

平成24年度卒業論文
高時間分解能電磁カロリメータ応用に
向けたピクセル型光子検出器MPPCの
基礎テスト

広島大学理学部物理科学科
クォーク物理学研究室
B090531 関畑 大貴

2013年2月28日
指導教官：杉立徹 教授
主査：杉立徹 教授
副査：石川健一 准教授

概要

本研究の目的は電磁カロリメータ PHOS への応用に向けて MPPC の基礎的性質を調査する事である。MPPC とは浜松ホトニクス社が開発した光子検出器 Multi-Pixel Photon Counter の略称で、ガイガーモードの APD(Avalanche Photo-Diode) がピクセル状に配置された構造を持つ。

MPPC の特徴として、

- 磁場の影響を受けない
- 1photon を検出可能
- 高い増幅率 ($10^5 \sim 10^6$) を持つ
- 高い時間分解能を持つ

があげられる。ガイガーモードで動作するために MPPC の各ピクセルは光子が入射したかどうかだけ識別可能である。それをピクセル上に配置することで光子を数えられるように設計されている。PHOS に搭載されている PWO 結晶は温度が低い方が発光量が多いため、現在、PHOS は $-25\text{ }^\circ\text{C}$ で稼働している。そのため、本研究では MPPC の増幅率や検出効率の温度・印加電圧依存性を調査した。さらに、MPPC はそのガイガーモードの性質上、ピクセル数以上の光子を検出する事は不可能である。故に、ピクセル数に対して入射光子数が多い場合には、入射光子数と検出光子数の応答の線形性が失われる。本研究では、増幅率は印加電圧に対して線形的に変化し、その傾きは温度に依らないという結果が得られた。また、70p.e. までは応答の線形性が保たれている事が分かった。

目次

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 第 1 章 | 序論 | 7 |
| 1.1 | クォークとレプトン | 7 |
| 1.2 | 荷電粒子と物質の相互作用 | 7 |
| 1.2.1 | Bethe-Bloch の式 | 7 |
| 1.2.2 | 制動放射 (Bremsstrahlung) | 8 |
| 1.2.3 | 電磁シャワー | 10 |
| 1.2.4 | 電磁カロリメータ | 10 |
| 1.3 | LHC 加速器 | 10 |
| 1.4 | ALICE 実験 | 11 |
| 1.4.1 | 高エネルギー原子核衝突実験における光子測定 | 11 |
| 1.5 | PHOS | 13 |
| 1.5.1 | PWO 結晶 | 13 |
| 1.5.2 | APD | 14 |
| 1.6 | MPPC | 16 |
| 1.6.1 | MPPC の動作原理 | 16 |
| 1.6.2 | MPPC の性質 | 17 |
| 1.7 | 物理的動機 | 19 |
| 第 2 章 | 実験方法 | 20 |
| 2.1 | セットアップ | 20 |
| 2.1.1 | LED テストでのセットアップ | 20 |
| 2.1.2 | ピコ秒パルスレーザーを用いた実験のセットアップ | 22 |
| 2.2 | 解析手法 | 22 |
| 2.2.1 | 増幅率 | 22 |
| 2.2.2 | 電荷分解能 | 25 |
| 2.2.3 | 時間分解能 | 26 |
| 2.2.4 | 検出効率 (PDE, Photon Detection Efficiency) | 26 |
| 2.2.5 | Cross Talk と After Pulse | 28 |
| 2.2.6 | 応答線形性 | 29 |
| 第 3 章 | 結果 | 32 |
| 3.1 | 増幅率 | 32 |

| | | |
|--------------|------------------------------------|-----------|
| 3.2 | 電荷分解能 | 34 |
| 3.3 | 相対的な検出効率 | 36 |
| 3.4 | After Pulse と Cross Talk | 36 |
| 3.5 | 応答線形性 | 37 |
| 3.5.1 | 新しいピコ秒パルスレーザーを使用した応答線形性 | 39 |
| 3.6 | 時間分解能 | 41 |
| 3.6.1 | 光量が多い場合の時間分解能 | 42 |
| 第 4 章 | 結論 | 45 |
| 付 録 A | Modules | 46 |
| A.1 | NIM | 46 |
| A.2 | CAMAC | 47 |

目次

| | | |
|------|----------------------------------|----|
| 1.1 | 物質別の Bethe-Bloch の式 [3] | 9 |
| 1.2 | 電磁シャワーの概念図 [4] | 10 |
| 1.3 | LHC の航空写真 [5] | 11 |
| 1.4 | ALICE 実験の検出器 [6] | 12 |
| 1.5 | PHOS 検出器 [6] | 13 |
| 1.6 | PWO 結晶 [6] | 14 |
| 1.7 | PWO 結晶の発光量と温度の関係 [4] | 15 |
| 1.8 | APD と前置増幅器 [4] | 15 |
| 1.9 | 電子雪崩降伏 (左) とツェナー降伏 (右) の概念図 [11] | 16 |
| 1.10 | MPPC とプリアンプ | 17 |
| 1.11 | MPPC の等価回路 [7] | 17 |
| 1.12 | LED off 時の MPPC の出力電荷分布 | 17 |
| 1.13 | After pulse の概念図 | 18 |
| 1.14 | クロストークの概念図 | 18 |
| 2.1 | 少数光子入射時の測定のためのセットアップ | 20 |
| 2.2 | LED を用いた実験の恒温装置内の写真 | 21 |
| 2.3 | オシロスコープで見た 1p.e. シグナル | 21 |
| 2.4 | リニアリティー測定のセットアップ | 22 |
| 2.5 | 時間分解能測定のための回路 | 23 |
| 2.6 | 図 2.5 の回路を組んだ時にオシロスコープで見た信号の関係 | 23 |
| 2.7 | LED on 時の MPPC の出力電荷分布 | 24 |
| 2.8 | 25 °C, 71.8V での中心値と p.e. の関係 | 24 |
| 2.9 | 電荷分解能を求めるための概念図 | 25 |
| 2.10 | TDC 分布 | 26 |
| 2.11 | 図 2.10 と同時測定した ADC 分布 | 27 |
| 2.12 | TDC と ADC の 2 次元ヒストグラム | 27 |
| 2.13 | 各フォトンピークの収量@-25deg, 69.0V | 28 |
| 2.14 | ランダムに 10000 個の光子を入射させた場合のピクセルの応答 | 30 |
| 2.15 | リニアリティーのモンテカルロ・シミュレーション | 31 |
| 3.1 | 温度毎の増幅率の印加電圧依存性 | 32 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.2 | Break down 電圧の温度依存性 | 33 |
| 3.3 | Break down 電圧を基準とした場合の増幅率の変化 | 33 |
| 3.4 | 0p.e. ピークの電荷分解能 | 34 |
| 3.5 | 1p.e. ピークの電荷分解能 | 35 |
| 3.6 | 2p.e. ピークの電荷分解能 | 35 |
| 3.7 | 相対的な検出効率の ΔV 依存性 | 36 |
| 3.8 | A.P.or C.T. を起こす確率の ΔV 依存性 | 37 |
| 3.9 | 1 光子検出可能な PMT の ADC 分布 | 38 |
| 3.10 | 70p.e. までの応答線形性 | 38 |
| 3.11 | MPPC での検出光子数とフィルターの減光率の関係 | 39 |
| 3.12 | PMT での検出光子数とフィルターの減光率の関係 | 40 |
| 3.13 | MPPC と PMT の検出光子数の関係 | 40 |
| 3.14 | 各 p.e. ピーク毎に分けた場合の TDC 分布 | 41 |
| 3.15 | p.e. 毎の時間分解能 σ | 42 |
| 3.16 | ADC 分布 | 42 |
| 3.17 | TDC 分布 | 42 |
| 3.18 | TDC と ADC の二次元ヒストグラム | 43 |
| 3.19 | p.e. 毎の TDC 分布 | 43 |
| 3.20 | p.e. 毎の時間分解能 | 44 |
| A.1 | FAN IN/FAN OUT の入力と出力の関係 [14] | 46 |

表 目 次

| | |
|-------------------------|----|
| 1.1 素粒子の表 [1] | 7 |
| 1.2 物質とその性質 | 13 |

第1章 序論

1.1 クォークとレプトン

クォークとレプトンは物質を構成する究極要素である素粒子の一種だと現代では考えられている。素粒子は「物質を構成する粒子」と「力を媒介する粒子」に大別される。自然界には4つの力(強い力、弱い力、電磁力、重力)が存在することが知られているため、力を媒介する粒子も4種類(グルーオン、ウィークボソン、光子、グラヴィトン)存在する。世代ごとにまとめると以下の表 1.1 のようになる。

表 1.1: 素粒子の表 [1]

| 名称 | スピン | 電荷 | 第1世代 | 第2世代 | 第3世代 |
|------|---------------|----------------|---------|-----------|------------|
| クォーク | $\frac{1}{2}$ | $+\frac{2}{3}$ | u(アップ) | c(チャーム) | t(トップ) |
| | $\frac{1}{2}$ | $-\frac{1}{3}$ | d(ダウン) | s(ストレンジ) | b(ボトム) |
| レプトン | $\frac{1}{2}$ | 0 | ν_e | ν_μ | ν_τ |
| | $\frac{1}{2}$ | -1 | e^- | μ | τ |

1.2 荷電粒子と物質の相互作用

この節では、電磁カロリメータに欠かす事の出来ない荷電粒子と物質の相互作用について述べる。荷電粒子は、物質中を通過すると媒質との衝突によってエネルギーを失い、これにより原子は励起されるか、電離する。電離した場合のエネルギー損失は Bethe-Bloch の式によって記述される。

1.2.1 Bethe-Bloch の式

荷電粒子の物質中におけるエネルギー損失は Bethe-Bloch の式で与えられる。特にこの式をエネルギー測定に应用する場合には、単位長さ当たりの質量 ($\xi = \rho x$) に変換すると便利である。その場合の式は以下のようになる。

$$-\frac{dE}{d\xi} = \frac{4\pi\alpha^2(\hbar c)^2}{m_e c^2} \left(\frac{Z}{A}\right) \left(\frac{z}{\beta}\right)^2 \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I}\right) - \beta^2 \right] \quad (1.1)$$

$\frac{dE}{d\xi}$: $d\xi = d\rho x$ 当たりのエネルギー損失量 , ρ : 物質の質量密度

Z, A : 物質の原子番号, 質量数 , α : 微細構造定数 $\approx \frac{1}{137}$

$\hbar c$: エネルギーと距離を変換する定数 $\approx 197[\text{MeV} \cdot \text{fm}]$

$m_e c^2$: 電子の静止質量エネルギー $\approx 0.511 \text{MeV}$

z : 荷電粒子の電荷 , β : 光速と荷電粒子の速度比 $\beta = \frac{v}{c}$

γ : ローレンツ因子 $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$, I : 物質の平均イオン化ポテンシャル

この Bethe-Bloch の式の特徴は、エネルギー損失が荷電粒子の質量に依らず、電荷の 2 乗 z^2 に比例し、速度について、 β^{-2} に比例することである。この特徴のために、電荷 z が等しければ、粒子の速度がほぼ光速に近い $\beta \approx 0.96$ 程度になると、粒子の種類に依らず、 $-\frac{dE}{d\xi}$ がほぼ一定の最小値をとる。

$$-\frac{dE}{d\xi}_{min} \approx 2\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g} \quad (1.2)$$

このような荷電粒子を最小電離損失粒子 (MIP, Minimum Ionization Particle) という。例として、電荷 1 の粒子 (μ , π 中間子、陽子) の場合は以下の図 1.1 のようになる事が知られている。この最小値を超えてさらに粒子の速度が大きくなると、 β^{-2} の項がほぼ一定となり $\ln(\gamma)$ の項によって緩やかに増加する。一方、粒子の速度が小さく、 β が小さい時は β^{-2} に比例して $\frac{dE}{d\xi}$ が増加する。しかし、適用限界が存在し、 $\beta < 0.01$ の場合には過大評価を与える [2]。

1.2.2 制動放射 (Bremsstrahlung)

荷電粒子の物質中でのエネルギー損失においては、電離ばかりでなく制動放射も重要な過程である。物質中の原子核のクーロン場によって減速された電子は光子としてエネルギーを放出する。制動放射の断面積は、以下の式 1.3 で表わされる [2]。

$$\sigma_{brem} \propto \frac{Z^2 \alpha^3}{m^2 c^4} \quad (1.3)$$

断面積は m^{-2} に比例するため電子・陽電子よりも質量の大きな荷電粒子はほとんど制動放射は起こさない。例として、電子と π^\pm の制動放射の起こす確率は $\frac{0.511^2}{139^2} \approx 10^{-5}$ 倍も異なる。

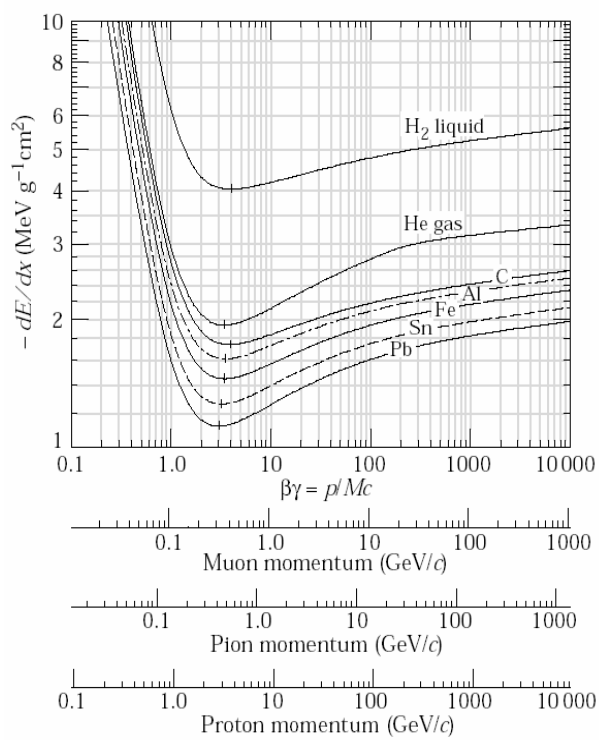


図 1.1: 物質別の Bethe-Bloch の式 [3]

1.2.3 電磁シャワー

高エネルギーの電子が物質中に入射すると、物質中の原子核の電場との散乱により、電子は制動放射を起こし、エネルギーを失う。また、高エネルギーの光子は電子陽電子対を生成し、これらの制動放射と対生成の繰り返しにより、大量の電子陽電子対が生成される。このような現象を電磁シャワーと呼び、電磁シャワーは光子が対生成するのに必要なエネルギー以下になると止まる。

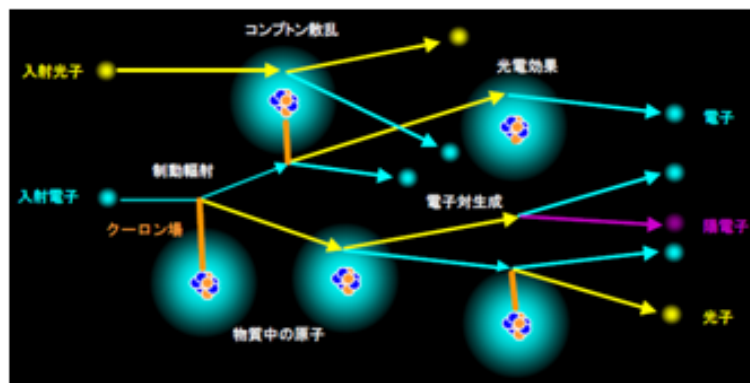


図 1.2: 電磁シャワーの概念図 [4]

1.2.4 電磁カロリメータ

電磁カロリメータとは電磁シャワーを利用して、荷電粒子のエネルギーを測定する検出器である。使用されるシンチレータ部は無機シンチレータと有機シンチレータに大別され、PHOS 検出器は無機シンチレータを使用している。シンチレータとは、粒子がその内部を通過した際に、損失するエネルギーをシンチレーション光という光を放出する物質である。無機シンチレータは有機シンチレータに比べて、発光量が多く、エネルギー分解能が優れるという利点をもつ。また、無機シンチレータは放射長、モリエール半径が小さく電磁シャワーを小さな領域に閉じ込めやすく、入射粒子の全エネルギーを測定する電磁カロリメータとしてよく利用される。放射長とは、粒子が物質内部を通過した際のエネルギーが $\frac{1}{e}$ に減衰するまでの入射面に垂直な距離である。モリエール半径とは、この時の入射面に平行な方向の広がり半径を表わす。

1.3 LHC 加速器

LHC(Large Hadron Collider) 加速器とは、世界最大の衝突型加速器であり、フランスとスイスの国境をまたいでいる。周長 27km で、世界最大の衝突エネルギーを実現してい

る。将来的には、陽子+陽子衝突では重心系衝突エネルギー 14TeV、鉛+鉛衝突では核子対当たり 5.5TeV に到達する事を予定されている。

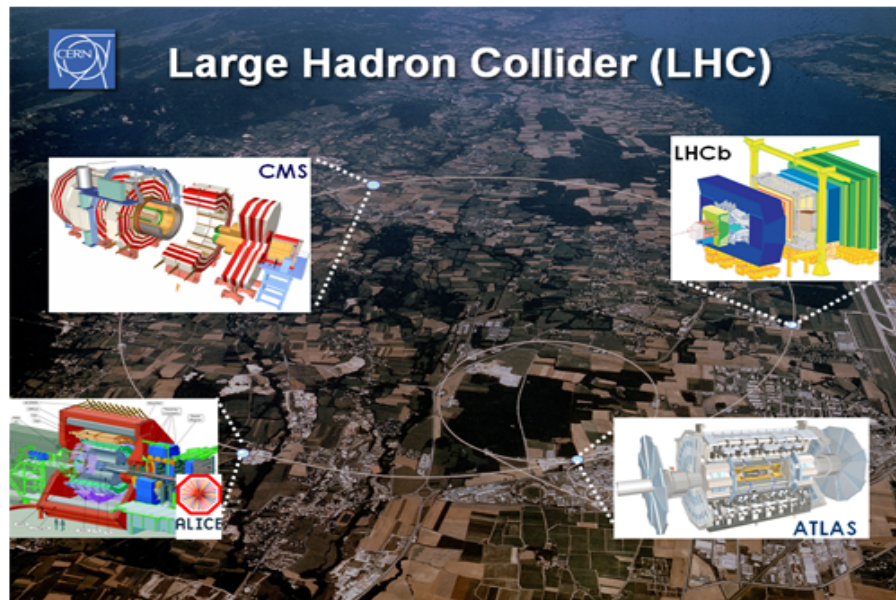


図 1.3: LHC の航空写真 [5]

1.4 ALICE 実験

ALICE 実験 (A Large Ion Collider Experiment) とは LHC 加速器実験の中で唯一、重イオン衝突実験のために設計された検出器をもつ実験である。日本からは広島大学をはじめ、東京大学、筑波大学が参加しており、グループ全体で 1000 人以上の研究者が共同で実験している。ほぼ光速まで加速した原子核同士を衝突させると、核子中のクォークは閉じ込めから解放され、宇宙誕生直後に存在したと考えられている「クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 相」というクォークとグルーオンが自由に飛び交っている物質相が作られる。ALICE 実験の目的はその QGP 相を探索し、現在の宇宙を構成している物質の生成過程を解明する事である。

1.4.1 高エネルギー原子核衝突実験における光子測定

光子は色荷を持たないため、衝突によって生成されたクォーク物質とは相互作用しない。従って、光子は衝突初期の情報やその光子が生成された段階の情報を知る上で有用なプローブとなり得る。光子はその発生起源によって「直接光子 (Direct Photon)」と「崩壊光子 (Decay Photon)」2 つに大別される。さらに直接光子は「Thermal Photon」と「Prompt

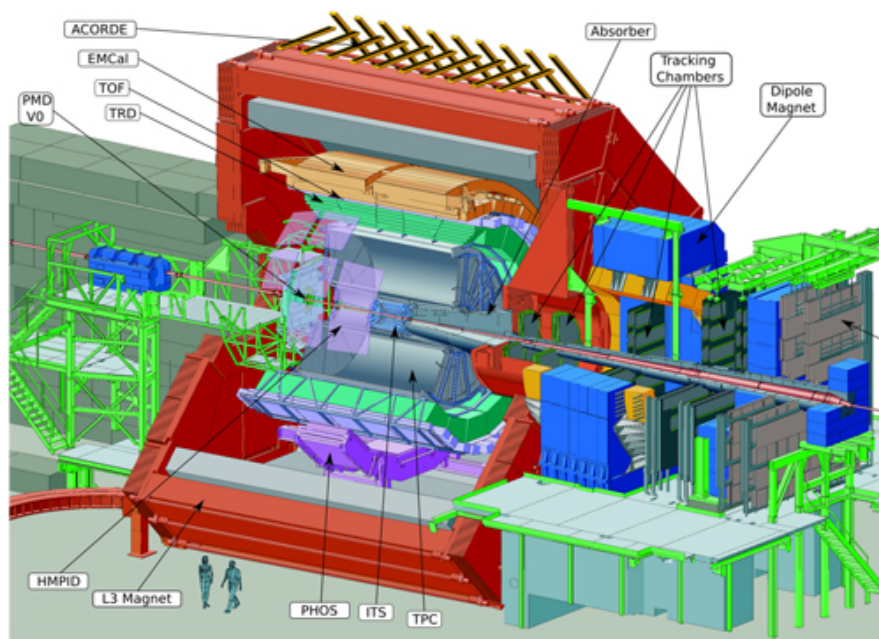


図 1.4: ALICE 実験の検出器 [6]

Photon」に大別される。しかし、測定されるのは包括的光子 (Inclusive Photon) であるため、識別は困難である。本小節ではその特徴を述べる。

熱光子 (Thermal Photon)

熱平衡状態にある QGP 相の熱輻射による光子。QGP 相の温度を測定するための直接的プローブになり得る。その生成量は Maxwell・Boltzmann 分布に従う。

Prompt Photon

原子核が衝突した初期の強いパートン (クォークとグルーオン) 散乱の $q + g \rightarrow \gamma + q$ (コンプトン散乱)、 $q + \bar{q} \rightarrow \gamma + g$ (対消滅) によって生成される光子。

崩壊光子 (Decay Photon)

ハドロンの崩壊を起源とする光子。代表例として $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ (分岐比 $98.823 \pm 0.034\%$) [8]、 $\eta \rightarrow 2\gamma$ (分岐比 $39.31 \pm 0.20\%$) [8] がある。直接光子を測定する場合はこれらの崩壊光子はバックグラウンドとなる。ハドロン崩壊から来る光子のスペクトルを引く事で、直接光子のスペクトルを作成する事が出来る。

1.5 PHOS

PHOton Spectrometer(PHOS) 検出器は ALICE 実験に搭載されている電磁カロリメータである。重イオン衝突によって作られるクォーク物質相の熱輻射から来る熱光子を検出することも大きな目的の一つである。PHOS 検出器の特徴は、LHC の中で一番高い 2 粒

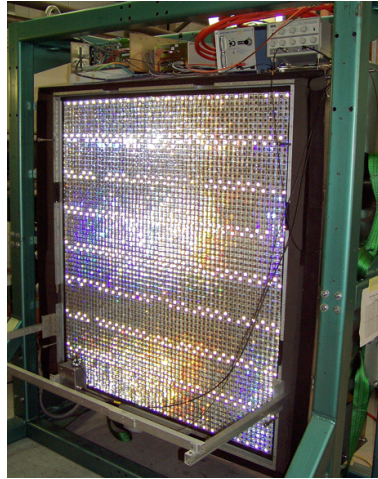


図 1.5: PHOS 検出器 [6]

子分解能を持つこと、さらに、高いエネルギー分解能と位置分解能を有している事である。

1.5.1 PWO 結晶

次に、PHOS に積まれている無機シンチレータである鉛タングステン酸結晶 (PWO) について述べる。

PWO 結晶はモリエール半径が小さいので電磁シャワーの広がりを抑えることが出来る。そのため、前述したように 2 粒子分解能 (granularity) が高い。以下の表 1.2 に PWO 結晶と他の無機シンチレータの特徴をまとめる。

表 1.2: 物質とその性質

| 物質 | 密度 [g/cm^3] | モリエール半径 [cm] | 放射長 [cm] | 発光量 (NaI 比) |
|-----|-----------------|------------------|--------------|-------------|
| NaI | 3.67 | 4.5 | 2.59 | 1.00 |
| PWO | 8.28 | 2.0 | 0.89 | 0.01 |
| CsI | 4.53 | 3.8 | 1.85 | 0.40 |
| BGO | 7.13 | 2.4 | 1.12 | 0.15 |

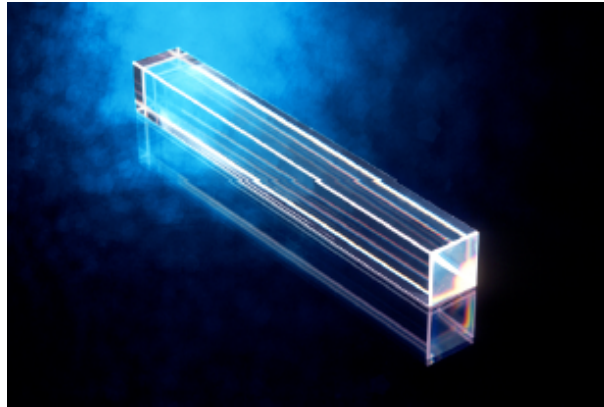


図 1.6: PWO 結晶 [6]

また、PWO 結晶は温度を冷やすと発光量が増加するという特徴を持つため、現在は-25℃で稼働している。

1.5.2 APD

APD とは Avalanche Photo Diode の略称で、光子検出器の一種である。

p 型半導体と n 型半導体を接合させてあり、接合部は互いのキャリアが打ち消しあっている領域を空乏層と呼ぶ。この空乏層に半導体の禁制帯の幅以上のエネルギーの光子が入射すると、内部光電効果により電子と正孔対が生成される。pn 接合半導体は逆バイアスをかけても電流はほとんど流れないが、逆バイアス電圧がある一定以上になると、電流が流れ出す。これをブレイクダウンと言い、この時の閾値の逆バイアス電圧の事をブレイクダウン電圧と言う。ブレイクダウンを起こす原因には電子雪崩とツェナー効果によるものがある。図 1.9 にその概念図を示す。

p 型半導体の価電子帯の電子がトンネル効果によって禁制帯を通り抜けて n 型半導体に移ることで電流が流れる現象をツェナー降伏という。また、逆バイアス電圧が大きくなると、空乏層中に高電場が形成される。この状態の時に空乏層に光子が入射して、電子と正孔対を生成すると電場によって電子が加速され、そのエネルギーによって結晶の結合を切断して、電子と正孔対を生成する。このように生成された電子・正孔対はまた電場によって加速され、同様な事象を繰り返して電子数が雪崩的に増幅する現象をアバランシェ増幅と呼ぶ。これにより、大電流が発生することを電子雪崩降伏という。このようにアバランシェ増幅を利用して信号を増幅させたフォトダイオードをアバランシェフォトダイオード (Avalanche Photo Diode, APD) という。

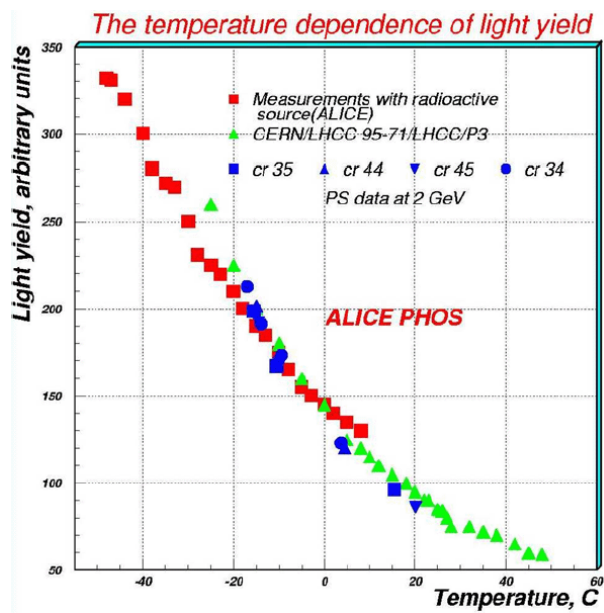


図 1.7: PWO 結晶の発光量と温度の関係 [4]

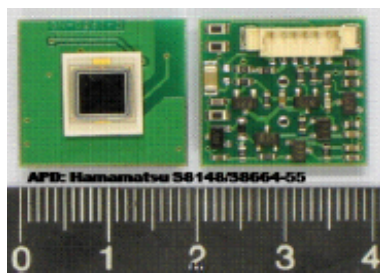


図 1.8: APD と前置増幅器 [4]

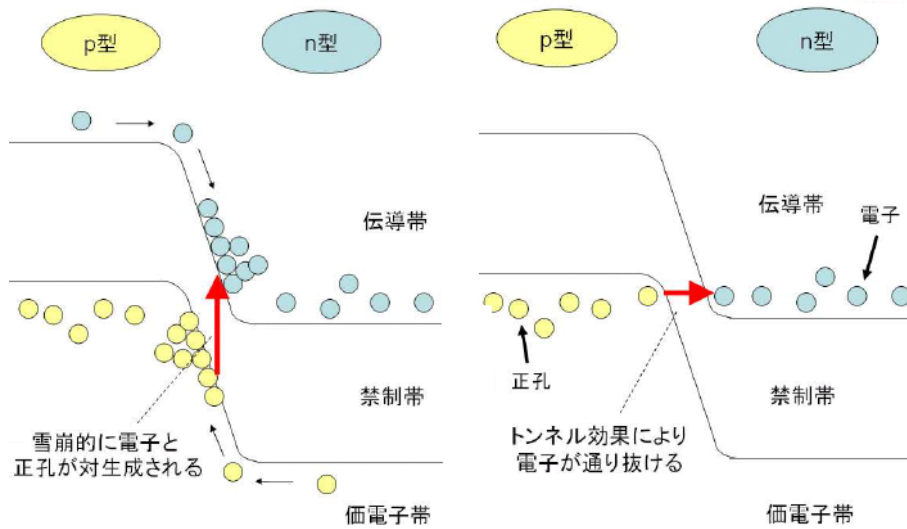


図 1.9: 電子雪崩降伏 (左) とツェナー降伏 (右) の概念図 [11]

1.6 MPPC

1.6.1 MPPC の動作原理

MPPC は Multi-Pixel Photon Counter の略称でガイガーモードの APD をピクセル状に配置された構造をもつ。ガイガーモードとはブレイクダウン電圧以上の逆バイアス電圧を与え、同時に入射する光子数に関係なく一定の信号を出す状態の事をいう。MPPC の特徴は以下の通りである。

- 磁場の影響を受けない
- 1photon を検出可能
- 高い増幅率 ($10^5 \sim 10^6$) を持つ
- 高い時間分解能を持つ

図 1.11 に MPPC の等価回路を示す。MPPC の重要な特徴は Geiger Mode で動作させているために、出力は 1 ピクセルにいくつの光子が入射しても一定であり、入射した光子数は分からず、「入射したか否か」のみが情報である。それを並列に並べる事で、「反応したピクセル数 = 検出した光子数」という関係が成り立つ。そのため、入射光子数がピクセル数よりも多くなると、正しく光子数をカウント出来なくなってしまい、過小評価を与える。また、並列な構造によって出力信号は各ピクセルの和となる。



図 1.10: MPPC とプリアンプ

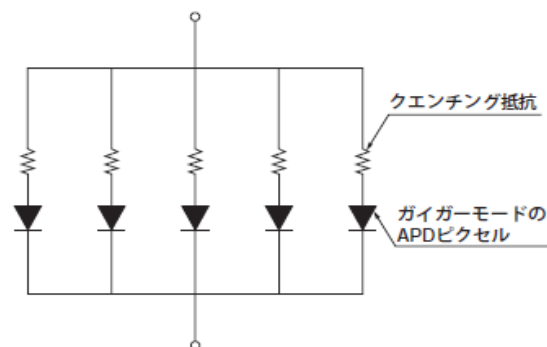


図 1.11: MPPC の等価回路 [7]

1.6.2 MPPC の性質

Dark count

MPPCはGeiger Modeで構造上、各ピクセルで発生したノイズは1光子によるシグナルと区別がつかない。そのため、検出した光子数を過大評価してしまう。このピクセル中で生じるノイズの事をダークカウントと呼ぶ。本論文では、ピクセル外のノイズを単に「ノイズ」と呼び、ピクセル中のノイズを「ダークカウント」と記述し、区別する。

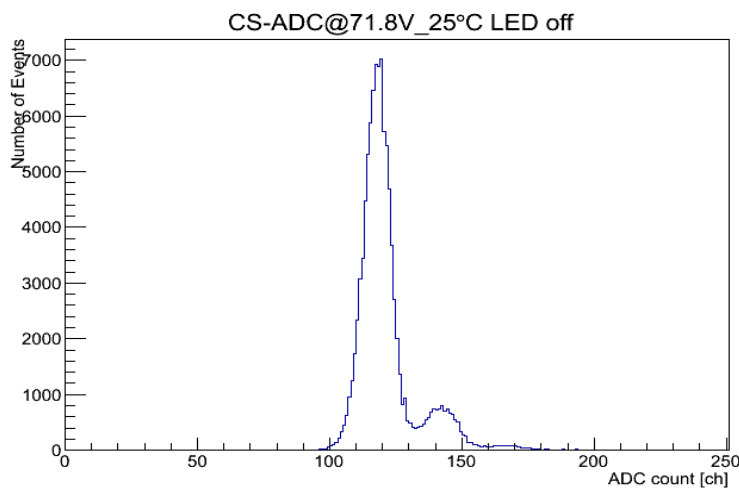


図 1.12: LED off 時の MPPC の出力電荷分布

LED off にもかかわらず左端の 0p.e. 以外のピークが見える。これらがダークカウントによるシグナルである。ここで、p.e. は photoelectron または、photon equivalent の略である。

After pulse

アフターパルスとはピクセルに光子が入射した際に生成される電子が空乏層内部の電場でアバランシェ増幅された時に物質中の格子欠陥に捕われてしまい、電場が回復した後に再放出される現象の事をいう。このアフターパルスも検出光子数を過大評価してしまう原因の1つである。

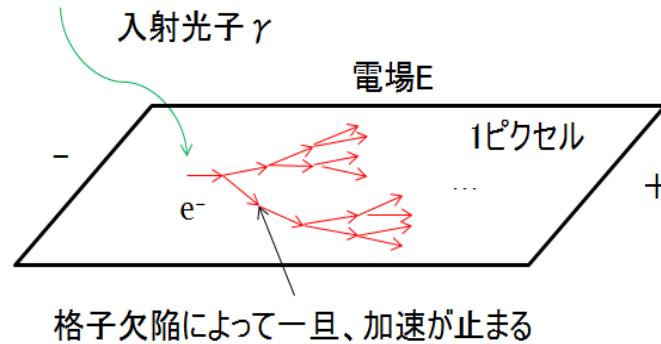


図 1.13: After pulse の概念図

Cross talk

ピクセル中でアバランシェ増幅される過程で二次光子が放出される場合がある。その二次光子が隣接するピクセルに入射してまた増幅される現象の事をクロストークという。このクロストークもアフターパルスと同様に検出光子数を過大評価してしまう原因の1つである。

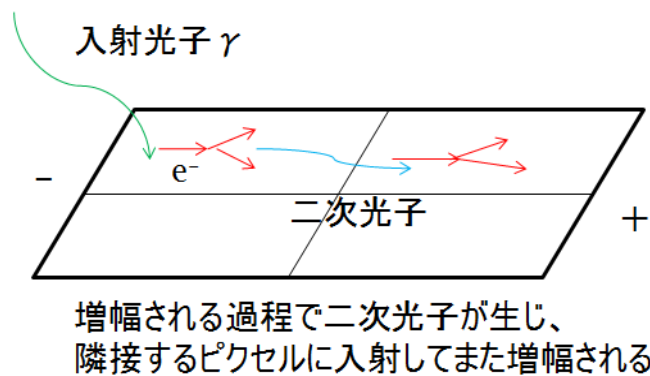


図 1.14: クロストークの概念図

1.7 物理的動機

本研究は CERN での ALICE 実験検出器 PHOS(PHOton Spectrometer) のアップグレード計画の一環であり、高い時間分解能を用いた熱光子と反中性子の識別を最終的な目的として掲げている。高エネルギー原子核衝突によって生成された QGP(クォーク・グルーオン・プラズマ) 相の初期段階を探索する上で、熱光子が有用なプローブとなり得る。しかし、GeV 領域において、反中性子が中性子と対消滅して約 2GeV のエネルギーの光子が PHOS で測定されるために背景事象となる。その識別のためには時間分解能の向上が必要不可欠である。現在は量子効率の高い APD(Avalanche Photo Diode) を使って高いエネルギー分解能と広いダイナミックレンジを実現している。その長所を保持したまま高い時間分解能を付加しなければならない。その要求に応え得る素子の候補が MPPC である。

第2章 実験方法

2.1 セットアップ

2.1.1 LEDテストでのセットアップ

MPPCの基礎テストを行うに当たって、まず、少数光子入射時のMPPC応答の印加電圧と温度依存性の測定をするために、光源として緑色のLED(King bright社製、英)を使ってセットアップをした。その回路を図2.1に示す。光電子増倍管(PMT,Photo Multiplier Tube)はH7195を使用した。

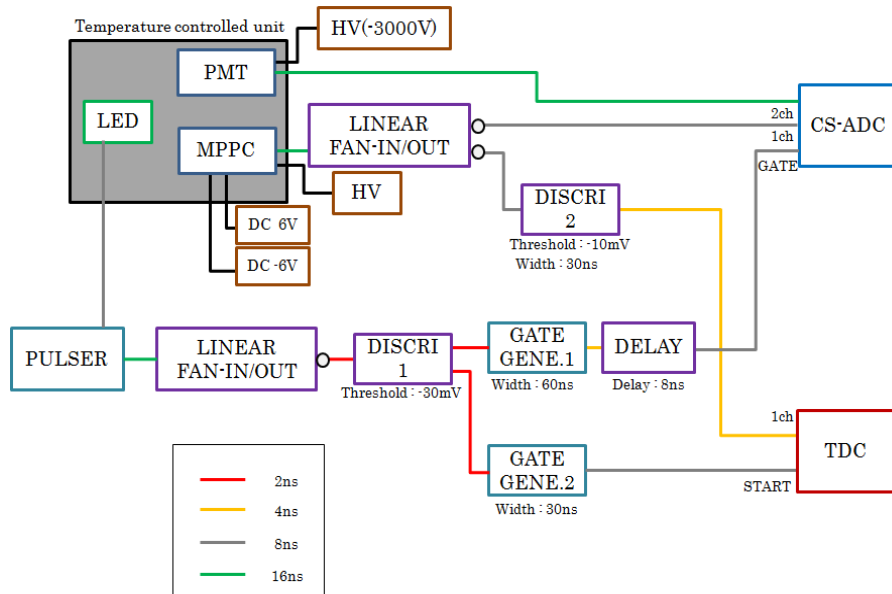


図 2.1: 少数光子入射時の測定のためのセットアップ

LEDの発光量は温度に依存する。そのため、発光量を一定に保つために、一般に、その応答が温度に依らない光電子増倍管とMPPCを使って同時測定を行った。MPPCから出力信号はNIMモジュールによって整形された後、CAMACモジュールで電荷量とパルサーがLEDに信号を発した時間とMPPCがLEDからの光を検出した時間との時間差を測定する。NIMとCAMACの説明は付録Aを参照されたい。

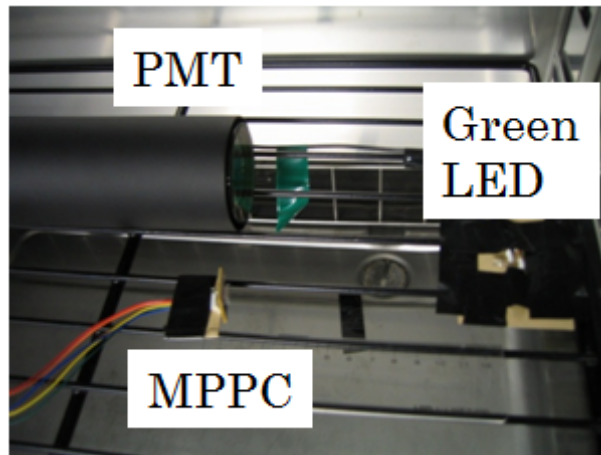


図 2.2: LED を用いた実験の恒温装置内の写真

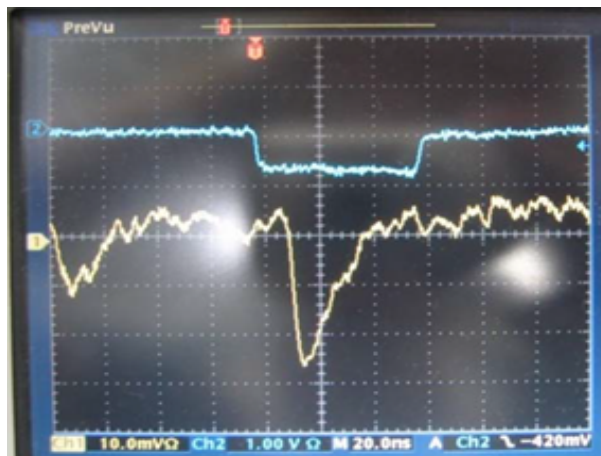


図 2.3: オシロスコープで見た 1p.e. シグナル
1ch(黄) : MPPC からの出力 (FAN IN/FAN OUT で正負を反転している)
2ch(青) : ADC の GATE(Trigger)

2.1.2 ピコ秒パルスレーザーを用いた実験のセットアップ

次に、ピコ秒パルスレーザーを使った MPPC のリニアリティー測定のためのセットアップを図 2.4 に示す。レーザーからの光量をモニタリングするために 1 光子を検出可能な光電子増倍管 (R1450) を用いた。また、これとは別に図 2.5 のように、時間分解能測定のための回路を組んだ。

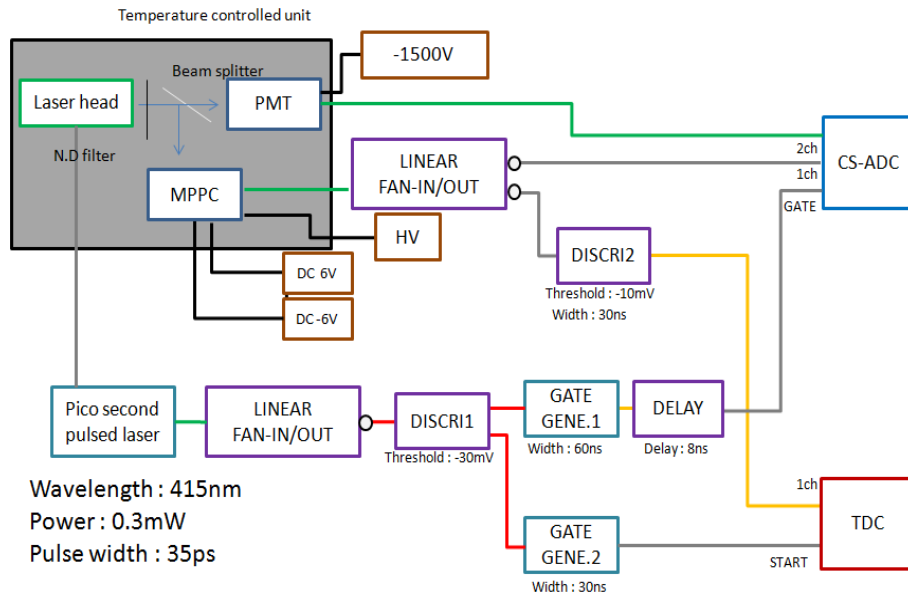


図 2.4: リニアリティー測定のためのセットアップ

2.2 解析手法

図 2.7 は LED を光らせた場合の ADC のヒストグラムである。赤線は Multi Gaussian によるフィッティングである。0p.e. から 9p.e. までフォトンピークが見られるので 10 個のガウシアンでフィットを行った。

2.2.1 増幅率

図 2.7 の Multi Gaussian からそれぞれのピークを中心値のパラメータを各 p.e. に対してプロットするとその傾きから MPPC とプリアンプの合計の増幅率が分かる。なぜならば、MPPC の出力は各ピクセルの和になり、p.e. に対して線形だからである。そして、プリアンプの増幅率は一定とする事で MPPC の増幅率の印加電圧・温度依存性を知ることが出来る。

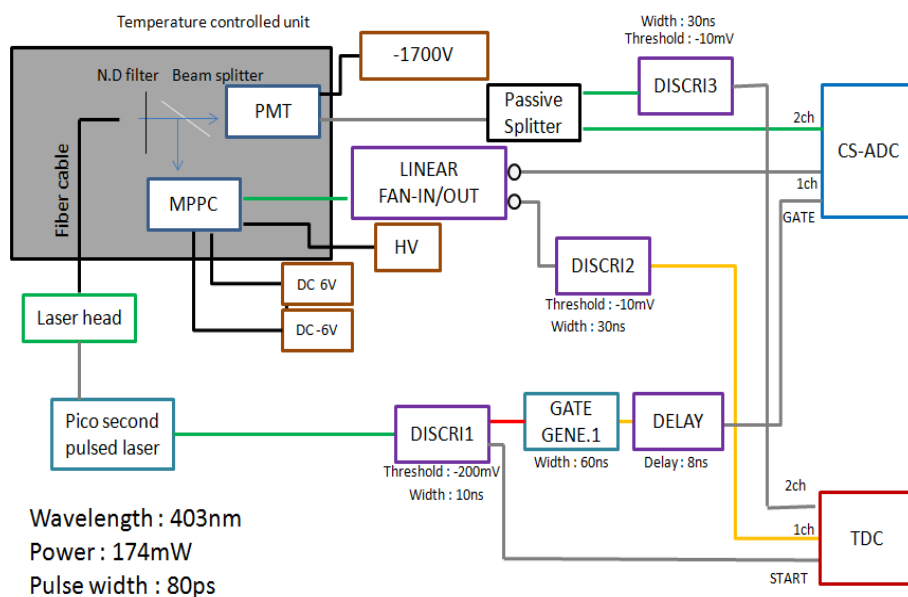


図 2.5: 時間分解能測定のための回路

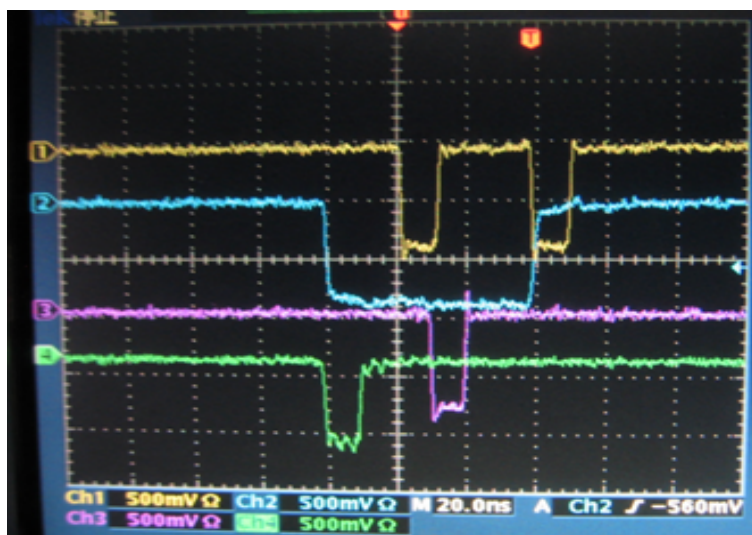


図 2.6: 図 2.5 の回路を組んだ時にオシロスコープで見た信号の関係
1ch(黄) が MPPC からの stop 信号、2ch(青) が ADC の GATE、3ch(紫) が PMT からの stop 信号、4ch(緑) が TDC の start 信号である。ADC の GATE と TDC の start を共通のタイミングにすることで光子による信号で stop させる確率を高くした。

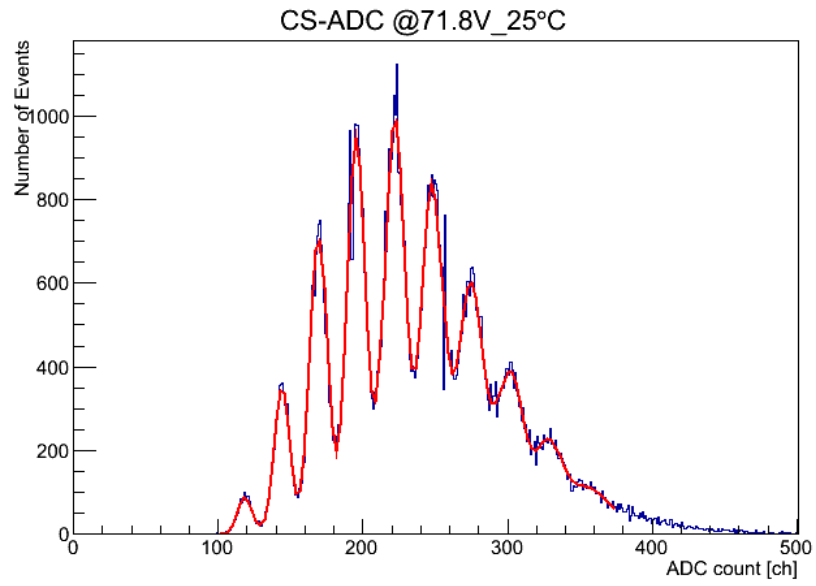


図 2.7: LED on 時の MPPC の出力電荷分布

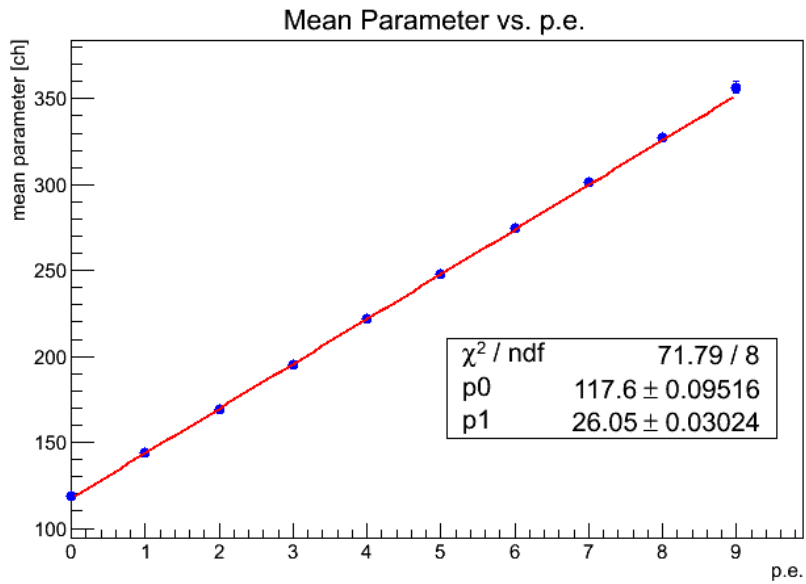


図 2.8: 25 °C,71.8V での中心値と p.e. の関係
 グラフの傾きからピークの間隔は $26.05 \pm 0.03 \text{ch/p.e.}$ である。

増幅率とピーク間の平均間隔、印加電圧の関係は式 2.1 によって記述される。

$$G_{total} = \frac{Q}{e} = \frac{r \times d}{e} = \frac{C_{pixel} \times (V_{op} - V_{bd})}{e} \quad (2.1)$$

G_{total} : MPPC とプリアンプの合計の増幅率, e : 素電荷 1.602×10^{-19} [C]

r : CS - ADC の変換係数 0.25[pC/ch], d : ピーク間の平均間隔 [ch/p.e.]

Q : 出力電荷 [C], C_{pixel} : 各ピクセルの静電容量 [F]

V_{op} : 印加電圧 [V], V_{bd} : ブレイクダウン電圧 [V]

よって、ピーク間の平均間隔 d を測定する事でブレイク電圧 V_{bd} と各ピクセルの静電容量 C_{pixel} を求める事が出来る。また、新たに over voltage ΔV という量を以下のように式 2.2 で定義する。すなわち、

$$\Delta V \equiv V_{op} - V_{bd} \quad (2.2)$$

この ΔV はブレイクダウン電圧よりも印加電圧がどれだけ大きいかを表す。ブレイクダウン電圧は温度によって変化するため、全ての温度で印加電圧の基準を統一するために導入する。

2.2.2 電荷分解能

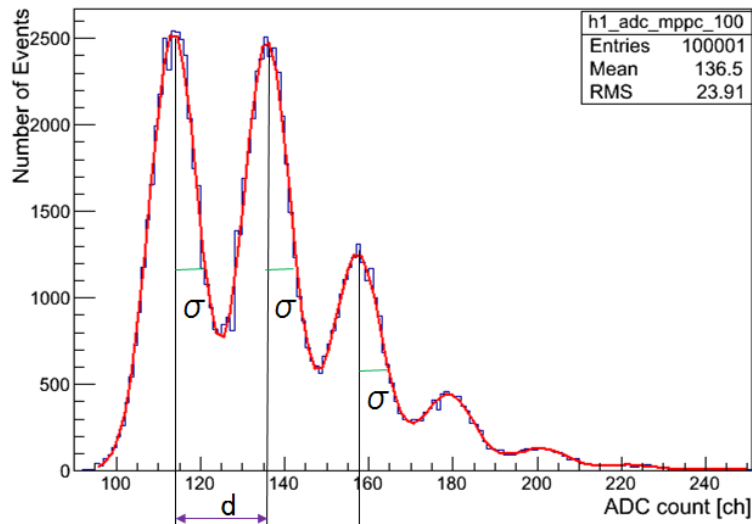


図 2.9: 電荷分解能を求めるための概念図

図 2.9 中でフィッティングしたガウシアン各ピークの幅 σ をピーク間の平均間隔 d で割った値を電荷分解能 R_{charge} と定義する。

$$R_{charge} \equiv \frac{\sigma}{d} \quad (2.3)$$

この電荷分解能 R_{charge} が小さければ、各 p.e. ピークを良く分離できるという事である。

2.2.3 時間分解能

ピコ秒パルスレーザーを光らせてから MPPC が射出された光子を検出するまでの時間を測定した。その得られたヒストグラムが図 2.10 である。いくつかのピークに分かれているが、これは TDC と ADC の二次元ヒストグラム図 2.12 を見ると、p.e. ピークに対応している事が分かる。これから各 p.e. ピークを抽出して時間分解能の変化を調べた。

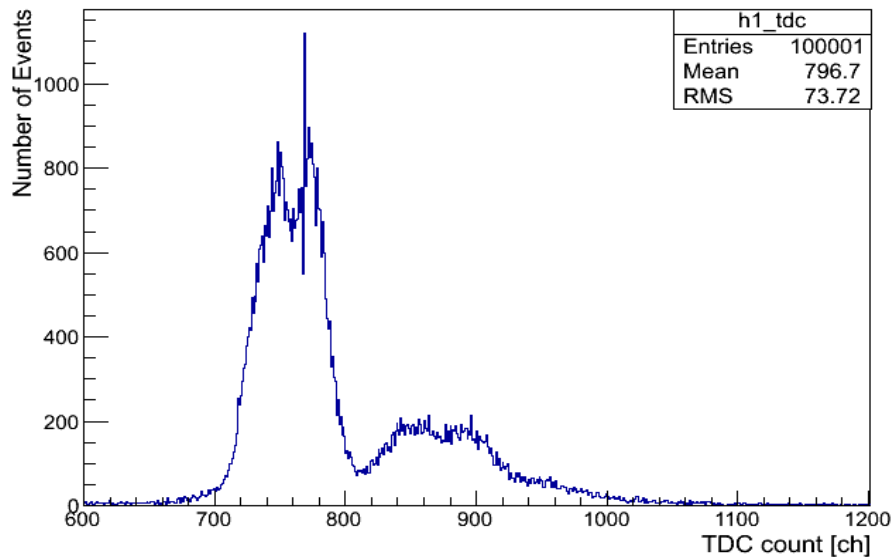


図 2.10: TDC 分布

2.2.4 検出効率 (PDE, Photon Detection Efficiency)

検出効率 f の定義は、以下の式 2.4 である。

$$f = \frac{\text{検出光子数}}{\text{入射光子数}} \quad (2.4)$$

しかし、入射光子数を測定するのは非常に困難である。そのため、本論文では相対的な検出効率の求め方を次に述べる。LED の発光はある時間間隔で発生する事象であるためポ

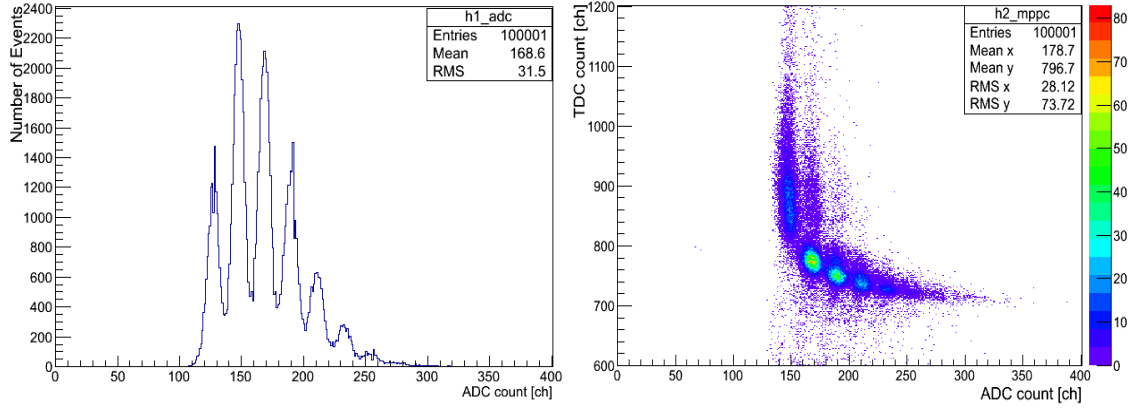


図 2.11: 図 2.10 と同時測定した ADC 分布 図 2.12: TDC と ADC の 2 次元ヒストグラム

アソン分布に従うので、 k 個の光子が射出される確率 $P(x = k)$ は、 λ を平均射出光子数として、式 2.5 となる。

$$P(x = k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \quad (2.5)$$

さらに、式 2.5 に「LED から $k+i$ 個の光子が射出されたが、検出効率を f として、MPPC では $k+i$ 個中、 k 個だけ入射光子を検出し、 i 個は検出しない」という場合を考える。

$$\begin{aligned} P_i(x = k) &= P(x = k + i) \times {}_{k+i}C_k \times f^k (1 - f)^i \\ &= \frac{e^{-\lambda} \lambda^{k+i}}{(k+i)!} \times \frac{(k+i)!}{k! \cdot i!} \times f^k (1 - f)^i \end{aligned} \quad (2.6)$$

そして、式 2.6 を i について 0 から ∞ の和をとれば、検出効率が f の場合に MPPC で k 個の光子が検出される確率 P_{det} が分かる。

$$\begin{aligned} P_{det}(x = k) &= \sum_{i=0}^{\infty} \frac{e^{-\lambda} \lambda^{k+i}}{(k+i)!} \times \frac{(k+i)!}{k! \cdot i!} \times f^k (1 - f)^i \\ &= \frac{(f\lambda)^k}{k!} \times e^{-\lambda} \times \sum_{i=0}^{\infty} \frac{[\lambda(1-f)]^i}{i!} \\ &= \frac{(f\lambda)^k}{k!} \times e^{-\lambda} \times e^{\lambda(1-f)} \\ &= \frac{e^{-f\lambda} (f\lambda)^k}{k!} \end{aligned} \quad (2.7)$$

結局、式 2.7 より検出光子数の従う分布は平均値 $f\lambda$ のポアソン分布である事が分かった。つまり、平均入射光子数 λ が分かれば検出効率 f が分かる事を意味している。図 2.13 中で青い点は測定量で赤い線はポアソン分布でフィッティングした曲線である。

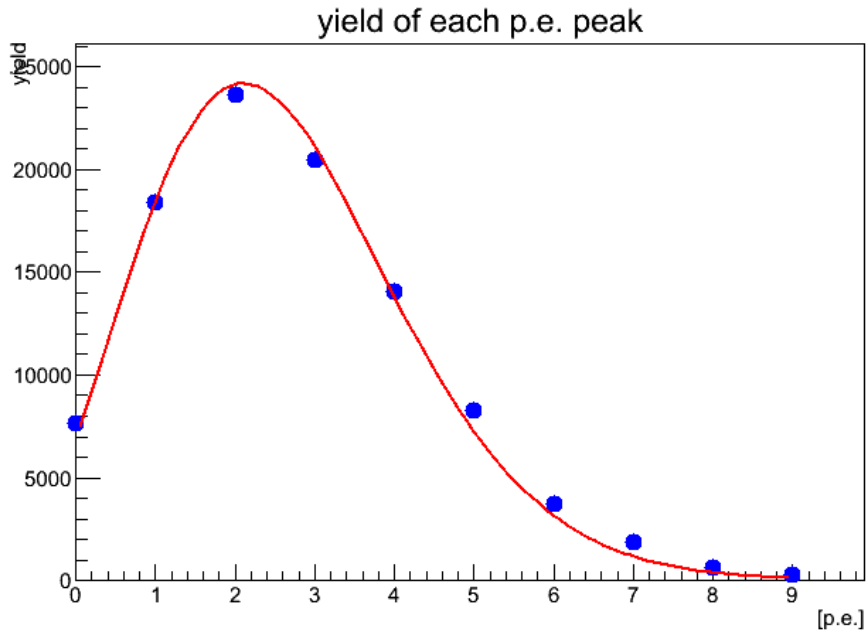


図 2.13: 各フォトンピークの収量@-25deg,69.0V

2.2.5 Cross Talk と After Pulse

Scaler での回数から計算する方法

クロストークを起こす確率 $P_{C.T.}$ を次式 2.8 のように定義する。

$$\begin{aligned}
 P_{C.T.} &= \frac{1.5\text{p.e. threshold} - 0.5\text{p.e. threshold}}{0.5\text{p.e. threshold}} \\
 &= 1 - \frac{1.5\text{p.e. threshold}}{0.5\text{p.e. threshold}}
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

1.5p.e.threshold : LED offでの 1.5p.e. threshold 以上の信号の回数

0.5p.e.threshold : LED offでの 0.5p.e. threshold 以上の信号の回数

式 2.8 で定義される確率 $P_{C.T.}$ は、「LED off の状態で同時に 2 つ以上のピクセルでダークカウントが観測される確率は小さく、1.5p.e. threshold を越えたダークカウントはクロストークによるものである」という仮定に基づいている。

また、アフターパルスが起こる確率 $P_{A.P.}$ を式 2.9 で定義する。

$$\begin{aligned}
 P_{A.P.} &= \frac{\text{short gate} - \text{long gate}}{\text{short gate}} \\
 &= 1 - \frac{\text{long gate}}{\text{short gate}}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

short gate : 短いゲート信号の回数

long gate : 長いゲート信号の回数

長いゲート信号は本来観測されるべき回数で、短いゲート信号はアフターパルスによって増加したゲートの回数である。その比を取れば、アフターパルスが起きる回数分かる。

0p.e. の収量から見積もる方法

こちらの方法ではクロストークの確率とアフターパルスの確率を分離できない。前小節で述べた、検出光子数がポアソン分布に従う事を利用する。まず、アフターパルスとクロストークは検出光子数に過大評価を与えるため、1p.e. の収量は減少する方向にしか変化しない。ここで、ダークカウントは光子によるシグナルと区別できないため、ダークカウントも 1p.e. として扱う。また、アフターパルスもクロストークも光子シグナルに起因するので、0p.e. にはこれらの影響は無い。そこで、0p.e. の収量の割合から 1p.e. の収量の割合を見積もる。

$$P_{cal}(1) = -P_{meas}(0) \ln P_{meas}(0) \quad (2.10)$$
$$P_{meas}(0) = \frac{0p.e. \text{ yield}}{\text{Total Entry}}$$

$P_{cal}(1)$: $P_{meas}(0)$ を使って計算した期待される確率

$P_{meas}(0)$: 測定した 0p.e. の収量から求めた確率

このようにして求めた $P_{cal}(1)$ と $P_{meas}(1)$ の差はアフターパルスとクロストークの影響で減少した量を表わす。これらからクロストークもしくはアフターパルスを起こす確率 $P_{C.T.orA.P.}$ を見積もる。

$$P_{C.T.orA.P.} = \frac{P_{cal}(1) - P_{meas}(1)}{P_{cal}(1)} \quad (2.11)$$
$$P_{meas}(1) = \frac{1p.e. \text{ yield}}{\text{Total Entry}}$$

$P_{meas}(1)$: 測定した 1p.e. の収量から求めた確率

2.2.6 応答線形性

MPPC はガイガーモードで動作しているため、各ピクセルにいくつの光子が入射したかは分からないという事は前章で述べた。さらに、ピクセル数は有限であるため、ピクセル数に対して多くの光子が入射した場合、検出光子数に過小評価を与える。ピクセル数に対して、入射光子数と検出光子数の線形性がどこまで保たれるかを表わす曲線を応答曲線または、リニアリティと呼び、以下の式 2.12 で表わされる。しかし、この理論式は簡略

化された式でクロストークとアフターパルスの影響や、シンチレータの時間構造を含んでおらず、まだ改善の余地がある。

$$N_{fired} = N_{pixel} \left(1 - \exp \left(\frac{-f N_{in}}{N_{pixel}} \right) \right) \quad (2.12)$$

N_{fired} : ガイガー放電したピクセル数 (検出光子数), N_{in} : 入射光子数, N_{pixel} : 有効ピクセル数

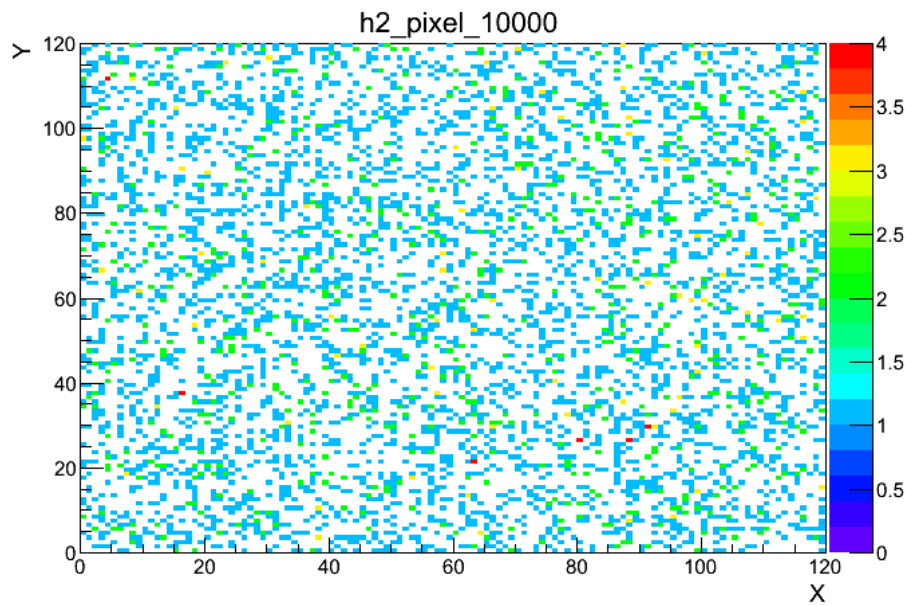


図 2.14: ランダムに 10000 個の光子を入射させた場合のピクセルの応答

次に、 $N_{pixel} = 14400$ 、 $f = 0.5$ としたリニアリティーのモンテカルロ・シミュレーションを行った。120 × 120 = 14400 ピクセルを用意して、そのピクセルにランダムに N_{in} 個の光子を入射させる状況を再現した。それを図 2.14 に示す。しかし、各ピクセルにいくつの光子が入射しても、ガイガーモードの性質で出力は一定で、「検出光子数」=「反応したピクセル数」であるため、入射光子数と検出光子数の線形性は失われる。次に、図 2.15 に応答の線形性を示す。青点はアフターパルスとクロストークを含まない場合で、赤点はそれらを考慮した場合の結果である。しかし、これらの応答曲線は光源の発光の時間構造により、実効的なダイナミックレンジが拡大する事が期待される。

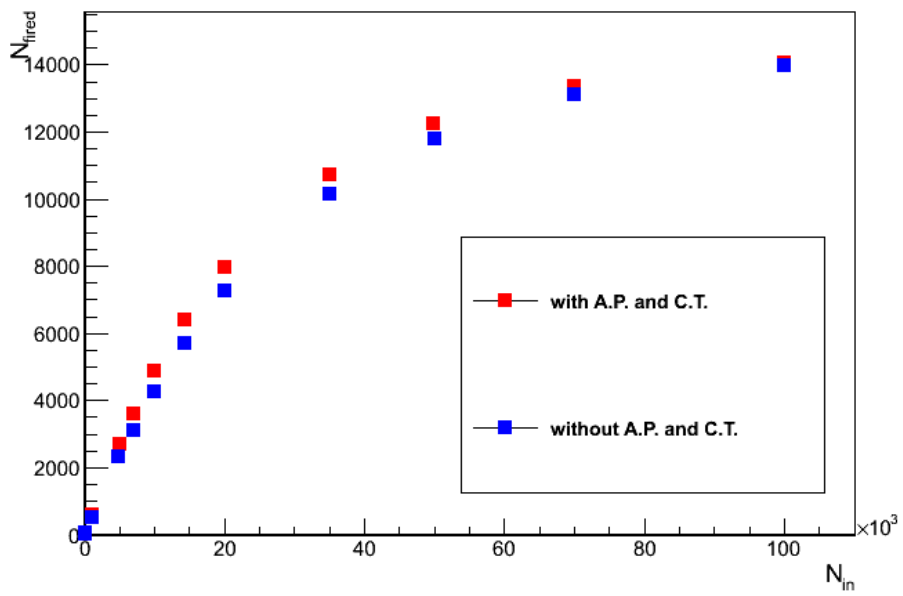


図 2.15: リニアリティーのモンテカルロ・シミュレーション

第3章 結果

3.1 増幅率

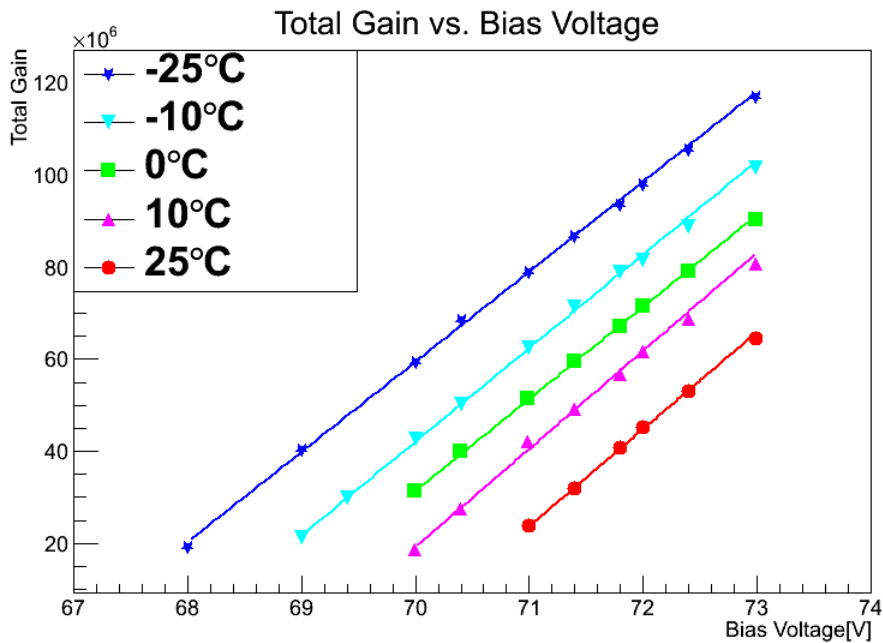


図 3.1: 温度毎の増幅率の印加電圧依存性

図 3.1 から分かるように、印加電圧が大きいほど MPPC の増幅率は大きい。またこの図 3.1 の x 切片がブレイクダウン電圧である。図 3.2 にその温度依存性を示す。温度が下がるにつれて、ブレイクダウン電圧が小さくなるのが 3.2 から見て取れる。25°C のブレイクダウン電圧と -25°C の時の値の差は 3V である。これは、低い温度ではより低い印加電圧で光子検出可能である事を意味している。また、ブレイクダウン電圧を基準にして over voltage ΔV を横軸に取った場合の結果を図 3.3 に示す。この結果から、増幅率の変化の仕方は温度に依らず ΔV に比例する事が分かる。

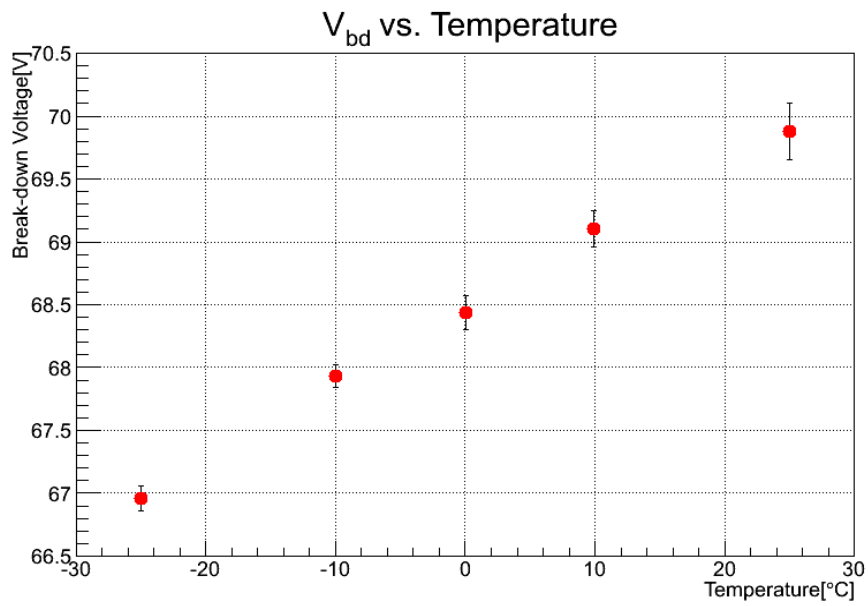


図 3.2: Break down 電圧の温度依存性
 温度が下がるにつれて Break down 電圧は下がるのが分かる。

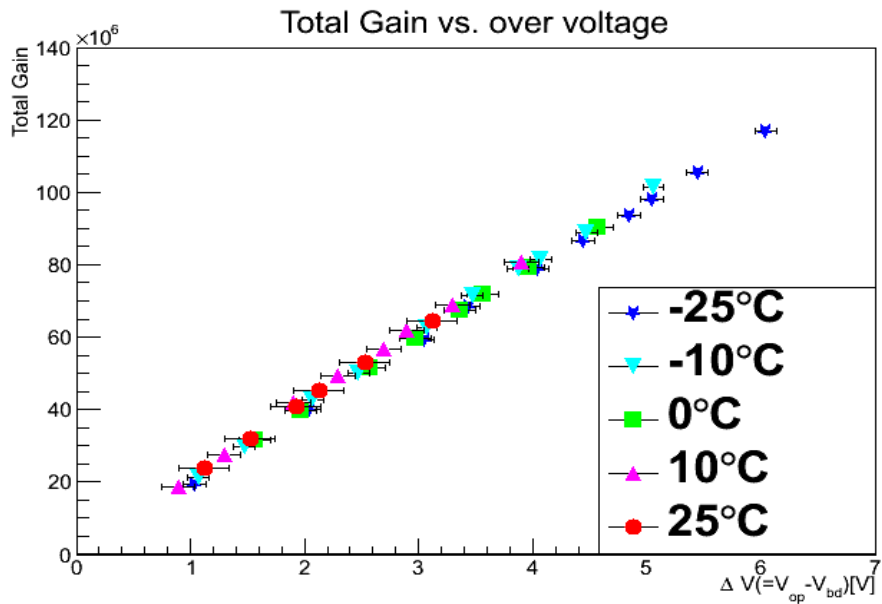


図 3.3: Break down 電圧を基準とした場合の増幅率の変化
 温度に依らず増幅率の傾きは一定である。

3.2 電荷分解能

前章の式 2.3 で定義した電荷分解能は、印加電圧を変化させて測定すると極小値をもつという結果が得られた。また、電荷分解能に極小値を与える ΔV の値は、温度を下げるにつれて大きくなる事が分かる。

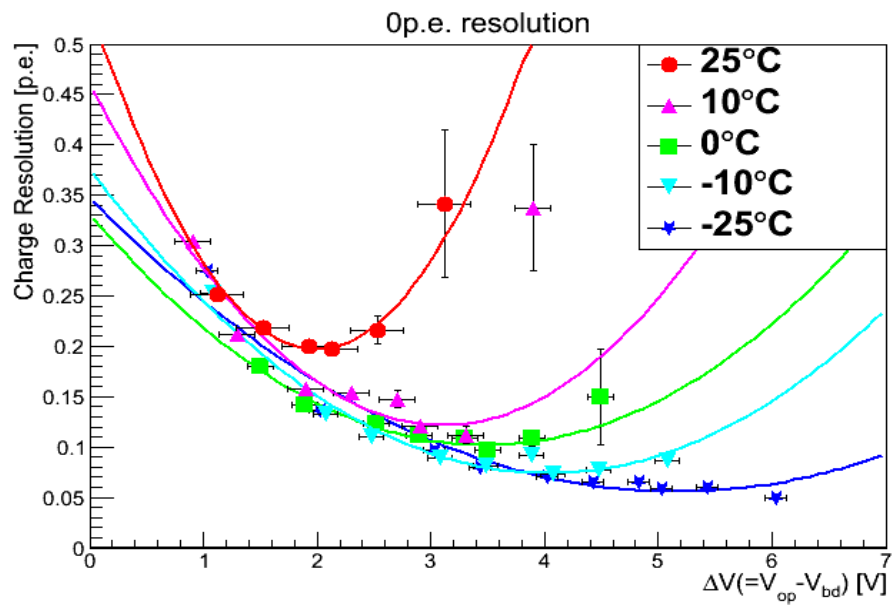


図 3.4: 0p.e. ピークの電荷分解能

0p.e. の電荷分解能はグラウンドの揺らぎを表わし、その値が小さいほどグラウンドが安定している。温度が低い場合には熱的ノイズが少なくなるためこのような結果になると考えられる。

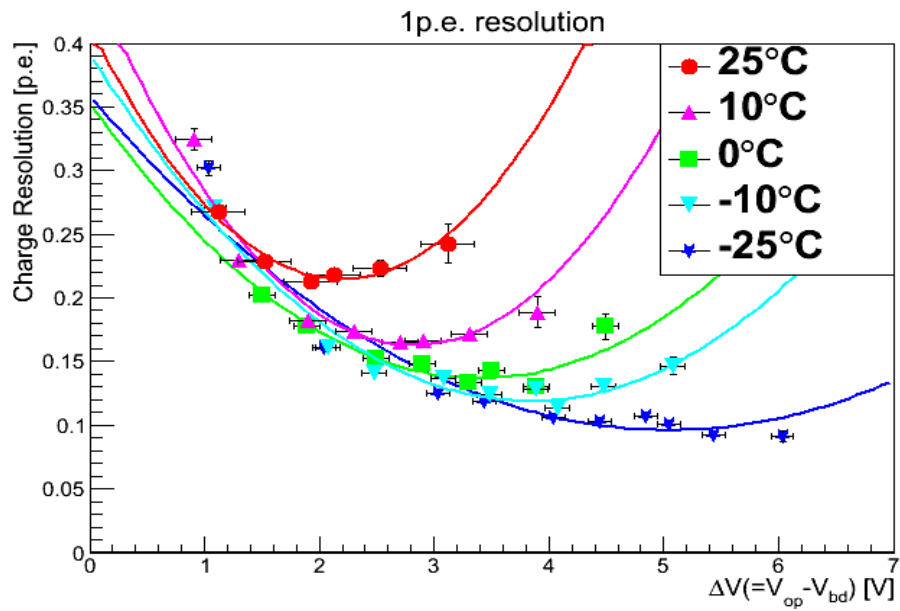


図 3.5: 1p.e. ピークの電荷分解能

図 3.5 より、1p.e. ピークの電荷分解能は 25 °C では $\Delta V = 2V$ の時に 0.2p.e. また、-25 °C では $\Delta V = 5V$ で 0.1p.e. である。

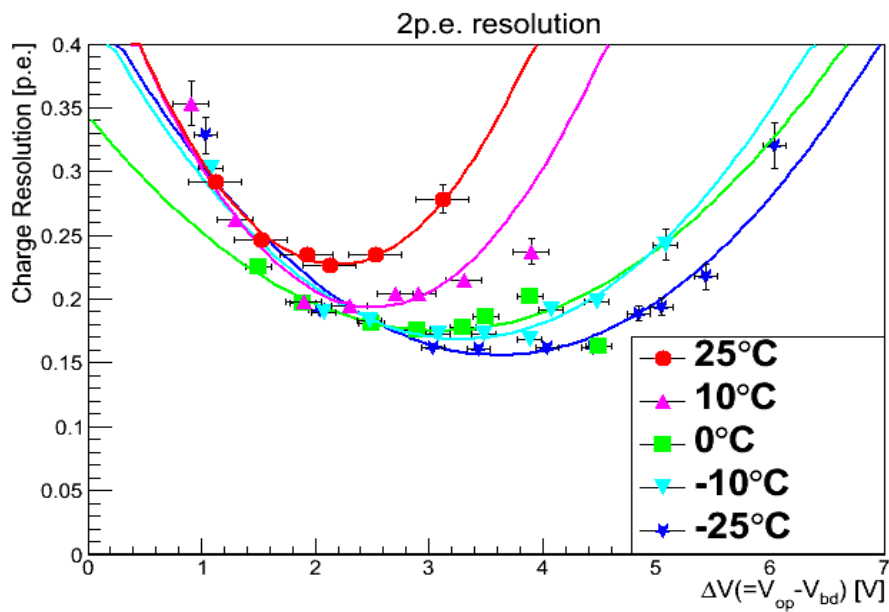


図 3.6: 2p.e. ピークの電荷分解能

3.3 相対的な検出効率

検出効率の定義は式 2.4 で述べたが、いくつかの光子が入射したかは分からないが、全ての温度・印加電圧において、PMT で LED の光量をモニタリングして一定に保って測定した。その結果が図 3.7 である。温度下げた場合には検出効率は悪くなるという結果が得られた。また、 ΔV が大きくなるにつれて検出効率が增加する事が見て取れる。

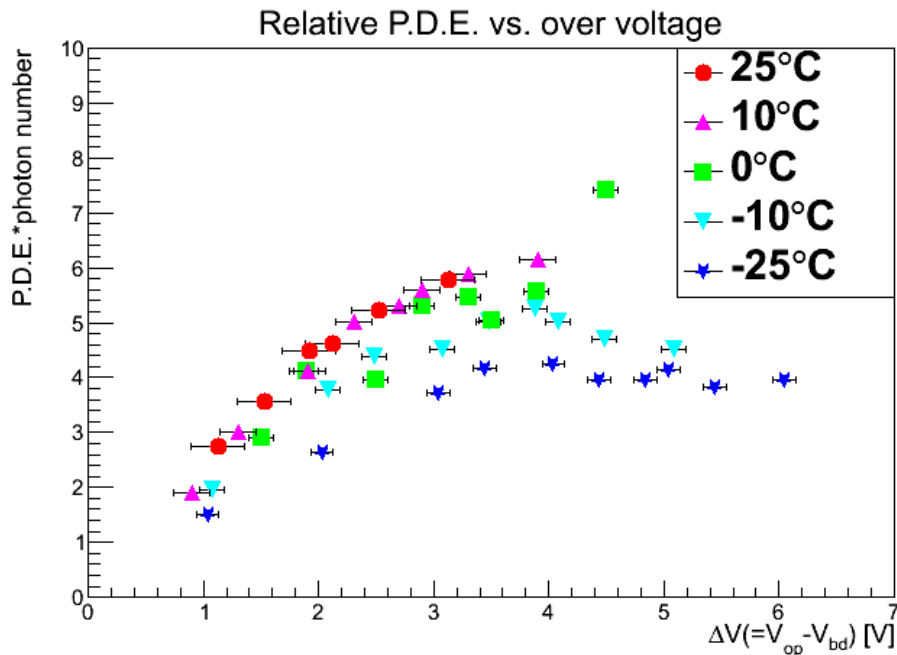


図 3.7: 相対的な検出効率の ΔV 依存性

3.4 After Pulse と Cross Talk

0p.e. の収量から予想した 1p.e. の収量と実際に測定された 1p.e. の収量の差からアフターパルスとクロストークの確率を見積もった結果である。温度を下げた場合にはその確率が増加するという結果が得られた。また ΔV が大きくなるにつれて確率も増加している。この結果から、 -25°C で MPPC を動作させた場合には、 25°C の場合に比べて検出光子数を大きく見積もってしまう恐れがあり、応答線形性も早く失われる可能性がある事が分かる。ここで、アフターパルスとクロストークの識別にはオシロスコープで見られる波形の分析が必要で、収量の差からは識別出来ないため”or”と表わした。

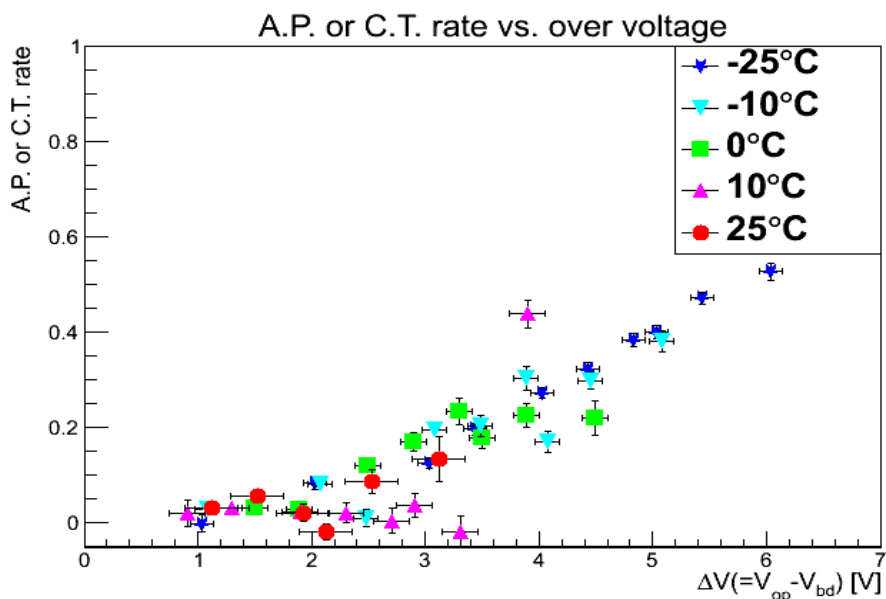


図 3.8: A.P.or C.T. を起こす確率の ΔV 依存性

3.5 応答線形性

本研究ではピコ秒パルスレーザーを使って、70p.e. までの応答線形性の結果を図 3.10 に示す。また、レーザーの光量をモニタリングしていた 1 光子検出可能な PMT の ADC 分布を図 3.9 に示す。125ch にあるピークは 0p.e. ピーク (ペDESTAL) で、128ch にあるピークは 1p.e. ピークである。その増幅率は約 3ch に相当する。70p.e. までは線形が保たれている事が分かる。しかし、電磁カロリメータへの応用のためには $10^5 \sim 10^6$ 光子まで測定可能な広いダイナミックレンジが要求される。そのため、より高強度なピコ秒パルスレーザーを使って大光量の応答線形性を測定しなければならない。

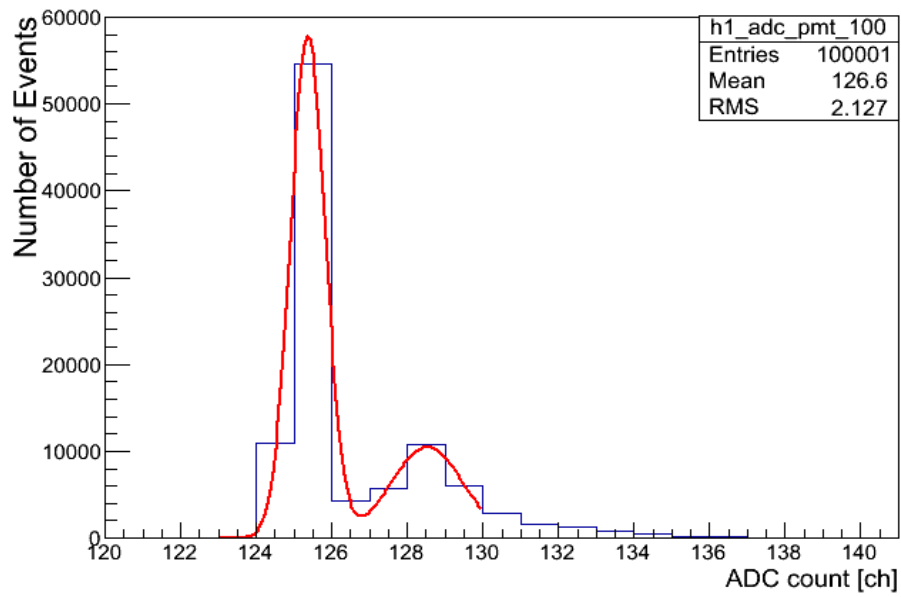


図 3.9: 1 光子検出可能な PMT の ADC 分布

図 3.9 に示すように、1 光子検出可能な光電子増倍管はペダスタルと 1p.e. のピークが現れる。

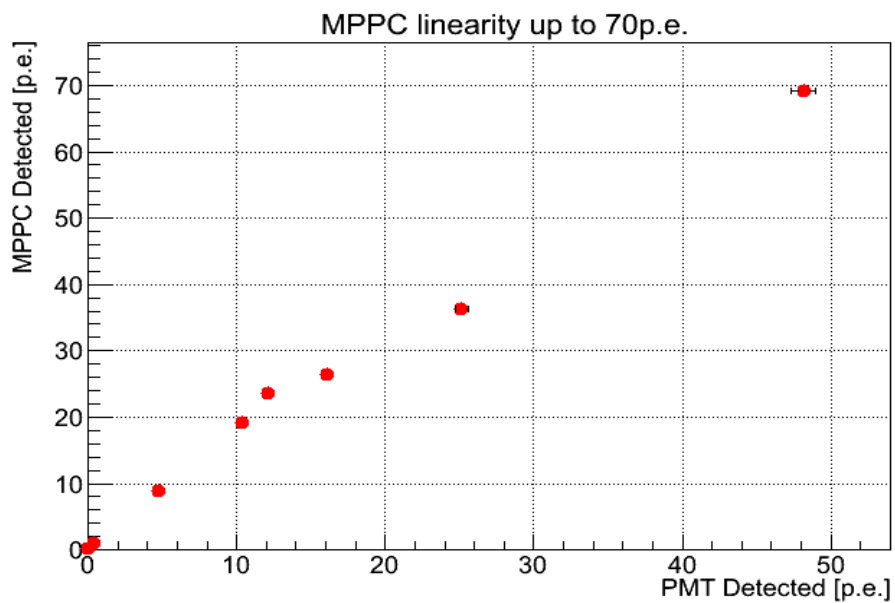


図 3.10: 70p.e. までの応答線形性

3.5.1 新しいピコ秒パルスレーザーを使用した応答線形性

図 2.5 のように回路を組み、新しいピコ秒パルスレーザーを使って光量が多い場合の応答の線形性を測定した。

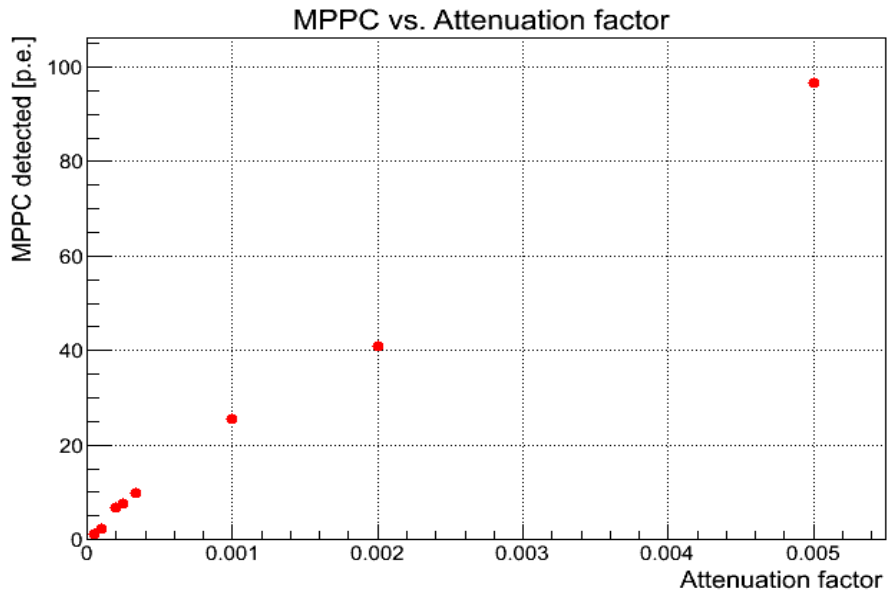


図 3.11: MPPC での検出光子数とフィルターの減光率の関係

レーザーヘッドを高温装置の中に直に入れた場合との違いは光電子増倍管に印加している電圧である。今回は Passive Splitter で信号を 2 等分しているため、光電子増倍管からの信号の大きさが半分になってしまう。よって、Discriminator で threshold を越えず、TDC へ stop 信号が送られなくなる。それを防ぐために -1700V の高い電圧で動作させた。図 3.11 をより、MPPC の減光率との関係は線形になっているが、光電子増倍管の関係は図 3.12 を見ると明らかなように線形性が失われている。図 3.13 に示すように、光電子増倍管では線形性が失われ、MPPC では多く検出されているのが分かる。

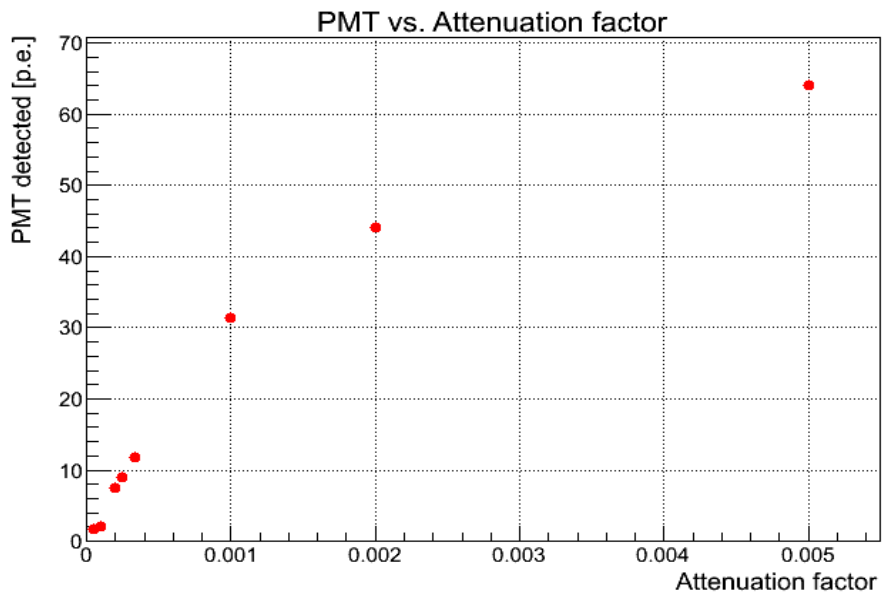


図 3.12: PMT での検出光子数とフィルターの減光率の関係

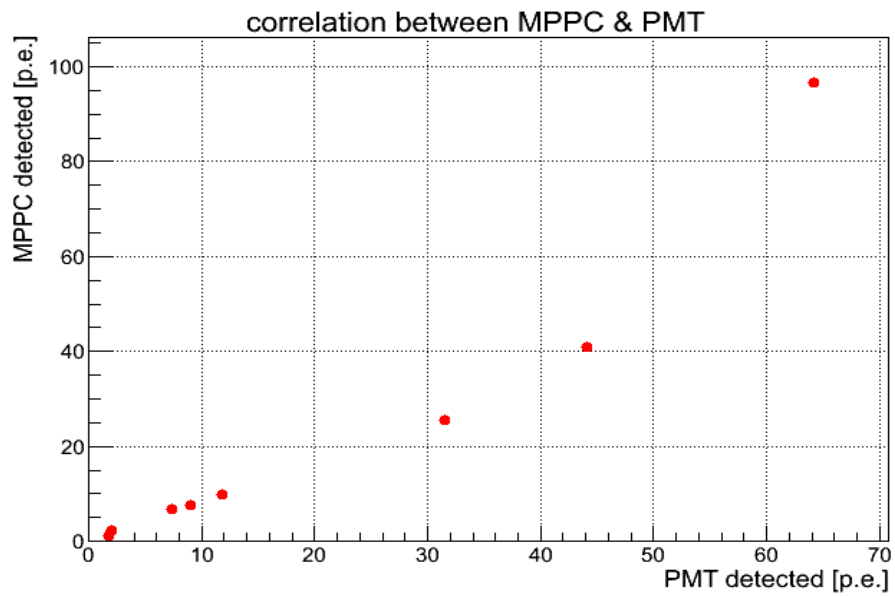


図 3.13: MPPC と PMT の検出光子数の関係

3.6 時間分解能

TDC 分布に光電子数によってピークに分かれる事は述べたが、そのピークごとに時間分解能がどのように変化するかを求めた。その結果が図 3.14 と図 3.15 である。光電子数

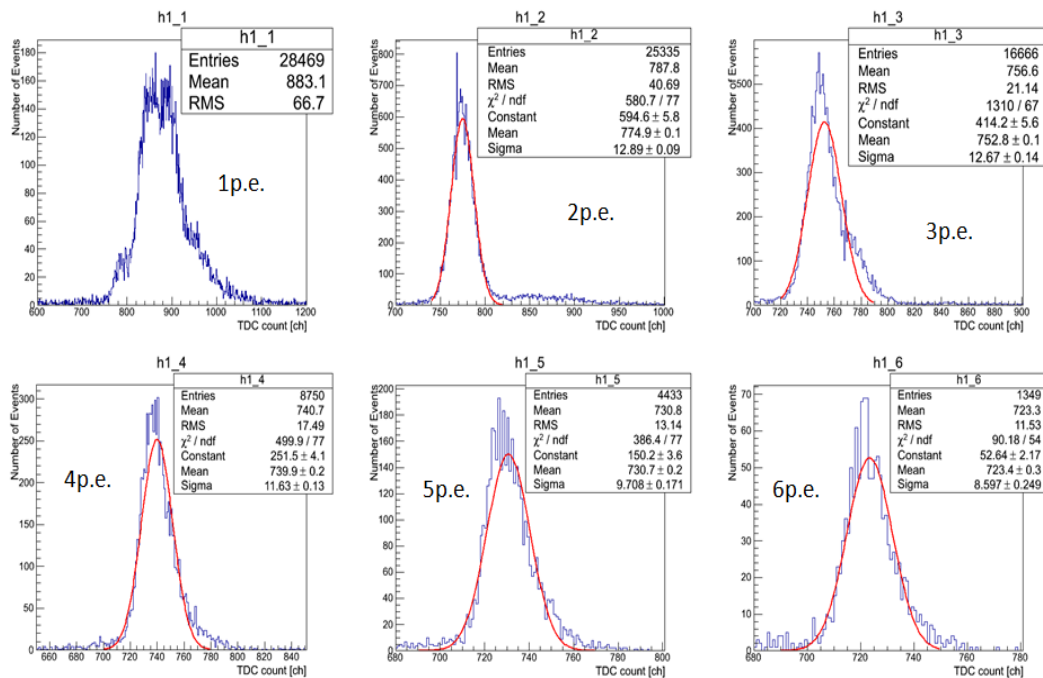


図 3.14: 各 p.e. ピーク毎に分けた場合の TDC 分布

が多い方が時間分解能が良くなる事が分かる。これは、TDC の stop を決めるのは MPPC からの出力信号の立ち上がりが Discriminator の threshold を越えるタイミングだからである。光量が多い場合には、信号は大きいので threshold を越えるタイミングの揺らぎは小さい。しかし、光量が少なく信号が小さい場合には、threshold を越えるタイミングの揺らぎが大きくなってしまうためである。そのため、光量が十分多い場合には、時間分解能はどこか一定の値に収束すると考えられる。

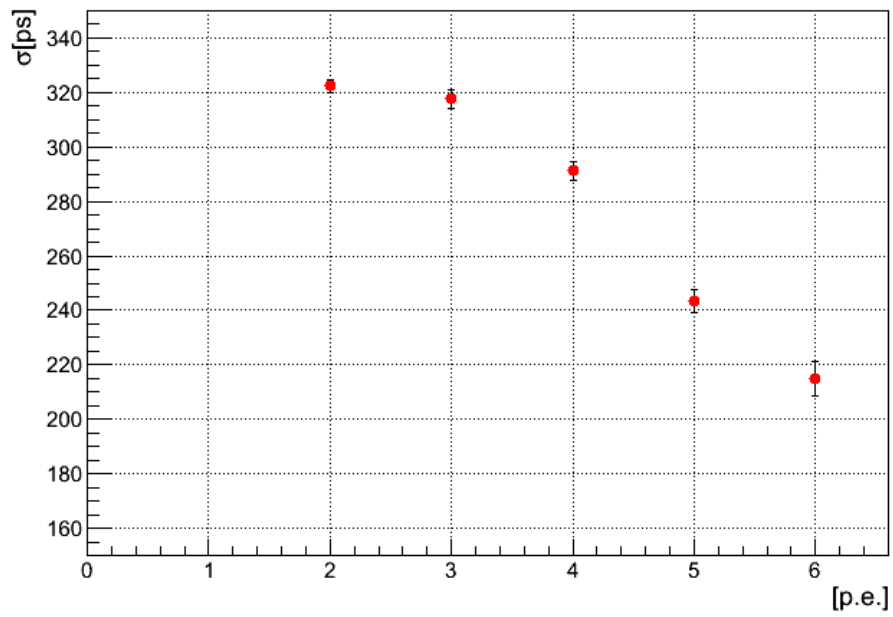


図 3.15: p.e. 毎の時間分解能 σ

3.6.1 光量が多い場合の時間分解能

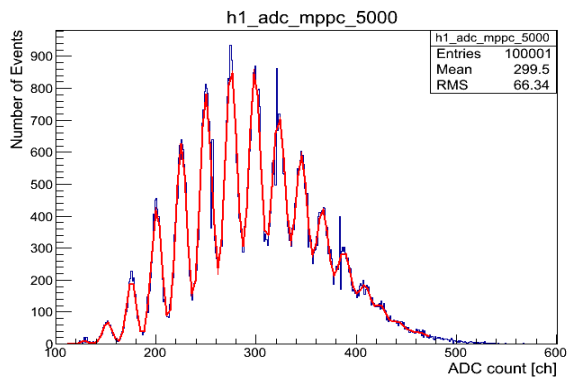


図 3.16: ADC 分布

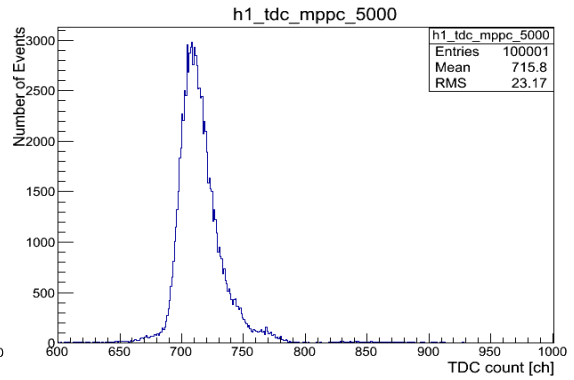


図 3.17: TDC 分布

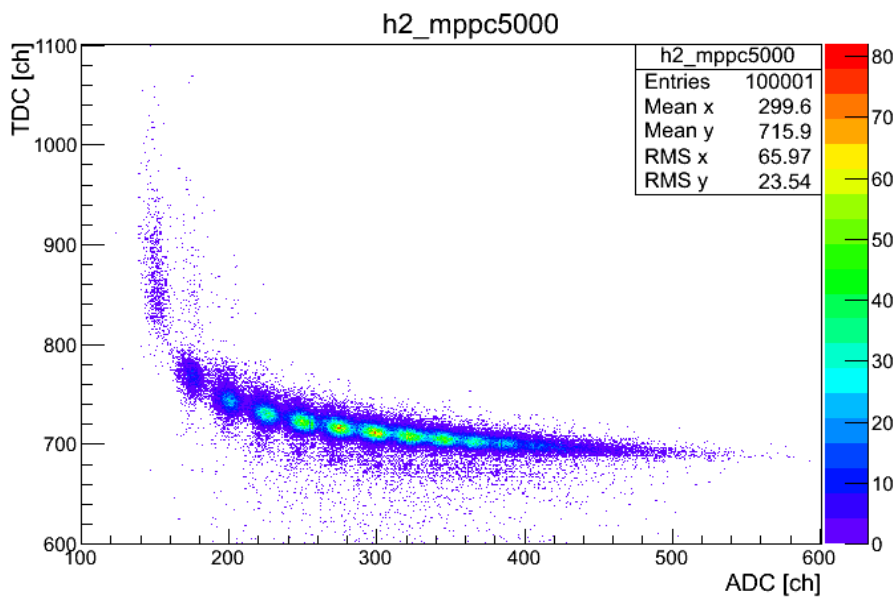


図 3.18: TDC と ADC の二次元ヒストグラム

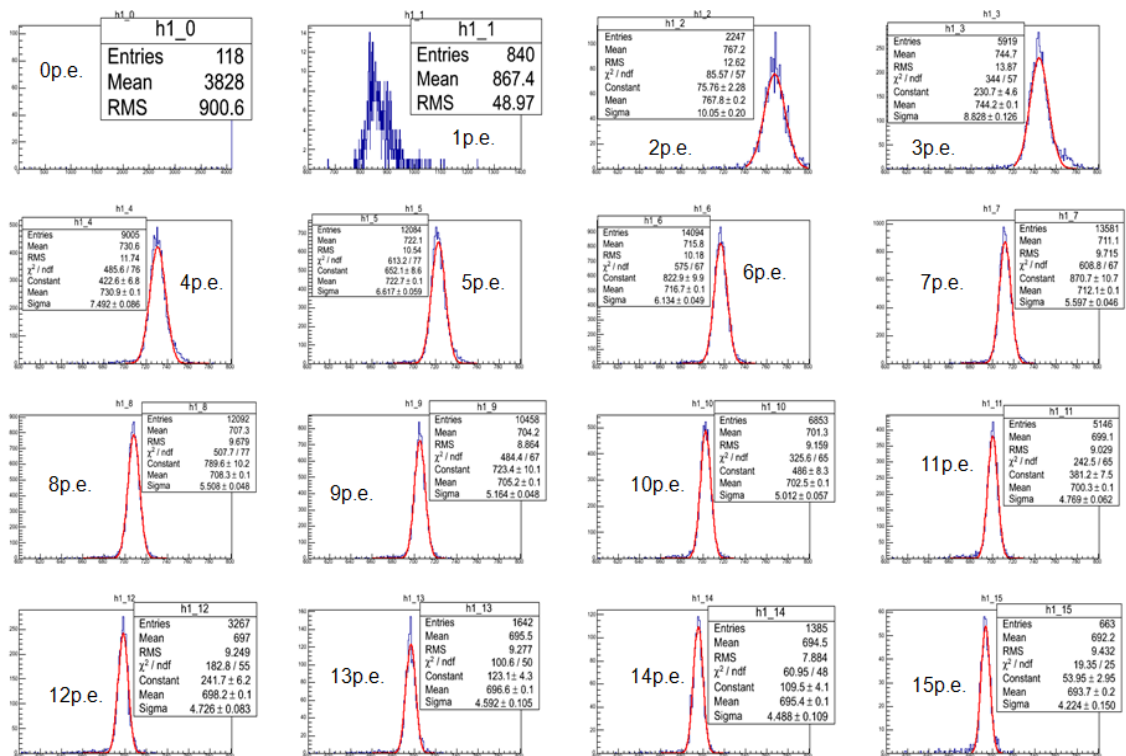


図 3.19: p.e. 毎の TDC 分布

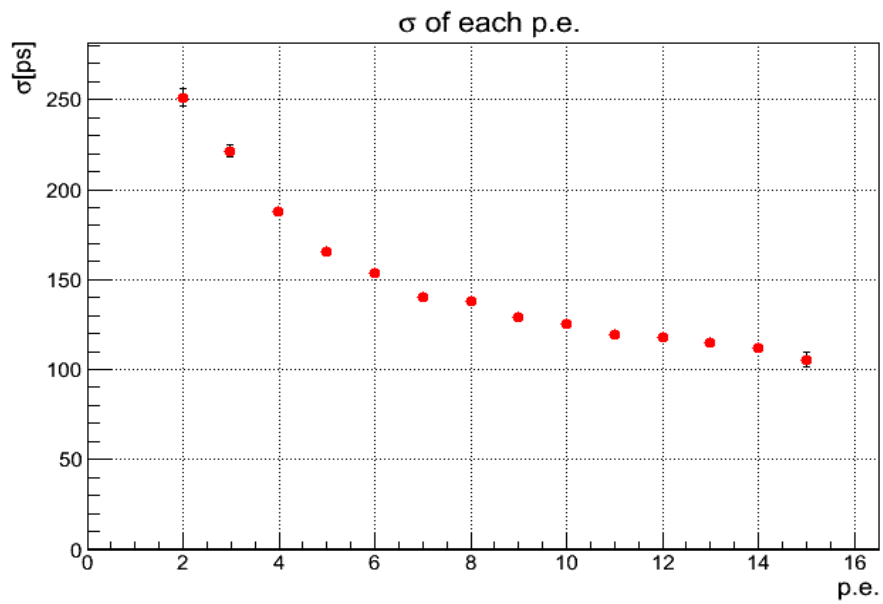


図 3.20: p.e. 毎の時間分解能

p.e. が大きいほど時間分解能は良くなり、100ps 位に収束している。

第4章 結論

本研究の目的は、電磁カロリメータへの応用に向けて MPPC の基本的性質を知る事である。CS-ADC 分布上で光電子数に応じたピークの分離に成功し、検出光子数も予想される Poisson 分布に従うという結果が得られた。増幅率が印加電圧に対して線形である事、また温度を下げると降伏電圧が小さくなり、低温では低い印加電圧でも光子検出が可能であると言える。ピーク分解能は、温度を下げると小さくなり、1p.e. ピークの分解能の最長値は 25℃では 0.21p.e.、-25℃では 0.1p.e. となった。また、入射光子数に対する検出光子数の応答の線形性も 70p.e. までは保たれる事を確認した。時間分解能については、光子数が多い方が時間分解が良くなる傾向があり、現段階では 100ps に収束している。アフターパルスとクロストークを起こす確率は温度の低下にともない、増加する事も確認した。今後の展望としては、大光量での応答線形性の測定である。これは電磁カロリメータへの応用には欠かす事の出来ない測定である。また、PWO 結晶の発光の時間構造を考慮して応答線形性を測定しなければならない。最終的なアップグレードの目的は高いエネルギー分解能のダイナミックレンジを保持したままで、高時間分解能を付加する事である。そのため、MPPC を使って現在の APD と同様のエネルギー分解能とダイナミックレンジを実現できるかどうか重要である。

付録A Modules

A.1 NIM

NIMとは、Nuclear Instruments Modulesの略称で、放射線測定器標準規格 TID-20983の事をNIM規格という。原子核・素粒子・宇宙線測定実験等で使用される高速エレクトロニクス規格で、10nsのオーダーで信号を取り扱う事が出来る。NIMで作られるパルスは日本国内外、メーカーを問わず、論理レベル「0」が0mV、「1」が-780mVと決まっている。以下に使用したNIMモジュールの説明を述べる。

FAN IN/FAN OUT

2つ以上の入力信号を足し合わせる or 回路のモジュール。後述の COINCIDENCE とは異なり、信号の時間幅は入力信号に依存する。 \overline{OUT} の出力の異なる LINEAR タイプと LOGIC タイプがある。LOGIC タイプは「0」と「1」をひっくり返すだけだが、LINEAR タイプは「0」は0mVになり、「1」は+780mVとなる。1つの入力信号を複数に分けるためにも使用される。

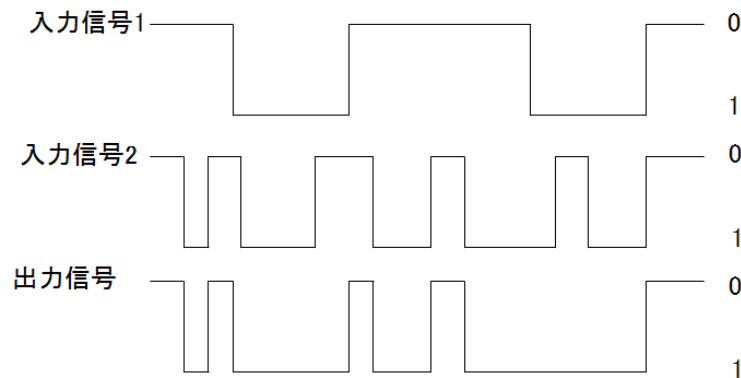


図 A.1: FAN IN/FAN OUT の入力と出力の関係 [14]

GATE GENERATOR

入力した NIM 信号に対して、設定した遅延時間の後に設定した時間幅の NIM 信号を出力するモジュールである。

COINCIDENCE

複数の NIM 信号を論理的に足し合わせるモジュールである。入力したそれぞれの NIM 信号の「1」が重なっている場合に新たな NIM 信号を出力する。また、重なっている部分だけの時間幅か、それとは別の時間幅を設定する事も出来る。

DISCRIMINATOR

MPPC や PMT から出力されたアナログ信号の電圧が設定した閾値 (threshold) を越えた場合にある時間幅の NIM 信号を出力するモジュールである。

DELAY

NIM 信号を遅延させるためのモジュール。COINCIDENCE を用いる時などに 2 つの NIM 信号のタイミングを合わせるために使用する。

VISUAL SCALER

入力された NIM 信号の回数を数えるモジュール。前面にある表示板に回数を表示される。

A.2 CAMAC

CAMAC は Computer Automated Measurement And Control standard の略称である。NIM を使って信号のタイミングを合わせて、論理回路を構築した後に CAMAC を使ってデータを取る。

CS-ADC(RPC-022,REPIC)

CS-ADC は Charge Sensitive Analogue to Digital Converter の略称で、ゲートの時間幅に入っているアナログ信号の電荷量を測定するためのモジュールである。しかし、測定されるアナログ信号は負でなければならない。0pC から-1000pC まで測定可能で、チャンネル当たりの変換係数は 0.25pC/ch である。またチャンネルにはペDESTAL と呼ばれるオフセットが加わっており、電荷量を知るにはペDESTAL との差をとらなければならない。

TDC(RPC-061,RPC-060,REPIC)

TDCはTime to Digital Converterの略称で、スタート端子にNIM信号が入力されてからストップ端子にNIM信号が入力されるまでの時間差を測定するモジュールである。ダイナミックレンジはメーカー、型番によって異なり、本実験で使用したのは、118ns、236ns、2 μ sまでの3種類のモジュールで、チャンネル当たりの変換係数は25ps/ch、35ps/ch、0.48ns/chである。

参考文献

- [1] 素粒子物理学の基礎 長島順清 著 朝倉図書
- [2] 原子核物理学 永江知文・永宮正治 共著 裳華房
- [3] Heidelberg University 資料
http://www.physi.uni-heidelberg.de/~herrmann/VDET06/Notes/Notes_3.pdf
- [4] 核子対あたり重心系エネルギー 2.76TeV の鉛鉛衝突における ALICE 実験 PHOS 検出器の中性パイ中間子検出効率 平成 22 年度修士論文 広島大学 坂口拓明
- [5] ALICE JAPAN ホームページ <http://alice-j.org/lhc.html>
- [6] ALICE JAPAN ホームページ <http://alice-j.org/alice.html>
- [7] 浜松ホトニクス社ホームページ <http://jp.hamamatsu.com>
- [8] REVIEW OF PARTICLE PHYSICS Volume86 Published by AMERICAN PHYSICAL SOCIETY
- [9] 素粒子・原子核物理入門 改訂新版 B. ポッフ/K. リーツ/C. ショルツ/F. サッチャ 著
柴田利明 訳 シュプリンガー・ジャパン株式会社
- [10] 原子物理入門 鷲見義雄 著 裳華房
- [11] 新型 MPPC の性能評価 信州大学 小林秋人
- [12] MPPC を用いた次世代 PET 装置の基礎研究 平成 21 年度修士論文 信州大学 山崎真
- [13] 第 4 回次世代光センサーに関するワークショップ兼 EASIROC 研究会 2012 年 12 月 25,26 日 大阪大学開催
- [14] NIM 資料 http://be.nucl.ap.titech.ac.jp/~koba/mem/module_sum.html

謝辞

本実験を行うにあたって、杉立先生には実験の考え方などをご指導して頂きました。オプティクスを使った新たな実験のセットアップについて考えた経験は自身の糧になっています。2012年12月25,26日に大阪大学で開催されたワークショップに参加する機会も与えて下さり、大変感謝しています。「なぜこんな結果が得られたのか、また、その結果から次の測定ではどうなると予想されるのか」を考える事の重要性も学び、とても感動しました。中宮義英さんには、夏休み中には朝から議論して頂きMPPCの理解が深まりました。同じ部屋の渡辺大輔さんには、基礎的な知識から、検出器についてなど幅広く丁寧に教えて頂きました。また、うるさく騒いすみませんでした。さらに、大久保翼さんにはC++について教えて頂き、佐藤大地さんからは回路の組み方を学びました。志垣先生には前期のラボ・エクササイズにおいて、ネットワーク構築について様々な助言を頂きました。それ以外にも、昼食や小休憩の時に、興味深い物理解析に関して聞かせて頂き、とても有意義でした。三好先生には、前期のセミナーで大変お世話になり、原子核物理学の基礎知識を学びました。本間先生には光検出器を扱う上での注意点や評価方法を教えて頂きました。他にも研究室の先輩にも相談にのって頂き大変感謝しています。同期の方々には一緒にラボ・エクササイズでお世話になり感謝しています。皆さま大変ありがとうございました。