

シンチレーションカウンターの デジタルオシロスコープ読み出し

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

下雅意美紀
谷川祥子

平成25年度

概要

デジタルオシロスコープ等の測定器をプログラムで自動制御することは、高速の電気信号を扱い、測定の作業効率を高めるだけでなく、測定値の統計処理を厳密に進める上で今日の実験には不可欠である。そこで、LANベースのデジタルオシロスコープをLinux環境でVXI-11を用いて制御し、データ収集を行った。出力信号の時間発展の違いに注目し、シンチレーション光とチェレンコフ光を弁別し、シンチレーション光によるイベントのみの波高分布を得た。その波高分布から光電子数を算出した。また、波形の時間発展を指数関数でフィットすることで時定数を得た。

謝辞

本実験を進めるにあたり、お忙しい中多くの時間を割きご指導下さった宮林先生をはじめ、ゼミや日々の実験で熱心にご指導下さった林井先生、励ましの言葉を下さった諸先輩方にこの場をお借りして心から感謝の意を申し上げます。

目次

概要.....	2
謝辞.....	2
第1章 原理.....	4
1.1 γ 線.....	4
1.2 γ 線の物質との相互作用.....	4
1.2.1 光電効果.....	4
1.2.2 コンプトン散乱.....	5
1.2.3 電子対生成.....	5
1.3 シンチレーション光.....	6
1.4 チェレンコフ光.....	6
第2章 実験器具・機器.....	7
2.1 シンチレーションカウンター.....	7
2.1.1 シンチレーター.....	8
2.1.2 光電子増倍管.....	8
2.2 デジタルオシロスコープ.....	8
2.3 線源.....	8
第3章 実験.....	10
3.1 シンチレーションカウンターの製作.....	10
3.2 実験セットアップ.....	10
3.3 データ収集プログラム.....	10
第4章 データ解析.....	12
4.1 チェレンコフ光とシンチレーション光.....	12
4.2 エネルギー分解能と光電子数.....	14
4.3 時定数.....	17
第5章 結果・課題.....	19
付録.....	20
A データ収集プログラム.....	20
B データ解析プログラム.....	22
B.1 ゼロ点と r	22
B.2 シンチレーション光の波高.....	24
B.3 平均データ.....	27
B.4 フィット.....	30
参考文献.....	32

第1章 原理

粒子は検出器を構成する材料との相互作用により検出される。本章では、 γ 線の性質、 γ 線の物質との相互作用について述べる。

1.1 γ 線

γ 線は放射線の種類で、放射性崩壊や高エネルギーでの粒子の衝突により励起した原子核のエネルギー準位の遷移により発生する¹。 γ 線の透過力は非常に高く、一般に γ 線のエネルギーは0.1～10 MeV、それに対応する波長は $10^4 \sim 100 \text{ fm}$ である²。

1.2 γ 線の物質との相互作用

γ 線がエネルギーを失う物質との相互作用は、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成の3つに分けられる³。これらの作用の起こる確率は、物質の種類および γ 線のエネルギーにより異なり、約10 MeV以下では光電効果、2 MeV以下ではコンプトン散乱⁴、5 MeV以上では電子対生成が優勢となる²。

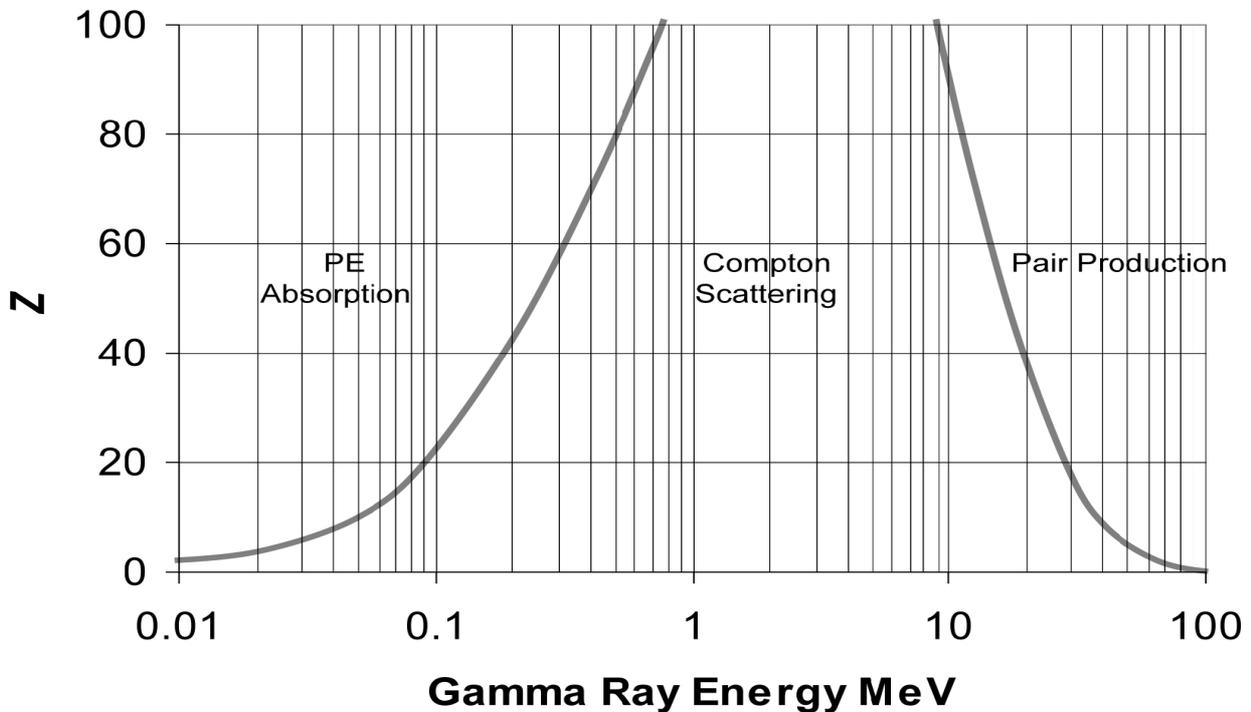


図 1.1: 各相互作用の支配的エネルギー領域⁵

1.2.1 光電効果

光電効果とは、光を物質に照射したとき、その光子のエネルギーがすべて電子に与えられ、その電子が放出される現象のことである。光電効果は、照射する光のエネルギーが1個の電子を物質表面から取り出すのに必要な最小のエネルギー ϕ より大きい場合のみ起こる¹。これは、2.2.3で説明する光電子増倍管に应用されている。放出される電子の最大エネルギー E_{max} は γ 線のエネルギーを E_γ とすると、

$$E_{max} = E_\gamma - \phi \tag{1.1}$$

と書ける。

1.2.2 コンプトン散乱

入射光子が物質入射時に束縛がゆるい軌道電子を散乱することでエネルギーを失い、散乱光子の波長が長くなる現象を光電効果という⁶。

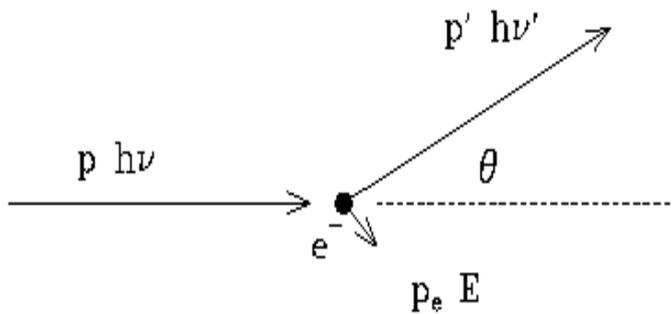


図 1.2: コンプトン散乱⁷。振動数 ν をもつ入射光子が静止している質量 m の電子と衝突し、角度 θ の方向に振動数 ν' をもつ光子として散乱される。

図 1.2 のような場合を考えると、運動動量保存の法則:

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} \cos \theta + p_{e\parallel} \quad (1.2)$$

$$0 = \frac{h\nu'}{c} \sin \theta - p_{e\perp} \quad (1.3)$$

およびエネルギー保存の法則:

$$h\nu + mc^2 = E\nu' + E \quad (1.4)$$

が成り立つ⁸。したがって、散乱前後の光子の波長の関係は、

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta) \quad (1.5)$$

で表される⁸。

1.2.3 電子対生成

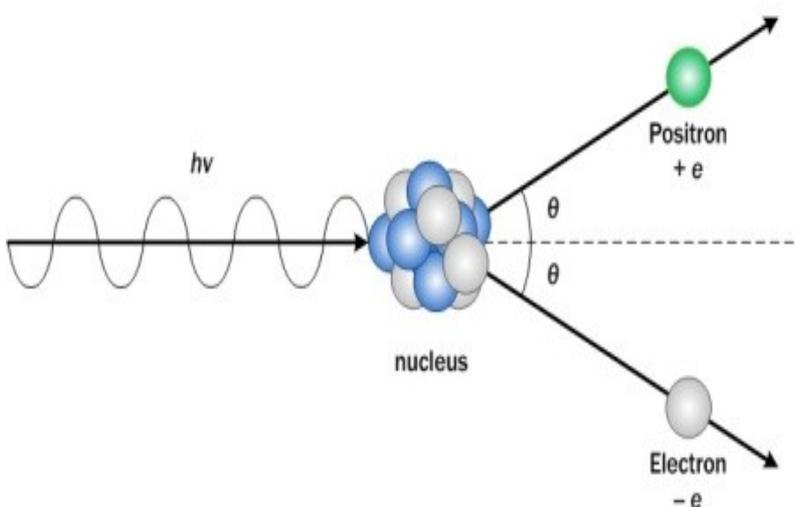


図 1.3: 電子対生成⁹

高いエネルギーを持った光子が原子核などに衝突したときに電子と陽電子が生成され、入射光子は消滅する。そのエネルギー収支は、

$$E_{\gamma} = T_{positron} + mc^2 + T_{electron} + mc^2 \quad (1.6)$$

と書ける²。しきい値が $2mc^2 \simeq 1.022 \text{ MeV}$ であるため、光子のエネルギーが高くなければ電子対は生成されない。

1.3 シンチレーション光

電離放射線がシンチレーター中を通過すると、シンチレーション光と呼ばれる蛍光が発せられる¹⁰。これは、電離放射線により励起したシンチレーター中の電子が脱励起するとき、エネルギー準位差に相当する光子を放出することに起因する¹⁰。

1.4 チェレンコフ光

荷電粒子が光の位相速度 $\frac{c}{n}$ より速い速度 v で屈折率 n の物質中を通過するとき、電磁気的な衝撃波の発生があり¹¹、この時干渉性のあるチェレンコフ光を特有の角度 θ で放出する³。図1.4より、

$$\cos \theta = \frac{\frac{c}{n}t}{vt} = \frac{c}{vn} = \frac{1}{\beta n} \quad (1.6)$$

である。チェレンコフ光の発光時間は、荷電粒子が物質中を通過する時間に等しいため非常に短い。

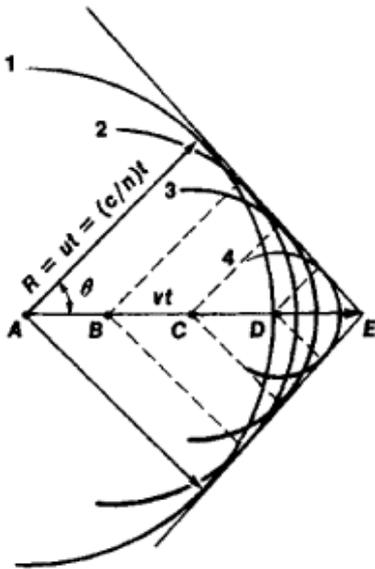


図1.4: チェレンコフ光のホイヘンスの原理による解釈図¹²

第2章 実験器具・機器

実験に使用した主な機器および線源について説明する。

2.1 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電離放射線を検出及び測定する装置で、図2.1のように大まかにシンチレーター、光電子増倍管から成る。

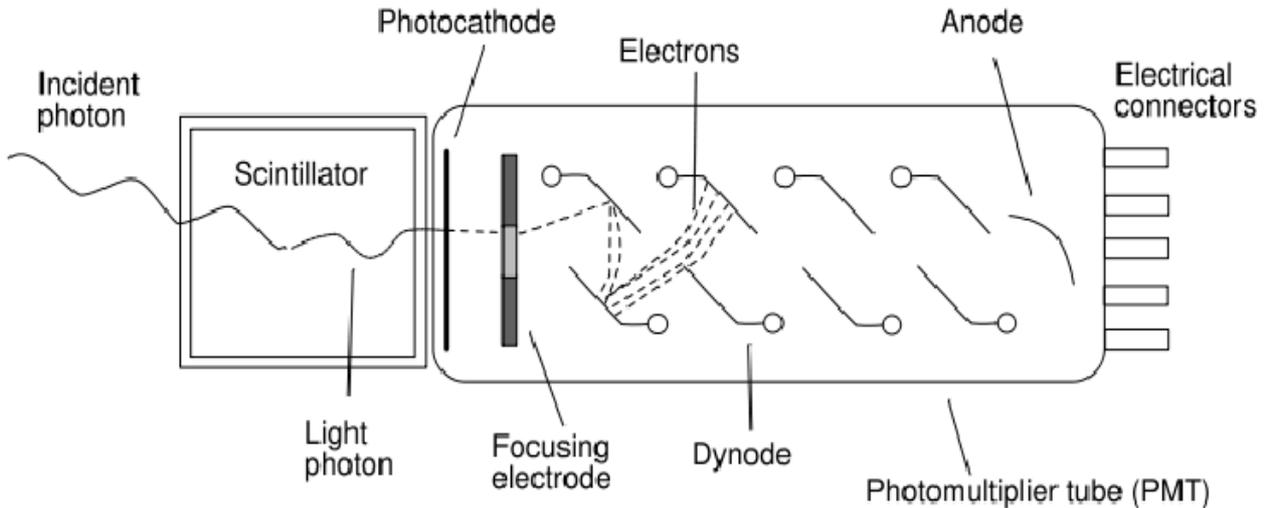


図2.1: シンチレーションカウンターの模式図¹³

シンチレーション光の損失の主な原因はシンチレーターと光電子増倍管間での伝達ロス、及び、シンチレーターによる吸収である¹⁰。

屈折率 n をもつ媒質中の光の速度は $\frac{c}{n}$ である。したがって、光が屈折率の異なる物質間の境界に入射すると、異なる速度のため一部は屈折し、一部は反射する。これはフレネルの式で説明され、光が屈折率 n_1 の物質から屈折率 n_2 の物質に垂直に入射した場合、屈折率 R および透過率 T は、

$$R = \left| \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right|^2 \quad (2.1)$$

$$T = 1 - R \quad (2.2)$$

で表される¹⁴。シンチレーション光の伝達ロスを低減させる有効な方法として、光学セメントやグリースがよく用いられる。透明度が非常に高いのが特徴で、光電子増倍管の入射窓に使われるガラスの屈折率(≈ 1.5)に近いものを使用するのが理想である¹⁴。本実験では(株)サンゴバンのBC-630を使用した。屈折率 $n = 1.465$ をもち、波長 $280 \sim 700 \text{ nm}$ の光の約 95% を透過する¹⁵。

シンチレーターによる吸収前後の光強度 L_0 と L の関係は、

$$L = L_0 \exp\left(-\frac{x}{l}\right) \quad (2.3)$$

で表される¹⁰。そのため、シンチレーション光の伝搬距離 x が減衰長 l ($\geq 1 \text{ m}$) に相当するような大きな検出器でない場合、シンチレーターの吸収による損失は無視できる。本実験では、 $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ の小さなシンチレーターを使用するので、シンチレーター中の吸収は問題にならない。

2.1.1 シンチレーター

本実験に用いたシンチレーターはCe添加GAGGおよびCe添加LSOである。それぞれの性質を表2.1に示す。

表 2.1: GAGG:Ce および LSO:Ce の性質¹⁶

	GAGG:Ce	LSO:Ce
密度 g/cm^3	6.63	7.4
減衰時間 ns	88	40
発光量 $photons/MeV$	60000	26000
エネルギー分解能 % (^{137}Cs ; $5 \times 5 \times 5 mm^3$)	6.3	9
発光波長 nm	520	420
自己放射性	無	有

2.1.2 光電子増倍管

光が光電子増倍管に入射すると、光電カソードで光電効果により光電子が放出される¹⁰。光電子はフォーカス電極でダイノードに収束され、そこで二次電子が放出される¹⁷。この過程が繰り返され、最終ダイノードで放出された二次電子はアノードから取り出される¹⁸。本実験では、2インチ径でラインフォーカス型ダイノードをもつR329を組み込んだ浜松ホトニクス製のH7195を用いた。

2.2 デジタルオシロスコープ

多くの計測機器はLAN経由でコンピューターなどのコントローラーで制御される。この計測機器とコンピューター間の通信には、様々な計測機器が共通して使用できるコマンドやクエリを定義したVXI-11と呼ばれるプロトコルが使われる¹⁹。今回使用したオシロスコープ(DS05014A)もLXI-11規格に準拠しており、LANを介してAgilent InfiniiVision 5000 Series Oscilloscopes Programmer's Guide²⁰で与えられるSCPIコマンドを受け取り、コンピューターと通信可能である。

2.3 線源

^{137}Cs の密封線源を使用した。 ^{137}Cs の6.5%は ^{137}Ba 、93.5%は ^{137m}Ba に β 崩壊する²¹。 ^{137m}Ba は準安定状態で、約662 keVの γ 線を放出し安定な ^{137}Ba に壊変する。放出される γ 線は、図1.1より光電効果およびコンプトン散乱により物質と相互作用する。

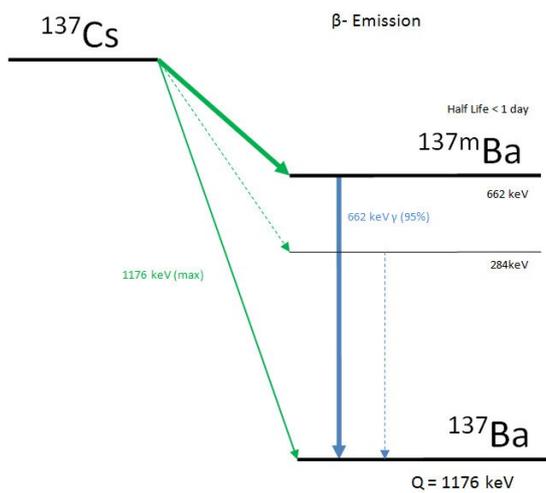


図 2.2: ^{137}Cs の壊変図式²²

第3章 実験

3.1 シンチレーションカウンターの製作

Leo¹⁰を参考に、以下の手順でシンチレーションカウンターを製作した。シンチレーターは2.1.1で述べたGAGG:CeおよびLSO:Ceの $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ の結晶を使用した。

- 1) 光電子増倍管の入射窓とシンチレーターの表面を拭いた。
- 2) 光電子増倍管の入射窓の中心にシリコングリースを塗った。
- 3) シリコングリースが薄く広がるよう、また、気泡ができないよう光電子増倍管をシンチレーターに押しつけた。
- 4) シンチレーターが中心から動かないよう、 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ の穴をあけたダンボールで固定した。
- 5) シンチレーション光が外部に漏出しないよう、銀色の反射シートで覆った。
- 6) 黒テープで覆い、遮光した。

3.2 実験セットアップ

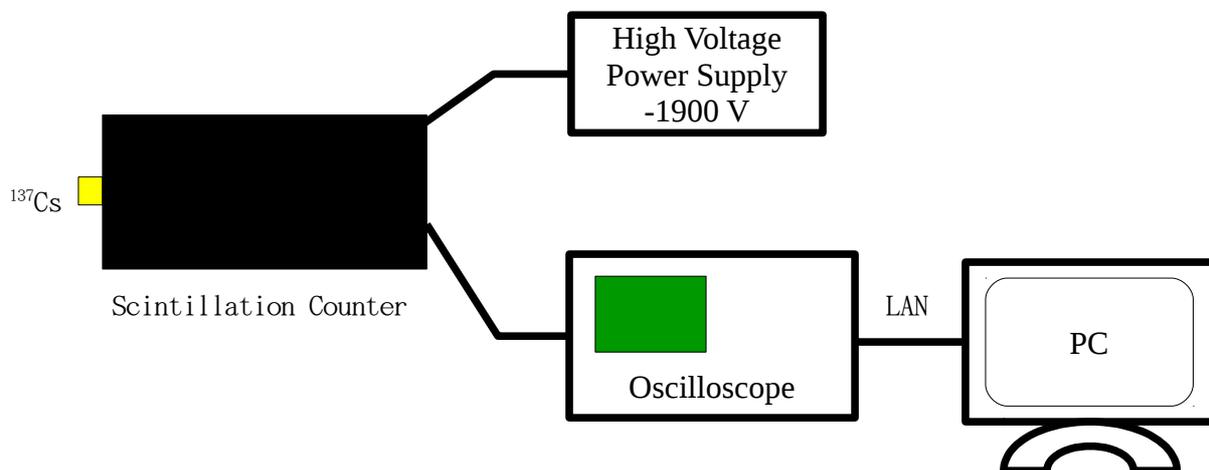


図3.1: セットアップ図

^{137}Cs から放射される γ 線はシンチレーターに入射するとシンチレーション光を発する。一部の γ 線はシンチレーターの周囲の段ボールに入射する。透過力が高いため段ボールを通過し、光電子増倍管の入射窓に入射する。このホウケイ酸ガラス製の窓材中で、光電効果やコンプトン散乱により電子が放出される。この電子が速度 $v > \frac{c}{n}$ で移動すると、チェレンコフ光が発せられる。

3.3 データ収集プログラム

データ収集に用いたプログラムを付録Aに示す。最大サンプリング周波数は 2 GHz つまり 0.5 ns 間隔で信号をサンプル・アンド・ホールドする。コンピューターは、LAN上のTCP/IPベースのリモートインターフェイスを通じてメッセージを送ったり、受け取ったりすることでオシロスコープと通信する。このメッセージの入出力のターゲットとなるオブジェクトとしてCLINKというものがあり、付録Aのプログラム中では、clinkという変数名でそれを宣言している。はじめに、オシロスコープとの接続を張る。

```
int vx111_open_device(serverIP, clink);
```

なお、接続を切断するには下文を用いる。

```
int vx111_close_device(serverIP, clink);
```

接続を張ると、SCPI コマンドを送ることができる。まずオシロスコープの設定をし、その後クエリを送ったり、それに対する回答を受け取ったりする。この際以下いずれかのファンクションを用いる。SCPI コマンドはわかりやすい文字列で書かれているが、今回の実験で用いたコマンドの説明を表 3.1 に示す。最も基本的な関数コールは以下の 3 つである。

- (1) `int vx111_send(clink, "cmd");`
- (2) `double vx111_obtain_double_value(clink, "cmd");`
- (3) `long vx111_receive_data_block(clink, wf, 1000, 2000);`

(1)はターゲットの clink にコマンドを送信、(2)はクエリに対応した実数、例えばレンジを示す V/div の値、の取得、(3)は入力パルスをサンプル・アンド・ホールドした時系列データのブロック受信に用いる。

表 3.1: SCPI コマンド²⁰

コマンド	説明
:CHANnel1:DISPlay 1	チャンネル1のディスプレイをオンにする。
:TIMebase:SCALe 50ns	時間軸の目盛を 50 ns/div に設定する。
:TIMebase:REFERence LEFT	タイムリファレンスを画面左から1目盛の位置に設定する。
:TIMebase:POSition 0.	トリガーとタイムリファレンスの時間差を設定する。
:CHANnel1:SCALe 0.2	電圧軸を 0.2 V/div(200 mV/div)に設定する。
:WAVEform:FORMat BYTE	データ転送モードを8ビットバイトに設定する。
:ACQuire:TYPE NORMal	オシロスコープをノーマルモードに設定する。
:WAVEform:XINC?	データ点間の時間間隔を返す。
:WAVEform:YINC?	1LSBが対応する電圧を単位Vで返す。
:TIMebase:RANGe?	フルスケール(10目盛)の時間の値を返す。
:WAVEform:POINt:MODE RAW	:WAVEform:DATA?で返されるデータをRAWデータ型に設定する。
:WAVEform:POINt 1000	:WAVEform:DATA?で転送されるデータ点の数を1000に設定する。
:WAVEform:SOURce CHANnel1	:WAVEform コマンドに使われるソースをチャンネル1に設定する。
:WAVEform:DATA?	データを2進数のブロックで返す。

第4章 データ解析

チェレンコフ光とシンチレーション光の時間発展の違いを利用し、条件式をつけることでシンチレーション光によると考えられるイベントのみを取り出した。取り出したデータをもとに度数分布を描き、これが正規分布に従うと仮定して光電子数を求めた。

4.1 チェレンコフ光とシンチレーション光

収集した波形の例を図4.1に示す。

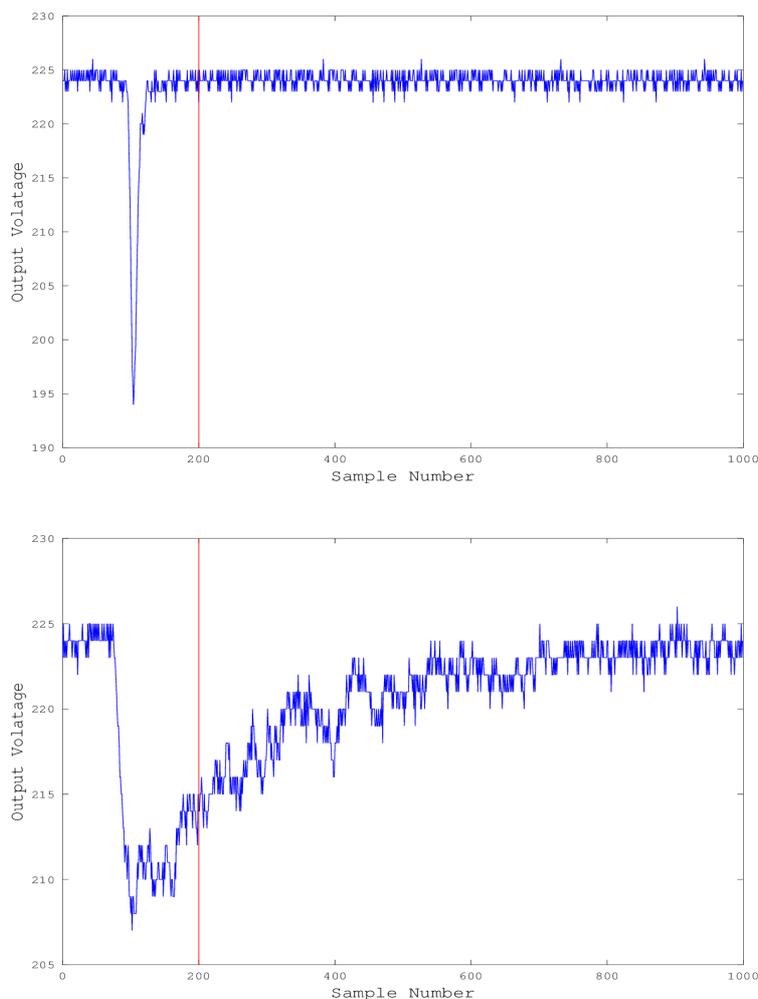


図4.1: 収集したデータのプロットの例。発光時間の短い上図はチェレンコフ光によるイベント、発光時間の長い下図はシンチレーション光によるイベントと考えられる。

トリガーポジションを左から 50 ns 、つまり 100 番目のサンプルの位置に設定したので、初めの 50 サンプルの平均、

$$zero = \frac{\sum_{i=0}^{49} h_i}{50} \quad (4.1)$$

を計算し、ゼロ点とした。ここで i はパルス時系列データのサンプルを示す番号で、 h_i は i 番目にサンプルされたデータである。図4.1中に赤の縦線で示すように、200 番目のサンプルでチェレンコフ光は発光し終えているのに対し、シンチレーション光は発光し終えていないのがわかる。そこで、チェレンコフ光によるイベントとシンチレーション光によるイベントを区別するため、

$$r = \frac{zero - h_{200}}{peak} \quad (4.2)$$

を計算した。 h_{200} は 200 番目のサンプルの出力電圧、 $peak$ はピークの正味の振幅を表す。チェレンコフ光によるイベントは 200 番目のサンプルでは発光がすでに終わっており、ほぼゼロ点と等しいので r は 0 に近い値をもつ。したがって、図 4.2 の r の度数分布で 0 付近にピークをもつ分布はチェレンコフ光、それより大きいピークをもつ分布をシンチレーション光によるイベントとみなせる。この間の谷の r の値 r_v を図 4.2 から読み取り、GAGG では $r > r_v = 0.09$ 、LSO では $r > r_v = 0.13$ のものをシンチレーション光のイベントとした。

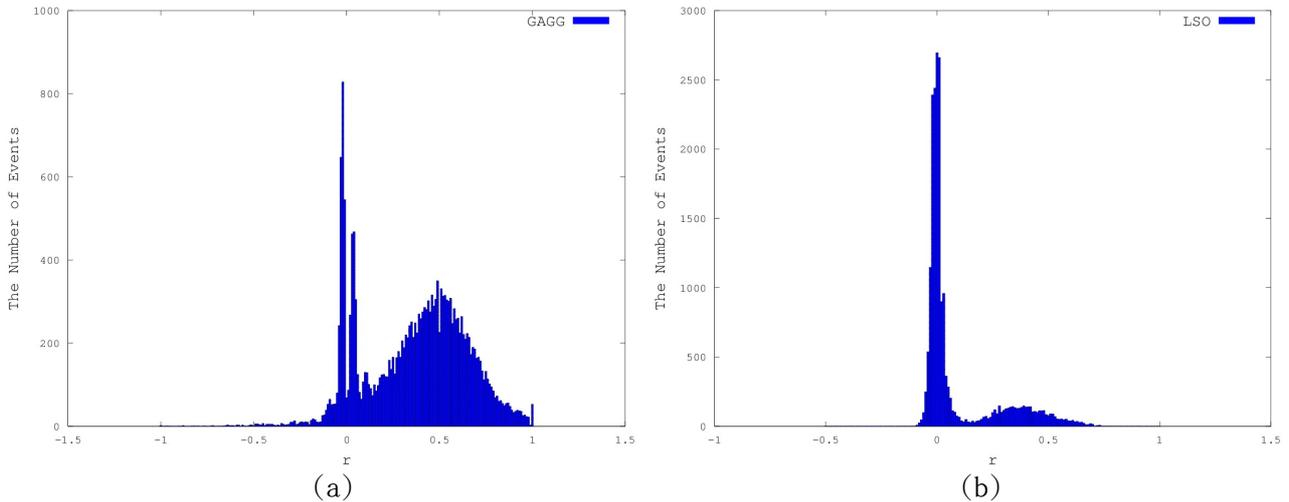


図 4.2: r の度数分布。(a)GAGG (b)LSO

$r < 0$ のイベントの波形をプロットした。以下のとおり、2通りの原因があることがわかった。

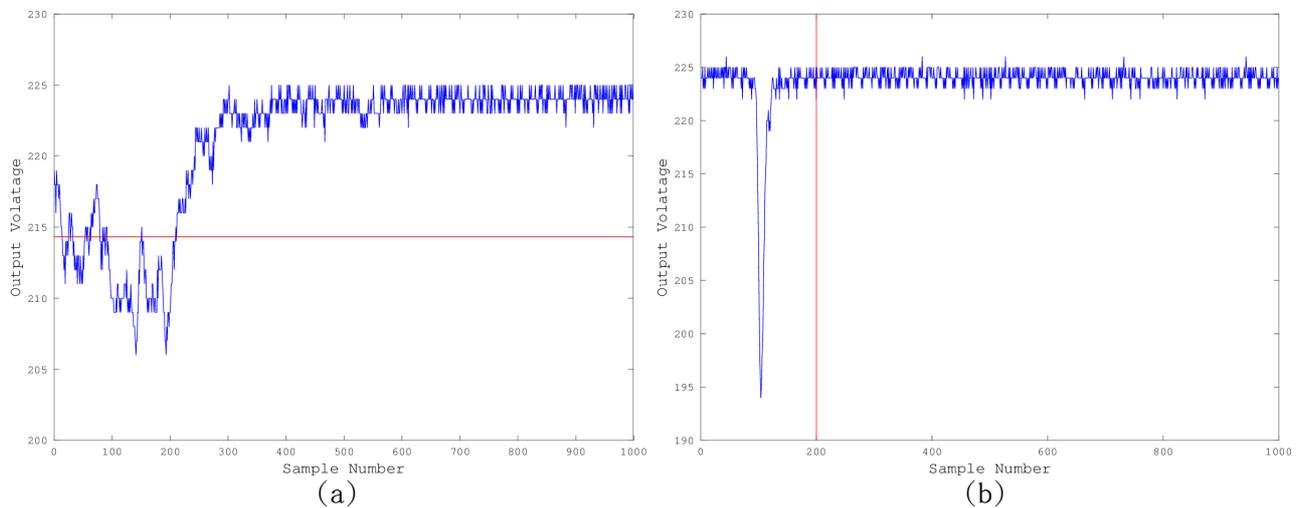


図 4.3: (a)トリガーポジション以前にノンゼロの信号が記録されている。赤線はゼロ点を示すが明らかに正しくない。(b)普通のチェレンコフ光によるイベントである。ゼロ点のふらつきのため、 r の分子がマイナスになったと考えられる。

以上より、ゼロ点の値が正しくないイベントを排除し、 $r > r_v$ を満たすイベントをシンチレーション光によるイベントとした。

4.2 エネルギー分解能と光電子数

付録B.2に示すデータ解析プログラムを用いて、4.1で述べた条件を満たすイベントの出力電圧の積分値を計算した。この際、オシロスコープの単位目盛あたりの電圧値の設定にかかわらずデータの比較ができるよう、単位をボルトに変換した。積分値から得られる波高分布で光電効果によるイベントの分布は、正規分布にしたがう。この正規分布の平均値が信号電荷、すなわち光電子数に比例しているのはもちろんだが、分解能は光電子数の統計的ふらつきにより主として制限されていると考え、半値全幅を $FWHM$ 、光電ピークの波高を μ とするとエネルギー分解能は、

$$\frac{\sigma}{\mu} = \frac{FWHM}{2\sqrt{2\ln 2}} \times \frac{1}{\mu} \quad (4.3)$$

と書ける。これが $\frac{1}{\sqrt{N}}$ に等しいので²³、光電子数 N は

$$N = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^{-2} \quad (4.4)$$

で求められる。

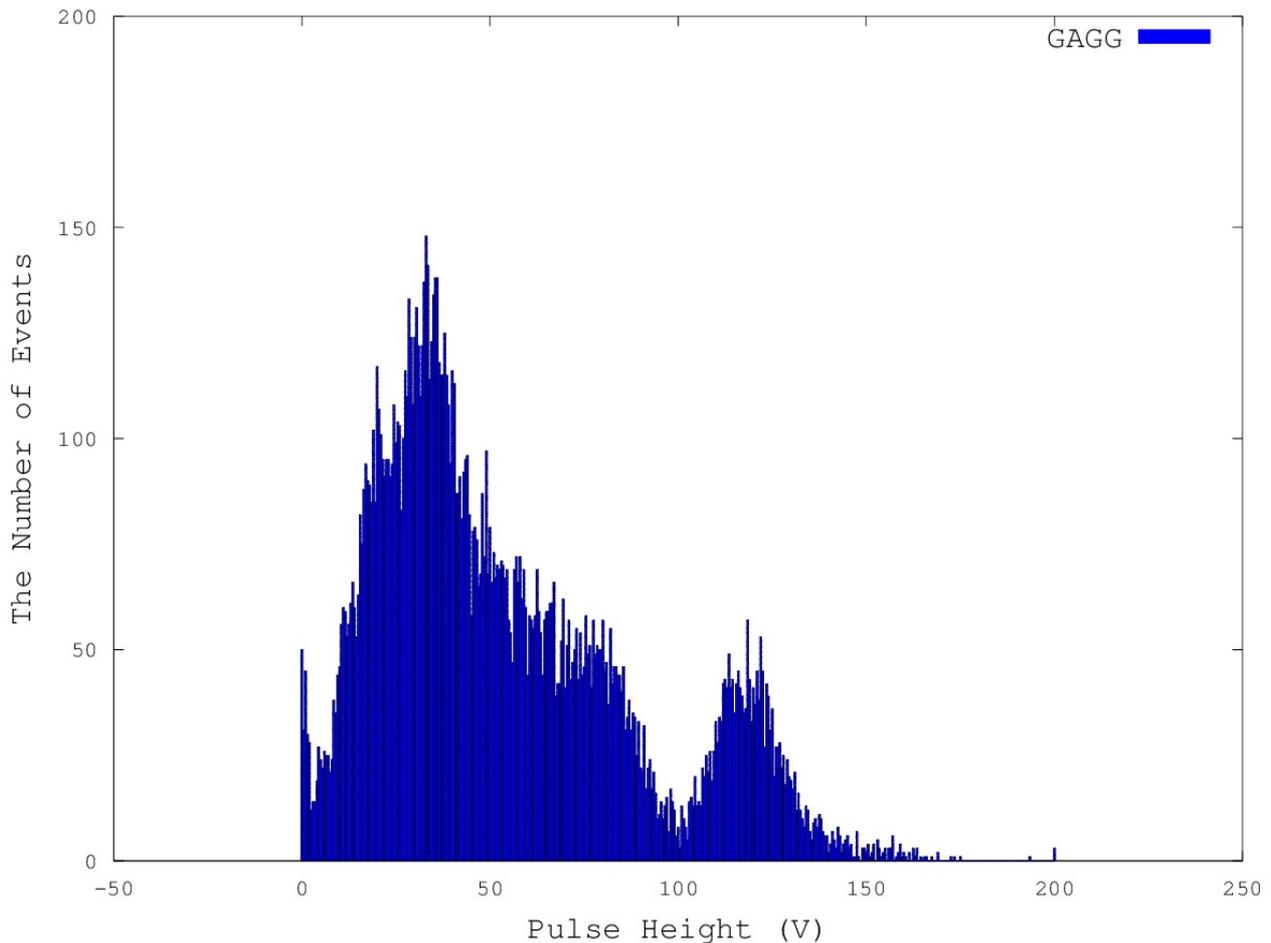


図4.4: GAGGによるシンチレーション光の波高分布

図4.4から $FWHM \simeq 20$ 、 $\mu \simeq 120$ と読み取った。したがってエネルギー分解能は、

$$\frac{\sigma}{\mu} \simeq \frac{20}{2\sqrt{2\ln 2}} \times \frac{1}{120} \simeq 0.071 \simeq 7\% \quad (4.5)$$

光電子数は、

$$N \simeq (0.07)^{-2} \simeq 200 \quad (4.6)$$

となる。

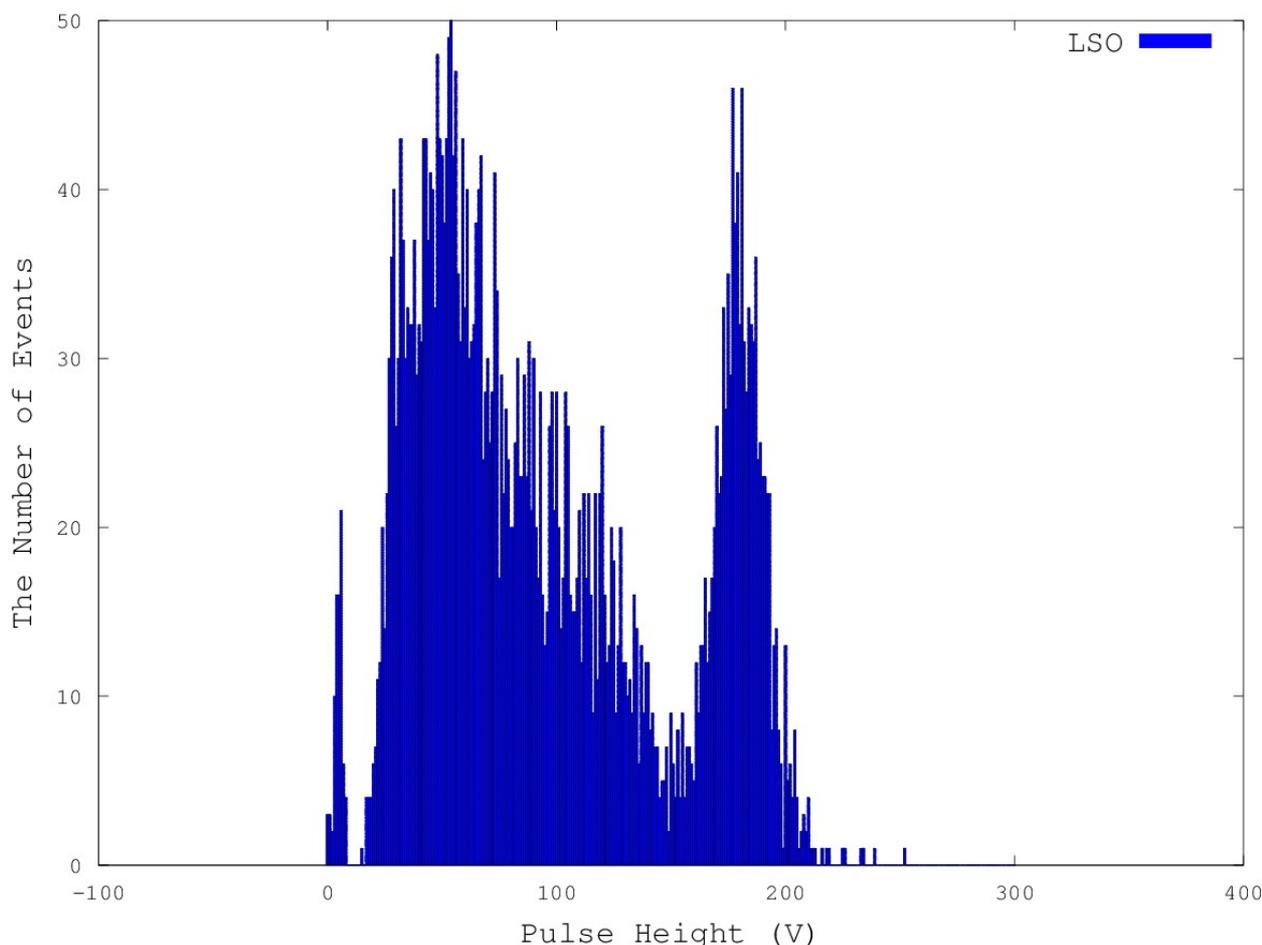


図4.5: LSOによるシンチレーション光の波高分布

同様に、 $FWHM \simeq 180$ 、 $\mu \simeq 25$ と読み取り計算すると、

$$\frac{\sigma}{\mu} \simeq 0.059 \simeq 6\% \quad (4.7)$$

$$N \simeq 290 \quad (4.8)$$

が得られた。

GAGGでは約 200 個の光電子、LSOでは約 290 個と、LSOの方が約 45% 光電子数が多いという結果が得られた。一方表4.1で示した文献値では、GAGGの発光量はLSOの発光量に比べ多い。発光量を議論するには、GAGGの発光波長とLSOの発光波長が異なるため、図4.6のように量子効率が異なることによる効果を考慮すべきである。量子効率とは光電カソードの光子から光電子への変換効率のことで、

$$\eta = \frac{\text{The number of photoelectrons emitted}}{\text{The number of incident photons}} \quad (4.9)$$

と定義される。なお、今回の実験で用いた光電子増倍管はバイアルカリ光電面をもつ。量子効率による影響を調べるため、求めた光電子数を量子効率で割るとGAGGの方が約 23% LSOより光量が多いという結果を得た。

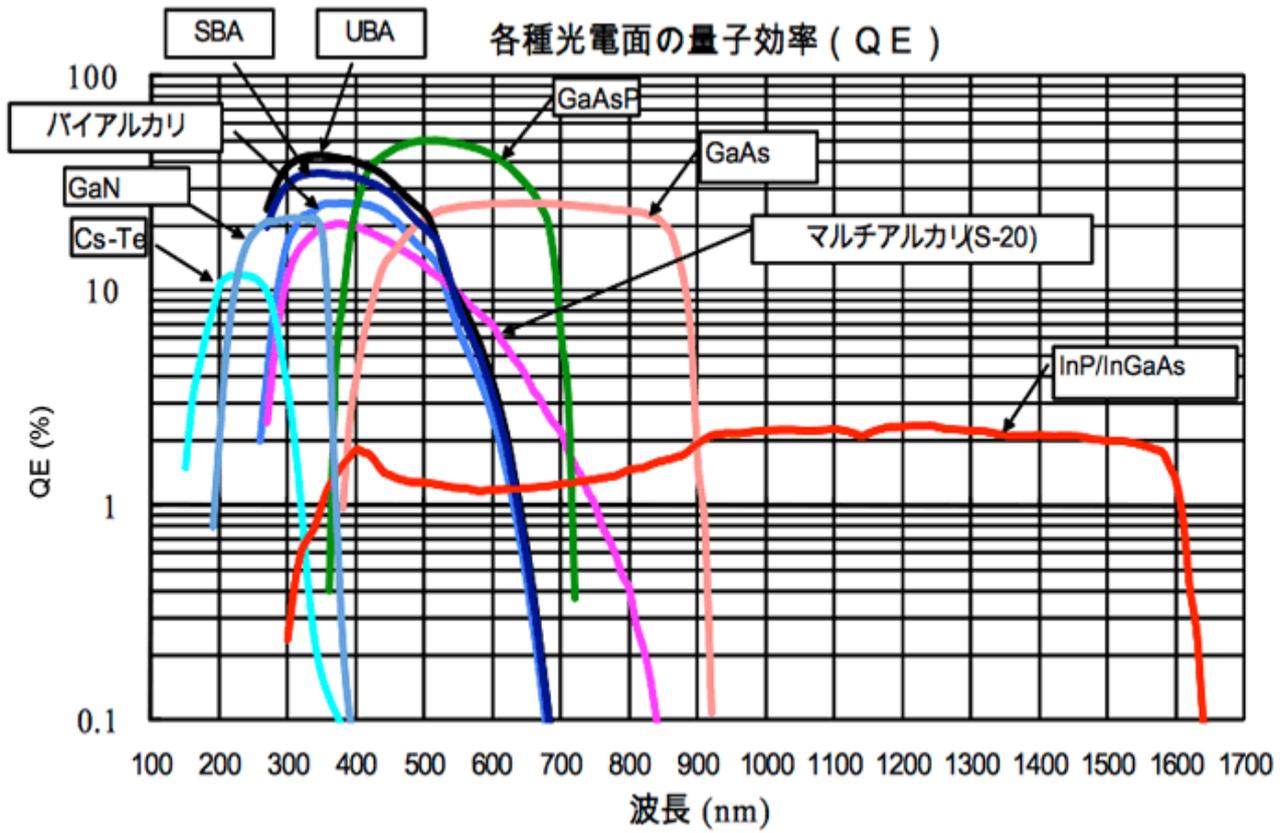


図 4.6: 量子効率の波長依存性²⁴

表 2.1 に記載したように、GAGG の発光波長は 520 nm 、LSO の発光波長は 420 nm である。図 4.6 からシンチレーターの量子効率を読み取ると、GAGG は約 0.14、LSO は約 0.25 である。この違いを考慮に入れると、式 4.9 より GAGG の光子数は 1430、LSO の光子数は 1160 となり、GAGG の方が約 23% 多いという結果が得られた。

4.3 時定数

信号パルスがピークになったときに示す電圧を V_{max} とし、出力信号が V_{max} から $\frac{V_{max}}{e}$ になるのにかかる時間を時定数といい、 τ で表す。すでに 4.1 で説明したとおり、波形ピーク値とトリガー後 50 ns のデータ比により、チェレンコフ光によるパルスとシンチレーション光によるパルスはよく分離できる。そこで、シンチレーション光のイベントのみ選び、収集した全イベントについて、波形データのサンプル番号ごとに平均をとったものを平均波形と呼ぶ。この平均波形の立ち上がり部分を除いた適切な範囲を

$$V(t) = V_{max} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (4.10)$$

でフィットすると、シンチレーション光の時定数を得る。GAGG シンチレーターについてこれを行った結果を図 4.7 に示す。

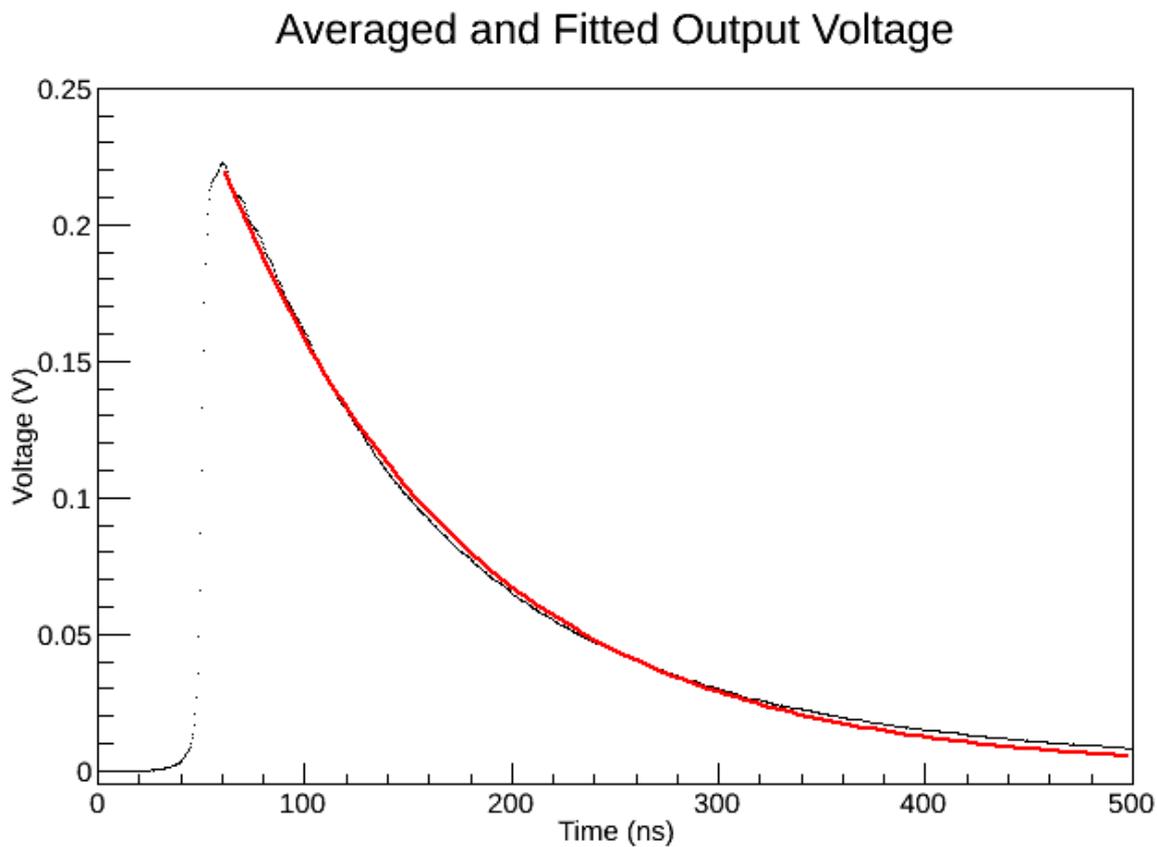


図 4.7: GAGG の平均波形とそのフィット関数

フィット結果は式(4.11)と求められた。したがって、GAGG シンチレーターの時定数 $\tau = (117.0 \pm 0.2) \text{ ns}$ である。

$$V(t) = (0.3722 \pm 0.0009) \exp\left(-\frac{t}{117.0 \pm 0.2}\right) \quad (4.11)$$

同様の解析処理を LSO シンチレーターを用いた実験データについて行った結果を図 4.8 に示す。

Averaged and Fitted Output Voltage

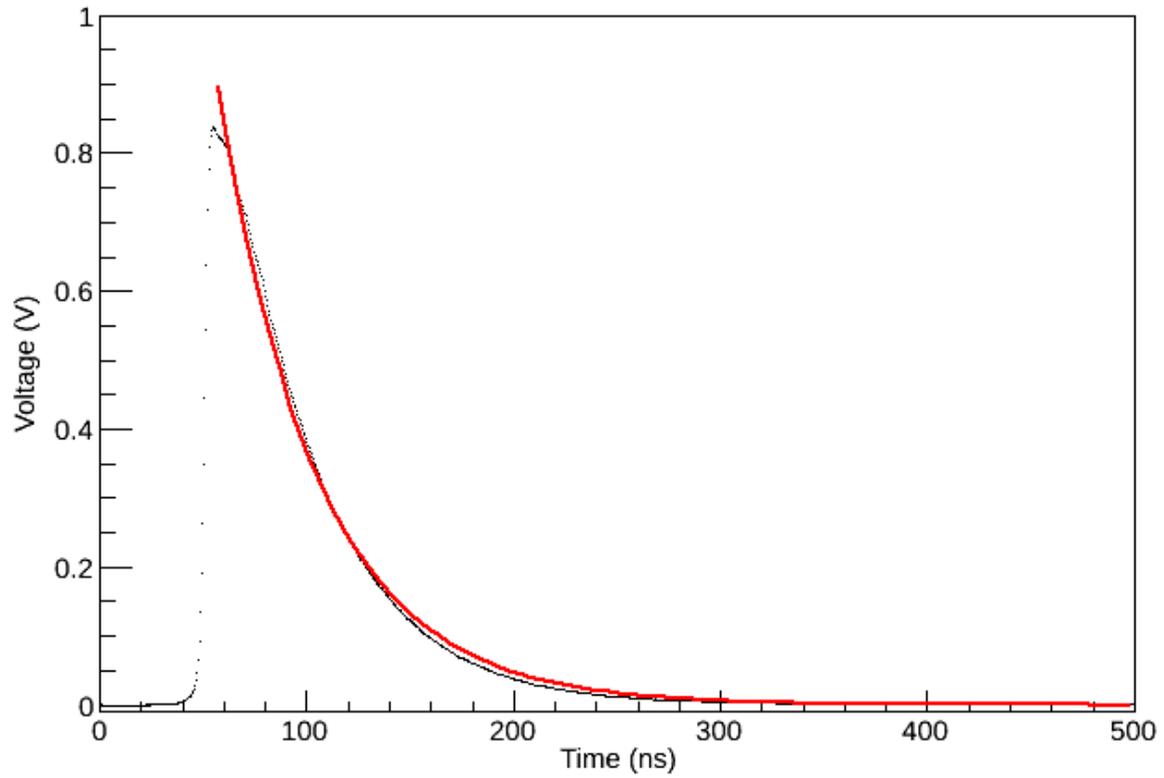


図 4.8: LSO の平均波形とそのフィット関数

フィット関数は式(4.11)と求められた。したがって、時定数 $\tau = (48.6 \pm 0.2) \text{ ns}$ である。

$$V(t) = (2.90 \pm 0.02) \exp\left(-\frac{t}{48.6 \pm 0.2}\right) \quad (4.12)$$

第5章 結果・課題

今回の実験で達成したこと、得た結果を以下に挙げる。

- コンピューターからLANを介してデジタルオシロスコープを制御し、波形データを得ることができた。
- チェレンコフ光によるイベントとシンチレーション光によるイベントの時間発展の違いを利用し、シンチレーション光によるイベントのみを取り出すことができた。
- 使用した光電子増倍管のバイアルカリ光電陰極の量子効率の違いを考慮して光量を計算すると、GAGGの光子数の方がLSOの光子数より約23%多いという結果を得た。
- GAGGの時定数は $\tau = (117.0 \pm 0.2) \text{ ns}$ 、LSOの時定数は $\tau = (48.6 \pm 0.2) \text{ ns}$ と求まり、GAGGの時定数の方が約2.4倍長いことがわかった。

今後の課題を以下に書く。

- GAGGシンチレーターの時定数の文献値は 88 ns であり¹⁶、実験結果と比べ短い。違うロットのGAGG結晶を用いて同じ実験をすることで、これが結晶のロット間のばらつきに起因するかわかる。
- 使用したGAGGシンチレーターは以前に誤って床上に落下したことがあり、物理的衝撃が加わると減衰時間が伸びる場合があるとの指摘があるため、追加で入手できるサンプルがあれば、意図的に衝撃を加える前後で測定して時定数を比較して衝撃による影響かどうか調べることは興味深いと考えられる。

付録

A データ収集プログラム

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

int main(int argc, char *argv[]){
    char* ofile = "wf.root";
    int nevt = 20000;
    CLINK *clink;
    clink = new CLINK;
    static char* serverIP = "10.0.1.103";

    // Open the oscilloscope.
    if (vxill_open_device(serverIP, clink) != 0){
        printf ("Couldn't open the device.\n");
        exit(1);
    }

    // Data will be saved in wf.
    static char wf[1000];

    int ret;
    ret = vxill_send(clink, "CHAN1:DISP 1");
    ret = vxill_send(clink, "TIM:SCAL 50ns"); // 50 ns/div
    ret = vxill_send(clink, "TIM:REF LEFT");
    ret = vxill_send(clink, "TIM:POS 0.");
    ret = vxill_send(clink, "CHAN1:SCAL 0.2"); // 200 mV/div
    ret = vxill_send(clink, "WAV:FORM BYTE");
    ret = vxill_send(clink, "ACQ:TYPE NORM");
    ret = vxill_send(clink, "ACQ:COUN 1");

    double xinc = vxill_obtain_double_value(clink, "WAV:XINC?");
    double yinc = vxill_obtain_double_value(clink, "WAV:YINC?");
    printf("%10.3e\n", xinc); // Time interval
    printf("%10.3e\n", yinc); // Least significant bit
```

```

double hint = vxill_obtain_double_value(clink, "WAV:XINC?");
double range = vxill_obtain_double_value(clink, "TIM:RANG?");
ret = vxill_send(clink, "WAV:POIN:MODE RAW");
ret = vxill_send(clink, "WAV:POIN 1000");
for (int iev = 0 ; iev < nevt + 1; iev++){
    ret = vxill_send(clink, "DIG CHAN1");
    ret = vxill_send(clink, "WAV:SOUR CHAN1");
    ret = vxill_send(clink, "WAV:DATA?");
    long bytes_returned = vxill_receive_data_block(clink, wf, 1000, 2000);
    if (iev == 0) continue;
    printf(" %5d %5d ", iev, bytes_returned);
    for (int i = 0 ; i < 1000; i++){
        printf("%d ", (unsigned char)wf[i]);
    }
    printf("\n");
    if (iev == 0) continue;
}
vxill_close_device(serverIP, clink); // Close the oscilloscope.
}

```

B データ解析プログラム

B.1 ゼロ点と r

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

char header1[40], header2[40], buffer[10];
int i, iev, nbytes;
int wf[1000];

FILE* fp;
FILE* fpout1;
FILE* fpout2;

int main(int argc, char *argv[]){
    if(argc < 2 ){
        std::cout << "./zero_and_r input_file" << std::endl;
        return 0;
    }

    // Open data file.
    fp = fopen(argv[1], "r");

    // Open files to save computed zero point and r.
    fpout1 = fopen("zero_point.out", "w");
    fpout2 = fopen("r.out", "w");

    fscanf(fp, "%s", header1);
    fscanf(fp, "%s", header2);

    while(fscanf(fp, "%s", buffer) != EOF){
        iev = atoi(buffer); // Event number
        fscanf(fp, "%s", buffer);
        nbytes = atoi(buffer); // The number of bytes

        for(i = 0; i < nbytes; i++){
```

```

    fscanf(fp, "%s", buffer);
    wf[i] = atoi(buffer);
}

// Done reading one event of data.
// wf can now be analysed.

// Take the mean of the first 50 samples.
double sum = 0.0;
double zero_point = 0.0;
const int nped = 50;
for(i = 0; i < nped; i++){
    sum = sum + (double)wf[i];
}
zero_point = sum / 50.0;
fprintf(fpout1, "%f ", zero_point);

// Find peaks and then calculate the net peak pulse heights.
double min = 255.0;
for(i = 0; i < nbytes; i++){
    if(min > (double)wf[i]){
        min = wf[i];
    }
}
double peak_height = zero_point - min;

/* As is shown in Fig. 4.1,
 * Cerenkov radiation is no longer emitted at the 200th sample,
 * whereas scintillation light is.
 * Therefore, by computing r written below,
 * Cerenkov radiation and scintillation light can be separated.
 */
double r = (zero_point - (double)wf[200]) / peak_height;
fprintf(fpout2, "%f ", r);
}
}

```

B.2 シンチレーション光の波高

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

char header1[40], header2[40], buffer[10];
int i, iev, nbytes;
float delta_t, lsb;
int wf[1000];

FILE* fp;
FILE* fpout;

int main(int argc, char *argv[]){
    if(argc < 2 ){
        std::cout << "./cerenkov_and_scintillation input_file" << std::endl;
        return 0;
    }

    // Open the raw data file.
    fp = fopen(argv[1], "r");

    // Open a file to save data later.
    fpout = fopen("scintillation.out", "w");

    // First two lines are headers. Contents are as below.
    fscanf(fp, "%s", header1); delta_t = atof(header1); // Time interval
    fscanf(fp, "%s", header2); lsb = atof(header2); // Least significant bit

    while(fscanf(fp, "%s", buffer) != EOF){
        iev = atoi(buffer); // Event number
        fscanf(fp, "%s", buffer);
        nbytes = atoi(buffer); // The number of bytes in the event

        // Read one event of data and store in wf.
        for(i = 0; i < nbytes; i++){
            fscanf(fp, "%s", buffer);
```

```

    wf[i] = atoi(buffer);
}

// Done reading one event of data.
// wf can now be analysed.

// Take the mean of the first 50 samples.
double sum = 0.0;
double zero_point = 0.0;
const int nped = 50;
for(i = 0; i < nped; i++){
    sum = sum + (double)wf[i];
}
zero_point = sum / 50.0;

// Find peaks and then calculate the net peak heights.
double min = 255.0;
for(i = 0; i < nbytes; i++){
    if(min > (double)wf[i]){
        min = wf[i];
    }
}
double peak_height = zero_point - min;

double r = (zero_point - (double)wf[200]) / peak_height;

/* The following 7 lines were used to figure out
 * why some r's were calculated to be below zero.
 * if(r < 0){
 *     printf("%f\n ", r);
 *     for(int i = 0; i < 1000; i++){
 *         printf("%d ", (unsigned char)wf[i]);
 *     }
 *     printf("\n");
 * }
 */

/* By plotting events with r smaller than zero,
```

```

* we found two causes:
* - Triggers were pulled before the trigger position.
* - Normal Cerenkov radiation,
* yet the numerator of r was calculated to be below zero
* due to the fluctuation in the zero point.
*/

/* The following if statements are to exclude such events,
* and to select events presumably caused by scintillation light.
*/

// Take the sum of output voltage amplitudes and convert to volts.
// The conversion factor is lsb V/LSB.
double sum_scintillation = 0.0;
if((zero_point > 224) && (r > 0.14)){
    for(i = 0; i < nbytes; i++){
        sum_scintillation = sum_scintillation + (zero_point - (double)wf[i]) *
lsb;
    }
    fprintf(fpout, "%f\n", sum_scintillation);
}
}
}

```

B.3 平均データ

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

char header1[40], header2[40], buffer[10];
int i, iev, nbytes, ntot;
float delta_t, lsb;
int wf[1000];
double wg[1000];

FILE* fp;
FILE* fpout;

int main(int argc, char *argv[]){
    if(argc < 2 ){
        std::cout << "./time_const input_file" << std::endl;
        return 0;
    }

    // Open the data file.
    fp = fopen(argv[1], "r");

    // Open a file to save data later.
    fpout = fopen("averaged_data.out", "w");

    // First two lines are headers. Contents are as below.
    fscanf(fp, "%s", header1); delta_t = atof(header1); // Time interval
    fscanf(fp, "%s", header2); lsb = atof(header2); // Least significant bit

    // Initialise wg to 0.0.
    for(i = 0; i < 1000; i++){
        wg[i] = 0.0;
    }

    ntot = 0;
    // Loop over the events
```

```

while(fscanf(fp, "%s", buffer) != EOF){
    iev = atoi(buffer); // Event number.
    fscanf(fp, "%s", buffer); // The number of bytes of the event
    nbytes = atoi(buffer);

    // Read one event of data and store in wf.
    for(i = 0; i < nbytes; i++){
        fscanf(fp, "%s", buffer);
        wf[i] = atoi(buffer);
    }

    // Done reading one event of data.
    // wf can now be analysed.

    // Take the mean of the first 50 samples.
    double sum = 0.0;
    double zero_point = 0.0;
    const int nped = 50;
    for(i = 0; i < nped; i++){
        sum = sum + (double)wf[i];
    }
    zero_point = sum / 50.0;

    // Find peaks and then calculate the net peak heights.
    double min = 255.0;
    for(i = 0; i < nbytes; i++){
        if(min > (double)wf[i]){
            min = (double)wf[i];
        }
    }
    double peak_height = zero_point - min;

    double r = (zero_point - (double)wf[200]) / peak_height;
    // r must be around zero in Cerenkov and greater in scintillation.

    // Take the sum of output voltage amplitudes and convert to V.
    // The conversion factor is lsb V/LSB.

```

```
if((zero_point > 223) && (r > 0.14)){
    for (i = 0; i < nbytes; i++){
        wg[i] = wg[i] + (zero_point - (double)wf[i]) * y;
    }
    ntot++;
}
}
for(i=0; i<nbytes; i++){
    fprintf(fpout, "%f ", wg[i] / (double)ntot);
}
fprintf(fpout, "\n");
}
```

B.4 フィット

```
#include <fstream.h>

using namespace std;
int analysis()y{
float x[1001],y[1001];
float xx, yy, ex, ey;

ifstream data;
data.open("convert.out");
int index=0;
while(!data.eof()){
    data>>xx>>yy>>ex>>ey;
    index++;

    x[index]=xx;
    y[index]=yy;
    cout << "index = " << index << " x = " << x[index] << " y = " << y[index] <<
endl;
    if(index >= 1000){break;}
}
data.close();

TGraph *graph = new TGraph(index, x,y);
graph -> SetTitle("Averaged and Fitted Output Voltage");
graph -> SetMinimum(-0.01);
graph -> SetMaximum(0.25);
graph -> GetXaxis() -> SetTitle("Time (ns)");
graph -> GetYaxis() -> SetTitle("Voltage (V)");
graph -> GetXaxis() -> CenterTitle();
graph -> GetYaxis() -> CenterTitle();
graph -> Draw("AP");
TF1 f1("f1","[0]*exp(-x/[1])", 0, 500);
f1.SetParameters(0.1, 100);
graph -> Fit("f1", "", "", 60, 500);
graph -> GetXaxis() -> SetRangeUser(0, 500);
}
```

参考文献

- ¹Mansfield, M. and O'sullivan, C.. *Understanding Physics*. 2nd ed. West Sussex. John Wiley & Sons, Inc.; 2011
- ²Krane, K. S.. *Introductory Nuclear Physics*. 1st ed. Canada. John Wiley & Sons, Inc.; 1988
- ³Martin, B. R. and Shaw, G.. *Particle Physics*. 3rd ed. West Sussex. John Wiley & Sons, Inc.; 2008
- ⁴Roe, B. P.. *Particle Physics at the New Millennium*. 1st ed. New York. Springer-Verlag New York, Inc.; 1996
- ⁵Society of Petroleum Engineers. Gamma Ray Logs. http://petrowiki.org/images/a/a6/Vol5_Page_0254_Image_0001.png (accessed 31 Jan 2014).
- ⁶Nave, C. R.. *Compton Scattering*. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/comptint.html> (accessed 31 January 2014).
- ⁷Anonymous. *Lecture 7: Compton Scattering*. <http://www.astro.utu.fi/~cflynn/astroII/17.html> (accessed 2 Feb 2014).
- ⁸風間洋一『相対性理論入門講義』培風館; 2009
- ⁹Cardenas, R.. *Positron: Definition, Symbol & Production*. <http://education-portal.com/academy/lesson/positron-definition-symbol-production.html#lesson> (accessed 19 Feb 2014).
- ¹⁰Leo, W. R.. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. 2nd ed. Berlin. Springer-Verlag; 1994
- ¹¹Martin, B. R.. *Nuclear and Particle Physics*. 2nd ed. West Sussex. John Wiley & Sons Ltd.; 2009.
- ¹²Frank, I. M.. *Cerenkov Radiation*. <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Cherenkov+Radiation> (accessed 2 Feb 2014).
- ¹³Anonymous. *Photomultiplier*. <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/52/Photomultipliertube.svg> (accessed 31 Jan 2014).
- ¹⁴AnaLog Services, Inc.. *A World About Optical Coupling Grease*. http://www.logwell.com/tech/servtips/optical_coupling_grease.html (accessed 12 Feb 2014).
- ¹⁵Saint-Gobain Ceramics & Plastics, Inc.. *Detector Assembly Mterials*. <http://www.crystals.saint-gobain.com/uploadedFiles/SG-Crystals/Documents/Organic%20Product%20Accessories%20Data%20Sheet.pdf> (accessed 24 Feb 2014).
- ¹⁶Furukawa Co., Ltd.. シンチレータ結晶物性比較表;. <http://www.furukawakk.co.jp/pdf/others/hikaku.pdf> (accessed 24 Feb 2014).
- ¹⁷浜松ホトニクス株式会社『光電子増倍管』浜松ホトニクス株式会社; 2007
- ¹⁸Hamamatsu Photonics K. K.. *Photomultiplier Tubes*. 3rd ed. Shizuoka. Hamamatsu Photonics K. K.; 2006
- ¹⁹The LXI Consortium. *VXI-11 and LXI*. <http://www.lxistandard.org/About/VXI-11-and-LXI.aspx> (accessed 9 Jan 2014).
- ²⁰Agilent Technologies, Inc.. *Agilent InfiniiVision 5000 Series Oscilloscopes Programmer's Guide*. http://www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/All/5000_series_prog_guide.pdf?&cc=JP&lc=jpn (accessed 17 Dec 2013).
- ²¹瓜生奈都美、福井千尋『デジタルオシロスコープによるシンチレーションカウンターの高速サンプリング読み出しの研究』; 2013
- ²²Anonymous. *12.1.4 - Caesium 137*. <http://ozradonc.wikidot.com/caesium-137> (accessed 19 Feb 2014).
- ²³Hughes, I. G. and Hase, T. P. A.. *Measurements and their Uncertainties*. 1st ed. New York.

Oxford University Press Inc.; 2010

²⁴Hamamatsu Photonics K.K. 光電面技術.

<http://www.hamamatsu.com/jp/ja/technology/innovation/photocathode/index.html> (accessed 9 Jan 2014).