

アイソマー弾性散乱に向けたアクティブストッパーの 開発

京都大学大学院理学研究科
物理学・宇宙物理学専攻 物理学第二教室
原子核・ハドロン物理学研究室
吉田 凌祐

2022 年度 修士論文



概要

原子核の性質は陽子数、中性子数、励起エネルギーによって劇的に変化する。これらの変数を変え、様々な原子核を調べることは、その性質の理解に重要である。例えば、密度分布は原子核の性質を特徴づける重要な指標の一つである。安定核の密度分布は弾性散乱により測定され、原子核構造理論の発展に重要な寄与をしてきた。近年では、RI ビーム技術の発展、逆運動学条件下での弾性散乱測定手法の確立 [5] により、不安定核の密度分布測定も可能となった。しかし、励起状態の弾性散乱実験は、その極短寿命な性質のため、これまで実現されていない。我々は準安定な励起状態であるアイソマーを用いて、この課題を克服できることに思い至った。しかし、アイソマー弾性散乱の実現には高効率なアイソマーの同定手法の確立が必須である。我々は実験的に扱いやすい $^{16}\text{N}(0^-)$ アイソマーを用いて、新しいアイソマー同定手法の確立を目指している。 $^{16}\text{N}(0^-)$ アイソマーは中性子ハロー構造が強く示唆され [2]、非一様ビッグバン元素合成モデルで重要な役割を果たす [3] ため、物理的にも興味深い対象である。

一般に (飛行) アイソマーの同定は、ストッパーにアイソマーを埋め込み、遅れて放出される遅延放射線を周辺に配置した検出器で検出することで行われる。したがってこの検出効率を上げることが効率的なアイソマー同定の鍵となるが、従来の手法ではストッパーによる放射線の吸収や検出器の配置の制限によりその値は低い (典型的には 10% 程度 [6])。そこで、我々は新手法「アクティブストッパー」を考案した。この手法では、放射線検出器をストッパーとしても用いることで、放射線の吸収がなく、全立体角を覆うことができるため、原理的には 100% の検出効率を達成できる。一方、実用上はアイソマー埋め込み時のエネルギーが遅延放射線のエネルギーより 10^4 オーダー大きいことにより不感時間の問題とフォトセンサーへの課題が生じる。不感時間は、アイソマー埋め込み時のシンチレーション光がバックグラウンドとなり、遅延放射線を検出できない時間である。高い検出効率 (95%) を得るためには、減衰時間 30 ns の高速応答により不感時間を短くすることが求められる。フォトセンサーには、遅延放射線より 10^4 倍大きい光量でも安定な動作が求められる。これらの要求を満たすアクティブストッパーとして CeBr_3 シンチレータ (時定数 19 ns) と MPPC を採用することにした。MPPC の時間応答が、アクティブストッパーの時間応答を決定する。そのため、MPPC の時間応答を最適化することが重要である。

そこで、本研究では MPPC を最適化するための光学系セットアップを構築した。具体的には、アイソマー埋め込みと遅延 γ 線放出のシンチレーション光を模擬するものである。そのためには、それぞれ 8×10^4 光子/ mm^2 、5 光子/ mm^2 の光量を持った、数十 ns の短パルス光源が必要である。そこで、サブナノ秒パルスレーザーと LED をそれぞれの模擬光源として用いることにした。

本研究では、実際に構築した光学系セットアップが要求性能を満たしていることを調査した。レーザーおよび LED の光量と時間応答の測定には PMT を用いた。PMT で 1 光子のゲインを測定し、ゲインの校正を行った。校正結果を用いて検出光子数を求め、レーザーと LED がともに光量、時間応答の要求を満たすことを確認した。今後は、本セットアップを用いて MPPC の最適化を行い、アクティブストッパーに採用する MPPC を決定する予定である。

目次

第 1 章	序論	5
1.1	原子核の構造	5
1.2	弾性散乱	6
第 2 章	アクティブストッパー	7
2.1	アイソマー弾性散乱	7
2.2	アイソマー同定の手法	9
2.3	アクティブストッパー実用上の課題	10
2.4	アクティブストッパーの要求性能	12
第 3 章	本研究の目的	20
第 4 章	MPPC 性能評価のための光学系セットアップ	21
4.1	シンチレーション光の見積もり	21
4.2	光学セットアップ	22
4.3	光子数測定セットアップ	33
第 5 章	解析と考察	38
5.1	キャリブレーション	38
5.2	光量の評価	46
5.3	時間応答の評価	52
5.4	MPPC による応答の試験	56
第 6 章	まとめと今後の展望	61
6.1	まとめ	61
6.2	今後の展望	61
	参考文献	63

目次

1.1	核図表と原子核の構造	5
2.1	アイソマー弾性散乱実験セットアップ	8
2.2	弾性散乱からアイソマー同定までの概念図	8
2.3	アイソマービームに対する一般的なアイソマー同定の手法	9
2.4	アクティブストッパーによるアイソマー同定の手法	10
2.5	不感時間	11
2.6	ビーム強度と検出効率関係の減衰時間 τ に対する依存性	13
2.7	MPPC の概念図	15
2.8	MPPC の等価回路	16
2.9	3 mm 角 MPPC	17
2.10	6 mm 角 MPPC	17
2.11	典型的な MPPC の応答	18
4.1	$^{16}\text{N}(0^-)$ 用のアクティブストッパー概念図	22
4.2	NPL45B	23
4.3	NPL45B の典型的なパルス出力	23
4.4	ED1-S20-MD の拡散特性	24
4.5	C503B-BAS/BAN/GAS/GAN の電圧-電流特性	26
4.6	C503B-BAS/BAN/GAS/GAN の電流-光強度特性	26
4.7	C503B-BAS/BAN/GAS/GAN の角度-光強度特性	26
4.8	C503B-BAN-CZ0A0451 の時間応答	27
4.9	短パルスに対する LED の応答	28
4.10	アクティブストッパー性能評価のための回路	29
4.11	レーザーと LED のセットアップ	30
4.12	光学系セットアップ概念図	30
4.13	ED1-C20-MD の拡散特性	31
4.14	拡散板からの距離と上下方向への拡散	32
4.15	拡散板からの距離と 1mm^2 あたりの光子数	33

4.16	光子数測定セットアップ概念図	34
4.17	受光面を約 3mm × 3mm の穴をあけた暗幕で覆った PMT	34
4.18	R7600U の波長に対する典型的な応答	35
4.19	光子数測定のための回路	36
5.1	数光子イベントの波形	39
5.2	ペDESTAL と数光子イベントのフィッティング	39
5.3	印加電圧と QDC チャンネルの関係	42
5.4	ゲインキャリブレーションの結果とデータシートの典型値の比較	46
5.5	検出光子数と要求値の比較	49
5.6	入射光子数	52
5.7	レーザーの時間応答	53
5.8	レーザー (パルス幅 10 ns) と CeBr ₃ の時間応答の比較	54
5.9	レーザー (パルス幅 20 ns) と CeBr ₃ の時間応答の比較	54
5.10	LED の時間応答 (入力電圧 3.4 V)	55
5.11	LED の時間応答 (入力電圧 3.2 V)	56
5.12	試験に用いた MPPC と基板	57
5.13	MPPC による模擬信号の応答の確認	58
5.14	MPPC による模擬信号の応答の確認 (レーザーによる応答拡大)	59
5.15	MPPC による模擬信号の応答の確認 (LED の応答拡大)	60

表目次

2.1	シンチレータの比較	14
2.2	MPPC の仕様	18
2.3	MPPC 接続方法での応答性の比較	19
4.1	パルス幅によるレーザーの出力光子数	24
4.2	ED1-S20-MD の相対強度領域	25
4.3	C503B-BAN-CZ0A0451 の特性	25
4.4	ED1-C20-MD の相対強度領域	31
4.5	R7600U の特性	35
4.6	使用する減光板の特性	36
5.1	ペDESTAL と数光子イベントのフィッティング結果	40
5.2	ゲインキャリブレーション時の設定とフィット結果	41
5.3	ゲインの定数 A, B の値	43
5.4	実測チャンネルと式 5.2 の差	43
5.5	接続倍率	44
5.6	PMT のゲイン	45
5.7	QDC チャンネルと検出光子数 (レーザーパルス幅 20 ns)	47
5.8	QDC チャンネルと検出光子数 (レーザーパルス幅 10 ns)	48
5.9	LED の入力電圧・入力パルス幅と QDC チャンネルのガウスフィット結果	50
5.10	検出光子数と入射光子数	51
5.11	使用した MPPC の特性	57

第 1 章

序論

1.1 原子核の構造

自然界には多様な物質が見られる。これらの多様性は「多体効果 (相関)」によって生み出されており、未知なる相関やその発現機構を探ることは現代物理学の重要な目的の一つである。強い相互作用に支配された量子多体系である原子核においても、その相互作用の複雑さを反映して多彩な相関 (構造) が予言、観測されている (図 1.1)。

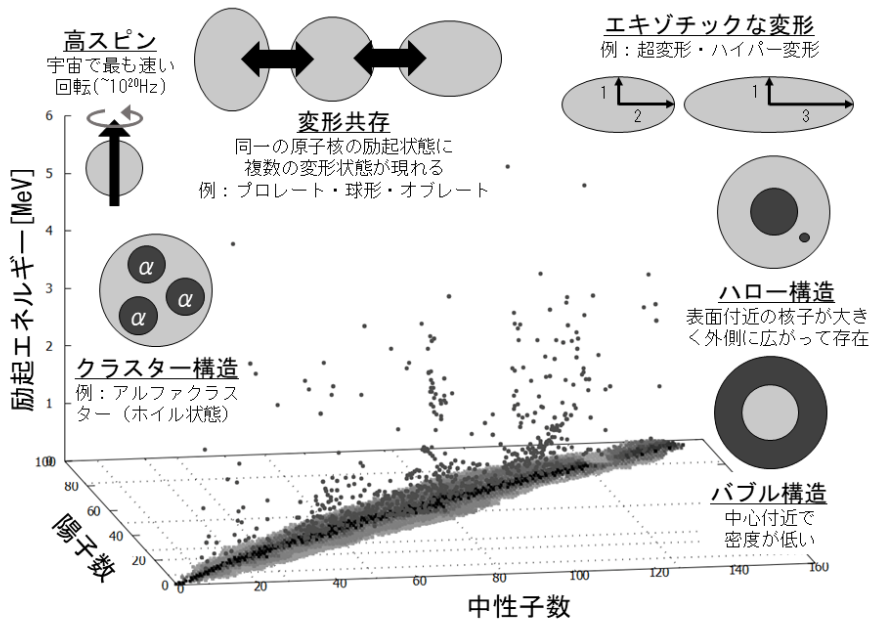


図 1.1: 核図表と原子核の構造。安定核が 300 種に対し、不安定核は知られているだけで約 3000 種、励起エネルギー軸上には約 2500 種のアイソマーが存在し、そこには多様な核構造が変化しながら現れる。

図 1.1 は「陽子数 (Z)」「中性子数 (N)」「励起エネルギー (E_x)」で原子核の核図表を示したもの

である。自然界に安定して存在する原子核は安定核と呼ばれ、約 300 種存在する。一方、自然界で安定して存在できずに、ある寿命で安定核へと崩壊する原子核は不安定核と呼ばれ、知られているだけで約 3000 種存在する。それぞれの原子核は、多数の励起状態を持ち、そのほとんどは励起されてもすぐに脱励起し、基底状態へと落ちるが、中には準安定化し、有限の寿命を持つアイソマーと呼ばれるものが約 2500 種存在する。アイソマーは、その発現機構によって、スピンアイソマーやシェープアイソマーなどに分類される。

これら多様な原子核を図 1.1 のように見たときに、様々な構造が変化しながら現れることがわかる。例えば、ハロー構造は核子が大きく外側に広がって存在する構造で、中性子過剰核によく見られる。近年では、 $^{12}\text{B}(2^-, 1^-, \dots)$ [1] や $^{16}\text{N}(0^-)$ [2] など、励起状態にもハロー構造が現れることが明らかにされつつある。このことは、原子核の性質が「陽子数 (Z)」「中性子数 (N)」「励起エネルギー (E_x)」によって劇的に変化することを意味している。したがって、これらの変数を変え、様々な原子核を調べることは、多様な構造が現れるメカニズムを理解することにつながる。

この点を踏まえ、もう一度図 1.1 を見てみると、安定核は陽子数と中性子数の比がほとんど一定の限られた領域にしかないことがわかる。一方で、陽子数と中性子数の比が大きく崩れた不安定核や、励起エネルギー軸上に存在する励起状態が広い領域に分布していることがわかる。

したがって、実験的には、安定核だけでなく、不安定核や励起状態を調べることが重要である。

1.2 弾性散乱

原子核の構造を反映するものに「密度分布」がある。弾性散乱は、密度分布を調べるための強力な手法である。天然に存在する原子核 (安定核) では、弾性散乱によって密度分布が調べられており、原子核構造理論の発展に大きな寄与を果たしてきた。近年では、放射性同位元素 (RI) ビーム技術の発展、我々の研究グループが確立した陽子弾性散乱による陽子・中性子密度分布の抽出手法 [4]、および逆運動学条件下での弾性散乱測定装置 (“Elastic Scattering of Protons with Radioactive Ion beams” = ESPRI と呼ばれる) の開発 [5]、がブレイクスルーとなり不安定核の弾性散乱による測定も可能となった。

一般に励起状態は極短寿命であるので、実験が非常に困難である。そのため励起状態の弾性散乱は行われたことがない。したがって、励起状態の弾性散乱を実現するためには、この課題を解決する大きなブレイクスルーが必要である。

第 2 章

アクティブストッパー

本章では、アイソマー同定の新手法「アクティブストッパー」について述べる。まず、アイソマー弾性散乱の概要について述べる。次に、アイソマー同定について、従来の手法と新手法「アクティブストッパー」について述べる。最後にアクティブストッパーの要求性能の見積もりについて議論する。

2.1 アイソマー弾性散乱

第 1 章で述べたように、一般に励起状態は極短寿命であるので、実験を行うことは非常に困難である。しかし、我々は準安定な励起状態であるアイソマーを用いることで、この課題を克服できるということに気付いた。アイソマーは RI ビームとして得ることができる (アイソマービーム) ので、不安定核の弾性散乱と同様に ESPRI を用いれば、アイソマーの密度分布を抽出することが可能となる。しかし、これを実現するためには、高効率なアイソマーの同定手法を確立することが必須である。

アイソマー弾性散乱は図 2.1 に示すセットアップで行う。陽子弾性散乱による密度分布測定のためには、固体水素標的に入射させるビームのエネルギーは、200 MeV/u, 300 MeV/u が必要である。図 2.1 のように、アイソマービームを固体水素標的に照射し、散乱陽子を ESPRI+(TOGAXSI) を用いて検出する。一方、アイソマーはアクティブストッパーを用いて同定する (図 2.2)。固体水素標的で散乱されたアイソマーは、エネルギー減衰板を用いて ~ 100 MeV/u までエネルギーを減衰させ、アクティブストッパーに埋め込み、遅延放射線を検出する。

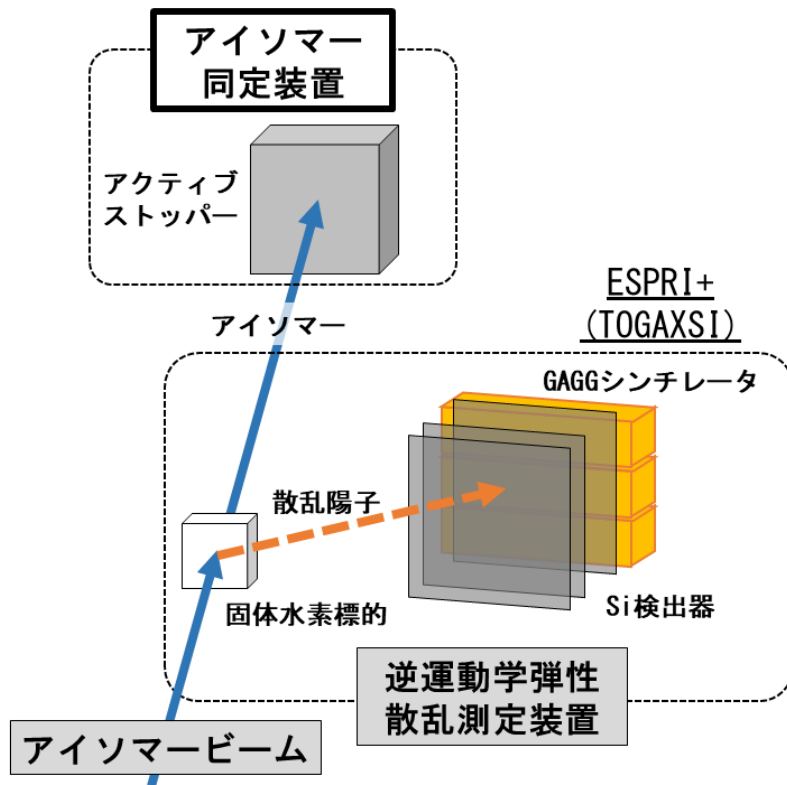


図 2.1: アイソマー弾性散乱実験セットアップ。アイソマービーム、ESPRI+ と「アクティブストッパー」の 3 要素を組み合わせることでアイソマーの密度分布を測定する。

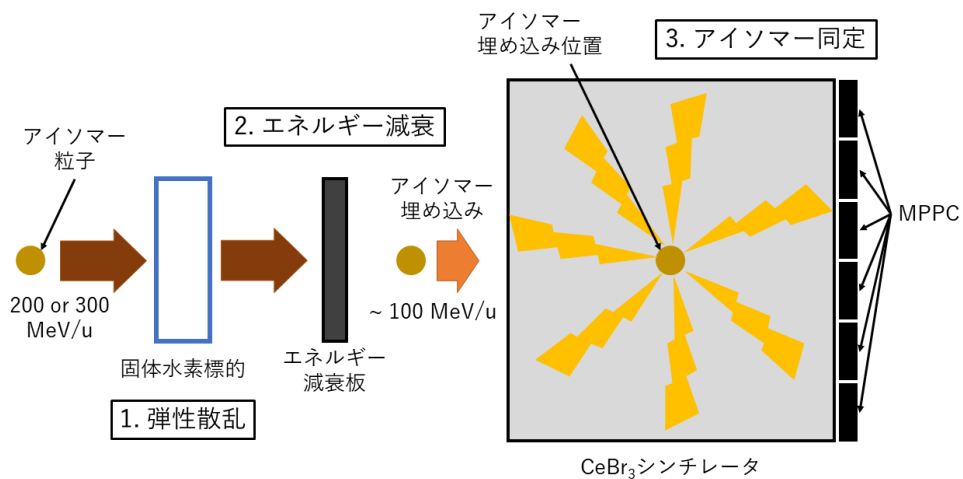


図 2.2: 弾性散乱からアイソマー同定までの概念図。

我々は $^{16}\text{N}(0^-)$ アイソマーを用いて、新アイソマー同定手法の確立を目指している。 $^{16}\text{N}(0^-)$

は半減期 5.25 μ s、遅延 γ 線のエネルギー 120 keV のアイソマーであり、半減期が適度に良いことと、アイソマービームとして得られる収量が比較的多いことが、このアイソマーを選んだ理由である。 $^{16}\text{N}(0^-)$ アイソマーは、実験的に扱いやすいだけでなく、物理的にも興味深いアイソマーである。 $^{16}\text{N}(0^-)$ アイソマーは、中性子ハロー構造が強く示唆され [2]、非一様ビッグバン元素合成模型において重要な役割を担っている [3]。

2.2 アイソマー同定の手法

本節では、飛行アイソマーの同定手法について、従来の手法と新手法「アクティブストッパー」を比較する。

一般に飛行アイソマーの同定は、ストッパーにアイソマーを埋め込み、遅れて放出される遅延放射線 (γ 線や電子・陽電子など) を周辺に配置した検出器で検出することで行われる。この際の検出効率がアイソマー同定の有効性に直結する。そのため、この点について議論する。

2.2.1 従来の手法

従来のアイソマー同定の手法では、ストッパーにアイソマーを埋め込み、放出される遅延放射線を放射線検出器で検出する (図 2.3)。この手法では、検出器の配置による制限とストッパーによる放射線の吸収のために、典型的な検出効率は 10% である [6]。

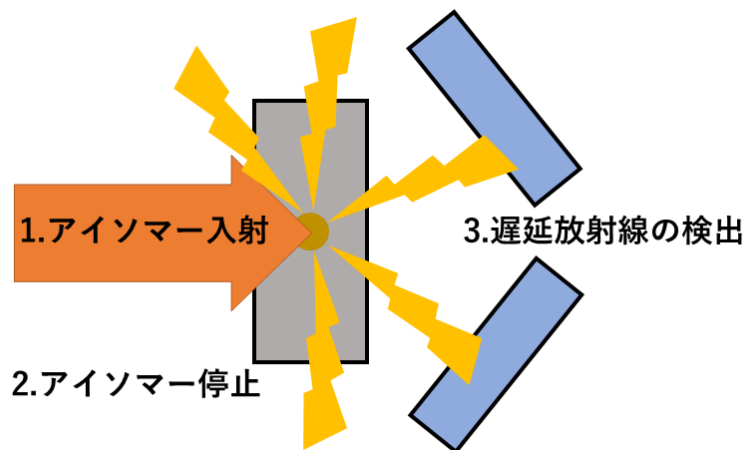


図 2.3: アイソマービームに対する一般的なアイソマー同定の手法。ストッパーに埋め込んだアイソマーから放出される遅延放射線を放射線検出器で検出する。立体角の制限、ストッパーでの放射線の吸収のため、典型的な検出効率は 10% である。

2.2.2 新手法「アクティブストッパー」

アクティブストッパーは、遅延放射線検出器にアイソマーを埋め込むストッパーの役割も担わせる (図 2.4)。ストッパーと検出器が一体であることにより、ストッパーによる放射線の吸収の問題が起こらない。さらに、全立体角を覆うことができるため、原理的には 100% の検出効率を実現できる。

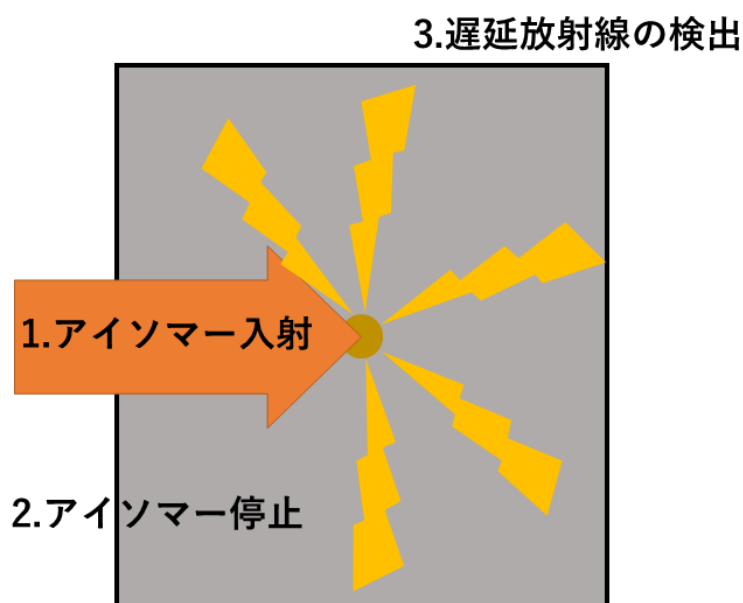


図 2.4: アクティブストッパーによるアイソマー同定の手法。本手法により 100% の検出効率を実現できる。

2.3 アクティブストッパー実用上の課題

高いアイソマー同定効率が期待できるアクティブストッパーであるが、実用上は解決しなければならない課題が存在する。それは、アイソマーをシンチレータに埋め込む際のエネルギーが、遅延放射線に対して 10^4 オーダー大きいことによる。これにより生じる不感時間と、フォトセンサーの問題について本節で述べる。

2.3.1 不感時間

不感時間は、アイソマー埋め込み時のシンチレーション光がバックグラウンドとなり、遅延放射線の信号を検出できない時間のことである (図 2.5)。

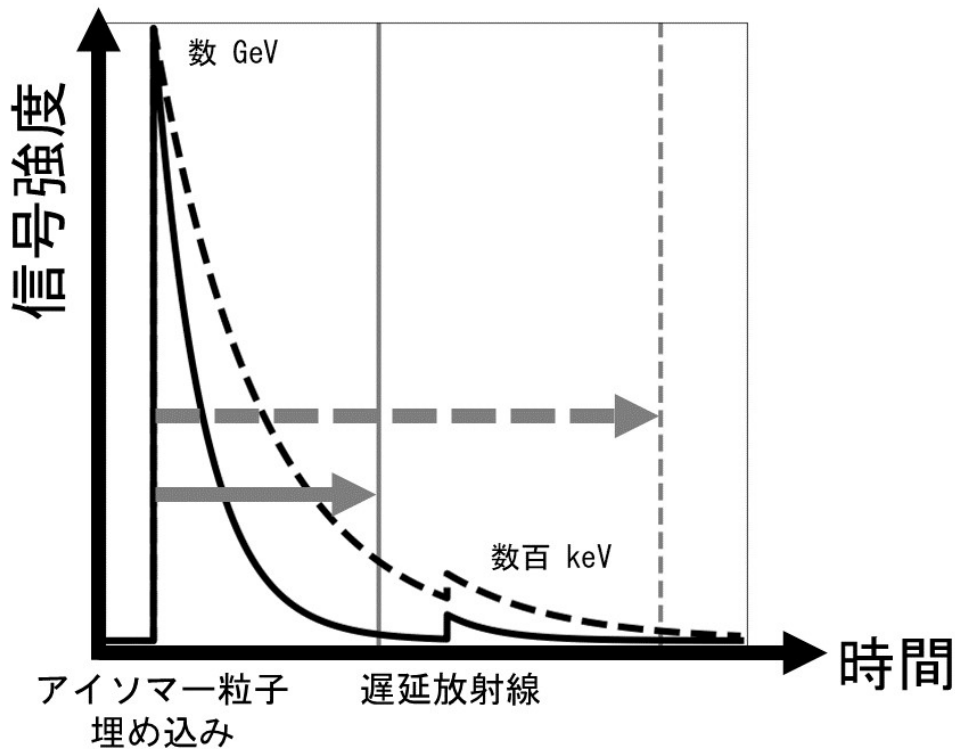


図 2.5: 不感時間。アイソマー粒子埋め込み時の大強度信号により、遅延放射線の信号が検出できない時間が存在する。矢印の領域は不感時間を表しており、その時間は検出器の時間応答に依存する。

アイソマーの崩壊は、式 2.1 で表される。ある時刻 $t = 0$ に N_0 個の粒子があったとき、時刻 t での残存粒子数 $N(t)$ は、

$$N(t) = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{lifetime}}}\right) \quad (2.1)$$

である。ここで、 τ_{lifetime} は寿命である。

検出効率を高くするためには、不感時間をできるだけ短くする必要がある。式 2.1 から残存粒子の割合 $N(t)/N_0$ がある値になるときの時刻は、

$$t = -\tau_{\text{lifetime}} \ln\left(\frac{N(t)}{N_0}\right) \quad (2.2)$$

により求めることができる。崩壊率を 5% 以内に抑えこもうとすると、式 2.2 から $N(t)/N_0 = 0.95$ 以上とできるように不感時間を短くする必要がある。

$^{16}\text{N}(0^-)$ は半減期 $t_{1/2} = 5.25\mu\text{s}$ であり、寿命と半減期の関係は $\tau_{\text{lifetime}} = t_{1/2}/\ln(2)$ であるので、不感時間 $t_{\text{dead}} \sim 400\text{ ns}$ であることが要求される。

2.3.2 フォトセンサー

アクティブストッパーでは、フォトセンサーとして何を選定するかが問題になってくる。

一般的には、フォトセンサーとして光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube = PMT) が広く用いられている。PMT の動作原理は次のとおりである。まず、入射光子を光電効果により電子に変える。電子は陽極-陰極間に電圧を印加すること加速され、複数段のダイノードで増幅され、最終的にアノードから電気信号として読み出す。入射光子数が増大すると光電効果により放出される電子が増える。電子が増え、出力電流が増大することに伴って、ダイノード間の電圧が低下し、増倍率が低くなってしまふ。

数百 keV の遅延放射線の信号に適した印加電圧のとき、それよりも 10^4 倍も多く光子が入射すると、上記のように増倍率が低下する。そのため、PMT を用いることはできない。そこで、大光量に対しても安定した応答を示すフォトセンサーを探す必要がある。

2.4 アクティブストッパーの要求性能

アクティブストッパーの検出効率の向上のためには 2.3 節で述べたように、数 GeV の大強度信号を素早く減衰する必要がある。これらを実現するための要求として、読み出し信号の減衰時間、シンチレータ、フォトセンサーのそれぞれに対する要求を議論する。

2.4.1 アクティブストッパーでの信号の減衰時間

不感時間の要求から、検出器系での減衰時間 τ を求める。

時刻 t での信号強度 $I(t)$ は、時刻 $t = 0$ での信号強度を I_0 として、

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2.3)$$

で表される。

シンチレータの発光量は $^{16}\text{N}(0^-)$ ビーム埋め込みや $E_\gamma = 120$ keV の γ 線が、シンチレータ中で落とすエネルギー ΔE に比例する。

不感時間 t_{dead} は、アイソマー埋め込みによるバックグラウンドの信号が、120 keV の γ 線の信号強度に対して十分小さくなる (ここでは $E_\gamma/10$ を仮定する) 時間であるとする。これは、検出器の時定数により決まっており、式 2.4 で表される。

$$I_{\text{beam}} \exp\left(-\frac{t_{\text{dead}}}{\tau}\right) = I_\gamma/10 \quad (2.4)$$

ここで I_γ は遅延 γ 線による初期信号強度である。それぞれの信号強度 $I_{0,\text{beam}}, I_{0,\gamma}$ は、 $I_{0,\text{beam}} = C \times \Delta E_{\text{beam}}, I_{0,\gamma} = C \times E_\gamma$ の関係があるので、

$$\Delta E_{\text{beam}} \exp\left(-\frac{t_{\text{dead}}}{\tau}\right) = E_\gamma/10 \quad (2.5)$$

と表すこともできる。式 2.5 から、

$$\tau = -t_{\text{dead}} \ln\left(\frac{E_\gamma/10}{\Delta E_{\text{beam}}}\right) \quad (2.6)$$

となる。これが、検出器の時定数と不感時間の関係を表すものである。

アイソマーの検出効率が95%以上となるためには、不感時間は ~ 400 ns以下であることが求められる。アクティブストッパーには、 $\Delta E_{\text{beam}} \sim 100$ MeV/u の ^{16}N ビームの入射を想定している(詳しくは2.4.2節で述べる)ので、 ^{16}N ビームの場合には $\Delta E_{\text{beam}} \sim 1.6$ GeVである。したがって、検出器の時定数には $\tau \sim 30$ nsが要求される。

また、アクティブストッパーの効率は、ビーム強度にも依存している。それは、レートがアイソマー崩壊の半減期程度になると、別のビームが遅延 γ 線に対して、不感時間を作ってしまう割合が増えてくるからである。ビーム強度と検出効率の関係をモンテカルロシミュレーションによって、見積もったものを図2.6に示す。

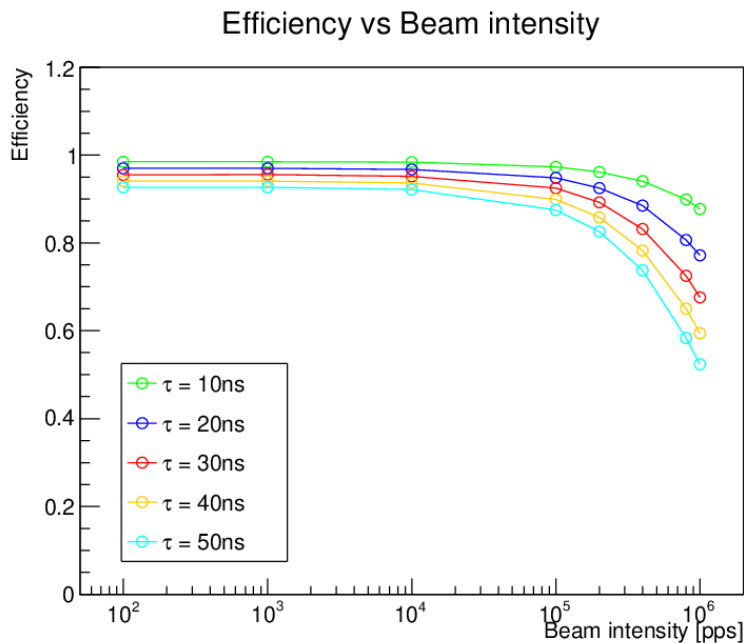


図 2.6: ビーム強度と検出効率関係の減衰時間 τ に対する依存性。

ビーム強度が高くなると検出効率が低下するが、時定数が小さいほどその影響は小さいことがわかる。弾性散乱実験の際には、 10^5 pps 程度の入射ビーム強度が想定される。図 2.6 から、そのビーム強度で90%の高い検出効率を得るためには、30 ns の減衰時間が必要であることがわかる。

以上の議論から、アクティブストッパーの減衰時間の要求として減衰時間 $\tau \sim 30$ ns が求められる。

2.4.2 シンチレータ

アクティブストッパーは、ストッパーの役割も担う放射線検出器である。そのため、アクティブストッパーに用いるシンチレータには放射線検出器としての要求と同時にストッパーとして用いたときの問題点を考える必要がある。

放射線検出器としては、2.4.1 小節で求めた高速な応答性が実現でき、 γ 線に対する感度が高く、120 keV でも十分な発光量が得られなければならない。表 2.1 で典型的なシンチレーターの性能を比較する。

表 2.1: シンチレーターの比較

素材	密度 [g/cm ³]	原子番号 (実効)	減衰時間 [ns]	発光量 [$\times 10^3$ /MeV]	発光波長 [nm]	分解能 [%] ^a	潮解性	自己放射性
NaI(Tl)	3.67	50	230	55	415	9	あり	なし
CsI(Tl)	4.51	54	900	54	550	7	あり	なし
BGO	7.13	74	300	8 - 10	480	7	なし	なし
GSO	6.7	58	30 - 60	8 - 10	430	7	なし	なし
GAGG	6.63	54.4	88	57	520	5.2	なし	なし
LaBr ₃	5.08	48	16	63	380	2.6	あり	あり
CeBr ₃	5.1	45.9	19	60	380	4	あり	わずか ^b

a 662keV に対して。

b 0.004 Bq/cm³。

一般に γ 線検出器として広く利用されている NaI(Tl)、CsI(Tl) は減衰時間が数百 ns と長い。LaBr₃、CeBr₃ は γ 線検出器として NaI(Tl)、CsI(Tl) と同様の優れた特徴を持ち、減衰時間も短い。CeBr₃ は自己放射性を持つが、0.004Bq/cm³ と小さいため、無視できる。一方、LaBr₃ には強い自己放射性 ($\sim 10^{-1}$ Bq/cm³) があるため、アクティブストッパーとしては適さない。GAGG は NaI(Tl)、CsI(Tl) と比較すれば応答が速いが、要求性能には満たない。BGO や GSO は減衰時間が長く、発光量が少ない。

以上から、CeBr₃ はアクティブストッパーとして用いるのに適した素材である。

次に、CeBr₃ の厚さを考える。

まず、 γ 線検出器としては、120 keV の遅延 γ 線に対して、単位体積当たりの減衰長を XCOM[7] で求めると 0.85 cm²/g であった。密度は 5.1 g/cm³ であるので、減衰長は 0.23 cm である。例えば、 γ 線の吸収率が 99% になる厚さを考えてみると、11 mm である。したがって、アクティブストッパーとして 22 mm 以上の厚さがあれば、放出された遅延 γ 線を 99% 以上逃さず吸収することができる。

一方、アクティブストッパーを厚くすれば、その分だけアイソマー埋め込み時に必要なエネルギーが大きくなる。弾性散乱で用いるビームのエネルギーは 200 MeV/u や 300 MeV/u であるが、アクティブストッパーに埋め込む際のエネルギーは、上述の厚さを考えると ~ 120 MeV/u が妥当である。したがって、弾性散乱実験では、ビームエネルギーをこのエネルギーまで落としたうえで、アクティブストッパーに埋め込むことを考えている。

2.4.3 フォトセンサー

アクティブストッパーで用いるフォトセンサーには、大光量に対しても安定に動作することが求められる。2.3.2 小節で述べたように、PMT では、大光量に対する安定動作が期待できない。そ

ここで、この要求を満たすフォトセンサーとして MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) を用いる。MPPC は、一般に Si-PM (Silicon Photomultiplier) とも呼ばれるフォトセンサーの一種であり、近年様々な用途で用いられてきている。

MPPC は多数の Avalanche Photo Diode (APD) から構成されるため、まず APD の動作原理から述べる。APD は降伏電圧以上の逆電圧をかけて動作させる (ガイガーモード) と、ガイガー放電と呼ばれる入射光子数と無関係な素子固有の飽和出力が生じる。そのため、大光量に対しても安定した動作が期待できる。ガイガー放電は素子内部の電場が保たれる間は継続してしまうため、次の光子を検出するにはガイガー放電を止める必要がある。MPPC では APD に直列にクエンチング抵抗を接続し、APD のアバランシェ増倍を短時間で止める手法が用いられている。APD とクエンチング抵抗の組み合わせを 1 単位 (1 ピクセル) として、多数のピクセルを 2 次元に電気的に接続することで MPPC は構成されている (図 2.7)。ガイガーモード APD の特性により、MPPC はダイナミックレンジがピクセル数で制限されているので、ピクセル数以上の光子が入ってきても無視されることになる。アイソマー埋め込み時の大強度シンチレーション光を無視できるため、この特性がアクティブストッパーに用いる際の利点となる。

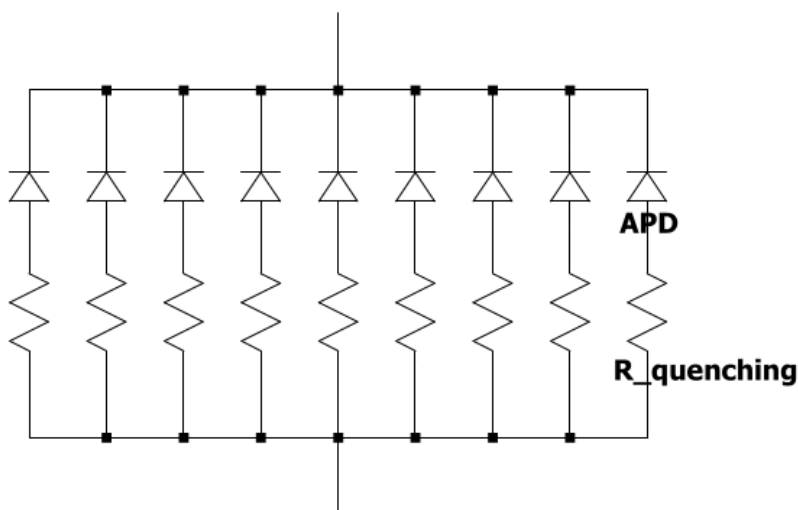


図 2.7: MPPC の概念図。ガイガーモード APD とクエンチング抵抗 ($R_{\text{quenching}}$) を直列に接続したピクセルが基本単位である。MPPC は、多数のピクセルから成り立っている。

また、アクティブストッパー全体で 2.4.1 小節で求めた時間応答の要求を満たさなければならぬので、フォトセンサーにも時間応答の良さが求められる。MPPC の時間応答は、立ち上がりの際は APD のガイガー放電により鋭いが、立ち下がりの際は MPPC の静電容量と抵抗値に従い比較的緩やかである。1 ピクセル当たりの静電容量を C_{pix} 、抵抗値を R_{pix} 、ピクセル数を N_{pix} 、読み出し回路での抵抗値を R_{receive} とすると、減衰時間 τ_{MPPC} は、

$$\tau_{\text{MPPC}} = N_{\text{pix}} C_{\text{pix}} \left(\frac{R_{\text{pix}}}{N_{\text{pix}}} + R_{\text{receive}} \right) \quad (2.7)$$

で表される (図 2.8 参照)。

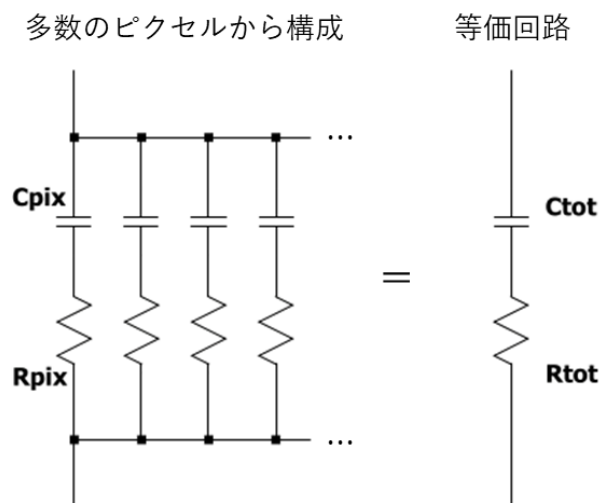


図 2.8: MPPC の等価回路。 C_{pix} , R_{pix} , C_{tot} , R_{tot} はそれぞれ、1 ピクセルの静電容量、1 ピクセルの抵抗値、MPPC 1 個分の静電容量、MPPC 1 個分の抵抗値であり、 $C_{\text{pix}}N_{\text{pix}} = C_{\text{tot}}$, $R_{\text{pix}}/N_{\text{pix}} = R_{\text{tot}}$ である。

アクティブストッパーに用いる MPPC には浜松ホトニクス製 S13360 シリーズを考えている。S13360-3025CS、S13360-3050CS、S13360-6025CS、S13360-6050CS (以下では、それぞれ単に 3025、3050、6025、6050 と呼ぶ) の仕様を、表 2.2 に示す [8]。また、例として 3025 と 6025 の外観を図 2.9、2.10 に示す。最大感度波長は 450 nm である。また、典型的な MPPC の応答を図 2.11 に示す。

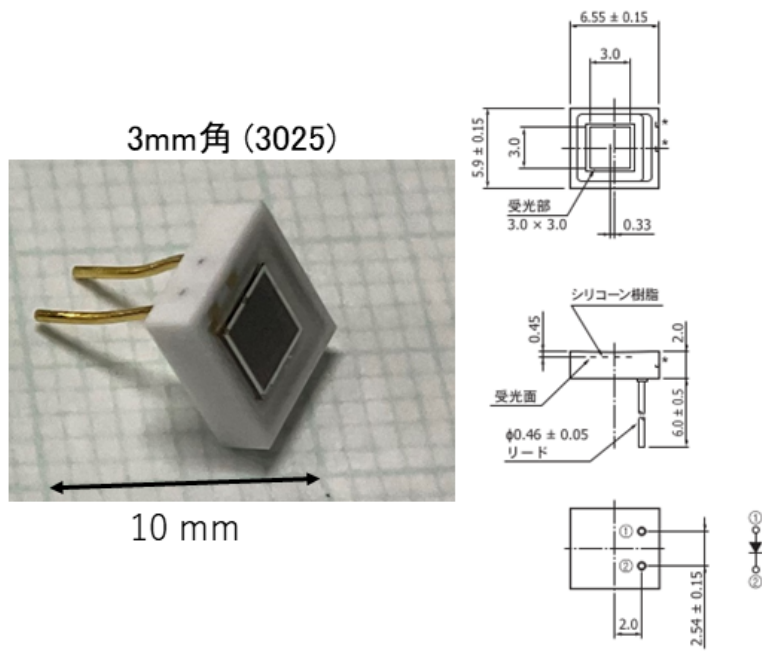


図 2.9: 3 mm 角 MPPC。例として 3025 を示す。寸法は [8] より。

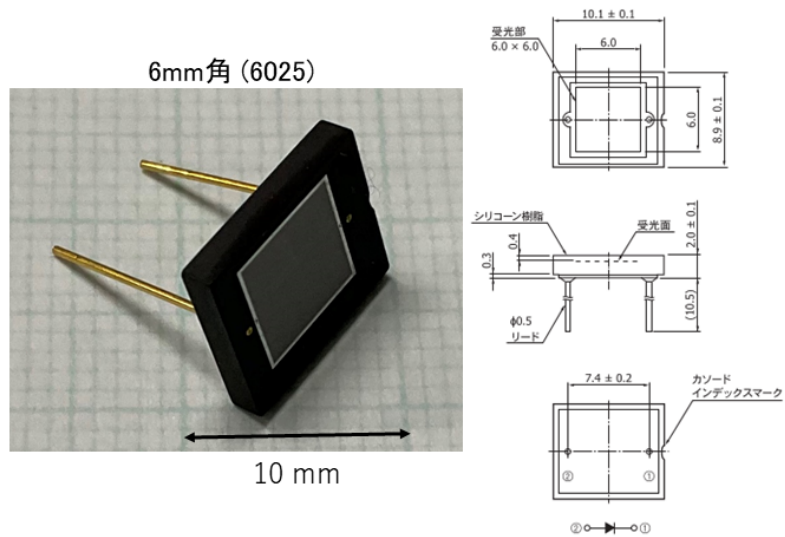


図 2.10: 6 mm 角 MPPC。例として 6025 を示す。寸法は [8] より。

表 2.2: MPPC の仕様 [8]

型名	ピクセルピッチ [μm]	有効受光面 [mm]	ピクセル数	開口率 [%]	端子間容量 [pF]
3025	25	3.0×3.0	14400	47	320
3050	50	3.0×3.0	3600	74	320
6025	25	6.0×6.0	57600	47	1280
6050	50	6.0×6.0	14400	74	1280

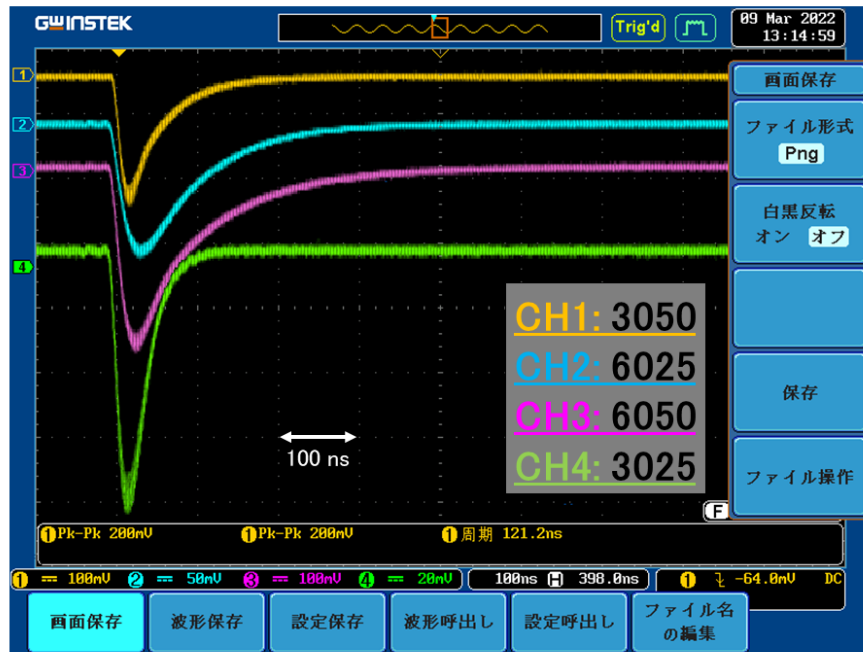


図 2.11: 典型的な MPPC の応答。立ち下がり是比较的緩やかである。

MPPC は読み出し回路のチャンネル接続方法により、立ち下がりの時間応答を短くすることが可能である。

MPPC を直列に接続した場合には、合成抵抗は大きくなり、合成容量は小さくなる。一方、読み出し抵抗値 R_{receive} が同じであるとき、MPPC を N 個直列に繋げば、減衰時間 τ_N は、

$$\begin{aligned} \tau_N &= \frac{N_{\text{pix}} C_{\text{pix}}}{N} \left(N \times \frac{R_{\text{pix}}}{N_{\text{pix}}} + R_{\text{receive}} \right) \\ &= C_{\text{pix}} \times R_{\text{pix}} + N_{\text{pix}} \frac{C_{\text{pix}} R_{\text{receive}}}{N} \end{aligned} \quad (2.8)$$

となる。そのため、MPPC を直列に接続することで、アクティブストッパーの時間応答を高速化することができる。

4種のMPPC(3025、3050、6025、6050)を1個だけで読み出した場合と、4個直列で読み出した場合を表2.3に比較する。ここでは $R_{\text{receive}} = 100 \Omega$ とする。また、 N_{pix} はMPPC1個当たりのピクセル数である。

表 2.3: MPPC 接続方法での応答性の比較

接続方法	N_{pix}	C_{pix} [fF]	R_{pix} [k Ω]	τ_{MPPC} [ns]
3025 個別	14400	22	100	34
3050 個別	3600	89	100	41
6025 個別	3600	89	100	130
6050 個別	14400	22	100	164
3025 直列	14400	22	100	10
3050 直列	3600	89	100	17
6025 直列	3600	89	100	34
6050 直列	14400	22	100	68

この結果から、浜松ホトニクス製 MPPC S13360 シリーズを用いることで、要求性能を満たすアクティブストッパーが実現できると考えた。

2.4.4 データ取得の方法

アクティブストッパーでは、アイソマー埋め込み時の信号と、遅延ガンマ線による信号の2種類の信号を取得する必要がある。バックグラウンド放射線の影響もあるかもしれない。そのため、マルチヒットイベントに対応したデータ収集法を採用する必要がある。また、半減期が5.25 μs であることから、タイムウィンドウとして数十 ns を実現できるものでなければならない。そこで、charge to time converter (QTC) や time over threshold (TOT) とマルチヒット TDC を組み合わせて測定を行う。QTC や TOT による出力をマルチヒット TDC で取得することにより、放出される遅延ガンマ線のエネルギーを求めることができる。これにより、アイソマーの同定を行う。

第 3 章

本研究の目的

本研究では、以下の 3 項目について MPPC の応答を最適化することができる、光学系セットアップを構築することを目的とする。

- 時間応答
- 大光量に対する応答
- マルチヒットイベントに対するデータの取得

アクティブストッパーは第 2 章で示したように、シンチレータと MPPC で構成される。時間応答は、シンチレータの時間応答と MPPC の時間応答をあわせたものになる。シンチレータの減衰時間は、素材を決めると一意に決まる。一方、MPPC は 2.4.3 小節に示したように、その減衰時間は MPPC の回路特性に依存している。そのため、要求性能を満たすアクティブストッパーの開発には、MPPC の性能およびチャンネル接続方法の評価が必要である。

また、大光量に対する MPPC の応答は、未知であるので実際に確認する必要がある。そのため、 CeBr_3 の光子数を模擬して、MPPC の応答を見ることができるセットアップが必要である。

アクティブストッパーでは、必ずマルチヒットイベントを取得する必要がある。そのため、これに対応したデータの取得方法を検討し、そのエネルギー分解能や時間分解能について、評価できるセットアップが求められる。

性能評価に最良の方法は、実際に $^{16}\text{N}(0^-)$ アイソマービームを使うことである。しかし、アイソマービームの生成は加速器施設を利用するものであり、限られた実験時間の中で開発を行うのは困難である。そこで、本研究ではアクティブストッパー性能評価のための光学系セットアップを構築し、簡便な評価を行うことができるようにする。構築した光学系セットアップによる模擬信号を用いることで、発光量や発光の遅延時間を任意に変更可能となる。そのため、アクティブストッパーに用いる MPPC の性能を評価し、パラメータを最適化することが容易になる。この光学系を用いた性能評価により、アイソマービームを用いた実験のできる、少ない機会を有効に利用できるようになる。そのため、アクティブストッパーの開発のための光学系セットアップを構築することは重要である。

第 4 章

MPPC 性能評価のための光学系セットアップ

本章では、アクティブストッパー開発のための MPPC 性能評価の光学セットアップについて述べる。アクティブストッパーの性能評価のためには、MPPC の応答を本番に近い状況で評価する必要がある。そのためには、アイソマービーム埋め込みと遅延 γ 線放出による CeBr_3 のシンチレーション光を模擬する必要がある。これを実現できる光学セットアップを作成し、その性能評価を行う。

アクティブストッパーでの $^{16}\text{N}(0^-)$ アイソマーの埋め込みを模擬する光学機器 A および遅延 γ 線の放出を模擬する光学機器 B のセットアップに対する要請は、

1. CeBr_3 の時間応答を再現するために、A、B ともに数十 ns のパルス幅で発光できること
2. A がアイソマー埋め込みによるシンチレーション光を模擬できるほど大光量であること
3. 同期信号をもとに A、B 2 個の光学機器を駆動できること
4. B の発光タイミングを A の発光タイミングから自由に遅らせることができること
5. B の光量が可変であること
6. A、B いずれからも複数の MPPC にできるだけ一様な光が入射すること

である。

上の要請を満たす光学機器として、A にサブナノ秒パルスレーザー、B に LED を用いることを検討し、これらを組み合わせた性能評価のためのデータ取得のセットアップを考える。さらに、そのセットアップに対して光量の測定を行い、実際の入射光子数と時間応答を評価する。

4.1 シンチレーション光の見積もり

^{16}N ビームと 120 keV γ 線のそれぞれに対する総発光量を求める。 CeBr_3 の発光量は表 2.1 に示したように 60000/MeV である。 ^{16}N ビームの入射エネルギーは 2.4.2 小節で示したように、約 120 MeV/u であるので、 CeBr_3 中で落とすエネルギーは 1.9 GeV であり、 1.2×10^8 個の光子が

放出される。120 keV γ 線によるシンチレーション光子数は 7.2×10^3 個である。

アクティブストッパーに用いる CeBr_3 の厚さに対する要求から、MPPC に対する入射光子数を見積もる。アクティブストッパーの最終的なデザインは現在検討中であるので、デザイン案の 1 例を図 4.1 に示し、これをもとにした光子数を求める。

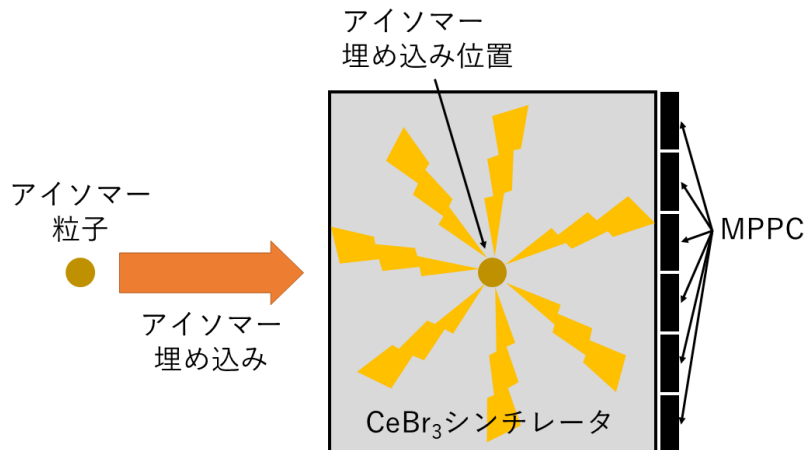


図 4.1: $^{16}\text{N}(0^-)$ 用のアクティブストッパー概念図。後方に配置した MPPC で CeBr_3 によるシンチレーション光を検出する。

アクティブストッパーでは、アイソマーを 11mm の位置に埋め込み、アイソマー埋め込み位置で遅延 γ 線を放出する。光量の見積もりは、簡単のため、次の状況を仮定する。

- アイソマー埋め込み位置で全入射エネルギーを落とす。
- アイソマー埋め込み位置で遅延 γ 線を放出する。
- アイソマー埋め込み位置で γ 線を吸収し、シンチレーション光を放出する。

このとき、アイソマー入射軸上の 1 mm^2 の領域を考えると、この領域が覆う立体角は全立体角の 0.05% 程度である。したがって、 1 mm^2 あたりの入射光子数は、 ^{16}N ビームに対して、 $8 \times 10^4 / \text{mm}^2$ 、120 keV γ 線に対して、 $5 / \text{mm}^2$ である。

4.2 光学セットアップ

本節では、アクティブストッパーの性能評価に用いるレーザー、LED の発光量について見積もりを行い、4.1 節で求めた光子数をもとに、その配置方法について議論する。

4.2.1 レーザー

アイソマー埋め込み時のシンチレーション光を模擬するためには、サブナノ秒パルスレーザーが必要である。そこで、本研究で使用するレーザーは Thorlabs の NPL45B である (図 4.2)。

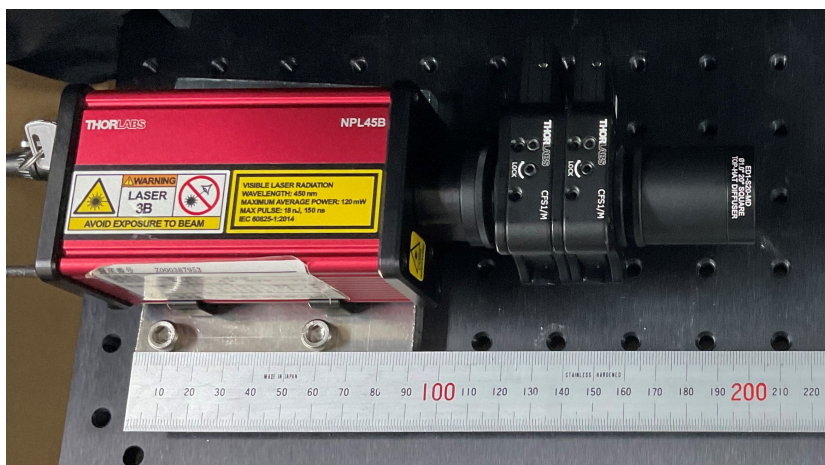


図 4.2: NPL45B。レーザー光は減光板 (後述) と拡散板 (後述) を通して出力される。

NPL45B の特徴は、 450 ± 10 nm の発光波長とパルス幅が可変であること (5 – 39 ns の間で 16 段階の調整が可能) である。いくつかのパルス幅に対して、典型的な応答を図 4.3 に示す [9]。

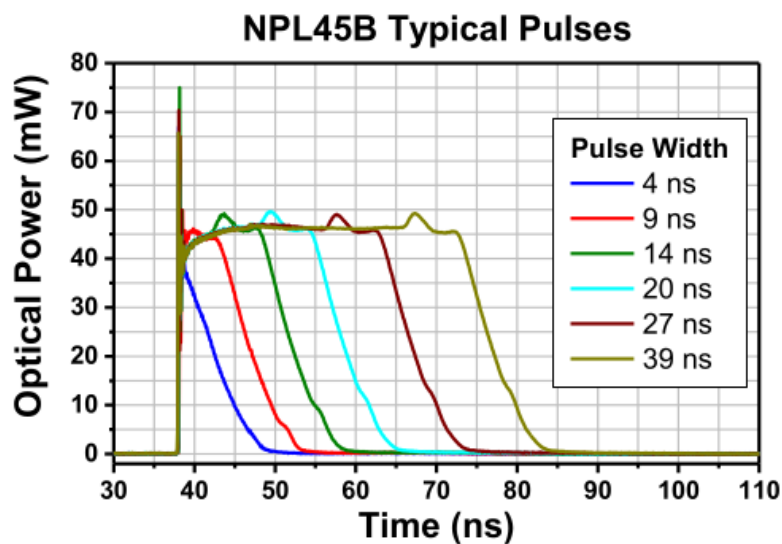


図 4.3: NPL45B の典型的なパルス出力 [9]。

波長 λ の光子 1 個のエネルギー $E_{1\text{ph}}$ は、

$$E_{1\text{ph}} = \frac{hc}{\lambda} \quad (4.1)$$

と表せる。ここで、 h はプランク定数、 c は光速である。 $\lambda = 450 \text{ nm}$ を用いると、 $E_{1\text{ph}} = 4.4 \times 10^{-19} \text{ J} = 4.4 \times 10^{-16} \text{ mWs}$ と求まる。

図 4.3 から、レーザーのパルス出力を簡易的に評価する。パルス成分として、

- 70 - 75 mW の鋭い立ち上がり (1 ns 程度)
- パルス幅に応じたフラットな 45 mW の出力 (4 ns のときはなし)
- 45 mW から 10 ns の線形な立ち下がり

の 3 成分に分けられる。これを用いて、4, 9, 20, 39 ns のときのパルス当たりのレーザーの出力エネルギー E_{laser} は、 $E_{\text{laser}} = 2.7 \times 10^{-7}, 7.2 \times 10^{-7}, 1.2 \times 10^{-6}, 2.1 \times 10^{-6} \text{ mWs}$ と評価できる。この評価をもとに出力光子数を表 4.1 にまとめる。

表 4.1: パルス幅によるレーザーの出力光子数

パルス幅 [ns]	レーザーの出力 [mWs]	出力光子数
4	2.7×10^{-7}	6.1×10^8
9	7.2×10^{-7}	1.6×10^9
20	1.2×10^{-6}	2.7×10^9
39	2.1×10^{-6}	4.7×10^9

表 4.1 の出力光子は、5.0 m 離れた位置での Beam Full Width ($1/e^2$) が 3.3 mm (major axis)、1.6 mm (minor axis) [9] という狭い範囲に集中しているため、そのままでは MPPC の受光面全体に当てることはできない。そこで、拡散板を用いて、レーザー光を広げる。今回用いる拡散板は、Thorlabs の ED1-S20-MD であり、その特性を図 4.4 に示す [10]。

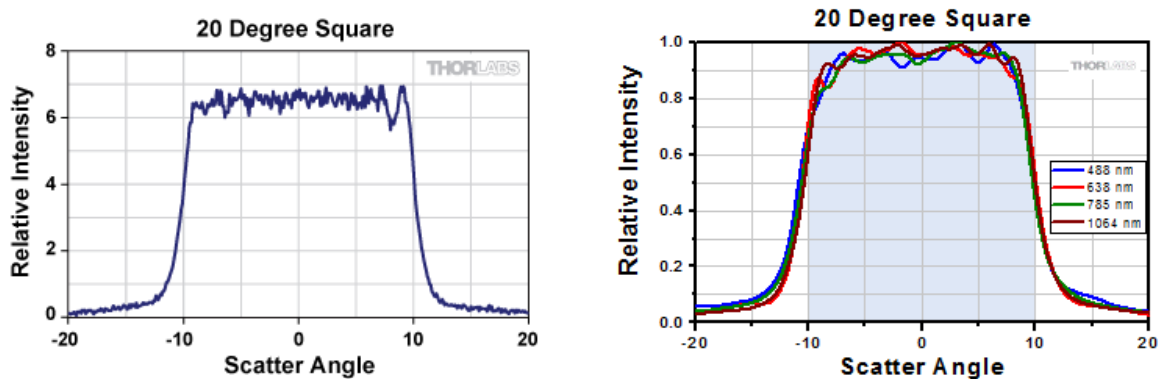


図 4.4: ED1-S20-MD の拡散特性 [10]。左は理論計算、右は実データ [11] に基づく。

拡散光の相対強度が最大値の 50 % 以上である角度が $20^\circ (\pm 10^\circ)$ になるように設計されており、実データ [11] では表 4.2 の結果となっている。

表 4.2: ED1-S20-MD の相対強度領域

波長 [nm]	フラットな領域 [°]	最大値の 50% の領域 [°]	最大値の 10% の領域 [°]
488	16.2	20.8	28.4
638	18.6	20.7	25.5
785	17.8	20.4	27.2
1064	17.5	20.4	25.9

表 4.2 のデータは、今回用いる NPL45B の発光波長 450 nm を含んでいないが、最大値の 50% の領域を約 $20^\circ(\pm 10^\circ)$ であるとして、4.2.3 小節での計算に用いる。

4.2.2 LED

使用する LED は、C503B-BAN-CZ0A0451 であり、C503B-BAS/BAN/GAS/GAN シリーズ共通の特性を表 4.3、図 4.5 - 4.7 に示す [12]。

表 4.3: C503B-BAN-CZ0A0451 の特性 [12]

特性	単位	典型値	最小値	最大値	条件
波長 λ	nm	470	465	480	$I_F = 20 \text{ mA}$ ^a
順電圧 V_F	V	3.0		3.8	$I_F = 20 \text{ mA}$
逆電流 I_R	μA			100	$V_R = 5 \text{ V}$ ^b
光強度 I_V	mcd	11000	4180		$I_F = 20 \text{ mA}$
出力 50% の角度 $2\theta_{1/2}$	deg (°)	15			$I_F = 20 \text{ mA}$

a 順電流。

b 逆電圧。

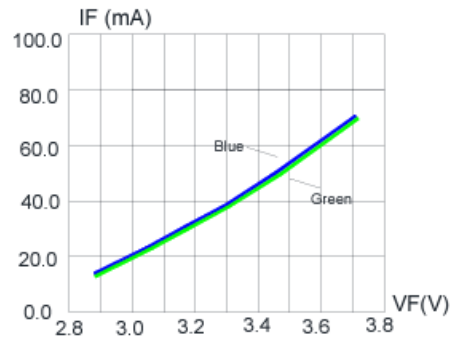


FIG.1 FORWARD CURRENT VS. FORWARD VOLTAGE.

図 4.5: C503B-BAS/BAN/GAS/GAN の電圧-電流特性 [12]。

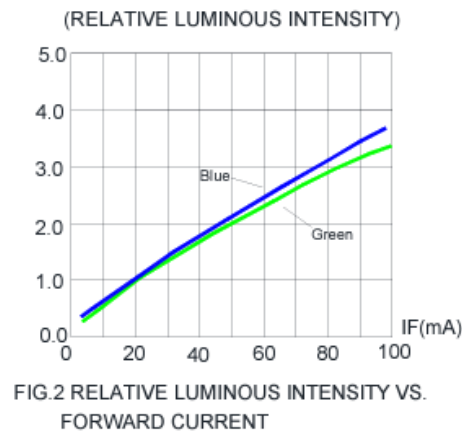


FIG.2 RELATIVE LUMINOUS INTENSITY VS. FORWARD CURRENT

図 4.6: C503B-BAS/BAN/GAS/GAN の電流-光強度特性 [12]。

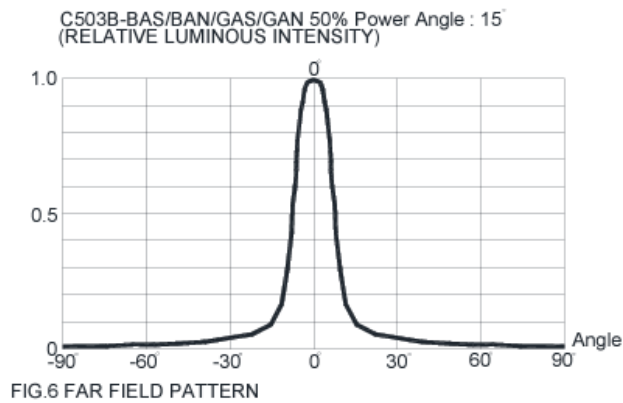


図 4.7: C503B-BAS/BAN/GAS/GAN の角度-光強度特性 [12]。

まず、パルス幅 $1\mu\text{s}$ 程度の長いパルスを入力したときの LED の応答を確認した (図 4.8)。LED が 100ns 程度の時定数を持っており、それによって応答がなままっていることがわかる。

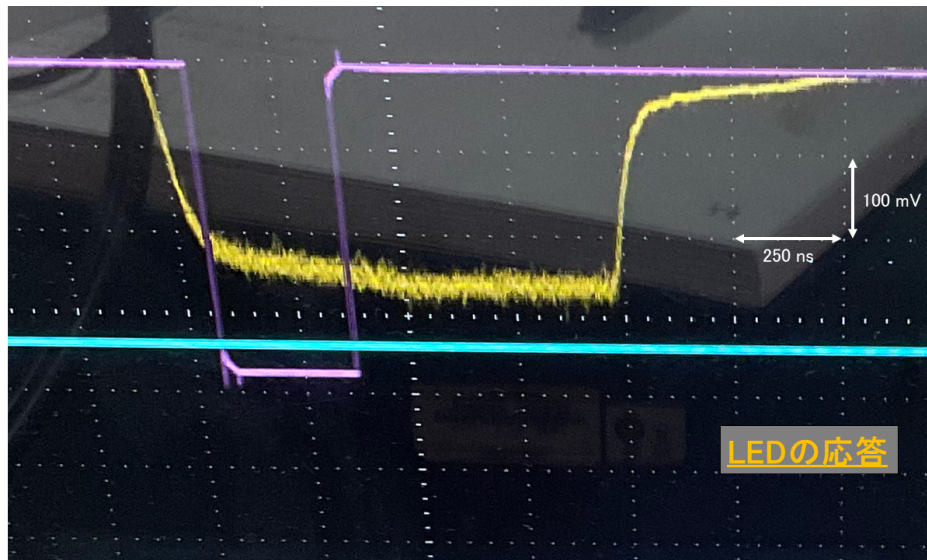


図 4.8: C503B-BAN-CZ0A0451 の時間応答。LED の発光回路には 100Ω の抵抗を用いた。入力信号にはファンクションジェネレータで生成した $1\mu\text{s}$, 5V のパルスを用いた。立ち上がり、立ち下がりともに 100ns 程度である。このデータは PMT (浜松ホトニクス製 R7600U、時間応答 $2-3\text{ns}$ [13]) でデータを取得した。立ち上がりと立ち下がりの後にある 450ns 程度のなだらかな部分は、データ取得時の回路による鈍りである。

実際には、 CeBr_3 の応答を模擬するためには、サブナノ秒の応答を LED が持っている必要があるが、これは LED 自体の時定数より短い。そこで、実際に 10ns 程度の短パルスを入力して、LED の応答について確認した (図 4.9)。LED の時定数が遅いため、信号が立ち上がりきる前に、下がってしまうような状況になっているが、サブナノ秒程度の応答でもって発光していることが確認できた。したがって、 CeBr_3 の模擬信号として使うことができると考えられる。

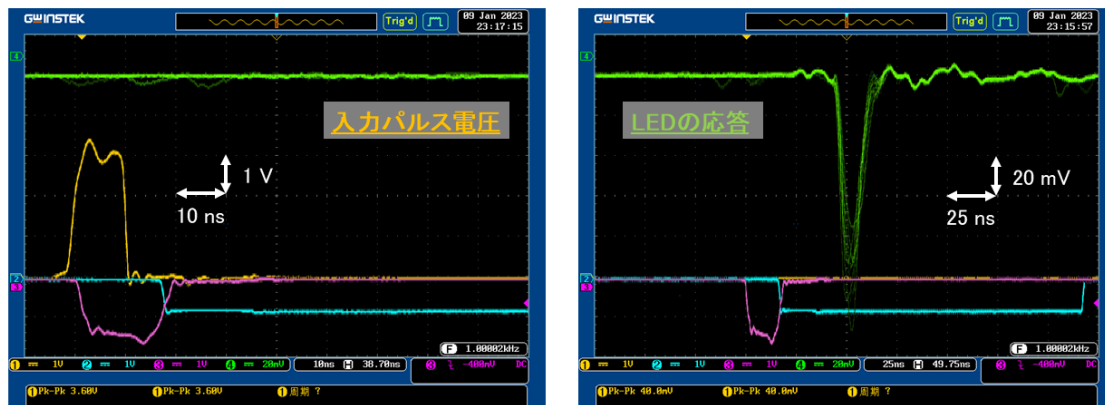


図 4.9: 短パルスに対する LED の応答。入力パルスは、電圧が 3 V 程度、幅が 10 ns 程度である。

発光量については、第 5 章で実際の測定結果から光子数を求め、アクティブストッパーの性能評価に用いる際のパラメータを検討する。

4.2.3 セットアップ

アクティブストッパーでの $^{16}\text{N}(0^-)$ アイソマーの埋め込みおよび遅延 γ 線の放出によるシンチレーション光を模擬するための光学セットアップに対する要請は、

1. レーザーの光量がアイソマー埋め込み時のシンチレーション光を模擬できるくらいの大光量であること
2. レーザーと LED を同期信号をもとに駆動できること
3. LED の発光タイミングをレーザーの発光タイミングより遅らせることができること
4. LED の光量が可変であること
5. 複数の MPPC にできるだけ一様な光が入射すること

である。

まず、要請 2 は、ファンクションジェネレータ (FG) やクロックジェネレータ (CG) による入力を、分配するだけでよい。次に、LED に対する要請は、アテネータで LED にかける電圧を可変とすることで要請 4 を実現でき、レーザーと LED に共通の信号を入れた際に、Gate and Delay Generator (GDG) で信号を遅らせることにより、要請 3 を実現できる。

これらをまとめて、要請 2、要請 4、要請 3 を満たす回路を図 4.10 に示す。

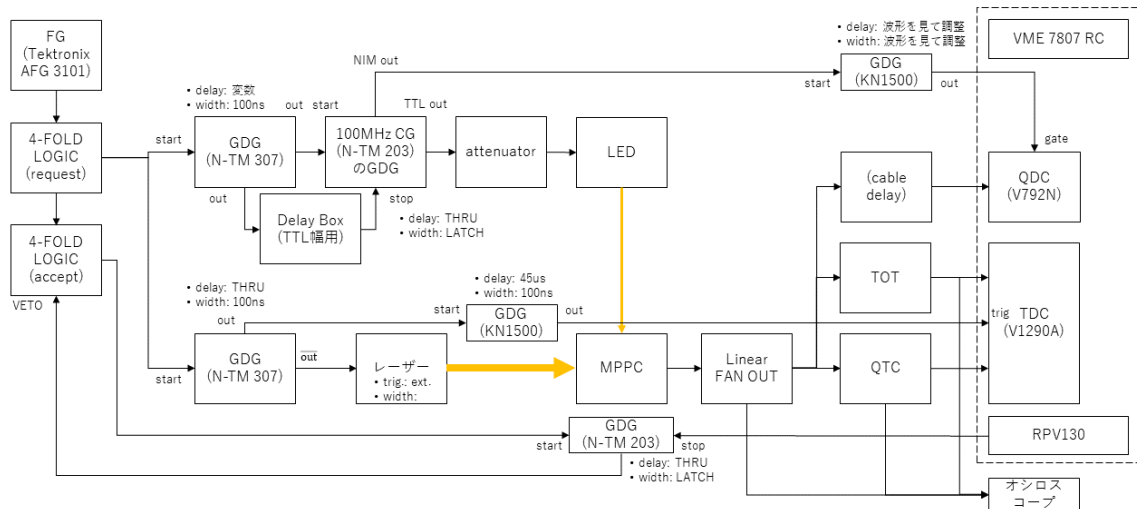


図 4.10: アクティブストッパー性能評価のための回路。 $^{16}\text{N}(0^-)$ アイソマーの遅延 γ 線の光量とタイミングを模擬する。

入力信号には Tektronix 製のファンクションジェネレータ AFG 3101 で生成した 1 kHz のロジック信号を用いる。これをレーザーと LED 用の GDG に入力し、同期信号を生成する。

レーザーは、この入力信号のタイミングでパルス光を発する。

LED の入力信号は、発光のタイミングを自由に遅らせられるようになっており、パルス幅や電圧変えることで、発光量を調整できるようになっている。

要請 1 と要請 5 はトレードオフの関係にある。複数の MPPC に光が一様に入射するためには、広く拡散させる必要がある。一方、要請 1 を満たすためには、面積あたりの入射光子数が必要であるので、できるだけ拡散させない方がよい。そこで、距離による拡散と光子数を比較して、レーザーと LED に対する MPPC の距離の最適化を行った (詳しくは後述)。

レーザーと LED の配置は、図 4.11、図 4.12 に示すとおりである。

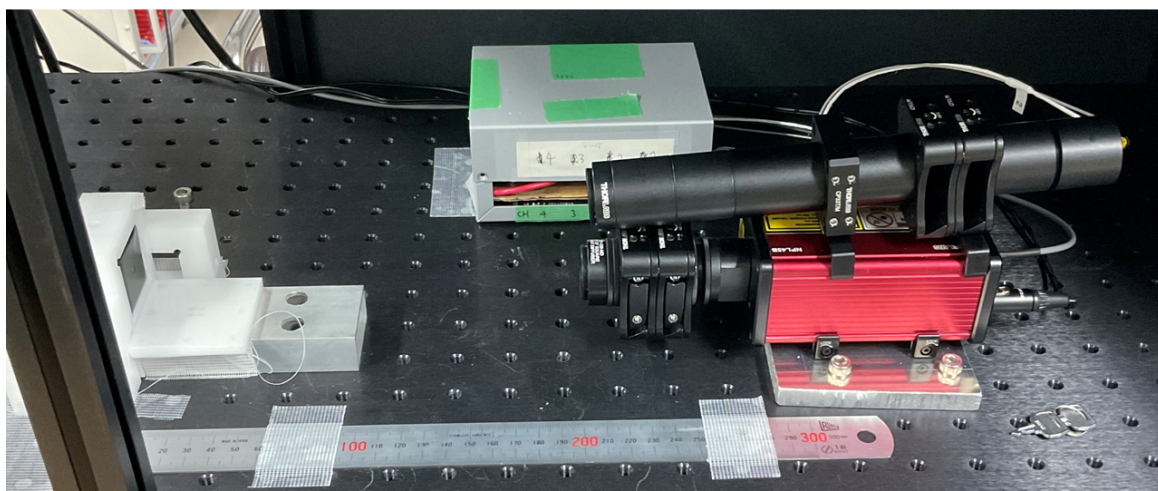


図 4.11: レーザーと LED のセットアップ。本画像は 4.3 節の光子数測定の際に撮られたものである。画像左側には光子数測定のため、MPPC の代わりに PMT (R7600U) が配置されている。

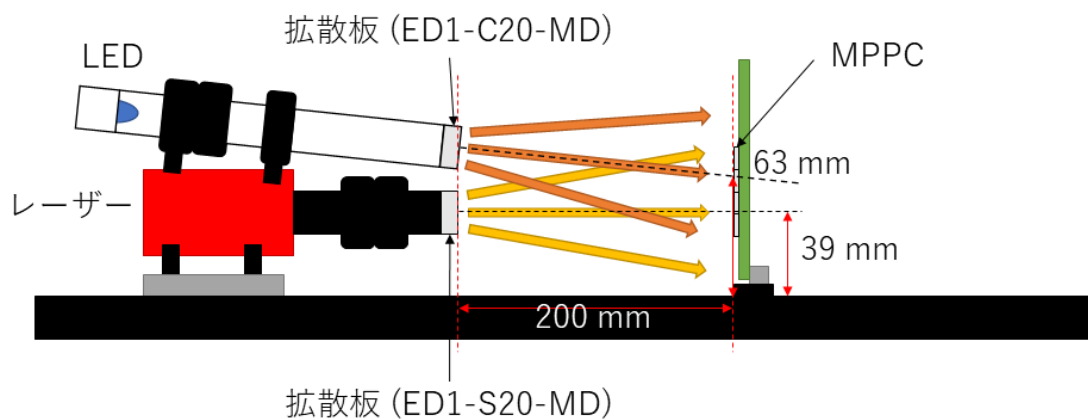


図 4.12: 光学系セットアップ概念図。レーザーの照射軸方向を z 、上下方向を y とする。レーザーの拡散板 (ED1-S20-MD) の位置を $z = 0$ mm、光学ブレッドボード上面を $y = 0$ mm として、 $z = 200$ mm の位置でレーザーと LED の中心を測ると、レーザーの中心が $y = 39$ mm で LED の中心が $y = 63$ mm であった。

レーザーで利用する拡散板 ED1-S20-MD の特性は図 4.4 と表 4.2 に既に示した。LED で利用する拡散板 ED1-C20-MD の特性を図 4.13 と表 4.4 に示す。

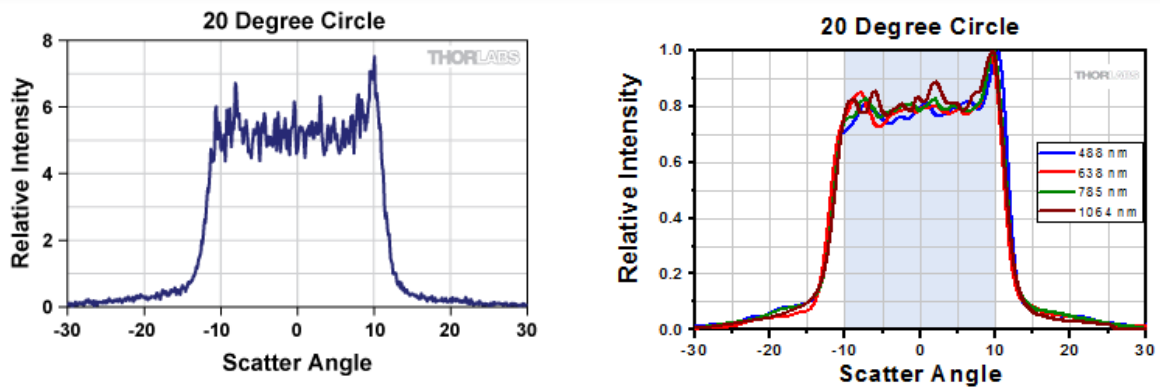


図 4.13: ED1-C20-MD の拡散特性 [10]。左は理論計算、右は実データ [14] に基づく。

表 4.4: ED1-C20-MD の相対強度領域

波長 [nm]	フラットな領域 [°]	最大値の 50% の領域 [°]	最大値の 10% の領域 [°]
488	22.1	23.5	28.5
638	21.2	23.1	27.8
785	21.0	22.9	28.9
1064	20.8	22.7	28.7

表 4.2 と表 4.4 から、拡散板 ED1-S20-MD、ED1-C20-MD とともに最大値の 50% 以上の角度領域が 20° 以上あるので、拡散角が 20° であると考えて、レーザーと LED の拡散を図 4.14 に示し、その時の 1 mm² あたりの光量を図 4.15 に示す。

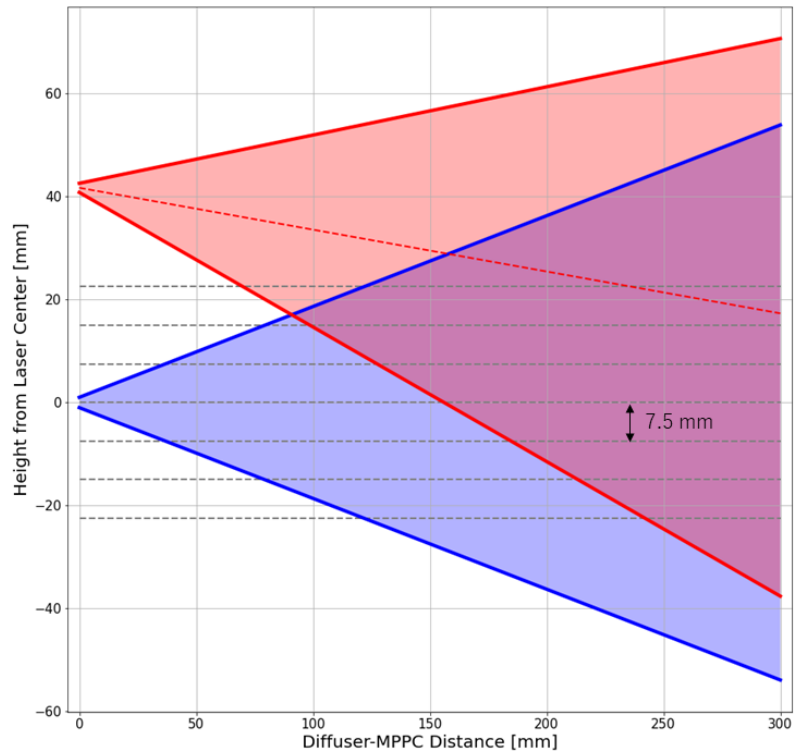


図 4.14: 拡散板からの距離と上下方向への拡散。レーザーの高さが $y = 0$ mm である。拡散板中心からの拡散を図示した。青色がレーザー光の拡散領域、赤色が LED の拡散領域を表す。図中の破線の間隔 7.5 mm は MPPC 1 パッケージを配置した際の大きさを見積もったものである。

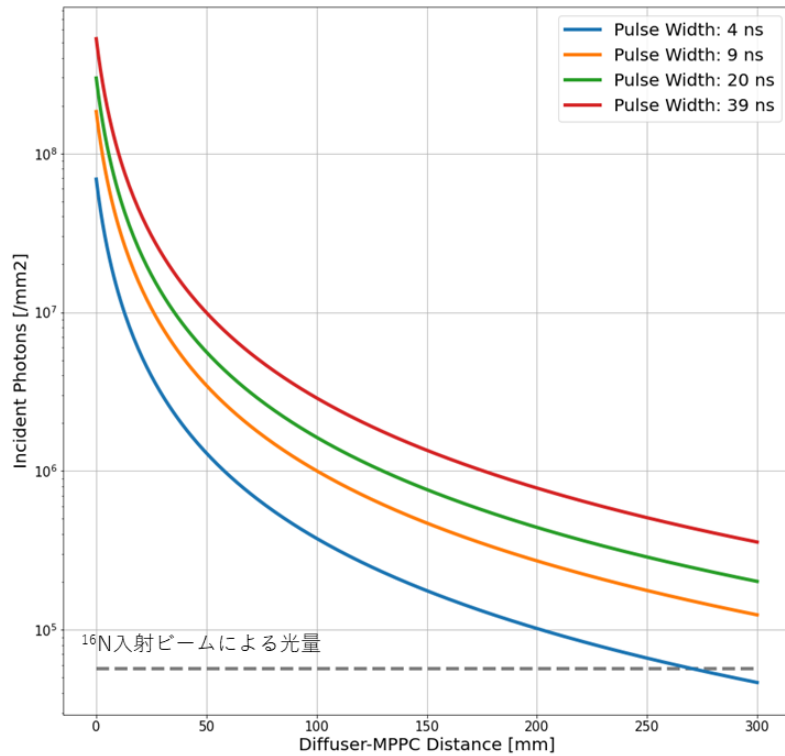


図 4.15: 拡散板からの距離と 1mm^2 あたりの光子数。パルス幅 (Pulse Width) および光量は表 4.1 参照。

図 4.14 と図 4.15 から、複数の MPPC を並べられ、光量を確保できる距離として、拡散板と MPPC の距離は 200 mm を採用する。

4.3 光子数測定セットアップ

本節ではレーザーと LED の光子数測定のためのセットアップについて述べる。MPPC は図 4.12 に示すセットアップで性能評価を行う予定であるが、事前にレーザーと LED の光量を PMT を用いて確認する。浜松ホトニクス製 R7600U を使い、1 光子からレーザーの最大光量までを測定し、検出光子数を求め、入射光子数を推定する。

4.3.1 実験セットアップ

光子数の測定には図 4.16 のセットアップを用いた。PMT の受光面に約 $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ の穴をあけた暗幕をかぶせ、データを取得した。

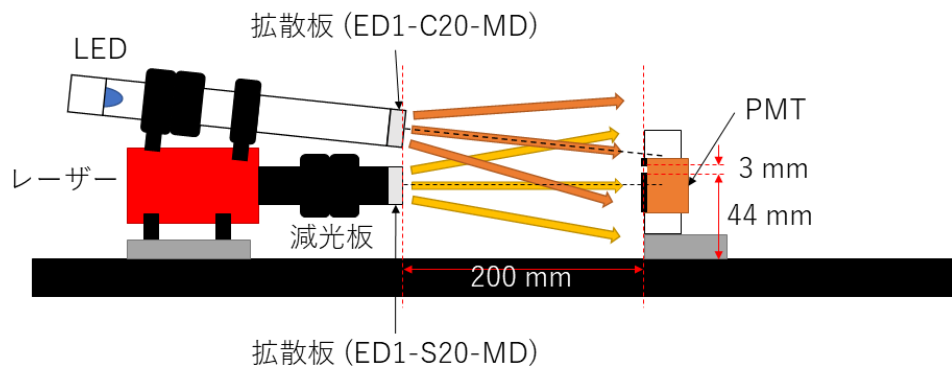


図 4.16: 光子数測定セットアップ概念図。減光板は最大で 2 枚用いることができる。図 4.12 の MPPC を PMT (R7600U) に置き換えた。PMT の受光面は約 3mm × 3mm の穴をあけた暗幕で覆っている。

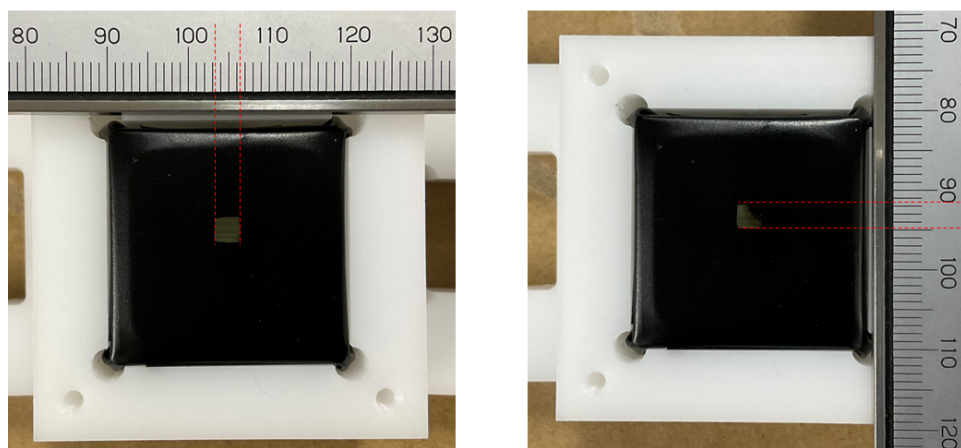


図 4.17: 受光面を約 3mm × 3mm の穴をあけた暗幕で覆った PMT。画像の上側が PMT を設置した際の上側になるようにした。

R7600U の波長に対する量子効率を図 4.18 に、その他の特性は表 4.5 に示す [13]。これをもとに、入射光子数を推定する。

Figure 1: Typical spectral response

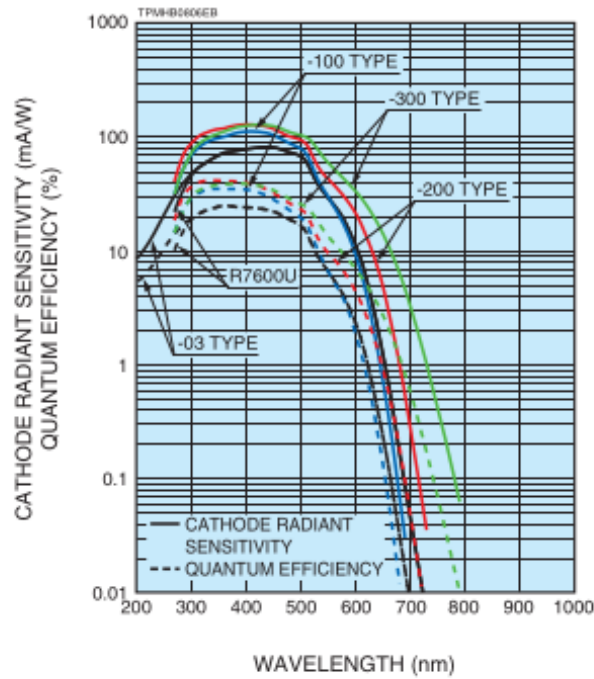


図 4.18: R7600U の波長に対する典型的な応答 [13]。使用するレーザーと LED の波長 450 ns, 470 ns に対する量子効率率は約 20% である。

表 4.5: R7600U の特性 [13]

	波長領域	感度最大波長	最大印加電圧	平均出力電流
単位	[nm]	[nm]	[V]	[mA]
	300 - 650	420	900	0.1

レーザーの出力は、減光板 (Thorlabs 製 マウント無し \varnothing 25 mm 吸収型 ND フィルタ、表 4.6 [15]) を用いて減衰させ、PMT の出力が QDC のダイナミックレンジにおさまるように調整し、QDC でデータを取得する。まず、PMT のキャリブレーションのためのデータを取得した。1 光子に対応する QDC チャンネルのキャリブレーション用のデータを取得し、次にゲインキャリブレーション用に複数の印加電圧で、データを取得した。その後、レーザーと LED の発光量を決定するために、各種パラメータを変えたデータを何点か取得した。

表 4.6: 使用する減光板の特性 [15]

型番	光学濃度 ^a	透過率 [%] ^a
NE05B	0.5	32
NE10B	1.0	10
NE15B	1.5	3
NE30B	3.0	0.1
NE40B	4.0	0.01

a 633 nm での設計値。

4.3.2 測定回路

レーザー・LED の駆動と光量評価のためのデータ収集は図 4.19 の回路で行う。レーザーと LED の光量測定は独立して行うため、一方の測定を行う際、他方には信号が入力されないように、測定対象でない方の信号入力ケーブルは抜いて測定を行った。MPPC 用の回路 (図 4.10) とほとんど同じ回路であるので、変更点にのみ触れる。

レーザーの出力も QDC で取得する必要があるものの、レーザー用の GDG の出力からも QDC のゲートを作れるように回路の変更を行った。

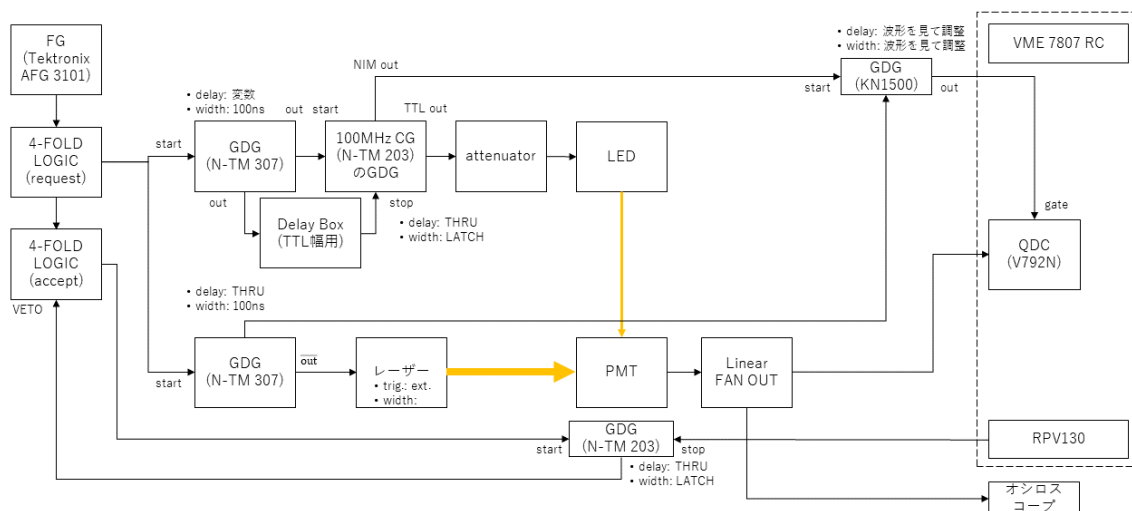


図 4.19: 光子数測定のための回路。レーザーと LED の光量測定は独立して行う。生成したファンクションジェネレータの信号から GDG によりレーザーと LED の入力信号を作る。また GDG から QDC のゲートを生成する。

時間応答の測定には、オシロスコープ（GWINSTEK 製 GDS-3504）を用いた。波形データは csv ファイルとして保存することができる。

第 5 章

解析と考察

本章では、第 4 章で取得したデータの解析を行った。また、得られた結果について考察を行う。

5.1 キャリブレーション

本節では、PMT のキャリブレーションについて議論する。

5.1.1 1 光子の評価

PMT による 1 光子の測定には、平均検出光子数が 0.5 光子程度になるように、レーザーのパルス幅と減光板を用いて調整した。測定時には、パルス幅は最小設定から数えて 3 段階目 (約 10 ns)、減光板は NE40B と NE15B とした。また、PMT の印加電圧は -890 V、QDC のゲート幅は 150 ns とした。このときの PMT の出力波形を図 5.1 に示す。オシロスコープのパーシスタンスを 1.0 s に設定して取得した。50 ns 付近にあるピークがレーザーの出力と同期して検出された光子のピークである。

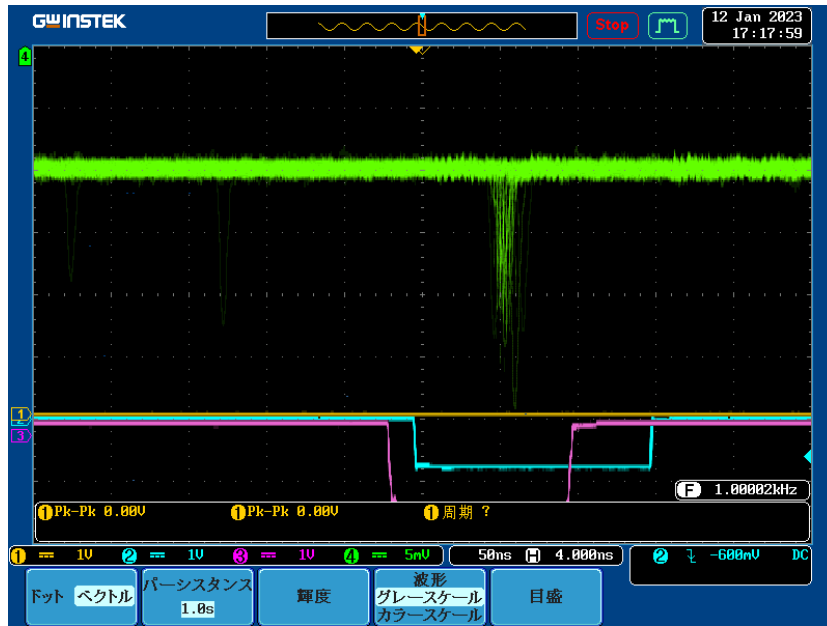


図 5.1: 数光子イベントの波形。オシロスコープでパーシスタンスを 1.0 s に設定し取得した。緑色の線が PMT の出力信号であり、50 ns 付近にピークが見られる。

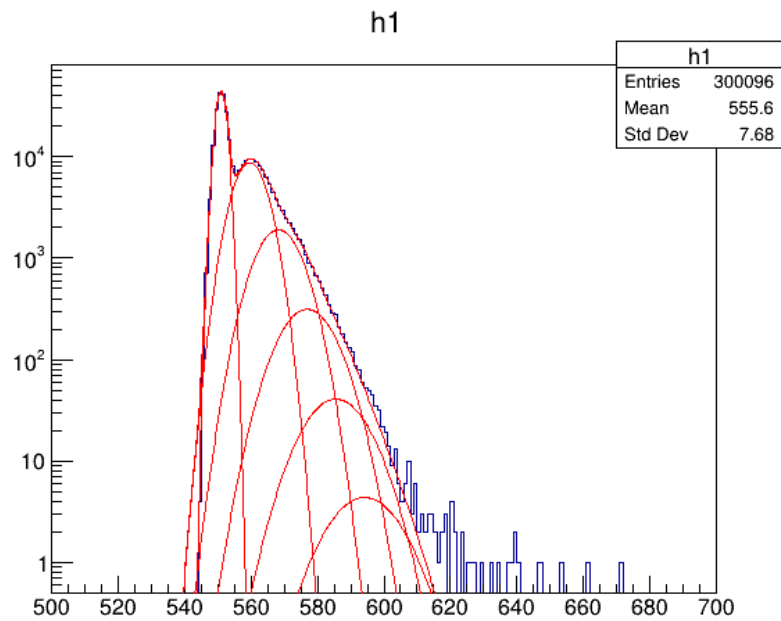


図 5.2: ペDESTALと数光子イベントのフィッティング。横軸は QDC のチャンネル、縦軸はイベント数である。

QDC スペクトルを図 5.2 に示す。この分布が 0 光子から数光子を検出したイベントの重ね合わ

せであると仮定して、

$$\begin{aligned}
 f(x) = & P(0; \mu) \times \text{Gaus}(x; Q_{\text{ped}}, \sigma_{\text{ped}}) \\
 & + P(1; \mu) \times \text{Gaus}(x; Q_{\text{ped}} + G, \sqrt{\sigma_{\text{ped}}^2 + \sigma_{\text{spp}}^2}) \\
 & + \sum_{k=2}^n P(k; \mu) \times \text{Gaus}(x; Q_{\text{ped}} + k \times G, \sqrt{\sigma_{\text{ped}}^2 + k \times \sigma_{\text{spp}}^2})
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

でフィットを行う。ここで、 $P(k; \mu)$ は光子数 k 、光子数の平均 μ のポアソン分布、 $\text{Gaus}(x; Q, \sigma)$ は、平均 Q 、分散 σ のガウス分布である。また、 $Q_{\text{ped}}, \sigma_{\text{ped}}$ はペDESTALの電荷量 (QDC のチャンネル) の平均値と分散、 G は1光子のゲイン、 σ_{spp} は1光子イベントの電荷量の分散である。さらに、ガウス分布の分散 σ は光子数 k のとき $\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{ped}}^2 + k \times \sigma_{\text{spp}}^2}$ とした。

図 5.2 では、0 から 5 光子イベントの重ね合わせであるとしてフィットを行った。結果を表 5.1 に示す。

表 5.1: ペDESTALと数光子イベントのフィッティング結果

	フィット結果	誤差
G [ch]	8.65E00	2.63E-02
μ [ch]	5.98E-01	2.34E-03
Q_{ped} [ch]	5.51E00	4.60E-03
σ_{ped} [ch]	1.54E00	3.81E-03
σ_{spp} [ch]	4.23E00	4.23E-02

これより1光子のゲインは $G = 8.65\text{E}00$ [ch]、その誤差は $2.63\text{E}-02$ [ch] であるとわかった。これを用いて、PMT のゲインの絶対値を 5.1.2 小節で求める。

5.1.2 ゲインの評価

PMT のゲインのキャリブレーションは、レーザーのパルス幅を最小幅から数えて 8 段階目 (約 20 ns) に設定し、光学濃度 (OD) と PMT の印加電圧 (HV) は表 5.2 に示す設定で行った。また、表 5.2 に取得した QDC データのピークをガウス分布でフィットした結果を示す。

表 5.2: ゲインキャリブレーション時の設定とフィット結果

OD	HV	平均 [ch]	誤差 (平均) [ch]	標準偏差 [ch]	誤差 (標準偏差) [ch]
3.5	-890	5.43E+02	7.46E-03	1.47E+00	5.34E-03
3.5	-890	2.08E+03	6.07E-01	1.15E+02	4.32E-01
3.5	-800	1.20E+03	3.05E-01	5.42E+01	2.17E-01
3.5	-730	8.50E+02	1.37E-01	2.60E+01	9.52E-02
3.5	-670	6.92E+02	6.69E-02	1.27E+01	4.59E-02
3.0	-670	5.42E+02	7.27E-03	1.46E+00	5.16E-03
3.0	-670	9.79E+02	1.22E-01	2.16E+01	8.58E-02
3.0	-800	2.37E+03	4.38E-01	7.55E+01	3.11E-01
3.0	-730	1.45E+03	2.37E-01	4.24E+01	1.66E-01
3.0	-580	6.70E+02	3.65E-02	6.56E+00	2.53E-02
2.0	-580	5.42E+02	7.44E-03	1.46E+00	5.36E-03
2.0	-580	2.63E+03	8.77E-02	1.61E+01	6.11E-02
2.0	-520	1.56E+03	5.52E-02	9.60E+00	3.87E-02
2.0	-470	1.01E+03	3.06E-02	5.31E+00	2.12E-02
2.0	-420	7.24E+02	1.47E-02	2.56E+00	1.01E-02
2.0	-370	6.03E+02	9.16E-03	1.59E+00	6.60E-03
1.0	-420	5.41E+02	8.27E-03	1.44E+00	5.92E-03
1.0	-420	1.91E+03	2.35E-02	4.15E+00	1.50E-02
1.0	-470	3.01E+03	3.45E-02	6.32E+00	2.25E-02
1.0	-370	1.15E+03	1.48E-02	2.70E+00	9.89E-03
1.0	-330	7.94E+02	9.90E-03	1.83E+00	6.82E-03
1.0	-290	6.24E+02	8.64E-03	1.53E+00	6.03E-03
0	-290	5.41E+02	9.04E-03	1.57E+00	6.43E-03
0	-290	1.02E+03	8.67E-03	1.77E+00	5.75E-03
0	-370	2.42E+03	1.58E-02	3.23E+00	8.80E-03
0	-330	1.60E+03	1.21E-02	2.34E+00	7.03E-03
0	-260	7.53E+02	8.38E-03	1.56E+00	6.02E-03
0	-240	6.50E+02	7.87E-03	1.48E+00	5.61E-03
0	-220	5.95E+02	8.09E-03	1.41E+00	5.72E-03
0	-200	5.67E+02	7.59E-03	1.40E+00	5.38E-03
0	-200	5.41E+02	7.29E-03	1.42E+00	5.12E-03

a OD=3.5 は NE30B と NE05B、OD=3.0 は NE30B、OD=2.0 は NE15B と NE05B、OD=1.0 は NE10B、OD=0 は減光板なし、の設定を表す。

b レーザーをオフにして取得したベダスタルの値。

表 5.2 の結果をもとに、光学濃度 (使用した減光板の組み合わせ) ごとに取得したペDESTALの値を引いて求めた、ピークの電荷量 (QDC のチャンネル CH_{qdc}) と PMT の印加電圧の関係を図 5.3 に示す。

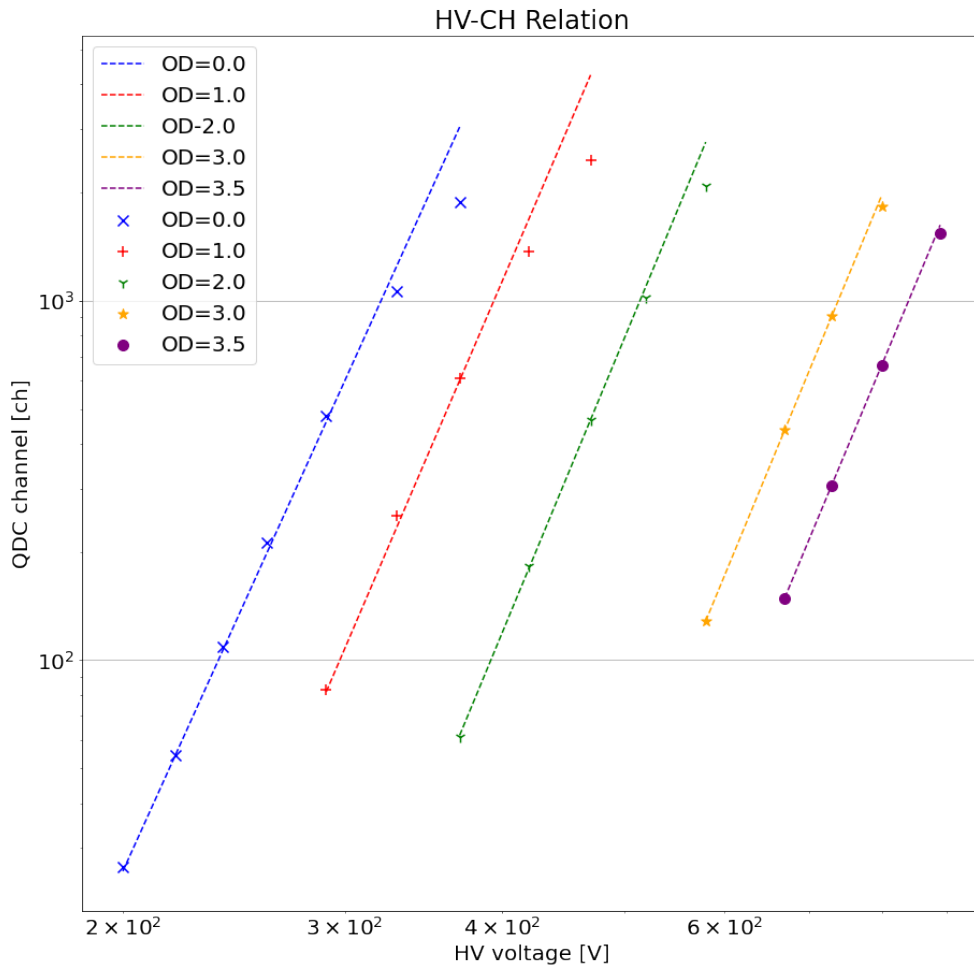


図 5.3: 印加電圧と QDC チャンネルの関係。

一般に、PMT のゲイン ($Gain$) と印加電圧 (V) には、

$$Gain(V) = AV^B \quad (5.2)$$

という関係がある [16]。ここで、 A, B は PMT の構造や増幅段数などの性質から決まる定数である。

QDC のチャンネルはゲインと比例しているので、式 5.2 を用いて、印加電圧と QDC チャンネル

の関係性を求めた。その際、印加電圧の値が低いもの 3 点を選んで式 5.2 の定数 A, B を求め、3 点から求めた値の平均値を算出し、その結果を図 5.3 に点線で示した。入射光量が多いときでは、式 5.2 で表される両対数グラフ上の直線に対して、印加電圧を上げたとき、測定した QDC のチャンネルが寝てきてしまっている。この原因としては、入射光量が多いときに電圧を上げると、電流が多く流れ、電圧降下が起こるためであると考えられる。そのため、OD=0 のときの $-330\text{ V}, -370\text{ V}$ 、OD=1.0 のときの $-420\text{ V}, -470\text{ V}$ の 4 点を以降では外して考えることにした。

表 5.3: ゲインの定数 A, B の値

OD	A	B
3.5	2.45E-22	8.42
3.0	4.60E-22	8.48
2.0	1.19E-20	8.46
1.0	5.75E-19	8.18
0	3.77E-17	7.75

表 5.3 の結果をもとに、異なる光量の設定同士を接続する。接続する際には、表 5.3 の値を式 5.2 に用いて求めた QDC チャンネル (相対ゲイン) と、実際に QDC で取得したチャンネルとの差が小さい組み合わせを用いた。接続のために選んだ印加電圧のとき実際に測定したチャンネルと式 5.2 の差を表 5.4 に示す。

表 5.4: 実測チャンネルと式 5.2 の差

OD	HV [V]	式 5.2 と測定値の差 [%]
3.5	670	0.1
3.0	670	0.0
3.0	580	0.0
2.0	580	24.4
2.0	370	0.7
1.0	370	-1.7
1.0	290	-1.0
0.0	290	-3.8

OD=2.0 で印加電圧が -580 V のとき、式 5.2 と実測値の差が 24.4% あるので、印加電圧が -200 V から -580 V のとき、ゲインを 25% 程度過大評価している可能性がある。

接続する際の、光量 (減光板の組み合わせ)、PMT の印加電圧、QDC チャンネル接続時の倍率 f および、その誤差を表 5.5 に示す。ここで、光量が小さい (減光板の光学濃度の合計 (OD1) が大きい) 方の QDC チャンネルを ch_1 、光量が多い (減光板の光学濃度の合計 (OD2) が小さい) 方

の QDC チャンネルを ch_2 として、

$$f = \frac{ch_1}{ch_2} \quad (5.3)$$

で定める。

表 5.5: 接続倍率

OD1	OD2	HV [V]	倍率	倍率の誤差
3.5	3.0	-670	3.40E-01	1.81E-04
3.0	2.0	-580	6.15E-02	1.80E-05
2.0	1.0	-370	1.01E-01	2.14E-05
1.0	0	-290	1.73E-01	2.54E-05

表 5.5 に示した f をもとに、OD=0 (減光板なし) のときのチャンネルを基準にした相対的なチャンネル CH_{rel} は、

$$CH_{\text{rel}} = \frac{CH_{\text{qdc}}}{f_i} \quad (5.4)$$

で表される。ここで、 f_i は OD=0 から i 回減光板の組み合わせを変えたときの倍率である。例えば、 f_3 を考えると OD=0 \rightarrow 1.0 \rightarrow 2.0 \rightarrow 3.0 と 3 回設定を変えており、 $f_3 = (1.73 \times 10^{-1}) \times (1.01 \times 10^{-1}) \times (6.15 \times 10^{-2})$ である。

相対 QDC チャンネル CH_{rel} はゲインに対して相対的なものであるため、絶対値のゲインに校正する必要がある。そこで、5.1.1 小節で求めた 1 光子のゲイン G を用いる。これは、PMT の電圧値 890V でのゲインに相当する。これを用いることで 890 V のときの相対チャンネル $CH_{\text{rel}, 890V}$ は絶対値に直すことができる。したがって、式 5.5 を用いることで、すべての電圧での相対値を絶対値に直すことができる。

$$G_{\text{abs}} = CH_{\text{rel}} \times \frac{G}{CH_{\text{rel}, 890V}} \quad (5.5)$$

ゲインの絶対値 G_{abs} の値と誤差を表 5.6 に示す。この値を用いて 5.2 で、光量の評価を行う。

表 5.6: PMT のゲイン

OD	HV [V]	ゲイン	ゲインの誤差
3.5	-890	5.27E+06	1.61E+04
3.5	-800	2.26E+06	6.91E+03
3.5	-730	1.05E+06	3.21E+03
3.5	-670	5.09E+05	1.55E+03
3.0	-670	5.09E+05	1.55E+03
3.0	-800	2.13E+06	6.51E+03
3.0	-730	1.05E+06	3.21E+03
3.0	-580	1.50E+05	4.57E+02
2.0	-580	1.50E+05	4.57E+02
2.0	-520	7.32E+04	2.23E+02
2.0	-470	3.32E+04	1.01E+02
2.0	-420	1.30E+04	3.98E+01
2.0	-370	4.39E+03	1.34E+01
1.0	-420	9.85E+03	3.00E+01
1.0	-470	1.78E+04	5.42E+01
1.0	-370	4.39E+03	1.34E+01
1.0	-330	1.82E+03	5.54E+00
1.0	-290	5.94E+02	1.82E+00
0	-290	5.94E+02	1.81E+00
0	-370	2.33E+03	7.12E+00
0	-330	1.32E+03	4.01E+00
0	-260	2.63E+02	8.03E-01
0	-240	1.35E+02	4.14E-01
0	-220	6.76E+01	2.07E-01
0	-200	3.30E+01	1.02E-01

キャリブレーションにより求めたゲインの絶対値と、R7600U のデータシート [13](図 4.18 参照) から $Gain(HV = 400V) = 1 \times 10^4$, $Gain(HV = 800V) = 2 \times 10^6$ の 2 点を読み取った値を、式 5.2 に用いて求めたゲインの典型値を図 5.4 に比較する。データシートには 400 V までしか示されていないので、400 V から 900 V までは内挿し (黒の実線)、200 V から 400 V までは外挿した (黒の点線)。

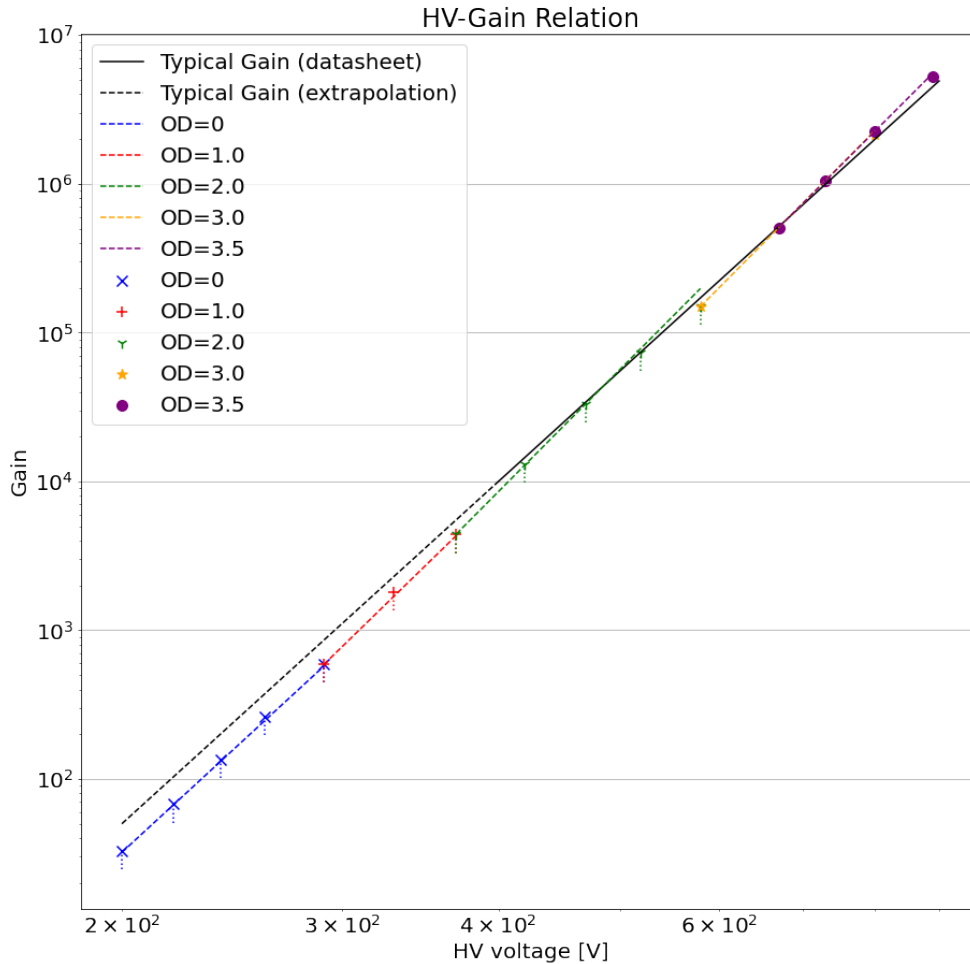


図 5.4: ゲインキャリブレーションの結果とデータシートの典型値の比較。データシートの典型値は $Gain(HV = 400V) = 1 \times 10^4$, $Gain(HV = 800V) = 2 \times 10^6$ の 2 点を用いて再構成した。

図 5.4 には、PMT の印加電圧とゲインの関係を示した。いま、ゲインは 25% 程度過大評価している可能性があるが、これを考慮したのが OD=0、1.0、2.0 の各点から下に伸びる点線である。これを見ると、ゲインの過大評価により典型値より、測定値がさらに低くなっている可能性がある。5.2 節では、このことに注意して考察する必要がある。

5.2 光量の評価

本節では、レーザーと LED の QDC による電荷量 (チャンネル) の測定結果から、5.1 節のゲインキャリブレーションの結果を用いて、検出光子数を求め、入射光子数について議論する。

5.2.1 レーザー

レーザーは、パルス幅 20 ns とパルス幅 10 ns の 2 種類のデータセットについて議論する。

PMT の印加電圧が V であるとき、QDC で取得した電荷 $Q_{\text{qdc}}(V)$ とゲイン $Gain(V)$ 、検出光子数 N_{detect} には、式 5.6 で表される関係がある。

$$Q_{\text{qdc}}(V) = Gain(V) \times e \times N_{\text{detect}} \quad (5.6)$$

ここで、 e は素電荷 $e = 1.602176634 \times 10^{-19}$ C である。また、

式 5.6 から、検出光子数 N_{detect} は、

$$N_{\text{detect}} = \frac{Q_{\text{qdc}}(V)}{e} \times Gain(V) \quad (5.7)$$

と求めることができる。取得した QDC のチャンネルのガウス分布によるフィット結果と検出光子数について、レーザーのパルス幅 20 ns (最小設定から数えて 8 段階目) のときを、表 5.7 に、レーザーのパルス幅 10 ns (最小設定から数えて 3 段階目) のときを、表 5.8 に示す。

表 5.7: QDC チャンネルと検出光子数 (レーザーパルス幅 20 ns)

HV [V]	平均 [ch]	誤差 (平均) [ch]	標準偏差 [ch]	誤差 (標準偏差) [ch]	検出光子数	検出光子数の誤差
-290	5.41E+02 ^b	9.04E-03	1.57E+00	6.43E-03		
-290	1.02E+03	8.67E-03	1.77E+00	5.75E-03	4.91E+05	1.50E+03
-260	7.53E+02	8.38E-03	1.56E+00	6.02E-03	4.91E+05	1.50E+03
-240	6.50E+02	7.87E-03	1.48E+00	5.61E-03	4.91E+05	1.50E+03
-220	5.95E+02	8.09E-03	1.41E+00	5.72E-03	4.91E+05	1.53E+03
-200	5.67E+02	7.59E-03	1.40E+00	5.38E-03	4.91E+05	1.50E+03

a キャリブレーションに用いたデータであるので、すべて同じ値になっている。

b ベDESTAL のフィット結果。取得した平均チャンネルからこの値を引いて検出光子数を求めた。

表 5.8: QDC チャンネルと検出光子数 (レーザーパルス幅 10 ns)

HV [V]	平均 [ch]	誤差 (平均) [ch]	標準偏差 [ch]	誤差 (標準偏差) [ch]	検出光子数	検出光子数の誤差
-330	5.45E+02 ^a	8.66E-03	1.51E+00	6.12E-03		
-290	8.11E+02	8.71E-03	1.56E+00	6.11E-03	2.72E+05	1.18E+03
-260	6.61E+02	8.37E-03	1.45E+00	6.10E-03	2.67E+05	1.16E+03
-240	6.05E+02	8.20E-03	1.42E+00	5.62E-03	2.70E+05	1.17E+03
-220	5.75E+02	7.49E-03	1.40E+00	5.32E-03	2.68E+05	1.17E+03
-200	5.60E+02	7.99E-03	1.39E+00	5.73E-03	2.68E+05	1.19E+03

a ペDESTALのフィット結果。取得した平均チャンネルからこの値を引いて検出光子数を求めた。

この結果より、検出光子数はパルス幅 10 ns, 20 ns に対して、それぞれ 2.7×10^5 , 4.9×10^5 である。表 5.7 と表 5.8 に示した検出光子数は、約 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ で検出したものであり、PMT の量子効率 はレーザーの波長 450 nm に対して約 20% である。従って、 1 mm^2 あたりの光子数は、それぞれ $1.5 \times 10^5/\text{mm}^2$, $2.7 \times 10^5/\text{mm}^2$ である。ゲインキャリブレーションの際の誤差 25% を考慮しても、入射光子数は $5 \times 10^4/\text{mm}^2$ を十分に満たしている。

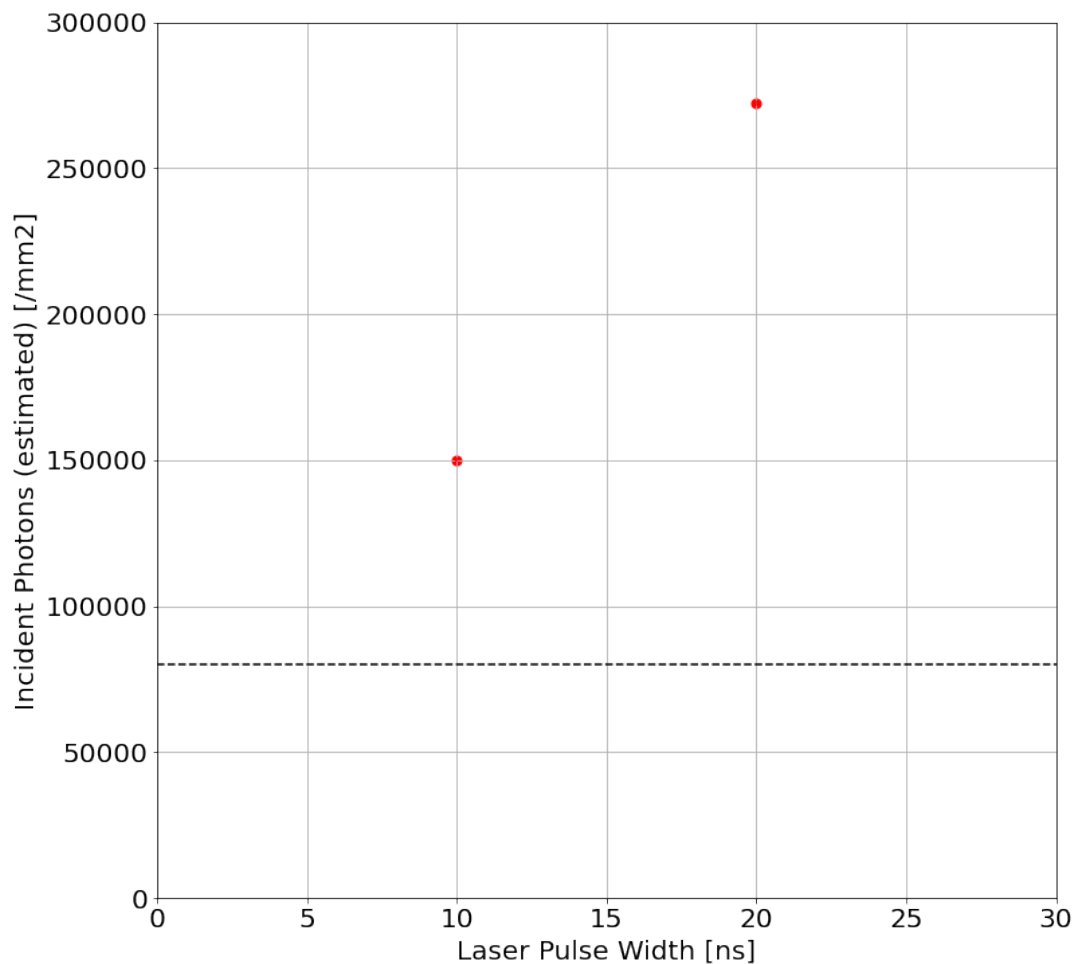


図 5.5: 検出光子数と要求値の比較。

図 5.5 に検出光子数と要求値 (点線) を載せた。要求値に対して検出光子数は 10 ns のときで 2 倍程度、20 ns のときは 3 倍以上あるので、十分要求性能を満たしているといえる。ゲインを過大評価している可能性があるので、ゲインに比例している入射光子数も過大評価している可能性がある。そのため、実際の入射光子数は求めた値よりも 25% 程度少ない可能性がある。

しかし、いずれの場合でも要求値には十分である。

以上の結果から、レーザーで CeBr_3 の光量を実現できることがわかった。レーザーの設定については、5.3 節の結果をもって考察する。

5.2.2 LED

LED もレーザーと同様に、式 5.6 を用いて、検出光子数を求めることが出来る。ここでは、OD=3.5 の時のゲインの値を用いることとする。表 5.9 に測定時の LED 入力電圧・入力パルス幅と、ガウス分布によるフィット結果を示す。

表 5.9: LED の入力電圧・入力パルス幅と QDC チャンネルのガウスフィット結果

HV [V]	入力電圧 [V]	パルス幅 [ns]	平均 [ch]	誤差 (平均) [ch]	標準偏差 [ch]	誤差 (標準偏差) [ch]
-890			5.44E+02 ^a	4.78E-03	1.49E+00	4.02E-03
-890	3.4	10	1.88E+03	5.86E-01	1.07E+02	4.42E-01
-890	3.4	9	9.29E+02	3.81E-01	6.74E+01	2.66E-01
-890	3.4	11	2.84E+03	5.95E-01	1.18E+02	4.36E-01
-800	3.4	11	1.69E+03	3.86E-01	6.64E+01	2.77E-01
-800	3.4	12	2.31E+03	3.96E-01	7.17E+01	2.85E-01
-800	3.4	13	3.08E+03	4.09E-01	7.41E+01	2.90E-01
-800	3.2	13	2.02E+03	3.63E-01	6.76E+01	2.63E-01
-800	3.2	12	1.51E+03	3.61E-01	6.20E+01	2.69E-01
-800	3.2	11	1.10E+03	3.03E-01	5.19E+01	2.18E-01
-800	3.2	10	7.14E+02	1.67E-01	2.94E+01	1.17E-01
-890	3.2	10	9.53E+02	4.06E-01	6.84E+01	2.94E-01
-890	2.8	11	7.78E+02	3.09E-01	5.16E+01	2.16E-01
-890	2.8	12	1.24E+03	4.90E-01	8.40E+01	3.61E-01
-890	2.8	13	1.97E+03	5.95E-01	1.01E+02	4.36E-01

a ベDESTAL のフィット結果。取得した平均チャンネルからこの値を引いて検出光子数を求めた。

また、検出光子数の少なかったものは、ポアソン分布 (式 5.1 で $n = 19$ とした) を用いてフィッティングを行った。以上より、1 mm² あたりの検出光子数と入射光子数は表 5.10 に示す結果が得られた。

表 5.10: 検出光子数と入射光子数

入力電圧 [V]	パルス幅 [ns]	検出光子数 [/mm ²]	誤差 (検出光子数) [/mm ²]	入射光子数 [/mm ²]	誤差 (入射光子数) [/mm ²]
3.4	10	1.72E+01	5.30E-02	8.60E+01	9.00E-01
3.4	9	4.95E+00	1.59E-02	2.48E+01	2.60E-01
3.4	11	2.95E+01	9.05E-02	1.48E+02	1.55E+00
3.4	11	3.43E+01	1.05E-01	1.72E+02	1.80E+00
3.4	12	5.27E+01	1.61E-01	2.64E+02	2.76E+00
3.4	13	7.58E+01	2.32E-01	3.79E+02	3.96E+00
3.2	13	4.42E+01	1.36E-01	2.21E+02	2.31E+00
3.2	12	2.89E+01	8.90E-02	1.45E+02	1.51E+00
3.2	11	1.66E+01	5.14E-02	8.29E+01	8.68E-01
3.2	10	5.10E+00	1.63E-02	2.55E+01	2.68E-01
3.2	10	5.27E+00	1.69E-02	2.63E+01	2.76E-01
3.2	9	6.05E-01	3.01E-03	3.02E+00	3.38E-02
2.8	10	4.50E-01	1.74E-03	2.25E+00	2.41E-02
2.8	11	3.01E+00	1.00E-02	1.50E+01	1.58E-01
2.8	12	8.96E+00	2.81E-02	4.48E+01	4.69E-01
2.8	13	1.84E+01	5.67E-02	9.19E+01	9.62E-01

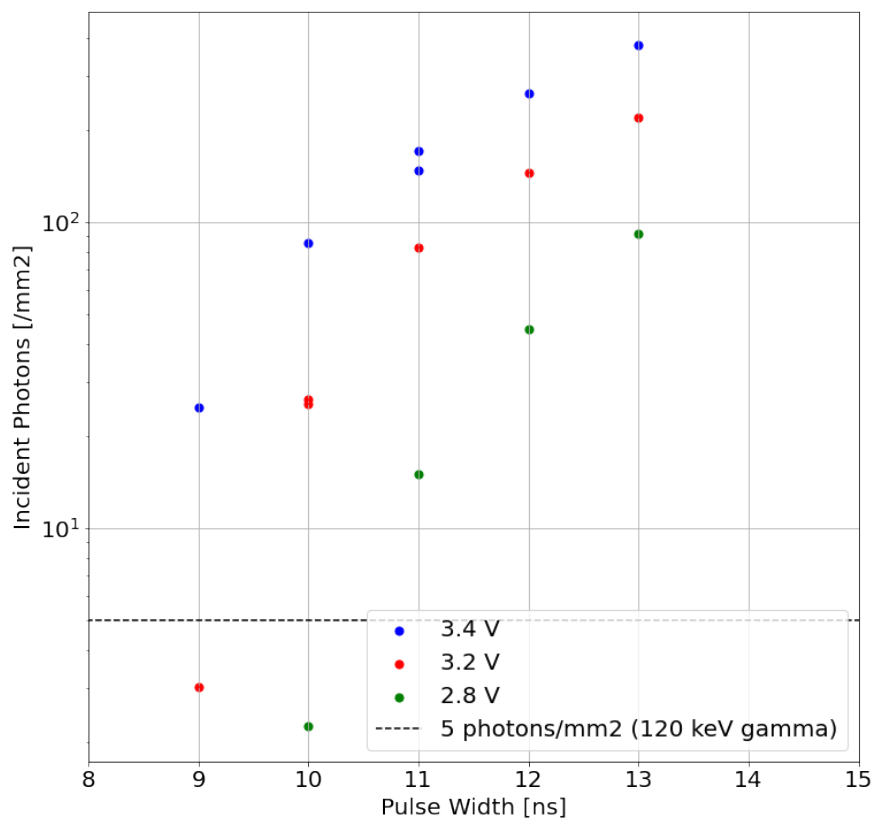


図 5.6: 入射光子数。5 /mm² を満たす性能を実現できている。

入射光子数と要求値の比較を図 5.6 に示す。パルスの電圧を上げることで、発光量が上がっていることがわかる。また、パルス幅を変えることによっても、光量を変えられることがわかる。

以上により、電圧やパルス幅を変えることで、要求値を含んだ様々な光量の実現できることが確認できた。

5.3 時間応答の評価

本節では、レーザーと LED の時間応答について議論する。レーザーと LED の波形は、PMT の出力をオシロスコープにより記録した。取得した波形情報には、PMT の時間応答の影響も含まれるが、PMT の時間応答は数 ns 程度と短いため、無視して考える。

オシロスコープの波形情報は、電圧値 V として記録される。そこで、式 5.8 を用いて、単位時

間・単位面積当たりの検出光子数 n_{detect} に変換し、議論を行う。

$$n_{\text{detect}} = \frac{V}{R \times e \times \text{Gain}(HV) \times S} \quad (5.8)$$

ここで、 R はオシロスコープの入カインピーダンス (50Ω)、 e は素電荷 ($1.90 \times 10^{-19} \text{ C}$)、 $\text{Gain}(HV)$ は PMT の印加電圧 HV のときのゲイン (表 5.6 参照)、 S は検出器の受光面の面積 ($S = 9 \text{ mm}^2$) である。

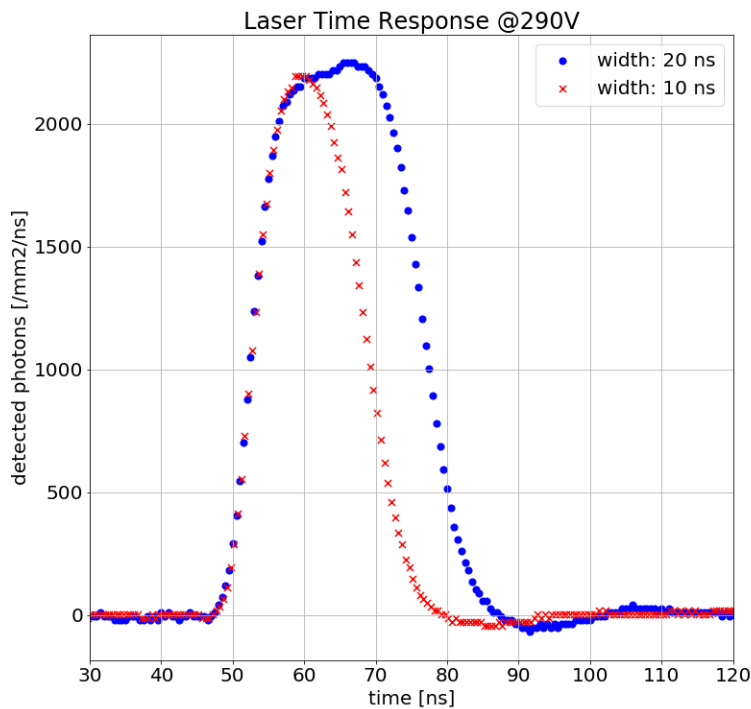


図 5.7: レーザーの時間応答。

パルス幅 10 ns と 20 ns のときのレーザーの時間応答は図 5.7 に示した。パルス幅 10 ns のときと 20 ns のときを比較すると、実際に 20 ns のときの方が応答が 10 ns 長い。また、立ち上がり立ち下がりの応答特性は同じであることも見て取れる。

レーザーと CeBr_3 (時定数 19ns) に対する MPPC の応答を、要求値である時定数 30ns についてシミュレーションし、その時間応答の比較を行った。その結果を図 5.8 と図 5.9 に示した。

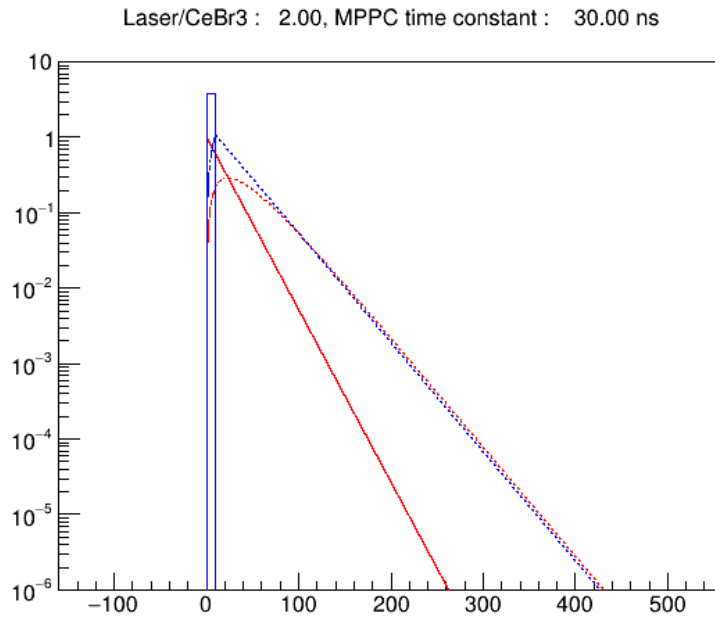


図 5.8: レーザー (パルス幅 10 ns) と CeBr₃ の時間応答の比較。

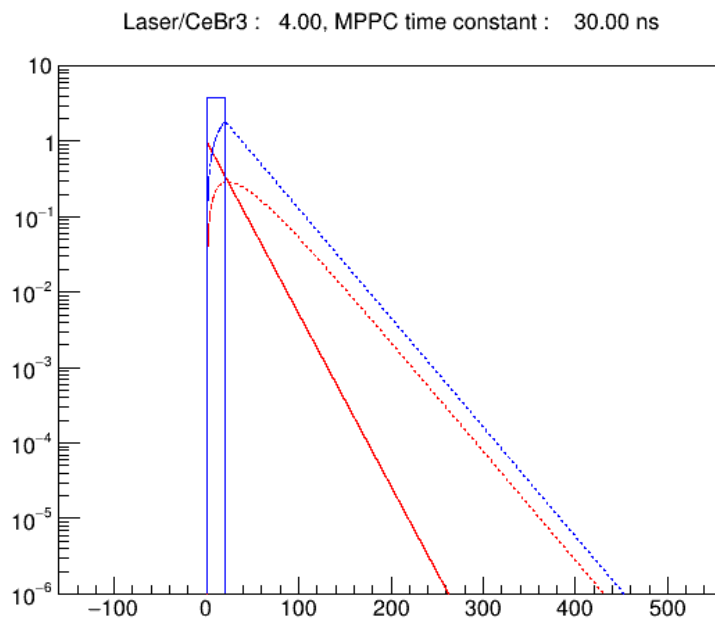


図 5.9: レーザー (パルス幅 20 ns) と CeBr₃ の時間応答の比較。

図 5.8 と図 5.9 の赤色の実線は CeBr₃ のシンチレーション光、青色の実線はレーザーのパルス波を表し、赤と青の点線は CeBr₃、レーザーそれぞれの波形を MPPC の時定数でなませたものである。レーザーと CeBr₃ の発光分布は異なるが、時定数 30ns でなませると両者は似た応答を

示すことがわかる。したがって、レーザーを用いて、 CeBr_3 に対する MPPC の応答を模擬することができる。

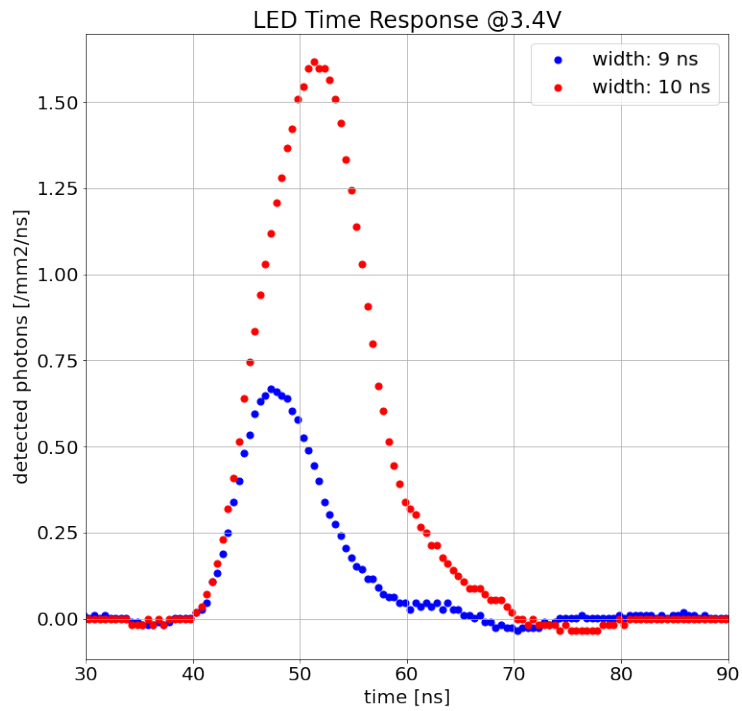


図 5.10: LED の時間応答 (入力電圧 3.4 V)。パルス幅 (width)9 ns と 10 ns の 2 種類の波形を示した。

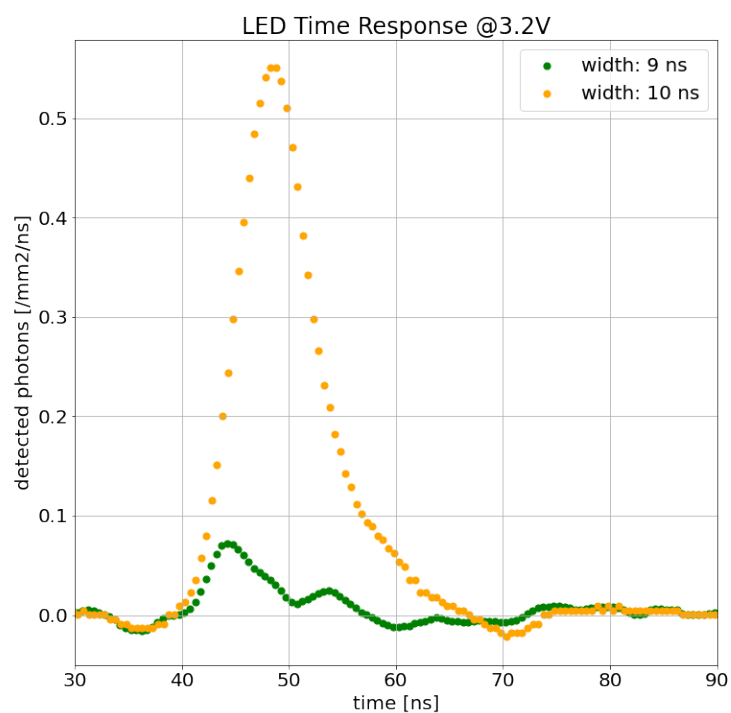


図 5.11: LED の時間応答 (入力電圧 3.2 V)。パルス幅 (width)9 ns と 10 ns の 2 種類の波形を示した。

図 5.10、図 5.11 はそれぞれ、入力電圧 3.4 V, 3.2 V のデータに対して LED の時間応答を示したものである。どの設定においても LED はサブナノ秒の時間応答を示すことが確認された。

5.4 MPPC による応答の試験

本節では、MPPC を用いて構築した光学系セットアップによる模擬信号の応答を確認した結果について議論する。MPPC には 3050 を 1 個用い、その読み出し基板には、読み出し抵抗 100Ω の回路を用いた (図 5.12)。

表 5.11: 使用した MPPC の特性

型番	シリアル番号	V_{br} [V]	I_d [μA]
3050	15043	54.5	0.094

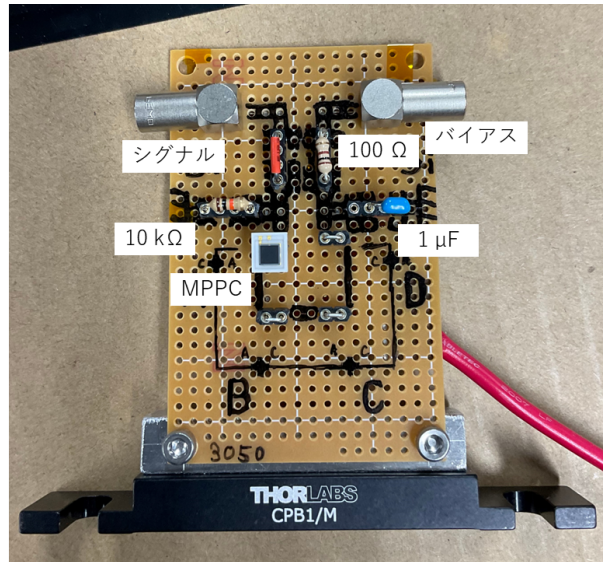


図 5.12: 試験に用いた MPPC と基板。

MPPC の特性を表 5.11 に示す。全体のセットアップは図 4.12 のセットアップを用いた。

図 5.13、図 5.14、図 5.15 にはパルス幅 10ns のレーザー光 (入射光子数 $1.5 \times 10^5/\text{mm}^2$) と、パルス幅 13ns、入力電圧 2.8V で発光させた LED (入射光子数 $9.2 \times 10^1/\text{mm}^2$) を用いて応答を確認した結果を示す。

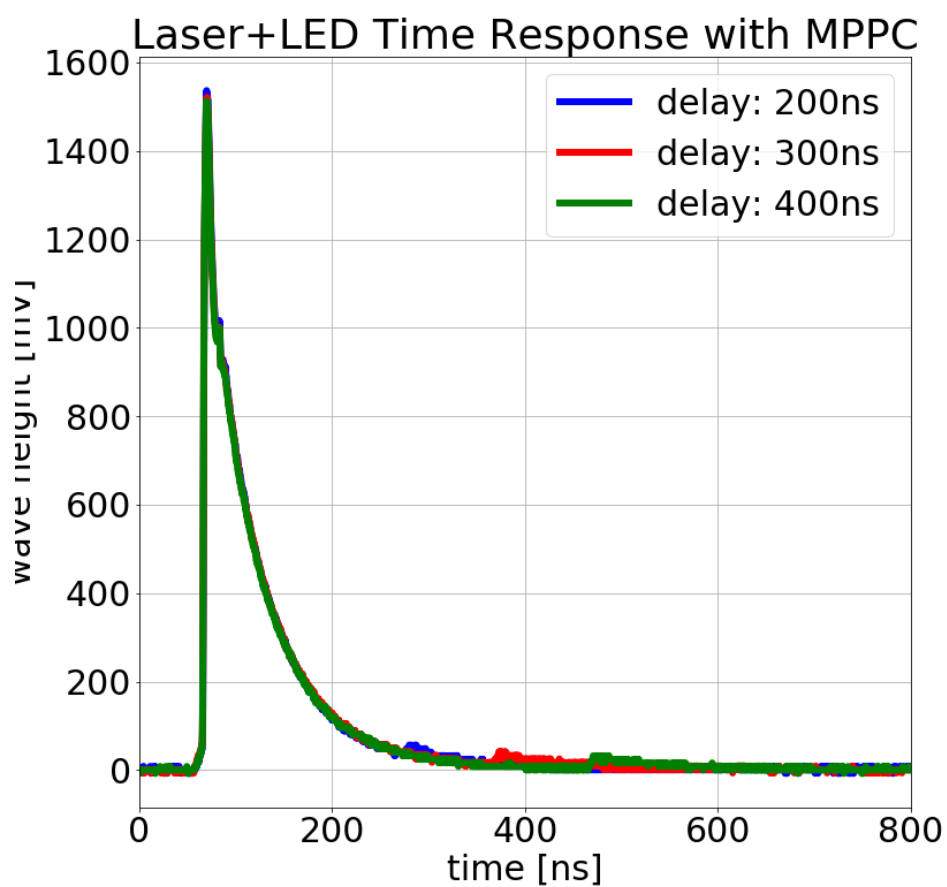


図 5.13: MPPC による模擬信号の応答の確認。

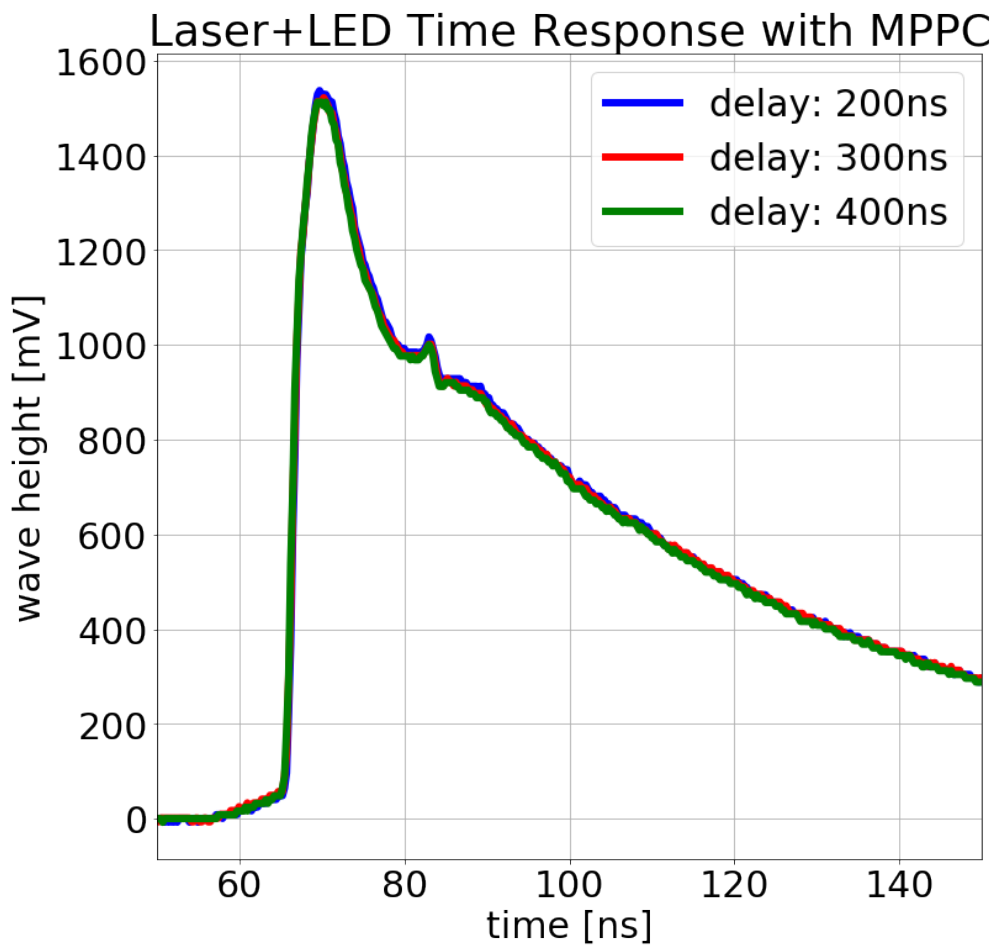


図 5.14: MPPC による模擬信号の応答の確認 (レーザーによる応答拡大)。

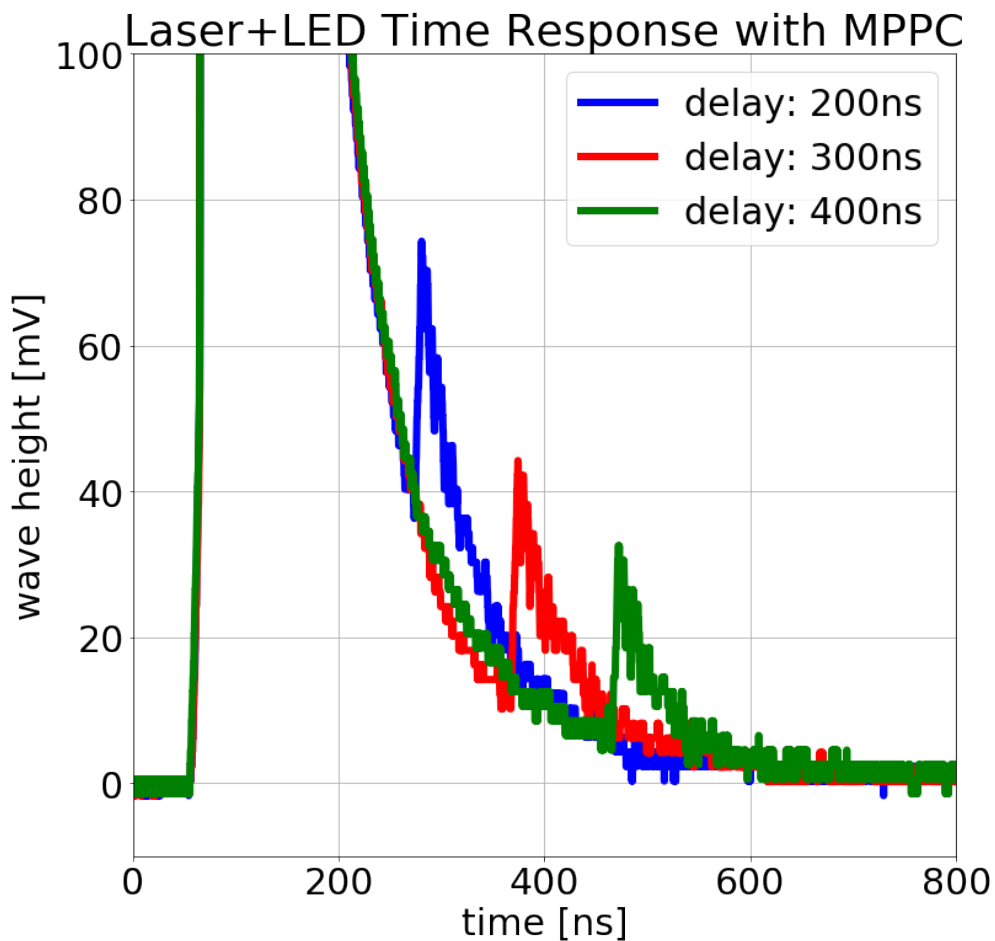


図 5.15: MPPC による模擬信号の応答の確認。

図 5.13、図 5.14、図 5.15 に示す応答について述べる。レーザー光は MPPC 全体で光子数 1×10^6 の強度であり、MPPC のピクセル数 (3600) よりも多いため、MPPC の飽和出力が期待される。また、LED の光をレーザーに対して遅延させて入力した。図 5.13 は MPPC の応答の全体像を示したものである。レーザーの応答について拡大したものが図 5.14 である。これを見ると、MPPC の出力が飽和していることが見て取れる。LED の遅延させた入力について拡大したものが図 5.15 である。LED の遅延時間を 200ns、300ns、400ns と変えて入力したときに、実際に 200ns、300ns、400ns 遅れて発光しているのが見える。

$^{16}\text{N}(0^-)$ アイソマーの同定の際にも、 CeBr_3 のシンチレーション光は、アイソマー埋め込み時に MPPC が飽和する大光量が発生し、その後遅延 γ 線による光を検出することになる。したがって、本研究で構築したセットアップを用いることで、実際の応答を模擬することができると確認できた。

第 6 章

まとめと今後の展望

6.1 まとめ

アイソマー弾性散乱の実現には高効率なアイソマーの同定手法の確立が必須である。そこで、アイソマー同定の新手法「アクティブストッパー」の開発を行っている。

そこで、MPPC の応答を最適化するための光学系セットアップを構築した。具体的には、アイソマー埋め込みと遅延 γ 線放出のシンチレーション光を模擬するものである。そのためには、それぞれ $8 \times 10^4/\text{mm}^2$ 、 $5/\text{mm}^2$ の光量を持った、数十 ns の短パルス光源が必要である。そこで、サブナノ秒パルスレーザーと LED をそれぞれの模擬光源として用いることにした。

実際に構築した光学系セットアップが要求性能を満たしていることを調査した。レーザーおよび LED の光量と時間応答の測定には PMT を用いた。PMT で 1 光子のゲインを測定し、ゲインの校正を行った。校正結果を用いて検出光子数を求め、レーザーと LED がともに光量、時間応答の要求を満たすことを確認した。

6.2 今後の展望

本研究で構築した光学系セットアップにより、アクティブストッパーの開発に重要な MPPC の研究を容易に行うことができるようになった。今後は、このシステムを用いて MPPC に関する各種仕様の最適化を行い、減衰時間 30 ns 程度の実現を目指す。

また、ESPRI 実験では 200 MeV/u と 300 MeV/u のエネルギーまで加速器で加速した原子核の陽子弾性散乱により、密度分布を抽出する。しかし、このエネルギー領域での ^{16}N ビーム中のアイソマー比は知られておらず、これを調べるための実験が 2023 年 2 月 27 日から 2023 年 3 月 3 日まで予定されている。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方にご支援、ご協力いただきました。この場を借りて心より感謝申し上げます。

まず第一に、堂園昌伯助教には、「研究」というものが何かというところから、物事に向き合う姿勢、実験屋としての心構え、データに対する向き合い方など、研究者として自立するために重要なことを手取り足取り教えていただきました。本研究にあたって、私の思い至らない点について数多くのご指導、ご指摘をいただきました。堂園助教の助力がなければ、本修士論文を書き上げることができなかったといっても過言ではありません。本当にありがとうございました。そして、今後ともよろしく願いいたします。

銭廣十三准教授には、ミーティングなどで様々な重要な助言をいただきました。物理の本質的な部分や、実験の内容や結果に対して、貴重なご指摘を多数いただき、ありがとうございました。

同じ研究グループの先輩である、土方佑斗氏、辻峻太郎氏、萩尾真吾氏、東邦大学の原田知也氏、同期の八尋寛太君、後輩の矢野隆之君、弾性散乱実験やアクティブストッパー開発に協力していただいている理化学研究所、東京大学原子核科学研究センター、大阪大学核物理研究センターの皆様などにも感謝いたします。

また、永江知文教授をはじめ、原子核・ハドロン物理学研究室の皆様にも、日常の些細なことから、実験への助言や協力、修士論文中間報告会をはじめとしたミーティングなど、大変お世話になりました。修士課程の2年間を有意義な時間として過ごすことができたのは皆様のおかげです。

最後に、家族や友人に感謝申し上げます。数多く友人の皆様は、普段の他愛ない会話を通じて和ませてくれたり、共通の趣味を楽しんだり、互いに相談しあったり、大きな心の支えとなりました。両親や祖父母など家族・親族の皆様は、学生生活をはじめ、これまでの生活全般といった経済的な支援から、食事や体調などを含めた健康面に至るまで、多大なご支援をいただきました。そして、家族・親族の皆様には、私の研究者生活の第一歩を応援していただいたこと、感謝しても感謝しきれません。

あらためてにはなりますが、本研究を支えていただいた皆様に深くお礼申し上げます。皆様、ありがとうございました。

参考文献

- [1] T. L. Belyaeva et al., Phys. Rev. C 98, 034602 (2018).
- [2] T. L. Tang et al., arXiv 2112.10742v1 (2021).
- [3] L. H. Kawano et al., Astrophys. J 372, 1 (1991).
- [4] H. Sakaguchi and J. Zenihiro, Prog. Part. Nucl. Phys. 97, 1 (2017).
- [5] Y. Matsuda et al., Phys. Rev. C 87, 034614 (2013).
- [6] K. Wimmer et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 769, 65 (2015).
- [7] <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>
- [8] 浜松ホトニクス, S13360 シリーズデータシート, https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s13360_series_kapd1052j.pdf
- [9] Thorlabs, NPL Series of Nanosecond Pulsed Lasers User Guide, <https://www.thorlabs.co.jp/drawings/867caf68a5fafd80-1971DD53-A59B-1286-3D9151A17321C9A6/NPL45B-Manual.pdf>
- [10] Thorlabs, Engineered Diffuser™(トップハット型ビーム出力拡散板), https://www.thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1660
- [11] Thorlabs, ED1-S20 Diameter Beam Profile, https://www.thorlabs.co.jp/images/tabimages/20_deg_Square_EngineeredDiffusers_Data.xlsx
- [12] Cree, PRODUCT FAMILY DATA SHEET Cree® 5-mm Blue and Green Round LED C503B-BAS/BAN/GAS/GAN, <https://assets.cree-led.com/a/ds/h/HB-C503B-BAS-BAN-GAS-GAN.pdf>
- [13] HAMAMATSU PHOTONICS K.K., PHOTOMULTIPLIER TUBES R7600U SERIES datasheet, https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/R7600U_TPMH1317E.pdf
- [14] Thorlabs, ED1-C20 Diameter Beam Profile, https://www.thorlabs.co.jp/images/tabimages/20_deg_Circle_EngineeredDiffusers_Data.xlsx
- [15] Thorlabs, 吸収型 ND フィルター、マウント無し, https://www.thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5011
- [16] 浜松ホトニクス株式会社 編集委員会, 『光電子増倍管ハンドブック』 (光電子

増倍管 -その基礎と応用- 第 4 版), https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/PMT_handbook_v4J.pdf