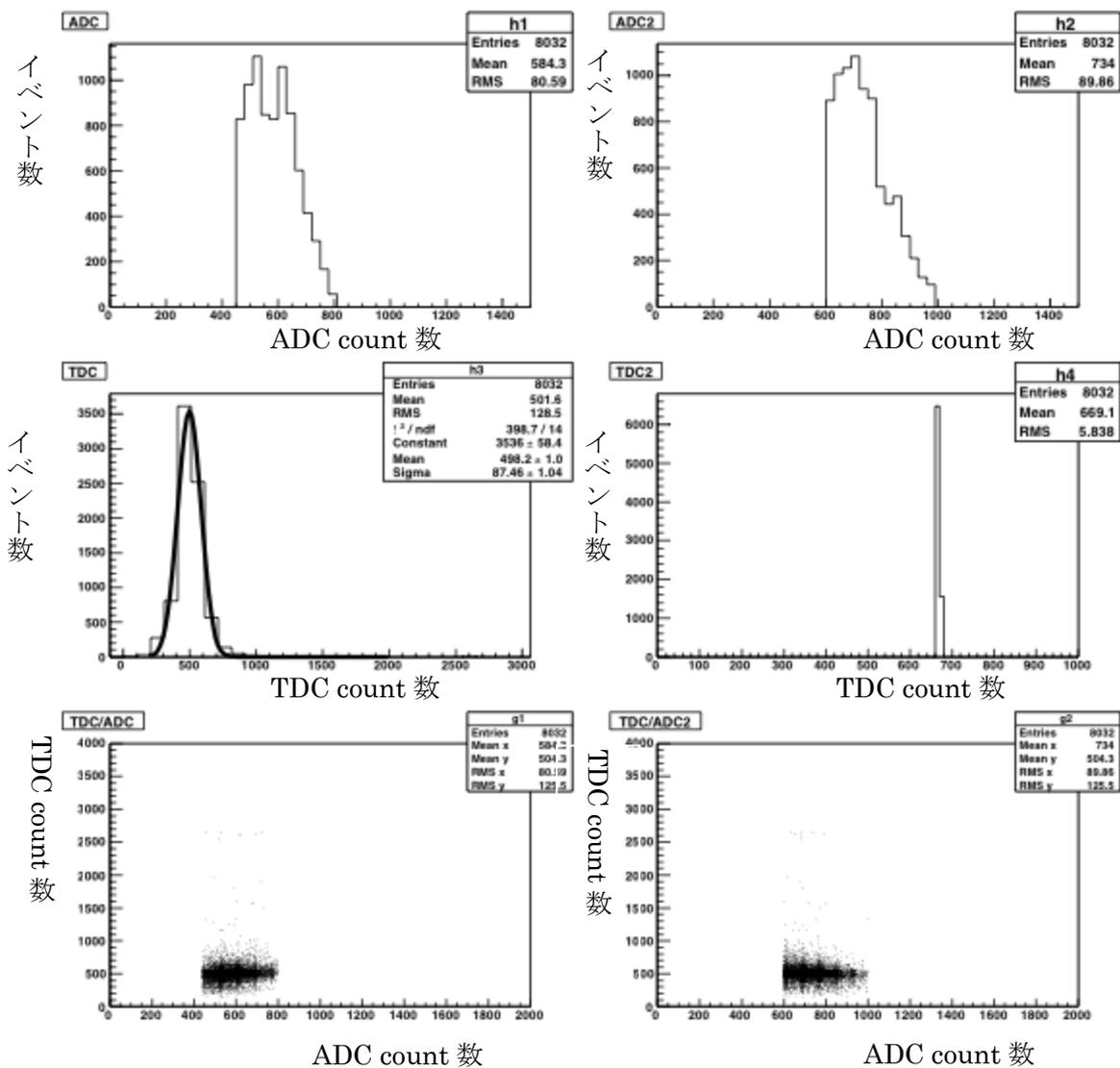


図 5-2.6 図 5-2.5 の TDC をガウス分布で Fitting させたグラフ
(各々のグラフについては、図 5-2.2 参照)

時間分解能を求める計算

時間分解能 = 分散 × (TDC 1count 当たりの時間)

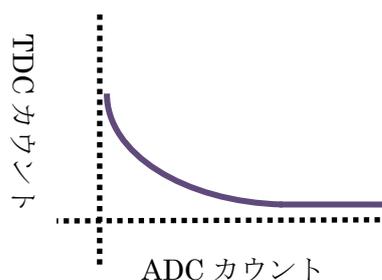
分散 87.46、TDC 1count 当たり 25(psec)なので、

時間分解能 = $87.46 \times 25 \times 10^{-3} = 2.19(\text{nsec})$

PMT 1つあたりの時間分解能 = $\frac{2.19}{\sqrt{2}} = 1.55(\text{nsec})$

5-3TDC の補正

信号の大きさによりディスクリミネーターがパルス出力する時刻が変化する。Start (PMT2) の信号が V_{th} を越えた時から、stop (PMT1) の信号が V_{th} を越えたときの時間を測定しているのに、この時間のズレは TDC の値に影響を及ぼす。この時の TDC グラフは下図のようになる。



今、ADC の値が比較的小さいシンチレーション光を 1、3 と比較的大きいシンチレーション光を 2、4 と仮定する。

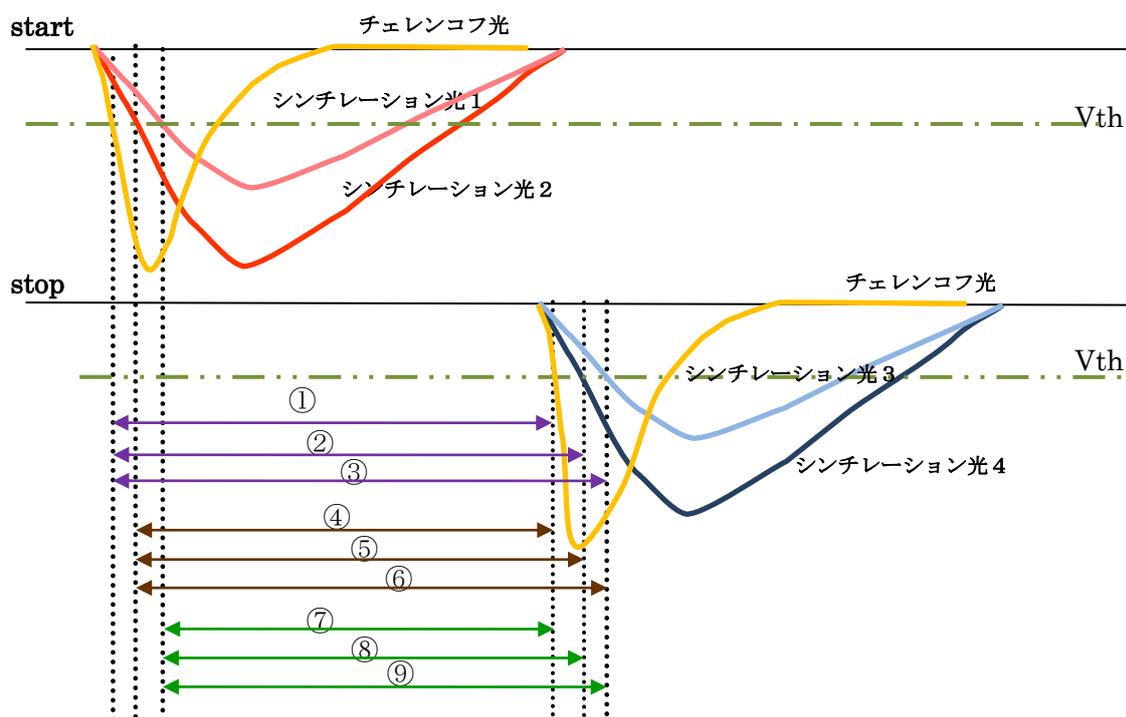


図 5-3.1 TDC の補正

- ① start 信号が γ 線、stop 信号がチェレンコフ光の TDC
- ② start 信号が γ 線、stop 信号シンチレーション光 4 の TDC
- ③ start 信号が γ 線、stop 信号がシンチレーション光 3 の TDC
- ④ start 信号がシンチレーション光 1、stop 信号がチェレンコフ光の TDC
- ⑤ start 信号がシンチレーション光 1、stop 信号がシンチレーション光 4 の TDC
- ⑥ start 信号がシンチレーション光 1、stop 信号がシンチレーション光 3 の TDC
- ⑦ start 信号がシンチレーション光 2、stop 信号がチェレンコフ光の TDC
- ⑧ start 信号がシンチレーション光 2、stop 信号がシンチレーション光 4 の TDC
- ⑨ start 信号がシンチレーション光 2、stop 信号がシンチレーション光 3 の TDC

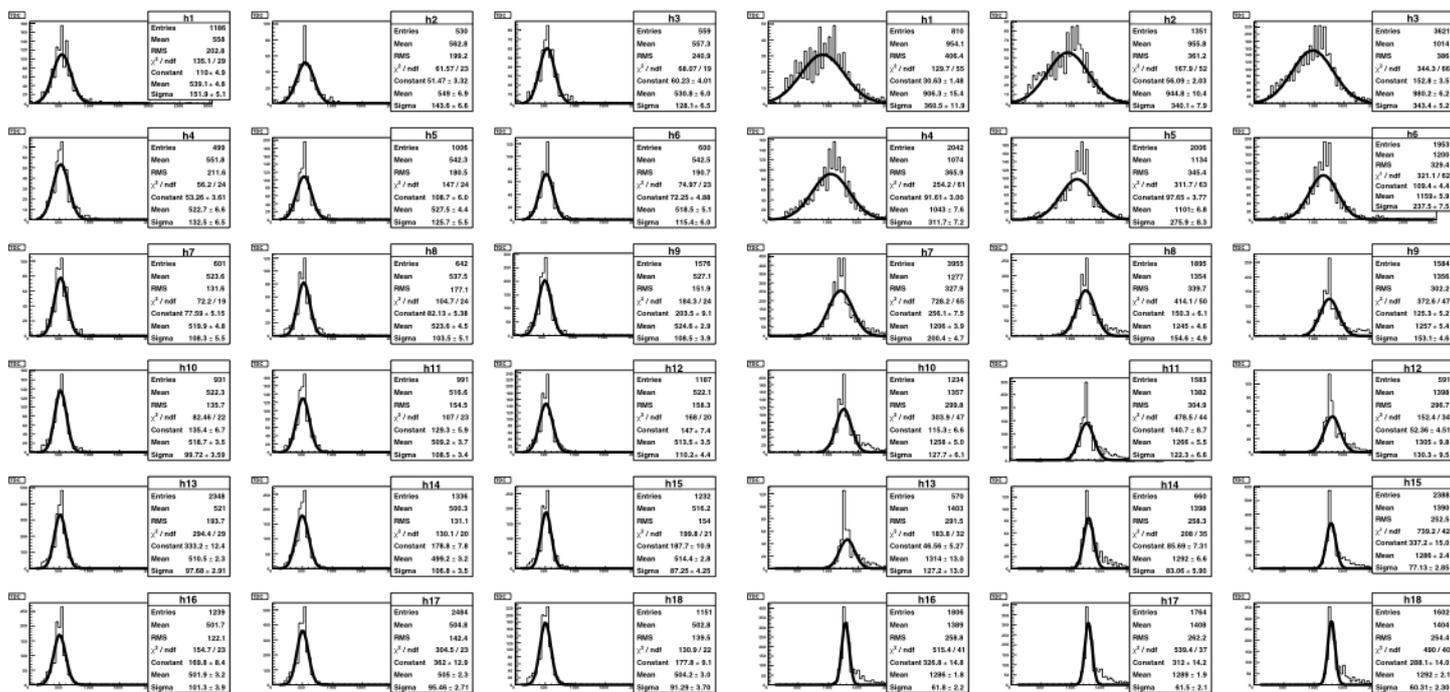
ADCの値が特に小さい時（GAGGでPMT1は250、PMT2は300、BSOでは150カウント以下の時）のADCカウントは、立ち上がり立下りが早いというチェレンコフ光によるものであり、TDC/ADC グラフではチェレンコフ光の TDC の値は小さい所に集中し、TDC/ADC2 グラフではチェレンコフ光の TDC の値は大きい所に集中する。今実験はシンチレータの時間分解能を測るのが目的であるため、GAGG では上記の値を超えた事象のみ選んで議論する。BSO は光量が小さくシンチレーション光と正確には区別できないが、今回200カウント以上の事象のみ選ぶ事とした。

上記のカウント以降において TDC の値が曲線を描いていることがわかる。特に、ADCの値が比較的小さい時に曲線を描く。これは図のように、波形の大きさにより立ち上がり時間が異なり、Discriminator の Vth を越えるタイミングもずれる事に因る。TDC/ADC グラフと TDC/ADC2 グラフで曲線が逆なのは、ADC が start 信号、ADC2 が stop 信号である為である。

次の手順で曲線の補正を行った。

1、ADCの値を細かく分割し、各区間のTDCの値をガウス分布でfitする。

ガウス分布でFitしたグラフの一例を以下に挙げる。



2、fitして得られた各区間の中心点をグラフにプロットする。

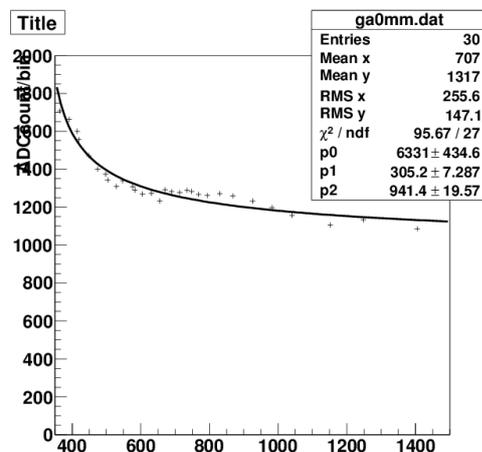
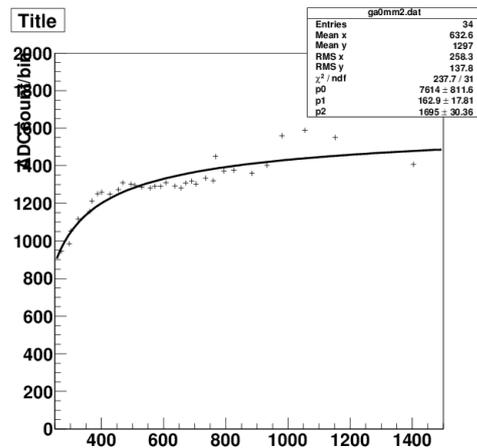
3、プロットしたグラフを関数 $F(x) = \frac{P_0}{\sqrt{x-P_1}} + P_2$ で fit する。そこで得たパラメーターをそれぞれ P_0, P_1, P_2 とする。

BSO では ADC/TDC のグラフの形がしっかり見えないため、ADC2/TDC の補正のみを行った。

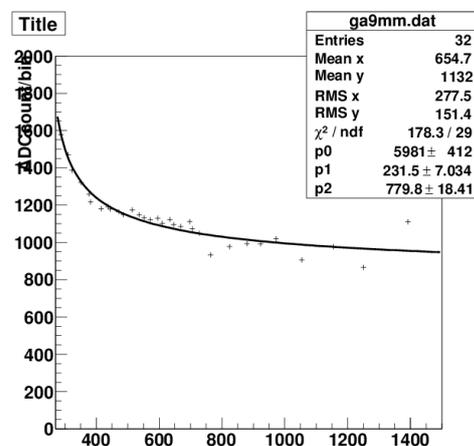
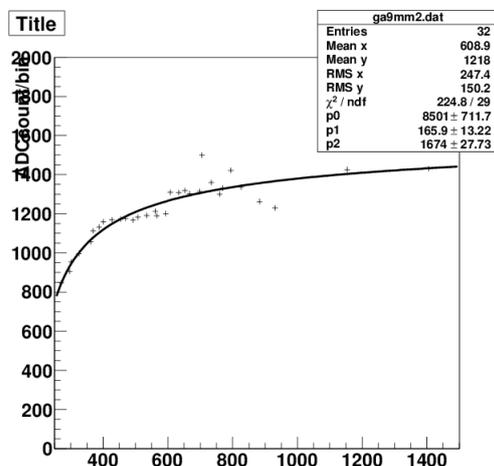
ADC と TDC の関係を Fit したグラフを以下に示す。

◎GAGG 左 : ADC/TDC 、右 : ADC2/TDC

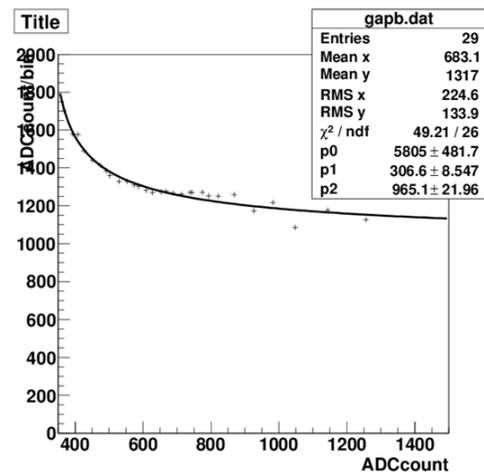
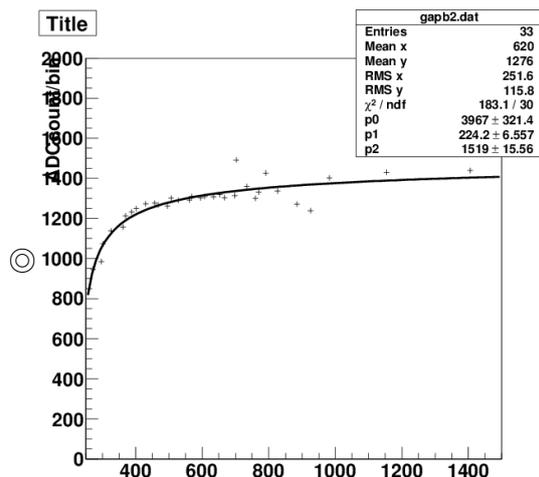
●GAGG0mm



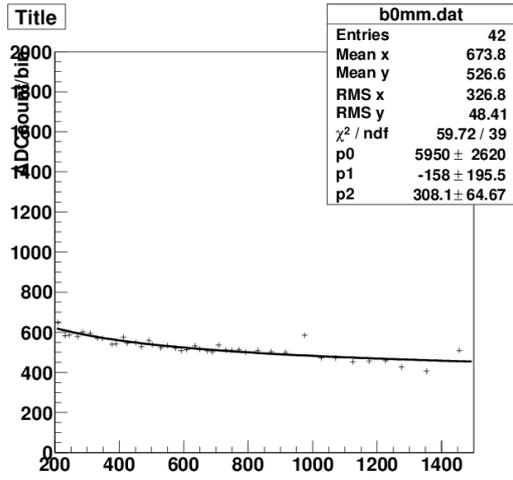
●GAGG9mm



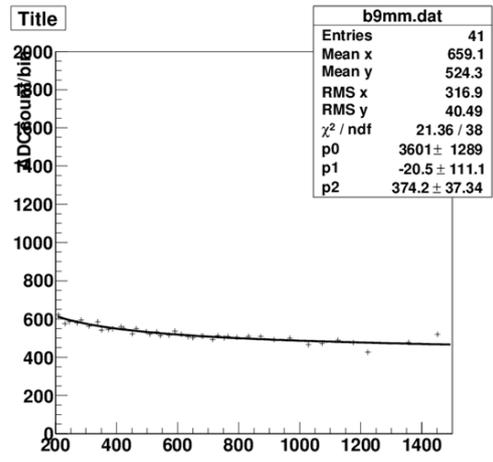
●GAGGpb



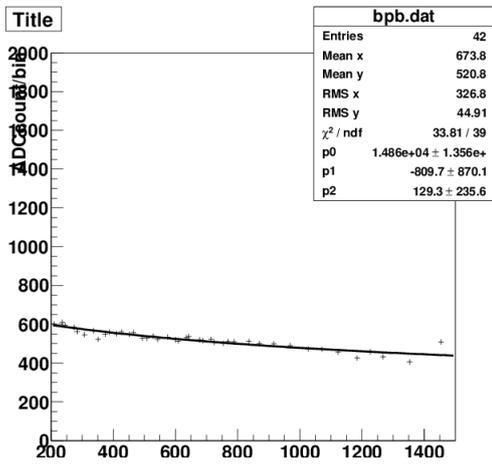
●BSO0mm



●BSO9mm

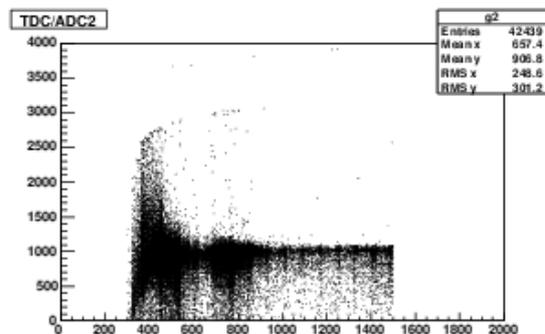
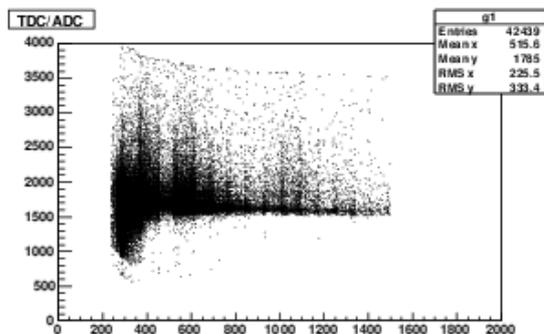


●BSOpb

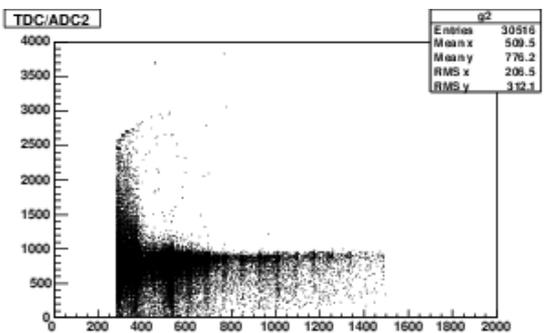
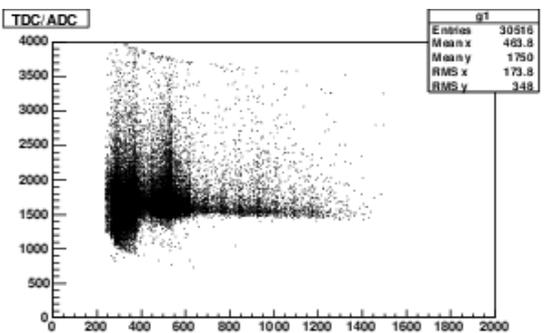


4. 得られた P0,P1,P2 を用いて TDC の値を補正する。補正後の ADC と TDC の 2d グラフは以下である。

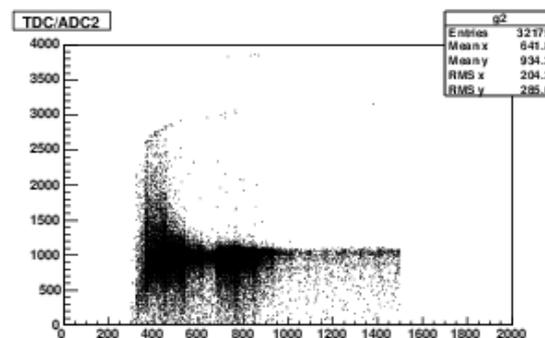
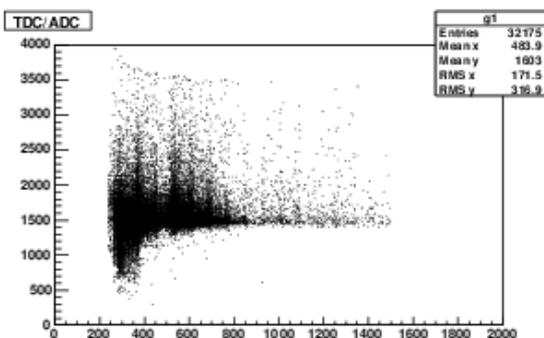
●GAGG0mm



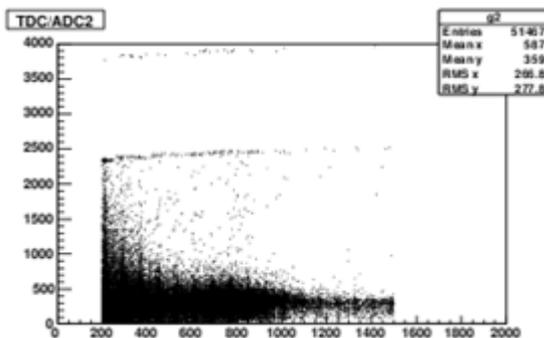
●GAGG9mm



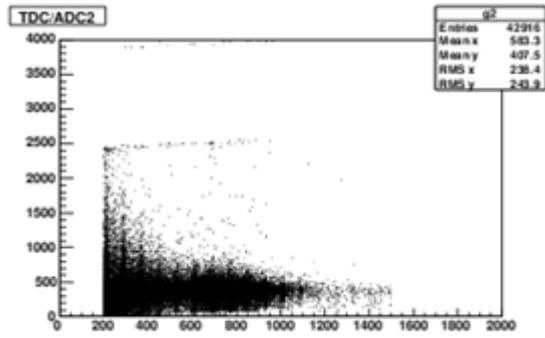
●GAGGpb



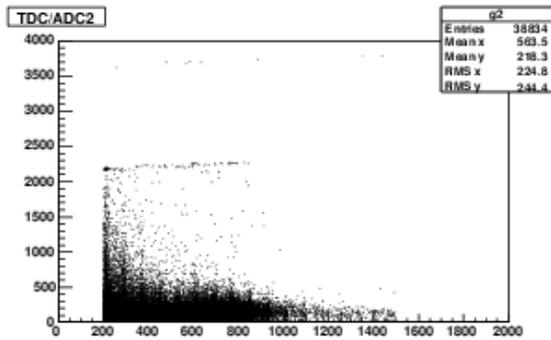
●BSO0mm



●BSO9mm

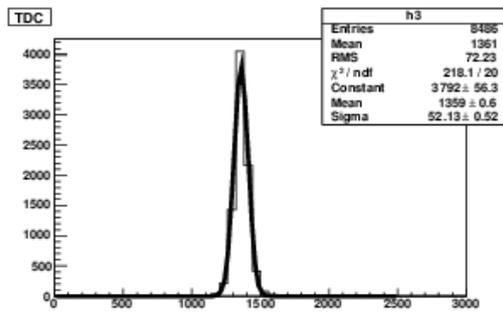


●BSOpb



補正後の TDC のグラフ（光電ピーク部のみ）を以下にあげる。

●GAGG0mm

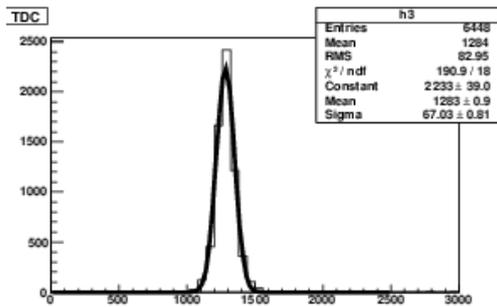


時間分解能

$$52.13 \times 0.025[\text{ns}] = 1.303[\text{ns}]$$

$$= 1.3[\text{ns}]$$

●GAGG9mm

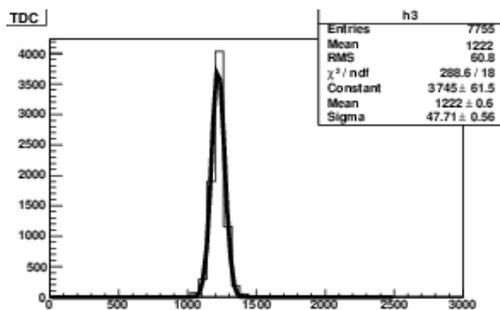


時間分解能

$$67.03 \times 0.025[\text{nsec}] = 1.675[\text{nsec}]$$

$$= 1.7[\text{nsec}]$$

●GAGGpb

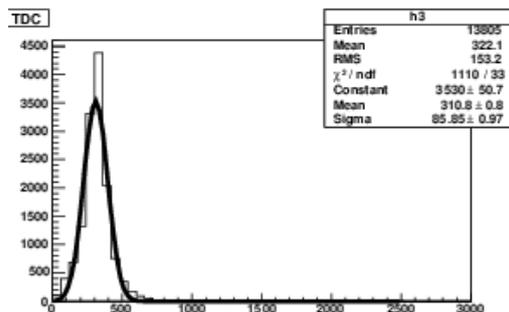


時間分解能

$$47.71 \times 0.025[\text{nsec}] = 1.192[\text{nsec}]$$

$$= 1.2[\text{nsec}]$$

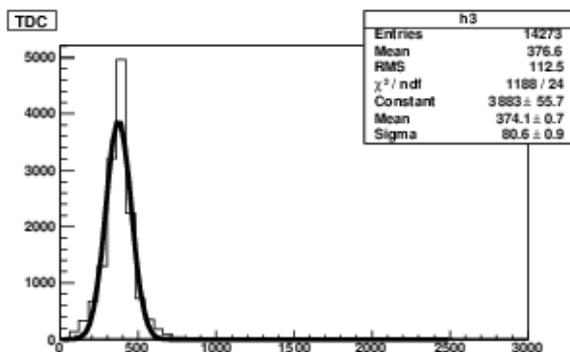
●BSO0mm



時間分解能

$$85.85 \times 0.025 [\text{nsec}] = 2.14625 [\text{nsec}] \\ = 2.15 [\text{nsec}]$$

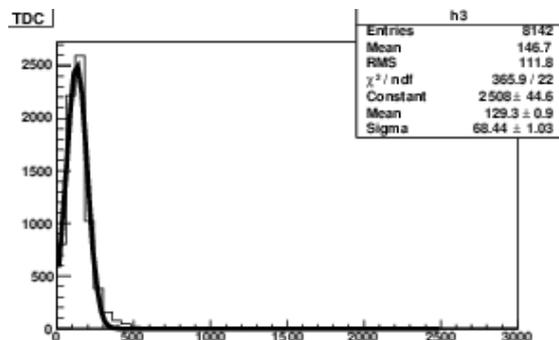
●BSO9mm



時間分解能

$$80.6 \times 0.025 [\text{nsec}] = 2.015 [\text{nsec}] \\ = 2.0 [\text{nsec}]$$

●BSOpb



時間分解能

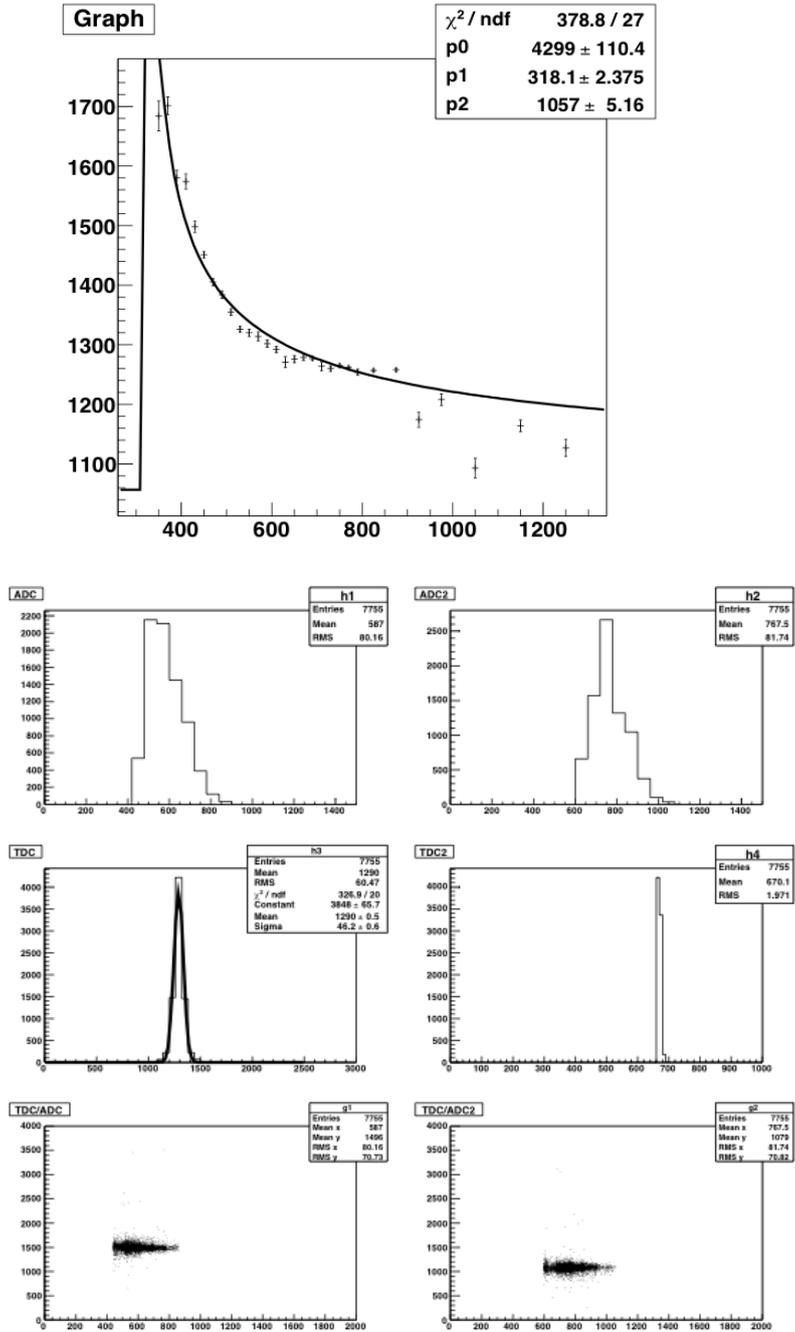
$$68.44 \times 0.025 [\text{nsec}] = 1.711 [\text{nsec}] \\ = 1.7 [\text{nsec}]$$

補正により、どの場合も補正前より時間分解能が良くなっていることがわかる。

●エラーバー付きの補正

プロットした点にエラーバーをつけ、同様の関数でのフィットも行った。それから得たパラメーターにより補正をした。今回は鉛板の場合についてのみ、GAGG,BSO それぞれについて行った。いかにグラフを示す。

[GAGG]

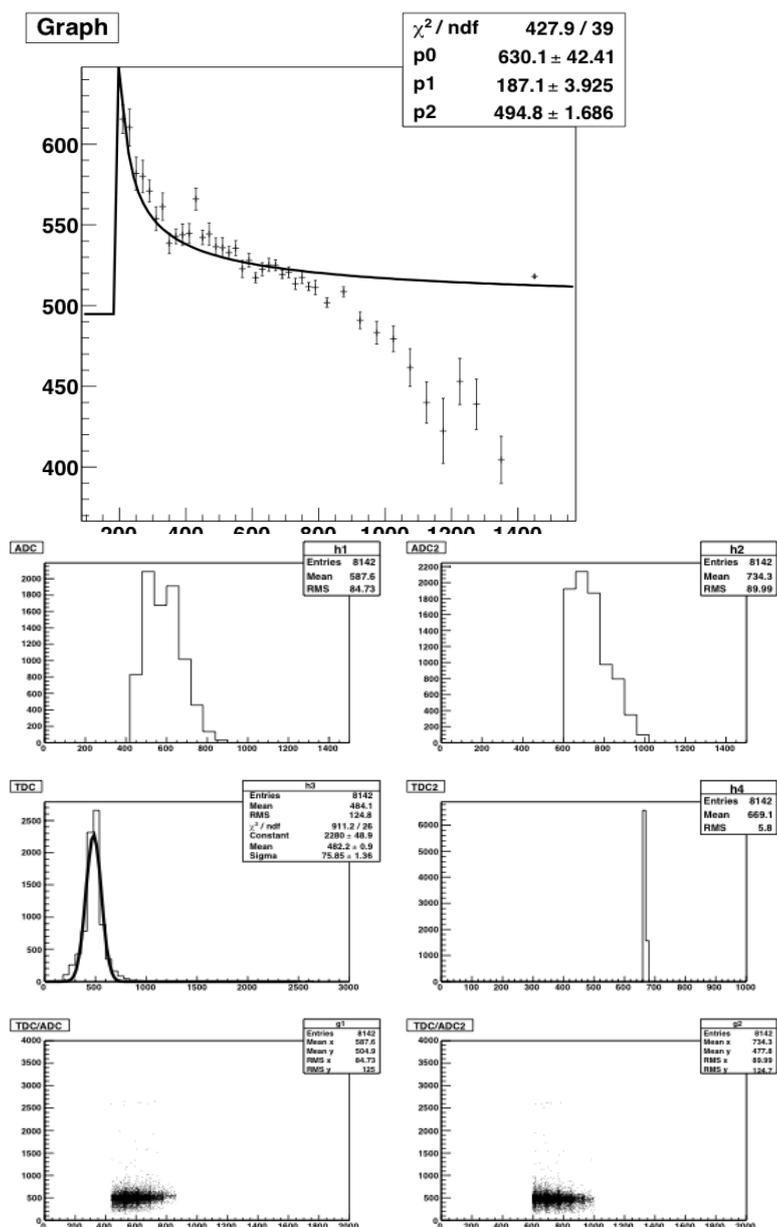


時間分解能

$$46.2 \times 0.025[\text{nsec}] = 1.155[\text{nsec}]$$

$$= 1.2[\text{nsec}]$$

[BSO]



時間分解能

$$75.85 \times 0.025 [\text{nsec}] = 1.89625 [\text{nsec}] \\ = 1.9 [\text{nsec}]$$

関数でのフィットの際、点のないところから線が延びている。プログラムの再考、修正を行う必要がある。また、エラーバーを含むことにより関数でフィットしやすくなり時間分解能がよくなると考えたが、BSO においては悪くなってしまった。鉛板の場合だけでなく他についても行き、検討することが必要である。

それぞれのシンチレータにおける時間分解能を以下にまとめる。

・ GAGG

	補正前		補正後	
	2本	1本	2本	1本
PMT				
0mm	1.31ns	0.93ns	1.30ns	0.92ns
9mm	1.78ns	1.26ns	1.68ns	1.19ns
9mm 鉛板	1.24ns	0.88ns	1.19ns	0.84ns

・ BSO

	補正前		補正後	
	2本	1本	2本	1本
PMT				
0mm	2.30ns	1.63ns	2.15ns	1.52ns
9mm	2.15ns	1.52ns	2.01ns	1.42ns
9mm 鉛板	2.19ns	1.55ns	1.71ns	1.21ns

今回使用した型の PMT の光の Transite Time Spread(T.T.S.)のカタログ値は 1.1ns である。

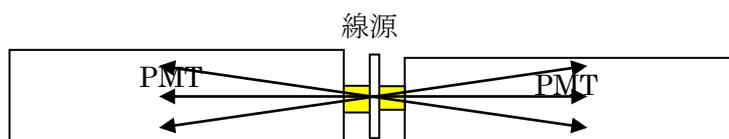
第6章 まとめ

本実験ではまず、光量測定を行ってから時間分解能の測定を行った。光量測定から、発光量が大きいと判断できたのが GAGG、BSO で、この2種類を時間分解能の測定に使用した。一方、ZnO は GAGG、BSO と比べて発光量が少なく時間分解能の測定に適していないと判断し、使用しなかった。

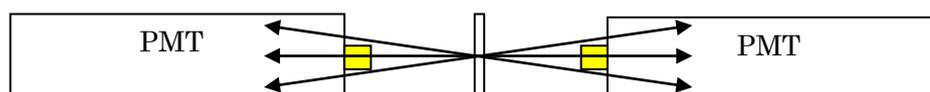
時間分解能において、測定の際の波高の確認により、GAGG は波高の大きいシンチレーション光と、波高の小さいシンチレーション光が比較的明確に分かれた。PMT1、PMT2 のどちらも光電効果に絞った時の時間分解能が、絞らなかった時よりも良くなった。一方、BSO は GAGG と比べて発光量が低いため、光電効果とコンプトン散乱の区別がしにくい。よって、PMT1、PMT2 のどちらも明確に光電効果に絞ることができず、時間分解能の精度が悪くなってしまったと考えられる。

また、下記の設置条件について、

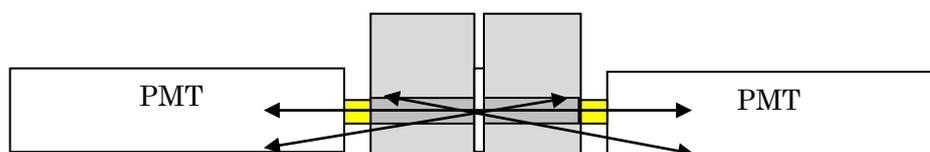
①0mm



②9mm



③9mm の鉛版



①の様に設置した条件では、違う γ 線のペアでコインシデンスになる確率が高く、違う組み合わせでコインシデンスになったものは、同じ1つのポジトロニウムからきたものだと断定できないので、精度が悪くなったと推測する。また、②の条件でも①と同様に、チェレンコフ光の個数が多いため、精度が悪くなった。③の条件では、鉛板により、違う組み合わせの γ 線のペアが減るのでチェレンコフ光が少なく、違う γ 線のペアでコインシデンスになる頻度も少なくなるため、精度が良くなったと考えられる。

今回の実験から、時間分解能が良いシンチレータには、

- ・減衰時間が短い（シンチレーション光の立ち上がり早い）
- ・発光強度が高い（発光量大きい）

という条件が必要であると考えられる。

6-1 課題

・本実験において使用した装置は我々の自作である箇所もあった。

そのため、作りやすい木材や段ボールを材料として使用した。

しかし、それはシンチレーションカウンターと線源の位置を決めるという重要な箇所であった。

実験の精度を向上させるためには、剛性と位置の再現性に優れた支持構造を検討し、より精確に測定できる装置が必要である。

・今回の時間分解能測定では、データ数は10万個と5万個で行っていた。

解析の際、光電効果部分に絞って時間分解能を出したため、データ数が少なくなってしまった。

今後、データ数を上げていくことで精度の向上が期待できる。

6-2 参考文献

- ・奈良女子大学理学部物理科学科 2007 年度卒業生
愛知七恵 岩下友子
「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 2009 年度卒業生
石塚規友紀 村上潤
「エアロジェル・チェレンコフ検出器による宇宙線の測定」
- ・素粒子・原子核物理学の基礎 -実験から統一理論まで-
A.Das , T.Ferbel 著 末包文彦・白井淳平・湯田春雄 訳 共立出版
- ・Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments
William R.Leo 著
- ・「放射線計測基礎論」
佐々木慎一 著

6-3 謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教官である宮林先生をはじめ、林井先生、岩下先輩、諸先輩方には丁寧かつ熱心な指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。本当にありがとうございました。