

平成 25 年度 卒業論文

光半導体素子 MPPC(14.4k 及び 90k ピクセル) の  
基礎特性と応答線形性の評価

広島大学理学部物理科学科

クォーク物理学研究室

B105704

垂永 和也

2014 年 2 月 10 日

指導教官 杉立 徹 教授

主査 志垣 賢太 准教授

副査 石川 健一 准教授

## 概要

MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) は浜松ホトニクス社が開発している光半導体素子で、複数のガイガーモードの APD(Avalanche Photodiode) ピクセルを二次元に並列接続した構造を持っている。優れた検出効率、低電圧で動作 (80V 以下)、高い増幅率 ( $10^5 \sim 10^6$ )、磁場の影響を受けないという特徴があり、今後、高エネルギー分野への応用が期待されている。

本研究の目的は APD ピクセル数が 14.4k 及び 90k の MPPC を測定し、その性質を調査・比較することである。基礎特性を測定した結果、14.4k ピクセルは増幅率で 4 倍、電荷分解能で 2 倍、平均検出光子数で 3 倍、90k ピクセルよりも優れているという結果が得られた。MPPC の特性上、入射光子数が増えると、入射光子数に対する MPPC の応答の線形性が失われることが知られている。14.4k 及び 90k ピクセルの MPPC を用いて、ピクセル数の違いによる応答線形性の変化を測定した。この結果、90k ピクセルでは 14.4k ピクセルに比べて応答線形性が保たれる範囲が約 10 倍広がっていることが分かった。PWO(タングステン酸鉛結晶) と MPPC を組み合わせた場合、14.4k ピクセルでは約 0.4GeV 以下の光子しか観測できないが 90k ピクセルでは約 4GeV の光子まで観測できると予想される。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>5</b>
1.1	高エネルギー原子核衝突実験 . . . . .	5
1.2	ALICE 実験 . . . . .	5
1.3	PHOS . . . . .	6
1.4	PWO . . . . .	7
1.5	APD . . . . .	7
1.6	MPPC . . . . .	8
1.6.1	動作原理 . . . . .	8
1.6.2	ダークカウント . . . . .	9
1.6.3	クロストーク . . . . .	10
1.6.4	アフターパルス . . . . .	10
1.7	NIM . . . . .	11
1.7.1	Discriminator . . . . .	11
1.7.2	Fan in/Fan out . . . . .	11
1.7.3	Gate Generator . . . . .	11
1.8	CAMAC . . . . .	11
1.8.1	クレートコントローラ . . . . .	11
1.8.2	CSADC . . . . .	11
1.9	研究目的 . . . . .	12
<b>第 2 章</b>	<b>実験</b>	<b>13</b>
2.1	測定した MPPC . . . . .	13
2.2	基礎特性の測定 . . . . .	13
2.2.1	増幅率 . . . . .	14
2.2.2	電荷分解能 . . . . .	15
2.2.3	平均検出光子数 . . . . .	16
2.2.4	ダークカウントレート . . . . .	17
2.2.5	クロストークとアフターパルス . . . . .	17
2.3	応答線形性の測定 . . . . .	18
<b>第 3 章</b>	<b>結果</b>	<b>20</b>
3.1	基礎特性 . . . . .	20

3.1.1	増幅率 . . . . .	20
3.1.2	電荷分解能 . . . . .	21
3.1.3	平均検出光子数 . . . . .	23
3.1.4	ダークカウントレート . . . . .	23
3.1.5	クロストークとアフターパルス . . . . .	25
3.2	応答線形性 . . . . .	25
第 4 章	結論	28
謝辞		29

# 目 次

1.1	高エネルギー原子核衝突の時間発展 [1]	5
1.2	ALICE 実験の検出器 [1]	6
1.3	PHOS の外観 [1]	6
1.4	PWO[1]	7
1.5	ツェナー降伏の概念図 [3]	8
1.6	電子雪崩降伏の概念図 [3]	8
1.7	MPPC[4]	9
1.8	MPPC の出力パルス	9
1.9	入射光が無い時の MPPC の電荷量分布	9
1.10	クロストークの概念図 [3]	10
1.11	アフターパルスの概念図 [3]	10
2.1	測定のセットアップ	13
2.2	恒温槽内の様子	14
2.3	入射光があるときの MPPC の出力電荷分布	15
2.4	電荷分解能の概念図	15
2.5	各 p.e. の収量とポアソン分布	16
2.6	$N_{in} \leq 5 \times 10^6$ のときの理想応答曲線	19
3.1	増幅率の温度・電圧依存性	20
3.2	増幅率の $\Delta V$ 依存性	21
3.3	0p.e. の電荷分解能の温度・電圧依存性	22
3.4	1p.e. の電荷分解能の温度・電圧依存性	22
3.5	2p.e. の電荷分解能の温度・電圧依存性	23
3.6	平均検出光子数の温度・電圧依存性	24
3.7	ダークカウントの温度・電圧依存性	24
3.8	クロストークとアフターパルスの発生確率の温度・電圧依存性	25
3.9	14.4k ピクセルの結果を $y = p_0 \times x$ でフィッティングした様子	26
3.10	90k ピクセルの結果を $y = p_0 \times x$ でフィッティングした様子	26
3.11	14.4k および 90k ピクセルの入射光量と検出光子数の応答関係	27

# 表 目 次

1.1 無機シンチレータとその性質 . . . . .	7
2.1 測定した MPPC[4] . . . . .	13

# 第1章 序論

## 1.1 高エネルギー原子核衝突実験

クォークやグルーオンは通常の温度や密度ではハドロン中に閉じ込められており、単体で取り出すことが出来ない。しかし、非常に高温もしくは高密度な状態ではその閉じ込めが破れ、解放されたクォークやグルーオンが自由に動くことができるようになる。このような状態をクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 相という。QGP を実験室上で人工的に再現するために有効な方法が高エネルギー原子核衝突実験である。高エネルギー原子核衝突実験は、原子核同士を加速し高エネルギーで衝突させることで、QGP 生成に十分な高温状態を得ることができる。

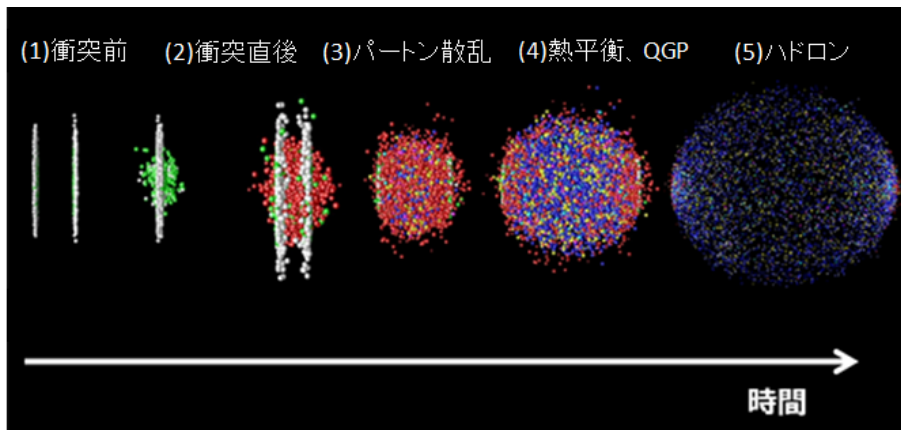


図 1.1: 高エネルギー原子核衝突の時間発展 [1]

## 1.2 ALICE 実験

ALICE 実験 (A Large Ion Collider Experiment) は、欧州共同原子核研究機構 (CERN) によって建設された世界最大のハドロン衝突型円形加速器 LHC (Large Hadron Collider) を用いて行われている高エネルギー原子核衝突実験である。他の LHC 実験グループと異なり、唯一高エネルギー重イオン衝突実験に特化した実験グループであり、重イオン同士を加速し衝突させることで QGP を生成し、その性質を解明することを目的としている。

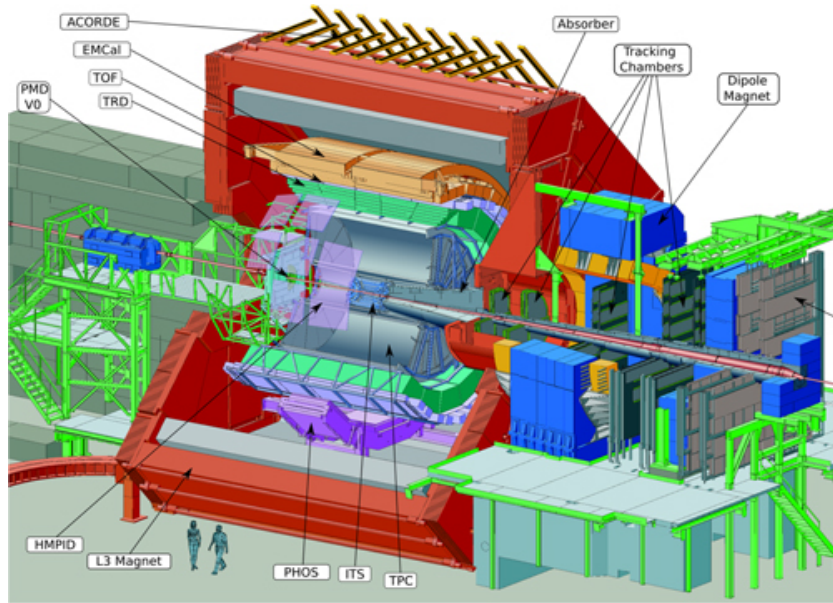


図 1.2: ALICE 実験の検出器 [1]

### 1.3 PHOS

PHOS(PHOTon Spectrometer) は、タングステン酸鉛結晶 (PWO) を用いた電磁カロリメータで、光シグナルの読み出しに APD(Avalanche Photodiode) が使用されている。PHOS は優れた二粒子分解能・エネルギー分解能・位置分解能を有しており、高エネルギー重イオン衝突で生成された多くの光子を高精度で測定できる。



図 1.3: PHOS の外観 [1]



## 1.4 PWO

タンゲステン酸鉛結晶 (PWO) は無機シンチレータの一種であり、他の無機シンチレータと比較して放射長が短く、モリエール半径が小さいという特徴を持っている。放射長とは電子が入射してから、そのエネルギーが $1/e$ になる長さのことであり、モリエール半径とは電磁シャワーの横方向の広がりのことである。PWOはこの2つの特徴によって狭い範囲に電磁シャワーを閉じ込めることができるため、優れた二粒子分解能を実現している。PWOは他の無機シンチレータに比べて発光量が小さいという特徴も持っているが、温度を下げることで発光量を増やすことができる。そのため、現在PHOSは $-25^{\circ}\text{C}$ で稼動している。 $-25^{\circ}\text{C}$ でのPWOの発光量は $24.1\text{p.e./MeV}$ [2]である。表 1.1 に無機シンチレータの性質の比較を示す。

表 1.1: 無機シンチレータとその性質

物質名	密度 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	放射長 [cm]	モリエール半径 [cm]	減衰時間 [ns]	光量 [NaI 比]
PWO	8.28	0.89	2.0	5~15	0.01
NaI	3.67	2.59	4.5	250	1.00
CsI	4.53	1.85	3.8	565	0.40
BGO	7.13	1.12	2.4	300	0.15

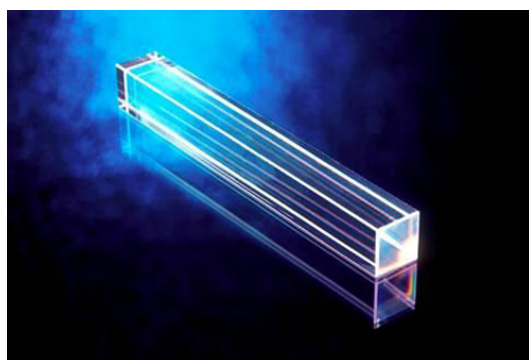


図 1.4: PWO[1]

## 1.5 APD

APDとはAvalanche Photodiodeの略称で、光半導体素子の一種である。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。この領域を空乏層と呼ぶ。空乏層に半導体のバンドギャップ以上のエネルギーを持つ光子が入射すると、内部光電効果により電子-正孔対が生成される。pn接合半導体に印加する逆電圧を大きくしていくと、ある電圧以上になったとき急激に電流が流れ始める。この現象をブレイクダウンと言い、この時の逆電圧の事

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ツェナー効果と電子雪崩がある。

逆電圧が大きくなると空乏層が狭くなり、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型半導体の伝導帯に励起され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-正孔対を生成すると電場によって電子が加速され、非常に大きなエネルギーを持つ。この電子が結晶格子と衝突すると、そのエネルギーによって結晶の結合を切断し新たな電子-正孔対を生成する。この電子-正孔対は電場によって再び加速され、さらに電子-正孔対を生成する。このように電子-正孔対生成が連鎖的に発生し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び、アバランシェ増幅により大電流が発生することを電子雪崩降伏という。アバランシェ増幅を利用して信号を増幅させるフォトダイオードのことをアバランシェフォトダイオード (Avalanche Photodiode) という。

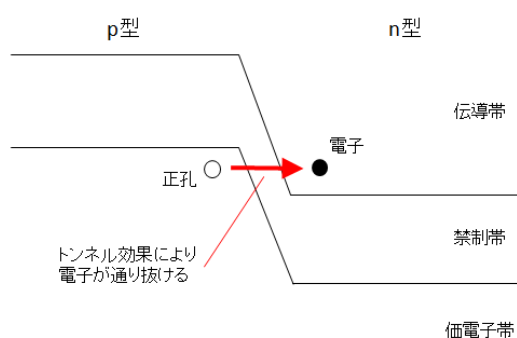


図 1.5: ツェナー降伏の概念図 [3]

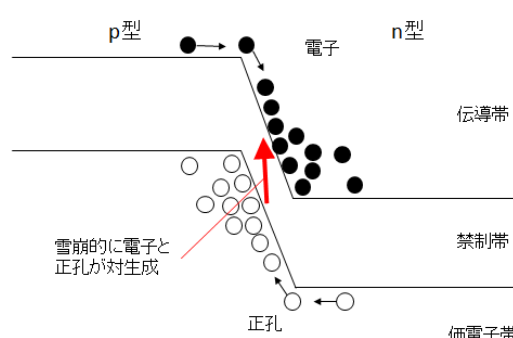


図 1.6: 電子雪崩降伏の概念図 [3]

## 1.6 MPPC

### 1.6.1 動作原理

MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) は、ガイガーモードで動作する APD ピクセルを二次元に並列接続した構造をもち、優れた検出効率、低電圧で動作 (80V 以下)、高い増幅率 ( $10^5 \sim 10^6$ )、磁場の影響を受けないという特徴をもつ光半導体素子である。ガイガーモードとは APD の逆電圧をブレイクダウン電圧以上にして動作させている状態のことで、わずかな光の入射に対しても放電現象が発生するようになる。ガイガーモードでは光子が入射した場合の出力は入射光子数によらず一定になり、光子が入射したかどうかの情報だけが分かる。全ての APD ピクセルは並列接続されているため、それぞれの APD ピクセルの出力の和が MPPC の出力となる。この出力を測定することにより光子数計測を可能にしている。

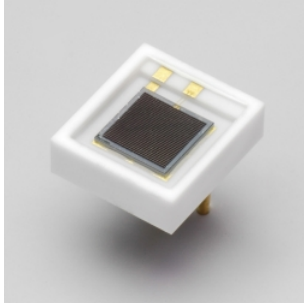


図 1.7: MPPC[4]

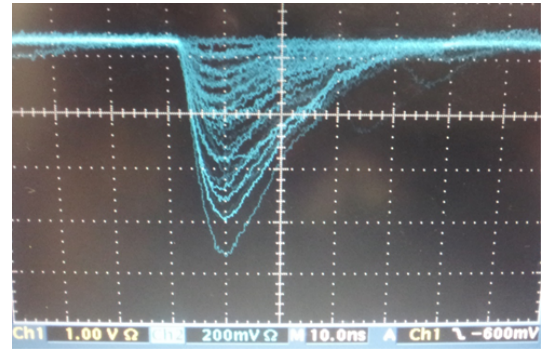


図 1.8: MPPC の出力パルス

### 1.6.2 ダークカウント

ガイガーモードの特性上、入射光子により生成されたキャリアだけでなく、熱的に発生したキャリアも増幅されパルスが発生する。このパルスをダークカウントと呼ぶ。ダークカウントは光子入射によるシグナルと区別することができず、検出光子数を過大評価してしまう原因となる。図 1.9 では、入射光が無いにもかかわらず左端の 0p.e. ピーク以外の光子ピークが見える。これがダークカウントである。p.e. とは photon equivalent の略称で、1p.e. ピークは 1 光子の検出に相当する。

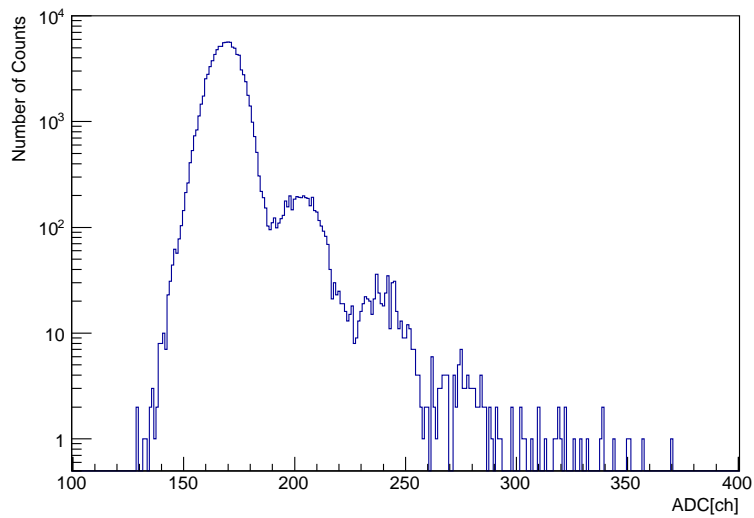


図 1.9: 入射光が無い時の MPPC の電荷量分布

### 1.6.3 クロストーク

MPPCの各APDピクセルにおいて、入射光子により励起されたキャリアがアバランシェ増幅する過程で、入射光子とは別の二次光子を発生させることがある。この二次光子が他のAPDピクセルに入射し検出される現象をクロストークと呼ぶ。クロストークも検出光子数を過大評価してしまう原因になる。

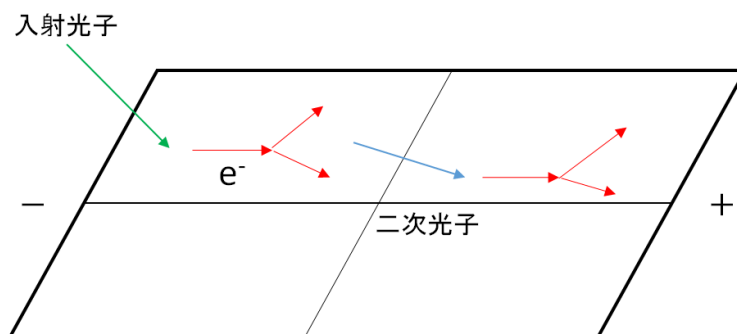


図 1.10: クロストークの概念図 [3]

### 1.6.4 アフターパルス

MPPCのピクセルでアバランシェ増幅する過程でキャリアが格子欠陥などに捕獲されることがある。このキャリアが放出され再びアバランシェ増幅されることでパルスを発生させる現象をアフターパルスと呼ぶ。アフターパルスもダークカウント、クロストークと同じく検出光子数を過大評価してしまう原因となる。温度が低いほどキャリアが格子欠陥に捕獲される確率が高くなりアフターパルスは増加する。

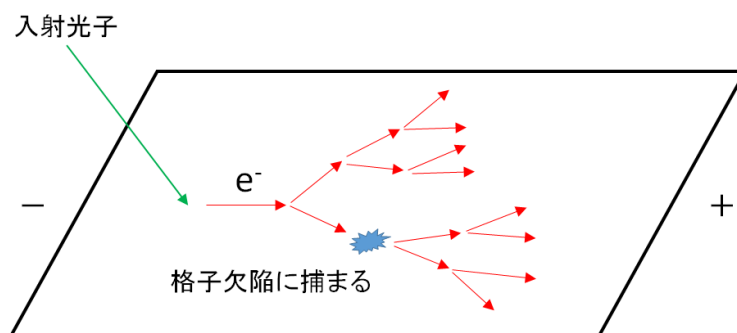


図 1.11: アフターパルスの概念図 [3]

## 1.7 NIM

NIMは Nuclear Instrument Modules の略称で、米国原子力委員会において1966年に制定された「放射線測定モジュール標準規格 TID-20893」に準拠した標準規格。NIM規格に準拠するエレクトロニクスをNIMモジュールと呼び、素粒子・原子核など幅広い分野の実験で使用されている。

### 1.7.1 Discriminator

入力信号が設定した threshold(しきい値)を超えたときに任意の時間幅を持つ信号を出力する。

### 1.7.2 Fan in/Fan out

2つ以上の入力信号を足し合わせる OR 回路。出力信号の時間幅は入力信号の時間幅に依存する。入力信号を反転させて出力したり、1つの入力信号を複数の信号に分けて出力するために使われる。

### 1.7.3 Gate Generator

入力信号に対して、任意の遅延時間と時間幅の信号を出力する。

## 1.8 CAMAC

CAMACは Computer Automated Measurement And Control standard の略称で、1970年代に制定された標準規格。CAMAC規格に準拠するエレクトロニクスをCAMACモジュールと呼び、NIMモジュールと併せて素粒子原子核実験などで使用される。

### 1.8.1 クレートコントローラ

コンピュータと接続し、モジュールからのデータの読み出しや、モジュールへのデータの書き込みなど、モジュールの制御を行う。

### 1.8.2 CSADC

CSADCは Charge Sensitive Analogue to Digital Converter の略称で、任意のゲート信号の時間幅内に入力されたアナログ信号の電荷量を積分しデジタル値に変換する。

## 1.9 研究目的

MPPC は前述した性質上、全ピクセル数以上の光子を同時に検出することはできない。90k ピクセル MPPC では 14.4k ピクセル MPPC と比較して、ピクセル数の増加によるダイナミックレンジの拡大やその他の性能変化が予想される。本研究の目的は、14.4k ピクセルと 90k ピクセルの MPPC について同じ実験セットアップ・解析手法を用いて測定を行い、両者の性能変化を確認・比較し評価することである。また、今後 PHOS のような高エネルギー実験の検出器に MPPC を応用していくためには、入射光子数と検出光子数の関係を理解しなければならない。

## 第2章 実験

### 2.1 測定した MPPC

本実験で測定した MPPC を表 2.1 に示す。

表 2.1: 測定した MPPC[4]

種類	有効面積	ピクセル数
浜松ホトニクス S12572-010C	3mm×3mm	90k
浜松ホトニクス S12572-025C	3mm×3mm	14.4k

### 2.2 基礎特性の測定

MPPC の基礎特性を評価するため、減光フィルターで十分減光された光を MPPC に照射する。光源として浜松ホトニクス社製のピコ秒パルスレーザーを用いた。CSADC で MPPC の出力電荷量をデジタル値として記録する。図 2.1 にそのセットアップを示す。恒温槽内の温度を 25°C、10°C、0°C、-10°C、-25°C と変更し測定を行った。

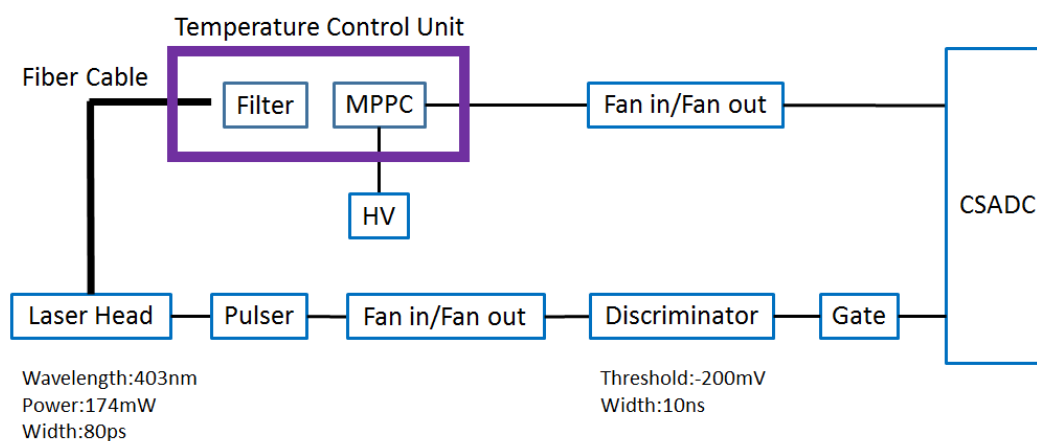


図 2.1: 測定のセットアップ

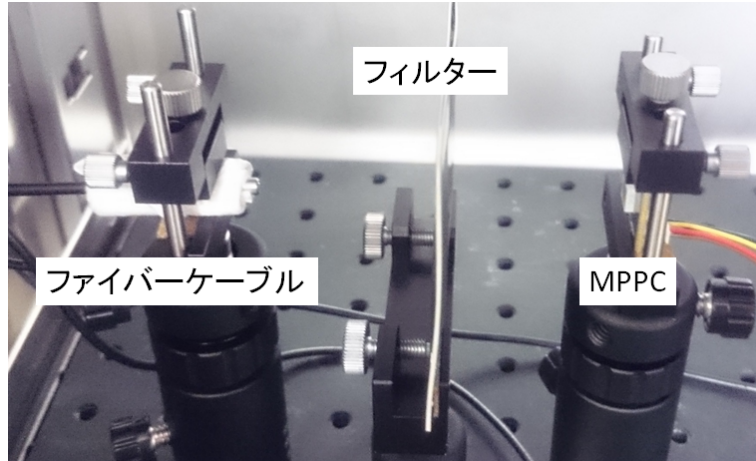


図 2.2: 恒温槽内の様子

### 2.2.1 増幅率

MPPC の出力電荷量分布は図 2.3 のようになる。図 2.3 に見られるピークは左端から順に 0p.e.、1p.e.、2p.e.、…を示している。赤の曲線は各ピークをガウス関数でフィッティングしたもので、その中心値をそれぞれの p.e. に対してプロットすると、その傾きからピーク間の平均間隔  $d$  が分かる。この平均間隔  $d$  は 1 光子を検出したときの出力電荷量にあたるので、増幅率は式 2.1 で表される。

$$G = \frac{Q}{e} = \frac{d \times r}{e} = \frac{C \times (V_{OP} - V_{BR})}{e} \quad (2.1)$$

$G$ :増幅率

$e$ :素電荷  $1.602 \times 10^{-19}$ [C]

$Q$ :出力電荷量 [C]

$d$ :ピーク間の平均間隔 [ch]

$r$ :CSADC の変換係数 0.25[pC/ch]

$C$ :1 ピクセルの静電容量 [F]

$V_{OP}$ :動作電圧 [V]

$V_{BR}$ :ブレイクダウン電圧 [V]

ピーク間の平均間隔が分かれば、増幅率  $G$  だけでなく 1 ピクセルの静電容量  $C$  とブレイクダウン電圧  $V_{BR}$  を求めることが出来る。ここで、新しく  $\Delta V$  という動作電圧とブレイクダウン電圧の差を表す量を式 2.2 で定義する。

$$\Delta V = V_{OP} - V_{BR} \quad (2.2)$$

ブレイクダウン電圧は温度で変化するため、全ての温度で動作電圧の基準を統一するために  $\Delta V$  を用いる。



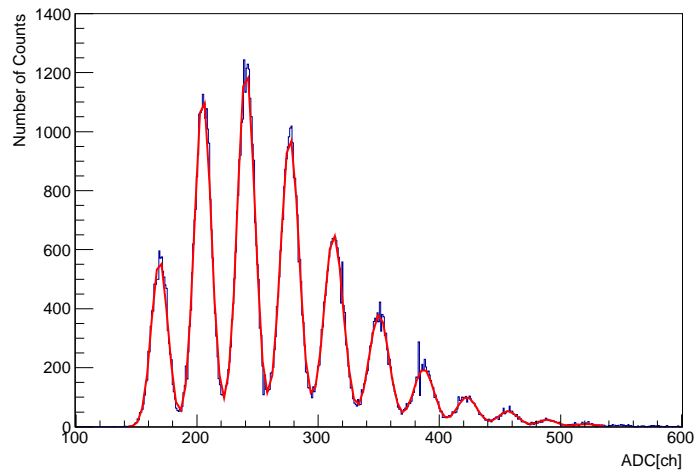


図 2.3: 入射光があるときの MPPC の出力電荷分布

### 2.2.2 電荷分解能

電荷分解能を式 2.3 で定義する。

$$R = \frac{\sigma}{d} \tag{2.3}$$

$R$ : 電荷分解能

$\sigma$ : 各ピークの幅 [ch]

電荷分解能  $R$  が小さいほど、各ピークを良く分離できている。

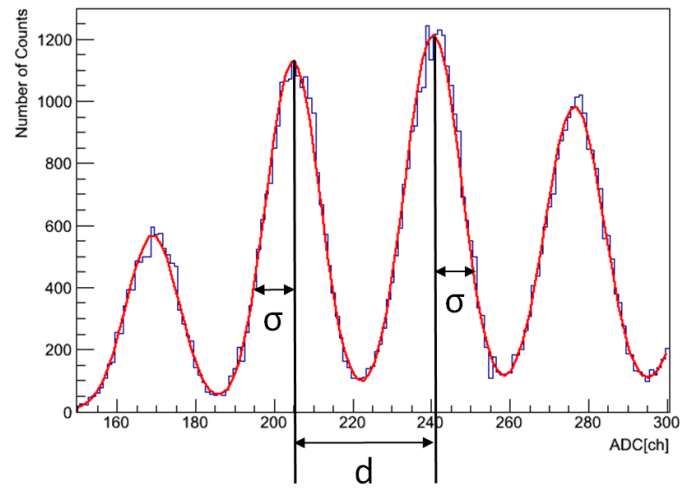


図 2.4: 電荷分解能の概念図

### 2.2.3 平均検出光子数

MPPC への入射光が十分に減光されているとき、MPPC の検出光子数の分布は理想的にはポアソン分布に従う。しかし、1p.e. 以上のイベントにはクロストーク、アフターパルスの影響が含まれるため、実際の分布は理想的なポアソン分布からずれた分布 (図 2.5) になる。クロストークとアフターパルスは励起されたキャリアがアバランシェ増幅される過程で発生する現象なので、0p.e. のイベントにはクロストークとアフターパルスの影響が含まれない。そのため、0p.e. のイベントからダークカウントの影響を取り除くことで平均検出光子数を求めることができる。

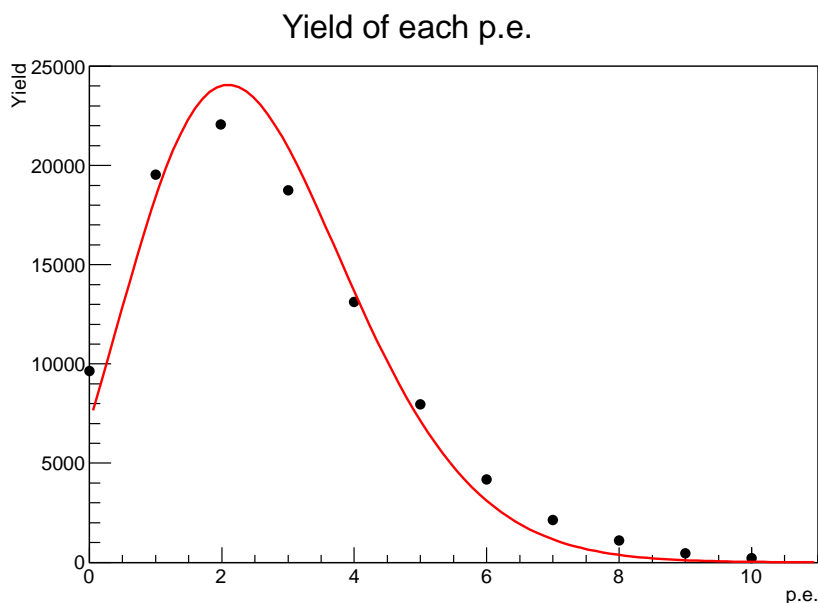


図 2.5: 各 p.e. の収量とポアソン分布  
赤の曲線はデータ点 (黒点) をポアソン分布でフィッティングしたもの。  
実際に測定される収量分布はポアソン分布からずれている。

ポアソン分布は式 2.4 で定義される。

$$P(k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \quad (2.4)$$

$\lambda$ : 平均検出光子数

$k$ : 検出光子数

式 2.4 で  $k = 0$  のとき、ダークカウントの影響を補正すると式 2.5 のようになる。

$$P(0) = e^{-\lambda} = \frac{\left(\frac{N_{0p.e.}}{N_{total}}\right)}{\left(\frac{N_{0p.e.}}{N_{dark}^{total}}\right)} \quad (2.5)$$

$N_{0p.e.}$ : レーザー ON 時の 0p.e. イベント数  
 $N_{total}$ : レーザー ON 時の総イベント数  
 $N_{0p.e.}^{dark}$ : レーザー OFF 時の 0p.e. イベント数  
 $N_{total}^{dark}$ : レーザー OFF 時の総イベント数

式 2.5 から、平均検出光子数  $\lambda$  は式 2.6 のようになる。

$$\lambda = -\ln\left(\frac{\frac{N_{0p.e.}}{N_{total}}}{\frac{N_{0p.e.}^{dark}}{N_{total}^{dark}}}\right) = -\ln\left(\frac{N_{0p.e.}}{N_{total}}\right) + \ln\left(\frac{N_{0p.e.}^{dark}}{N_{total}^{dark}}\right) \quad (2.6)$$

## 2.2.4 ダークカウントレート

光を照射していないときの MPCC の電荷量分布から、式 2.7 を用いてダークカウントレートを計算する。

$$R_{DC} = \frac{N_{total}^{dark} - N_{0p.e.}^{dark}}{N_{trigger} \times W_{gate}} \quad (2.7)$$

$R_{DC}$ : ダークカウントレート [MHz]

$N_{trigger}$ : トリガーをかけた回数

$W_{gate}$ : ADC のゲート幅 [ns]

## 2.2.5 クロストークとアフターパルス

前述したように、検出光子数は理想的にはポアソン分布に従うが、クロストークとアフターパルスが 1p.e. 以上のイベントに影響し検出光子数を過大評価させる。そのため、クロストークとアフターパルスが発生すると 1p.e. のイベント数は減少してしまう。そのため、クロストークとアフターパルスの影響が含まれない 0p.e. のイベントとポアソン分布から 1p.e. のイベントの検出確率を計算する。ダークカウントは光子入射によるシグナルと区別できないため、ここではダークカウントも光子入射によるシグナルとして扱う。

$$P_{meas}(0) = \frac{N_{0p.e.}}{N_{total}} \quad (2.8)$$

$$P_{meas}(1) = \frac{N_{1p.e.}}{N_{total}} \quad (2.9)$$

$$P_{cal}(1) = e^{-\lambda} \lambda = -P_{meas}(0) \ln P_{meas}(0) \quad (2.10)$$

$P_{meas}(0)$ : 測定から求めた 0p.e. の確率

$P_{meas}(1)$ : 測定から求めた 1p.e. の確率

$P_{cal}(1)$ :  $P_{meas}(0)$  から期待される確率

$P_{cal}(1)$  と  $P_{meas}(1)$  の差はクロストークとアフターパルスの影響によって減少したイベント数に相当する。そのため、クロストークとアフターパルスが起きる確率  $P_{CTAP}$  は式 2.11 のようになる。なお、これからはクロストークとアフターパルスがそれぞれ独立に発生する確率を求めることはできない。

$$P_{CTAP} = \frac{P_{cal}(1) - P_{meas}(1)}{P_{cal}(1)} \quad (2.11)$$

## 2.3 応答線形性の測定

基礎特性の測定と同じセットアップ (図 2.1) を用いて応答線形性の測定を行った。減光フィルターの減衰率を変えることで MPPC に照射する光量を調整しながら、CSADC を用いて出力電荷量の変化を記録した。この出力電荷量を、1 光子を検出したときに相当する電荷量で割ることで検出光子数を見積もる。

MPPC の各ピクセルは光子が入射したかどうかの情報しか持っていない。そのため、ピクセル数に対して、入射光子数が多くなると、入射光子数と検出光子数の線形性が低下する。入射光子数と検出光子数の関係を表す曲線を応答曲線と呼ばれ、式 2.12 で表される。しかし、式 2.12 にはダークカウント、クロストーク、アフターパルスの影響や、MPPC の各ピクセルの回復時間の影響などは含まれていない。

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

$N_{fired}$ : 励起ピクセル数 (検出光子数)

$N_{pixel}$ : 全ピクセル数

$N_{in}$ : 入射光子数

$\epsilon$ : 検出効率

図 2.6 に 14.4k および 90k ピクセルの MPPC の理想応答曲線を示す。この理想応答曲線において、14.4k ピクセルでは全ピクセル数  $N_{pixel}$  を 14400、検出効率を 35% [6] とし、90k ピクセルでは全ピクセル数  $N_{pixel}$  を 90000、検出効率を 10% [5] としている。

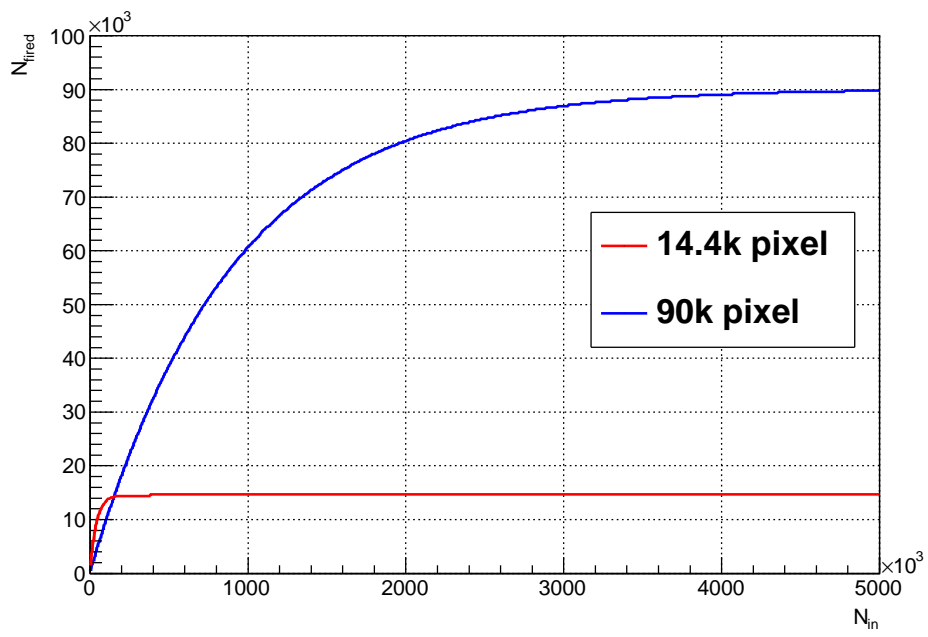


図 2.6:  $N_{in} \leq 5 \times 10^6$  のときの理想応答曲線

# 第3章 結果

## 3.1 基礎特性

### 3.1.1 増幅率

図 3.1 に増幅率の温度依存性と電圧依存性を示す。図 3.1 から分かるように動作電圧が高くなるほど増幅率は線形的に大きくなる。また、温度が低いほどある電圧における増幅率が大きくなる。図 3.2 に横軸に  $\Delta V$  を取った結果を示す。図 3.2 から増幅率の動作電圧に対する傾きは温度に依存せず  $\Delta V$  に比例することが分かる。14.4k 及び 90k ピクセルの増幅率を比較すると、14.4k ピクセルのほうが 90k ピクセルよりもその傾きが約 4 倍大きくなる。つまり、同じ増幅率を得るには 90k ピクセルは 14.4k ピクセルよりも 4 倍大きい  $\Delta V$  が必要になる。

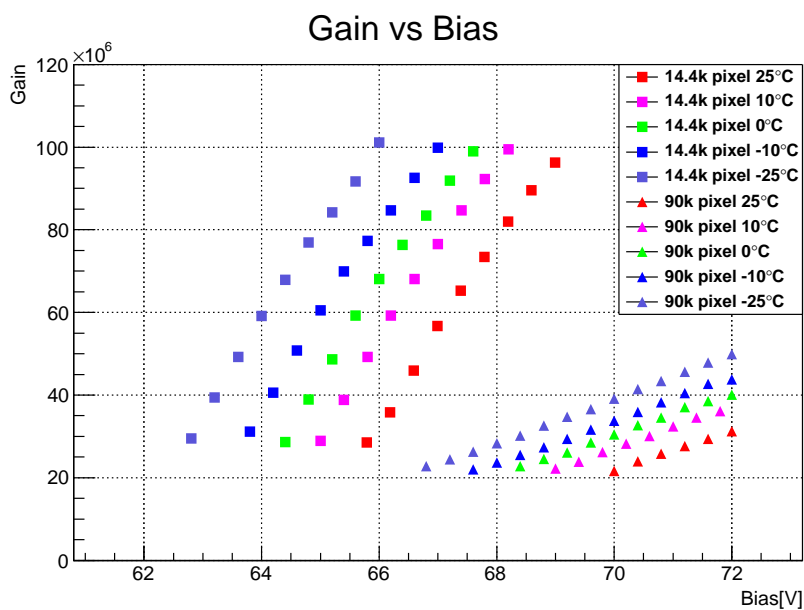


図 3.1: 増幅率の温度・電圧依存性

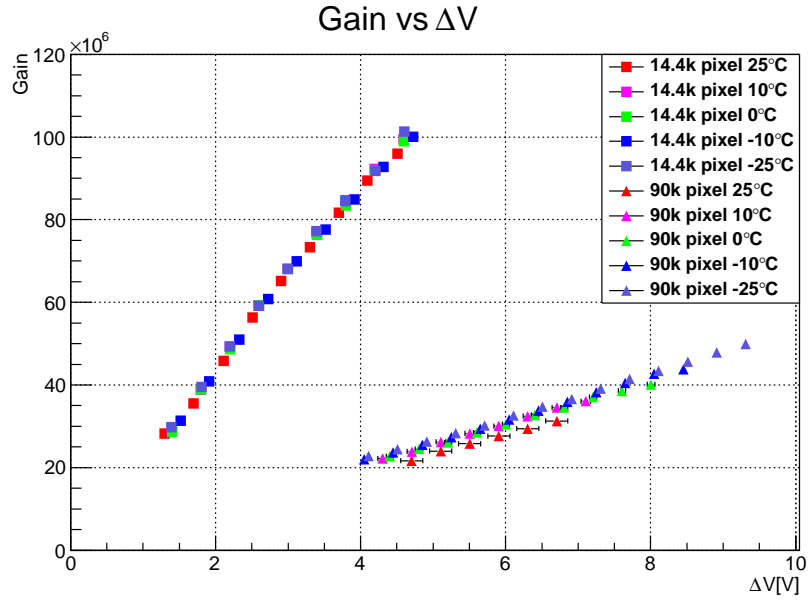


図 3.2: 増幅率の  $\Delta V$  依存性

### 3.1.2 電荷分解能

図 3.3 に 0p.e. の、図 3.4 に 1p.e. の、図 3.5 に 2p.e. の電荷分解能の温度依存性と電圧依存性を示す。3つの p.e. の全てで電荷分解能はある電圧で極小値を持つ。また、温度が下がるほど電荷分解能は小さくなり、極小値となる  $\Delta V$  は大きくなる。14.4k および 90k ピクセルの電荷分解能を比較すると、14.4k ピクセルのほうが 90k ピクセルよりも極小値が約 0.5 倍小さく、よりピークを分離できている。

### 0p.e. Charge Resolution

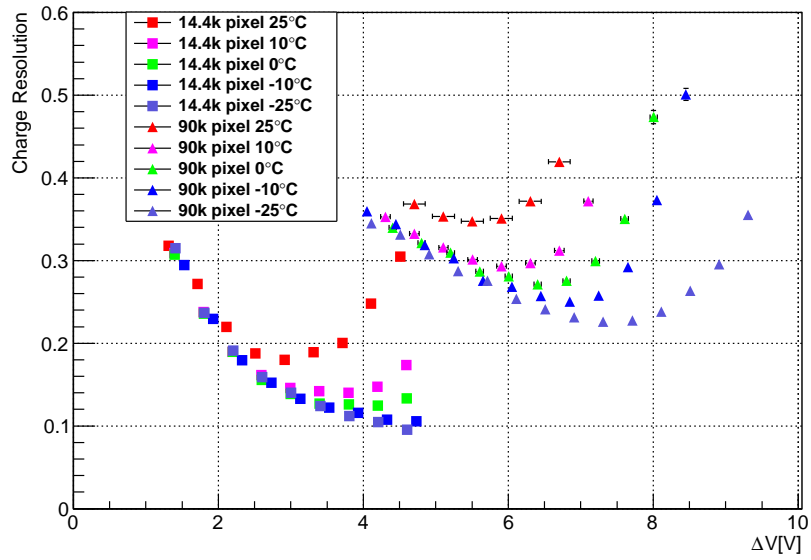


図 3.3: 0p.e. の電荷分解能の温度・電圧依存性

### 1p.e. Charge Resolution

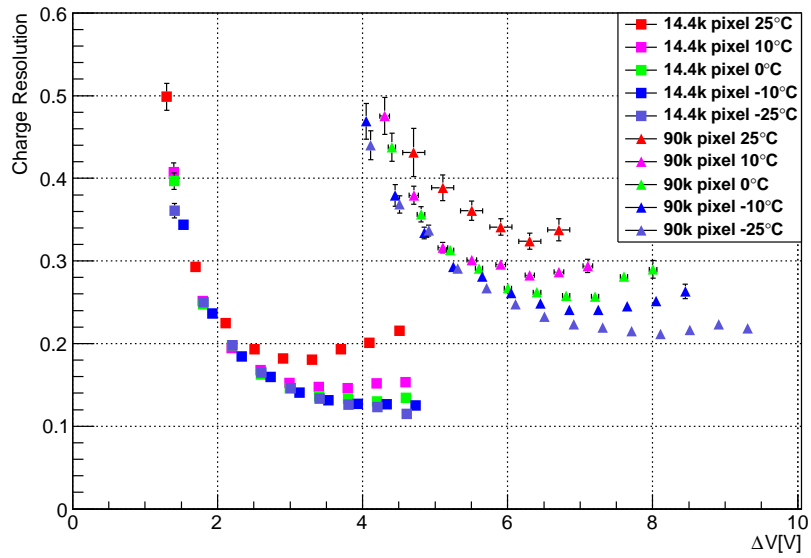


図 3.4: 1p.e. の電荷分解能の温度・電圧依存性



## 2p.e. Charge Resolution

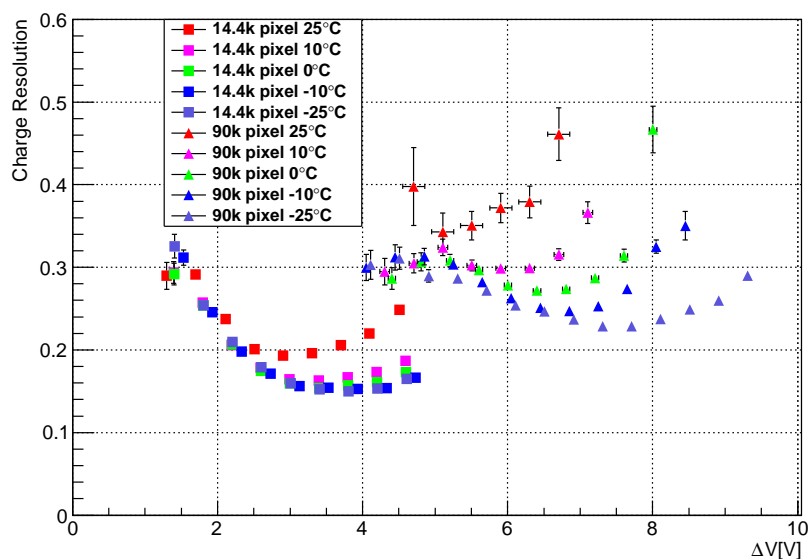


図 3.5: 2p.e. の電荷分解能の温度・電圧依存性

### 3.1.3 平均検出光子数

図 3.6 に平均検出光子数の温度依存性と電圧依存性を示す。平均検出光子数は電圧が高くなるほど増加する。また、温度を下げるほど平均検出光子数は減少する。これは温度が低いほど励起が起きにくいからだと考えられる。この結果は 14.4k 及び 90k ピクセルの MPPC の相対的な検出効率を表している。14.4k 及び 90k ピクセルの検出効率を比較すると、14.4k ピクセルのほうが 90k ピクセルより 3 倍高い。

### 3.1.4 ダークカウントレート

図 3.7 にダークカウントレートの温度依存性と電圧依存性を示す。ダークカウントは電圧を高くするほど増え、温度が低いほど小さくなる。これは温度が低くなるほど熱的ノイズも減少するからだと考えられる。14.4k 及び 90k ピクセルのダークカウントレートを比較すると、14.4k ピクセルに比べ 90k ピクセルのほうが同温度でのダークカウントは多いことが分かる。

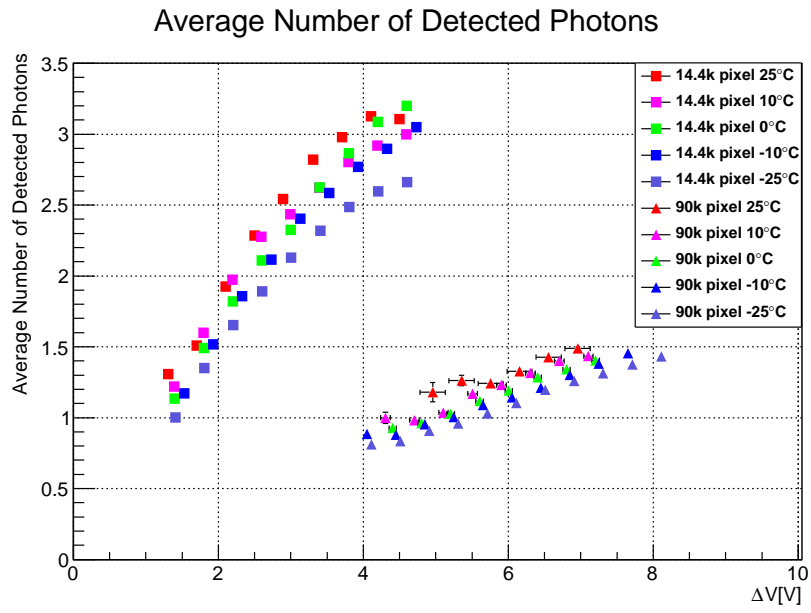


図 3.6: 平均検出光子数の温度・電圧依存性

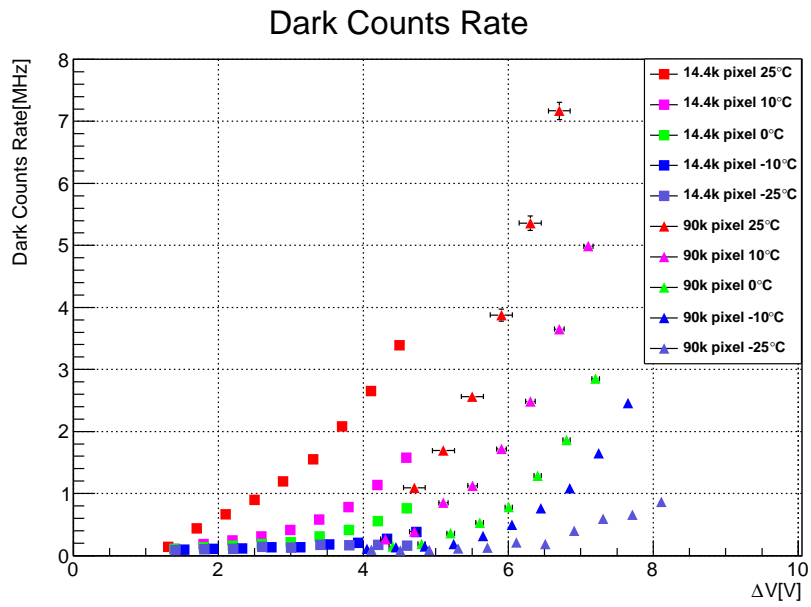


図 3.7: ダークカウントの温度・電圧依存性

### 3.1.5 クロストークとアフターパルス

図 3.8 にクロストークとアフターパルスの発生確率の温度依存性と電圧依存性を示す。ΔV が大きくなるほどクロストークやアフターパルスの確率は高くなる。また、この確率の温度依存性は小さいことが分かった。アフターパルスは温度が低いほど増加することが知られているため、アフターパルスの発生確率はクロストークの発生確率に比べて低く、式 2.11 から求めた確率の主要要素はクロストークだと考えられる。14.4k 及び 90k ピクセルのクロストークとアフターパルスの発生確率を比較すると、確率の変化の仕方に違いが見られないため、クロストークとアフターパルスの発生確率はピクセル数によらないと考えられる。

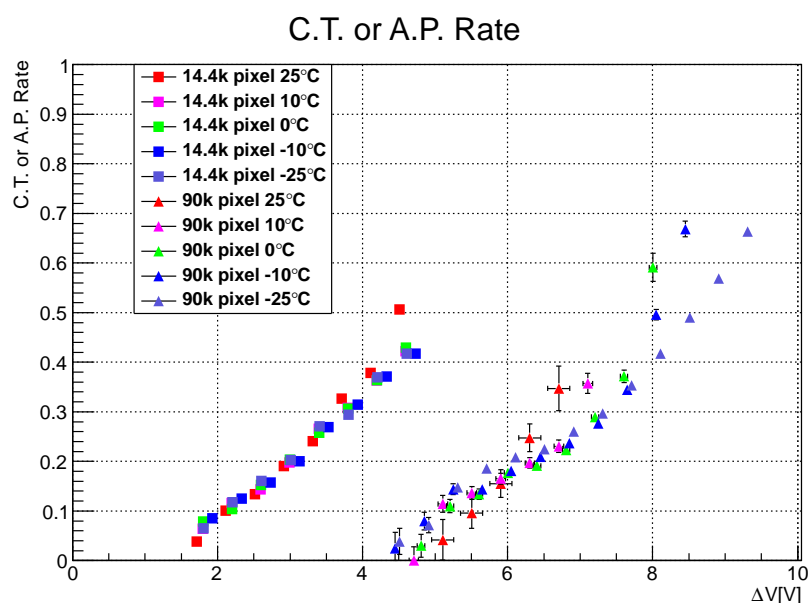


図 3.8: クロストークとアフターパルスの発生確率の温度・電圧依存性

## 3.2 応答線形性

今回測定した MPPC の真の検出効率はまだ分かっていない。しかし、入射光量と出力が線形とみなせるような小光量の範囲を

$$y = p_0 \times x \quad (3.1)$$

でフィッティングする (図 3.9、図 3.10) ことで、検出効率の代わりにパラメータ  $p_0$  を得ることができる。式 2.12 に  $p_0$  を適用させ

$$N_{fired} = N_{pixel} \left( 1 - \exp \left( -\frac{p_0 \times x}{N_{pixel}} \right) \right) \quad (3.2)$$

という新たな関数を用意する。式 3.2 にそれぞれのピクセル数と  $p_0$  を代入し、測定結果と比較したものを図 3.11 に示す。図 3.11 の横軸は光量比、縦軸は検出光子数を表している。図 3.11 において、14.4k ピクセル MPPC では横軸の値が 0.01 付近から理想曲線とずれ始め、90k ピクセル MPPC では横軸の値が 0.1 付近から理想曲線とずれ始める。このことから、14.4k と 90k ピクセルはダイナミックレンジが 10 倍違うことが分かる。ここで、真の入射光子数を知ることは難しいが、図 3.11 と図 2.6 を比較して、図 3.11 の横軸の値 0.01 は  $10^4$  個の光子入射、0.1 は  $10^5$  個の光子入射に相当するのではないかと予想される。この予想入射光子数を用いると、どちらの MPPC も入射光子数が全ピクセル数以下の場合には応答曲線とよく一致し線形性を保っているが、入射光子数が全ピクセル数を超えると、応答曲線とはずれ始め、14.4k では約 0.5 倍、90k では約 0.25 倍、全ピクセル数よりも小さいところで飽和していると考えられる。

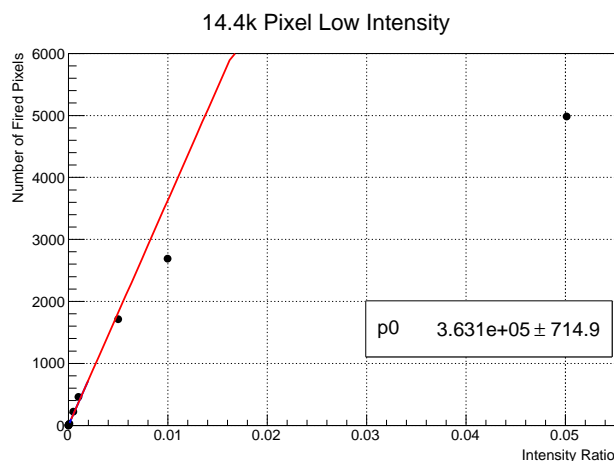


図 3.9: 14.4k ピクセルの結果を  $y = p_0 \times x$  でフィッティングした様子

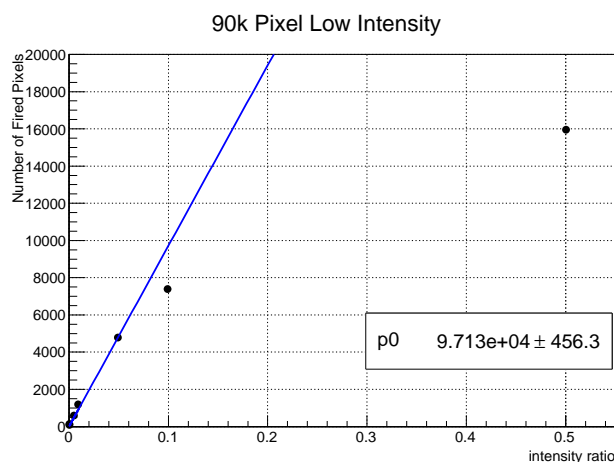
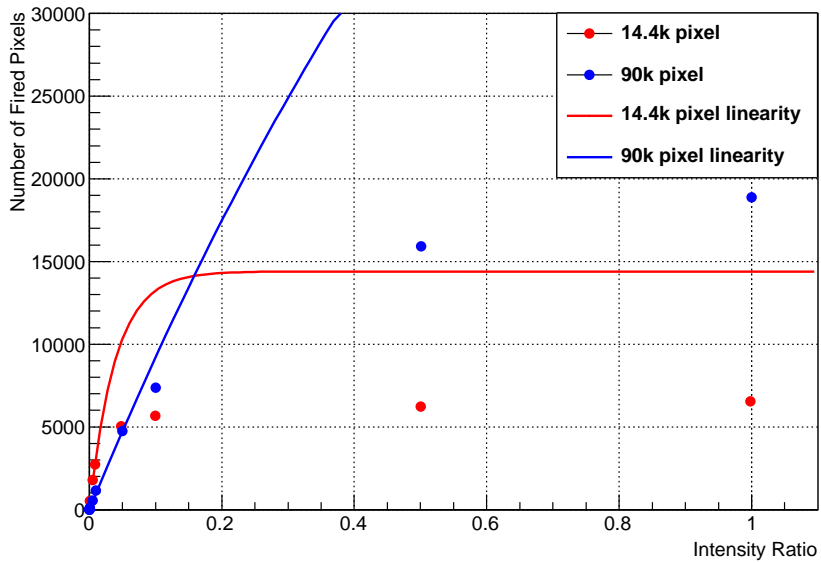


図 3.10: 90k ピクセルの結果を  $y = p_0 \times x$  でフィッティングした様子

14.4k and 90k Pixel MPPC Linearity



14.4k and 90k Pixel MPPC Linearity

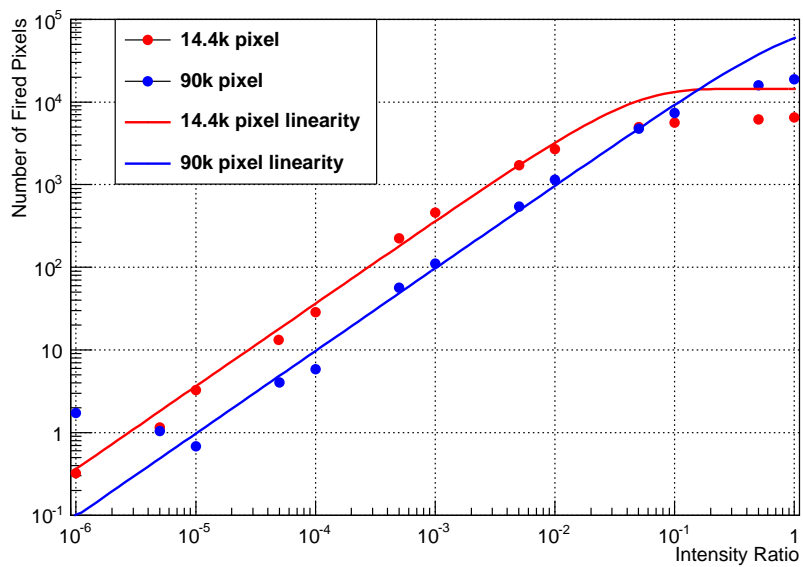


図 3.11: 14.4k および 90k ピクセルの入射光量と検出光子数の応答関係  
 赤の曲線は式 3.2 から計算できる 14.4k ピクセルの応答曲線  
 青の曲線は式 3.2 から計算できる 90k ピクセルの応答曲線

## 第4章 結論

本研究では 14.4k ピクセルおよび 90k ピクセルの MPPC について同じ実験セットアップ・解析手法を用いて基礎特性の温度・電圧依存性および応答線形の測定を行い、その性質を確認・評価した。14.4k ピクセルの MPPC は 90k ピクセルに比べ、増幅率が 4 倍、電荷分解能が 2 倍、平均検出光子数が 3 倍優れている。しかし、ダイナミックレンジは 10 倍小さい。このため入射光子数が少ない実験には 14.4k ピクセルが向いていると言えるが、入射光子数が多く広ダイナミックレンジが求められる高エネルギー分野の実験には 90k ピクセルを用いなければならない。PHOS の場合、PWO の発光量が 24.1p.e./MeV であるため、14.4k ピクセルでは約 0.4GeV の光子までしか観測できないが、90k ピクセルでは約 4GeV の光子まで観測できると予想される。今後、高エネルギー実験の検出器へ MPPC の応用を進めるためには、応答曲線を正しく求める必要があり、そのためには MPPC への入射光子数の測定が不可欠である。また本研究では、光量を増やしていくと MPPC の出力が 14.4k ピクセルでは約 0.5 倍、90k ピクセルでは約 0.25 倍、全ピクセル数より小さいところで飽和し始めるという結果が得られた。この結果は理想応答曲線の振る舞いとは一致していない。そのため、大光量照射時の測定について詳しく調べなければならない。

## 謝辞

本研究に関して、実験に必要な資料の提供や指導教官として指導して下さった杉立先生に感謝いたします。研究室内会議にて実験の問題点や助言を下さった志垣先生、本間先生、三好先生に感謝いたします。また、副査としてお忙しい中時間を用意していただいた石川先生にも感謝いたします。

この1年間クォーク物理学研究室の皆様には大変お世話になりました。中宮さんには本研究に関するだけでなく様々なことで相談にのっていただきました。関畑さんには実験装置の使い方を一から教えて頂きました。いつも質問してばかりで大変ご迷惑をかけたと思います。多くの方々のおかげで本論文を書くことができました。この場でお礼を述べたいと思います。本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] LHC ALICE 実験 -ALICE JAPAN- <http://alice-j.org/>
- [2] 渡辺大輔 2005 年卒業論文 「タングステン酸鉛結晶とアバランシェフォトダイオードを用いた電磁カロリメーターの性能評価」
- [3] 関畑大貴 2013 年卒業論文 「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」
- [4] 浜松ホトニクス <http://www.hamamatsu.com/jp/ja/index.html>
- [5] MPPC S12572-010C データシート [http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s12572-010.etc\\_kapd1045j03.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s12572-010.etc_kapd1045j03.pdf)
- [6] MPPC S12572-025C データシート [http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s12572-025.etc\\_kapd1043j03.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s12572-025.etc_kapd1043j03.pdf)