

MPPC読み出しによる
無機シンチレーターを用いた γ 線検出

井上裕貴 奥野あや 日野純子

平成28年3月

概要

MPPC(Multi Pixel Photon Counter)は、低バイアス電圧で高い増倍率を誇り、優れた時間分解能を持つ小型のフォトンカウンティングデバイスであり、光電子増倍管に代わる検出器として様々な分野で期待されている。また、GAGGは発光量が大きく潮解性と自己放射性を持たない無機シンチレーターである。放射性物質を利用し、放射線を光に変換するシンチレーターと、その光を検出する受光素子から構成される γ 線検出器には様々な応用例があり、医療機器分野における典型的なものの一つがPET(Positron Emission Tomography)検査装置である。PETをはじめとして、GAGGシンチレーターとMPPCを組み合わせた γ 線検出器の特性評価とその考察を行った結果について記す。

目次

第1章	原子核崩壊から生じる γ 線とその検出	1
1.1	γ 線	1
1.2	実験に用いた γ 線源	1
1.3	光電効果	2
1.4	コンプトン効果	2
1.5	電子対生成	3
1.6	シンチレーション光	3
第2章	MPPC (Multi Pixel Photon Counter)	4
2.1	MPPC	4
2.1.1	APD	5
2.1.2	プロポーショナルモードとガイガーモード	5
2.2	MPPCの動作原理	6
2.3	仕様	7
2.4	基本接続回路	8
2.5	動作に関して留意すべき点	9
2.5.1	ダークパルス	9
2.5.2	クロストーク	9
2.5.3	アフターパルス	9
第3章	シンチレーター	10
3.1	有機シンチレーター	10
3.2	無機シンチレーター	11
第4章	エレクトロニクス	12
4.1	NIMモジュール	12
4.1.1	High Voltage	12
4.1.2	Clock generator	12
4.1.3	Attenuator	12
4.1.4	AMP	12
第5章	MPPCの動作確認	14
5.1	原理	14
5.2	セットアップ	14
5.3	実験方法	16
5.4	生データのフォーマット	17

5.5	オフライン解析	18
5.5.1	段階1：信号電荷への変換	18
5.5.2	段階2：波高分布のフィット	19
5.5.3	段階3：増倍率の算出	20
5.6	結果・考察	21
第6章	GAGGシンチレーターとの組み合わせによるγ線検出	23
6.1	セットアップ	23
6.2	実験方法	24
6.3	波高分布	24
6.4	結果・考察	25
第7章	まとめ	29
	謝辞	30
付録A	増倍率測定時に用いたデータ 収集プログラムのソースコード	31
付録B	増倍率データ解析プログラム	33
付録C	検出光子数のシミュレーション	35
	参考文献	36

目 次

1.1	^{137}Cs の壊変図	1
1.2	コンプトン散乱	2
2.1	浜松ホトニクス社製 S10362-11-050C 型 MPPC の外観	4
2.2	空乏化	5
2.3	MPPC の 1 ピクセル	6
2.4	MPPC の構造	6
2.5	1 ピクセルの光子入射後の動作サイクル	6
2.6	MPPC 外寸図	7
2.7	基本接続回路	8
2.8	ダークパルスをおシロスコープで観測した波形	9
3.1	有機シンチレーターの発光原理	10
3.2	無機シンチレーターの発光原理	11
4.1	アンプの増幅率	13
5.1	LED 点灯実験の Block Diagram	15
5.2	デジタルオシロスコープ	15
5.3	アルミシャーシ内の様子	15
5.4	恒温槽	15
5.5	NIM モジュール	15
5.6	サンプル 616、温度 25℃、逆電圧 70V、LED 点灯をトリガーした時の波形 スナップショット	17
5.7	サンプル 616、温度 25℃、逆電圧 70V の時の信号電荷の分布	19
5.8	サンプル 616、温度 25℃、逆電圧 70V の時の信号電荷の分布における個々の ピークをガウス分布でフィットしたもの	19
5.9	温度 25℃時の増倍率の印加電圧による変化	22
6.1	Block Diagram	23
6.2	上から見た図	24
6.3	アルミシャーシ内のセットアップ	24
6.4	γ 線入射時の波高分布	24
6.5	反射材のテフロンシートをかぶせた場合の想定図	25
6.6	テフロンを被せていないとき	25
6.7	テフロンを被せたとき	25
6.8	MPPC の検出効率 (浜松ホトニクス社のカタログより抜すい)	26
6.9	各ピクセルに入射した光子数のヒストグラム	28

6.10 光子を検出できたピクセル数のヒストグラム	28
-------------------------------------	----

表 目 次

2.1	MPPC の仕様	7
3.1	有機シンチレーターの例	10
3.2	無機シンチレーターの例	11
5.1	サンプル 606 の温度 25 °C 時の電圧変化による増倍率	21
5.2	サンプル 608 の温度 25 °C 時の電圧変化による増倍率	21
5.3	サンプル 616 の温度 25 °C 時の電圧変化による増倍率	21
5.4	図 5.9 における各 MPPC の近似式。p0 : 切片、p1 : 傾き	22

第1章 原子核崩壊から生じる γ 線とその検出

1.1 γ 線

γ 線は波長の極めて短い電磁波で、ある種の放射性同位元素の原子核がエネルギー準位間の遷移を起こすと放出される。波長が短いことから γ 線は2つの特徴を示す。1つ目は、粒子としての性質を強く持つことである。2つ目は、透過力が強いことである。その透過力の強さから、 γ 線は人体の深くまで到達できるため、癌の放射線治療などにも使用される。また、透過性が強い事、荷電粒子ではないことから、 γ 線は直接的に物質を電離することはほとんどないが、以下に述べるようなで示す様な過程を経ることで、物質中から電子（二次電子）をたたき出すため、この電子が物質を電離する作用を持つ。

1.2 実験に用いた γ 線源

^{137}Cs は半減期30.2年で、 ^{137}Cs は β^- 崩壊により、94%が励起状態の ^{137}Ba 、残りの6%が基底状態の同位体 ^{137}Ba へと変化する。励起状態の ^{137}Ba はエネルギー662keVの γ 線を放出して、基底状態の ^{137}Ba となる。

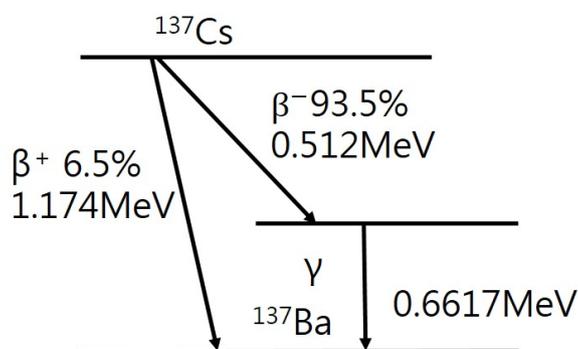


図 1.1: ^{137}Cs の壊変図

1.3 光電効果

物質に光が入射すると、その光子のエネルギーが物質中の電子に全て与えられ、その電子（光電子）が放出される現象である。このとき、光子はある一定の値 ϕ を上回るエネルギーを持つ必要があり、 ϕ の値は物質によって異なる。光電子の最大の運動エネルギーは、照射される光の振動数によってのみ決まり、単位時間当たりに飛び出す光電子の個数は、照射する光の強度による。

1 個の光子が 1 個の電子に当たり、その電子が放出される時、その電子のエネルギー E は、入射する光子のエネルギーを E_{photon} とすると

$$E = E_{\text{photon}} - \phi$$

で与えられる。

1.4 コンプトン効果

光子が束縛の緩い軌道電子や自由電子に衝突すると、その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コンプトン効果という。

プランク定数を h 、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 $h\nu_1$ とすると、前後のエネルギーの差

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

は、散乱された電子（コンプトン電子）の運動エネルギーとなる。

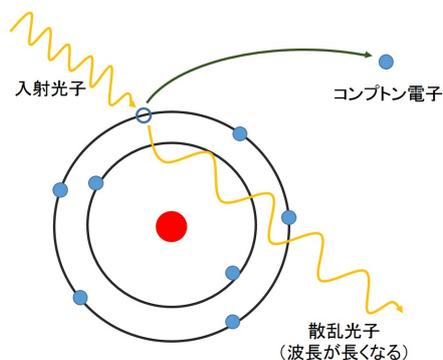


図 1.2: コンプトン散乱

1.5 電子対生成

1個の光子 (γ 線) が物質中で消えて、電子とその反粒子である陽電子が生成する過程を電子対生成という。 γ 線が原子核近傍などの電磁場が強い自由空間でないところに入射 (衝突) すると、 γ 線のエネルギー $h\nu$ が電子と陽電子に与えられるので、電子の質量を m_e として $2m_e c^2 = 1.02 \text{ MeV}$ のエネルギーが必要である。

この過程で作られた電子は、物質中を進んでいく間に次第に運動エネルギーを失い、最終的には止まってしまう。一方、陽電子は物質中に存在するの電子と対消滅する。対消滅が起こる直前には、陽電子が電子と互いに相手の周りをまわる束縛状態を作る。このような系のことをポジトロニウムという。

1.6 シンチレーション光

物質中を荷電粒子が通過すると、物質中の原子 (あるいは分子) が励起、つまり高いエネルギー状態に移る。これらの励起状態の原子は、すぐに低いエネルギー状態に移ろうとする。その際、余分になったエネルギーは光としてそして放出される。この光がシンチレーション光である。シンチレーション光を効率よく出す素材をシンチレーターと呼ぶ。本研究で用いたシンチレーターについては第3章で詳しく述べる。

第2章 MPPC (Multi Pixel Photon Counter)

2.1 MPPC

MPPCとは、Silicon Photomultiplierとも呼ばれるデバイス的一种で、Multi Pixel Photon Counterの略称である。浜松ホトニクス社が開発した光検出半導体素子であり、優れたフォトンカウンティング能力をもち、微弱光を検出する様々な用途に利用できる。特徴は100V以下の低電圧で動作し、ガイガーモードで動作するAPDピクセルを持つことにより $10^5 \sim 10^6$ におよぶ高い増幅率を持つことである。また、半導体であるため磁場の影響を受けず、個々のピクセルの静電容量が小さいため良好な時間分解能を示す。本実験で使用したMPPC（浜松ホトニクス社製S10362-11-050C型）の画像を図2.1に記す。

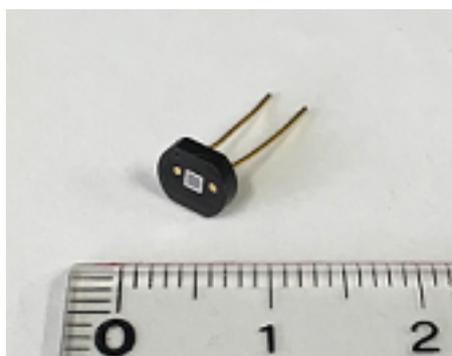


図 2.1: 浜松ホトニクス社製 S10362-11-050C 型 MPPC の外観

2.1.1 APD

APD (Avalanche Photodiode) を含め、PN 接合のダイオードでは P 層側が N 層側より低い電位になるように電圧を印加すると、電子-正孔対の電子は N 層に、正孔は P 層に集まる。このためダイオードの内部で電子または正孔のいずれのキャリアも存在しない空乏化した領域が形成され、素子内の電流が止まる。(図 2.2) この空乏層に光子が入射し、光電効果を起こして電子-正孔対が生成されると、素子内部の電位差により電子が N 層に、正孔が P 層に向かって流れて電流が発生するので、これを信号パルスとして取り出す。これがフォトダイオードの基本的な原理である。

APD では、不純物濃度や構造を工夫することにより、素子の内部に局所的に強い電場を作るようにする。すると、入射した光が光電効果を起こして生成した電子が局所的に強い電場が作られている場所を通るとき、半導体内の電子に衝突、新たな電子-正孔対を生成するに十分なエネルギーを得る。このため、電子-正孔対の連鎖的な生成が可能になる結果、電子雪崩が形成される。APD は、こうして電子雪崩を利用して信号を増幅する機能を持つフォトダイオードである。

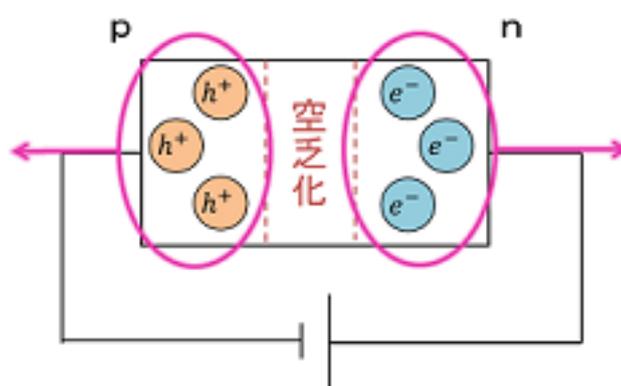


図 2.2: 空乏化

2.1.2 プロポーショナルモードとガイガーモード

APD 素子中の構造および印加電圧により、電子雪崩による増幅が数十倍か 100 倍程度であるとき、形成された電子-正孔対は素子中（あるいはピクセル中）の限定された領域に形成される。そのため素子受光面に複数の光子が入射して電子-正孔対を作ると、独立に電子雪崩が発達する。したがって、最終的な信号電荷の大きさが入射光子の数に比例する。これをプロポーショナルモードという。

一方、降伏電圧を超えた電圧のときにガイガーモードで動作する。ガイガーモードでは、形成された電子雪崩がピクセルの全面に広がり、これをガイガー放電と呼ぶ。これにより、出力される信号パルスは入射して光電効果を起こした光子数に関係なく、ほぼ一定の出力となる。したがって、信号電荷の大きさは入射光子数の情報を失っている代わりに、 10^5 倍程度に達する大きな増幅率を得ることが可能である。

2.2 MPPCの動作原理

MPPCは、個々のピクセルが独立なガイガーモードのAPDとしてはたらき、その各々にクエンチング抵抗が直列に接続されたものをピクセルの数だけ並列接続した構造をしている（図2.3および図2.4）。光子が入射したピクセルで、ガイガーモードの電子雪崩を形成し信号パルスを作る。このときの電流によるクエンチング抵抗の電圧降下によって逆バイアスが降伏電圧 V_{BR} 以下に下がり、電子雪崩が停止する。その後再充電され、逆バイアスがもともとの印加電圧 V_R まで戻ると再び入射する光子を検出可能な状態になる（図2.5）。受光部に入る粒子の数がピクセルの数より十分少ない条件下で使用すれば、信号を出したピクセルの数を検出した光子の数とみなしてよい。ガイガーモードで信号を出したピクセル1個あたり 10^5 個の電子がパルス出力されるので、ピクセルに一光子入射した信号の大きさは十分雑音から分離するのでフォトンカウンティングが可能である。このとき出力信号の電荷はとびとびの値を取るという特徴がある。

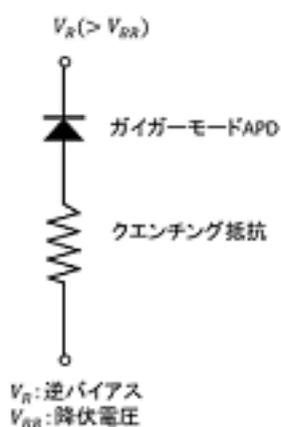


図 2.3: MPPC の1ピクセル

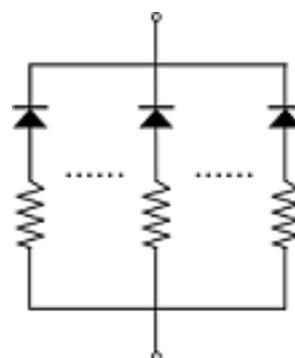


図 2.4: MPPC の構造

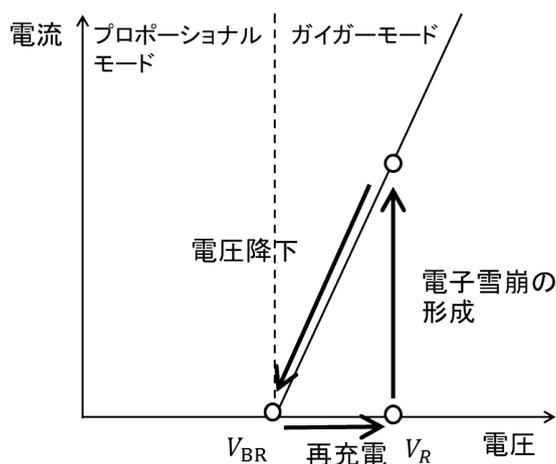


図 2.5: 1ピクセルの光子入射後の動作サイクル

2.3 仕様

今回使用した MPPC は、浜松ホトニクス社製 S10362-11-050C である。表 2.1 に仕様を、図 2.6 に外寸図を示す [1]。

表 2.1: MPPC の仕様

項目		単位
有効受光面サイズ	1 × 1	mm ²
ピクセル数	400	-
ピクセルサイズ	50 × 50	μm ²
動作温度	-20 ~ +40	°C
開口率	61.5	%
感度波長範囲	320 ~ 900	nm
最大感度波長	440	nm
検出効率	50	%
動作電圧範囲	70 ± 10	V
ダークカウント	400	kcps
端子間容量	35	pF
時間分解能	200 ~ 300	ps
逆電圧の温度計数	56	mV/°C
増倍率	7.5 × 10 ⁵	-

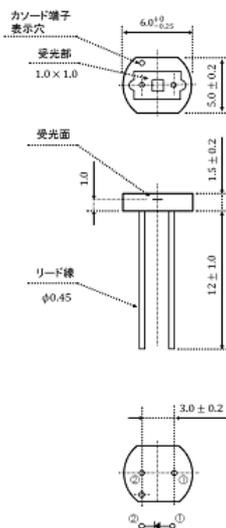


図 2.6: MPPC 外寸図

2.4 基本接続回路

MPPCの基本接続回路を図2.7に示す。この回路において、 $47\text{k}\Omega$ の抵抗と $0.1\mu\text{F}$ のコンデンサーによるローパスフィルター2段を配置して、バイアス電源のリップルやノイズを遮断する。さらに信号の読み出しは $0.47\mu\text{F}$ の結合コンデンサー接続して、バイアス電源の直流成分をカットし、AC結合で信号を読み出す。使用したコンデンサはいずれも耐圧100Vのセラミック製で、TDK社の製品である。

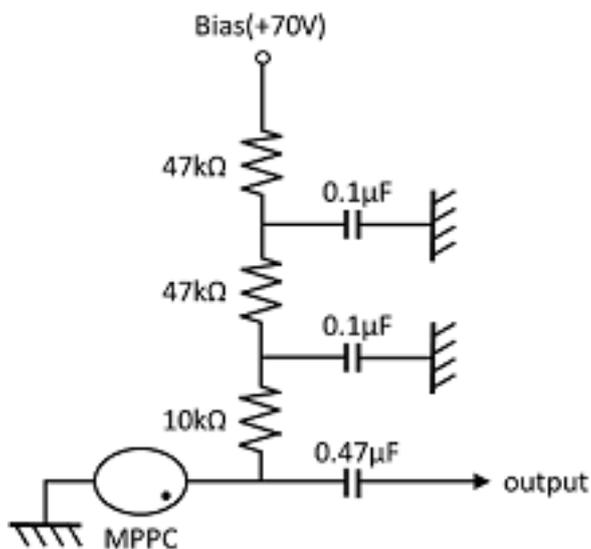


図 2.7: 基本接続回路

2.5 動作に関して留意すべき点

2.5.1 ダークパルス

MPPCでは、電子-正孔対は入射光子による光電効果だけでなく、熱励起によっても発生する。熱励起によって発生した電子-正孔対もガイガーモードによって光子が入射した場合と同様の信号パルスが形成される。これをダークパルスと呼ぶ。図 2.8 に外部からの光を遮断し、MPPCに 70V の電圧を印加し、オシロスコープによって観測された波形を示す。2.5GSample/sec のレートで光子の検出を行っている。

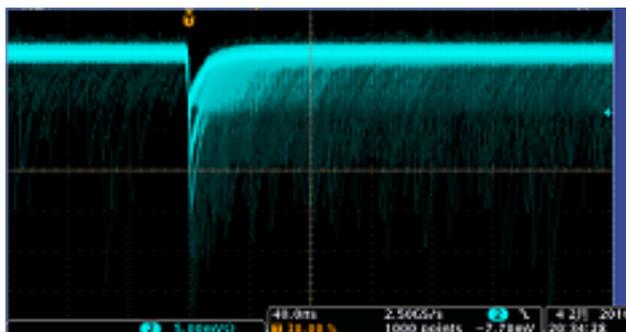


図 2.8: ダークパルスをオシロスコープで観測した波形

2.5.2 クロストーク

APD ピクセルにおいて、電子雪崩の過程で二次的な光子が放出される。放出された光子が別のピクセルで光電効果を起こし、信号パルスを出力することがある。光電効果を起こした二次光子が一つなら、まるで2つの光子が同時に2つのピクセルに入射したかのように、2倍の波高が検出される。それより確率は下がるが2つの二次光子が他のピクセルで相互作用したときは3倍の波高になる。こうして、信号を出力したピクセルの数が実際に検出した光子数より大きくなることがある。この現象をクロストークと呼ぶ。

2.5.3 アフターパルス

APD ピクセル内で電子雪崩を生成した際に、発生した電子の一部が半導体内の格子欠陥にトラップし、遅れて解放されて電子雪崩を作ってパルスを出す。これをアフターパルスと呼ぶ。温度が低くなるにつれ電子が格子欠陥にトラップされる確率が高くなり、アフターパルスの発生頻度は増加すると考えられている。

第3章 シンチレーター

シンチレーターとは、その内部で入射した粒子がエネルギー損失を起こしたとき、それにより蛍光を発する物質のことである。シンチレーターには、大別して有機シンチレーターと無機シンチレーターの2種が存在し、それぞれの発光の仕組みは大きく異なっている。本研究では、MeV程度の γ 線を検出する目的に向く無機シンチレーターを用いた。

3.1 有機シンチレーター

有機シンチレーターは、 π 電子を持つ有機分子の状態遷移を発光の源とするものが大多数である。図3.1は有機分子中の π 電子エネルギー準位図である。Sは電子のスピンが0のシングレット状態、Tはスピンが1のトリプレット状態であり、添字の0は基底準位、1,2,3,...は励起準化を表し、実線はその最低の準位を表す。入射した放射線により基底準位(S0)にある有機分子がそれぞれの励起準位(S1,S2,S3)に励起され、全ての励起準位から第1励起状態(S1)の最低準位に非常に短い時間で遷移する。そして、基底状態(S0)に遷移して蛍光が発する。蛍光減衰時間が比較的に短いため、良好な時間分解能を得ることができる。表3.1に有機シンチレーターの例をあげる。[2]

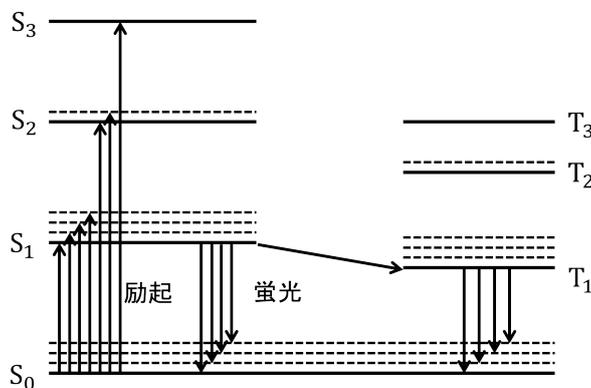


図 3.1: 有機シンチレーターの発光原理

表 3.1: 有機シンチレーターの例

	Anthracene	Plastic(NE 102A)	Liquid(NE213)
密度 [g/cm ³]	1.25	1.32	0.87
屈折率	1.62	1.58	1.51
蛍光減衰時間 [ns]	32	2.4	3.7
発光波長 [nm]	447	423	425

3.2 無機シンチレーター

図 3.2 に示すように、入射した放射線のエネルギー損失により励起した結晶中の電子が脱励起する際に光子を放出する。この過程をシンチレーションと呼ぶ。無機シンチレーターは有機シンチレーターに比べ、原子番号の大きな元素を含んで密度の高いものが多いため、 γ 線の検出効率を高くできる。また、発光量が豊富なものも多く、高いエネルギー分解能を実現可能であるという利点がある。一方、無機シンチレーターは一般的に有機シンチレーターに比べ、蛍光減衰時間が長く、時間応答性が悪くなるため高速の測定に不向きであるというデメリットがある。温度が上昇すると、熱エネルギーが増加するため励起状態の分布が空間的、エネルギー的に広がる。これにより、励起された電子が基底状態に戻る時間が短くなるので、蛍光減衰時間が短くなるものも多い。表 3.2 に無機シンチレーターの例を挙げる。[3] 本実験では以下に挙げる 5mm × 5mm 角のシンチレーター GAGG を用いた。LSO や LYSO、LuAG といった無機シンチレーターはルテチウム (Lu) を含む。Lu は放射性同位元素の存在比が高く、シンチレーター中にバックグラウンド源を含有することになってしまう。そこで、Lu を使わない酸化物シンチレーターとして Gd、Ga、Al の酸化物を宿主物質とし、発光する添加物として Ce をドーピングした GAGG が開発された。

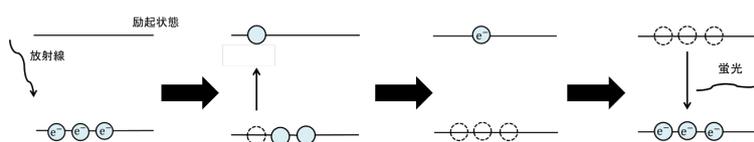


図 3.2: 無機シンチレーターの発光原理

表 3.2: 無機シンチレーターの例

	GAGG	LSO	BSO
密度 [g/cm ³]	6.63	7.40	6.80
発光量 [photon/MeV]	60000	26000	900
蛍光減衰時間 [ns]	88	40	100
発光波長 [nm]	520	420	480

第4章 エレクトロニクス

本実験において、MPPCへの逆バイアス電圧印加、トリガー論理信号の生成にはNIM規格のエレクトロニクスを使用した。それについて、本章で記す。

4.1 NIMモジュール

NIMモジュールとはNuclear Instrument Modulesの略称である。1960年代に米国原子力委員会(AEC)において制定された「放射線測定モジュール標準規格 TID-20893」のことをNIM規格と言い、それに準拠して製作されたモジュールのことをNIMモジュールという。この規格を適用したものであれば、国やメーカーやによらず物理的、電氣的に完全な互換性を持つ。このNIMモジュールを装着する箱状の標準ビンのことをNIMビンといい、NIMビン電源は装着したNIMモジュールに電源を供給する。

4.1.1 High Voltage

High Voltageは高電圧を印加する電源モジュールである。本実験においては、半導体検出器向けの最大+100Vまで出力できるサトウ電子工業製のものを使用した。

4.1.2 Clock generator

Clock generatorは、出力パルス幅を可変でき、Fast NIM信号とTTL信号を出力するモジュールである。本実験においては、LEDのパルスを点灯する際に使用した。

4.1.3 Attenuator

Attenuatorは、入力信号を減衰させるモジュールである。本実験においては、アンプの増幅率を測定する際に使用した。

4.1.4 AMP

AMPは、光電子増倍管やMPPCのように応答が速い光検出器の入力信号を線形増幅するモジュールである。本実験において、MPPCは増倍率が十分に高いため光電子増倍管の入力信号を線形増幅する既製のPM AMPを用いて目的を達成する。AMPの増幅率はClock generatorを接続したときの、AMP使用時と未使用時のオシロスコープ画面の比較により求めた。

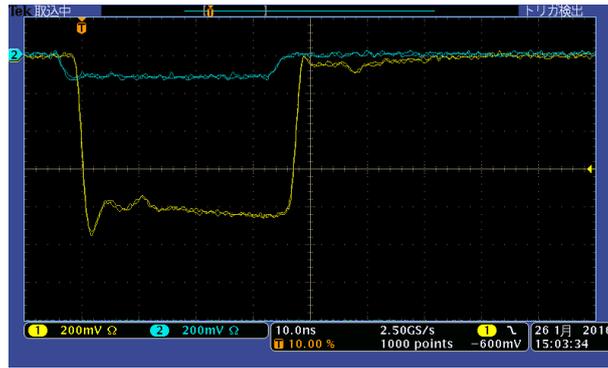


図 4.1: アンプの増幅率

図 4.1 のように、100 番目までのデータをそれぞれ基準面とし、基準面からのパルスの高さが AMP 使用時は平均 80.3 であるのに対し、AMP 未使用時は平均 8.8 であることから

$$80.3 \div 8.8 = 9.1$$

となり、AMP の増幅率を 9.1 と求めた。

第5章 MPPCの動作確認

MPPCの動作確認のために3つのサンプルについて、それぞれの増倍率を測定した。十分に減光したLEDのパルスから1パルス当たり数個の光子がMPPCの受光部に届く状態にし、MPPCの出力波高分布を得ることにより測定した。信号の数値化にはデジタルオシロスコープを使用した。

5.1 原理

増倍率は、1ピクセルあたり1フォトンの信号を検知した時の電荷量を、1電子あたりの電荷量で割った値である。MPPCの出力パルスは検出した光子の数に応じて離散的な波高になるため、1フォトン検出時の信号の電荷量は隣り合う2つの波高分布のピークの差から求められる。つまり、

$$\text{増倍率} = \frac{\text{2つのピークの電荷量の差}}{\text{1電子あたりの電荷量}} \quad (5.1)$$

で求まる。MPPCには温度特性がある。温度が上がると結晶の格子振動が激しくなり、光電効果で発生したキャリアのエネルギーが十分大きくなならないうちに、結晶中のフォノンと衝突する確率が高まる。これが、電子雪崩の発生と発達を抑制する向きにはたらくため、同じ逆電圧では高温になると増倍率が小さくなる。一定の温度なら、逆電圧を大きくすれば増倍率は大きくなる。したがって、一定の増倍率で動作させるためには、素子の温度を一定に保つ必要がある。

5.2 セットアップ

図5.1にLED点灯実験のBlock Diagram、図5.2から図5.5に実験に使用したハードウェアを示す。

LED回路とMPPC回路はアルミシャーシの中に設置し、アルミシャーシは恒温槽に入れて温度を一定に保つ。2つの回路の間には、LEDを点灯させるためにClock generatorから送ったパルスがMPPCの読み出し系に対して雑音とならないよう、両社の間を静電遮蔽するために段ボール表面にアルミテープを貼った壁を置き、LEDの光がMPPCに届くように壁に2mm程度の穴を開けた。LED回路はClock generatorとLEDの間に直列に100Ωの抵抗を入れ、TTLパルスを送ってLEDをパルス点灯させた。MPPCの逆バイアス電圧印加と信号読み出しには、図2.7基本接続回路を使用した。

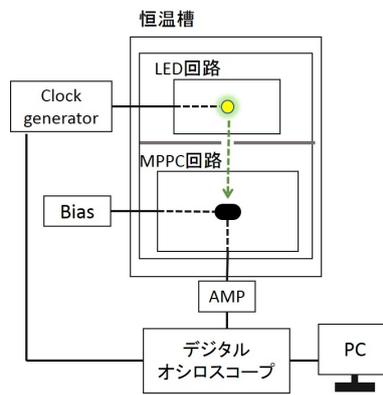


図 5.1: LED 点灯実験の Block Diagram



図 5.2: デジタルオシロスコープ



図 5.3: アルミシャーシ内の様子



図 5.4: 恒温槽



図 5.5: NIM モジュール

- PC 環境： CPU:AMD Athlon(tm) X2 220 processor OS:Linux
- LED：日亜化学工業株式会社製 NSPB320BS
- デジタルオシロスコープ：Tektronix 製 DPO 3034 Digital Phosphor Oscilloscope
- 恒温槽：日本ブローア株式会社製 LS-5 バイオチェンバー
- Bias：サトウ電子工業製 HV-07WS Dual High Voltage Power Supply
- Clock generator：株式会社テクノランドコーポレーション製 N-TM 203 100MHz Clock Generator
- AMP：株式会社海津製作所 KM2107 12ch PMT AMP

5.3 実験方法

Clock generator から LED 回路に周波数 10Hz で TTL パルスを送ることで LED を点灯させる。LED に拡散キャップをつけて光を拡散させ、薄い青と白の紙製の箱を LED 全体を覆うように被せることで十分に減光した。また、段ボールにアルミテープを張り 2 mm 程度の穴を開けた仕切りを作成し、LED 回路と MPPC 回路の間に置いて更に光量を絞る。アルミボックス、LED 回路、MPPC 回路、仕切りは一点接地して静電遮蔽した。

デジタルオシロスコープは LAN インターフェイスを装備しており、これを介して PC との命令やデータの送受信が可能である。LXI と呼ばれる通信プロトコルに基づいてコマンドやデータの送受信を行なうソフトウェアパッケージとして VXI11 がある。VXI11 がサポートする関数をコールするデータ収集用プログラムを作成、実行することで、デジタルオシロスコープよりダイナミックレンジ 8bit、最大サンプリング周波数 2.5GHz の波形データを取得できる。このデータをテキスト形式で PC のディスク上のファイルに生データとして書き出して、オフライン解析処理を進める。データ収集用プログラムのソースコードの一例を付録 A に示す。

MPPC は温度を 25 °C に保ち、逆電圧を 70V から 0.5V 刻みで 71.5V まで変化させて増倍率の変化を測定した。

5.4 生データのフォーマット

以下に、例として製造番号 616 の MPPC サンプル（以後サンプル 616 と略記）を、温度 25℃、逆電圧 70V の条件で動作させた際の生データの一例、図 5.6 にオシロスコープ画面上のスナップショットを示す。

```
4.000e-10
0 1000 73 75 73 76 75 73 72 69 70 72 73 73 73 76 73 72 77 77 78 76 73 76 70 71 72 73 76 75 77 74 72 73
70 74 74 74 75 73 74 70 70 73 71 75 77 78 82 78 79 76 75 76 73 76 76 79 74 77 76 74 78 75 76 75 75 77
73 76 75 74 76 73 76 74 76 78 74 77 77 73 75 70 71 69 70 72 71 75 74 72 76 73 74 74 78 77 71 74 74 74 76
74 77 75 74 75 73 74 74 74 74 74 78 76 73 73 70 72 72 73 77 74 77 77 76 78 76 77 73 72 75 71 73 71 73 74
71 72 70 70 74 71 76 77 75 77 74 79 79 77 79 77 77 73 73 74 71 77 74 73 74 71 72 73 74 77 74 75 ...

1 1000 78 77 77 75 75 75 73 76 77 73 76 75 76 72 71 73 73 76 76 78 74 75 73 71 75 73 74 72 72 76 71
72 73 73 76 72 75 71 69 74 74 79 77 77 79 77 79 77 76 79 74 78 77 74 75 73 75 74 76 78 74 74 72 72 78 74
80 78 78 78 72 75 73 72 76 75 77 77 75 76 74 76 75 75 77 76 78 75 73 76 73 75 76 78 79 75 79 79 78 77 73
77 75 74 78 74 77 76 75 77 72 72 74 77 78 72 74 73 74 75 72 74 74 75 77 75 77 75 79 74 77 77 77 75 70
71 71 70 74 70 71 71 74 77 75 74 75 77 80 76 78 75 72 74 70 73 73 74 73 66 71 70 71 78 76 80 78 ...

2 1000 72 73 75 75 73 77 75 77 74 71 78 75 77 76 74 75 74 75 74 72 78 74 75 76 76 78 76 77 76 75 75 73
75 77 73 76 76 79 77 72 76 76 76 76 77 77 74 74 76 71 72 73 76 76 75 77 75 76 74 71 76 73 74 74 73 74 74
77 77 74 75 72 74 76 75 79 75 78 79 75 78 75 75 73 71 74 73 76 78 77 79 75 76 76 75 77 71 73 74 70 74 72
74 73 73 74 70 74 78 76 79 76 76 77 75 79 75 75 72 74 73 76 75 75 79 76 77 77 74 75 73 75 76 73 78 77
78 75 73 77 73 71 73 72 76 75 78 78 77 79 78 76 76 78 72 72 73 70 75 74 77 78 75 78 76 77 77 ...
```

- 1行目は、ラン開始レコード (begin run record) にあたり、デジタルオシロスコープが 2.50GSample/s、すなわち時間間隔が

$$\frac{1\text{s}}{2.50\text{GSample}} = 0.4\text{ns} \quad (5.2)$$

で収集されたデータであることを示す。

- 2行目は、最初のイベントレコード (event record) で、イベント番号、サンプリング数を表し、そのあと 8bit のデータが 1000 個分続く。
- その後、イベントレコードがファイルの末尾まで繰り返される。

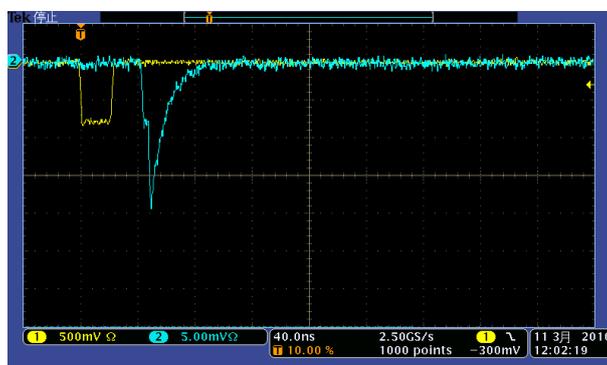


図 5.6: サンプル 616、温度 25℃、逆電圧 70V、LED 点灯をトリガーした時の波形スナップショット

5.5 オフライン解析

5.5.1 段階 1 : 信号電荷への変換

5.4 で得た生データを、付録 B 増倍率データ解析用プログラムで処理をする。以下に、例として MPPC サンプル 616、温度 25 °C、逆電圧 70V の時の生データを、プログラムで処理したデータを示す。

0	69.220000	5.371600	70.220000	4740.800000
1	69.590000	5.261900	160.590000	6241.100000
2	69.550000	5.727500	32.550000	743.500000
3	69.650000	5.487500	28.650000	794.500000
4	69.200000	4.980000	38.200000	1395.000000
5	64.580000	93.603600	117.580000	5774.200000
6	69.310000	5.333900	6.310000	-41.100000
7	69.490000	5.449900	79.490000	4212.100000
8	68.970000	4.349100	84.970000	3552.300000
9	69.560000	5.646400	111.560000	5433.400000
10	69.640000	6.510400	152.640000	8645.600000
...				

- 1 列目は、イベント番号を示す。
- 2 列目は、ゼロ点の値を示す。ここでゼロ点は、trigger position を左から 10 %、つまり 100 番目に設定しているため、100 番目までの平均と定義する。

$$\text{ゼロ点} = \frac{\sum_{i=1}^{100} x_i}{100} \quad (5.3)$$

ここで、 i はサンプリング数、 x_i は i 番目のデータである。

- 3 列目は、ゼロ点の分散を示す。

$$\text{分散} = \frac{\sum_{i=1}^{100} (\text{ゼロ点} - x_i)^2}{100} \quad (5.4)$$

trigger position より前でパルスが出ている時は分散が大きくなるため、指標として分散を計算する。

- 4 列目は、ゼロ点からピークまでのパルス高を示す。
- 5 列目は、信号パルスの積分値（信号電荷）を示す。積分値は、信号パルスが出ていると思われる 110 番目から 300 番目のデータを、ゼロ点からそれぞれ引いたものを積算する。

$$\text{積分値} = \sum_{i=110}^{300} (\text{ゼロ点} - x_i) \quad (5.5)$$

5.5.2 段階 2 : 波高分布のフィット

1. 段階 1 で得た信号電荷、すなわち波高データを読み込み、得た分布の一例を図 5.7 に示す。検出した光電子の個数 (photoelectron=p.e.) に応じて等間隔にピークが立つ分布を示す。
2. 各 p.e. ピークの中央値を Maximum Likelihood 法によりガウス分布でフィットして求める。(図 5.8)
3. 隣り合う 2 つのピークの間隔の平均と分散を求める。

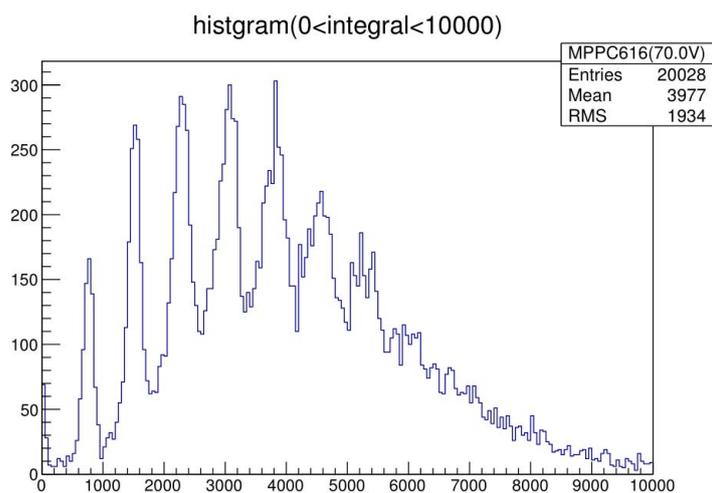


図 5.7: サンプル 616、温度 25 °C、逆電圧 70V の時の信号電荷の分布

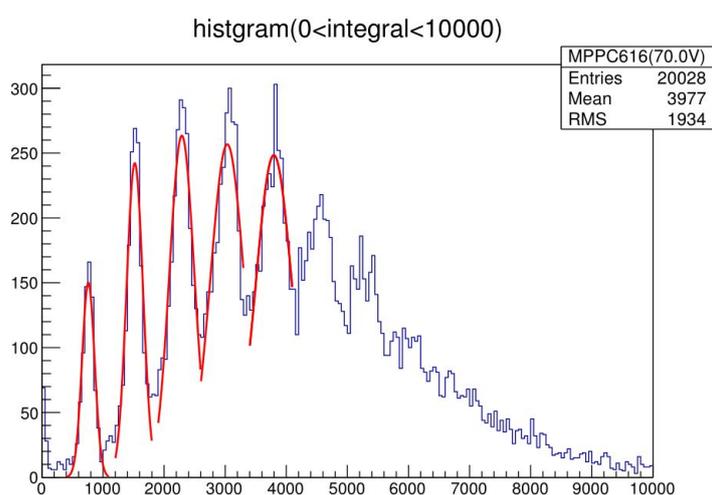


図 5.8: サンプル 616、温度 25 °C、逆電圧 70V の時の信号電荷の分布における個々のピークをガウス分布でフィットしたもの

5.5.3 段階3：増倍率の算出

式 (5.1) より MPPC の増倍率を求める。ここで、

$$\text{2つのピークの電荷量の差} = \frac{\text{2つのピークの間隔の平均} \times \text{LSB 電圧} \times \text{データの時間間隔}}{\text{デジタルオシロスコープの抵抗値} \times \text{アンプの増倍率}} \quad (5.6)$$

$$\text{LSB 電圧} = \frac{\text{1div 当たりの電圧} \times 8[\text{div}]}{2^8} \quad (5.7)$$

$$\text{データの時間間隔} = 0.4[\text{ns}] \quad (5.8)$$

$$\text{アンプの増幅率} = 9.1 \quad (5.9)$$

$$\text{デジタルオシロスコープの抵抗値} = 50[\Omega] \quad (5.10)$$

$$\text{1 電子当たりの電荷量} = 1.602 \times 10^{19}[\text{C}] \quad (5.11)$$

である。これらの値を式 (5.1) に代入することにより、電圧変化による MPPC の増倍率を計算する。

5.6 結果・考察

温度を 25 °C に保った恒温槽において、製造番号 606,608,616 の 3 つの MPPC サンプルについて、逆電圧を 70.0V から 71.5V まで 0.5V 刻みで変化させて測定した結果を以下に示す。表 5.1~表 5.3 に波高分布のフィットの結果より求めた平均ピーク間隔と、5.5.3 より求めた増倍率を示す。図 5.9 に横軸に印加電圧、縦軸に増倍率をとったグラフを示す。

表 5.1: サンプル 606 の温度 25 °C 時の電圧変化による増倍率

HV[V]	70.0	70.5	71.0	71.5
平均ピーク間隔	853.2 ± 7.2	1072.2 ± 12.3	1387.2 ± 11.5	1418.2 ± 18.1
増倍率 (× 10 ⁵)	7.3 ± 0.2	9.2 ± 0.1	11.9 ± 0.9	12.2 ± 0.6

表 5.2: サンプル 608 の温度 25 °C 時の電圧変化による増倍率

HV[V]	70.0	70.5	71.0	71.5
平均ピーク間隔	818.6 ± 5.3	986.2 ± 7.8	1249.6 ± 12.3	1294.6 ± 16.0
増倍率 (× 10 ⁵)	7.0 ± 0.2	8.5 ± 0.1	10.7 ± 0.7	11.1 ± 0.4

表 5.3: サンプル 616 の温度 25 °C 時の電圧変化による増倍率

HV[V]	70.0	70.5	71.0	71.5
平均ピーク間隔	748.9 ± 4.0	1021.5 ± 9.1	1270.0 ± 13.5	1355.3 ± 7.4
増倍率 (× 10 ⁵)	6.5 ± 0.3	8.8 ± 0.2	10.9 ± 0.6	11.6 ± 0.5

Multiplication Factor

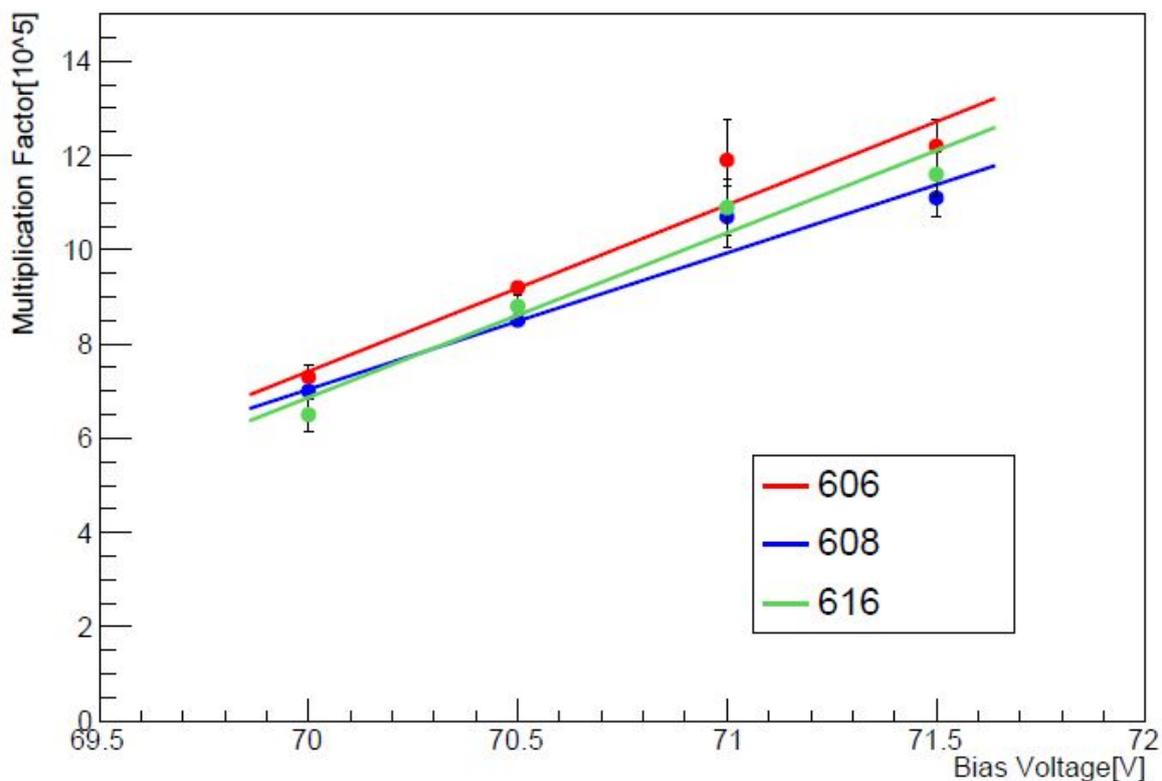


図 5.9: 温度 25 °C 時の増倍率の印加電圧による変化

表 5.4: 図 5.9 における各 MPPC の近似式。p0 : 切片、p1 : 傾き

サンプル	χ_2/ndf	p0	p1
606	1.152/2	$(-236.06 \pm 48.03) \times 10^5$	$(3.48 \pm 0.68) \times 10^5$
608	0.615/2	$(-195.85 \pm 35.09) \times 10^5$	$(2.90 \pm 0.50) \times 10^5$
616	0.712/2	$(-236.76 \pm 37.76) \times 10^5$	$(3.48 \pm 0.53) \times 10^5$

図 5.9 より、同じ電圧を印加したときの 3 つの MPPC の増倍率個体差は大きくても相対値で 10 % 程度であることがわかった。印加電圧による増倍率の変化は、測定した 3 つのサンプルについては誤差の範囲で一致した。

第6章 GAGGシンチレーターとの組み 合わせによる γ 線検出

^{137}Cs 線源を用いて、GAGG シンチレーターを光学グリースを用いて MPPC 受光部に
とりつけ、 ^{137}Cs が発する 662keV の γ 線を検出する実験を行った。

6.1 セットアップ

下記に本実験のセットアップを示す。Bias 電源、MPPC が出力する信号の読み出しは前
章で説明したものと同一である。ただし、LED 点灯時には LED を光らせる Clock generator
でデジタルオシロスコープをトリガーしていたが、この測定では MPPC が出力する信号
でトリガーするセルフトリガーのセットアップで行った点が異なる。線源が発する γ 線が
シンチレーターに届くよう、アルミシャーシ天板の対応する位置に直径 6mm の穴をあけ
た。図 6.2 はアルミシャーシを上から見た写真であり、図 6.3 はアルミシャーシ内のセッ
トアップである。これらを恒温槽内に入れ、温度を 25℃ に保って測定した。

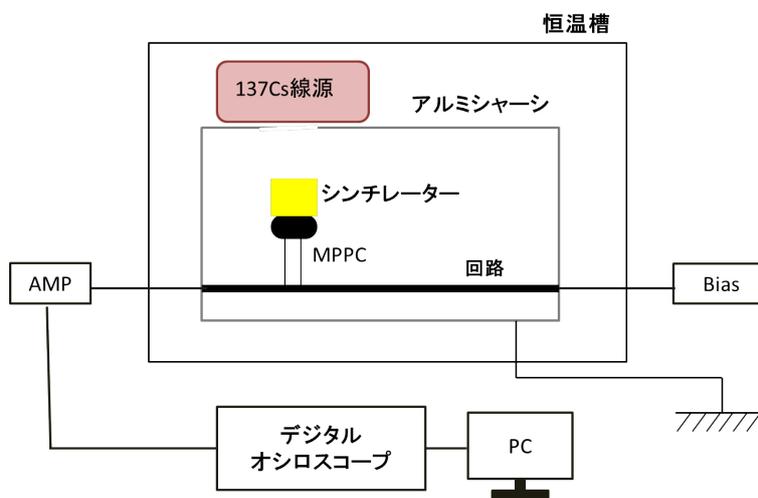


図 6.1: Block Diagram



図 6.2: 上から見た図

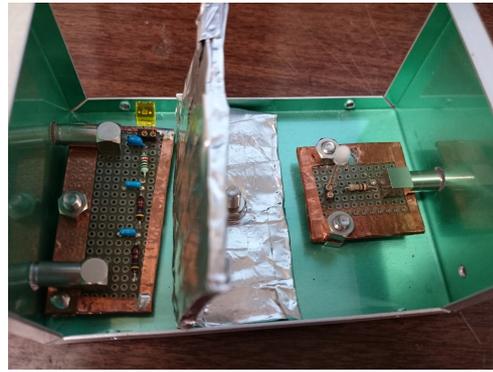


図 6.3: アルミシャーシ内のセットアップ

6.2 実験方法

前小節で説明したセットアップを用いて、MPPCサンプル616を使用し、逆電圧は70.0V、恒温槽で25℃に保った。信号電荷すなわち波高を求める際に、トリガー位置は波形データ1000点中の100番目付近にしていることと、GAGGシンチレーターの発光減衰時間が約90nsであるので、パルス終了までの時間がダークパルスやLED点灯時より遅いことを考慮して、積分するデータサンプルを波形データの終端である1000番目までとり入れた。

6.3 波高分布

^{137}Cs 線源の有無に対応して、出力信号パルスの有無をオシロスコープで確認した上で、 ^{137}Cs 線源の γ 線が入射した時の波高分布を図6.4に示す。

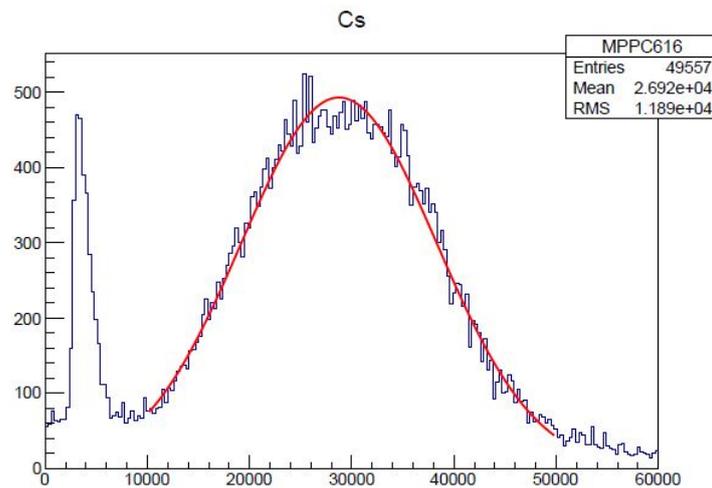


図 6.4: γ 線入射時の波高分布

波高分布の主成分はガウス分布に近い形をしている。そこでこの分布のピークをガウス分布でフィットして平均値を求めると 2.88×10^4 となっていた。LED点灯により求めた

単一光電子検出時の波高をこのデータとオシロスコープの使用レンジの違いを考慮して換算した値 3.80×10^2 と比較すると

$$\frac{2.88 \times 10^4}{3.80 \times 10^2} = 75.8$$

となり、平均約 76 個の光子が検出できたということになる。

6.4 結果・考察

前小節で得た結果をさらに吟味・考察するために行った追加測定と見積もりについて述べる。

ここまでの測定ではシンチレーターを裸の状態でも PPC にとりつけていた。この場合、シンチレーション光のうち PPC 受光部以外へ向かったものはそのまま外部へ逃げて検出されない可能性がある。そこで、反射材のテフロンシートでシンチレーターを包み、シンチレーションが反射してから PPC の受光面に届く寄与を検討することにした。図 6.5 にこの際の想定図をあげる。

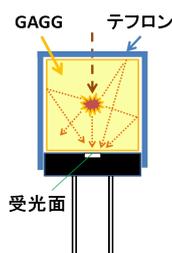


図 6.5: 反射材のテフロンシートをかぶせた場合の想定図

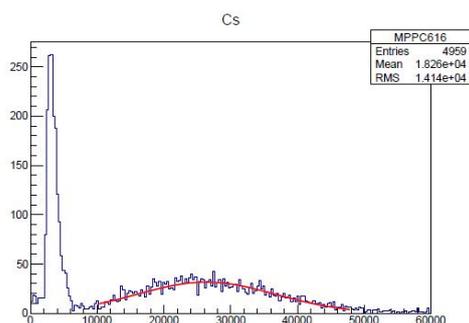


図 6.6: テフロンを被せていないとき

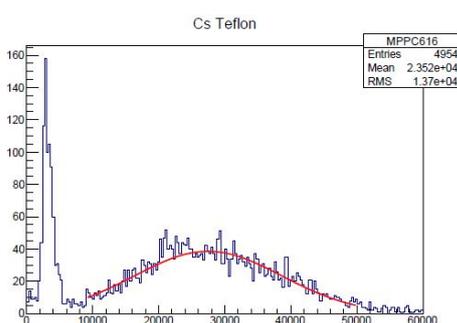


図 6.7: テフロンを被せたとき

結果の波高分布を、図 6.6 と図 6.7 に示す。波高分布のピークをガウス分布でフィットした平均値を比較すると、テフロンを被せていないとき 2.63×10^4 に対して、テフロンを被せたとき 2.75×10^4 であり、検出できる光子は平均して約 3 個の変化しかみられなかつ

た。そこで、直接 MPPC の受光面に向かったシンチレーション光子の数を検討するため、以下のようにモンテカルロシミュレーションを行った。

5mm 角のシンチレーターの中央で光電効果を起こしたと仮定し、この点に対し MPPC の受光面が占める立体角 ω は

$$\text{立体角} = \frac{\text{受光面積}}{\text{距離}^2}$$

で表され、受光面積は 1mm^2 、距離は 2.5mm である。

MPPC の検出効率、開口率 (ピクセルの境界付近など不感部分をのぞいた割合) 61.5% と量子効率および電子雪崩形成確率の積で決まり、それを図 6.8 に示す。(検出効率にはクロストークとアフターパルスによる影響が含まれている) これによると、GAGG の発光波長 $520[\text{nm}]$ のとき光子検出効率は 40% である。[1]

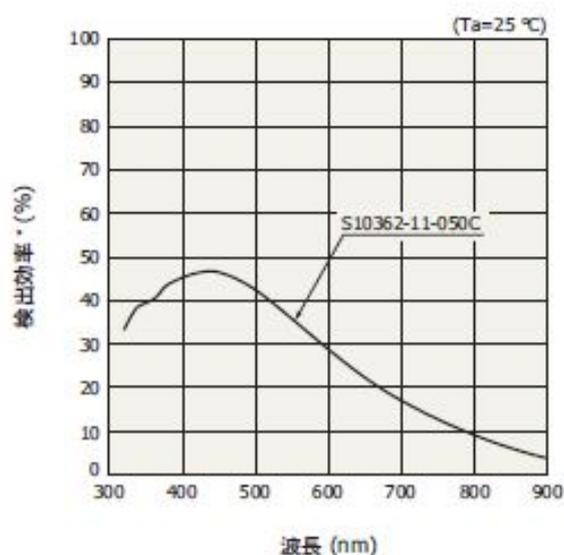


図 6.8: MPPC の検出効率 (浜松ホトニクス社のカタログより抜すい)

すると、全立体角が $4\pi[\text{sr}]$ であるので、受光部に届いて検出される光子の割合は

$$\frac{\omega}{4\pi} \varepsilon_{det} = \frac{1}{2.5^2} \times \frac{1}{4\pi} \times 0.40 = 0.0051$$

と見積もられる。

シンチレーター GAGG の発光量は、製造者である古河機械金属の仕様表（表 3.2 参照）によれば 60,000[photon/MeV] である。 ^{137}Cs の γ 線エネルギー 0.662MeV がすべてシンチレーター内で失われたと仮定すると MPPC で検出される光子の期待値は、

$$60,000[\text{photon/MeV}] \times 0.662[\text{MeV}] \times 0.51[\%]=202[\text{photons}]$$

と見積もられる。ここで、MPPC は同じピクセルに 2 個以上の光子が入った場合には 1 個の光子が入った時と同じ信号が出ることとを考慮し、MPPC によって検出できる光子数のシミュレーションを以下のようなアルゴリズムで行った。

検出される光子数の期待値が 202 であるから、個々の事象では $\pm\sqrt{202}$ 個の標準偏差を持つガウス分布するものとした。表 2.1 にあるように本実験で用いた MPPC は 400 のピクセルを持つため、光子は 400 のピクセルに一様分布で入射し、同一ピクセルに複数個の光子が入ったときはそれを 1 光子とカウントした。

図 6.9 には各ピクセルに入射した光子数の分布、図 6.10 は光子を検出したピクセル数の分布を示す。

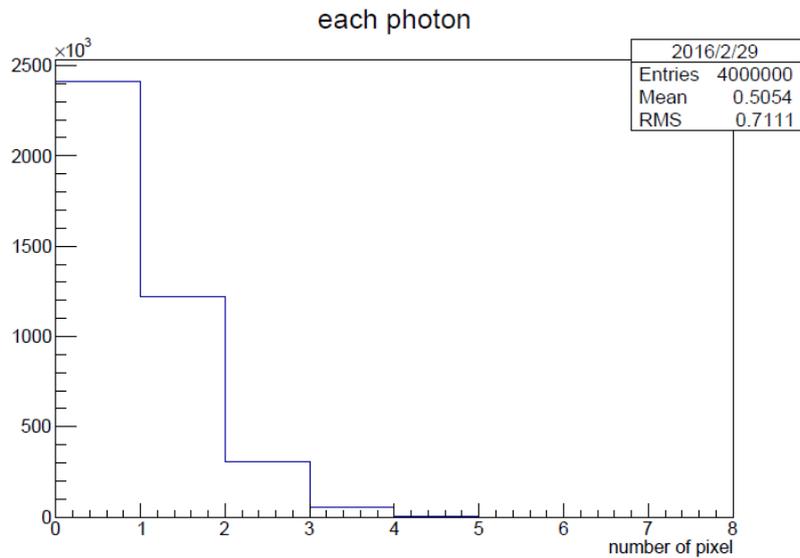


図 6.9: 各ピクセルに入射した光子数のヒストグラム

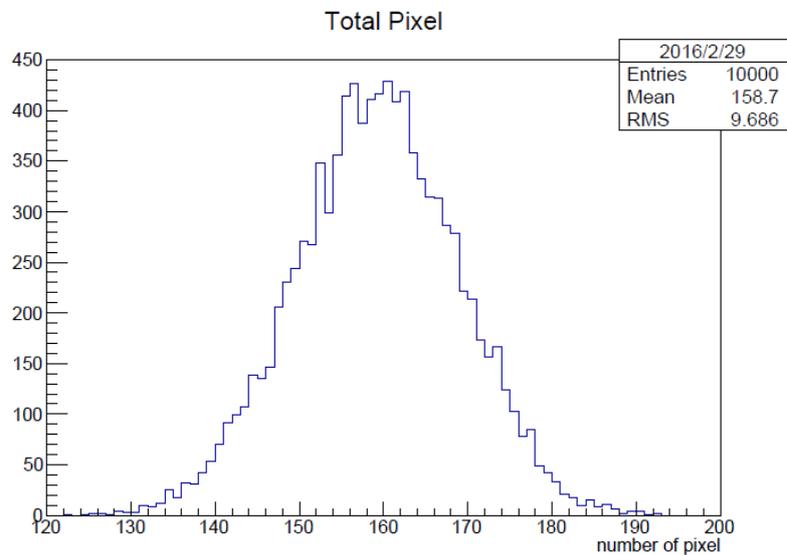


図 6.10: 光子を検出できたピクセル数のヒストグラム

これらにより、平均 202 個の光子が MPPC の有感領域に達するが、同一ピクセルに複数個の光子が入る場合があるため、結果として、平均して 159 個程度の光子が検出されるという見積もりになる。これは実際に実験データから得た 76 個と比較すると

$$76 \div 159 = 0.477$$

となり、実験値は期待値の 48 % 程度であるという結論に達する。この約 2 倍の減少が生じている理由は現時点では未解明である。

第7章 まとめ

LED 点灯を MPPC で受け、波高分布からその増倍率を測定し、 10^5 オーダーの増倍率を示し、フォトンカウンティング能力を持つことを確認した。GAGG シンチレーターと組み合わせて、 ^{137}Cs が発する 662keV の γ 線を検出できることを確認した。ただし、シンチレーター内で 662keV の全てが失われ、発生したシンチレーション光のうち MPPC 受光部に直接入ったもののみが検出されるという仮定に基づいた期待値と比べ、実験データから得た測定値は半分程度であった。この約 2 倍の減少が生じている理由は現時点では未解明である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、始終ご指導ご鞭撻を頂きました指導教官の宮林謙吉先生に心より感謝いたします。また、たくさんのアドバイスを頂きました林井久樹先生、下村真弥先生に深く感謝いたします。そして、たびたびご助言、ご協力いただいた先輩方、1年間高エネルギー物理学研究室で共に研究を進めてきた同回生にも大変お世話になりありがとうございました。

たくさんの方々のご支援とご協力により、卒業論文を完成させることができました。皆様へ心から感謝の気持ちと御礼を申し上げたく、謝辞にかえさせていただきます。

付録A 増倍率測定時に用いたデータ 収集プログラムのソースコード

```
//header file
#include <unistd.h>
#include <stdio.h>
#include "vxi11_user.h"

int main(int argc , char *argv[]){

    FILE *fp;
    fp=fopen("Cs03032.txt", "w");

    int nevt = 5000;//event number
    CLINK *clink;
    clink = new CLINK;
    static char* serverIP = "10.0.1.108";

    int A;

    //-- open scope
    if (vxi11_open_device(serverIP , clink) != 0){
        printf ("Couldn 't open scope.\n");
        exit(1);
    }
    //-- buffer to receive data block.
    static char wf1[10000],wf2[10000];
    char buffer[40];

    int ret;
    ret = vxi11_send(clink , "DAT:SOU CH2");//Digitize ch=2 signal.
    ret = vxi11_send(clink , "HOR:SCA 40E-09"); //Horizontal 40 ns/div
    ret = vxi11_send(clink , "CH2:SCA 10E-03");//ch=2 vertical 10mV/div
    ret = vxi11_send(clink , "TRIG:A:EDGE:SOU CH2");//triger type = edge.ch=2
    ret = vxi11_send(clink , "TRIG:A:EDGE:SLO FALL");//slope control=fall
    ret = vxi11_send(clink , "TRIG:A:LEV:CH2 -37.6E-03");//triger level = -37.6mV
    ret = vxi11_send(clink , "TRIG:A:MODE NORM");//trigered data get
    ret = vxi11_send(clink , "CH1:POS 3.0"); //vertical position
    ret = vxi11_send(clink , "HOR:DEL:MOD OFF"); //delay mode off
    ret = vxi11_send(clink , "HOR:POS 20");//trig pos 20% from left
    ret = vxi11_send(clink , "HOR:RECO 1000");//record length
    ret = vxi11_send(clink , "ACQ:MOD SAM");//acquisition mode = 8bit

    double xinc = vxi11_obtain_double_value(clink , "WFMO:XIN?"); //get horizontal range
    printf("%10.3e\n",xinc);
    fprintf(fp,"%10.3e\n",xinc );

    for (int iev = 0 ; iev < nevt + 1; iev++){
        ret = vxi11_send(clink , "DAT:ENC FAS");// fastest encoding
        ret = vxi11_send(clink , "WFMO:BYT_N 1"); //reng = -128~127
        ret = vxi11_send(clink , "DAT:STAR 1");
        ret = vxi11_send(clink , "DAT:STOP 1000");
        ret = vxi11_send(clink , "CURV?");//get data

        long bytes_returned=vxi11_receive_data_block(clink , wf1, 10000, 1000);

        if (iev == 0){
            for (int j = 0 ; j < 200; j++){
                wf2[j]=wf1[j];
            }
        }
    }
}
```

```

    continue;
  }
}

for (int k = 0; k < 200; k++){
  A = wf2[k]-wf1[k];
  if (A==0){
    continue;
  }
  break;
}
printf(" %5d %5d ", iev, bytes_returned);
fprintf(fp, " %5d %5d ", iev, bytes_returned);

for (int i = 0 ; i < 1000; i++){
  fprintf(fp, "%d ", (char)wf1[i]);
}
printf("\n");
fprintf(fp, "\n");
}

fclose(fp);
printf("ending... \n");
vx111_close_device(serverIP , clink);
}

```

付録B 増倍率データ解析プログラム

```
#include <stdio.h>

int main()
{
    int i, n, j;
    float xdiv; /* horizonta axes range. */
    int iev, nsample; /* Event number and number of sampling. */
    int siny[10000];
    FILE *fp;
    FILE *fpout;

    fp = fopen("Cs03032.txt", "r"); //file open for read
    if(fp == NULL){
        printf("can't open file \n");
        return 0;
    }

    fpout = fopen("Cs03032i.txt","w"); //file open for write
    if(fp == NULL){
        printf("can't open file \n");
        return 0;
    }

    /* Top line is x/div. */
    fscanf(fp, "%e\n", &xdiv );
    printf("xdiv read done.\n");

    /* Read event number unless EOF. */
    while(fscanf(fp,"%d",&iev)!=EOF){
        printf("event number=%d",iev);

    /* Check number of samplings. */
    fscanf(fp, "%d", &nsample );

    /* Read sample and hold data.*/
    const int nstot =1000;//taking 1000 sample is normal.
    for(i=0; i<nstot; i++){
        fscanf(fp, "%d", &(siny[i] )); //get data
    }
    printf("\n");
    if(nsample == nstot){
        /* Do needed instructions for the read data. */
        double sum = 0.0;
        double sum2 = 0.0;
        double sum3 = 0.0;
        double dev = 0.0;
        double ave = 0.0;
        double delta = 0.0;
        double max = 0.0;
        const int nped = 100;

        /* sum */
        for(i=0;i<nped;i++){
            sum = sum + (double)siny[i];
        }
        /* average */
        ave = sum / nped;

        /* deviation*/
    }
}
```

```

for(i=0;i<nped;i++){
    sum2 = sum2 + (ave - (double)siny[i])*(ave - (double)siny[i]);
}
dev = sum2 / nped;

/* delta */
for(i=nped+10;i<300;i++){
    delta = ave - (double)siny[i];

    /*pulse hight*/
    if(max < delta){
        max = delta;
    }
    /*integral*/
    sum3 = sum3 + delta;
}
/* select data */
//fprintf(fpout,"%d %f %f %f %f\n" ,iev,ave,dev,max,sum3);
printf("%d %f %f %f %f\n",iev,ave,dev,max,sum3);
fprintf(fpout,"%f\n" ,sum3); //only integral
}
}/* Event loop end. */
fclose(fp);
fclose(fpout);
printf("ending ... \n");
}

```

付 録 C 検出光子数のシミュレーション

```
#include<stdio.h>
#include<stdlib.h>
#include<math.h>
//#include<random.h>

/*random number of gaus generation*/

int main(int argc, char* argv[]){
    int ipix[400];//ピクセル数
    int nran[8];
    FILE *fp;
    FILE *fpp;

    fp=fopen("np2.txt","w");
    fpp=fopen("ne2.txt","w");

    /* expected value */

    const double mu=202.0;
    const double sigma=sqrt(202.0);
    srand(10);

    for(int i=0;i<10000;i++){

        double r=((double)rand())/((double)RAND_MAX);
        double rr=((double)rand())/((double)RAND_MAX);
        double z1=sqrt(-2.0*log(r))*cos(2.0*M_PI*rr);
        double z2=sqrt(-2.0*log(r))*sin(2.0*M_PI*rr);

        double rand_normal=0.0;
        rand_normal=(double)mu+(double)sigma*(double)z1;
        printf("event number =%d rand_normal =%f\n",i,rand_normal);

        int npix=0;

        for(int i=0;i<400;i++){
            ipix[i]=0.0;
        }

        for(int t=0;t<rand_normal;t++){
            int iran=rand()%400;
            ipix[iran]++;
        }

        /* number of photon in pixel */
        for(int it=0;it<400;it++){
            if(ipix[it]!=0){
                npix++;
            }
        }

        fprintf(fpp,"%d\n",npix);

        for(int jj=0;jj<400;jj++){
            fprintf(fp,"%3d",ipix[jj]);
        }
        fprintf(fp,"\n");
    }
}
```

```
}  
fclose(fp);  
fclose(fpp);  
}
```

参考文献

- [1] 浜松ホトニクス http://akizukidenshi.com/download/ds/hamamatsu/s10362-11_series_kapd1022j05.pdf
- [2] William R.Leo.Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments(1994)p160
- [3] FURUKAWA シンチレータ結晶物性比較表
<http://www.furukawakk.co.jp/pdf/others/hikaku.pdf>
- [4] 長坂憲子、横山紗依 卒業論文 「デジタルオシロスコープによる高速サンプリング記録を用いたMPPC読み出しシンチレーションカウンターの特性評価」奈良女子大学（2014年度）
- [5] 下雅意美紀、谷川祥子 卒業論文 「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（2013年度）
- [6] 瓜生奈都美、福井千尋 卒業論文 「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」奈良女子大学（2012年度）
- [7] 栗林和加、立川晶絵、峰村さつき 卒業論文 「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（2011年度）
- [8] 木原理美、脇田紗弥佳 卒業論文 「MPPC読み出しによるシンチレーションカウンターを用いた荷電粒子検出」奈良女子大学（2010年度）
- [9] 小池博子、米山知佐子 卒業論文 「シンチレーションカウンターのMPPCの読み出し」奈良女子大学（2008年度）
- [10] 辻知佳、宮田香織 卒業論文 「MPPCの基本特性およびシンチレーションカウンターへの応用」奈良女子大学（2007年度）
- [11] 猪木慶治、川合光/著 「基礎量子力学」 講談社
- [12] 富永洋、野口正安/著 「放射線応用計測-基礎から実用まで-」 日刊工業新聞社