

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を用いた
高速波形読み出しによる γ 線検出

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
加納美佳 浅野七瀬

平成31年1月25日

概要

MPPC (Multi Pixel Photon Counter) は、浜松ホトニクス社が開発した光検出半導体素子である。高い増幅率を持ち、磁場中でも特性が変化しない等の様々な理由から、従来までの光電子増倍管等の光検出器に代わる存在として、多方面での応用が期待されている。また、GAGGは無機シンチレーターの一種で、高密度で発光量が大きく、 γ 線に対する検出効率を高くできるという特徴を持つ。

本研究では、MPPCとGAGGを組み合わせたカウンターを用いたセットアップを作成し、 γ 線を検出する実験を行った。 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	6
1.1	γ 線	6
1.2	光電効果	6
1.3	コンプトン効果	7
1.4	電子対生成	7
1.5	シンチレーション光	7
1.6	研究に用いた γ 線源	7
第2章	MPPC(Multi Pixel Photon Counter)	9
2.1	MPPC	9
2.1.1	APD	9
2.1.2	プロポーショナルモードとガイガーモード	10
2.2	MPPCの動作原理	10
2.3	仕様	11
2.4	基本接続回路	11
2.5	光子の入射以外に発生するパルス	14
2.5.1	ダークパルス	14
2.5.2	クロストーク	15
2.5.3	アフターパルス	15
第3章	シンチレーター	16
3.1	有機シンチレーター	16
3.2	無機シンチレーター	17
3.3	シンチレーションカウンター	18
第4章	MPPCおよびエレクトロニクスの特性測定	19
4.1	原理	19
4.2	セットアップ	19
4.3	実験方法	20
4.4	生データのフォーマット	21
4.5	オフライン解析	23
4.5.1	段階1: 信号電荷への変換	23
4.5.2	段階2: 信号電荷の分布	24
4.6	結果・考察	24

第 5 章	^{137}Cs 線源を用いた γ 線検出	26
5.1	セットアップ	26
5.2	実験方法	26
5.3	波高分布	27
第 6 章	^{22}Na 線源を用いた γ 線検出	29
6.1	セットアップ	29
6.2	実験方法	29
6.3	波高分布	30
6.4	時間差	31
6.4.1	方法 1: パルスのピークに達した時刻を用いた方法	31
6.4.2	方法 2: 3σ 電位が変わった時刻を用いた方法	31
6.4.3	方法 3: パルスのピークの 10%、90% の電位を横切る 2 点を直線で結んで得た時刻を用いた方法	31
6.5	結果	32
6.6	結果の考察	32
第 7 章	まとめ	34
付 録 A	増倍率データ収集プログラム	36
付 録 B	増倍率データ解析プログラム	38

目 次

1.1	光電効果の概要図	6
1.2	^{137}Cs の壊変図	8
1.3	^{22}Na の壊変図	8
2.1	S12572-025C の外観	9
2.2	空乏化	10
2.3	MPPC の 1 ピクセル	11
2.4	MPPC の構造	11
2.5	1mm 角 MPPC の外寸図	12
2.6	3mm 角 MPPC の外寸図	13
2.7	基本接続回路	14
2.8	ダークパルスの波形スナップショット	14
3.1	有機シンチレーターの発光原理	16
3.2	無機シンチレーターの発光原理	17
4.1	LED 点灯実験のブロックダイアグラム	20
4.2	アルミケース内のセットアップ	20
4.3	デジタルオシロスコープ	20
4.4	NIM モジュール	21
4.5	恒温槽	21
4.6	LED 点灯をトリガーした時の波形スナップショット (1mm 角 MPPC)	22
4.7	LED 点灯をトリガーした時の波形スナップショット (3mm 角 MPPC)	22
4.8	信号電荷の分布 (減光 1 枚で 1mm 角 MPPC を使用した場合)	24
4.9	信号電荷の分布 (減光 1 枚で 3mm 角 MPPC を使用した場合)	24
4.10	積分値分布の比較	25
5.1	Block Diagram	26
5.2	上から見た様子	27
5.3	1mm 角 MPPC を用いたときの波高分布	27
5.4	3mm 角 MPPC を用いたときの波高分布	28
6.1	アルミシャーシ内の様子	29
6.2	実験の様子	29
6.3	blockdiagram	30
6.4	パルスが同時に来た時の波形スナップショット	30

6.5	ch1、ch2 についての波高分布	31
6.6	概略図	32
6.7	時間差のヒストグラム (横軸：時間差 [ns]、縦軸：カウント)	32
6.8	時刻と波高の関係	33
6.9	時間差のヒストグラム	33

表 目 次

2.1	MPPC の仕様 (1mm 角)	12
2.2	MPPC の仕様 (3mm 角)	13
3.1	有機シンチレーターの例	16
3.2	無機シンチレーターの例	17
4.1	MPPC への入射光子数	25

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、透過性が強いことである。その透過性の強さから、 γ 線は人体の深くまで到達できるため、ガンの放射線治療などにも使用される。また、透過性が強いこと、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。しかし、以下に述べるような過程を経ると、物質を構成する原子から電子（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 光電効果

光電効果の概要を図1.1に示す。光電効果とは、物質に入射した光子のエネルギーが物質中の電子にすべて与えられ、その電子（光電子）が放出される現象である。このとき、光子は一定の値 ϕ を上回るエネルギーを持つ必要があり、 ϕ は物質によって異なる。光電子の最大運動エネルギーは、照射される光の振動数によってのみ決まり、単位時間あ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。

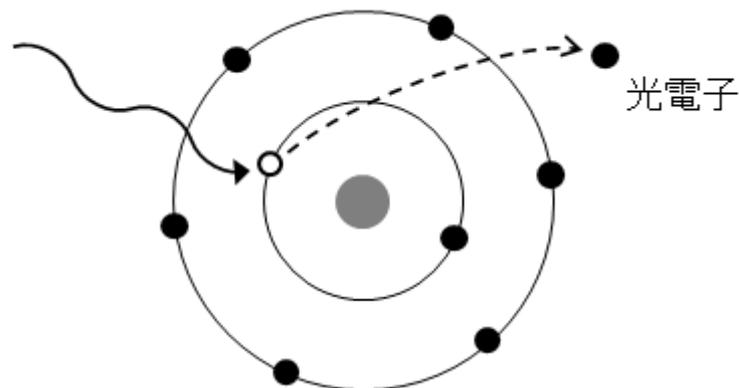


図 1.1: 光電効果の概要図

1.3 コンプトン効果

光子が自由電子あるいはそれに準じる束縛の緩い電子に衝突すると、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。この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 $h\nu_0$ 、散乱後の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。

1.4 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ため、電子の質量を m_e とすると $2m_e c^2 = 1.022\text{MeV}$ 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、最終的には静止する。一方、陽電子は物質中で静止すると、物質中に存在する電子と対消滅する。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。

1.5 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）が励起する。これらの励起状態の原子が、低いエネルギー状態に移る際に、エネルギーの準位差を光として放出する。この現象を蛍光の発生またはシンチレーションとよぶ。この光のことをシンチレーション光と呼び、これ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。

1.6 研究に用いた γ 線源

図 1.2、図 1.3 に、本研究で用いた ^{137}Cs と ^{22}Na の壊変図をそれぞれ示す。 ^{137}Cs は半減期が 30.2 年であり、 β^- 崩壊により、93.5% が励起状態の $^{137\text{m}}\text{Ba}$ に、残りの 6.5% が基底状態の同位体 ^{137}Ba へ変化する。 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ は 0.6616MeV の γ 線を放出し、 ^{137}Ba となる。また、 ^{22}Na は半減期が 2.6 年であり、 β^+ 崩壊をして陽電子を放出する。この陽電子の運動エネルギーは最大で 500 keV 程度なので、周囲の物質中で容易に静止する。そこで、原子中の電子とポジトロニウムとよばれる束縛状態を作り対消滅すると、0.511MeV の 2本の γ 線を同時に互いに 180° の向きに放射する。

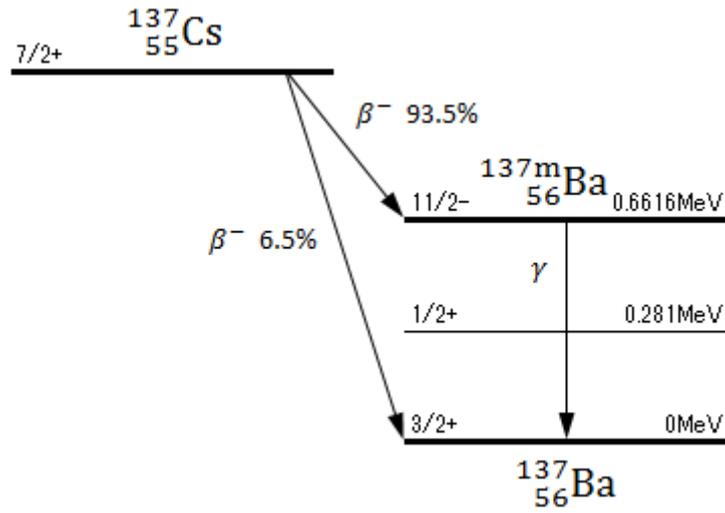


図 1.2: ^{137}Cs の壊変図

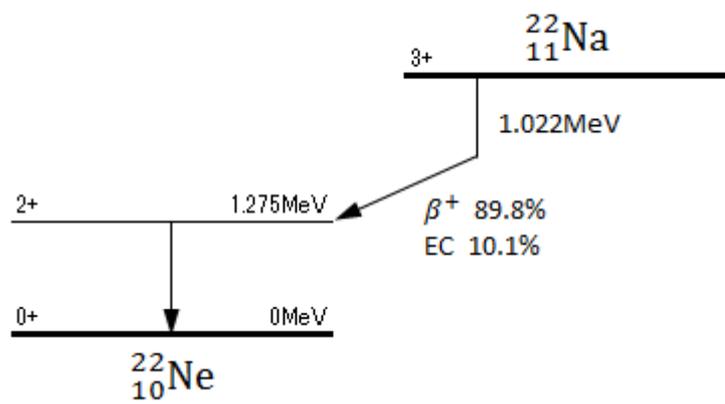


図 1.3: ^{22}Na の壊変図

第2章 MPPC(Multi Pixel Photon Counter)

2.1 MPPC

MPPCとは、Silicon Photomultiplier と呼ばれるデバイスの一種で、Multi Pixel Photon Counter の略称であり、浜松ホトニクス社が開発した光検出半導体素子である。優れたフォトンカウンティング能力を持ち、微弱光を検出する様々な用途に利用できる。特徴は100 V 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 S12572-025C) の画像を図 2.1 に記す。

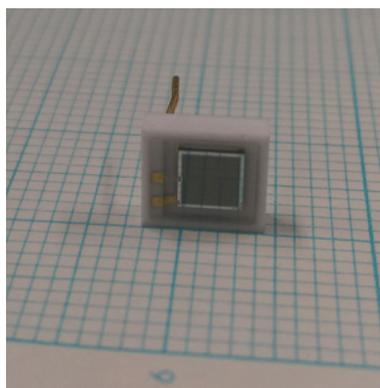


図 2.1: S12572-025C の外観

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。

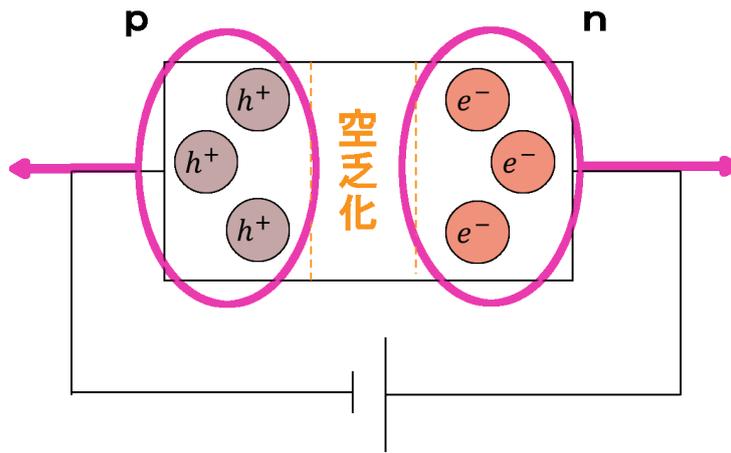


図 2.2: 空乏化

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すことで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起きて、電子雪崩が生成される。APDは、こうして電子雪崩形成を利用して信号を増幅する機能をもつフォトダイオードである。

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10倍か100倍程度であるとき、形成された電子雪崩は素子中（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時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よぶ。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粒子数の情報を失っている代わりに、 $10^5 \sim 10^6$ 倍程度に達する大きな増幅率を得ることが出来る。

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としてはたらし、その各々にクエンチング抵抗が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にガイガーモードの電子雪崩が生成し信号パルスを作る。この際に流れる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。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だしたピクセル1個あたり約 10^5 個の電子がパルス出力されるので、ピクセルに一光子が入射した時の信号の大きさは雑音から十分に分離するのでフォトンカウンティングが可能である。このとき出力人号の電荷は光電子形成したピクセルの数に対応して、とびとびの値をとるという特徴がある。



図 2.3: MPPC の 1 ピクセル

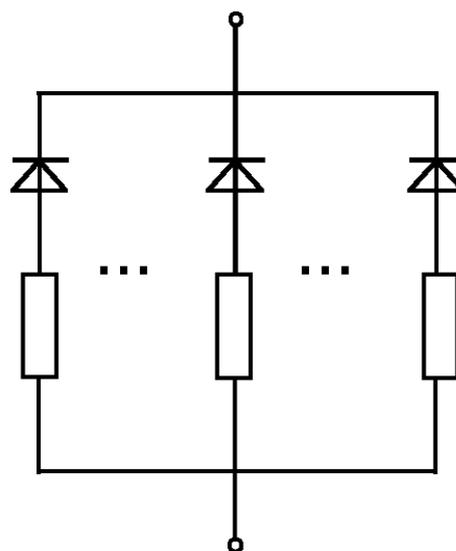


図 2.4: MPPC の構造

2.3 仕様

今回使用した MPPC は、浜松ホトニクス社製 S10362-11-050C、S12572-025C である。表 2.1 および表 2.2 に仕様を示しており、図 2.5 および図 2.6 に外寸図を示している。[1][2]

2.4 基本接続回路

MPPC の基本接続回路を図 2.7 に示す。この回路においては、 $47\text{k}\Omega$ の抵抗と $0.1\mu\text{F}$ のコンデンサーを組み合わせたローパスフィルターを 2 段接続することで、電源から進入するノイズを遮断する。信号を読みだす出力線には結合コンデンサーとして $0.47\mu\text{F}$ を配置して、印加している逆バイアス電圧の直流成分を除去する。

表 2.1: MPPC の仕様 (1mm 角)

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	μ m 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
逆電圧の温度係数	56	mV/°C
増倍率	7.5 × 10 ⁵	-

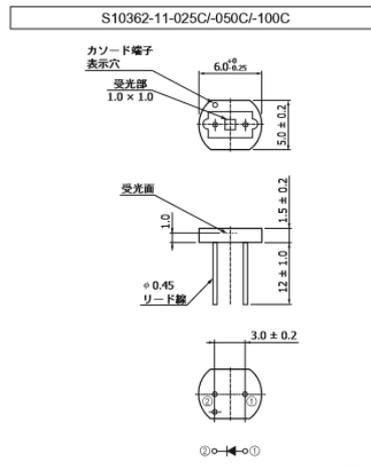


図 2.5: 1mm 角 MPPC の外寸図

表 2.2: MPPC の仕様 (3mm 角)

項目		単位
有効受光面サイズ	3 × 3	mm
ピクセル数	14400	-
ピクセルピッチ	25	μ m
動作温度	-20 ~ +60	°C
開口率	65	%
感度波長範囲	320 900	nm
最大感度波長	450	nm
検出効率	35	%
降伏電圧 (V_{BR})	65 ± 10	V
推奨動作電圧	$V_{BR} + 3.5$	V
ダークカウント	1000	kcps
端子間容量	320	pF
時間分解能	250	ps
増倍率	5.15×10^5	-

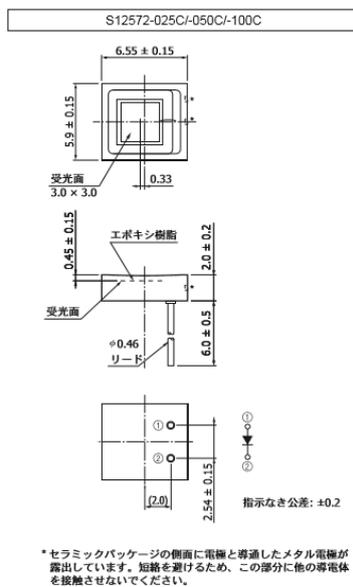


図 2.6: 3mm 角 MPPC の外寸図

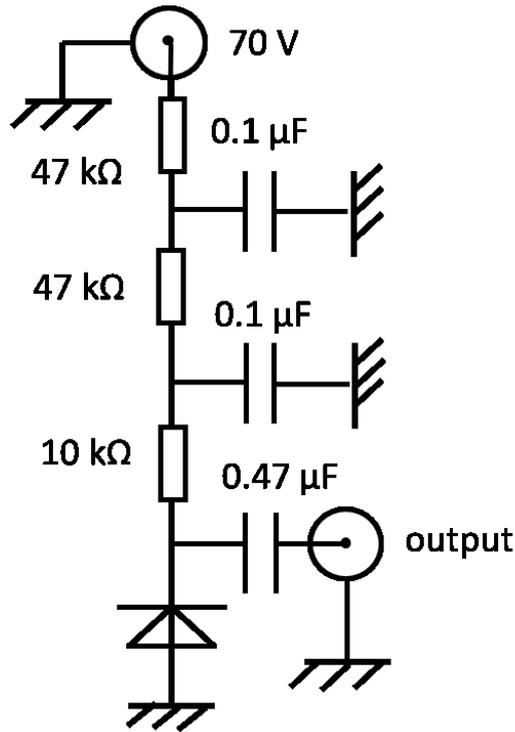


図 2.7: 基本接続回路

2.5 光子の入射以外に発生するパルス

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。MPPCはガイガーモードで動作しているため、この熱励起によって発生した電子も電子雪崩を形成して増幅された信号パルスを出す。このパルスは単一光子が入射した際に生じる本来の検出したい信号パルスと区別がつかなくなる。この現象はランダムに発生し、ダークパルスと呼ぶ。ダークパルスが生じるレートはサンプル個体によって異なり、また印加電圧が高いほど増加する。図 2.8 に MPPC を遮光した状態で 70V の逆電圧を印加したときの、オシロスコープで観測された波形を示す。

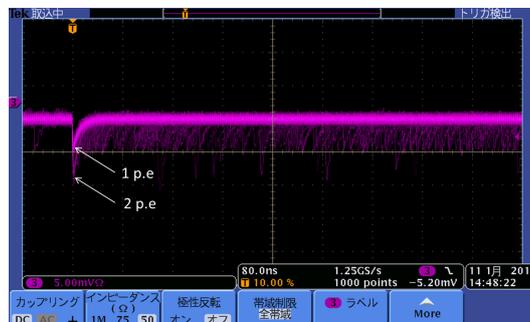


図 2.8: ダークパルスの波形スナップショット

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すと、最初に光子が検出されたときと同様な信号パルスを出力する。別のピクセルで光電効果を起こした二次的な電子が1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場合と同様に2倍の波高が検出される。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多くなることがある。この現象をクロストークとよぶ。

2.5.3 アフターパルス

APD ピクセルにおいて、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され、やや遅れて解放されることがある。解放されたのちに電子雪崩を作りパルスを出す。これをアフターパルスと呼ぶ。温度が低くなるにつれて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。

第3章 シンチレーター

シンチレーターとは、入射した粒子がエネルギー損失を起こしたときに蛍光を発することにより発光する物質である。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る。本研究では、MeV程度の γ 線を検出する目的に向く無機結晶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源とするものが大多数である。図3.1に、有機分子中の π 電子エネルギー準位図を示す。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る。また、添え字の0は基底準位、1, 2, 3, …は励起準位、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 (S_0) にある有機分子がそれぞれの励起準位 (S_1, S_2, S_3) に励起される。すべての励起準位から第1励起状態 (S_1) の最低準位に非常に短い時間で遷移し、基底状態 (S_0) に遷移すると蛍光が発する。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。[3]

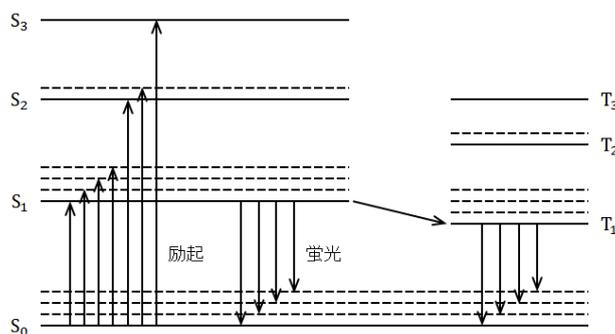


図 3.1: 有機シンチレーターの発光原理

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。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、発光量が多いものも多く、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。

表 3.2 に無機シンチレーターの例を示す。[4] 本研究では、以下に挙げる $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 5\text{mm}$ の GAGG シンチレーターを用いた。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 は放射線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 を含まない酸化物シンチレーターとして Gd、Ga、Al の酸化物をホスト物質とし、発光する添加物として Ce をドープした GAGG が開発された。[5]

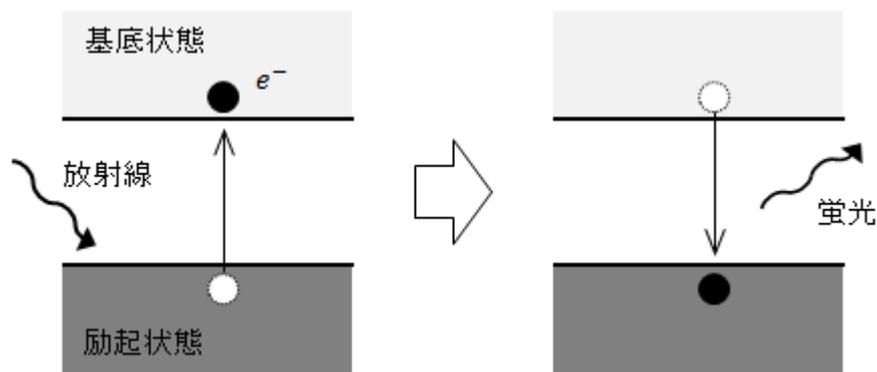


図 3.2: 無機シンチレーターの発光原理

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

3.3 シンチレーションカウンター

入射粒子がシンチレーター中で起こしたエネルギー損失によるシンチレーション光を光検出器でとらえて、電気信号パルスを出力する検出器をシンチレーションカウンターと呼ぶ。

本実験では、 γ 線の検出体となるシンチレーターとして、 $5\text{m}\times 5\text{mm}\times 5\text{mm}$ の立方体形状をしたCe添加GAGGを用いて、これを光検出器として受光部体 $1\text{mm}\times 1\text{mm}$ のS10362-11-050C型MPPCまたは $3\text{mm}\times 3\text{mm}$ の受光部を持つS12572-025C型MPPCと組み合わせたシンチレーションカウンターを製作した。MPPC受光部へ届く光量を増やす動機で、反射材として $200\mu\text{m}$ 厚の白色ゴアテックスシートで包み、MPPC受光部とはオプティカルグリースにより光学的接触を図るようにした。電圧印加および信号読み出し回路、静電遮蔽のためのアルミシャーシなどセットアップ詳細は第4章で述べる。

第4章 MPPCおよびエレクトロニクス の特性測定

LED をパルス点灯し十分に減光させ、1パルス当たり平均数個の光子がMPPCの受光部に届く状態で、MPPCの出力波高分布を得た。信号の数値化にはデジタルオシロスコープを用いて高速サンプル・アンド・ホールドした波形データを収集し、そこから信号電荷を計算する手法をとった。

4.1 原理

増倍率は、1ピクセルが1フォトンを検出して発生した信号パルスの電荷量を、電気素量で割ると得られる。MPPCの出力パルスは、生じた光電子数に応じて波高が離散的になるので、波高分布の近接した2つのピーク差から

$$\text{増倍率} = \frac{\text{2つのピークの電荷量の差}}{\text{電気素量}} \quad (4.1)$$

と求まる。

温度が上昇すると結晶の光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次の電離を起こすのに十分なほど大きくなる前に、結晶中のフォノンと衝突する確率が大きくなる。その結果、電子雪崩が起こりにくくなり、増倍率が小さくなる。逆電圧を上昇させると、キャリアに与えるエネルギーが大きくなるため、増倍率は大きくなる。増倍率を一定にするためには、周囲の温度に合わせて逆電圧を変化させるか、素子温度を一定に保つ必要がある。

4.2 セットアップ

図4.1にブロックダイアグラム、図4.2から図4.5に本研究で使用したハードウェアを示す。MPPCの逆バイアス電圧印加と信号読み出しには、第2章で示した基本接続回路を使用した。

- 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製 KM2107 12ch PMT AMP
- LED：日亜化学工業株式会社製 NSPB320BS

- デジタルオシロスコープ：Tectronix 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
- PC 環境：CPU:AMD Athlon(tm) X2 220 processor OS:Linux

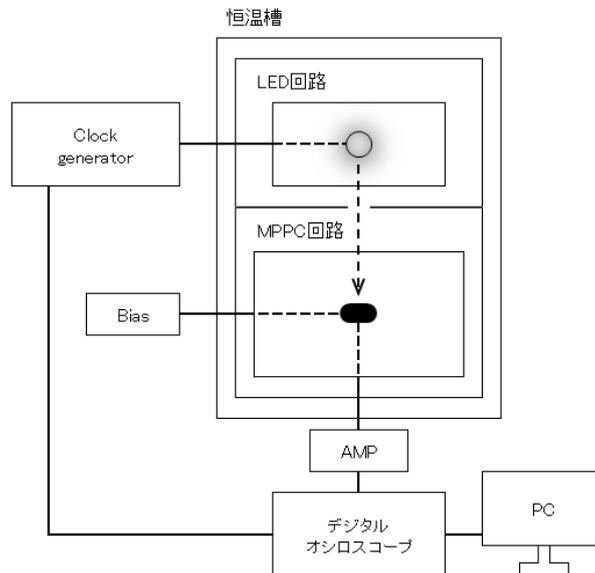


図 4.1: LED 点灯実験のブロックダイアグラム



図 4.2: アルミケース内のセットアップ



図 4.3: デジタルオシロスコープ

4.3 実験方法

LED 回路と MPPC 回路をアルミケースの中に設置し、恒温槽に入れて温度を 25℃に保った。MPPC は 1mm 角 (Sumple No.616) と 3mm 角 (Sereal No.4L000371) を用いた。2つの回路間には、Clock generator から送られたパルスが 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 に届くように壁には 2mm 程度の穴を開けた。Clock generator と LED の間に直列に 100Ω の抵抗を入れ、周波数 500Hz の TTL パルスを送り、LED をパルス点灯させた。LED には薄い青と白の紙製の箱を覆うように被せ、十分に減光させた。

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



図 4.4: NIM モジュール



図 4.5: 恒温槽

ドやデータの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波形データを取得し、これをテキスト形式で書き出す。付録 A に、サンプル番号 616 の MPPC を動作させたときのデータ収集用プログラムのソースコードの例を示す。

4.4 生データのフォーマット

例として、LED に紙製の箱を 1 枚被せ減光させたときに、3mm 角の MPPC を温度 25℃、逆電圧 70V で動作させた際の生データを以下に示す。また、図 4.6、図 4.7 にデジタルオシロスコープのスクリーン上のスナップショットを示す。1mm 角 MPPC の場合は光子がいつ何個来たか分かる波形となっている。一方 3mm 角の場合は入射する光子の数が多いため光子 1 つ 1 つのふるまいは見ることができない。

	4.000e-10															
0	1000	59	60	60	60	61	59	59	60	60	60	60	60	60	61	...
1	1000	61	60	59	60	59	60	62	60	61	62	61	59	59	58	...
2	1000	60	60	60	60	60	60	61	60	60	60	59	59	60	...	
3	1000	61	60	59	61	61	61	62	60	58	59	60	61	61	61	...
4	1000	59	59	60	59	60	59	58	60	58	59	59	59	59	60	...
5	1000	60	62	61	61	59	60	61	60	61	60	60	60	60	61	...
6	1000	60	63	63	61	60	60	60	61	61	59	58	61	61	59	...
7	1000	61	60	60	59	61	60	61	61	61	59	60	60	59	60	...

- 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

$$\frac{1\text{s}}{2.50\text{GSample/s}} = 0.4\text{ns} \quad (4.2)$$

で収集されたデータであることを示す。

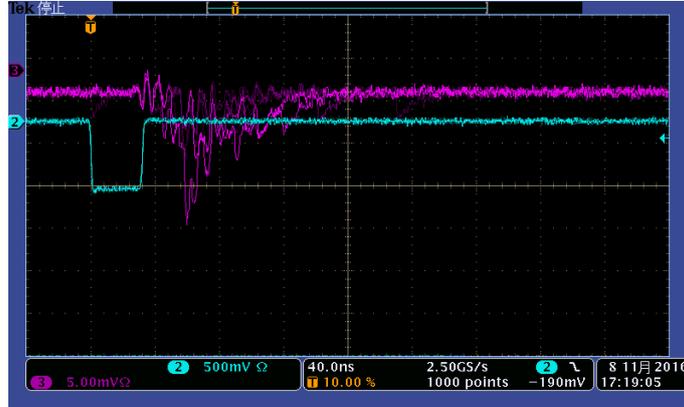


図 4.6: LED 点灯をトリガーした時の波形スナップショット (1mm 角 MPPC)

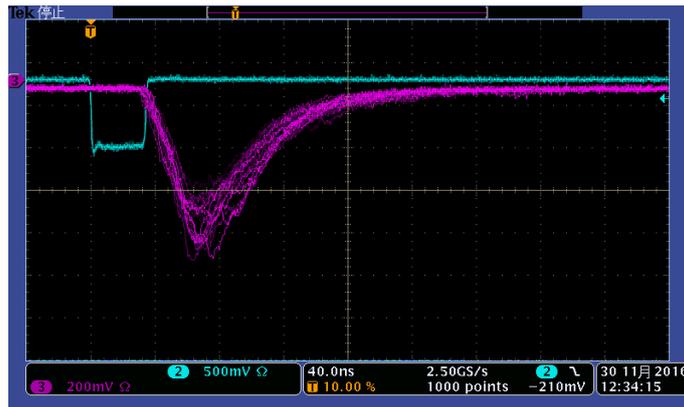


図 4.7: LED 点灯をトリガーした時の波形スナップショット (3mm 角 MPPC)

- 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、符号付き 8bit のデータがその後 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。

4.5 オフライン解析

4.5.1 段階 1：信号電荷への変換

4.4 で得た生データを、付録 B の増倍率データ解析プログラムで処理したデータを以下に示す。

0	60.000000	0.780000	78.000000	12568.000000
1	59.900000	0.830000	88.900000	12666.000000
2	60.200000	0.720000	91.200000	14130.000000
3	60.090000	0.741900	64.090000	9545.600000
4	59.740000	0.952400	62.740000	9363.600000
5	59.980000	1.039600	100.980000	13821.200000
6	59.940000	1.056400	77.940000	11376.600000
7	60.020000	0.779600	87.020000	11458.800000
...				

- 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。

$$\text{ゼロ点} = \frac{\sum_{i=1}^{100} x_i}{100} \quad (4.3)$$

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。trigger position より前でパルスが出ているときに分散が大きくなるため、指標として計算する。

$$\text{分散} = \frac{\sum_{i=1}^{100} (\text{ゼロ点} - x_i)^2}{100} \quad (4.4)$$

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。

- 4列目は、ゼロ点からピークまでのパルスの高さの最大値を示す。
- 5列目は、信号パルスの積分値（信号電荷）を示す。積分値は、信号パルスが検出されたと思われる 110 番目から 600 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。

$$\text{積分値} = \sum_{i=110}^{600} (\text{ゼロ点} - x_i) \quad (4.5)$$

4.5.2 段階 2 : 信号電荷の分布

段階 1 で得たデータのうち、信号パルスの積分値（信号電荷）における分布を図 4.8 図 4.9 に示す。1mm 角 MPPC の場合は入射した光電子の数に対応したピークが等間隔にたつが 3mm MPPC は一つのピークしか見られない。これは入射する光子が多いためである。なので、3mm 角 MPPC については紙製の箱 2 枚、4 枚で減光した場合も同様に分布を求め、比較する。

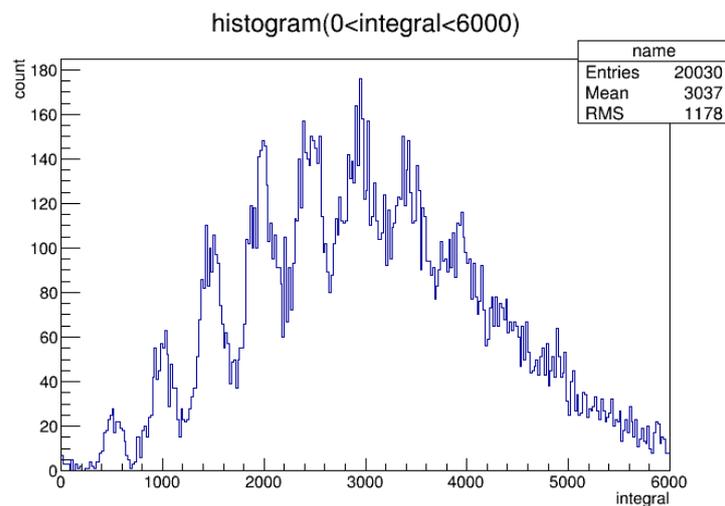


図 4.8: 信号電荷の分布（減光 1 枚で 1mm 角 MPPC を使用した場合）

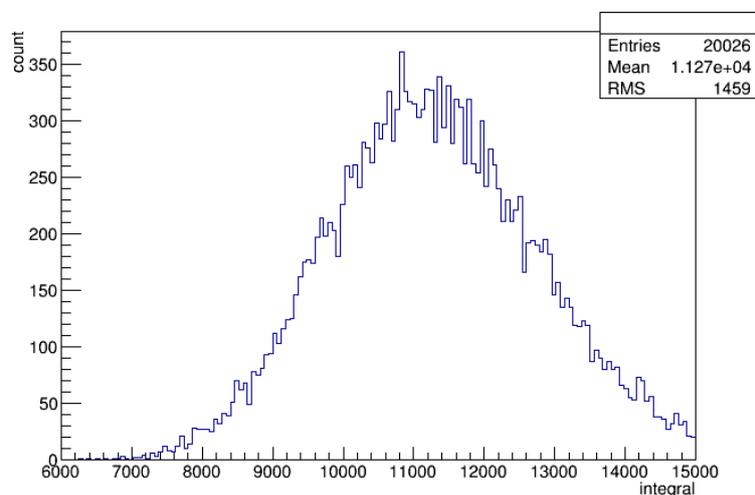


図 4.9: 信号電荷の分布（減光 1 枚で 3mm 角 MPPC を使用した場合）

4.6 結果・考察

信号パルスの積分値（信号電荷）の比較したものを図 4.10 に示す。LED を紙製の箱 1 枚で減光した場合を黒線、2 枚の場合を赤線、4 枚の場合を青線で示している。また、そ

れぞれの場合における、MPPCに入射した光子数を表 4.1 に示す。

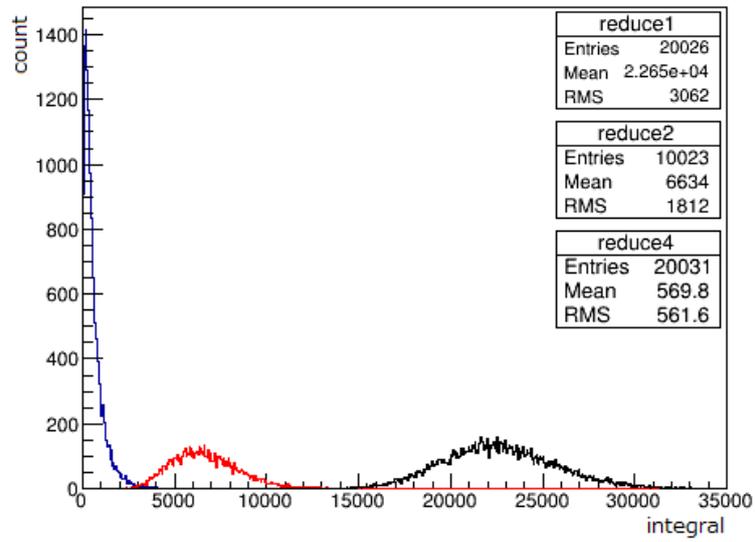


図 4.10: 積分値分布の比較

表 4.1: MPPC への入射光子数

紙箱の減光枚数	光子数
1	54.7
2	13.4
4	1.03

第5章 ^{137}Cs 線源を用いた 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662 keVの γ 線を検出する実験を行った。

5.1 セットアップ

図5.1に本実験のセットアップを示す。Bias電源や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でトリガーしていたが、この測定ではセルフトリガーでセットアップしている。線源が出す γ 線がシンチレーターに届くようにアルミシャーシの対応する位置に直径6 mmの穴を開けている。図5.2はアルミシャーシを上から見た写真であり、アルミシャーシ内のセットアップはLEDで用いたものと同じである。これらを恒温槽に入れて温度を25 °Cに保って測定した。

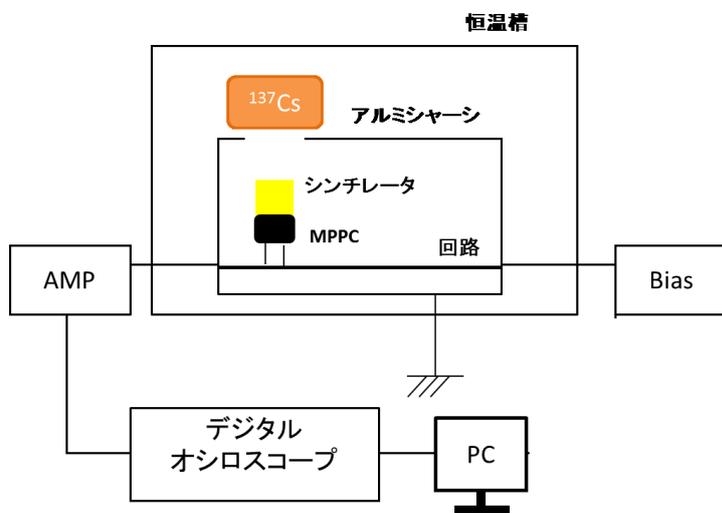


図 5.1: Block Diagram

5.2 実験方法

前小節で述べたセットアップを用いてMPPC1mm角 (Sample No.616)と3mm角 (Sereal No.4L000371)を使用し、逆電圧は70.0 V、恒温槽で25 °C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1000点中の60番目付近に集中していることと、GAGG



図 5.2: 上から見た様子

の発光減衰時間が約 90 ns であることから、積分範囲を 60~999 までに設定した。また、連続するイベントでデータが重複していないイベントのみを選んで今後の解析は行った。

5.3 波高分布

ダークパルスを拾わないようにトリガーレベルを設定した上で、 ^{137}Cs 線源からの γ 線が入射した時の波高分布を図 5.3、図 5.4 に示す。1mm 角 MPPC を用いたときは光電効果による一つのピークが見えているが、3mm 角 MPPC を用いたときは光電効果とコンプトン効果による二つのピークが見えている。3mm 角 MPPC は受光面が大きく、ピクセル数も多いため MPPC で検出した光子の数はダークパルス等のノイズで出す光子数より十分大きく、threshold をかけてもエネルギーの低いコンプトン効果によるピークとノイズとを分離できているためだと考えられる。

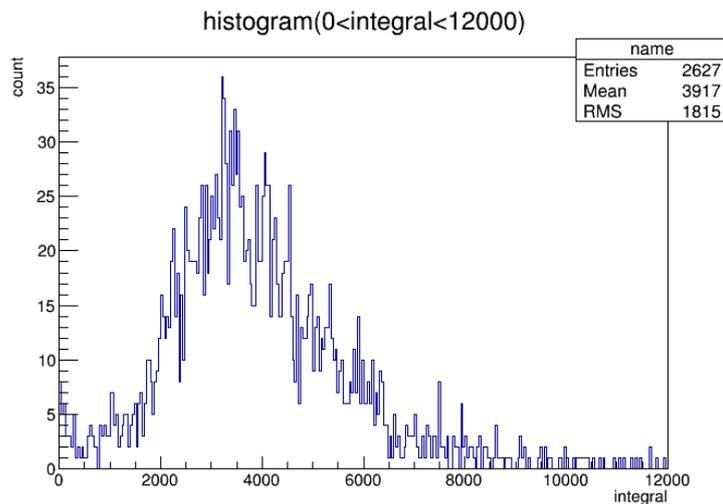


図 5.3: 1mm 角 MPPC を用いたときの波高分布

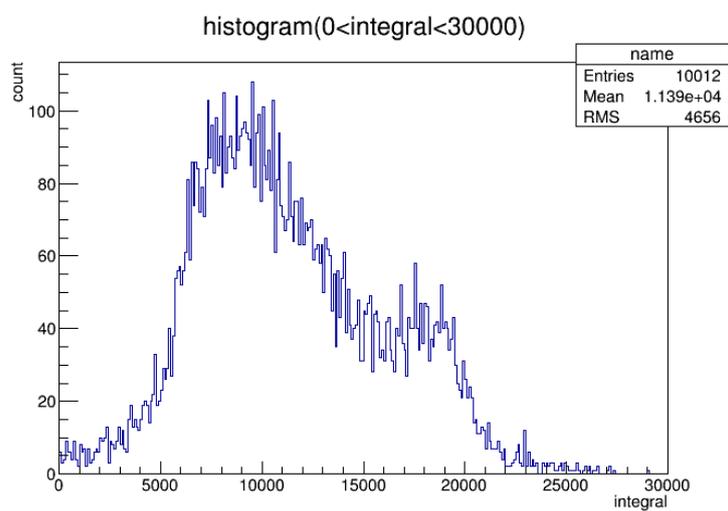


図 5.4: 3mm 角 MPPC を用いたときの波高分布

第6章 ^{22}Na 線源を用いた γ 線検出

^{22}Na 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、 ^{22}Na が発する511 keVの2本の γ 線を同時に検出するセットアップを制作し実験を行った。

6.1 セットアップ

線源が出す γ 線がシンチレーターに届くようにアルミシャーシの側面に直径5 mmの穴を開けて蓋をし静電遮蔽した。また、5mmGAGGシンチレーターと3mm角MPPCを組み合わせたカウンターを発泡スチロールで固定し基本回路に接続した。(図6.1)このアルミシャーシを2つ作り、これらを恒温槽にいれて温度を25 $^{\circ}\text{C}$ に保って測定した。70Vの逆電圧を印加しMPPCからの信号をオシロスコープに出力させてPCに波形データを取り込む。図6.2のように真ん中に ^{22}Na 線源を配置し、3 cm離れたところに二つのアルミシャーシを、二つのカウンターと線源が一直線になるように配置した。セットアップの概略図を図6.3に示す。



図 6.1: アルミシャーシ内の様子

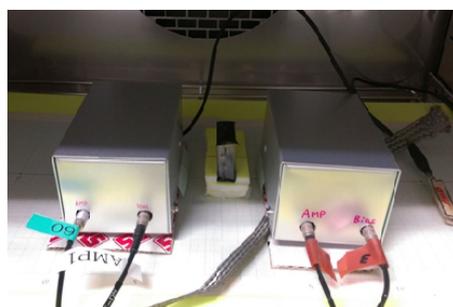


図 6.2: 実験の様子

6.2 実験方法

前小節で述べたセットアップを用いて3mm角 (Sereal No.4L000371) を使用し、逆電圧は70.0 V、恒温槽で25 $^{\circ}\text{C}$ に保った。左のMPPCからの信号をデジタルオシロスコープのch1に、右のMPPCからの信号をch2に出力させて今回はch1でトリガーした。波高を求める際に、トリガー位置は1000点中の60番目付近に集中していることと、GAGGの発光減衰時間が約90 nsであることから、積分範囲を60~999までに設定した。また、図??のようにch1、ch2ともにパルスが来たときのデータを用いるために、トリガーをとっ

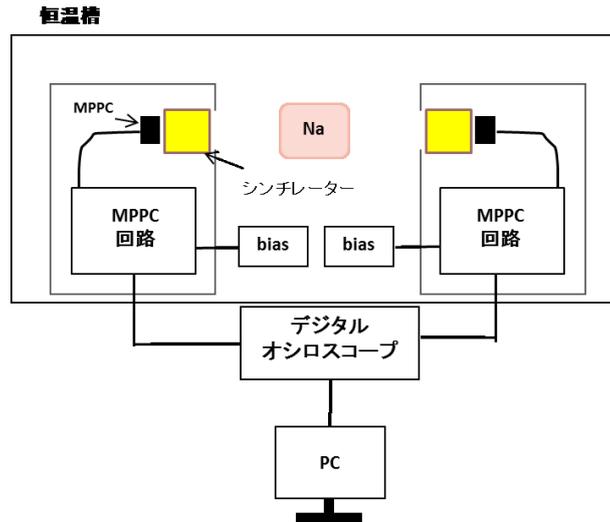


図 6.3: blockdiagram

ていない ch2 の積分値が 2000 以上のイベントのみで解析を行った。また Cs と同様にデータが重複していないイベントのみを選んで解析を行った。

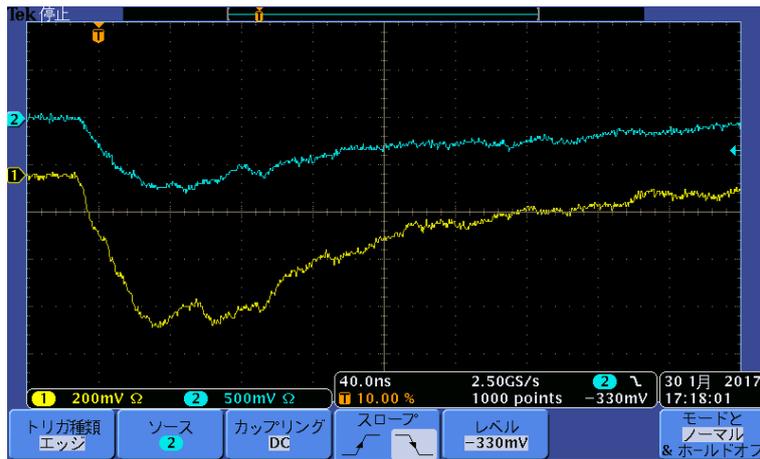


図 6.4: パルスが同時に来た時の波形スナップショット

6.3 波高分布

ダークパルスを拾わないようにトリガーレベルを設定した上で、 ^{22}Na 線源からの γ 線が入射した時の波高分布を図 6.5 に示す。ch1 を黒で、ch2 を赤で示している。ch1、ch2 ともに光電効果とコンプトン効果による二つのピークが見えている。

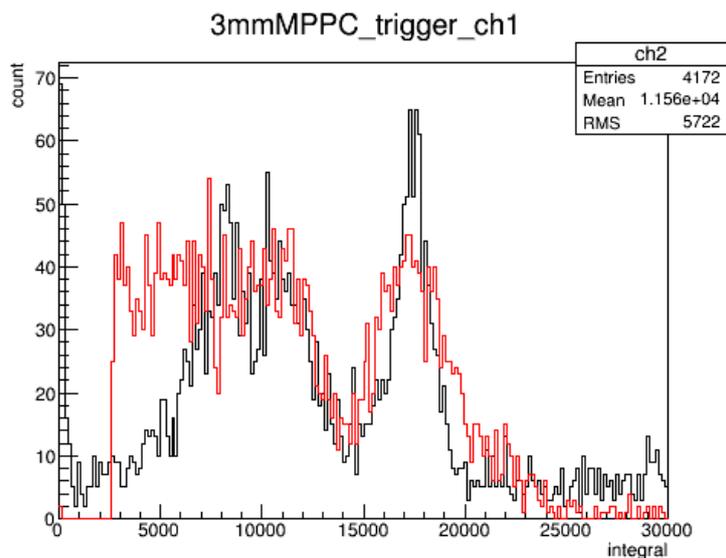


図 6.5: ch1、ch2 についての波高分布

6.4 時間差

ch1、ch2 の 2 つパルスの時間差を求める。時間差の測定方法として 3 つの方法を用いたので順に説明する。

6.4.1 方法 1 : パルスのピークに達した時刻を用いた方法

パルスハイトの最大値をとったイベント番号を ch1、ch2 について求める (i、j とする) と 5 章で説明した通り 0.4 ns ごとにデータを収集しているので時間差は $0.4(i-j)$ ns と求められる。

6.4.2 方法 2 : 3σ 電位が変わった時刻を用いた方法

ゼロ点の平均を x_0 、標準偏差を σ とするとき $x_0 - 3\sigma$ 電位が下がった時パルスが来たことみなしてその時刻を ch1、ch2 それぞれ求める。

6.4.3 方法 3 : パルスのピークの 10%、90% の電位を横切る 2 点を直線で結んで得た時刻を用いた方法

パルスピークの 10%、90% の電位を横切る 2 点を直線で結んだとき、その直線とゼロ点が変わる時刻を ch1、ch2 についてそれぞれ求める。

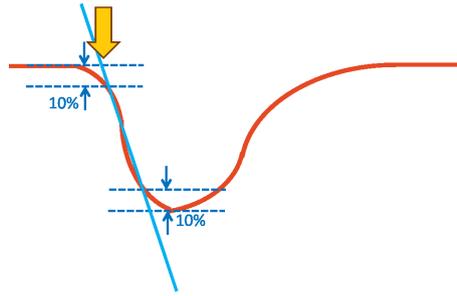


図 6.6: 概略図

6.5 結果

上記3つの方法を用いて得た時間差を図6.7に示す。peakが方法1で黒、3sigmaが方法2で赤、slopeが方法3で青で示している。今回RMSの値を本実験のセットアップの時間分解能とみなす。2章でも述べたようにMPPCの時間分解能は0.25 nsなので、本実験の時間分解能はシンチレータの発光減衰時間とデータ処理の方法によって決まっていると考えられる。

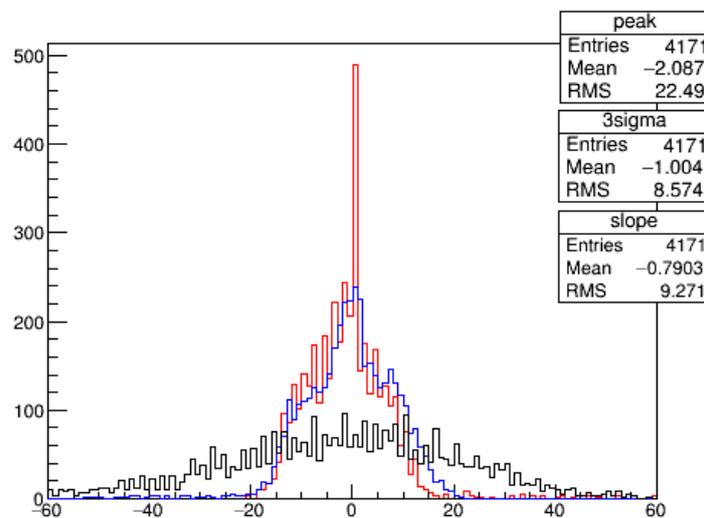


図 6.7: 時間差のヒストグラム (横軸：時間差 [ns]、縦軸：カウント)

6.6 結果の考察

オシロスコープはトリガーレベルを決めてそのレベルを超えるトリガーポイントが一定になるように出力している。すると図6.8のように同じパルスがきても波高によってパルスの到達時刻が変わってしまう。これをタイムウォーク効果という。波高を考慮するためにch1、ch2ともに光電ピークとなる時のデータのみを用いて解析を行った。その結果が図6.9に示している。fallが方法2で黒、slopeが方法3で赤で示している。全イベント

で時間差を求めたときに比べてRMSの値は小さくなっている。方法3でパルスピークの値を考慮した解析を行っているがそれでもRMSの値は小さくなるのでより厳密に波高と時刻の関係を考慮した解析方法を行う必要があることが分かった。

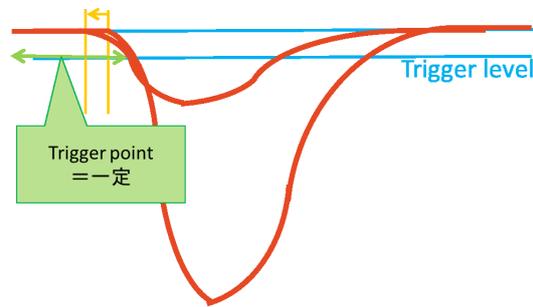


図 6.8: 時刻と波高の関係

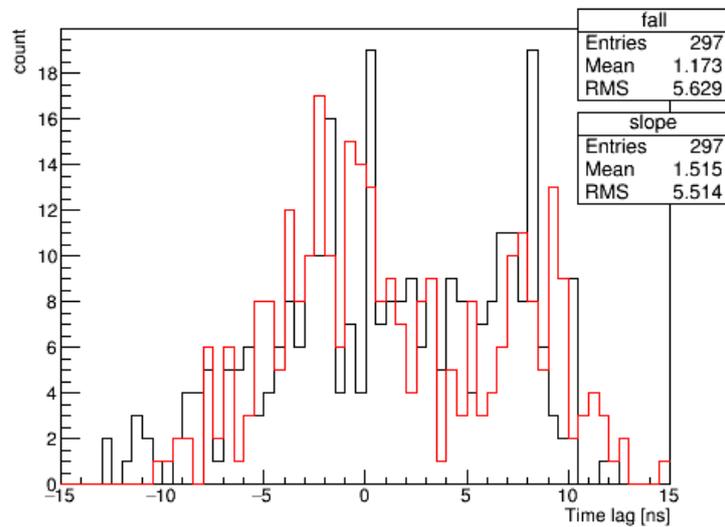


図 6.9: 時間差のヒストグラム

第7章 まとめ

本研究では、 ^{22}Na から放射される2本の γ 線を同時に検出できる、MPPCとGAGGシンチレーターを用いたセットアップを作成し、エネルギースペクトラムを作成することができた。時間分解能は、パルスのピークに対して10%と90%の電位を横切る2点を直線で結び得た時刻を用いた方法（方法3）において9.3nsとなったが、光電ピークにあたる積分値に限定した場合5.5nsとなった。現段階での解析方法では、パルスの大きさの影響を完全には除去しきれていないことがわかる。正確に時間差を求めるためには、波形を適切にフィットする必要がある。また、今回受光面が1mm角、3mm角のMPPCを用いて実験を行った。1mm角MPPCの場合は光子1つのふるまいが観測できる特徴があり、3mm角MPPCの場合はMPPCが出すノイズと入射光子とを十分に区別できるため低エネルギーの事象を観測できる特徴があることが分かった。

謝辞

本研究に関して、終始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を申し上げます。また、多くの有用なコメントやアドバイスを頂きました林井久樹先生、下村真弥先生に深謝致します。そして、貴重なご意見や助言を頂きました高エネルギー物理学研究室の先輩方、共に研究を進めた同回生にも大変お世話になりました。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。皆様への深い感謝の意を表して、謝辞と致します。

付録A 増倍率データ収集プログラム

```
#include <unistd.h>
#include <stdio.h>
#include "vxi11_user.h"

int main(int argc, char *argv[]){
    FILE *fp;
    fp=fopen("20161130.txt", "w");

    int nevt =10100;//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 CH3");//Digitize ch=3 signal.
    ret = vxi11_send(clink, "HOR:SCA 40E-09");//Horizontal 40 ns/div
    ret = vxi11_send(clink, "CH3:SCA 5E-03");//ch=3 vertical 5mV/div
    ret = vxi11_send(clink, "TRIG:A:EDGE:SOU CH2");//trigger type = edge.ch=3
    ret = vxi11_send(clink, "TRIG:A:EDGE:SLO FALL");//slope control=fall
    ret = vxi11_send(clink, "TRIG:A:LEV:CH2 -210E-03");//trigger level = -210.0mV
    ret = vxi11_send(clink, "TRIG:A:MODE NORM");//triggered data get
    ret = vxi11_send(clink, "CH2:POS 1.5");//vertical position
    ret = vxi11_send(clink, "HOR:DEL:MOD OFF");//delay mode off
    ret = vxi11_send(clink, "HOR:POS 10");//trig pos 10% 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");//range = -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");
vx11_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;//horizontal axes range.
    int iev, nsample;//Event number and number of sampling.
    int siny[10000];
    FILE *fp;
    FILE *fpout1, *fpout2;

    fp = fopen("20161130.txt", "r");//file open for read
    if(fp == NULL){
        printf("can't open file\n");
        return 0;
    }

    fpout1 = fopen("20161130a.txt","w");//file open for write
    fpout2 = fopen("20161130all.txt","w");

    /* 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){

        /*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+20; i<1000; i++){
        delta = ave -(double)siny[i];

        /*pulse hight*/
        if(max < delta){
            max = delta;
        }
        /*integral*/
        sum3 = sum3 +delta;
    }

    /*select data*/
    printf("%d %f %f %f %f\n",iev, ave, dev, max, sum3);
    fprintf(fpout1, "%f\n", sum3);//only integral
    fprintf(fpout2,"%d\t%f\t%f\t%f\t%f\n",iev, ave, dev, max, sum3);//all
    }
} //Event loop end.

fclose(fp);
fclose(fpout1);
fclose(fpout2);
fclose(fpout3);
printf("ending ... \n");
}

```

参考文献

- [1] 浜松ホトニクス (MPPC、s12572-025)
http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s12572-025_etc_kapd1043j.pdf
- [2] 浜松ホトニクス (MPPC、s10362-11)
http://akizukidenshi.com/download/ds/hamamatsu/s10362-11_series_kapd1022j05.pdf
- [3] William R.Leo.Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments(1994) p160
- [4] FURUKAWA シンチレータ結晶物性比較表
<http://www.furukawakk.co.jp/pdf/others/hikaku.pdf>
- [5] 古河機械金属 (GAGG) <http://www.furukawakk.co.jp/business/others/gammaspotter.html>
- [6] 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」
- [7] 井上裕貴、奥野あや、日野純子 卒業論文 「MPPC 読み出しによる無機シンチレーターを用いた λ 線検出」