

平成 29 年度 卒業論文

MPPC 読み出しシンチレーションカウンターの
時間分解能測定

平成 30 年 3 月 23 日

奈良女子大学理学部数物科学科
高エネルギー物理学研究室

釜野楓 藤井美保

概要

MPPC(Multi Pixel Photon Counter) は浜松ホトニクス社が開発した、ガイガーモードで動作する、複数のアバランシェフォトダイオードピクセルから成るフォトンカウンティングデバイスである。低電圧で動作し、磁場中でも特性が変化しないことなどが特徴である。また、GAGG シンチレーターは高密度で発光量が大きく、 γ 線検出効率を高くできるという特徴をもつ無機シンチレーターである。

本研究では、MPPC と GAGG シンチレーターを組み合わせた γ 線検出器 2 つを製作し、 ^{22}Na が発する 2 本の γ 線を同時検出した事象により、 γ 線検出器の時間分解能の測定を行った。その結果について記す。

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	6
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	8
2.1	MPPC	8
2.2	構造と動作原理	9
2.3	仕様	11
2.4	MPPC の基本接続回路	13
2.5	基礎特性	13
第 3 章	シンチレータ	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	17
第 4 章	エレクトロニクス	18
4.1	NIM モジュール	18
第 5 章	MPPC およびエレクトロニクスの特性測定	20
5.1	原理	20
5.2	セットアップ	20
5.3	実験方法	22
5.4	生データ	22
5.5	データ解析	24
5.6	結果	27
第 6 章	^{137}Cs 線源と ^{22}Na 線源が発する γ 線の検出	29
6.1	セットアップ	29
6.2	実験方法	29
6.3	波高分布	31
第 7 章	^{22}Na 線源が発する 2 つの γ 線の同時検出と シンチレーションカウンターの時間分解能測定	33
7.1	セットアップ	33

7.2	実験方法	33
7.3	波高分布	35
7.4	フィットに用いる関数の決定	35
7.5	時間差分解能測定	38
7.6	考察	41
付録 A	増倍率データ収集プログラム	45
付録 B	増倍率データ解析プログラム	47
付録 C	^{22}Na データ収集プログラム	49

目次

1.1	光電効果の概要図	6
1.2	^{137}Cs の壊変図	7
1.3	^{22}Na の壊変図	7
2.1	S10362-11-50C	8
2.2	S12572-025C	8
2.3	空乏化	9
2.4	光の入射による電子-正孔対の生成	9
2.5	プロポーショナルモード	9
2.6	ガイガーモード	9
2.7	MPPC 1 ピクセルの動作	10
2.8	MPPC の構造 [1]	10
2.9	フォトンカウンティングのイメージ [1]	10
2.10	S10362-11-050C 外形寸法	11
2.11	S12572-025C 外形寸法	12
2.12	MPPC の基本接続回路	13
2.13	MPPC の基礎特性を観察した実験の Block Diagram	14
2.14	ダークパルス	14
2.15	クロストークの概念図	15
2.16	ダークパルスに起因するクロストーク成分	15
2.17	ダークパルスの直後に発生したアフターパルス成分	15
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	AMP の増幅率	19
5.1	LED 点灯実験の Block Diagram	20
5.2	アルミシャーシ内のセットアップ	21
5.3	NIM モジュール	21
5.4	恒温槽	21
5.5	デジタルオシロスコープ	21
5.6	LED 点灯をトリガーにしたときのスナップショット	22
5.7	MPPC1mm 角 (S10362-11-050C) の信号パルスの分布	25
5.8	MPPC3mm 角 (S12572-025C) の信号パルスの分布	25
5.9	MPPC1mm 角 (S10362-11-050C) 電圧変化による増倍率	27
5.10	MPPC3mm 角 (S12572-025C) 電圧変化による増倍率	28
6.1	γ 線の検出実験の Block Diagram	29
6.2	1mm 角 MPPC と ^{137}Cs 線源を用いたときの波形のスナップショット	30
6.3	3mm 角 MPPC と ^{137}Cs 線源を用いたときの波形のスナップショット	30
6.4	3mm 角 MPPC と ^{22}Na 線源を用いたときの波形のスナップショット	30
6.5	1mm 角 MPPC と ^{137}Cs 線源を用いたときの波高分布	31

6.6	3mm 角 MPPC と ^{137}Cs 線源を用いたときの波高分布	31
6.7	3mm 角 MPPC と ^{22}Na 線源を用いたときの波高分布	31
6.8	波形の積分値と γ 線のエネルギーの関係	32
7.1	アルミシャーシの中を横から見た様子	33
7.2	アルミシャーシの中を上から見た様子	33
7.3	アルミシャーシに線源を貼り付けている様子	33
7.4	恒温槽の中の様子	33
7.5	γ 線同時検出実験の Block Diagram	34
7.6	^{22}Na 線源を用いたときの波高分布	35
7.7	カウンター 2 の波形の平均	35
7.8	Time Walk Effect のイメージ図	36
7.9	^{22}Na 線源を用いたときの波高分布 (cut)	36
7.10	0.511MeV の γ 線の全吸収ピークに当たる波高のイベントのみによる波高の平均	36
7.11	カウンター 2 のフィットに用いる関数	37
7.12	$t_0(\text{I}) - t_0(\text{II})$ 分布	38
7.13	うまくフィットできたパルスの例	39
7.14	うまくフィットできていないパルスの例	39
7.15	カウンター 1,2 それぞれの t_{\min} の分布	40
7.16	それぞれの t_0 の 2 次元分布 (cut なし)	40
7.17	それぞれの t_0 の 2 次元分布 (cut あり)	40
7.18	イベント選別後の $t_0(\text{I}) - t_0(\text{II})$ 分布	41
7.19	シンチレーターを交換した実験の $t_0(\text{I}) - t_0(\text{II})$ 分布	42

表目次

2.1	S10362-11-050C の仕様	11
2.2	S12572-025C の仕様	12
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
5.1	MPPC1mm 角 (S10362-11-050C) 電圧変化による増倍率	27
5.2	MPPC3mm 角 (S12572-025C) 電圧変化による増倍率	28
7.1	フィットにより返ってきた値	38
7.2	時間差分解能	41
7.3	検出光子数	43

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 線は波長が短い (エネルギーが高い) 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。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高い運動エネルギーを持った電子 (二次電子) を叩き出すため、この電子が物質を電離・励起する作用を持つ。

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全てが物質内原子に束縛されている軌道電子に与えられ、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。

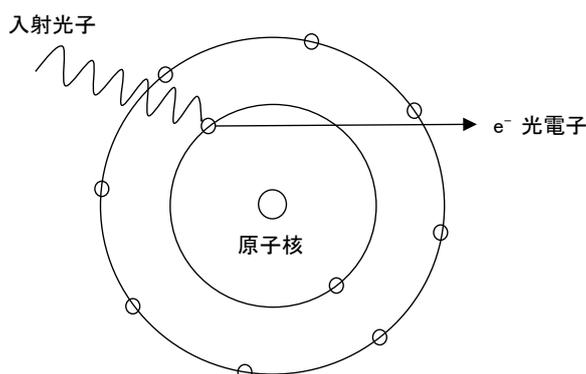


図 1.1: 光電効果の概要図

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、その電子を散乱してエネルギーを失い、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

$$E = h\nu_0 - h\nu_1 \quad (1.1)$$

は、散乱された電子 (コンプトン電子) の運動エネルギーである。コンプトン効果では、光子は消滅しない。

1.4 電子対生成

光子が原子核の近傍においてクーロン場を受けた際に、光子が消滅して電子とその反粒子である陽電子の対が生成する過程を電子対生成という。 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 $2m_e c^2 = 1.022\text{MeV}$ 以上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、陽電子は物質中の電子と結合して対消滅する。対消滅する際には、複数の γ 線が生成する。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、エネルギー準位差を光として放出する。この現象をシンチレーションと呼ぶ。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、本研究に用いた ^{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 ^{137m}Ba に、残りの 6.5% が基底状態の同位体 ^{137}Ba へ変化する。ここで記号 m は、準安定状態 (meta-stable state) を指す。 ^{137m}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 500keV 程度なので、周囲の物質中で容易に停止する。そこで、原子中の電子とポジトロニウムと呼ばれる束縛状態を作り対消滅すると、0.511MeV の 2 本の γ 線を互いに 180° の向きに放出する反応が支配的である。

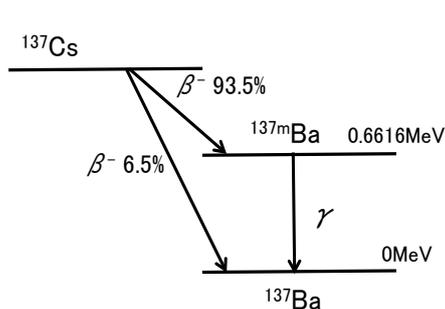


図 1.2: ^{137}Cs の壊変図

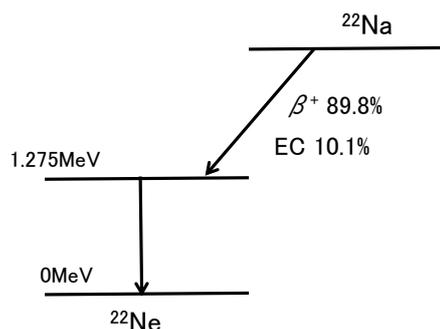


図 1.3: ^{22}Na の壊変図

第 2 章 MPPC

2.1 MPPC

MPPC(Multi Pixel Photon Counter) は、Si-PM(photomultiplier) と呼ばれるデバイス的一种であり、浜松ホトニクス社が開発した光半導体素子である。ガイガーモードで動作する複数の APD(Avalanche Photodiode) ピクセルから成る新しいタイプのフォトンカウンティングデバイスである。100V 以下の低電圧、常温で動作すること、ガイガーモードで動作するため $10^5 \sim 10^6$ におよぶ高い増幅率をもつこと、ピクセル一つの静電容量は小さいため優れた分解能を示すこと、固体素子であるため磁場の影響を受けないことなどが特徴である。図 2.1、2.2 に本研究で使用した MPPC(浜松ホトニクス社製 S10362-11-50C,S12572-025C) の画像を示す。

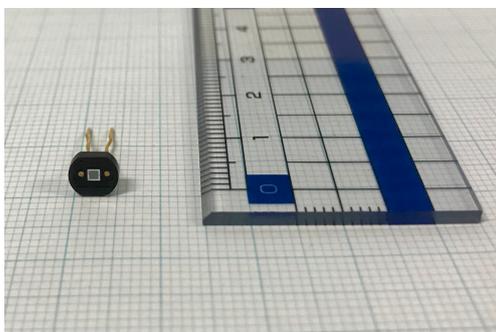


図 2.1: S10362-11-50C

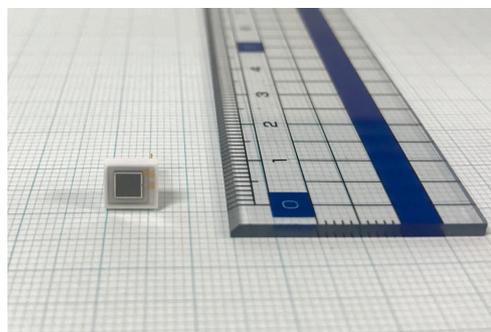


図 2.2: S12572-025C

2.1.1 APD

MPPC を含む APD(Avalanche Photodiode) について概観する。pn 接合のフォトダイオードに逆電圧を印加すると、p 側電極に正孔が、n 側電極に電子が蓄積し、pn 接合面付近に空乏層が広がる。(図 2.3) 空乏層にはキャリアが蓄積しないため、素子内の電流が止まる。空乏層に光子が入射すると、光電効果により電子-正孔対が生成される。生成された電子と正孔は、素子内部の電位差により、電子は n 側に、正孔は p 側に移動するため、電流が生じて、これが信号パルスを作る。(図 2.4) 以上がフォトダイオードの基本的な原理である。

APD では、光電効果により生成された電子が内部電圧により加速され、この電子が半導体内の電子に衝突し、新たな電子-正孔対を生成する。ここで生成された電子も同様に内部電圧により加速され、また半導体内の電子に衝突し、新たな電子-正孔対を生成する。この工程が連鎖的に起こることにより、電子雪崩が形成される。APD は、電子雪崩を利用し、信号を増幅する機能をもつフォトダイオードである。

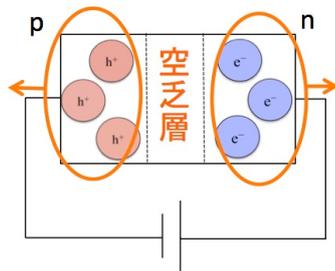


図 2.3: 空乏化

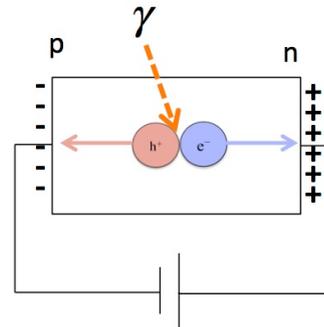


図 2.4: 光の入射による電子-正孔対の生成

2.1.2 プロポーショナルとガイガーモード

APD には、降伏電圧以下で動作するプロポーショナルモードと、降伏電圧以上で動作するガイガーモードがある。プロポーショナルモードでは、電子雪崩が局所的であるため (図 2.5)、出力信号パルスは入射した光子の数に比例する。また増幅率は 50 ~ 100 程度である。ガイガーモードでは、電子雪崩がピクセル全面に広がるため (図 2.6)、出力信号パルスは入射した光子の数に比例せず、ほぼ一定である。また増幅率は $10^5 \sim 10^6$ と高いものになり、これが単一光子検出を可能にする。

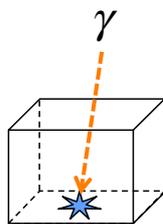


図 2.5: プロポーショナルモード

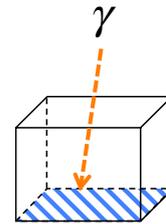


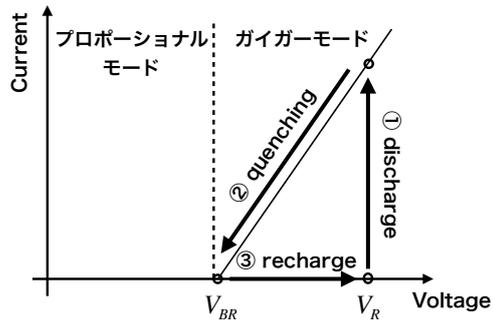
図 2.6: ガイガーモード

2.2 構造と動作原理

MPPC の 1 ピクセルは、図 2.8 の一列分のように、ガイガーモードの APD とクエンチング抵抗が直列に接続されたものである。

MPPC の動作原理について説明する。以下の説明と図 2.7 中の数字がそれぞれ対応している。

1. MPPC はガイガーモードで動作するため、降伏電圧以上の逆電圧をかけた APD に光子が入射すると、電子雪崩を形成し電流が流れ始める。
2. 再び光子検出可能にするには電子雪崩を止める必要がある。クエンチング抵抗により、電圧降下を起こし、ガイガーモードから脱するため、電子雪崩が停止する。
3. 再充電され、ガイガーモードになると光子検出可能になる。



V_{BR} : 降伏電圧

V_R : 逆電圧

図 2.7: MPPC 1 ピクセルの動作

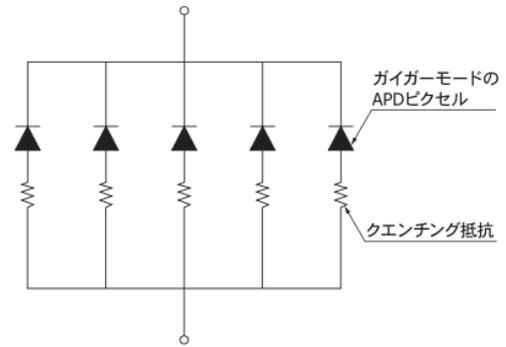


図 2.8: MPPC の構造 [1]

MPPC は、図 2.8 のように、1 ピクセル分の構造をピクセル数分、二次元に並列接続をした構造をしている。そのため全てのピクセルに同じ値の逆電圧が印加され、各ピクセルからの信号パルスの重ね合わせが出力される。したがって、光子の入射により電子雪崩を生成したピクセルの数に応じて離散的な波高分布を示す。図 2.9 に MPPC にフォトンカウンティングのイメージを示す。例えば 3 つの光子がそれぞれ別のピクセルで電子雪崩形成すれば、1 光子検出時の 3 倍の大きさの信号パルスを出力する。

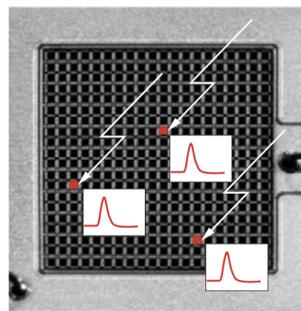


図 2.9: フォトンカウンティングのイメージ [1]

2.3 仕様

本実験で使用した MPPC は、S10362-11-050C と S12572-025C である。仕様を表 2.1 および 2.2 に、外形寸法図を図 2.10 および 2.11 に示す。[2][3]

表 2.1: S10362-11-050C の仕様

項目		単位
有効受光面サイズ	1 × 1	mm
ピクセル数	400	-
ピクセルサイズ	50 × 50	μm
動作温度	-20 ~ +40	°C
保存温度	-20 ~ +60	°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 (Typ.)	400	kcps
ダークカウント (Max.)	800	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	-

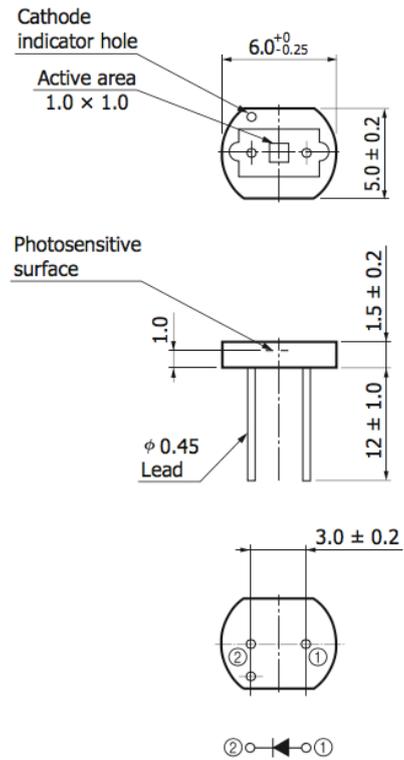
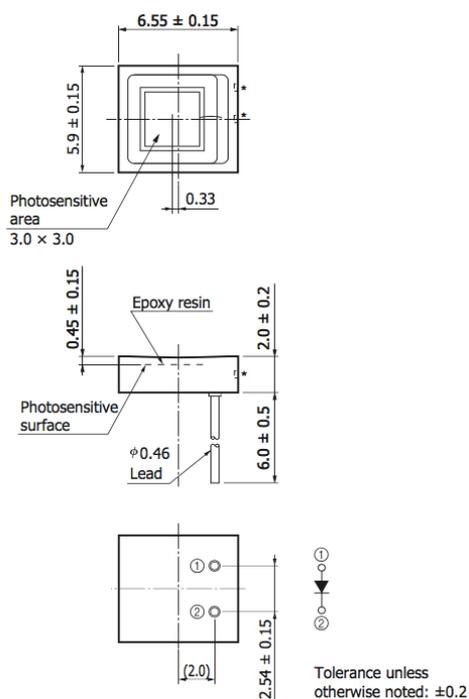


図 2.10: S10362-11-050C 外形寸法

表 2.2: S12572-025C の仕様

項目		単位
有効受光面サイズ	3 × 3	mm
ピクセルピッチ	25	μm
ピクセル数	14400	-
動作温度	-20 ~ +60	°C
保存温度	-20 ~ +80	°C
有感部の開口率	65	%
感度波長範囲	320 ~ 900	nm
最大感度波長	450	nm
検出効率	35	%
ダークカウント (Typ.)	1000	kcps
ダークカウント (Max.)	2000	kcps
時間分解能	250	ps
増倍率	5.15×10^5	-
増倍率の温度係数	8.2×10^3	/°C
降伏電圧	65±10	V
推奨動作電圧	$V_{BR} + 3.5^{*1}$	V
推奨動作電圧の温度係数	60	mV/°C



*Metal electrodes connecting to the internal electrodes are exposed on the sides of the ceramic package. To avoid short circuits, never allow other conductors to come in contact with these metal electrodes.

図 2.11: S12572-025C 外形寸法

*1 V_{BR} は降伏電圧を表す。

2.4 MPPC の基本接続回路

MPPC の基本接続回路を図 2.12 に示す。47k Ω の抵抗と 0.1 μ 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 段階構成し、バイアス電源から進入するノイズを遮断する。また、MPPC の信号を読み出す出力線には、0.47 μ F の結合コンデンサーを配置し、逆バイアス電圧の直流成分を除去している。使用するコンデンサーの耐圧は印加電圧の 70V に対して余裕が必要であり、TDK 社製の耐圧 100V 積層セラミック型を使用した。

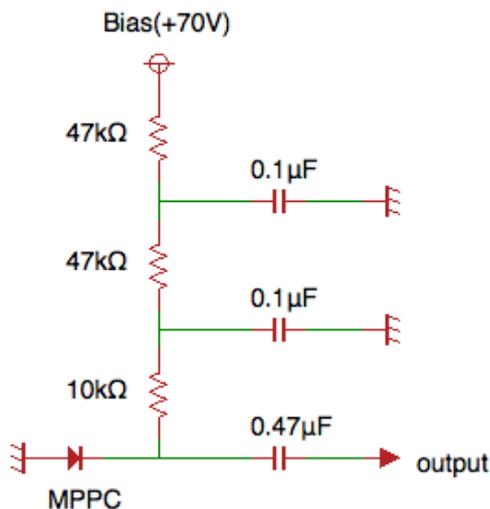


図 2.12: MPPC の基本接続回路

2.5 基礎特性

MPPC の基礎特性について説明する。

2.5.1 MPPC の基礎特性をセットアップ

MPPC の基礎特性を観察した実験の Block Diagram を図 2.13 に示す。MPPC 回路は図 2.12 に示したものを、MPPC は 1mm 角の (S10362-11-050C) を使用した。また、暗幕でアルミシャーシを包み遮光し、70V の逆電圧を印加した。

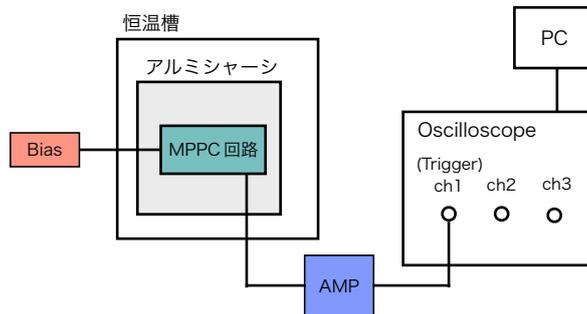


図 2.13: MPPC の基礎特性を観察した実験の Block Diagram

2.5.2 ダークパルス

室温に半導体を置いているため、電子-正孔対は、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、熱励起によって発生した電子-正孔対も増幅され、信号パルスとして検出される。これは本来検出したい光の入射による光電効果で発生した信号パルスと区別がつかない。この現象はランダムに発生する。これを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、また印加電圧が大きいくほど増加する。図 2.14 に、オシロスコープで観測した単一光電子 (1 p.e.) に対応する信号パルスを示す。

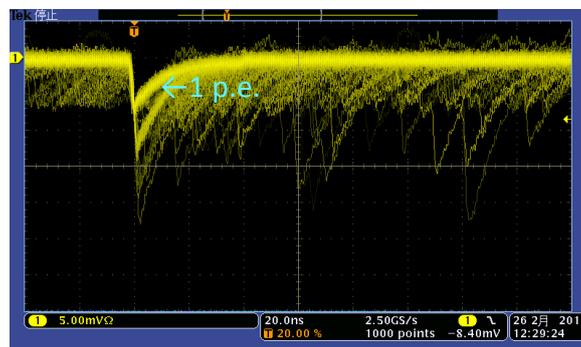


図 2.14: ダークパルス

2.5.3 クロストーク

ある APD ピクセルにおいて、熱電子や光電子に起因して電子雪崩を形成すると、その過程で二次的な光子 (特性 X 線) が放出される。図 2.15 に示すように、この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。この過程はピコ秒のオーダーで終了するのに対し、オシロスコープの時間分解能はナノ秒のオーダーであるため、二つの信号パルスは時間で分離されず重ね合わさって検出される。すなわちクロストークは、入射した光子数を実際より多く見せる効果がある。ダークパルスで 2 p.e. や 3 p.e. の波高パルスが検出される事象はクロストークによるものである。図 2.16 にオシロスコープで観測した波形を示す。

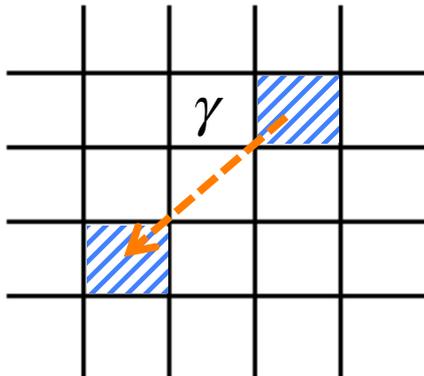


図 2.15: クロストークの概念図

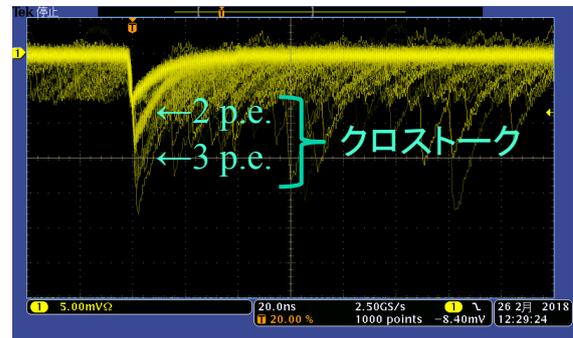


図 2.16: ダークパルスに起因するクロストーク成分

2.5.4 アフターパルス

ある APD ピクセルにおいて、ガイガー放電により増幅された電子の一部が半導体内の格子欠陥にトラップされることがある。この場合、トラップされた電子が、数十ナノ秒のオーダーの時間差で再放出され、再び電子雪崩を形成し、信号パルスが形成されることがある。温度が低いほど熱振動が小さくなるため、電子が格子欠陥にトラップされる確率が高くなり、アフターパルスは増加する。図 2.17 にオシロスコープで観測した波形を示す。

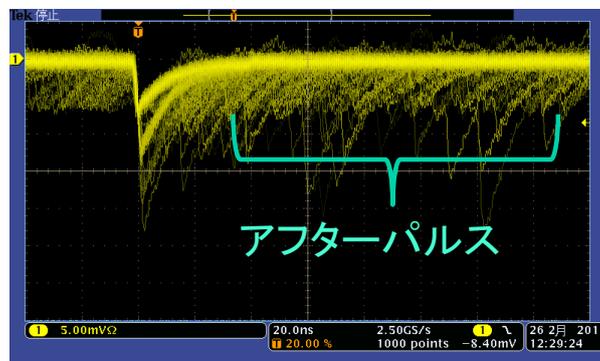


図 2.17: ダークパルスの直後に発生したアフターパルス成分

第3章 シンチレータ

シンチレータとは、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物質である。シンチレータには大別して有機シンチレータと無機シンチレータの2種類が存在し、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を用いた。

3.1 有機シンチレータ

有機シンチレータは、 π 電子を持つ有機分子の状態遷移を発光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 電子の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、添字の 0 は基底準位、1, 2, 3, … 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、規定励起準位 (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。全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の例をあげる。[4]

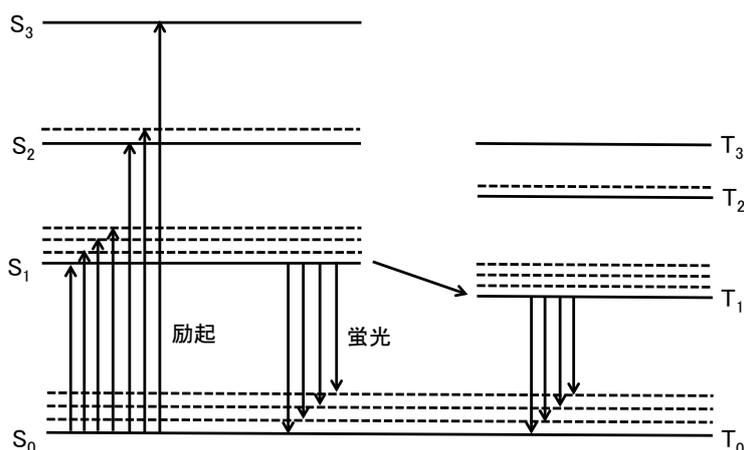


図 3.1: 有機シンチレータの発光原理

表 3.1: 有機シンチレータの例

	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、発光量が大きいものが多く、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。[5] 本研究では、以下にあげる $5\text{mm}\times 5\text{mm}\times 5\text{mm}$ 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。[6]

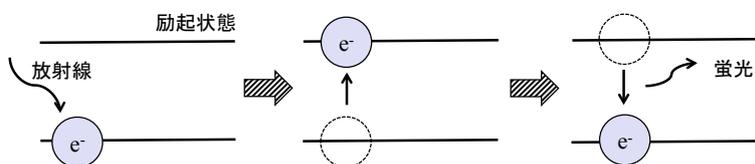


図 3.2: 無機シンチレーターの発光原理

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 [photons/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

入射光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捉えて、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、 $5\text{mm}\times 5\text{mm}\times 5\text{mm}$ の立方体形状をした Ce 添加 GAGG を用い、これを光検出器として、受光面 $1\text{mm}\times 1\text{mm}$ の S10362-11-050C 型 MPPC または受光面 $3\text{mm}\times 3\text{mm}$ の S12572-025C 型 MPPC を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 受光部に届く光量を増やす目的で、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、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 6 章で述べる。

第4章 エレクトロニクス

本実験では、MPPCの逆電圧印加、トリガー論理信号の生成にはNIM規格のモジュールであるエレクトロニクスを使用した。本章ではそのエレクトロニクスについて記す。

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。米国原子力委員会 (Atomic Energy Commission) において、1996 年に制定された「放射線測定モジュール標準規格 TID-20893」のことを NIM 規格といい、これに準拠し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、国やメーカーによらず、物理的、電氣的に完全な互換性を持つ。NIM モジュールを装着する箱状の標準ピンのことを NIM ピンと呼び、NIM ピン電源は装着した 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。本実験では、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、任意の width と周波数の Fast NIM 信号または TTL 信号を出力するモジュールである。本実験では LED のパルス点灯に使用した。

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。その増幅率は、Clock generator を接続した時の AMP 使用時と未使用時のオシロスコープの画面の比較により求めた。

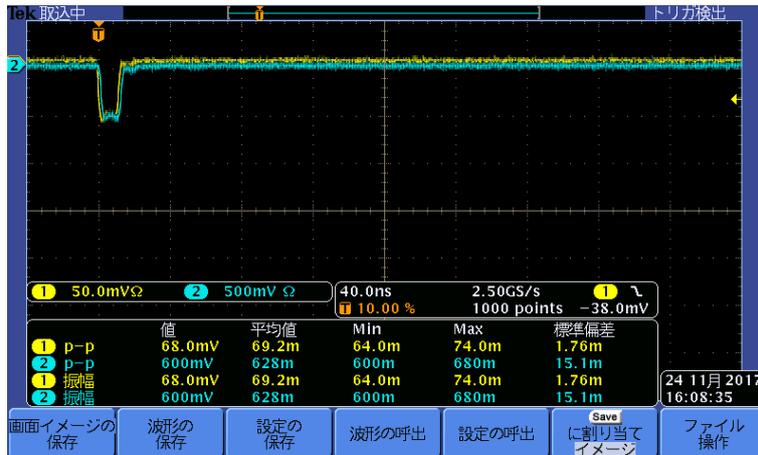


図 4.1: AMP の増幅率

図 4.1 より、AMP の増幅率を 9.1 ± 0.3 と求めた。

4.1.5 Discriminator

Discriminator は入力されたアナログ信号の波高が、しきい値電圧を超えたときに規格にのっとった方形波、すなわち 1bit のデジタル信号を出力するデバイスである。Discriminator は信号パルスが生成したとき、それをノイズから弁別する目的で使用する。後述するように、しきい値電圧は約 -20mV で使用した。

4.1.6 Coincidence

Coincidence は、複数のデジタル信号入力が同時に ON となったときのみ信号を出力する AND 機能を持つデバイスである。出力パルスの width は設定した値に固定される。後述するように、出力パルスの width は約 60ns とした。

第5章 MPPC およびエレクトロニクスの特徴測定

MPPC およびエレクトロニクスの特徴測定として、MPPC の増倍率測定を行った。

5.1 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

$$\text{増倍率} = \frac{\text{2つのピークの電荷量の差}}{\text{電気素量}} \quad (5.1)$$

と求められる。

温度が上昇す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次の電離を起こすのに十分大きくなる前に、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。また、逆電圧を上昇させると、キャリアの平均自由飛程の間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。つまり、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。本研究では、恒温槽を使用して温度を 25 °C で一定に保ち、逆電圧を変化させる測定を行った。

5.2 セットアップ

図 5.1 に Block Diagram、図 5.2 から図 5.5 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。LED 回路は、Clock Generator と LED の間に 100Ω の抵抗が直列に接続されたものである。また、2つの回路間には、LED から MPPC 受光面に到達する光量を適切に減らすとともに、LED を発光させる Clock generator のパルスが MPPC 読み出し系の雑音にならないように互いに静電遮蔽する目的で、ダンボールの表面にアルミテープを貼って、直径 2mm 程度の穴を開けた仕切りを入れ、全体が一点アースになるようにした。

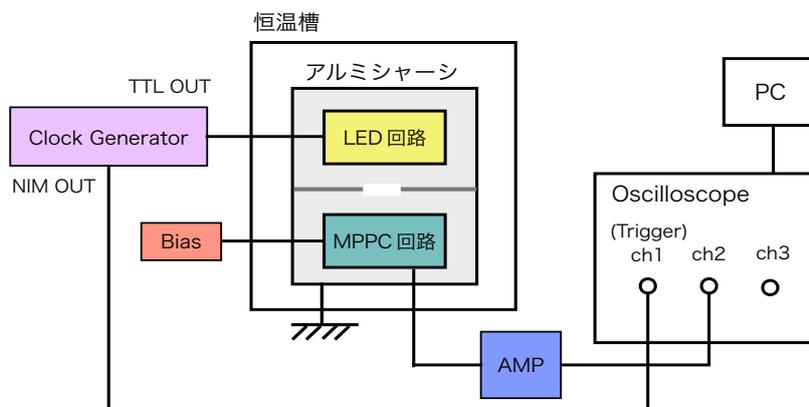


図 5.1: LED 点灯実験の Block Diagram



図 5.2: アルミシャーシ内のセットアップ



図 5.3: NIM モジュール



図 5.4: 恒温槽



図 5.5: デジタルオシロスコープ

- Bias 電源：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
- 恒温槽：日本プロアー株式会社製 LS-5 バイオチェンバー
- デジタルオシロスコープ：Tectronix 製 DPO 3034 Digital Phosphor Oscilloscope
- LED：日亜化学工業株式会社製 NSPB320BS

5.3 実験方法

LED のパルス発光により、1 パルスあたり平均数個の光子が MPPC 受光部に届くようにして、1mm 角 MPPC(S10362-11-050C)、3mm 角 MPPC(S12572-025C) の増倍率測定を行った。

LED を発光させるため Clock Generator からくり返し周波数 100Hz で約 30ns の幅を持つ TTL パルスを送った。LED には拡散キャップをつけて光を拡散させ、これがアルミシャーシ内の仕切り板にあけた直径 2mm の穴を通過して MPPC に達したものが作る信号パルスを測定した。3mm 角 MPPC は受光面が大きく、十分に減光させる必要があるため、3mm 角 MPPC を用いた実験では、LED に紙製の箱状マスクを 3 枚被せることにより条件を満たすようにした。

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、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ドやデータの送受信を行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、実行することにより、デジタルオシロスコープより波形データを取得する。これをテキスト形式で書き出したものが生データであり、それに対して後述する解析処理を行い、MPPC の増倍率を求めた。

5.4 生データ

以下に例として、3mm 角の MPPC(S12572-025C)、温度 25°C、逆電圧 67.7V のときのオシロスコープのスクリーン上のスナップショット (図 5.6) と生データの一部を示す。LED が点灯してから、MPPC の信号パルスが出力されていることがわかる。

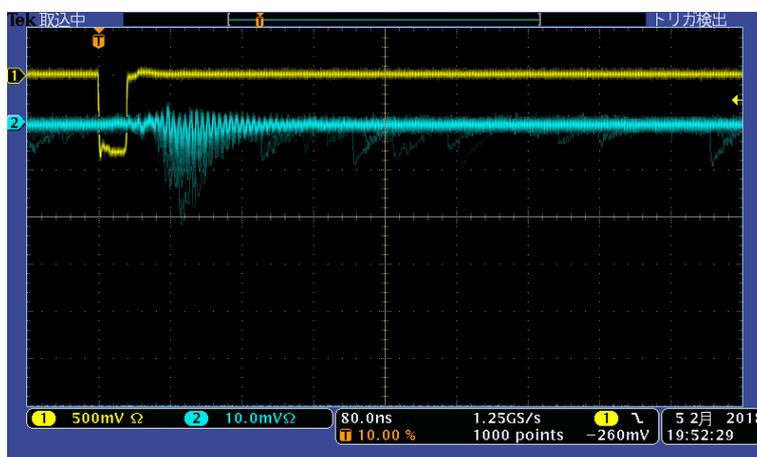


図 5.6: LED 点灯をトリガーにしたときのスナップショット

ch1(黄色) が Clock Generator が LED を発光させる TTL パルスと同期して出力する NIM パルス、ch2(水色) が AMP で増幅した後の MPPC の出力パルスである。

以下にテキスト形式の生データを抜粋して示す。

```

8.000e-10
 0 1000 48 49 50 50 49 50 50 50 50 50 47 48 51 49 47 47 50 50 47 48 48 48
49 48 48 49 50 50 50 48 50 48 50 49 48 47 50 49 50 49 49 50 51 50 48 47 47 50
50 48 50 49 50 50 49 48 49 50 50 50 44 49 49 50 50 48 49 50 50 47 48 49 49 49
49 48 48 49 49 46 50 50 50 50 48 47 49 50 51 49 46 50 49 51 49 47 48 51 50 49
48 49 50 48 47 48 50 50 48 48 48 48 51 52 49 49 50 48 51 49 49 49 50 50 49 47
46 51 49 50 47 49 50 50 49 49 50 50 50 48 48 49 50 51 50 50 48 52 50 49 46 48
49 51 49 52 49 48 48 48 46 49 50 49 50 48 47 51 51 55 53 50 52 51 49 49 49 51
50 51 50 50 50 50 43 44 45 50 50 48 46 41 40 44 47 47 49 52 47 41 39 40 47 48
...
 1 1000 48 46 48 48 51 50 47 47 48 50 49 50 49 49 51 49 49 48 50 52 49 49
48 49 49 47 48 47 50 50 49 49 46 49 50 50 47 49 49 50 50 48 50 50 51 50 47 49
49 48 49 49 50 48 50 49 49 49 48 50 51 49 48 48 48 50 48 48 50 50 49 48 47 48
48 50 48 49 51 51 48 48 47 49 50 48 48 48 48 47 49 48 47 49 50 48 50 48 48 49
49 50 49 49 51 49 47 47 49 49 49 50 48 49 50 49 49 48 49 50 49 48 47 47 49 49
47 50 48 49 49 47 48 48 50 51 48 46 48 49 50 49 50 50 51 49 48 46 48 48 50 48
47 47 47 51 50 46 50 49 47 46 45 46 49 50 50 46 50 50 51 50 50 50 51 52 51 46
46 49 53 51 50 48 48 49 48 49 49 54 52 48 46 45 48 49 54 54 55 52 48 47 47 51
...
 2 1000 50 50 51 47 49 48 50 45 46 50 50 49 48 46 49 51 50 50 48 52 50 50
49 48 51 50 49 49 48 49 50 49 49 47 50 52 50 47 49 50 50 50 48 49 49 49 49 47
49 50 52 50 48 50 48 53 51 49 48 48 47 49 47 48 48 50 49 48 47 46 50 50 49 46
50 49 49 49 48 50 49 50 50 49 48 50 49 48 46 49 51 49 47 48 50 49 49 49 48 48
50 50 49 47 48 51 51 49 49 48 50 50 49 50 47 50 50 49 47 48 51 50 49 49 50 50
51 49 51 49 49 51 50 46 49 50 52 49 46 48 48 49 49 48 50 48 48 48 48 46 46 50
50 49 49 52 50 49 48 45 48 50 49 49 45 48 50 50 49 54 53 50 50 51 50 50 48
50 50 51 54 49 48 45 49 51 51 53 51 50 48 46 46 47 51 54 56 50 46 49 48 49 48
...
 3 1000 48 48 49 52 48 49 48 52 51 50 47 48 47 50 50 48 49 50 52 49 48 48
49 51 50 50 49 48 50 49 50 48 49 51 49 50 48 49 49 48 49 51 51 49 50 48 51 50
51 50 49 47 50 50 52 49 50 50 50 48 49 48 49 51 50 49 49 48 50 50 49 47 50 52
52 49 49 48 50 52 49 48 50 49 50 48 50 50 49 51 50 48 50 51 51 50 48 50 48 52
52 48 49 50 51 47 48 48 49 50 50 51 49 50 51 50 49 47 50 51 51 49 51 48 51 51
48 50 51 50 50 50 49 51 51 51 49 48 52 49 48 50 50 52 51 53 48 49 49 52 49 50
49 46 51 51 48 49 50 51 47 48 43 48 47 50 50 47 51 52 51 50 50 52 50 51 49 48
48 50 51 49 51 51 48 48 49 51 53 54 53 49 44 44 47 46 47 50 50 47 45 43 43 43
└─┘

```

- 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 1.25GSample/s、すなわち時間間隔が、

$$\frac{1s}{1.25 \text{ GSample}} = 0.8 \text{ ns} \tag{5.2}$$

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で、イベント番号、このイベントが含むサンプル・アンド・ホールディングしたデータの数が書かれ、その後 8bit のデータが 1000 個分続く。DPO3034 型の仕様のため、8bit のデータは符号付き 7bit 整数で表され、-127 から +127 の値をとる。
- 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。

5.5 データ解析

5.5.1 波形データの積分

以下に例として、3mm 角 MPPC(S12572-025C)、温度 25°C、逆電圧 67.7V の生データを、付録 B 増倍率データ解析プログラムで処理したデータを示す。

0	48.860000	2.640400	5.860000	95.400000
1	48.940000	1.896400	14.940000	361.600000
2	49.020000	2.279600	11.020000	371.800000
3	47.680000	10.077600	6.680000	-84.800000
4	48.870000	1.733100	5.870000	-36.700000
5	49.110000	1.717900	11.110000	233.900000
6	49.080000	2.433600	15.080000	359.200000
7	48.940000	2.116400	4.940000	8.600000
8	49.090000	1.981900	6.090000	6.100000
9	48.750000	2.267500	20.750000	416.500000
10	49.070000	3.025100	13.070000	460.300000
...				

- 1 列目は、イベント番号を表す。
- 2 列目は、ゼロ点の値を表す。ここで、ゼロ点は 100 番目までのデータの平均と定義する。その理由は、trigger position を左から 10%、つまり 100 番目に設定しているため、MPPC の信号パルスの記録は必ずその後に入っており、逆にそこまでのデータは無信号時の状態が記録されているからである。

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

ここで、 i はサンプリング番号で、 x_i は i 番目のデータである。

- 3 列目は、ゼロ点の計算に用いたデータの分散を表す。

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

- 4 列目は、パルスのピークのデータからゼロ点を引き算したパルスハイトを表す。
- 5 列目は、信号パルスの積分値を表す。積分値は、信号パルスが到来する時間領域にあたる 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。

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

これは信号電荷を arbitrary unit で表したものになる。

5.5.2 波形データ積分値の分布

1. 波形データ積分値のヒストグラムには検出した光電子の個数 (p.e.) によって等間隔にピークが立つ。

2. 各ピークの中央値を Maximum Likelihood 法によりガウス分布でフィットして求める。1mm 角と 3mm 角の MPPC についての分布を図 5.7 と図 5.8 にそれぞれ示す。
3. 隣り合う 2 つのピークの間隔の平均、分散を求める。

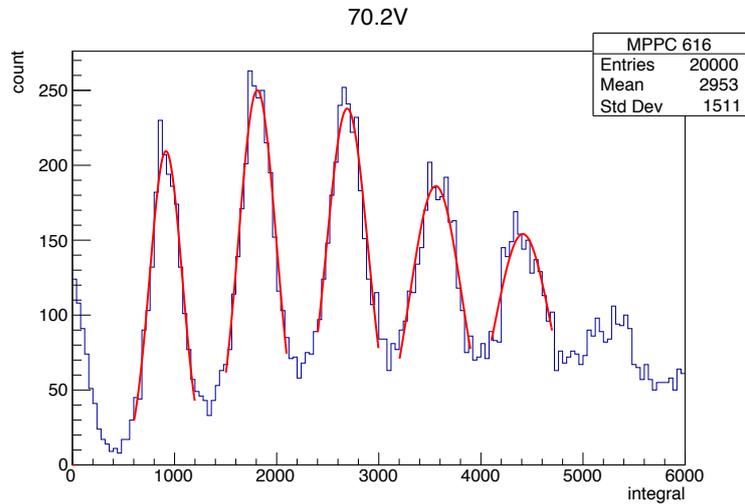


図 5.7: MPPC1mm 角 (S10362-11-050C) の信号パルスの分布

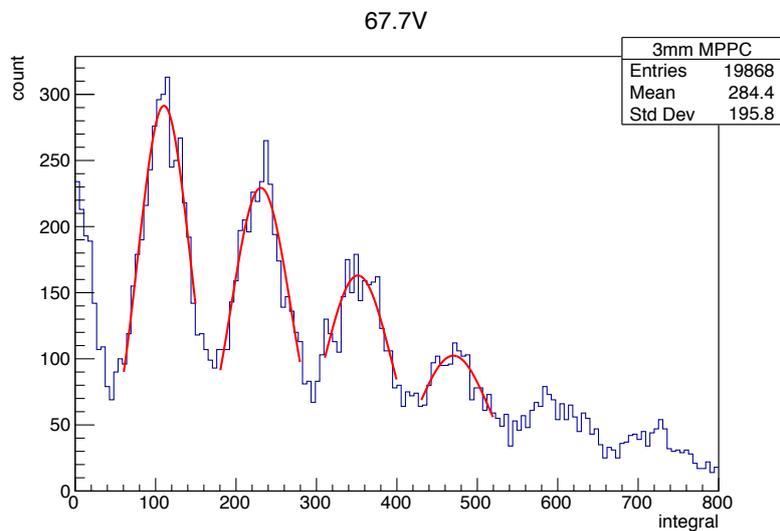


図 5.8: MPPC3mm 角 (S12572-025C) の信号パルスの分布

5.5.3 増倍率の算出

MPPC の増倍率は式 (5.1) で表すことができる。

$$\text{増倍率} = \frac{\text{2つのピークの電荷量の差}}{\text{電気素量}} \quad (5.1)$$

ここで、

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

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

$$\text{データの時間間隔} = 0.4 [\text{ns}] (1 \text{ mm 角 MPPC}), 0.8 [\text{ns}] (3 \text{ mm 角 MPPC}) \quad (5.8)$$

$$\text{デジタルオシロスコープの抵抗値} = 50 [\Omega] \quad (5.9)$$

$$\text{アンプの増幅率} = 9.1 \quad (5.10)$$

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

である。波形データ積分値は信号電荷を arbitrary unit で表したもので、2 つのピークの間隔の平均つまり 1p.e. の信号電荷の平均に LSB 電圧を乗じて、電圧へ換算するとともに、デジタルオシロスコープの入力抵抗値で割り、さらにデータの時間間隔をかけることにより、電荷の絶対値となる。最後にアンプの増幅率で割り、MPPC が出した信号電荷を得る。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 の増倍率を得る。

5.6 結果

温度一定で逆電圧を変化させた際の増倍率測定の結果を以下に示す。

5.6.1 MPPC1mm 角 (S10362-11-050C) の増倍率

表 5.1: MPPC1mm 角 (S10362-11-050C) 電圧変化による増倍率

	逆電圧 [V]	増倍率
出荷時に検査された値	70.19	7.51×10^5
測定値	69.7	$(5.04 \pm 0.19) \times 10^5$
	70.2	$(7.5 \pm 0.3) \times 10^5$
	70.7	$(9.5 \pm 0.4) \times 10^5$

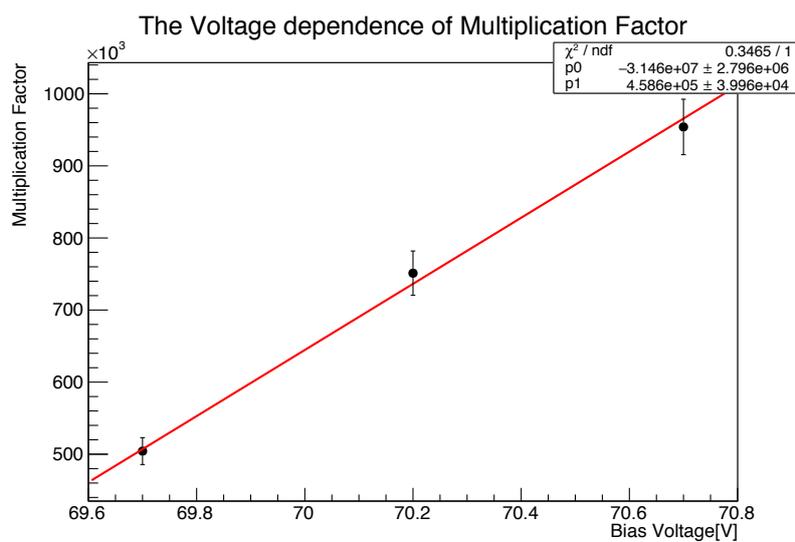


図 5.9: MPPC1mm 角 (S10362-11-050C) 電圧変化による増倍率

この測定結果は出荷時検査の値とよく一致した。

5.6.2 MPPC3mm 角 (S12572-025C)

表 5.2: MPPC3mm 角 (S12572-025C) 電圧変化による増倍率

	逆電圧 [V]	増倍率
出荷時に検査された値	67.71	5.14×10^5
測定値	67.2	$(3.61 \pm 0.15) \times 10^5$
	67.7	$(4.13 \pm 0.15) \times 10^5$
	68.2	$(4.73 \pm 0.17) \times 10^5$

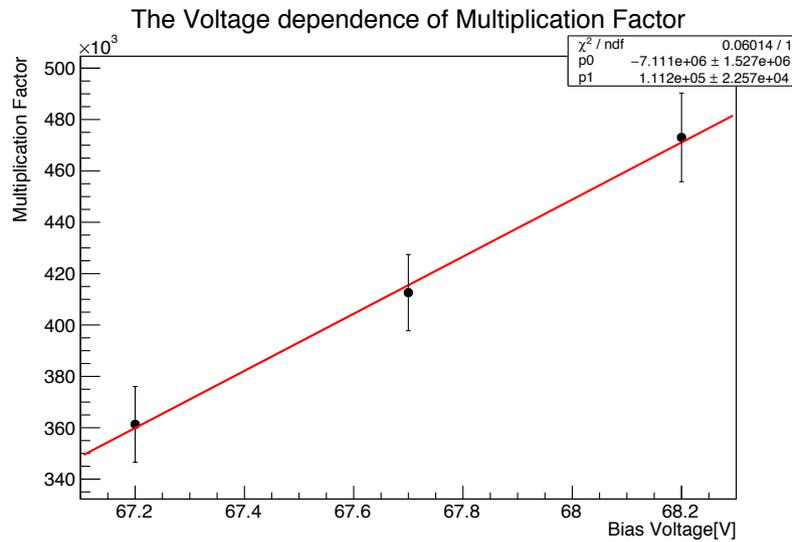


図 5.10: MPPC3mm 角 (S12572-025C) 電圧変化による増倍率

この測定結果は出荷時検査の値より、20% 程度小さい増倍率となった。この増倍率の絶対値は γ 線検出の時間分解能に直接の影響はない。

第 6 章 ^{137}Cs 線源と ^{22}Na 線源が発する γ 線の検出

GAGG シンチレーターを MPPC 受光部に取り付けた検出器で、 ^{137}Cs が発する 662keV の γ 線と ^{22}Na が発する 511keV と 1275keV の γ 線を検出する実験を行った。

6.1 セットアップ

図 6.1 にこの実験の Block Diagram 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。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、この測定ではセルフトリガーのセットアップで行った。図 6.1 において ^{137}Cs と示した場所が線源を置く位置で、 ^{22}Na を使用する際も同様である。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 6mm の穴を開けている。これらを恒温槽に入れ、温度を 25 °C に保って測定した。

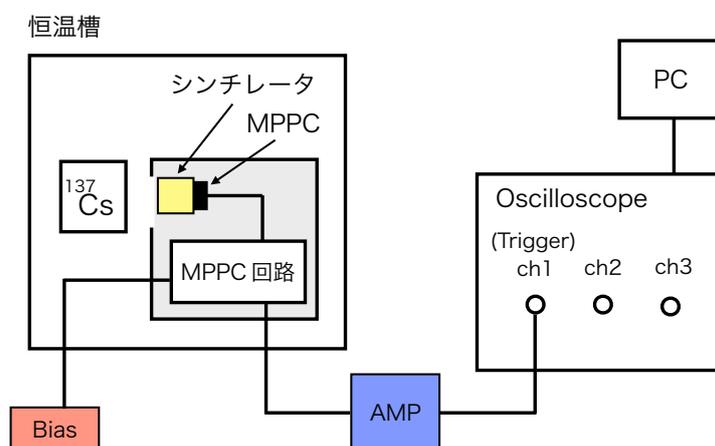


図 6.1: γ 線の検出実験の Block Diagram

6.2 実験方法

6.1 節で述べたセットアップを用いて、1mm 角 MPPC(S10362-11-050C) と 3mm 角 MPPC(S12572-025C) を使用し、逆電圧は 70.2V(1mm 角 MPPC) と 67.7V(3mm 角 MPPC) とした。図 6.2、図 6.3、図 6.4 にデジタルオシロスコープのスナップショットを示す。トリガーレベルはダークパルスを拾わないよう 5 p.e. から 6 p.e. 相当またはそれ以上に設定した。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 番目に集中していることと、GAGG の発光減衰時間が約 90ns であることから、積分範囲を 60~999 までに設定した。デジタルオシロスコープのメモリーバッファは新たにトリガーされたときだけ更新されるので、次のトリガーまでの間にデータの読み出しの命令が実行されると、同じデータが読み出されてしまう。直前のイベントと重複したレコードは配列の値の比較によって判別できるので、これを除いたイベントのみを生データファイルに書き込むようにした。



図 6.2: 1mm 角 MPPC と ^{137}Cs 線源を用いたときの波形のスナップショット

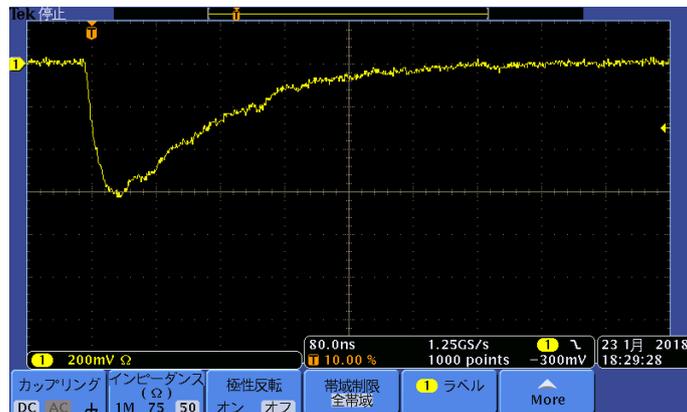


図 6.3: 3mm 角 MPPC と ^{137}Cs 線源を用いたときの波形のスナップショット



図 6.4: 3mm 角 MPPC と ^{22}Na 線源を用いたときの波形のスナップショット

6.3 波高分布

^{137}Cs 線源からの γ 線が入射したときの波高分布のうち 1mm 角 MPPC による読み出しの場合を図 6.5、3mm 角のものの場合を図 6.6 に、 ^{22}Na 線源からの γ 線が入射したときの波高分布を図 6.7 に示す。1mm 角 MPPC と ^{137}Cs 線源を用いたときは、積分値が平均 7900 程度の分布が見られる。3mm 角 MPPC と ^{137}Cs 線源を用いたときは、積分値 4000 から 14000 の領域に分布するのがコンプトン散乱によるもので、積分値 14000 から 20000 の領域に分布するのが光電効果によるものであると考えられる。3mm 角 MPPC と ^{22}Na 線源を用いたときは、積分値 11000 から 13500 の領域に分布するのが 511keV の γ 線が光電効果を起こしたものの、積分値 28000 から 38000 の領域に分布するのが 1275keV の γ 線が光電効果を起こしたものであると考えられる。

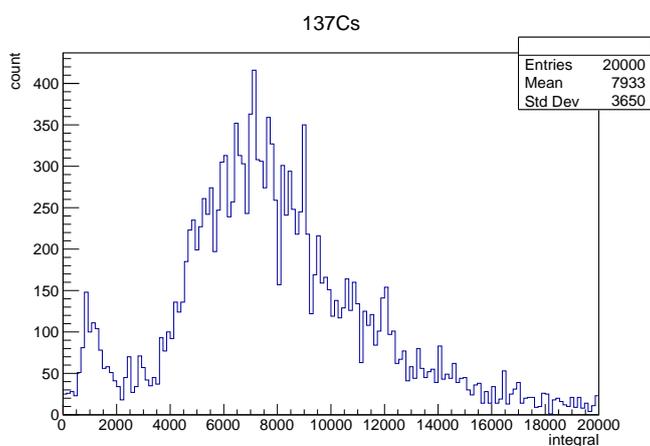


図 6.5: 1mm 角 MPPC と ^{137}Cs 線源を用いたときの波高分布

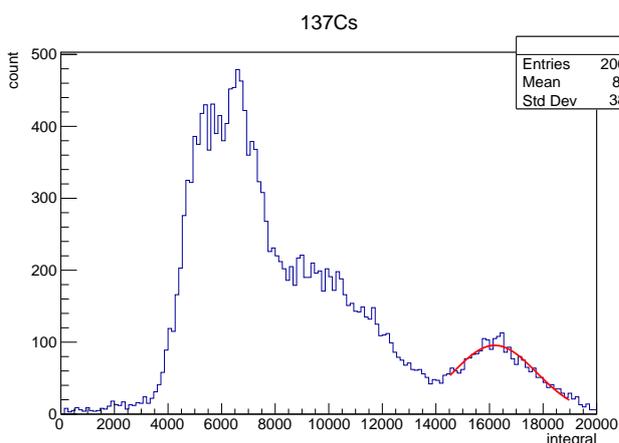


図 6.6: 3mm 角 MPPC と ^{137}Cs 線源を用いたときの波高分布

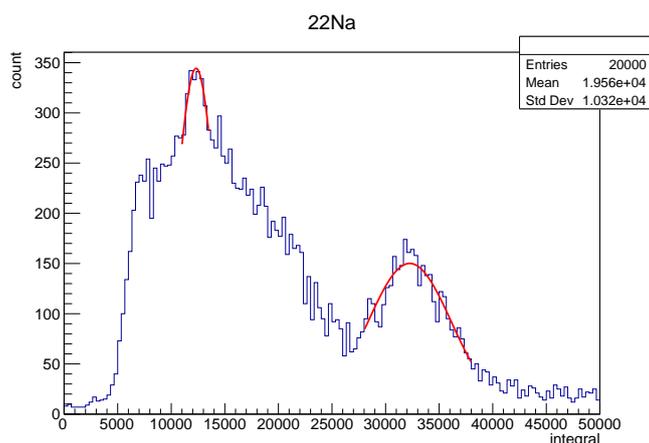


図 6.7: 3mm 角 MPPC と ^{22}Na 線源を用いたときの波高分布

1mm 角 MPPC を用いたときは、3mm 角 MPPC を用いたときのような光電効果やコンプトン散乱による波高の構造を見ることはできなかった。3mm 角 MPPC は、1mm 角 MPPC の 9 倍受光面が大きい。そのため、検出するシンチレーション光子の数が増したため、その統計的ふらつきが小さくなることによりエネルギー分解能が改善され、より繊細な波高分布の構造を測定可能になったと考えられる。

また、図 6.8 に、積分値とエネルギーの関係を示す。図 6.6,6.7 の波高分布のピークをガウス分布でフィットし、得られたピークの値を積分値として用いた。3 点がほぼ直線上にのっていることが確認できた。このエネルギー領域では、製作したシンチレーションカウンターは検出したエネルギーに対して、線型性を保っていることがわかった。

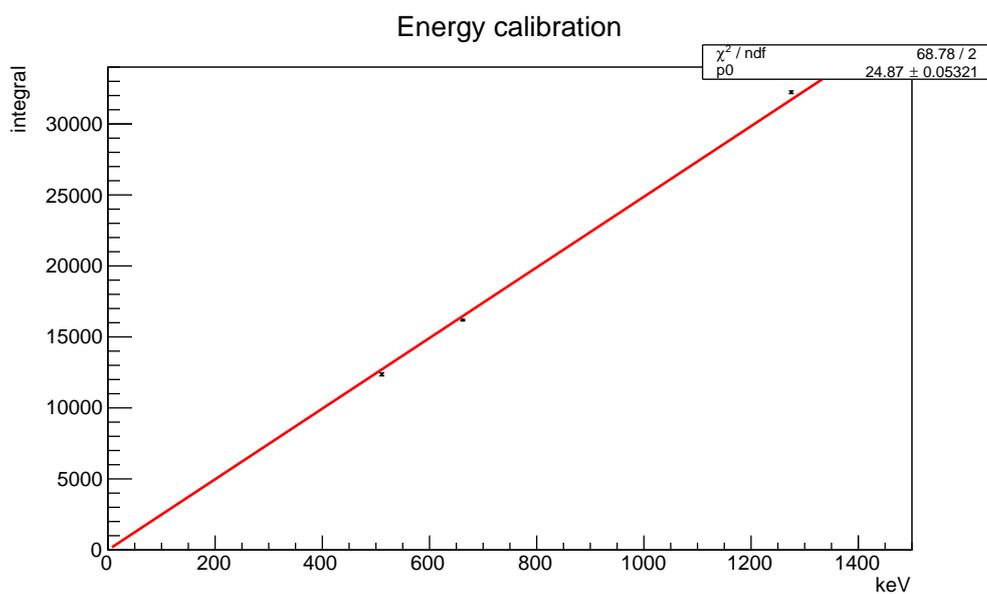


図 6.8: 波形の積分値と γ 線のエネルギーの関係

第7章 ^{22}Na 線源が発する2つの γ 線の同時検出と シンチレーションカウンターの時間分解能測定

前章の測定に用いたシンチレーションカウンターをもう一つ用意し、 ^{22}Na 線源が発する 511keV の2つの γ 線を同時に検出する実験を行った。

7.1 セットアップ

第1章で記したように、 ^{22}Na 線源からは 511keV の2つの γ 線が互いに逆方向に放出される。この γ 線がシンチレーターに届くように静電遮蔽したアルミシャーシの側面に直径 6mm の穴を開け、そこに 5mm×5mm×5mm の GAGG シンチレーターを置いた。シンチレーション先の読み出しに用いた 3mm 角 MPPC がシャーシ内で固定されるように、発泡スチロールを切り出したものを用いた。これを図 7.1、図 7.2 に示す。このようにセットしたシンチレーションカウンターを2つ作成し、恒温槽に設置して温度を 25℃に保った。

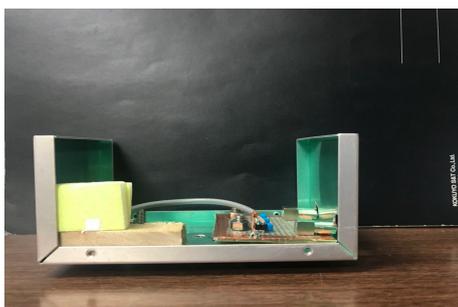


図 7.1: アルミシャーシの中を横から見た様子



図 7.2: アルミシャーシの中を上から見た様子

7.2 実験方法

図 7.3 のように、片方のシンチレーションカウンターの穴を開けた部分に線源を貼り付け、もう一方のシンチレーションカウンターの穴を開けた部分に合わせて配置した。69.5V 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して PC に波形データを取り込んだ。



図 7.3: アルミシャーシに線源を貼り付けている様子



図 7.4: 恒温槽の中の様子

図 7.5 に、この実験の Block Diagram を示す。

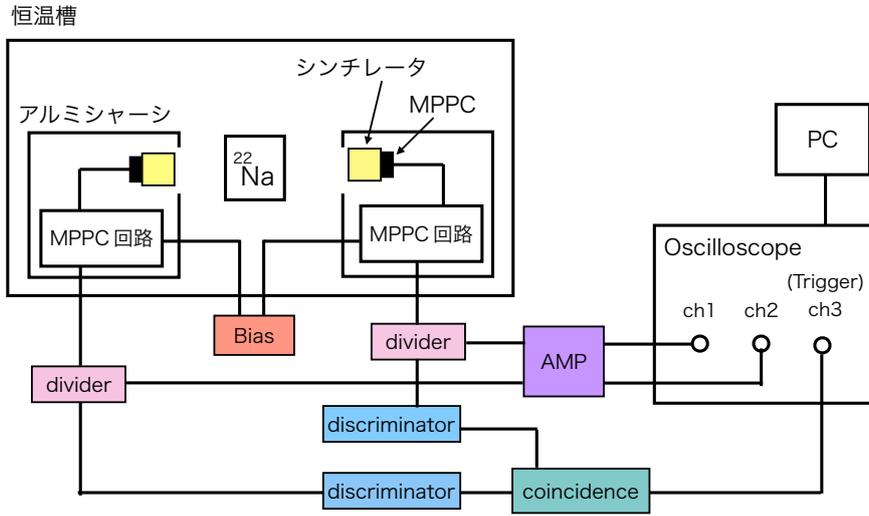


図 7.5: γ 線同時検出実験の Block Diagram

2つのシンチレーションカウンターそれぞれのMPPCからの出力をdividerで2つに分け、それぞれAMPとdiscriminatorに接続する。AMPからの出力はそれぞれオシロスコープのch1とch2に接続した。2つのdiscriminatorからのパルスでcoincidenceを取り、これをオシロスコープのch3に接続し、トリガーとした。discriminatorのthresholdはch1に接続している方が23.6mVで、ch2に接続している方が23.1mV、widthはどちらも約61nsに設定した。3mm角MPPCはSerial No.4L000368のものと、No.4L000369のものを使用した。

γ 線のレートはダークパルスよりも低いので、前章で単一 γ 線検出時に行った手法と同様に、一回前にアクセスしたデータと比較して、変化したときのみ生データのファイルに出力するようにしてデータ収集した。

波高を求める際に、トリガー位置は1000点中の100番目に集中していることと、GAGGの発光減衰時間が約90nsであることから、積分範囲を100~1000に設定した。

7.3 波高分布

以上のセットアップでのカウンター 1, 2 それぞれの波高分布を図 7.6 に示す。

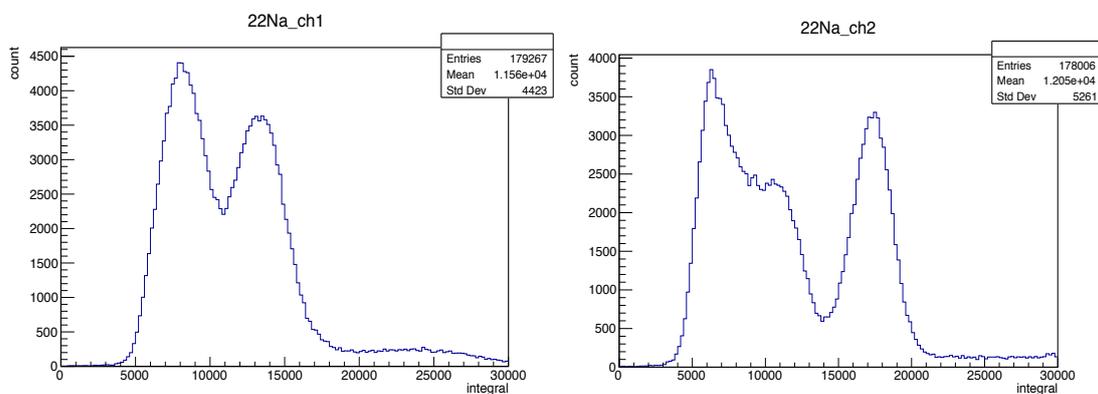


図 7.6: ^{22}Na 線源を用いたときの波高分布

7.4 フィットに用いる関数の決定

フィットに用いる関数を決定するため、図 7.6 で示した全イベントについて、カウンターごとに、オシロスコープの横軸 i (つまりサンプル・アンド・ホールドしたデータの時間を示すインデックスである) ごとの平均を計算し、波形の平均の分布を作成した。例として、図 7.7 にカウンター 2 の波形の平均の分布を示す。

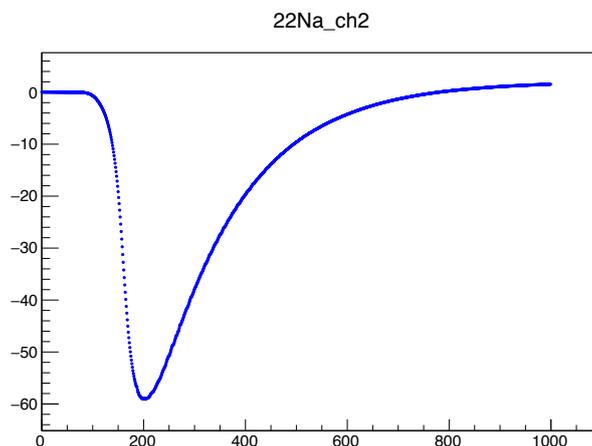


図 7.7: カウンター 2 の波形の平均

図 7.7 に示した波形は、パルスの立ち上がりが鈍っていて、イベントごとのパルスをフィットし、パルスのスタート時刻を求める際にその決定精度を劣化させるおそれがある。パルスの立ち上がりが鈍るのは、Time Walk Effect が原因である。Time Walk Effect とは、パルスの大きさが異なると、Discriminator の threshold

を超えるタイミングが異なるのでパルスのスタート時刻に影響を与えてしまうことである。(図 7.8)

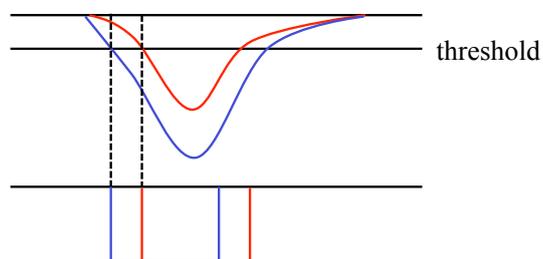


図 7.8: Time Walk Effect のイメージ図

Time Walk Effect を考慮し、図 7.9 の赤線で囲まれた光電効果による全吸収ピークに対応する波高が揃ったイベントのみを使用し、同様に波形の分布を作成した。図 7.10 にカウンター 2 の波形の平均の分布を示す。

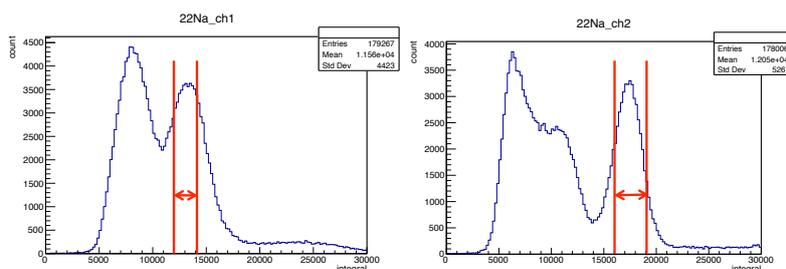


図 7.9: ^{22}Na 線源を用いたときの波高分布 (cut)

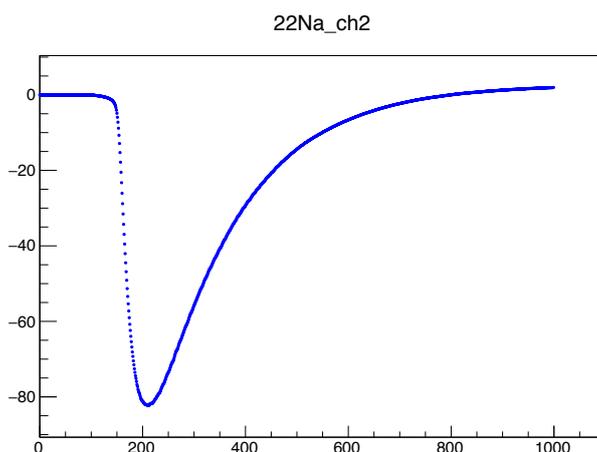


図 7.10: 0.511MeV の γ 線の全吸収ピークに当たる波高のイベントのみによる波高の平均

図 7.7 と比較し、パルスの立ち上がり部分の鈍りが改善されたので、この平均の波形を標準偏差を示すエラーバー付きで用い、フィットに用いる関数 [9] のパラメーターを決定する。

$$f(t) = \frac{a}{n^n e^{-n}} \left(\frac{b(t-t_0)}{\tau} \right)^n \exp \left(-\frac{b(t-t_0)}{\tau} \right) \quad (7.1)$$

式 (7.1) 中の変数について説明する。

- n : 波形を表現する次数
- a : 波高
- t_0 : パルスのスタート時刻
- τ : 時定数
- b : 波形の横幅を調節

以上の 5 つのパラメータでフィットし、返ってきた値をイベントごとのフィットに使用する。図 7.11 にエラーバー付きの波形の平均を示す。

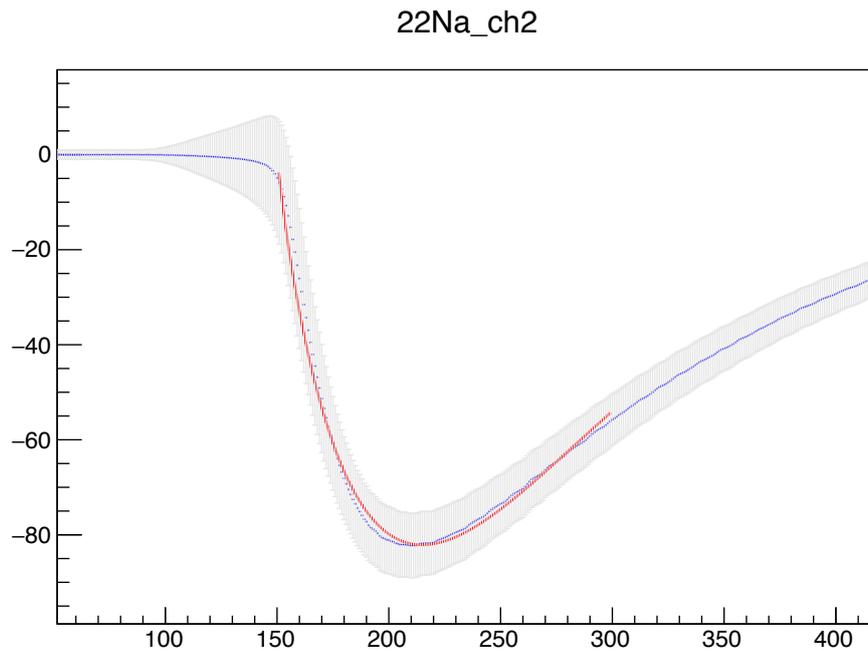


図 7.11: カウンター 2 のフィットに用いる関数

青線が図 7.10 と同様の波形の平均、灰色線がエラーバー、赤線がフィットした関数である。また、フィットにより返ってきた値を表 7.1 に示す。

表 7.1: フィットにより返ってきた値

	カウンター 1	カウンター 2
n	0.950334	0.890212
τ	174.864	79.1982
b	2.40951	1.08469

7.5 時間差分解能測定

7.5.1 イベント選別なし

Time Walk Effect を考慮し、カウンター 1, 2 ともに光電効果を起こしているイベントのみを使用してフィットし、パルスの立ち上がりの時間 t_0 を得た。パルスごとに波形をフィットするとき、表 7.1 の値に固定し、 a と t_0 だけを動かして最ももっともらしい t_0 の値をパルスごとに得た。カウンター 1 のパルスの立ち上がりの時間 $t_0(\text{I})$ とカウンター 2 のパルスの立ち上がりの時間 $t_0(\text{II})$ の差、 $t_0(\text{I}) - t_0(\text{II})$ の分布を図 7.12 に示す。

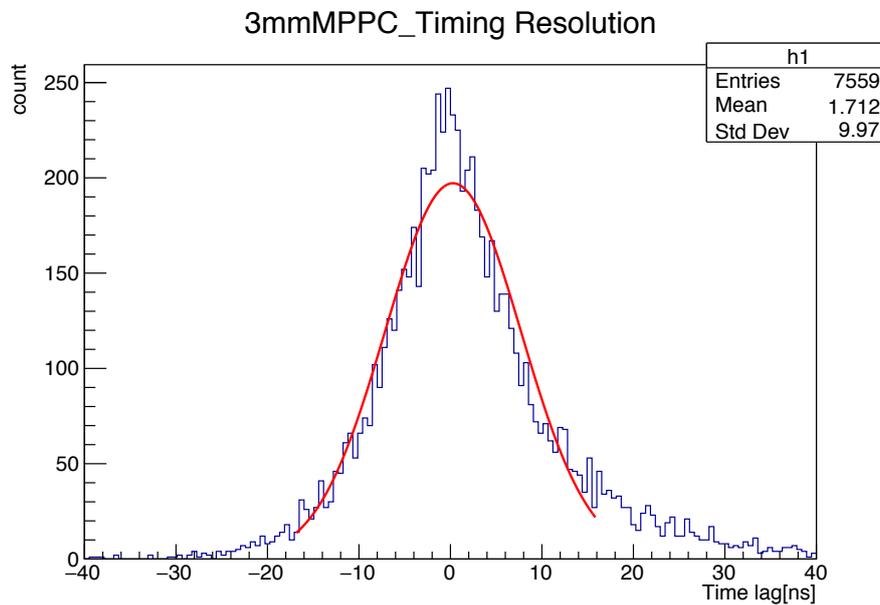


図 7.12: $t_0(\text{I}) - t_0(\text{II})$ 分布

ガウス分布でフィットし、その広がりより求めた時間差分解能は $(7.42 \pm 0.09)\text{ns}$ となった。右側にテールがある。これはカウンター 2 に比べ、カウンター 1 の t_0 が遅れていることを示している。このテールの原因を追求するため、パルスごとのフィットの様子を確認した。

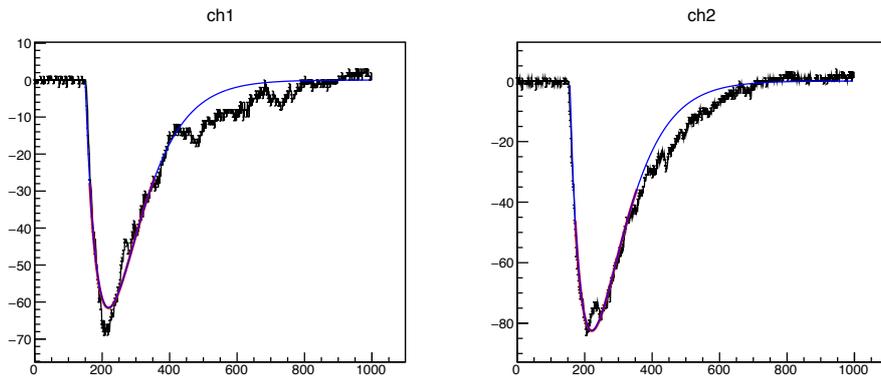


図 7.13: うまくフィットできたパルスの例

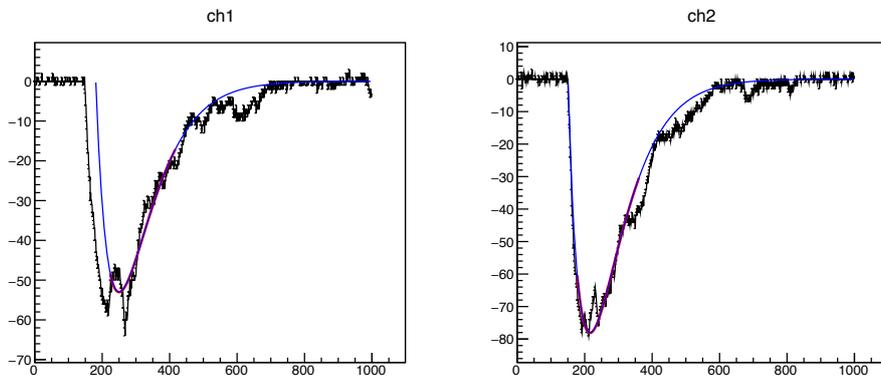


図 7.14: うまくフィットできていないパルスの例

すると、図 7.13 のように、パルスの立ち上がりとフィットが合っているイベントと、図 7.14 の ch1 のように、パルスの立ち上がりとフィットが合っていないイベントがあることがわかった。これは、フィットをする際に、パルスのピークに合わせてフィットをしていることが原因である。図 7.14 の ch1 のように、ダブルパルスかつ 2 つめのパルスの方が大きいイベントでは、フィットが 2 つめのパルスに合わせて行く場合があるため、本当のパルスの立ち上がり時間より遅い t_0 が返ってくる。また、カウンター 2 に比べ、カウンター 1 のほうがダブルパルスの頻度が高かったため、図 7.12 において右側にテールがより顕著に見られた、ということがわかった。

7.5.2 イベント選別あり

パルスの立ち上がり時間とフィットが合っているイベントのみに対して、時間差分解能を求めるため、イベント選別を行った。7.5.1 節で述べたように、フィットをする際に、パルスのピークに合わせてフィットをしている。そこで、パルスのピーク時の横軸の値 t_{\min} とし、カウンター 1, 2 ともに t_{\min} の分布を求めた。図 7.15 に t_{\min} の分布を示す。

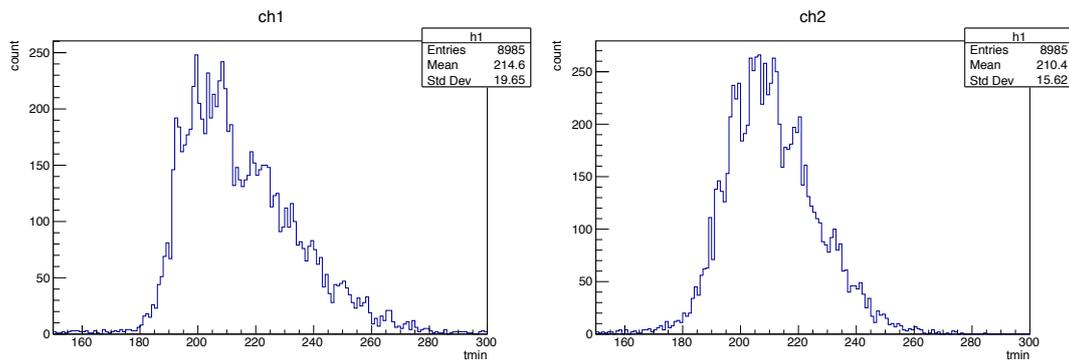


図 7.15: カウンター 1,2 それぞれの t_{\min} の分布

カウンター 1, 2 ともに $t_{\min} \simeq 215$ 付近で分布に落ちこみ (ディップ) があり、パルスの立ち上がりに正しくフィットした場合と、ダブルパルスの 2 つ目のパルスに引きずられた場合は、ここで大別されると考え、 t_{\min} が 215 より小さいイベントのみを使用し、時間差分解能を求めることにした。図 7.16 にイベント選別前のカウンター 1, 2 の t_0 の分布を、図 7.17 に選別後のカウンター 1, 2 の t_0 の分布を示す。

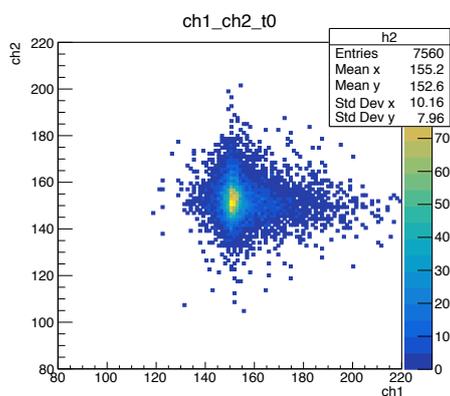


図 7.16: それぞれの t_0 の 2 次元分布 (cut なし)

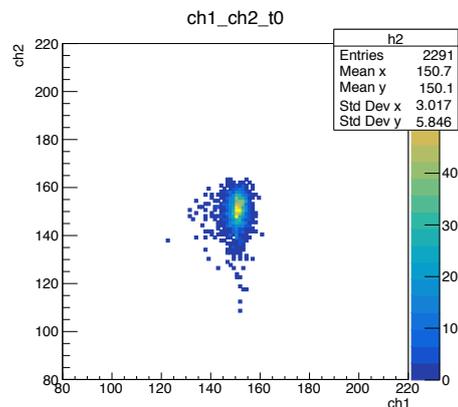


図 7.17: それぞれの t_0 の 2 次元分布 (cut あり)

それぞれ横軸がカウンター 1 の t_0 、縦軸がカウンター 2 の t_0 である。イベント選別前は分布の右側に広がりが見られるが、イベント選別後は分布の広がりが小さくなったことがわかる。イベント選別後のコアの部分のみを使用した際の、 $t_0(\text{I}) - t_0(\text{II})$ の分布を図 7.18 に示す。

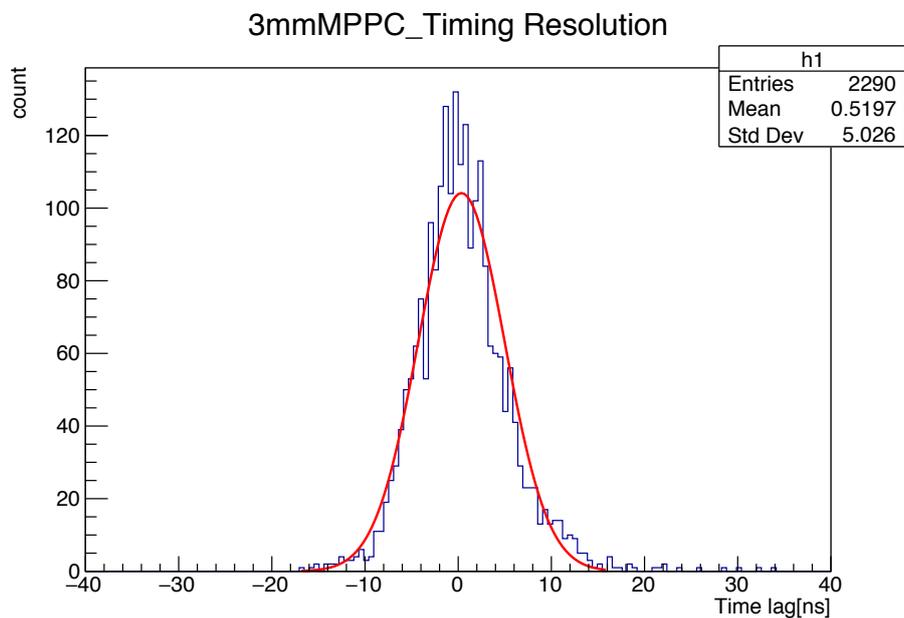


図 7.18: イベント選別後の $t_0(\text{I}) - t_0(\text{II})$ 分布

図 7.12 で見られたテールがなくなり、分布の広がり小さくなった。また、ガウス分布でフィットし、その広がりより求めた時間差分解能は $(4.67 \pm 0.07)\text{ns}$ となった。

7.5.3 結果

イベント選別前後それぞれの結果を表 7.2 にまとめる。

表 7.2: 時間差分解能

	時間差分解能 [ns]
イベント選別なし	7.42 ± 0.09
イベント選別あり	4.67 ± 0.07

7.6 考察

7.6.1 GAGG シンチレーター

7.5.1 節で述べたように、カウンター 2 に比べ、カウンター 1 がダブルパルスの頻度が高かった。これはカウンター 1 に使用した GAGG シンチレーターが原因ではないかと仮定し、カウンター 1, 2 の GAGG シンチレーターのみを交換したセットアップを作成し、同様の実験を行った。このセットアップでの、 $t_0(\text{I}) - t_0(\text{II})$ の分布を図 7.19 に示す。

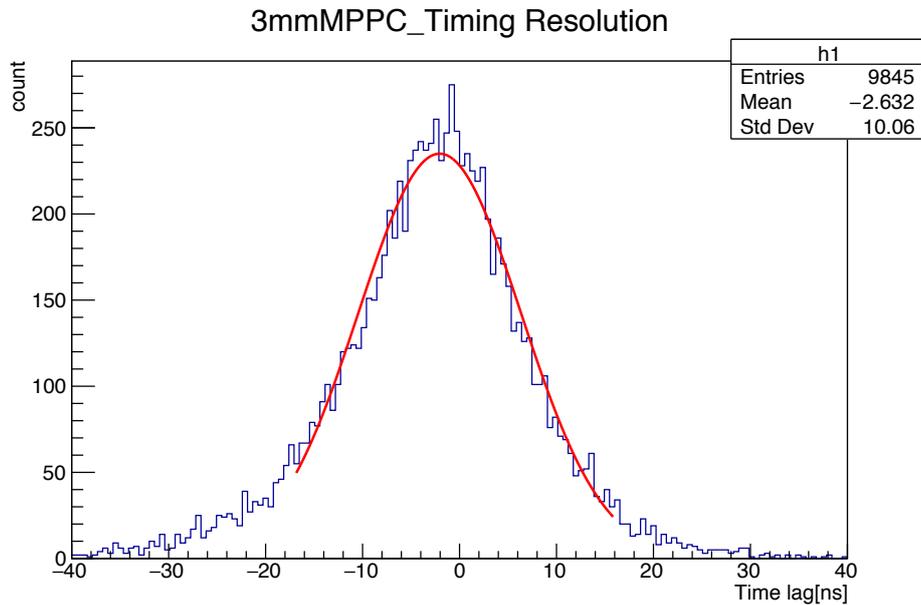


図 7.19: シンチレーターを交換した実験の $t_0(\text{I}) - t_0(\text{II})$ 分布

図 7.12 では、右側にテールが見られたのに対し、図 7.19 では左側にテールが見られた。つまり、これまでカウンター 1 で使用していた GAGG シンチレーターの方がダブルパルスの頻度が高い、ということがわかった。

7.6.2 検出光子数

カウンター 1, 2 共に検出光子数を見積もり、図 7.6 の分布の広がり統計によるふらつきのみであるのか、他の原因も含まれているのかを検討した。以下に手順と結果を示す。

図 5.10 より、増倍率を見積もった。7.2 節にあるように逆電圧は 69.5V であるので、

$$\begin{aligned}
 \text{増倍率} &= (1.112 \times 10^5)V - (7.111 \times 10^6) \\
 &= (1.112 \times 10^5) \times 69.5 - (7.111 \times 10^6) \\
 &\simeq 6.2 \times 10^5
 \end{aligned}
 \tag{7.2}$$

式 (5.1), (5.6) より、

$$\begin{aligned}
 \text{2つのピークの間隔の平均} &= \frac{\text{増倍率} \times \text{デジタルオシロスコープの抵抗値} \times \text{アンプの増幅率} \times \text{電気素量}}{\text{LSB 電圧} \times \text{データの時間間隔}} \\
 &= \frac{(6.2 \times 10^5) \times 50 \times 9.075 \times (1.602 \times 10^{-19})}{(6.25 \times 10^{-3}) \times (0.8 \times 10^{-9})} \\
 &\simeq 9
 \end{aligned}
 \tag{7.3}$$

また、図 7.6 より、光電吸収のピークの値はカウンター 1 では 13500、カウンター 2 では 17500 である。これらの値より見積もった検出光子数やふらつきの値を表 7.3 にまとめる。

表 7.3: 検出光子数

	カウンター 1	カウンター 2
検出光子数 n	1500	1944
検出光子数の統計的ふらつき $\frac{\sqrt{n}}{n}$	0.026	0.023
波高分解能 $\frac{\sigma_E}{E}$	0.152	0.08

カウンター 1, 2 共に、検出光子数の統計的ふらつきの見積値に比べ、波高分解能 $\frac{\sigma_E}{E}$ の値が大きくなった。つまり、統計的なふらつきのみならず、他の原因が含まれていることがわかった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にお世話になりました。指導教官の宮林謙吉先生には、実験の原理を一から詳しく教えて頂きました。また、実験が行き詰まったときには、たくさんのアドバイスを頂きました。お忙しい中、私たちに多くのことを教えて頂きありがとうございました。林井久樹先生は、4年生部屋にコーヒーを飲みに来られる際に私たちの様子を見て下さったり、質問すると私たちがわかるまで丁寧に教えて下さいました。下村真弥先生には、ゼミで高エネルギー物理学の基礎から詳しく教えて頂きました。また、ROOTの使い方などを時間をかけて教えて頂きました。蜂谷崇先生には、ミーティング中に鋭い質問をして頂いたり、またどうすれば上手く関数をフィットできるかを考えて下さいました。皆様ありがとうございました。

研究室の先輩方は皆優しくて過ごしやすかったです。同回生とはいつも笑いが絶えなくて、とても楽しかったです。最高のメンバーでした。皆様のおかげで、世界一ホワイトな研究室で一年を過ごすことができました。ありがとうございました。

多くの方々の協力により、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、謝辞とさせていただきます。

付録 A 増倍率データ収集プログラム

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

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

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

    int nevt = 20000;//event number
    CLINK *clink;
    clink = new CLINK;
    static char* serverIP = "10.0.1.105";

    //-- open scope
    if (vxi11_open_device(serverIP , clink) != 0){
        printf ("Couldn 't open scope.\n");
        exit(1);
    }

    //-- buffer to receive data block.
    static char wf[10000];
    char buffer[40];

    int ret;
    ret = vxi11_send(clink , "HOR:SCA 80E-09"); //Horizontal 80 ns/div
    ret = vxi11_send(clink , "CH1:SCA 500E-03");//ch=1 vertical 500mV/div
    ret = vxi11_send(clink , "CH2:SCA 10E-03");//ch=2 vertical 10mV/div

    ret = vxi11_send(clink , "TRIG:A:EDGE:SOU CH1");//triger type = edge.ch=1
    ret = vxi11_send(clink , "TRIG:A:EDGE:SLO FALL");//slope control=fall
    ret = vxi11_send(clink , "TRIG:A:LEV:CH1 -260E-03");//triger level = -260mV
    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 , "CH2:POS 2.0"); //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"); //reng = -128~127
        ret = vxi11_send(clink , "DAT:STAR 1");
        ret = vxi11_send(clink , "DAT:STOP 1000");

        ret = vxi11_send(clink , "DAT:SOU CH2");//Digitize ch=2 signal.
```

```
ret = vx111_send(clink , "CURV?");//get data
long bytes_returned = vx111_receive_data_block(clink , wf, 10000, 1000);

printf(" %5d %5d ", iev, bytes_returned);
fprintf(fp," %5d %5d ", iev, bytes_returned);

for (int i = 0 ; i < 1000; i++){
    fprintf(fp,"%d ",(char)wf[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; //horizontal axes range.
    int iev, nsample; //Event number and number of sampling.
    int siny[10000];
    FILE *fp;
    FILE *fpout;

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

    fpout = fopen("hoge.hoge.txt","w"); //file open for write

    /* 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);
        fprintf(fpout, "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;

            double max_2 = 0.0;
            double sum3_2 = 0.0;

            /*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;
    }

    printf("%d %f %f %f %f\n",iev, ave, dev, max, sum3);
    fprintf(fpout, "%f\n", sum3);

}
} //Event loop end.

fclose(fp);
fclose(fpout);
printf("ending ...\n");
}

```



```

fprintf(fp2,"%10.3e\n",xinc);

ret = vxii1_send(clink , "DAT:ENC FAS");// fastest encoding
ret = vxii1_send(clink , "WFMO:BYT_N 1"); //reng = -128~127
ret = vxii1_send(clink , "DAT:STAR 1");
ret = vxii1_send(clink , "DAT:STOP 1000");

ret = vxii1_send(clink , "DAT:SOU CH1");//Digitize ch=1 signal.
ret = vxii1_send(clink , "CURV?");//get data
long bytes_returned = vxii1_receive_data_block(clink , wf11, 10000, 1000);

ret = vxii1_send(clink , "DAT:SOU CH2");//Digitize ch=2 signal.
ret = vxii1_send(clink , "CURV?");//get data
long bytes_returned2 = vxii1_receive_data_block(clink , wf22, 10000, 1000);

for (int iev = 0 ; iev < nevt ; iev++){
    ret = vxii1_send(clink , "DAT:SOU CH1");//Digitize ch=1 signal.
    ret = vxii1_send(clink , "CURV?");//get data
    long bytes_returned1 = vxii1_receive_data_block(clink , wf1, 10000, 1000);

    ret = vxii1_send(clink , "DAT:SOU CH2");//Digitize ch=2 signal.
    ret = vxii1_send(clink , "CURV?");//get data
    long bytes_returned2 = vxii1_receive_data_block(clink , wf2, 10000, 1000);

while(wf1[1] != wf11[1] || wf1[2] != wf11[2] || wf1[3] != wf11[3]){
    for(int i = 0; i < 1000; i++){
        wf11[i] = wf1[i];
        wf22[i] = wf2[i];
    }
    if(iev == 0) continue;

    printf(" %5d %5d ", count, bytes_returned);
    fprintf(fp1," %5d %5d ", count, bytes_returned);
    fprintf(fp2," %5d %5d ", count, bytes_returned2);

    for (int i = 0 ; i < 1000; i++){
        fprintf(fp1,"%d ",(char)wf11[i]);
        fprintf(fp2,"%d ",(char)wf22[i]);
    }
    count = count + 1;
    printf("\n");
    fprintf(fp1,"\n");
    fprintf(fp2,"\n");
    if(iev == 0) continue;
}
if(count == 200001) break;
}

fclose(fp1);
fclose(fp2);
printf("ending... \n");
vxii1_close_device(serverIP , clink);
}

```

参考文献

- [1] 浜松ホトニクス 光半導体素子ハンドブック 第03章 Si APD、MPPC
https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/03_handbook.pdf
- [2] 浜松ホトニクス MPPC S10362-11 シリーズ カタログ
http://akizukidenshi.com/download/ds/hamamatsu/s10362-11_series_kapd1022j05.pdf
- [3] 浜松ホトニクス MPPC S12572 シリーズ カタログ
<http://www.hamamatsu.com.cn/UserFiles/DownFile/Product/20140117212906284.pdf>
- [4] William R.Leo.Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments(1994) p.160
- [5] FURUKAWA シンチレータ結晶物性比較表
<http://www.furukawakk.co.jp/pdf/others/hikaku.pdf>
- [6] 古河機械金属 (GAGG)
<http://www.furukawakk.co.jp/business/others/gammapotter.html>
- [7] K.Kamada, T.Yanagida, J.Pejchal, M.Nikl, T.Endo, K.Tsutumi, A.Yoshikawa, Cryst.Growth & Design 11 (2011) 4484-4490
- [8] A.Yoshikawa, Y.Fujimoto, A.Yamaji, S.Kurosawa, J.Pejchal, Y.Yokota, K.Kamada, M.Nikl et.al.,Opt. Mat.35 (11) (2013) 1882-1886
- [9] 前田奈津子 修士論文 「結晶カロリメーターにおける大面積アバランシェフォトダイオード読み出しの研究」 奈良女子大学 (2010 年度)
<http://webhepl.cc.nara-wu.ac.jp/thesis/master/maeda/maeda.pdf>
- [10] 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)
<http://webhepl.cc.nara-wu.ac.jp/thesis/4kaisei/2014/2014-nagasaka-yokoyama.pdf>
- [11] 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を用いた γ 線検出」 奈良女子大学 (2015 年度)
http://webhepl.cc.nara-wu.ac.jp/thesis/4kaisei/2015/2015_inoue_okuno_hino_sotsugyouronbun.pdf
- [12] 加納美佳 浅野七瀬 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 (2016 年度)