

2022年度 卒業論文

MPPCによる
結晶シンチレーターの
読み出し光量測定

奈良女子大学

理学部 数物科学科 物理学コース

高エネルギー物理学研究室

岡田 伊織

指導教員 宮林 謙吉

2023年3月30日

概要

本研究は茨城県にある SuperKEKB 電子・陽電子加速器の Belle II 測定器の電磁カロリメータをアップグレードする選択肢の一つとして、既存の CsI(Tl) の前に設置するプリシャワー検出器を検討するにあたり、そのアクティブ吸収層をなす結晶シンチレーターの特性を調べたものである。このプリシャワー検出器では、シャワーを発達させる吸収層での、エネルギー損失も測定する機能を持つアクティブ吸収層とするものが必要であり、結晶シンチレーターとコンパクトな半導体光検出器を組み合わせた一種のシンチレーションカウンターとすることが機能を果たす解になり得る。本研究ではフォトンカウンティング能力のある MPPC を用いて、結晶シンチレーターから読み出すエネルギー損失 1MeV あたりのフォトン数を調べた。

目次

第 1 章	はじめに	5
1.1	SuperKEKB 加速器	5
1.2	Belle II 実験	5
1.2.1	電磁カロリメータ	6
1.3	プリシャワー検出器	6
第 2 章	粒子の検出に関わる基礎的事項	8
2.1	半導体	8
2.1.1	光半導体	8
2.2	光子と物質	9
2.2.1	光電効果	9
2.2.2	コンプトン散乱	9
2.2.3	電子・陽電子対生成	10
2.3	荷電粒子と物質の相互作用	10
2.3.1	電離・励起による損失	10
2.3.2	制動放射	10
第 3 章	MPPC の動作原理とダークパルス	11
3.1	MPPC	11
3.2	MPPC の構造と動作原理	11
3.2.1	APD	11
3.3	ガイガーモードとプロポーショナルモード	11
3.4	MPPC の基本動作とバイアス回路	12
3.5	MPPC の規格	12
3.6	ダークパルス観測のセットアップ	14
3.7	ダークパルス	14
3.8	アフターパルス	14
3.9	クロストーク	15
3.10	MPPC のフォトンカウンティング	15
第 4 章	MPPC の増倍率測定とフォトンカウンティング	16
4.1	増倍率測定の原理	16
4.2	セットアップと使用機器	16
4.3	実験方法	18
4.4	生データ	18
4.5	データ解析	19
4.5.1	波形データの積分	19
4.5.2	1.3 mm 角 MPPC 信号電荷の分布	21
4.5.3	1.3 mm 角 MPPC 増倍率の算出	21
4.6	結果	21
4.7	受光面 6.0mm 角 MPPC の信号電荷分布	22

4.8	離散的な信号電荷分布によるフォトン検出効率見積もり	22
4.9	実験方法	23
4.9.1	1.3 mm 角 MPPC	23
4.9.2	6.0 mm 角 MPPC	24
第 5 章	アクティブ吸収層をなす結晶シンチレーターの読み出し光量測定	25
5.1	無機シンチレーター	25
5.2	シンチレーションカウンター	25
5.3	^{137}Cs 線源	26
5.4	セットアップ	26
5.5	実験結果	27
付録 A	増倍率データ収集用プログラム	31
付録 B	増倍率データ解析プログラム	33

目次

1.1	SuperKEKB の全体図 [1]	5
1.2	電磁カロリメーターの全体図 [2]	6
1.3	CsI(Tl) 結晶シンチレーター 1 本の概要 [2]	6
1.4	プリシャワー検出器の概念図	6
2.1	PN-PD の構造 [3]	9
2.2	PN-PD の動作 [3]	9
2.3	光電効果の模式図	9
2.4	コンプトン散乱の模式図	10
3.1	MPPC の構造	11
3.2	MPPC の基本接続回路	12
3.3	1375CS の仕様図	13
3.4	6050CS の仕様図	13
3.5	MPPC の基礎特性測定のための実験の Block 図	14
3.6	ダークパルスの波形	14
3.7	アフターパルスの波形	15
3.8	クロストークの波形	15
4.1	LED 点灯時の逆電圧と増倍率測定実験の Block 図	17
4.2	恒温槽	17
4.3	電源	17
4.4	アルミシャーシ内のセットアップ	17
4.5	デジタルオシロスコープ	17
4.6	クロックジェネレーター	17
4.7	LED 点灯パルスの幅	18
4.8	LED 点灯をトリガーした時の波形のスナップショット	18
4.9	生データの一部、最初の 2 イベント余りの表示。	19
4.10	生データ解析後のテキストのスナップショット	19
4.11	デジタルオシロスコープの等価回路	20
4.12	LED をパルス点灯した際の MPPC1.3mm 角 (S13360-1375CS) の信号電荷分布	21
4.13	1.3 mm 角 MPPC (S13360-1375CS) の印加電圧と増倍率の関係	22
4.14	6.0 mm 角 MPPC (S13360-6050CS) における LED 点灯をトリガーした時の波形のスナップショット	22
4.15	6.0 mm 角 MPPC (S13360-6050CS) の信号電荷分布	22
4.16	幅 6 ns でパルス点灯した時のオシロスコープの波形 (1.3 mm 角 MPPC)	23
4.17	幅 6 ns でパルス点灯した時の信号電荷分布 (1.3 mm 角 MPPC)	23
4.18	幅 6 ns でパルス点灯した時のオシロスコープの波形 (6.0 mm 角 MPPC)	24
4.19	幅 6 ns でパルス点灯した時の信号電荷分布 (6.0 mm 角 MPPC)	24
5.1	^{137}Cs の崩壊図	26

5.2	ガンマ線を検出するシンチレーションカウンターの Block 図	26
5.3	シンチレーションカウンター (上)	27
5.4	シンチレーションカウンター (横)	27
5.5	アルミシャーシにあけた穴の様子	27
5.6	シンチレータを GoreTex で包み 6mm 角の穴をあけた様子	27
5.7	線源の裏	27
5.8	6.0 mm 角 MPPC と ^{137}Cs 線源と BGO を用いたときの波形の写真	28
5.9	6.0 mm 角 MPPC と ^{137}Cs 線源と FastLGSO を用いたときの波形の写真	28
5.10	6.0mm 角 MPPC と ^{137}Cs 線源と BGO を用いたときの信号電荷分布	28
5.11	6.0mm 角 MPPC と ^{137}Cs 線源と FastLGSO を用いたときの信号電荷分布	28

第1章 はじめに

現在の素粒子標準理論では、物質を構成する最小単位となるフェルミ粒子は6種類の「クォーク」と、電子やニュートリノ等の6種類の「レプトン」であり、それぞれに反粒子が存在する。反粒子は、質量や寿命等の性質は同じでありながら電荷をはじめ、もろもろの量子数の符号が反対の粒子のことである。これらの間に働く相互作用は、その仲立ちをする4種類のボソンの交換によっており、それ以外に質量の起源に関係する「ヒッグスボソン」を合わせたものが標準理論が含む粒子群である。

素粒子標準理論で説明できていないことの一つに暗黒物質粒子の正体が未解決な点があげられる。それを含めて、高輝度電子・陽電子衝突実験は標準理論を超える新原理・新粒子に感度が高い測定を網羅的に行うことがミッションである。この役割を果たす目的で稼働中なのが SuperKEKB 加速器を用いた Belle II 実験である。

1.1 SuperKEKB 加速器

SuperKEKB 加速器は茨城県つくば市にある衝突型加速器である。SuperKEKB 加速器は高輝度ビーム衝突によって極めて多くの B 中間子と反 B 中間子を生成できるように設計されている。SuperKEKB の全体図は以下の図 1.1 である。電子用と陽電子用の二つのリング型加速器と、リングに電子・陽電子を供給する直線型加速器から成り立っている。地下約 11m に掘られた一周約 3km のトンネルの中には、二つのリングが並んで置かれ、それぞれのリングの中を電子ビーム (7GeV) と陽電子ビーム (4GeV) が逆方向に周回する。二つのビームは、リングの一点でのみ交差するように設計されており、衝突点に設置した Belle II 測定器が衝突によって起こる素粒子反応を捉える。

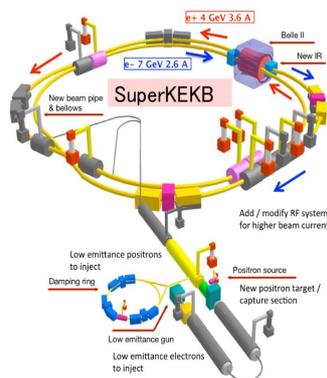


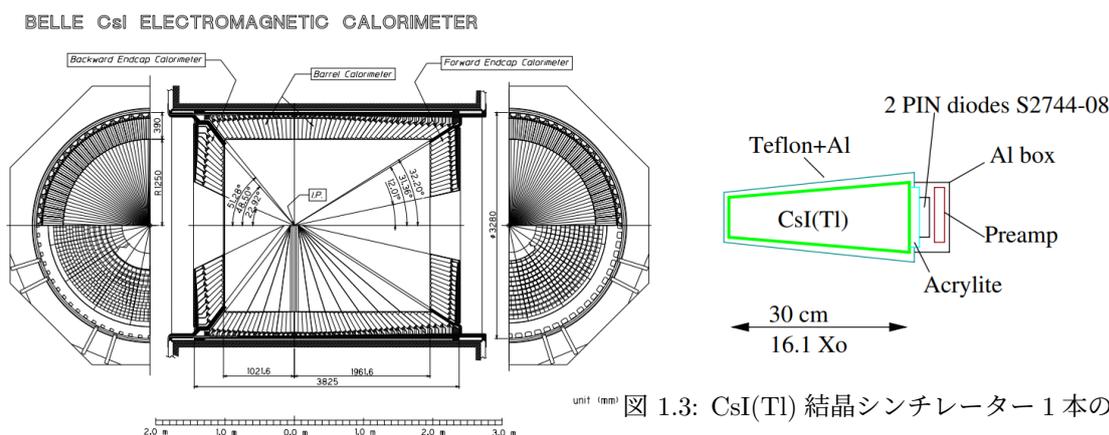
図 1.1: SuperKEKB の全体図 [1]

1.2 Belle II 実験

前世代の KEKB 加速器に比して最大で 30 倍に達する SuperKEKB 加速器がもたらす高輝度電子・陽電子衝突に対応するため、Belle II 測定器は Belle 測定器の検出器コンポーネントの大部分と信号処理電子回路およびデータ収集システムをアップグレードしたものである。本研究では、電磁カロリメータ直前に設置するプリシャワー検出器を検討しており、以下に電磁カロリメータについて詳しく述べる。

1.2.1 電磁カロリメータ

電子やガンマ線のエネルギーは、電磁シャワーを発生させ、その検出器内におけるエネルギー損失を検出することが測定の原理である。一般に結晶シンチレーターは密度が $5\text{g}/\text{cm}^3 \sim 7\text{g}/\text{cm}^3$ と高く、数十 MeV 以上のエネルギーを持つ電子やガンマ線が入射すると、効率的に電磁シャワーを発生させることができる。このとき、エネルギー損失に比例した量のシンチレーション光を発する。この光は光検出器を使用して電気信号に変えて読み出す。図 1.2 より、電磁カロリメータはバレル部と二つのエンドキャップ部で構成されており、衝突点を囲うように CsI(Tl) の結晶シンチレーターが 8736 本設置されている。結晶シンチレーター 1 本の概要を図 1.3 に示す。CsI(Tl) 結晶シンチレーターの断面積は約 $6\text{cm} \times 6\text{cm}$ で長さ 30cm の先端を切断した四角錐形である。CsI(Tl) 結晶シンチレーターは厚さ 200 μm の反射材である GoreTex で包み、反射光も含めシンチレーション光を 2 個の PIN-PD で検出する。



unit (mm) 図 1.3: CsI(Tl) 結晶シンチレーター 1 本の概要 [2]

図 1.2: 電磁カロリメータの全体図 [2]

1.3 プリシャワー検出器

本研究の検討対象であるプリシャワー検出器 (図 1.4) とは既存の CsI(Tl) シンチレーターの直前に置くことを想定しているもので、アクティブ吸収層と通過位置検出サンプリング層を一層とするものを厚み方向に三層並べたものである。

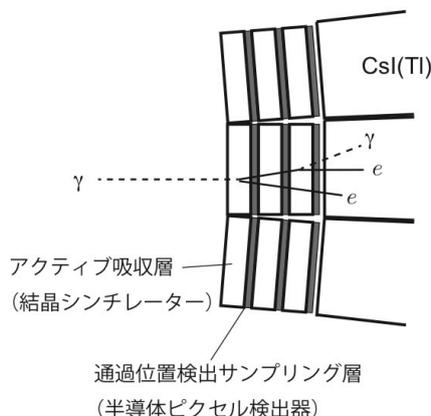


図 1.4: プリシャワー検出器の概念図

アクティブ吸収層には質量密度が大きく発光減衰時間が短い結晶シンチレーターを、通過位置検出サンプリング層には半導体ピクセル検出器を想定している。プリシャワー検出器の役割や特性を以下に示す。

1. 既存の CsI (Tl) カウンターの前に重くて応答の速い検出器を置くことで、低エネルギーのビームバックグラウンド粒子である数 MeV 程度のエネルギーを持つガンマ線の多くが、そこで止まって CsI (Tl) カウンターに届かず、既存の CsI(Tl) カロリメーターでのパイルアップを低減する。
2. プリシャワー検出器を厚み方向に分割して、一層毎にシャワー中の e^+ と e^- の通過位置が分かる検出器を入れて、複数層で通過位置のヒットがあれば、ガンマ線の到来方向が分かる。
3. Belle II 検出器で検出したいガンマ線のエネルギーは低いものであれば 50MeV~100MeV 程度なので、厚みが 3 放射長程度のプリシャワー検出器を想定すると、大半のエネルギーを失う事象も発生する。よって、シャワーを形成させる吸収層は、そこで生じるエネルギー損失を測定する機能を必要とするので、密度の高い結晶シンチレーターを使用する。

一般にシンチレーターに光検出器を組み合わせたシンチレーションカウンターでは、入射した粒子のエネルギー損失により発生したシンチレーション光が光検出器の受光部に届く確率、すなわち、集光効率はシンチレーターの屈折率や透明度表面の平滑性、該当する波長における反射材の反射率、光検出器の受光部面積や取り付け位置など、様々な要因で変化するため、実物で計測する以外に知る方法がない。そこで、本研究ではフォトンカウンティング能力のある半導体光検出器である浜松ホトニクス社製 MPPC を使用して、BGO および Fast-LGSO シンチレーターの読み出し光量を測定した。

第2章 粒子の検出に関わる基礎的事項

2.1 半導体

半導体は、導体と絶縁体の中間の性質を持つ物質である。温度が上昇すると、半導体の価電子帯にいる電子は、熱をエネルギーとして受け取り、価電子バンドから禁制バンドを超えて伝導バンドへ励起される。励起された電子が抜けた穴をホールと呼び、正の電荷を持つキャリアとして振る舞う。これらの電子とホールが半導体内でキャリアとして働くため、温度が上がると抵抗率は下がり、温度が下がると抵抗率は上がるという性質がある。さらに、半導体は大きく真性半導体と不純物半導体に大別される。真性半導体は単結晶でシリコンやゲルマニウムが主に使用されており、純度は99.99999999%と高純度である。真性半導体に不純物を混ぜたものが不純物半導体である。不純物半導体はさらにn型とp型に分かれる。n型は5価の原子を混合し、p型は3価の原子を混合する。

2.1.1 光半導体

光半導体とは、半導体のうち、電気を光に変える発光素子と光を電気に変える受光素子の総称である。

- 発光素子

典型的な発光素子が発光ダイオード(LED)である。発光ダイオードはPN接合に電流を流して発光させる半導体素子である。半導体の材料の違いで様々な波長の光を発光させることができる。原理としては、素子に電圧をかけると、ホールと電子が接合部分で結合して消滅する。このとき、電子はキャリアとして移動している高いエネルギー状態からホールと結合した低いエネルギー状態へと移る際にエネルギーの差額を光として外部へ放出する。

- 受光素子

受光素子の光半導体としては、PN-PD、PIN-PD、APD、フォトトランジスタなどある。受光素子の例としてPN-PDについて説明する。フォトダイオードは空乏層と呼ばれるPN接合付近に内部電界が発生することから、光が当たると電流が流れる半導体素子である。原理は、図2.1のようになる。電極をかけると、陽極側に電子、陰極側にホールの数に偏りができることから内部電界が発生する。動作は、図2.2のようになる。PN接合間に光が入射すると、電子とホールの対が生成される。その電子とホールが電極側に移動することで、電流が流れる。このような光の入射によって流れる電流を光電流という。

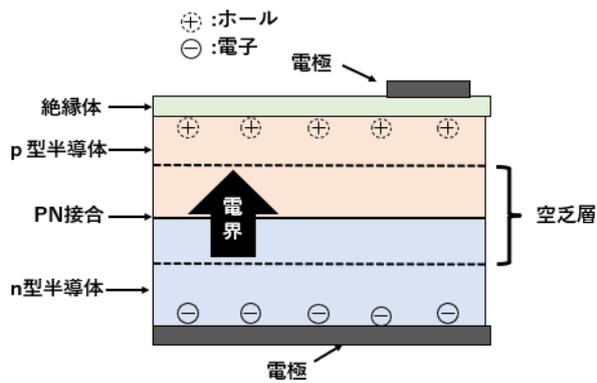


図 2.1: PN-PD の構造 [3]

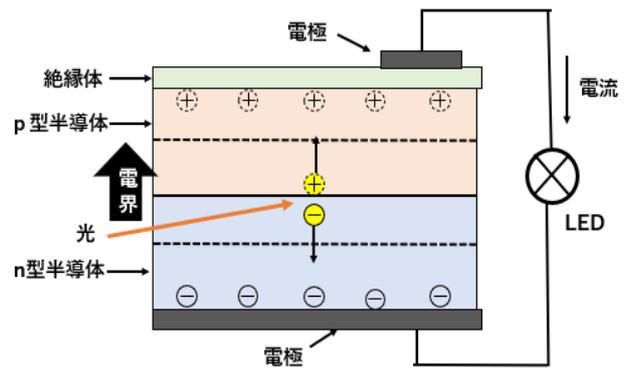


図 2.2: PN-PD の動作 [3]

2.2 光子と物質

2.2.1 光電効果

光子が物質内に入射した後、原子の軌道に束縛されている電子に衝突して、その電子が光子の全エネルギーを吸収して原子から放出される現象である。光子が電子が束縛から脱する仕事関数と呼ばれる値を上回るエネルギーを持つときだけ起こる。仕事関数は物質によって異なる。放出された電子は荷電粒子なので、その周りの原子や分子を励起または電離してエネルギー損失する。半導体や絶縁体などの物質にバンドギャップよりも高いエネルギーを持つ光子が入射して光電効果を起こすと、電子・正孔対が生成される。

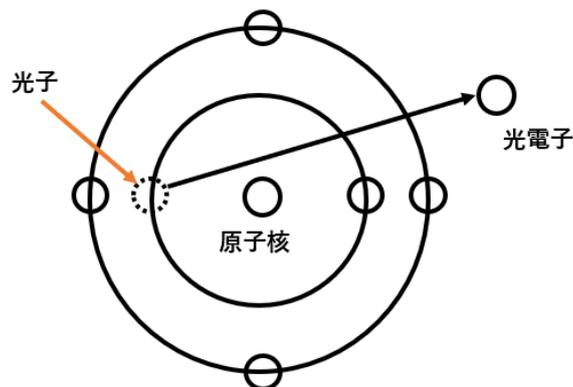


図 2.3: 光電効果の模式図

2.2.2 コンプトン散乱

コンプトン散乱とは、自由電子あるいは自由とみなせる束縛の緩い電子に光子が衝突すると、光子はその電子を散乱してエネルギーを失い、波長が長くなる現象である。入射光子から散乱された電子に移行するエネルギーが最大になるのは散乱角度が 180 度である。このため、散乱された電子のエネルギー損失による検出器の波高分布は一番高いところにコンプトン端と呼ばれる分布の終端が生じる。前述の光電効果とコンプトン散乱の頻度に大きな差がないとき、検出器のエネルギー分解能により、全吸収ピークの分布とコンプトン端が重複することも多い。

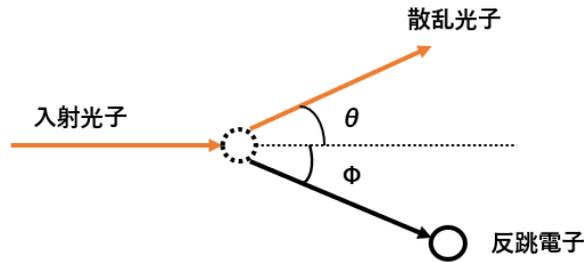


図 2.4: コンプトン散乱の模式図

2.2.3 電子・陽電子対生成

電子質量の2倍にあたる約 1.02 MeV 以上のエネルギーを有する光子が物質に入射すると、原子核のクーロン電場の中で光子が電子と陽電子の対に転換する現象のことである。陽電子は物質中を進行中は電子と同様にエネルギー損失を起こす。最終的に、陽電子が物質中で静止すると電子とポジトロニウムと呼ばれる束縛状態を形成した後に対消滅して複数個の光子になる。このうち最も頻度の高いのは二つの光子になる場合で、電子質量に等しいエネルギーを持つものが互いに逆方向に飛び出す。

2.3 荷電粒子と物質の相互作用

2.3.1 電離・励起による損失

荷電粒子が物質中を進行すると原子や分子との衝突により、原子中の電子に荷電粒子のエネルギーが渡され励起や電離を起こし、エネルギーを失う。単位長さ当たりのエネルギー損失は荷電粒子の速さ v 、光速 c 、 $\beta = v/c$ 、 $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ として、 $\beta\gamma$ に依存して変化し、 $\beta\gamma \simeq 2\sim 3$ 程度のとき、最小になる。これを Minimum Ionizing Particle(MIP) と呼び、多くの物質で約 $1.5\text{Mev} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ である。

2.3.2 制動放射

高エネルギー電子が原子核の近傍を通過するときに、その電場によって加速度運動する際に光を放射してエネルギーを失う現象である。ここで、電子や陽電子は 10 MeV を超えると多くの物質で電離と励起によるエネルギー損失を制動放射のそれを上回る。

第3章 MPPCの動作原理とダークパルス

3.1 MPPC

MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) は、浜松ホトニクス社が開発した SiPM (Silicon Photomultiplier) とも呼ばれるデバイスの1種で、複数のガイガーモード APD(Abaranshe Photo Diord) のピクセルから成る、フォトンカウンティングデバイスである。特徴としては、半導体光検出器が持つ高い量子効率による優れたフォトンカウンティング能力、低電圧で動作、磁場の影響を受けず、高い増倍率 ($10^5 \sim 10^6$) を持ち、優れた時間分解能を持つ。

3.2 MPPCの構造と動作原理

MPPC は、ガイガーモード APD とクエンチング抵抗を組み合わせたものを基本単位 (1 ピクセル) とし、多数のピクセルを2次元的に電気的接続をした構造を持つ。等価回路図を図 3.1 に示す。MPPC を高い増倍率をもたらすガイガーモードで動作させるため、平面の電極を採用している。

MPPC に十分な電圧をかけると、光の入射により MPPC のピクセル内で電子・正孔対が生成すると、そこから電子雪崩が発生する。ここで、電子雪崩の形成が可能になる電圧を降伏電圧と呼ぶ。電子雪崩の形成で生じた多数の電子がピクセル内の電極間を移動すると信号パルスを形成するとともに電流が流れるため、クエンチング抵抗で電圧降下が起きて降伏電圧以下まで下がり、電子雪崩が鎮静化する。これによって、次の光子入射を検出できる状態になる。

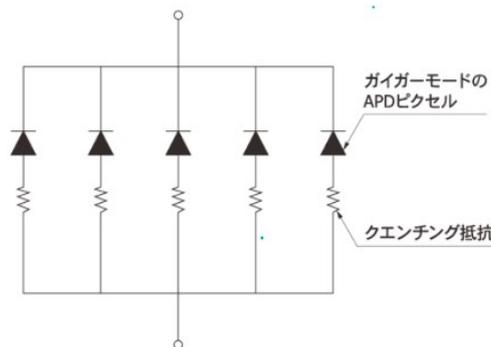


図 3.1: MPPC の構造

3.2.1 APD

APD(Avalanche Photo Diode) は固体内でのアバランシェ増倍 (電子雪崩) を利用し増幅機能を持つ超高速応答性のフォトダイオードである。アバランシェ増倍とは、まず、PN 接合に逆電圧が印加されていると空乏層で電子正孔対が生成される。その対の電子は N 層へ、正孔は P 層へ流れるが、一部のキャリアは、結晶格子と衝突すると新たな電子正孔対を発生させるというようにイオン化が起きる。イオン化が連鎖的に発生することをアバランシェ増倍という。

3.3 ガイガーモードとプロポーショナルモード

- ガイガーモード

デバイス内で電子雪崩を生成すると、それがデバイス全面に広がる大きなものになるモードである。MPPCの場合は、単一フォトンが入射したピクセルで発生した電子・正孔対に起因する電子雪崩がそのピクセル全面に広がる。これにより、単一フォトン入射の結果を雑音から分離して検出できる高い増幅率を得るが、複数のフォトンが同時に同一ピクセルに入射した場合も形成する電子雪崩の大きさが同じになるため単一フォトンと同様の信号パルスが出力される。

- プロポーショナルモード

フォトン入射により単一の電子・正孔対ができると、そこから生じる電子雪崩をデバイス内で局所的に形成する。これにより、出力信号パルスの大きさはデバイスに入射したフォトン数に比例する。形成する電子雪崩は小さいので増倍率はガイガーモードより小さく、典型的には50倍～100倍程度である。

3.4 MPPCの基本動作とバイアス回路

MPPCは、各ピクセルが独立に動作するガイガーモードAPDであるので、パルスを出力したピクセル数=検出したフォトン数とする測定になる。このとき、既述したように同時に同一ピクセルにフォトンが複数個入射した場合も出力パルスは同じである。したがって、受光部に入ったフォトン数がMPPCのピクセル数に対して少ない場合、いずれかのピクセルの有感部で検出したフォトン数と反応したピクセル数は一致する。しかし、入射フォトン数が全ピクセルに対して多い場合、両替の関係が線形でなくなることに注意が必要である。

バイアス電圧を印加し、信号パルスを読み出すためのMPPCの基本接続回路を図3.2に示す。抵抗47kΩとコンデンサー0.1μFがローパスフィルターの役割を持つRC回路を形成する。これにより、バイアス電圧からのノイズを遮断する。MPPCの信号は保護抵抗10kΩを流れる電流による信号を結合コンデンサー0.47μFを介して読み出す。

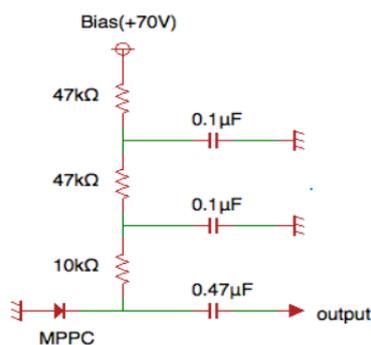


図 3.2: MPPC の基本接続回路

3.5 MPPCの規格

本実験で、使用したMPPCはS13360-1375CSおよびS13360-6050CSの二種類であり、CSとは、パッケージである窓材がシリコン樹脂を用いていることを指す。前者の規格と仕様図を表3.1と図3.3に、後者については表3.2と図3.4に示す。

S13360-1375CS

表 3.1: S13350-1375CS の規格

項目	
ピクセルピッチ (μm)	75
有効受光面サイズ (mm)	1.3×1.3
ピクセル数	285
開口率 (%)	82
動作温度 T_{opr} (°C)	-20~+60
保存温度 T_{stg} (°C)	-20~+80
感度波長範囲 λ	320~900
最大感度波長 λ_p	450
検出効率 PDE(%)	50
ダークカウント Typ.(kcps)	90
ダークカウント Max.(kcps)	270
端子間容量 Ct(pF)	60
増倍率 M	4.0×10^6
降伏電圧 V_{BR} (V)	53 ± 5
クロストーク確率 (%)	7
推奨動作電圧 V_{op} (V)	$V_{BR} + 5$
推奨動作電圧の温度係数 δTV_{op} (mV/)	54

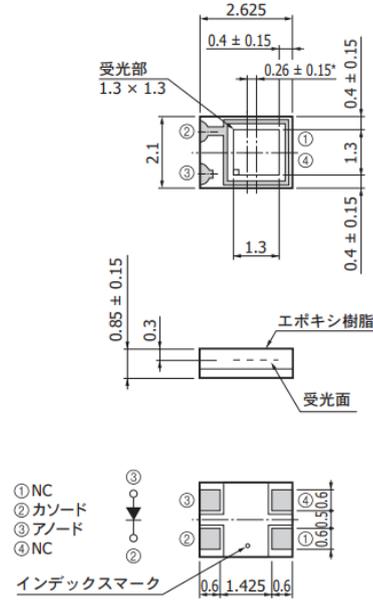


図 3.3: 1375CS の仕様図

S13360-6050CS

表 3.2: S13350-1375CS の規格

項目	
ピクセルピッチ (μm)	50
有効受光面サイズ (mm)	6.0×6.0
ピクセル数	14400
開口率 (%)	74
動作温度 T_{opr} (°C)	-20~+60
保存温度 T_{stg} (°C)	-20~+80
感度波長範囲 λ	270~900
最大感度波長 λ_p	450
検出効率 PDE(%)	40
ダークカウント Typ.(kcps)	2000
ダークカウント Max.(kcps)	6000
端子間容量 Ct(pF)	1280
増倍率 M	1.7×10^6
降伏電圧 V_{BR} (V)	53 ± 5
クロストーク確率 (%)	3
推奨動作電圧 V_{op} (V)	$V_{BR} + 5$
推奨動作電圧の温度係数 δTV_{op} (mV/)	54

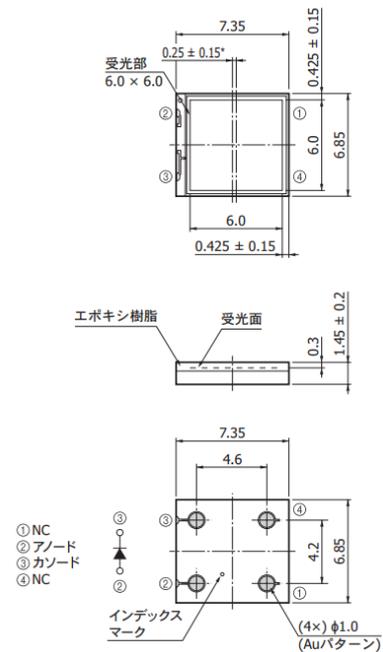


図 3.4: 6050CS の仕様図

3.6 ダークパルス観測のセットアップ

MPPCが暗黒状態下に置かれていても、電子・正孔対の熱励起に起因するダークパルスという波形を確認できる。セットアップをBlock図で書いたものを図3.5で示す。浜松ホトニクス社の出荷時の検査は温度を25℃として、推奨印加電圧が54Vであることから恒温槽を用いて同様の条件で測定した。受光面1.3mm角MPPCのS13360-1375CSの出力パルスをオシロスコープで、波形を観測するとともに、その波形データをPCにブロック転送してオフライン解析した。

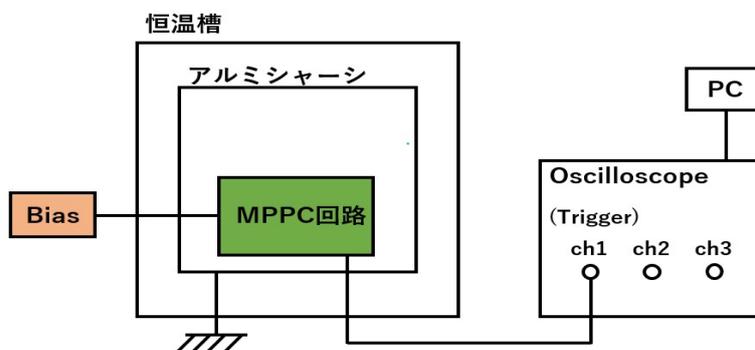


図 3.5: MPPC の基礎特性測定のための実験の Block 図

3.7 ダークパルス

ダークパルスとは、暗黒環境下で熱励起によって電子正孔対が発生し、ガイガーモードで増幅され、信号パルスとして検出されるものである。したがって、後述するクロストークが発生しない限り、単一フォトン検出時と同じパルスが出力される。単位時間当たりの熱励起の頻度と波高は温度に依存する。オシロスコープで観測した単一検出フォトン (1pe) に相当するダークパルスを図3.6に示す。

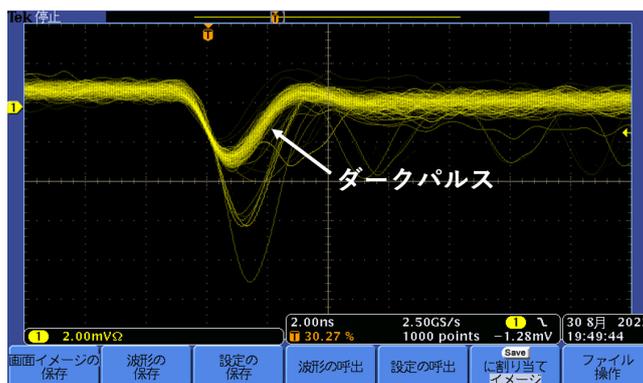


図 3.6: ダークパルスの波形

3.8 アフターパルス

MPPCで信号パルスを生成する際に、ピクセル内で電子雪崩の生成が起きる。ここで生じた電子は電極の陽極へ移動し、そこで電氣的に中和するまでの間が信号パルスを生じる過程である。電極間を移動する中の電子のうち、半導体内の格子欠陥に引っかかるものが発生する場合がある。その電子が遅れて移動を始め、電子雪崩を形成して出るパルスがアフターパルスである。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と考えられる。以下の図3.7にオシロスコープで観測した様子を示す。

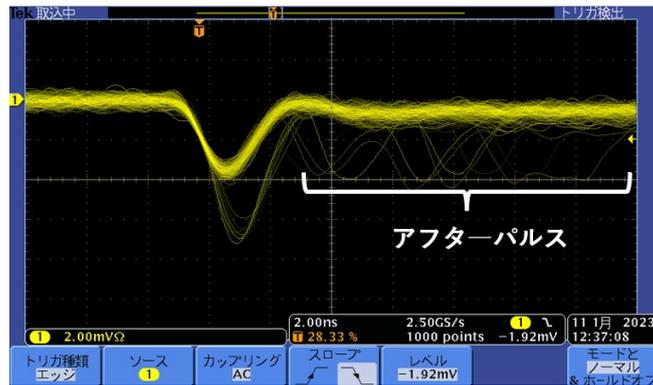


図 3.7: アフターパルスの波形

3.9 クロストーク

MPPC 上のいずれかのピクセルで、電子雪崩を形成すると、その中で半導体中に励起状態の原子を生じ、これが脱励起する際に光を放出することがある。この光子が、別のピクセルで光電効果を起こして信号パルスを発生させる現象をクロストークと呼ぶ。本来検出されるフォトンと同時にピクセルを鳴らすため、重ね合わさった信号パルスは検出フォトン 2 個 (2 pe) に相当するパルスの大きさを検出する。以下の図 3.8 にオシロスコープで観測したダークパルス発生に伴うクロストークで生じた 2 pe 相当のパルスの寄与を示す。



図 3.8: クロストークの波形

3.10 MPPC のフォトンカウンティング

MPPC の各ピクセルはガイガーモードで電子雪崩形成を行うための同一のピクセルで複数個のフォトンが光電効果を起こした場合も出力パルスは検出フォトン 1 個相当となる。したがって、受光面への入射フォトン数が全ピクセル数に対して十分少ない場合、「検出フォトン数」＝「反応したピクセル数」の関係が成り立つ。そうではない場合は「検出フォトン数」よりも「反応したピクセル数」の方が顕著に少なくなる。

第4章 MPPCの増倍率測定とフォトンカウンティング

LED点灯によるパルス微弱光がMPPCに届くようにすると検出したフォトン数に応じて離散的な波高分布になる。このことを用いて、MPPCの増倍率とその印加電圧依存を測定するとともに1.3 mm角と6.0 mm角MPPCの信号電荷分布を比較して入射フォトン数を見積もった。

4.1 増倍率測定の原理

MPPCの増倍率は、1ピクセルが1フォトンを検出して発生したパルスの電荷量を電気素量で割った値である。十分に減光したパルス光をMPPCに照射すると、出力電荷量の度数分布が離散的になる。この離散的な分布の隣り合うピークの間隔は、1フォトン検出分の電荷量に相当する。よって、増倍率Mは

$$\text{増倍率 (M)} = \frac{\text{隣り合うピーク間の電荷量差}}{\text{電気素量}} \quad (4.1)$$

となる。ここで、電気素量は 1.602×10^{-19} Cである。

さらに、MPPCの増倍率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、加速されたキャリアが格子振動と衝突してエネルギー散逸するため連続したイオン化が起こりにくくなることにより電子雪崩が生成しても、その規模が小さくなって増倍率が下がる。これを補うには印加電圧を大きくして内部電場を高めなければならない。増倍率を一定にするためには、MPPCの周囲温度に合わせて印加電圧を変化させるか、MPPCの周囲温度を一定に保つ必要がある。本実験では、MPPCの周囲温度を一定に保ちながら、印加電圧を変化させたときの増倍率を測定した。

4.2 セットアップと使用機器

LED点灯に対するMPPCの応答を測定するため、MPPCの逆バイアス電圧印加と信号読み出しには、図3.2の基本接続回路にLEDを点灯させる回路を追加した基板を製作した。この基板を囲むアルミシャーシは静電遮蔽するため接地した。基板上の中央にMPPCの受光面に届く光量減光の目的で壁を付け、さらにLEDに帽子をかぶせて減光した。MPPCの印加電圧は電子雪崩が発生する降伏電圧以上の52 V～56 Vの範囲を1 V刻みで変化させた。セットアップを図4.1に示す。恒温槽内は25 °Cで一定にした。LEDはClock GeneratorのTTL信号を用いて点灯した。オシロスコープのch1でMPPCの出力を観測し、ch2にLEDを点灯させるTTL信号と同期してClock Generatorが出力するNIM信号を入力して、これによりオシロスコープをトリガーした。

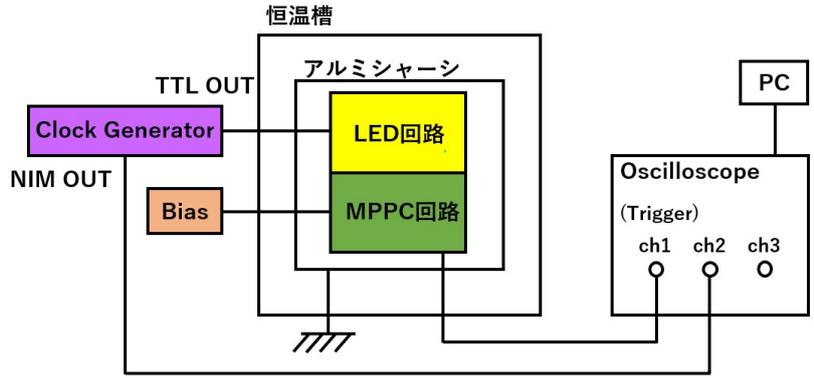


図 4.1: LED 点灯時の逆電圧と増倍率測定実験の Block 図



図 4.2: 恒温槽

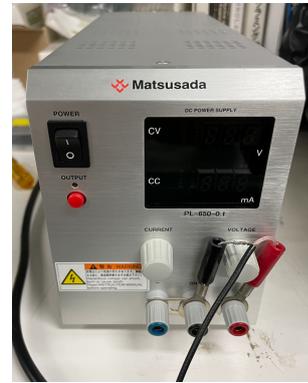


図 4.3: 電源

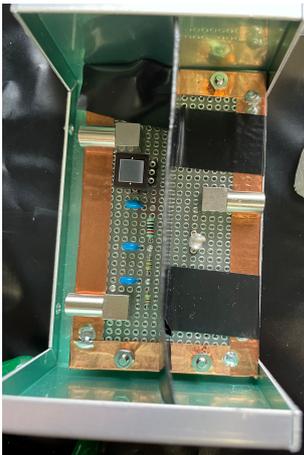


図 4.4: アルミシャーシ内の
セットアップ

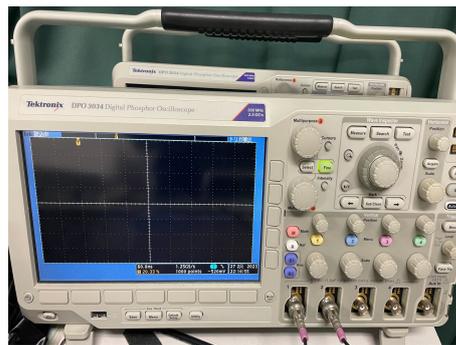


図 4.5: デジタルオシロスコープ



図 4.6: クロックジェネ
レーター

- LED：日亜化学工業株式会社製 NSPB320BS
- 恒温槽：日本ブロアー株式会社製 LS-5 バイオチェンバー
- 電源：松定プレジジョン株式会社製

- デジタルオシロスコープ：Tectronix 製 DPO 3034 Digital Phosphor Oscilloscope
- 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

4.3 実験方法

LED のパルス発光により、1パルス当たり平均数個のフォトンが MPPC の受光部に届くようにして 1.3 mm 角 MPPC (S13360-1375CS) と 6.0 mm 角 MPPC (S13360-6050CS) の特性測定を行った。

LED を発光させるには ClockGenerator から繰り返し周波数 10 Hz で約 9 ns の幅を持つ TTL パルスを送った。ここで、幅の定義はパルスの立ち上がりの中間点と立ち下がる中間点を結んだ長さとした。図 4.7 に同期して出力される NIM パルスを示す。MPPC に到着したパルス光が作る信号パルスをデジタルオシロスコープで数値化して記録した。

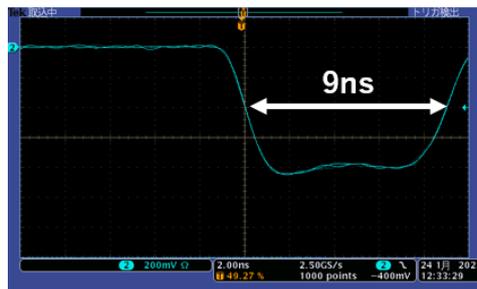


図 4.7: LED 点灯パルスの幅

DPO3034 型デジタルオシロスコープは LAN インターフェースを装備し、TCP/IP プロトコルによるネットワーク通信を行うことができる。PC とデジタルオシロスコープをもとに研究室内 LAN に接続し、波形データを取得した。データの送受信は VXI11 という規格のソフトウェアを使用した。ブロック転送したデータを書き出した生データのフォーマットは次節で述べる。

4.4 生データ

以下に例として、1.3 mm 角 MPPC (S13360-1375CS) を温度 25 °C、印加電圧 54 V の条件下でオシロスコープを用いて観測した信号波形を図 4.8 に、生データの一部のスクリーンショットを図 4.9 に示す。図 4.8 では、ch1 が ClockGenerator 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 が MPPC の出力パルスである。

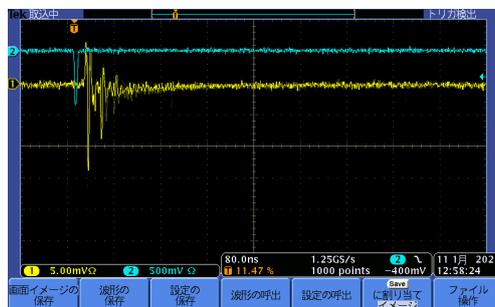


図 4.8: LED 点灯をトリガーした時の波形のスナップショット

ここでは、MPPC が出力する信号パルスよりも LED を点灯させるパルスによる影響の方が大きく見えている。これをイベントごと (パルスごと) に数値化、記録した生データについて以下に説明する。

```

8.000e-10
0 1000 46 47 47 46 47 48 48 45 46 47 48 49 46 48 48 48 44 48 47 47 46
48 49 48 49 47 49 48 48 46 47 47 49 47 46 49 52 45 48 48 46 46 48 46 48
49 56 52 55 52 49 48 49 44 44 46 54 50 45 46 48 55 61 55 52 46 42 46 43 46
44 45 46 46 46 44 45 47 47 44 45 46 44 46 45 46 45 44 47 45 48 47 45 49 47
46 48 47 48 46 51 47 48 47 46 46 47 48 46 48 48 46 45 46 49 46 46 48 49
49 49 47 48 48 49 48 49 49 47 48 49 49 50 47 49 50 48 47 48 47 47 47 46 46
48 48 49 49 48 48 50 49 49 51 47 50 48 50 49 48 49 50 48 48 46 49 49 49 50
48 49 49 49 51 50 47 48 48 49 48 48 46 48 49 49 47 52 49 48 46 50 46 51 47
48 49 47 47 48 50 48 49 49 49 48 49 49 48 51 49 48 47 48 49 49 48 49 49
51 48 47 46 48 48 48 52 49 50 49 47 48 49 49 50 50 49 48 49 50 49 48 51 50
1 1000 51 51 51 51 50 49 49 47 49 48 49 51 49 48 51 51 49 50 51 52 49
49 50 48 49 50 48 51 49 49 51 49 50 49 49 52 50 51 48 48 51 52 51 51 50 51
51 51 55 51 55 50 49 46 46 46 46 45 51 48 37 27 37 54 58 54 50 42 41 39 37
46 45 44 47 47 47 45 46 46 46 46 47 50 45 46 46 46 47 47 47 50 48 48
49 50 49 49 47 47 46 49 51 48 46 49 49 49 50 47 51 48 49 50 49 48 49 48 49
46 48 49 49 52 45 47 48 49 48 47 48 50 52 50 49 50 48 49 48 49 49 49 50
49 52 49 50 48 47 39 27 40 48 49 48 46 47 48 47 47 50 47 46 47 48 47 49 48
49 49 48 50 49 49 49 50 49 50 49 49 51 49 47 46 47 50 48 49 49 45 48 48 49
49 51 50 49 48 50 49 50 50 49 49 50 50 49 49 48 47 49 48 48 51 48 49 51 47
51 51 50 50 50 49 49 50 47 47 51 48 48 48 49 49 51 52 47 47 51 49 48 50 49
2 1000 48 49 50 49 51 48 48 49 49 48 49 50 47 49 48 50 49 51 50 47 46
49 47 49 47 49 48 51 47 48 51 47 49 51 51 52 50 49 49 48 51 48 48 49 49 52
50 49 51 52 55 52 53 49 46 45 45 48 54 48 43 46 49 58 58 54 50 45 43 41 43
47 47 48 47 47 46 50 46 46 46 48 51 48 46 46 47 49 48 48 47 48 50 49 49 49
46 50 49 49 50 50 49 49 47 49 51 48 48 49 49 47 50 50 50 51 50 49 49 48 49
47 49 49 49 49 49 52 50 46 46 48 49 48 46 48 46 49 46 48 49 50 49 51 49 49
50 48 53 52 49 49 49 49 50 48 47 48 50 49 48 47 46 50 48 49 47 46 48 49
48 51 49 48 49 49 49 48 49 48 51 48 49 48 49 49 50 50 51 49 48 50 50 48 51
52 49 50 48 49 48 48 51 51 48 49 47 48 50 50 49 47 51 47 50 49 48 49 48 50
51 51 49 51 48 49 50 49 49 48 46 48 49 49 50 47 48 49 49 50 47 48 48 48 49

```

図 4.9: 生データの一部、最初の 2 イベント余りの表示。

- 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 なので、時間間隔が、

$$\frac{1s}{1.25GSample} = 0.8ns \quad (4.2)$$

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収集したサンプル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 -127 から +127 の値をとる。
- その後、イベントレコードをファイルの末尾まで繰り返し書いている。

4.5 データ解析

4.5.1 波形データの積分

デジタルオシロスコープで高速サンプル・アンド・ホールドした波形データから無信号時レベル (ゼロ点) からの差を積算する処理により、パルスの信号電荷を得る。以下に例として、1.3 mm 角 MPPC (S13360-1375CS) を温度 25 °C、印加電圧 54 V の条件下で収集した生データの解析後のテキストファイルのスクリーンショット (図 4.10) を示す。生データを解析するためのデータ解析プログラムのソースコードを付録 B に示す。データ収集時の電圧スケールは 5 mV/div、時間スケールは 80 ns/div という条件であったことを前提とした処理を仕様になっており、8 bit 整数値の生データをデジタルオシロスコープのスケールを考慮して電荷に変換して出力するプログラムである。

```

0 7.426136 0.046036 10.551136 7.850000
1 7.740057 0.042026 10.396307 18.762500
2 7.660511 0.040598 13.285511 6.162500
3 7.643466 0.036458 10.455966 15.987500
4 7.642045 0.041968 9.829545 15.925000
5 7.640625 0.038596 10.453125 -2.162500

```

図 4.10: 生データ解析後のテキストのスナップショット

- 1 列目は、イベント番号を表す。
- 2 列目は、ゼロ点の値 (単位：mV) を表す。
イベントごとにデジタルオシロスコープがサンプル・アンド・ホールドした波形データを 1000 点ブロックで転送して取得する。このとき、デジタルオシロスコープのトリガーは LED 点灯と同時に出る NIM パルスにより、13 % つまり 130 点目でトリガーし、MPPC の信号パルスが立ち上がるまでの時間差を考慮し、ゼロ点は 130 点目までのデータの平均値と定義する。

$$\text{ゼロ点} = \frac{\sum_{k=1}^{130} x_k}{130} \quad (4.3)$$

ここで、 k はサンプリング番号で、 x_k は k 番目の生データを電圧値に変換したものである。

- 3 列目は、ゼロ点の計算に用いたデータの分散 (単位：mV) を表す。

$$\text{分散} = \frac{\sum_{k=1}^{130} (\text{ゼロ点} - x_k)^2}{130} \quad (4.4)$$

- 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 (単位：mV) を表す。
- 5 列目は、信号パルスが生じている範囲である 131 点目移行の波形データからゼロ点を引き算した値を足し合わせた信号パルスの積分値である。ここで、信号を見るときの等価回路を図 4.11 に示し、LEMO ケーブルの特性インピーダンスが 50Ω であることに合致するようにデジタルオシロスコープの終端抵抗を 50Ω で受けることと、サンプルデータの時間間隔より、信号パルスの積分値を信号電荷の値 (単位： 10^{-13} C) に変換した。

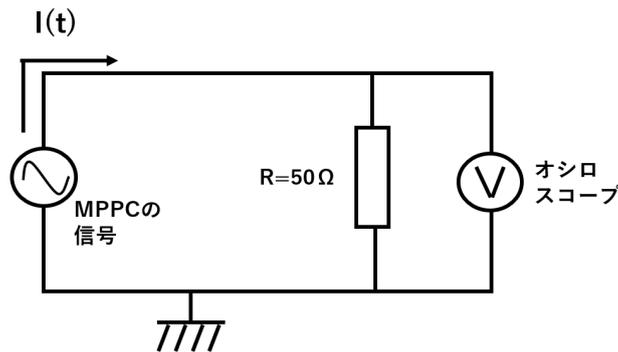


図 4.11: デジタルオシロスコープの等価回路

変換に用いた式は $Q = I(t) \times \Delta t = \frac{V \times \Delta t}{R}$ であり、具体的な変換は以下の式による。

$$\text{電荷量差} = \frac{\text{整数値} \times \text{LSB 電圧} \times \text{データの時間間隔}}{\text{デジタルオシロスコープの抵抗値}} \quad (4.5)$$

$$\Delta Q [10^{-13} \text{ C}] = \frac{\text{整数値} \times \frac{5 [\text{mV/div}] \times 8 [\text{div}]}{256} \times 0.8 \text{ ns}}{50 [\Omega]} \quad (4.6)$$

$$= \frac{\text{整数値} \times \frac{5 \times 8}{256} [\text{mV}] \times 8 [10^{-10} \text{ s}]}{50 [\Omega]} \quad (4.7)$$

ここで、

$$\text{LSB 電圧} = \frac{1 \text{ div 当たりの電圧} \times 8 [\text{div}]}{2^8} \quad (4.8)$$

$$\text{データの時間間隔} = 0.8 [\text{ns}] \text{ (1.3 mm 角 MPPC)} \quad (4.9)$$

$$\text{デジタルオシロスコープの抵抗値} = 50 [\Omega] \quad (4.10)$$

$$1 \text{ 電子当たりの電荷量} = 1.602 \times 10^{-19} [\text{C}] \quad (4.11)$$

こうして信号電荷量を $0.1 \text{ pC} = 10^{-13} \text{ C}$ の単位で算出した。

4.5.2 1.3 mm 角 MPPC 信号電荷の分布

MPPC の特性により、以上のデータ解析の結果による信号電荷分布には検出フォトンの個数によって等間隔にピークが立つ。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。1.3mm 角の MPPC についての信号電荷分布を図 4.12 に示す。このピークの間隔から MPPC の増倍率を得る。

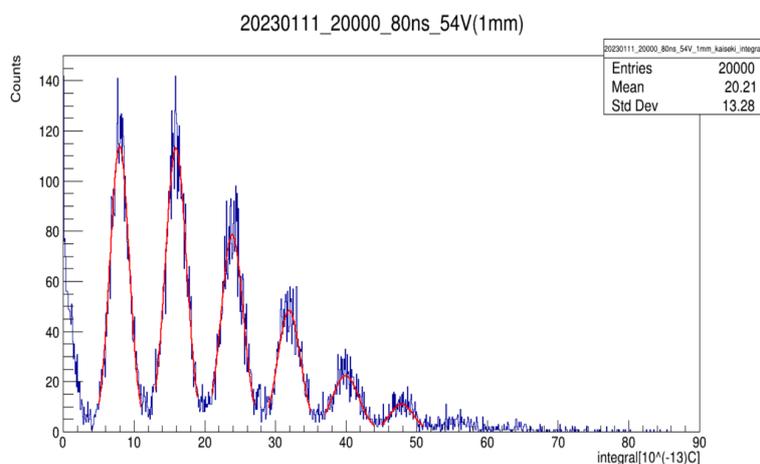


図 4.12: LED をパルス点灯した際の MPPC1.3mm 角 (S13360-1375CS) の信号電荷分布

4.5.3 1.3 mm 角 MPPC 増倍率の算出

MPPC の増倍率は式 (4.1) で表すことができる。

$$\text{増倍率 (M)} = \frac{\text{信号電荷分布のピーク間の差の平均}}{\text{電気素量}} \quad (4.1)$$

ここで、図 4.12 に示した信号電荷分布の典型例では、ピークが 6 つある。(2 つ目のピーク値)-(1 つ目のピーク値)、(4 つ目のピーク値)-(3 つ目のピーク値)、(6 つ目のピーク値)-(5 つ目のピーク値) の 3 つの値の平均と分散を求めた。平均と平均二乗誤差を用いて増倍率を求めた。

4.6 結果

1.3 mm 角 MPPC (S13360-1375CS) において温度を 25 °C 一定で印加電圧を変化させた際の増倍率測定の結果を以下に示す。

表 4.1: 1.3 mm 角 MPPC(S13360-1375CS) の印加電圧と増倍率の関係

	印加電圧 [V]	増倍率
出荷時に検査された値	54	4.0×10^6
測定値	53	$(3.40 \pm 0.02) \times 10^6$
	54	$(4.98 \pm 0.03) \times 10^6$
	55	$(5.81 \pm 0.03) \times 10^6$

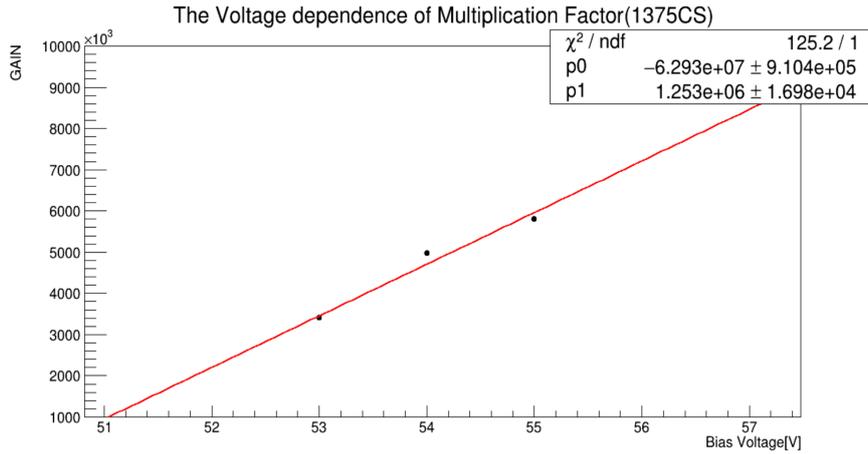


図 4.13: 1.3 mm 角 MPPC (S13360-1375CS) の印加電圧と増倍率の関係

図 4.13 より印加電圧を上げると直線的に増倍率が上がることを確認できた。

4.7 受光面 6.0mm 角 MPPC の信号電荷分布

6.0mm 角 MPPC (S13360-6050CS) を用いた場合、温度 25 °C、印加電圧 55 V の時のオシロスコープのスクリーンのスナップショットを図 4.14 に信号電荷分布を図 4.15 に示す。離散的な信号電荷分布が見られなかったため、次節以降に述べるように、1.3 mm 角 MPPC の測定値との比較により入射光子数を見積もることにした。

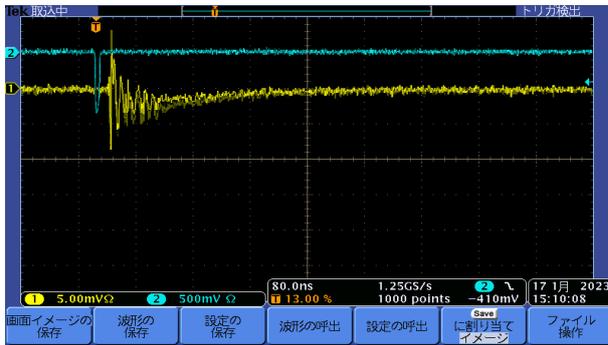


図 4.14: 6.0 mm 角 MPPC (S13360-6050CS) における LED 点灯をトリガーした時の波形のスナップショット

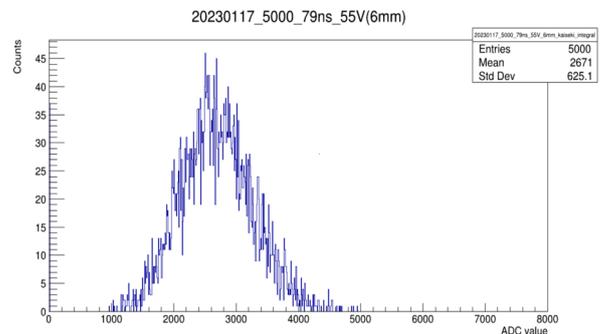


図 4.15: 6.0 mm 角 MPPC (S13360-6050CS) の信号電荷分布

4.8 離散的な信号電荷分布による光子検出効率見積もり

信号電荷分布が離散的な分布を示すような平均数個の光子が到来する条件下では、MPPC の検出光子数は原則としてポアソン分布に従う。式 (5.1) はある条件の下、1 イベント当たり観測される光子数の期待値が μ 個であるとき、 k 個の光子を観測するイベントが発生する確率を表す。 $k = 0$ を代入して得られる式 (5.2) は光子が検出されないイベントが発生する確率を表す。LED を点灯させて信号電荷分布が離散的になるような光量が MPPC に届く場合、信号電荷分布のペダスタルのイベント数から、MPPC の検出光子数が 0 個の確率を計算でき、そこから平均値 μ を得る。

$$P(k) = \frac{\mu^k e^{-\mu}}{k!} \quad (4.12)$$

$$P(0) = e^{-\mu} = \frac{N_{ped}}{N_{tot}} \quad (4.13)$$

MPPC の検出フォトン数の平均値を求めるために、式 (5.2) を変形させると以下の式 (5.3) となる。

$$\begin{aligned}\mu &= -\ln(P(0)) \\ &= -\ln\left(\frac{N_{\text{ped}}}{N_{\text{tot}}}\right)\end{aligned}\quad (4.14)$$

PDE、つまり、Photon Detection Efficiency は

$$\text{PDE} = \frac{\text{検出フォトン数}}{\text{入射フォトン数}}\quad (4.15)$$

であり、開口率、量子効率、アバランシェ確率の積である。PDE のカタログを用いれば、検出フォトン数の平均値から入射フォトン数の平均値を推定できる。

4.9 実験方法

Clock Generator の周波数を 10 Hz に設定して、パルスの幅を 6 ns から 14 ns まで変化させて測定した。以下に述べるように、1.3 mm 角 MPPC では離散的な信号電荷分布が得られたので、前節の処法により検出フォトン数を求めた。6.0 mm 角 MPPC では受光部面積の増加により連続的な正規分布に近い信号電荷分布となった。LED の発光の仕方と同じにして、1.3 mm 角 MPPC と 6.0 mm 角 MPPC に到達する光量の違いを生む要因として、有効受光面積を考慮した。

4.9.1 1.3 mm 角 MPPC

Clock Generator の周波数は 10 Hz で一定なので、幅を 14 ns、12 ns、10 ns、9 ns、8 ns、7 ns、6 ns と変化した。4 章 8 節の方法で検出フォトン数を見積もるには $k = 0$ のイベント数が適切に多い方が良いので幅 6 ns のデータを用いた。

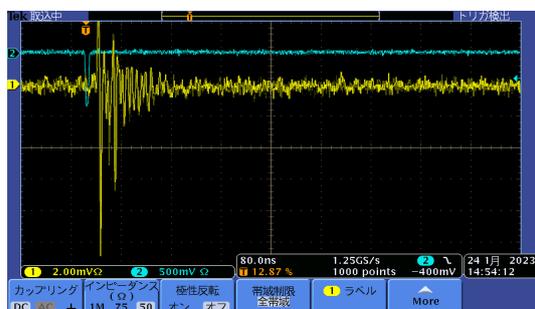


図 4.16: 幅 6 ns でパルス点灯した時のオシロスコープの波形 (1.3 mm 角 MPPC)

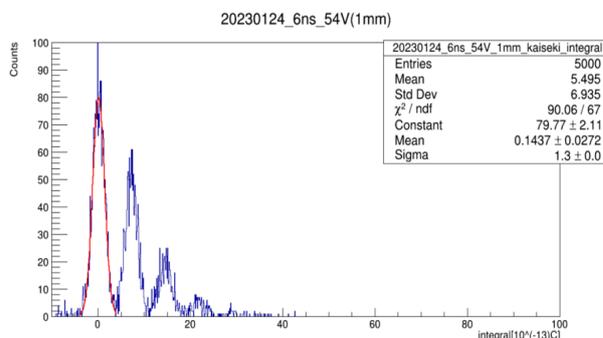


図 4.17: 幅 6 ns でパルス点灯した時の信号電荷分布 (1.3 mm 角 MPPC)

推奨電圧である 55 V を印加し、25 °C に保ってパルス幅を 6 ns で LED 点灯した際の波形を図 4.16 に示す。LED を点灯させるパルスの影響が大きく見え、MPPC の離散的な信号が分かりにくいですが、図 4.16 に示す、積算した信号電荷の分布では、離散的な分布を確認できた。ペDESTAL の部分を正規分布でフィットし、そのイベント数を 2446 イベントと得た。5000 イベントのデータ収集を行ったことから、式 (4.14) より検出フォトン数の平均値を 0.71 と得た。カタログ値の $\text{PDE} = 50\%$ から式 (4.15) より入射フォトン数の平均値を 1.43 と見積もった。以下の表 4.2 が計算結果である。

表 4.2: 1.3 mm 角 MPPC の受光面に届く光子数と検出フォトン数

	検出フォトン数 (平均値)	入射フォトン数 (平均値)
1.3 mm 角 MPPC	0.71	1.43

4.9.2 6.0 mm 角 MPPC

Clock Generator の周波数を 10 Hz、パルス幅は 6 ns の条件で測定を行った。図 4.18 にオシロスコープのスクリーンに映る波形、図 4.19 に信号電荷分布を示す。

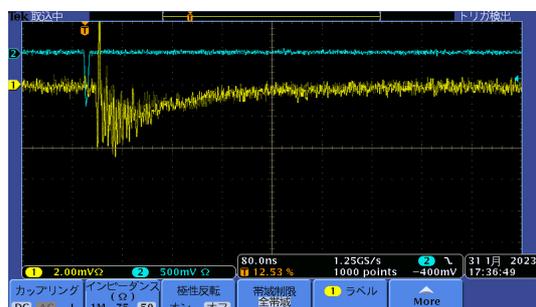


図 4.18: 幅 6 ns でパルス点灯した時のオシロスコープの波形 (6.0 mm 角 MPPC)

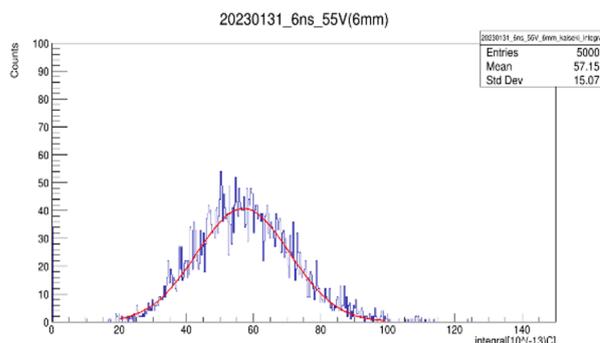


図 4.19: 幅 6 ns でパルス点灯した時の信号電荷分布 (6.0 mm 角 MPPC)

信号電荷分布は正規分布に近く、これをフィットして信号電荷の平均値を求めたところ 5.7 pC であった。この信号電荷分布は離散的ではなかった。この理由としては、6.0 mm 角のピクセル (50 μm) が 1.3 mm 角のピクセル (75 μm) より小さいため増幅率が小さいこと、有感部面積の増加のため多くの光子が入射すること、クロストークおよびアフターパルス発生の確率が大きくなることが影響していると考えられる。6.0 mm 角の信号電荷分布からは検出フォトン数が決定できないので、1.3 mm 角 MPPC の入射フォトン数と有効受光面積の違いより、6.0 mm 角の入射フォトン数を求めて、式 (5.4) より検出フォトン数を

- 1.3 mm 角 MPPC 入射フォトン数 1.43
- 1.3 mm 角と 6.0 mm 角の有効受光面サイズの比 $6^2 / 1.3^2 = 21.3$
- 75 μm 角ピクセルと 50 μm 角ピクセルの開口率の比 $82\% / 74\% = 1.108$

より $1.43 \times 21.3 \div 1.108 = 27.5$ と求めた。さらに、50 μm 角ピクセルの MPPC を降伏電圧 + 3 V で動作させたときの $\text{PDE} = 0.4$ として、検出フォトン数の平均値を 11.0 と見積もった。したがって、6.0 mm 角 MPPC の信号電荷 5.7 pC が検出フォトン数 11.0 に対応することになる。

表 4.3: 6.0 mm 角 MPPC の受光面に届くフォトン数と検出フォトン数

	検出フォトン数 (平均値)	入射フォトン数 (平均値)
6.0 mm 角 MPPC	11.0	27.5

第5章 アクティブ吸収層をなす結晶シンチレーターの読み出し光量測定

シンチレーションとは、ある種類の物質に放射線が入射してエネルギー損失すると、物質内の電子が励起状態となり、この電子が脱励起する際に戻るときにそのエネルギーの差分を光として放出する現象である。シンチレーション発光の効率が高い物質をシンチレーターという。シンチレーターは有機シンチレーターと無機シンチレーターに大別される。本研究では無機シンチレーターを使用するので、それについて記述する。

5.1 無機シンチレーター

無機シンチレーターはシンチレーション光の波長に対してほぼ透明な結晶であり、平均の原子番号が大きくなるように工夫している。なぜなら、原子番号が大きい程、密度が高くなり、放射線とりわけガンマ線に対する感度を高くするためである。[9] 代表的な無機シンチレータを以下の表 5.1 に示す。[10]

本実験で使用したシンチレーターはBGOとFastLGSOである。ここで、FastLGSOのLGSOはGSO(Gd_2SiO_5)とLSO(Lu_2SiO_5)の混晶組成の単結晶である。表 5.1 に示すように、質量密度が高く、発光量は多く、蛍光減衰時間は小さい。[11]

表 5.1: 無機シンチレーターの例

	FastLGSO	BGO	CsI(Tl)
密度 [g / cm ³]	7.3	7.13	4.35
発光量 [photons / MeV]	24000	6300	5000
蛍光減衰時間 [ns]	30~35	300	1050

5.2 シンチレーションカウンター

入射フォトンがシンチレーター内で生じ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、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、プリシャワー検出器のアクティブ吸収層をなす結晶シンチレーターとして、40mm × 40mm × 12mm の直方体の形をしたFastLGSOとBGOを比較するために光検出器として受光面6.0 mm角のS13360-6050CS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受光部へ届く光量を増やすために、反射材として白色のGoreTexシートで包み、MPPC受光部と透明なグリースで接着した。表 5.1 に示したのはシンチレーターの発光量絶対値の典型的な値であり、反射の寄与を含めて光検出器にシンチレーション光が届く割合、すなわち集光効率がかかった読み出し光量は、一般的に製作したシンチレーションカウンターを用いて実測する以外に知る方法がない。そこで、¹³⁷Cs線源が発する662 keVのガンマ線が検出される際のパルス信号電荷分布に現れる光電効果による全吸収ピークにより読み出し光量の測定を行うことにした。

5.3 ^{137}Cs 線源

BGO または FastLGSO シンチレーターを受光面 6.0 mm 角の S13360-1375CS 型の MPPC 受光部に取り付けた検出器で ^{137}Cs が発する 662 keV のガンマ線を検出する実験を行った。ここで、 ^{137}Cs の崩壊図を図 5.1 に示す。ベータ崩壊により ^{137}Ba の励起状態に移り、これがガンマ崩壊により脱励起する。

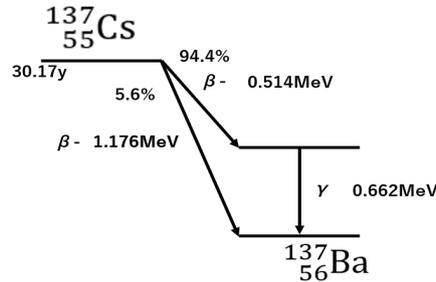


図 5.1: ^{137}Cs の崩壊図

5.4 セットアップ

Fast-LGSO と BGO の 2 種類の結晶シンチレーターと 6.0 mm 角 MPPC を用いてシンチレーションカウンターを製作した。印加電圧は 4 章同様に 55 V に設定した。この測定はセルフトリガーのセットアップで行った。シンチレーションカウンターのシンチレーターを設置する部分にアルミシャーシの外側に置く ^{137}Cs 線源からのガンマ線を届けるために、アルミシャーシに 9 つの穴をあけ、必要ならガンマ線の入射した位置の違いによる読み出し光量の変化を測定することも可能にしている。恒温槽は 25 °C で一定に保ち、オシロスコプの ch1 でシンチレーションカウンターの信号パルスを観測および数値化と読み出しを行った。恒温槽には遮光の万全を期すために暗幕をかけた。

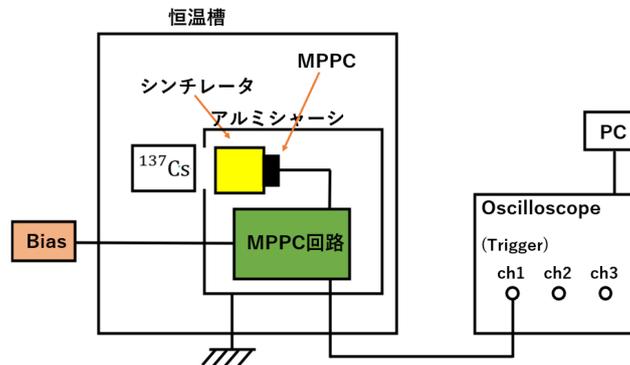


図 5.2: ガンマ線を検出するシンチレーションカウンターの Block 図

セットアップのアルミシャーシ内の実際の様子を図 5.3 と図 5.4 に、アルミシャーシに穴をあけた様子を図 5.5 に示す。結晶シンチレーターは発砲スチロール製のブロックで固定し、MPPC がシンチレーターから外れぬよう輪ゴムで固定した。シンチレーターを反射材の白色 GoreTex シートで包み MPPC 取り付け部 6.0 mm 角の穴をあけた様子を図 5.6 に、 ^{137}Cs の密封線源の写真を図 5.7 に示す。

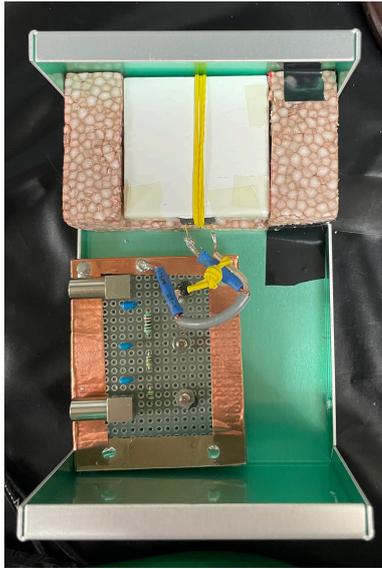


図 5.3: シンチレーションカウンター (上)

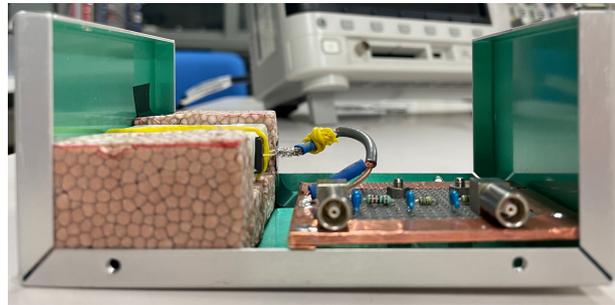


図 5.4: シンチレーションカウンター (横)



図 5.5: アルミシャーシにあけた穴の様子



図 5.6: シンチレータを GoreTex で包み 6mm 角の穴をあけた様子

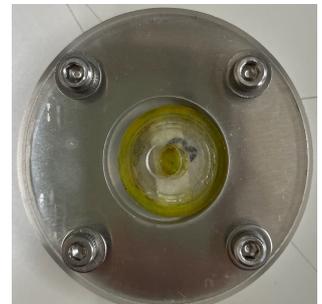


図 5.7: 線源の裏

5.5 実験結果

BGO を用いた時の波形の様子を図 5.8 に、FastLGSO を用いた時の波形の様子を図 5.9 に示す。さらに、信号電荷分布を図 5.10 と図 5.11 に示す。

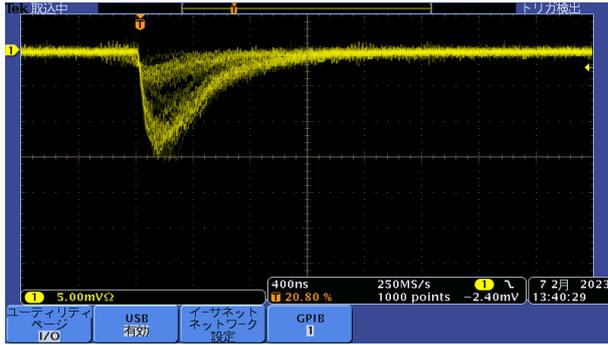


図 5.8: 6.0 mm 角 MPPC と ^{137}Cs 線源と BGO を用いたときの波形の写真

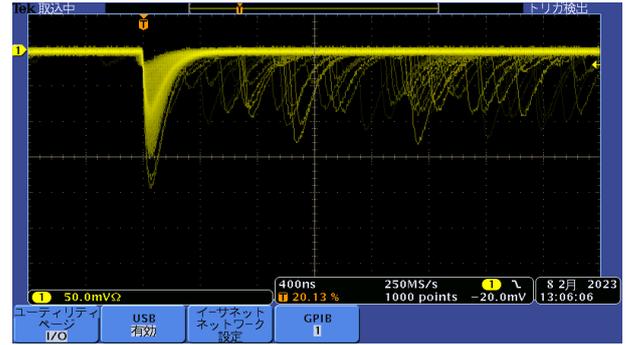


図 5.9: 6.0 mm 角 MPPC と ^{137}Cs 線源と FastLGSO を用いたときの波形の写真

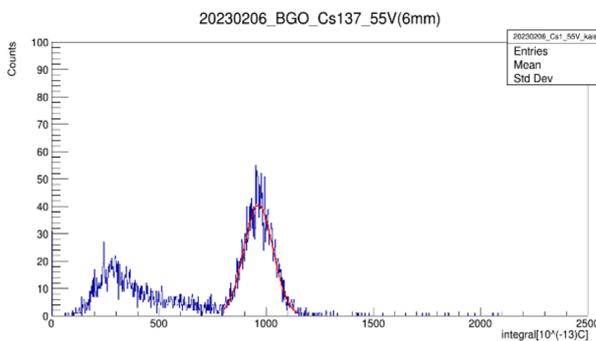


図 5.10: 6.0mm 角 MPPC と ^{137}Cs 線源と BGO を用いたときの信号電荷分布

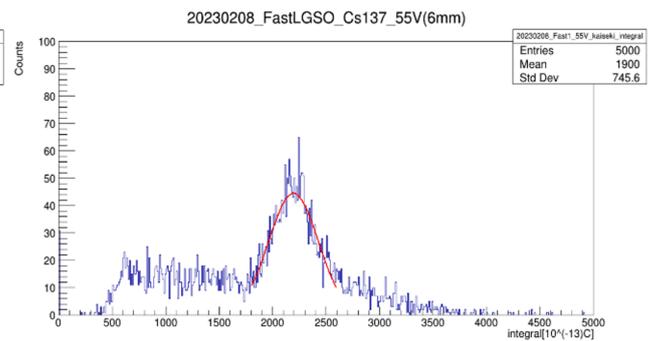


図 5.11: 6.0mm 角 MPPC と ^{137}Cs 線源と FastLGSO を用いたときの信号電荷分布

全吸収ピークがみとめられるので、正規分布でフィットした。全吸収ピークの左側に平坦な連続的な分布が見える。これは、コンプトン散乱による。全吸収ピークの値は ^{137}Cs が発する 662 keV のガンマ線が持つ全エネルギーに対応する。BGO の全吸収ピークの平均は 96.4 pC、Fast-LGSO のそれは 219.4 pC であった。この結果と 4 章 9 節で議論したように 5.7 pC の信号電荷が検出光子数 11.0、すなわち入射光子数 27.5 に対応することから 6.0 mm 角 MPPC の受光面への入射光子数を求めた結果を表 5.2 に示す。

表 5.2: 662 keV の光電吸収ピークから見積もった MPPC の入射光子数

	LED のパルス点灯 (10 Hz, 6 ns)	BGO	Fast-LGSO
電荷量 (pC)	5.7	96.4	219.4
入射光子数	27.5	465.1	1058.0

したがって、6.0 mm 角 MPPC の受光面へ入射した光量が 662 keV のエネルギー損失に対応することから、読み出し光量は

- BGO → 703 フォトン / MeV
- Fast-LGSO → 1598 フォトン / MeV

である。

受光面が 6.0 mm 角の MPPC の全ピクセル数は 14400 個であることから、ピクセルが鳴る割合は表 5.3 に示す通りである。

表 5.3: 全ピクセル数に対する鳴ったピクセルの割合

	BGO	FastLGSO
鳴った割合 (%)	5	11

鳴ったピクセルの割合は十分に小さく、この測定における、同一ピクセルへの複数フォトンの入射の影響は顕著なものでないと考えられる。

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。まず、指導教官の宮林謙吉先生には、物理現象や原理について詳細に教えて下さり、さらに、実験中で分からないことあれば多くの助言を頂きました。お忙しい中、沢山見てくださり感謝しております。下村先生、蜂谷先生には、コーヒーを入れに来られた際に質問すると丁寧に答えてくださったり、meeting中に貴重な助言を頂いたり、授業の際、必要な知識を沢山教えて頂きました。お忙しい中、皆様ありがとうございました。

また、先輩方とのお話や同回生との会話では研究の合間の緊張がほぐれ、楽しい時間を過ごすことができました。

多くの方々のご協力で、卒業論文を完成する事ができました。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 増倍率データ収集用プログラム

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

int main(int argc, char*argv[])
{
    FILE *fp;
    fp = fopen("20221102ch_01.txt","w");
    int nevt = 20000; //event number
    CLINK *clink;
    clink = new CLINK;
    static char* serverIP = "10.0.1.108";

    //-- 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];

    double ret;
    ret = vxi11_send(clink, "HOR:SCA 20E-09");// Horizontal 20.0ns/div
    ret = vxi11_send(clink, "CH1:SCA 10E-03");// ch1 vertical 10.0mV/div
    ret = vxi11_send(clink, "CH1:POS 3.0");

    ret = vxi11_send(clink, "TRIG:A:EDGE:SOU CH1");// trigger type: edge ,ch1
    ret = vxi11_send(clink, "TRIG:A:EDGE:SLO FALL");// trigger slope: FALL
    ret = vxi11_send(clink, "TRIG:A:LEV:CH1 -7.2E-03");
    ret = vxi11_send(clink, "TRIG:A:MODE NORE");// trigger mode: normal(which
        waits for a valid trigger event)

    ret = vxi11_send(clink, "HOR:DEL:MOD OFF");// delay mode: of f
    ret = vxi11_send(clink, "HOR:POS 10");// trigger position 13% 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?"); // horizontal
point spacing

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

ret = vxi11_send(clink, "DAT:ENC FAS"); // fastest encoding
ret = vxi11_send(clink, "WFMO:BYT_N 1"); // -128~127
ret = vxi11_send(clink, "DAT:STAR 1");
ret = vxi11_send(clink, "DAT:STOP 1000");

for(int iev=0; iev < nevt; iev++)
{
    ret = vxi11_send(clink, "DAT:SOU CH1");
    ret = vxi11_send(clink, "CURV?");

    long bytes_returned1 = vxi11_receive_data_block(clink, wf, 10000, 1000);

    printf("%3d  %3ld ", iev, bytes_returned1);
    fprintf(fp, "%3d  %3ld ", iev, bytes_returned1);

    for(int i=0; i < 1000; i++)
    {
        fprintf(fp, "%d ", (char)wf[i]);
    }
    printf("\n");
    fprintf(fp, "\n");
}
printf("ending... \n");
vxi11_close_device(serverIP, clink);
}

```

付録 B 増倍率データ解析プログラム

```
#include <stdio.h>
void zoubai_kaiseki()
{
    int i, j, n;
    float xdiv; //horizontal axes range.
    int iev, nsample; //Event number and number of sampling.
    int siny[20000];
    double tate = 5 ; //mV
    double yoko = 80 ; //10-9s
    double full = tate * 8; //mV
    double time = 8 ; //10-10s

    FILE *fp;
    FILE *fpout;
    fp = fopen("20230111_20000_80ns_54V_1mm.txt","r"); //file open for read
    if(fp == NULL)
    {
        printf("Can't open file\n");
        return 0;
    }
    //file open for write
    fpout = fopen("20230111_20000_80ns_54V_1mm_kaiseki2.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)
    {
        /* 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(nsampl == 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 = 130;

    /* sum */
    for(i=0; i < nped; i++)
    {
        sum = sum + ( (double)siny[i] * full / 256 );
    }
    /* average */
    ave = sum / (double)nped;

    /* deviation */
    for(i=0; i < nped; i++)
    {
        sum2 = sum2 + (ave - ((double)siny[i] * full /256))*
            (ave - ((double)siny[i] * full /256));
    }
    dev = sum2 / (double)nped;
}

```

```

    /* delta */
    for(i=nped+5; i < 500; i++)
    {
        delta = ave - ((double)siny[i] * full / 256);
        /* pulse hight */
        if(max < delta)
        {
            max = delta;
        }
        /* integral */
        sum3 = sum3 + delta;
    }
    double denka = sum3 / 50 * time ;

    printf("%d %f %f %f %f\n", iev, ave, dev, max, denka);
    fprintf(fpout, "%f\n", denka);
}
} //Event loop end.
fclose(fp);
fclose(fpout);
}

```

関連図書

- [1] Super KEKB and Belle II
<https://www.belle2.org/project/super'kekb'and'belle'ii/>
- [2] Lol'detector.pdf
<https://superb.kek.jp/documents/loi/img/LoI'detector.pdf>
- [3] フォトダイオード (PD) の構造や原理とは | ファイバーラボ株式会社
<https://www.fiberlabs.co.jp/tech-explan/about-pd/>
- [4] MPPC とは — MPPC (SiPM) — 浜松ホトニクス (hamamatsu.com)
- [5] 技術資料/MPPC
<https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99'SALES'LIBRARY/ssd/mp>
- [6] 1. 半導体の性質：日立ハイテク
<https://www.hitachi-hightech.com/jp/ja/knowledge/semiconductor/room/about/properties.html>
- [7] 発光ダイオード (LED) の発光の原理・仕組みや違いとは—ファイバーラボ株式会社
<https://www.fiberlabs.co.jp/tech-explan/about-pd/>
- [8] フォトダイオード (PD) の構造や原理とは—ファイバーラボ株式会社
<https://www.fiberlabs.co.jp/tech-explan/about-pd/>
- [9] 6-2-2-6 シンチレーション検出器 | JEMIMA 一般社団法人 日本電気計測器工業会
- [10] rpp2022-rev-particle-detectors-accel.pdf
<https://pdg.lbl.gov/2022/reviews/rpp2022-rev-particle-detectors-accel.pdf>
- [11] F-LGSO - OXIDE Corporation
<https://www.opt-oxide.com/v2019/wp-content/uploads/2019/09/F-LGSO'Leaflet'202106028.pdf>
- [12] 奈良女子大学 2018 年度卒業論文 釜野 楓、藤井 美保 <https://webhepl.cc.nara-wu.ac.jp/old'HP/thesis/4kaisei/2017/2017-Kamano-Fujii.pdf>