

修士論文

新型光検出器MPPC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 高エネルギー物理学研究室

信原 岳

平成18年2月16日

概要

MPPC(Multi Pixel Photon Counter) は、近年になって開発された新しいタイプの光検出器である。今も世界各国で開発が進められている段階であり、まだ本格的に実用化、製品化された例がない。しかし、優れたフォトンカウンティング能力、磁場に対する耐性、コンパクトである、などの性能から、将来的に様々な分野において光電子増倍管などの従来の光検出器に取って代わる存在として注目されている。その中で、最も早く MPPC が実用化されると考えられるのが T2K ニュートリノ振動実験である。

本研究では MPPC の T2K 実験での実用化にむけた研究開発を行った。浜松ホトニクス (HPK) 社製とロシアの CPTA 社製のともに試作品を使って、基本動作の確認、基礎特性であるゲイン、ノイズレート、クロストークレート、検出効率、パルスリニアリティについての印加電圧、温度依存性の測定、さらにピクセルごとの動作確認を行った。最後に MPPC の応用面でのテストとして、T2K 実験での使用環境であるシンチレータからのファイバー読み出しの測定を p, π のビームを使って行った。

以上の測定結果から、T2K から基本性能として要求される、ゲイン $> 5 \times 10^5$ 、ノイズレート $< 1MHz$ 、検出効率 $> 15\%$ 、リニアリティ $\sim 200p.e.$ 及び応用面として要求される、MIP 粒子に対して $5p.e.$ 以上の光量が得られ、 p/π の粒子識別ができるという項目を MPPC が満たしていることを確認し、実用化の可能性を示した。また、HPK 製においては社内でもこれらの測定は行われておらず、今回の測定は MPPC の実用化へむけた性能向上のためにも重要な情報を提供することになる。

目次

第1章	光検出器 MPPC	5
1.1	はじめに	5
1.2	1ピクセルの動作原理	5
1.3	MPPCの動作原理	7
1.4	MPPCの実用的な用途	8
第2章	T2Kニュートリノ振動実験	10
2.1	ニュートリノ及びニュートリノ振動について	10
2.2	T2Kニュートリノ振動実験	10
2.3	T2K実験における前置検出器	11
2.4	シンチレータ飛跡検出器	12
2.4.1	光検出器に対する要請	13
2.4.2	光検出器の選択	13
2.5	性能評価の流れ	14
第3章	基礎特性評価	15
3.1	測定に用いたサンプル	15
3.2	シグナルとフォトピーク	16
3.3	ゲインの測定	17
3.3.1	MPPCゲインの定義	18
3.3.2	測定方法	18
3.3.3	測定結果	19
3.4	ノイズレートの測定	22
3.4.1	MPPCがもつ熱電子ノイズについて	22
3.4.2	測定方法	23
3.4.3	測定結果	23
3.5	クロストークレートの測定	25
3.5.1	クロストークレートの定義	25
3.5.2	測定方法	26
3.5.3	測定結果	27
3.6	Photon Detection Efficiency(PDE)の測定	27

3.6.1	PDE の定義	28
3.6.2	PDE の測定方法	29
3.6.3	PDE の測定結果	29
3.7	パルスリニアリティの測定	30
3.7.1	MPPC のパルスリニアリティ	30
3.7.2	測定方法	30
3.7.3	測定結果	31
3.8	HPK400 の動作電圧について	31
3.9	シグナルとフォトピークに異常が見られたサンプル	32
3.10	基礎特性評価のまとめ	32
第 4 章	レーザーによるテスト	40
4.1	動機	40
4.2	測定したサンプル及び測定項目	40
4.2.1	HPK100A	40
4.2.2	HPK100C	40
4.3	セットアップ	41
4.4	HPK100A	41
4.4.1	レーザーによるシグナルと ADC 分布	41
4.4.2	1 ピクセル内での Efficiency 分布	42
4.4.3	ピクセルごとの Gain 及び Efficiency のばらつき	43
4.5	異常が見られたサンプルに対するレーザーキャン	44
第 5 章	ビームによるシンチレータからのファイバー読み出しのテスト	48
5.1	動機	48
5.2	セットアップ	48
5.3	MPPC とファイバーの位置合わせ	49
5.4	測定手順	53
5.5	測定結果	53
5.5.1	ビームによる生の MPPC シグナル	53
5.5.2	MIP による光量	53
5.5.3	p/π の粒子識別	56
5.6	ビームテストのまとめ	58
第 6 章	結論	67
	Bibliography	68
	謝辞	69

付 録 A ピクセル内及びピクセルごとのクロストークレート	70
付 録 B 最も大きい光電子ピークが見られたサンプル	73
List of Figures	75
List of Tables	77

第1章 光検出器MPPC

MPPC(Multi Pixel Photon Counter)¹は最近になって開発された新型の光検出器であり、まだ本格的に実用化、製品化された例がなく今も世界各国で開発が進められている途上にある。日本では浜松ホトニクス社が主に開発を行っており、様々なタイプの試作品を作りながらその性能を試している段階である。

この章では、MPPCの動作原理および基本構造、そしてMPPCの実用性についても述べる。

1.1 はじめに

MPPCは図1.1のように、受光面(典型的には $1 \times 1 \text{mm}^2$)内に多数のAPD(Avalanche Photo Diode)ピクセルが並べられた構造をしている。MPPCのシグナルはこれらそれぞれのAPDピクセルが出すシグナルの総和である。それぞれのAPDピクセルをフォトンを検出したかしていないかの2通りのシグナルを出すバイナリなデバイスとして動作させることでMPPCは、検出したフォトン数に対して優れた分解能を持つ、つまりフォトンカウンティング能力に優れた光検出器として働く。またコンパクトである、磁場に影響を受けない、低いバイアス電圧(30~70V)で動作する、高ゲイン(約 10^6)であるといった特長を持つ。しかし、まだ実用化には至っておらず世界中で開発が進められている。

1.2 1ピクセルの動作原理

まず、MPPCの1ピクセルを構成するAPDについて簡単に説明する。

APD(Avalanche Photo Diode)は、逆電圧をかけることで半導体のpn接合部に高電場領域を形成し、そこで電子雪崩を起こさせて信号を増幅するフォトダイオードのことである。図1.2にAPDの一般的な構造を示した。APDに逆電圧を印加すると検出器内部には図のような電場が形成される。入射光は吸収領域で電子-ホール対に変換される。生成された電子、ホールは電場によってそれぞれ反対方向にドリフトし、電子はpn接合部の高電場領域で雪崩増幅を起こす。増幅された電荷はシグナルとして読み

¹SiPM(Silicon Photo Multiplier)とも呼ばれる

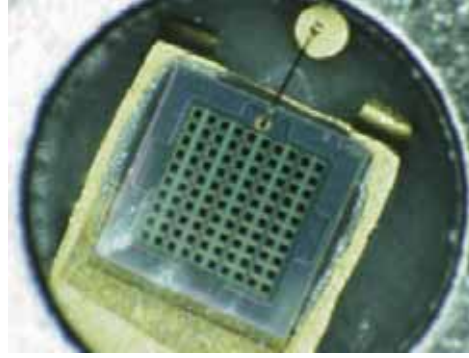


図 1.1: MPPC の受光面。図の受光面サイズは $1 \times 1 \text{mm}^2$ 、ピクセル数は 10×10

出される。

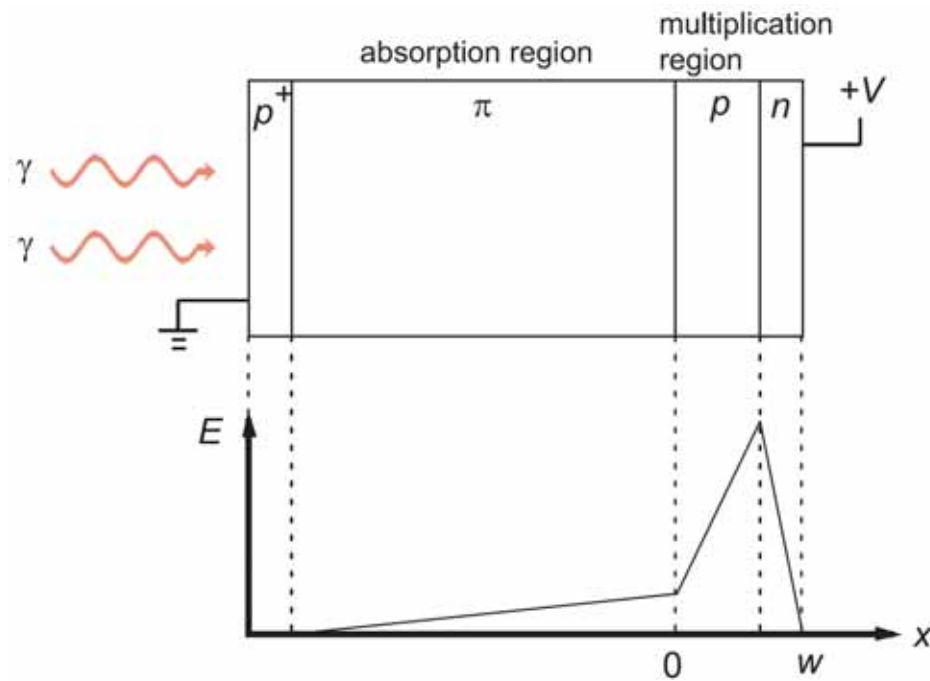


図 1.2: APD の構造の概念図

雪崩による増幅率は、1光子によって誘起された1つの電子が最終的にシグナルとして何個の電子になるかで定義される。この増幅率は印加電圧を徐々に上げていくと200程度まで大きくなる。ここまでの印加電圧では、得られるシグナルの大きさは入射光量に比例する。印加電圧をこれ以上に上げていくとある点で、わずかな光に対しても高電場領域内で放電現象を起こすようになる。この点をブレイクダウン電圧といい、この放電現象はガイガー放電と呼ばれる。ガイガー放電による電子の増幅率は約 10^6 にもなり、シグナルの大きさは入射光子数に依らない。つまりシグナルから

は、光子を受光したかしなかったかだけがわかることになる。APDの動作方法において、ブレイクダウン電圧以下で動作させるものをノーマルモード、ブレイクダウン電圧以上で動作させるものをガイガーモードという。([4])

MPPCの1ピクセルとなるAPDも、基本的な構造及び動作原理は同じである。MPPCにおいて、個々のAPDはガイガーモードで動作する。印加するバイアス電圧の領域はブレイクダウン電圧をわずかに超えた数Vの範囲であり、この範囲で増幅率も変化する。また、バイアス電圧は全てのピクセルに共通である。

MPPCの実際のピクセルの画像、1ピクセルの構造、電場分布を図1.3、図1.4、図1.5、に示す。

図1.4において、入射光子はドリフト領域で電子-ホール対に変換され、電子は比較的弱い電場によって p^+n^+ 接合が形成する空乏層(ガイガー領域)までドリフトする。空乏層に到達した電子はガイガー放電により約 10^6 倍に増幅され、増幅された電荷はポリシリコンの抵抗を經由しアルミ電極によってシグナルとして読み出される。ここで、ポリシリコンの抵抗はクエンチング抵抗と呼ばれピクセルごとにつけられている。アルミ電極は全ピクセルに共通の読みだしラインとしてピクセル間を走っている。

MPPCシグナルはこれらのAPDピクセルからのシグナルの総和であるから、MPPCのゲイン(増幅率)及びシグナル幅は、上で述べた1ピクセルの動作原理から定量的に理解することができる。

ガイガーモードにおいて、空乏層のキャパシタンス C_{pixel} はバイアス電圧 V_{bias} によらず一定の値をとる。よって、空乏層に蓄えられる電荷は V_{bias} に線形比例する。いま、ドリフトしてきた電子が空乏層に到達すると、ガイガー放電により、蓄えられた電荷はクエンチング抵抗 R_{pixel} を通過して流れ出す。この影響により空乏層にかかる電圧が一時的にブレイクダウン電圧 V_0 以下に降下することでガイガー放電は終了する。ピクセルからはガイガー放電により $Q_{pixel} = C_{pixel} \cdot (V_{bias} - V_0)$ の電荷がシグナルとして取り出される。電荷が流れ切るのに要する時間、つまりシグナル幅は $C_{pixel} \times R_{pixel}$ で決まる([2])。

1.3 MPPCの動作原理

はじめに述べたように、MPPCは受光面(典型的には $1 \times 1mm^2$)内に多数のAPD(Avalanche Photo Diode)ピクセルが並べられた構造をしており、各々のピクセルはブレイクダウン電圧以上つまりガイガーモードで動作する。各ピクセルは入射光子によりガイガー放電を起こし電荷を放出する。その電荷の全ピクセルの総和がMPPCのシグナルとして読み出される。各ピクセルにおいてガイガー放電により放出される電荷量は入射光子数によらない。つまり、1つのピクセルは光子を受光したかしていないかの情報のみを出すバイナリなデバイスとして動作する(シグナル自体はアナログである)。これにより、全てのピクセルが同じ増幅率を持つことで、MPPCシ

グナルの大きさから光子を受光したピクセル数、つまり MPPC 受光面で検出された光量 (p.e.) を求めることができる。MPPC シグナルの大きさ (電荷量) Q_{MPPC} は

$$Q_{MPPC} = N \times Q_{pixel}$$

と書くことが出来る。ここで N はガイガー放電したピクセル数である。

1.4 MPPC の実用的な用途

MPPC の実用化はまだ世界でも前例がないが現在国内においては、高エネルギー物理学実験での使用が検討されている。具体的には、ニュートリノ振動の観測を行う T2K 実験と電子陽電子リニアコライダーを用いる ILC 実験である。この2つの実験において、ともにシンチレータ²の光をファイバーで読み出す光検出器として MPPC の使用が予定されている。また医療分野においても、将来的には PET (Positron Emission Tomography) での光電子増倍管にかわる光検出器として期待されている。MPPC は光電子増倍管と違い磁場に影響を受けないため、PET 装置と NMR 装置³との結合化などが可能となる。

MPPC の実用化として、この中で最も早く実現されると考えられるのが T2K 実験である。次章では、この T2K 実験について簡単に説明し、そこでの MPPC の役割について述べる。

²荷電粒子がこの物質内を通過すると、光が放出される。この光を検出することで、通過粒子についての情報が得られる

³Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer。核磁気共鳴装置

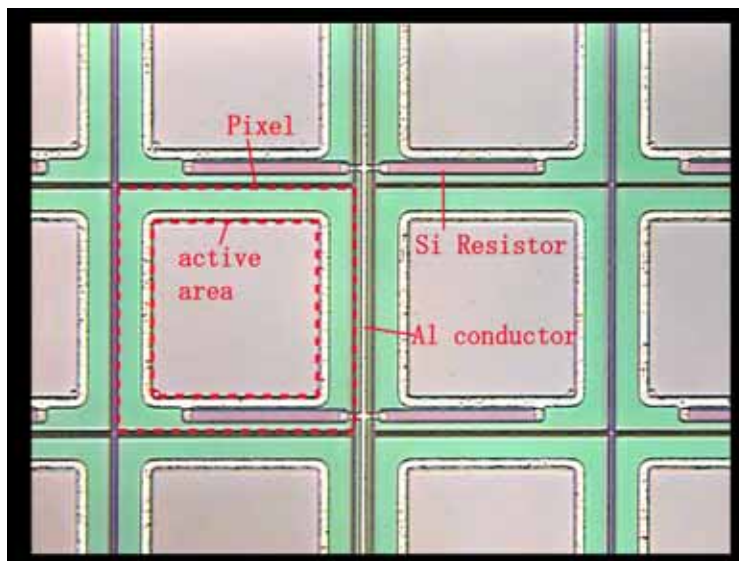


図 1.3: 顕微鏡によるピクセルの画像

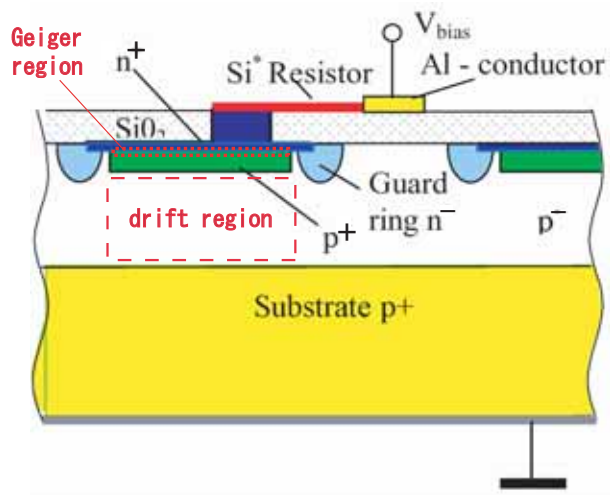


図 1.4: MPPC の 1 ピクセルの断面の模式図。光は上から入射する。

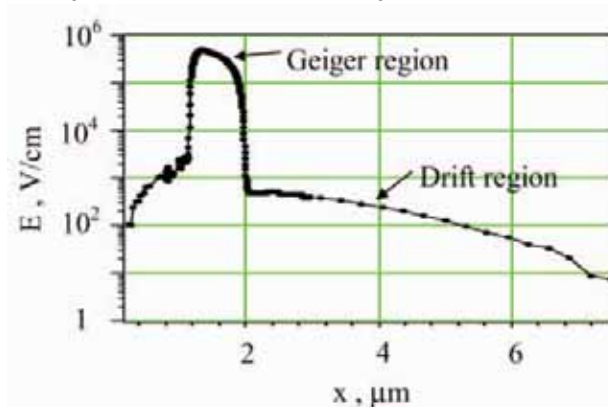


図 1.5: 図 1.4 における上部-下部にかけての電場の強さ分布。数値は典型的な値。

第2章 T2Kニュートリノ振動実験

T2Kニュートリノ振動実験 (T2K : Tokai to Kamioka) は、茨城県東海村で 50GeV 陽子シンクロトロン加速器を用いて生成させたほぼ純粋な μ ニュートリノビームを岐阜県の神岡町に向けて飛行させ、その間におこるニュートリノ振動を観測する、2009 年開始予定の実験である。本章では、ニュートリノ及びニュートリノ振動という物理現象について述べた後、T2K 実験について簡単に紹介する。

2.1 ニュートリノ及びニュートリノ振動について

ニュートリノは 1930 年にパウリによってその存在が仮定され、1956 年ライネスとコワンによる原子炉を利用した実験で初めて確認された。続いて 1962 年にミューニュートリノが、2000 年にタウニュートリノが発見され、また LEP での加速器による Z 粒子の崩壊幅の測定により、弱い相互作用をするニュートリノは 3 種類であることが確認された。

現在の素粒子標準理論は素粒子の世界を非常に良く記述しているとされるが、3 種類のニュートリノの質量は全て 0 として扱われている。しかし 1998 年にスーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノの観測によって、ニュートリノが世代間を振動するという報告がなされた。このニュートリノ振動とはニュートリノが有限の質量を持ち世代間で混合している時に、あるフレーバーのニュートリノが時間発展とともに別のフレーバーのニュートリノに変わることをいう。この現象は標準理論を超える素粒子物理学の唯一の手がかりであり、ニュートリノ振動の解明は大きな意義を持っている。

2.2 T2Kニュートリノ振動実験

本実験ではまず、茨城県東海村で現在建設中の大強度陽子加速器施設 J-PARC の 50GeV 陽子シンクロトロン加速器によって得られた高エネルギー陽子を、ターゲットであるカーボンに当て、生じた 2 次粒子からほぼ純粋なミューオンニュートリノビームを生成する。生成されたニュートリノビームは、J-PARC 敷地内に設置された前置検出器を通過し、約 1 ミリ秒のあいだ地中を走り、約 295km 離れた岐阜県神岡町にある東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設の附属観測装置スーパーカミオカンデ検出器に到達する。J-PARC 内に設置されたビームモニタと前置検出器により、ニュー

トリノ振動が起こるまえの、ニュートリノビームのフラックス・エネルギー分布・角度分布を測定する。その測定から、ニュートリノ振動がなかった場合、あるいは、ある振動パラメータのニュートリノ振動が起こった場合に、295km 離れたスーパーカミオカンデで得られるであろうエネルギー分布を予測する。そして、その予測と、実際にスーパーカミオカンデで観測されたエネルギー分布を比較することにより、ミューオンニュートリノ消失の振動パラメータの精密測定及び電子ニュートリノ出現の発見を目指す。

2.3 T2K 実験における前置検出器

前置検出器はニュートリノ生成点から約 280m 下流に設置され、生成したばかりのニュートリノビームの性質を測定することを目的とする。前置検出器には、ビーム軸上に設置される on-axis 検出器と、スーパーカミオカンデの方向に設置される off-axis 検出器の 2 種類の検出器が計画されている。この中で、off-axis 検出器は、生成されたばかりのニュートリノビームのフラックスやエネルギースペクトルを測定し、ニュートリノ振動がない場合のスーパーカミオカンデにおけるフラックスやエネルギースペクトルを求めるのが主な目的である。またニュートリノ振動解析の際にスーパーカミオカンデでバックグラウンドとなるニュートリノ反応の詳細な研究を行うことも重要な役割の 1 つである。off-axis 検出器の模式図を図 2.1 に示す。この off-axis 検出器の中で用いられるシンチレータ飛跡検出器 (図 2.1 の FGDs), ECAL 検出器、Pi-zero 検出器において MPPC の使用が計画されている。

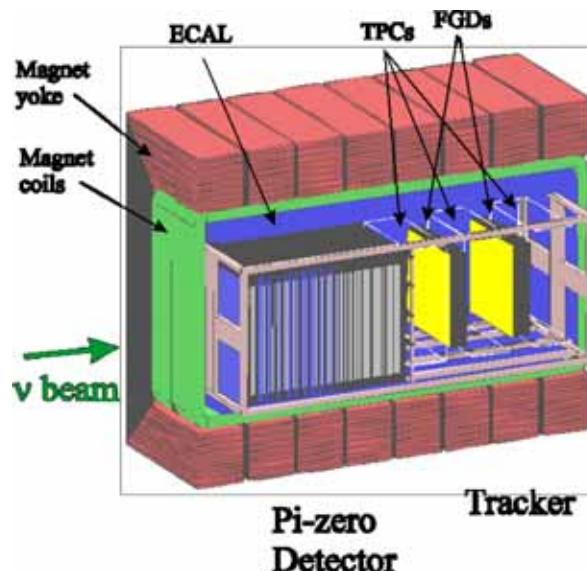


図 2.1: off-axis 検出器の模式図

この中で、シンチレータ飛跡検出器とそこで用いられる光検出器について次で述べる。

2.4 シンチレータ飛跡検出器

off-axis 前置検出器内に置かれるシンチレータ飛跡検出器について述べる。

シンチレータ飛跡検出器は図 2.2 のように、棒状にセグメント化されたシンチレータを 3 次元に隙間なく並べた構造をしている。

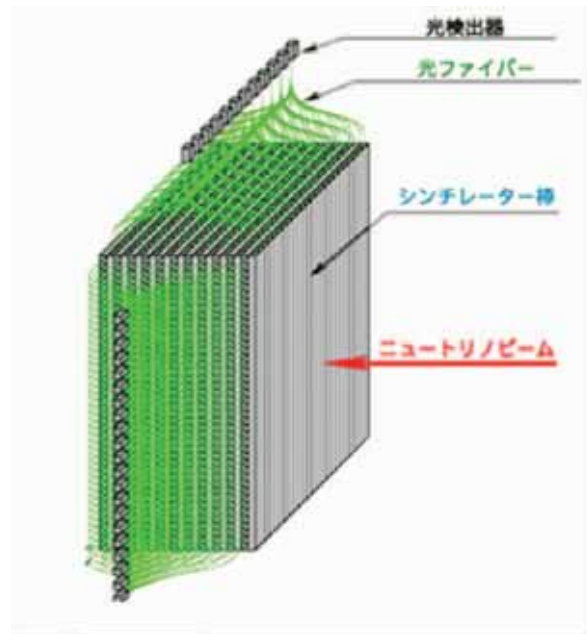


図 2.2: シンチレータ飛跡検出器の模式図

各々のシンチレータは反射材によって光学的に分割されており、波長変換ファイバーがそれぞれに挿入され、ファイバーごとに光検出器が配置される。波長変換ファイバーはシンチレータからの青色の光を吸収し、ファイバー内で緑色の光を再発光させてその光を光検出器まで導く。これによって、各シンチレータからの光を独立に読み出すことができる。

シンチレータはニュートリノに対するターゲットとしての役割も果たす。これにより、シンチレータ内でのニュートリノ反応により生成された荷電粒子の飛跡を求めることが可能となる。

T2K 実験におけるシンチレータ飛跡検出器に要求される性能は以下のようになる。

- ニュートリノ反応により生成されたすべての荷電粒子を検出できること
- 荷電粒子の飛程および粒子のエネルギーが測定できること

- p/π の粒子識別ができること
- ヒットの時間情報を有すること
- 0.2T の磁場内での動作

2.4.1 光検出器に対する要請

前節で述べたことから、シンチレータ飛跡検出器における光検出器には以下のことが要求される。

- コンパクトであること
読み出しチャンネル数は数万チャンネルにもなり、また光検出器を配置する電磁石中のスペースも限られている。さらにファイバーは 1mm 径程度のものを使用予定であるため、光検出器は出来る限りコンパクトであることが望ましい。
- 磁場に影響を受けないこと
T2K 実験におけるシンチレータ飛跡検出器は 0.2T の磁場内に置かれる。シンチレータからの光は低光量であり、またファイバーが長いほどその途中で光を減衰させてしまうため、出来るだけシンチレータに近い所に光検出器を配置して読み出すことが望ましい。よって、光検出器はシンチレータに近い場所、つまり磁場内での安定した動作が要求される。このため、磁場に影響を受ける光電子増倍管は今回使用することができない。
- 光量に対して 200p.e. 以上のダイナミックレンジを持つこと
シンチレータ飛跡検出器は、MIP¹から低エネルギーの陽子までの粒子を検出する。使われる光検出器はこれらの光量をカバーできるダイナミックレンジを持たなければならない。

2.4.2 光検出器の選択

前節で述べたことを踏まえ、シンチレータ飛跡検出器における光検出器として MPPC(Multi Pixel Photon Counter) を選択した。

MPPC は

- コンパクトである
- 磁場に影響を受けない
- 数千までのダイナミックレンジが可能である

¹Minimum Ionization Particle の略。

ことから、T2K 実験におけるシンチレータ飛跡検出器での使用に適していると考えられる。

さらに、高いゲインを持つ ($10^5 \sim 10^7$), 低いバイアス電圧で動作する (30 ~ 70V), チャンネル当たりのコストが安いという利点がある。

本研究では MPPC のサンプルを用いて、T2K 実験におけるシンチレータ飛跡検出器で使用可能かどうかの性能評価を行った。

2.5 性能評価の流れ

本研究における MPPC の性能評価の項目について述べる。

- 基礎特性評価
ゲイン、ノイズレート、クロストークレート、PDE(Photon Detection Efficiency), パルスリニアリティ についてそれぞれバイアス電圧特性、温度特性の測定を行った。これらの各項目の定義は、次章で詳しく述べる。T2K はこれらの基礎特性に対し、
ゲイン $> 5 \times 10^5$, ノイズレート $< 1\text{MHz}$, PDE $> \text{PMT}$ の 75%
を要求する。
- ピクセルごとの基本動作確認
全てのピクセルが正しく揃った動作をしているかどうかの確認として、レーザーによるテストを行った。
- 実機と同じ読み出し条件でのテスト
ビームによるシンチレータ+ファイバー読み出しのテストを行った。T2K は、MIP に対し 5p.e. 以上の光量が得られること、及び p/π の識別が出来ることを要求する。

以上のそれぞれの測定結果に対して MPPC の、新型検出器としての実用化の可能性を評価した。

第3章 基礎特性評価

第1章で述べたように、MPPCは現在開発段階で、製品化されていない光検出器である。その試作品を用いた性能評価は、T2KのみならずMPPCの開発においても重要な情報を提供する。とくに浜松ホトニクス(HPK)社製の試作品についてはこれまで、本章で述べるシグナルを用いた評価や第4章で述べるピクセルごとの評価は行われていない。そのため今回の評価結果が、HPKでの開発において、MPPCの性能向上に大きく寄与することが期待される。この章ではまずMPPCのシグナルとフォトピークの確認、そして基礎特性評価としてゲイン、ノイズレート、クロストークレート、PDE(Photon Detection Efficiency)、パルスリニアリティについて測定方法とその結果について述べる。

3.1 測定に用いたサンプル

今回、基礎特性評価を行うにあたりHPK社製とロシアのCPTA社製のともに試作品について測定を行った。それぞれのパラメータを表3.1に示した。

タイプ	ピクセル数	パルス幅	バイアス電圧
HPK100A	100	12ns	70V
HPK100B	100	40ns	70V
HPK100C	100	60ns	50V
HPK400	400	10ns	50V
CPTA600	600	10ns	40V

表 3.1: サンプルの基本パラメータ。パルス幅は1p.e.パルスの半値幅。HPK製の100Aは21-53-1A,100Bは21-53-2A,100Cは1-63-1A,400は1-32が正式なタイプ名。

HPKの100ピクセルのサンプルについて、HPK100AとHPK100Bは基本構造が同じでありクエンチング抵抗 R_{pixel} のみが異なっている。それがパルス幅($\approx C_{pixel} \times R_{pixel}$)の違いとなって出ている。ここで、 C_{pixel} はピクセルのキャパシタンスである。また、HPK100Cはこれら2つとは基本構造が異なっている。

なお、受光面サイズは5つのサンプル全て $1mm^2$ である。しかしその形状はHPK製とCPTA製とで異なっており、HPK製が四角い形状であるのに対し、CPTA製はファ

イバー読み出し用に丸い形状に作られている。受光面の拡大写真を図 3.1(HPK400)、図 3.2(CPTA600) に示す。

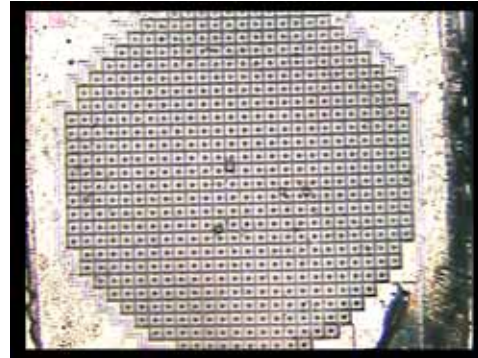
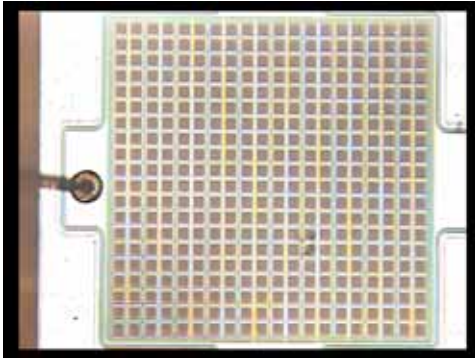


図 3.1: HPK400 の受光面の拡大写真。50 μm \times 50 μm のピクセルが 20 \times 20 に並んでいる。受光面のサイズは 1 mm^2 。
 図 3.2: CPTA600 の受光面の拡大写真。42 μm \times 42 μm のピクセルが丸い形状に並んでいる。受光面のサイズは 1 mm^2 。

この形状の違いは、第 5 章のファイバー読み出しでの光量において影響している可能性がある。

3.2 シグナルとフォトピーク

図 3.3 に用いた読み出し回路図を示す。

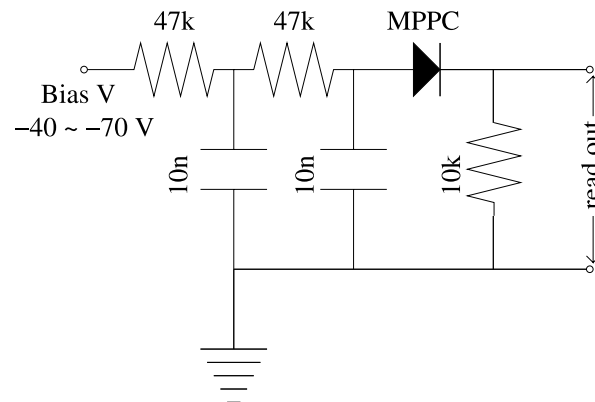


図 3.3: MPPC 読み出し回路図

まず光による MPPC のシグナルを見るため、青色 LED の光を MPPC の受光面に入射させ、その発光のタイミングでの MPPC からの信号を見た。この信号において、光によるシグナルを確認することができた。その波形を図 3.4 に示す。図 3.4 からわかる

ように、個々のシグナルの大きさ (パルス波高及び電荷量) は一番小さいパルスの整数倍になっている。このことから、一番小さいパルスが1ピクセルが出すパルス、つまり1p.e. パルスに対応しており、2ピクセルのパルス(2p.e. パルス)、3ピクセルのパルス(3p.e. パルス)と順に見えていることがわかる。つまり、MPPCは光子を検出したピクセルの数ごとにはっきりと大きさの異なるパルスを出している。これはMPPCが、検出した光子数に対して優れた分解能を持つ、つまり光子カウンティング能力に優れた光検出器であることを示している。

この優れた光子カウンティング能力は、MPPCシグナルのADC分布(電荷量分布に対応する)において容易に見て取ることが出来る。いま、MPPCシグナルのADC分布を図3.5に示す。このADC分布において、光子を検出したピクセル数ごとにきれいに分かれたピーク(光電子ピーク)を見ることができた。入射光量を上げていくと、ADC分布において45p.e.までのピークを確認することができた。また、そのピークごとの間隔は2%以内で一致していた。

光電子ピークがきれいに分かれ、またピークごとの間隔が良く一致していることは、MPPCのピクセルごとの電子増幅率が良く揃っていることを示している。この実験的な検証についてはレーザーによるテスト(第4章)で実証した。

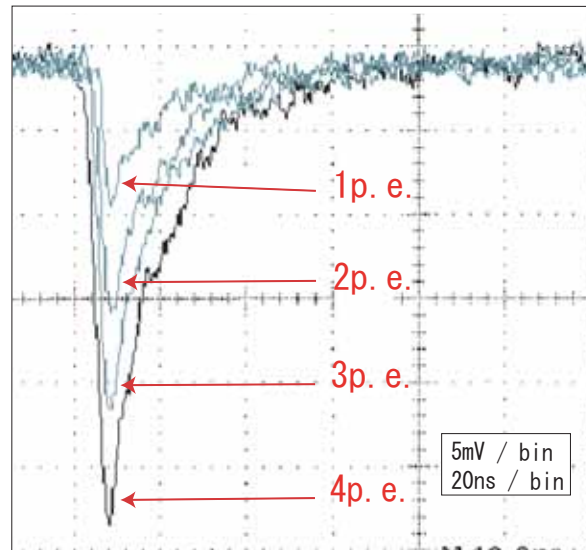


図 3.4: MPPC の生シグナル

3.3 ゲインの測定

MPPCの各サンプルについてゲインのバイアス電圧特性、温度特性の測定を行った。

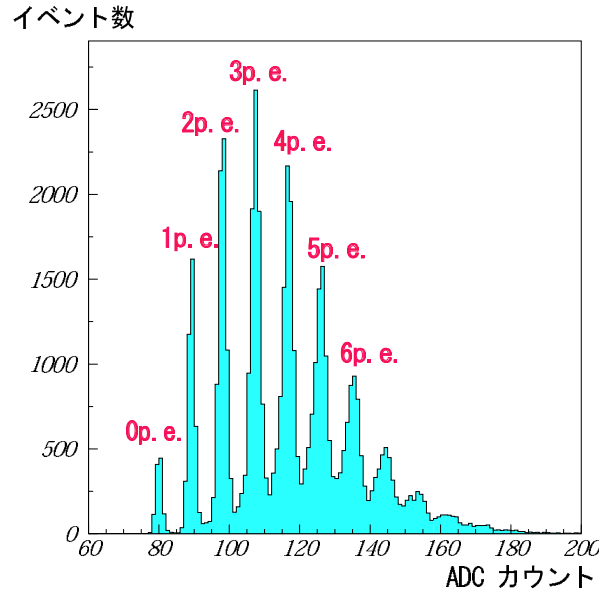


図 3.5: MPPC の青色 LED による ADC 分布

3.3.1 MPPC ゲインの定義

MPPC のゲインは、1つの APD ピクセルのガイガー放電による電子の増幅率として定義できる。つまり、

$$\text{MPPC のゲイン } (G) = \frac{1 \text{ ピクセルが出す電荷量 } (Q_{\text{pixel}})}{\text{素電荷 } (e)}$$

と書ける。

3.3.2 測定方法

受光面 (全ピクセル) に入射した光による MPPC シグナルの ADC 分布における p.e. ピークからゲインを求めた。

測定のセットアップを図 3.6 に示す。恒温槽内で青色 LED を光らせ、これによる MPPC シグナルからゲインを求めた。

用いたモジュールについて簡単に説明する。

- CAMAC ADC
チャージ積分型で、ダイナミックレンジは 0~4096。1ADC カウントは 0.25pC。
- AMP
HPK 製 MPPC に対しては PMT アンプ (ゲインは ×10) を、CPTA 製 MPPC に対しては浜松ホトニクス製アンプ (ゲインは可変で ~ ×77) を用いた。

- H.V. 電源
浜松ホトニクス製 MODEL C3350。
- 青色 LED
日亜化学 NSPB500S。発光波長域は 450~480nm。
- 恒温槽
ETAC HIFLEX FL211C。設定可能な温度範囲は-20 ~100 。

青色 LED の光の強度を、MPPC においてペDESTアルとシグナルが混じる程度に設定し、ADC 分布のペDESTアルと 1p.e. ピークの ADC カウントから、MPPC ゲインを算出した。この測定を各々のサンプルについて、温度 15,20,25 でバイアス電圧を変えながら行った。

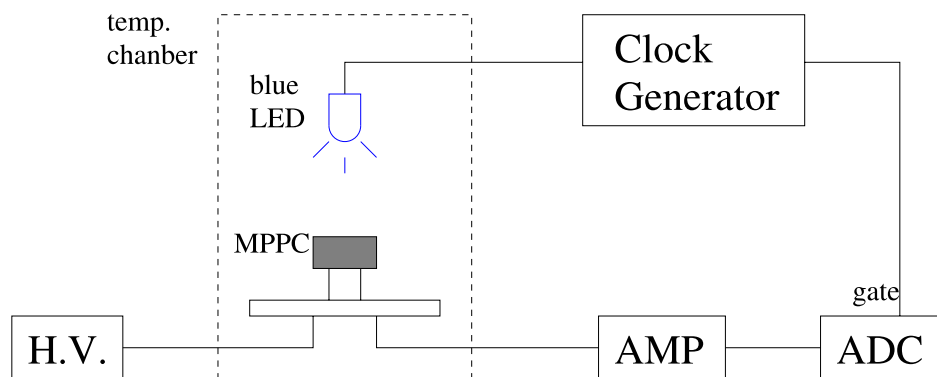


図 3.6: ゲイン測定のセットアップ

3.3.3 測定結果

ゲイン測定の結果を図 3.7 に示す。

図 3.7 よりゲインの値として、4 つのサンプルにおいて $2 \times 10^5 \sim 7 \times 10^6$ が得られた。HPK 製においては、全てのバイアス電圧、温度で T2K からの要請 (5×10^5 以上) を満たしている。CPTA 製においては、全体的にこれをやや下回る結果となった。

また、バイアス電圧を 0.1V 及び温度を 1 変えたときのゲインの変化の割合は、表 3.2 のようになった。表 3.2 から、MPPC のゲインのばらつきを数%以内に抑えるには、バイアス電圧を 100mV 以内、温度を 1 以内で安定に保つ必要があることがわかる。

第 1 章で述べた MPPC の動作原理から、ゲイン (G) はピクセルのキャパシタンス (C_{pixel})、ブレイクダウン電圧 (V_0) を用いて

$$G = \frac{Q_{pixel}}{e} = \frac{C_{pixel}}{e} \cdot (V_{bias} - V_0) \quad (3.1)$$

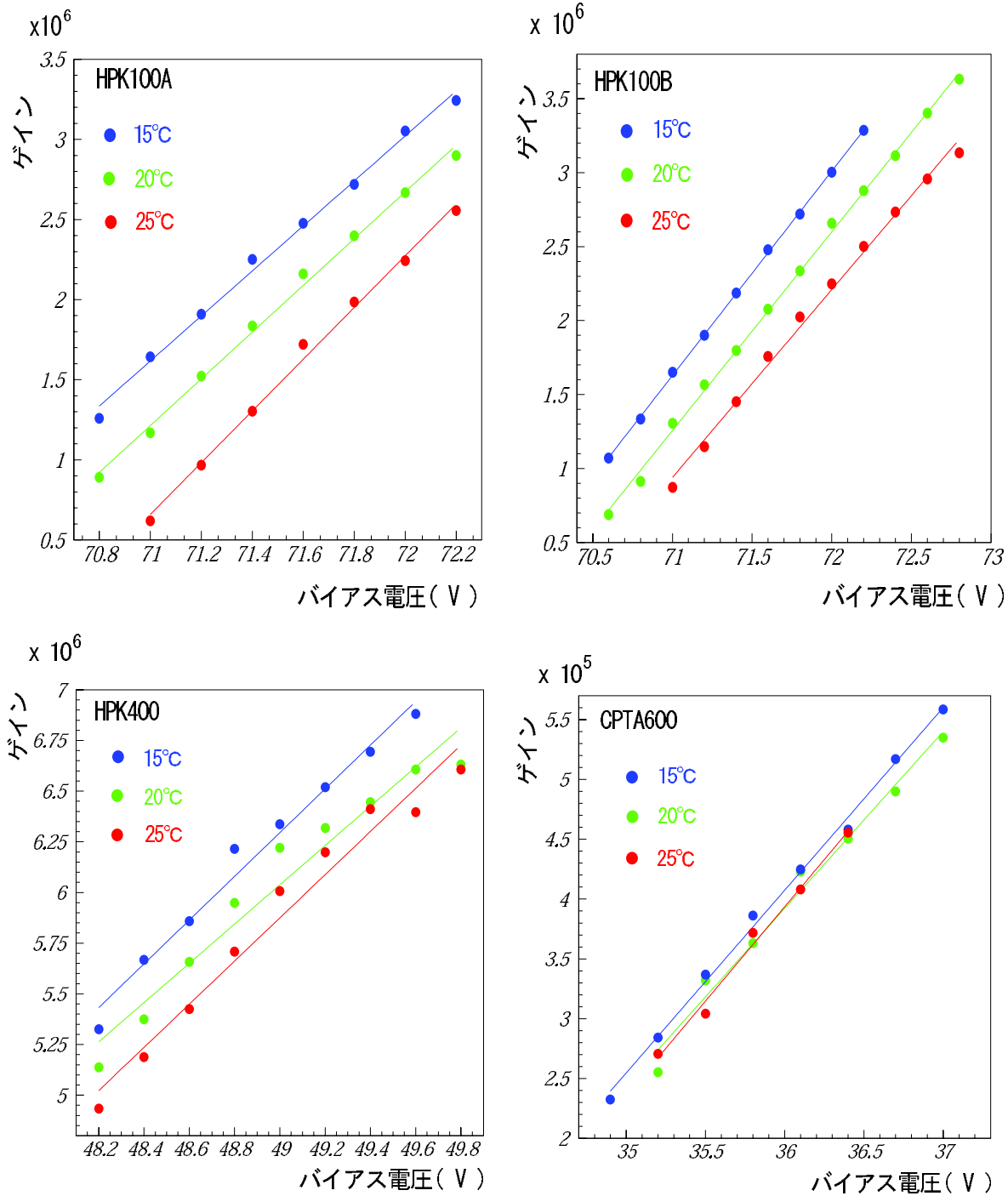


図 3.7: ゲインの測定結果。直線はそれぞれのプロットに対するリニアフィット。

ID	$\Delta G @ \Delta V = 0.1$	$\Delta G @ \Delta T = 1$
HPK100A	7.5%	5%
HPK100B	6.7%	5%
HPK400	1.6%	1%
CPTA600	3.8%	1%

表 3.2: バイアス電圧 (V) を 0.1V、温度 (T) を 1 変えたときのゲイン (G) の変化の割合 (%)

と表わすことができる。ここで、 Q_{pixel} : 増幅された電荷量、 e : 素電荷、 V_{bias} : バイアス電圧、である。

この式から温度が一定のとき、ゲインはバイアス電圧に対してリニアに変化することがわかる。そして今回の測定結果においても、確かにリニアな応答をしている。このとき、1ピクセルが持つキャパシタンス C_{pixel} はゲイン-バイアス電圧プロットの傾き dG/dV_{bias} を用いて、

$$C_{pixel} = e \cdot \frac{dG}{dV_{bias}} \quad (3.2)$$

と書ける。

また、シグナルの時間幅 (半値幅) の立ち下がり部分 T_d は、

$$T_d = C_{pixel} \cdot R_{pixel} \cdot \ln 2$$

と表わされる。ここで R_{pixel} は 1ピクセルが持つクエンチング抵抗である。いま、 T_d はオシロスコープの波形から知ることができ、また HPK 製 MPPC の R_{pixel} は既知の値である。よって 1ピクセルが持つキャパシタンス C_{pixel} は、

$$C_{pixel} = \frac{T_d}{R_{pixel} \cdot \ln 2} \quad (3.3)$$

からも求めることができる。

ゲイン-バイアス電圧プロットの傾きとシグナル幅からそれぞれ求めた、各サンプルにおけるピクセルのキャパシタンスを表 3.3 に示した。ゲイン-バイアス電圧プロットによる値 (3.2) とシグナル幅による値 (3.3) には \sim factor2 までの違いが見られるが、このずれはゲイン測定以外の、シグナル幅などの測定誤差の範囲内であり、今回の実験データはピクセルの動作特性を表すモデルに良く従っているといえる。

また、ゲイン-バイアス電圧プロットと式 (3.4) よりブレイクダウン電圧 V_0 を求めることができる。今回の測定結果から、各サンプルの 20 での V_0 は

HPK100A : 70.2V

HPK100B : 70.2V

ID	C_{pixel} [fF] by (3.2)	C_{pixel} [fF] by (3.3)	R_{pixel} [k Ω]
HPK100A	240	295	42
HPK100B	214	334	147
HPK400	155	88	108
CPTA600	24	-	-

表 3.3: 測定されたピクセルのキャパシタンス。HPK 製の R_{pixel} は HPK から提供された値。

HPK400 : 42.7V

CPTA600 : 33.3V

と求まった。

3.4 ノイズレートの測定

MPPC の欠点の 1 つとしてノイズレートが高いということが挙げられる。MPPC のノイズレートはバイアス電圧、温度依存性を持つ。そのため、MPPC の使用の際のバイアス電圧、温度の設定において、ノイズレートを低く抑えることが重要な指標の 1 つとなる。よって、ノイズレートのバイアス電圧、温度特性を知ることは重要である。本節では MPPC の各サンプルについてノイズレートのバイアス電圧特性、温度特性の測定を行った。

3.4.1 MPPC がもつ熱電子ノイズについて

MPPC はピクセル内において入射フォトン電子-ホール対に変換し、その電子をガイガー放電により増幅させることでパルスを出す。ここで、電子-ホール対はフォトンではなく熱によっても生成され、それによって同じようにガイガー放電を起こし、フォトンによるものと区別つかないパルスを出す。1 つのピクセルがこの熱によるパルス (熱電子ノイズ) を出すタイミングはランダムであり、またピクセルごとに独立に起こる。よって、MPPC の信号において熱電子ノイズは 1 ピクセルからのパルス、つまり 1p.e. パルスが大半であり、それがランダムなタイミングで見られることになる。図 3.8 に光を当てていない状態での MPPC 信号に見られる熱電子ノイズを示す。図 3.8 は、ランダムに取ったいくつかの波形の重ね合わせである。

一般的に高バイアス電圧、高温になるほどノイズレートは大きくなる。

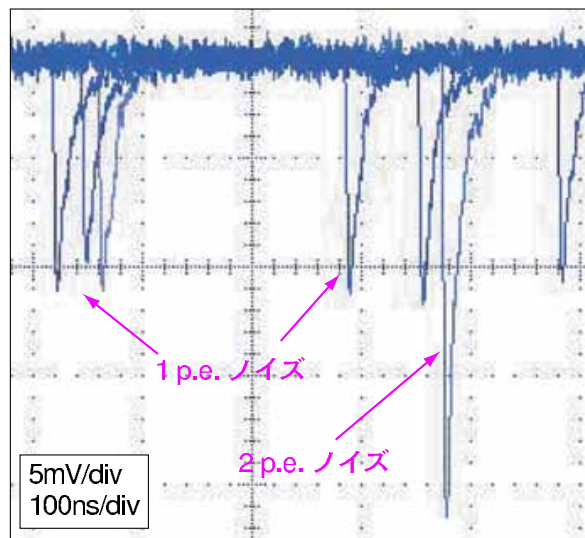


図 3.8: HPK100A の光を当てていない状態での信号波形。ランダムに取ったいくつかの波形の重ね合わせである。ランダムなタイミングで熱電子ノイズが見られる。

3.4.2 測定方法

測定は、光を当てていない状態での MPPC 信号に対し、0.5p.e. と 1.5p.e. で threshold をかけてスケータでカウントレートを測定した。0.5p.e. と 1.5p.e. のパルス波高は、オシロスコープで見られる生の信号から求めた。

3.4.3 測定結果

ノイズレート測定の結果を図 3.9 に示す。

4つのサンプルにおいて、0.5p.e. threshold に対して $10k \sim 3MHz$ の値が得られた。いずれのサンプルも低いバイアス電圧、低温度において 1MHz 以下であり、T2K からの要請を満たしている。HPK400 以外のサンプルにおいて、15 と 25 で大きい所で 2倍までのノイズレートの変化が見られた。しかし、HPK400 に関してはほとんど温度による変化は見られなかった。また、他の 3つのサンプルがバイアス電圧に対してノイズレートがほぼ直線的に増加しているのに対し、HPK400 は加速度的に増加している。

threshold を 1.5p.e. に上げると、バイアス電圧、温度にもよるが平均して一桁程度ノイズレートは小さくなる。ここで見られるのは 2p.e. 以上のパルスであり、また 2つ以上のピクセルが偶然同時にノイズパルスを出す確率は非常に小さい。よってここで見られるパルスのほとんどは、1ピクセルがノイズパルスを出し、それがクロストークを起こした結果 2ピクセル以上、つまり 2p.e. 以上のパルスとして見えるイベントである。ここでクロストークとは、1ピクセルがパルスを出したとき、それとは別のピクセル

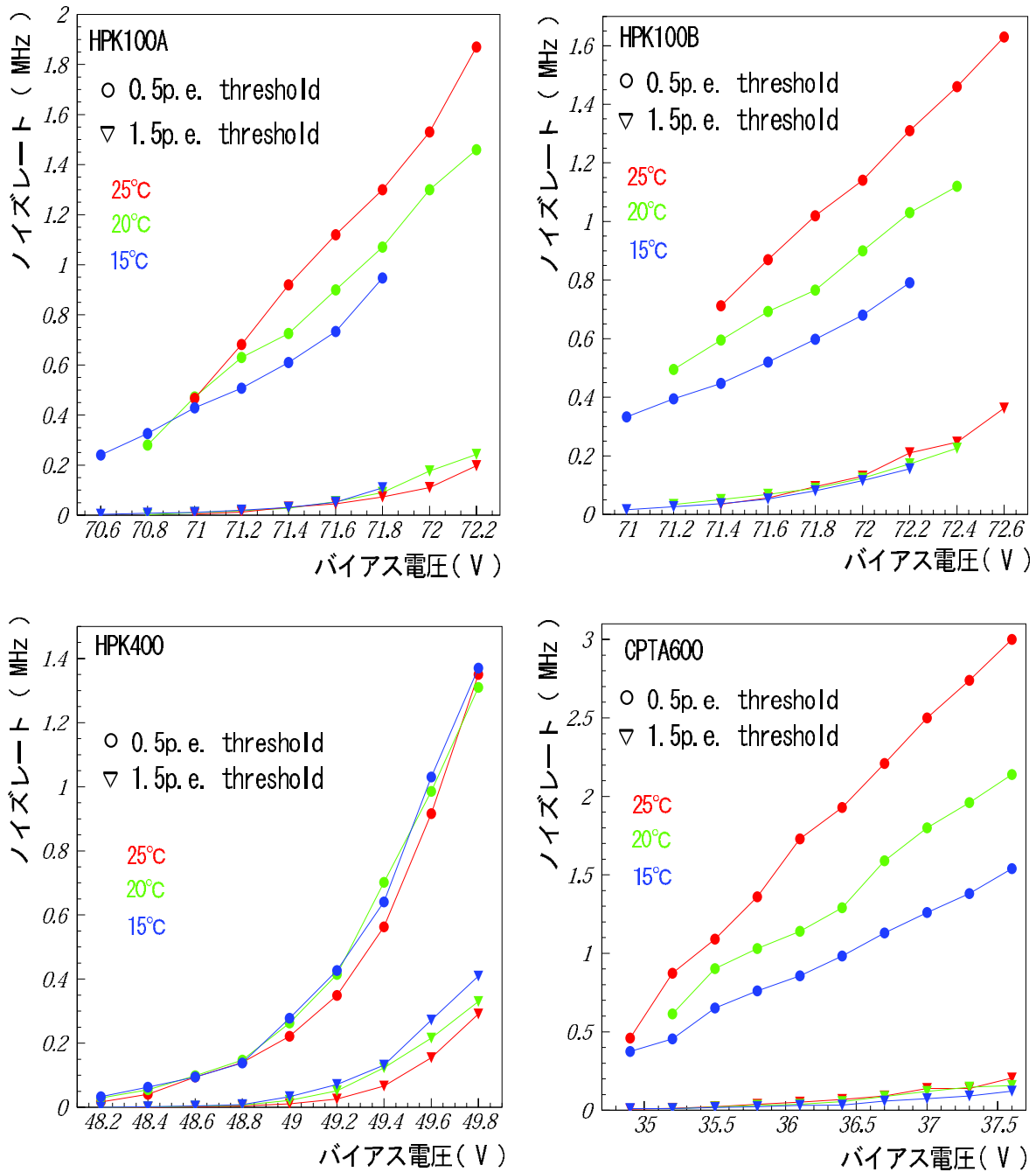


図 3.9: ノイズレートの測定結果

ルを誘発してパルスを出させる現象である (詳しくは次節で述べる)。よって、0.5p.e. threshold と 1.5p.e. threshold のノイズレートの比を取ることで、クロストークを起こす確率 (クロストークレート) について調べることが出来る。なおクロストークによるイベントの中には、最初の 1p.e. パルスとそのクロストークによる 1p.e. パルスが時間的に重なるものと重ならないものが存在する。重なるものは 2p.e. パルスとして、重ならないものは連続した 1p.e. パルスとして見える。後者は 1.5p.e. threshold にかからない。よって、ノイズレートの 0.5p.e. と 1.5p.e. threshold の比からわかるのはクロストークレートの下限值である。図 3.9 を見ると例えば HPK100A において、0.5p.e. threshold の値は低温ほど小さいのに対し 1.5p.e. threshold の値は温度によってあまり変化していない。つまり 0.5p.e. と 1.5p.e. threshold の比は低温ほど大きい。これは、クロストークレートが低温ほど大きくなることを示唆している。また、正確なクロストークレートの測定は次節で行う。

3.5 クロストークレートの測定

クロストークは主にパルスリニアリティ、 p/π 識別に悪影響を及ぼす。そのため、出来るだけ小さく抑えることが望ましい。MPPC の各サンプルについてクロストークレートのバイアス電圧特性、温度特性の測定を行った。

3.5.1 クロストークレートの定義

MPPC にはピクセルごとのクロストークが存在する。これは 1 つのピクセルがガイガー放電したときに、それによって別のピクセルもガイガー放電してしまう現象である。これは、ガイガー放電の際に光子が放出され、それを別のピクセルが検出しガイガー放電を起こすことによる。いま、1 つのピクセルがガイガー放電したときにクロストークを起こす確率をクロストークレートと定義する。典型的な数値は 0 ~ 0.3 である。

またクロストークと同様の二次的なパルスとしてアフターパルスという現象も存在する。これは、1 つのピクセルがガイガー放電したときにピクセル内に電子-ホール対が残留し、ガイガー放電が終了した後もう一度同じピクセルがガイガー放電を起こしてしまう現象である。アフターパルスはクロストークと違ってガイガー放電が終了してからではないと起こらないため最初のパルスとオーバーラップして見えることは無く、また最初のパルスと次のパルスとの時間差は典型的には $100ns \sim \mu s$ のオーダーである。今回の測定において、クロストークレートはこのアフターパルスによる影響を含んだ値になっている。しかし、用いたゲート幅 ($\sim 100ns$) はアフターパルスのタイムスケールに比べて小さいため、その影響は小さく抑えられていると考えられる。

3.5.2 測定方法

クロストークレートはバイアス電圧を上げると大きくなる。

バイアス電圧が低くクロストークレートが無視できるほど小さいときの、微弱光による ADC 分布を図 3.10 に示す。

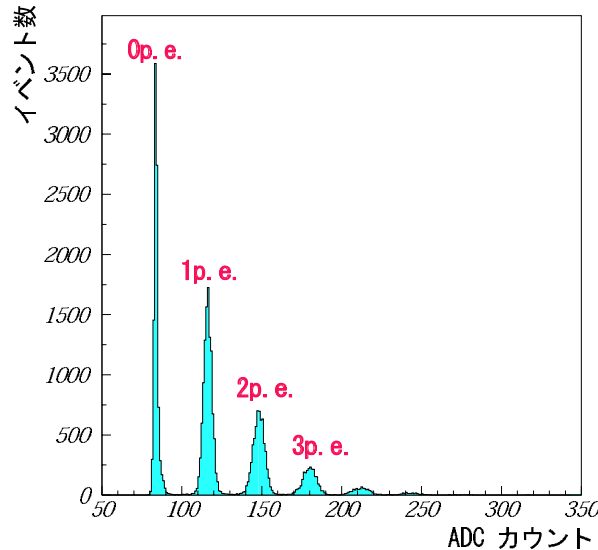


図 3.10: HPK400 の微弱光による ADC 分布。

この ADC 分布において光電子ピークごとにイベント数を取り、全イベント数に対する光電子数ごとの比率を求める。この実験データから得られた光電子分布と、データの全イベントに対する 0p.e. イベントの比率をもとにしたポアソン統計による光電子分布を図 3.11 に示す。図 3.11 から、クロストークの影響がほとんどないとき、MPPC シグナルの光電子分布はポアソン統計に良く従っていることがわかる。次に、バイアス電圧が高くクロストークレートが大きいときに得られた光電子分布を同様にデータの全イベント数に対する 0p.e. イベントの比率をもとにしたポアソン統計とともに図 3.12 に示す。ここで、データの全イベント数に対する 0p.e. イベントの比率をもとにしたポアソン統計による p.e. 分布はクロストークが無い場合の光電子分布を良く再現していると考えられる。なぜなら、クロストークはそもそもパルスがないときには起こらない現象であり、よってデータの全イベント数に対する 0p.e. イベントの比率はクロストークの有無に影響されない量だからである。図 3.12 において、データによる光電子分布とポアソン統計による光電子分布は大きくずれていることがわかる。

今回このずれをクロストークの影響によるものと考え、光電子分布におけるデータの全イベント数に対する 1p.e の比率の減少分からクロストークレートを求めた。つまり本来 1p.e. のイベントが、クロストークが起こると 2p.e. 以上のイベントとして見え

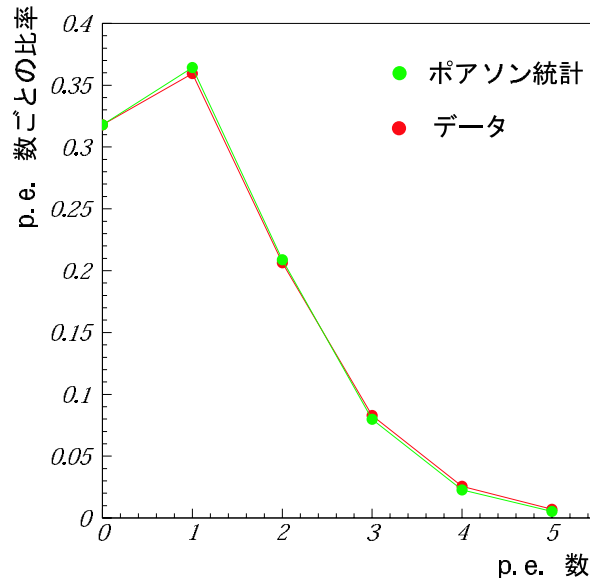


図 3.11: HPK400 の、クロストークレートが十分に小さいときの微弱光による光電子分布と、ポアソン統計から予想される光電子分布。

ることを用い、

$$\text{クロストークレート} = 1 - \frac{\text{データの } 1p.e. \text{ の比率}}{\text{ポアソン統計による } 1p.e. \text{ の比率}}$$

からクロストークレートを算出した。ここで、1p.e. の比率とは全 p.e. 数における 1p.e. の占める割合である。

また熱電子ノイズについては、ゲート幅内に熱電子ノイズがアクシデンタルに入る確率を測定し、その値 (4~17%) を使って熱電子ノイズがないときの光電子分布を再構成することで、その影響を差し引いた。

3.5.3 測定結果

測定結果を図 3.13 に示す。

2つのサンプルについて 0~40%の値が得られた。また、今回測定した 2 サンプルにおいて高バイアス電圧、低温ほどクロストークが大きいという特性を示した。

3.6 Photon Detection Efficiency(PDE) の測定

今回 MPPC の各サンプルについて 20 で、バイアス電圧を変えてゆき PDE の測定を行った。

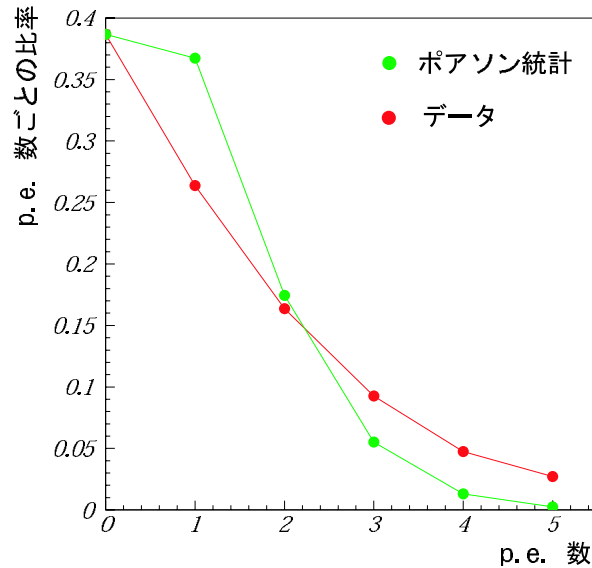


図 3.12: HPK400 の、クロストークレートが大きいときの微弱光による光電子分布と、ポアソン統計から予想されるクロストークが無い場合の光電子分布。

3.6.1 PDE の定義

PDE は Photon Detection Efficiency の略で、受光面に 1 フォトンが入射したときにそれを検出できる確率として定義される。

MPPC の場合、PDE は以下のように 3 つの要素から表わされる。

$$PDE = QE \cdot \epsilon_{Geiger} \cdot \epsilon_{pixel}$$

それぞれの要素について説明する。

- QE
量子効率のことであり、MPPC の場合ピクセルに 1 フォトンが入射したときに電子-ホール対が生成される確率のことを示す。波長依存性を持ち、典型的には 0.5~0.8 である。
- ϵ_{Geiger}
生成された電子-ホール対がガイガー放電をおこす確率であり、バイアス電圧依存性をもつ。典型的には 0.6~0.8 である。
- ϵ_{pixel}
受光面に対するピクセルの占める面積の割合。ピクセルごとを絶縁する物質の部分が光に対して不感領域となる。一般的に、ピクセル数が増えるほどこの絶縁部分の面積が増え、 ϵ_{pixel} は小さくなる。典型的には ϵ_{pixel} は 0.3~0.7 である。

3.6.2 PDEの測定方法

PDEの測定方法を図3.14に示す。PDEは光に対する efficiency であるから、測定のためには入射光量をモニターしなければならない。今回 MPPC に対する光量のリファレンスとして 1/2 インチの PMT を用いた。さらに、受光面の面積を同じにするため PMT の光電面に黒テープを貼り、MPPC と同じ 1mm^2 の大きさの入射窓を作った。そして MPPC と PMT を並べ、これら 2 つに同じ光量が入射するように、光源を十分に遠ざけて光を当てた。光源には波長変換ファイバーの端面から出る緑色の光を用いた。データはともに CAMAC の ADC で取り、ADC 分布から求められる光量 (p.e.) について MPPC と PMT の比を出した。今回用いた H.V. 電源ではバイアス電圧を精度良くモニター出来なかったため、バイアス電圧を変えながら、バイアス電圧依存性の大きいノイズレートを指標にし、PDE の測定を行った。

MPPC で得られた光量 (p.e.) の中には熱電子ノイズ、クロストークの影響が含まれる。PDE を求めるためにはこれらの影響を差し引かなければならない。熱電子ノイズについては、測定したノイズレートを使って影響を差し引くことは容易である。また、クロストークはシグナルに附随して出るものであり、ペDESTALには影響を与えない。つまりペDESTAL とシグナルを同時に含む ADC 分布において、クロストークは全イベントに対するペDESTAL の比率を変えない。そこで今回、クロストークの影響を差し引くため、微弱な入射光による ADC 分布に対してポアソン統計を仮定することで、全イベントに対するペDESTAL の比率から光量 (p.e.) を算出した。また、微弱光による MPPC シグナルの光量 (p.e.) がポアソン統計に従うことは実験的にもよく確かめられている。

但し、CPTA 製 MPPC においては ADC 分布のペDESTAL と 1p.e ピークにかなりのオーバーラップが見られ、ペDESTAL の比率を出すことが困難だったため、PMT と同じ方法で (シグナルの Mean)/ゲインから光量 (p.e.) を出した。よって、PDE はクロストーク込みの値となっている。

3.6.3 PDEの測定結果

PDE の測定結果を、ノイズレートとの相関として図 3.15 に示す。

PDE の値は、

$$PDE = \frac{\text{MPPC で得られた光量 (p.e.)}}{\text{PMT で得られた光量 (p.e.)}}$$

から求めてあり、相対的なものである。また、ノイズレートは 0.5p.e. threshold の値である。

図 3.15 から、ノイズレート (バイアス電圧) によって PDE は大きく変化していることがわかる。ガイガーモードにおいて個々のピクセルの QE はほとんど変化しないはずであり、この PDE の変化は主に ϵ_{Geiger} によるものと考えられる。HPK400 以外はノ

イズレートが数百 kHz のレベルで広範囲にわたって、PMT と同等の検出効率があることがわかる。

3.7 パルスリニアリティの測定

今回 MPPC の各サンプルについて 20 で、パルスリニアリティの測定を行った。

3.7.1 MPPC のパルスリニアリティ

パルスリニアリティとは、入射光量 (p.e.) あるいは入射光子数とそれに対して MPPC で得られた p.e. 数とのリニアリティのことである。ここで、

$$N_{p.e.}(\text{入射光量}) = PDE \times N_{\text{photon}}(\text{入射光子数})$$

である。

MPPC において、光量に対するダイナミックレンジはピクセル数に対応する。このダイナミックレンジの中で、どこまでリニアリティが保たれるかはピクセル数とクロストークレートによって決まる。ここで簡単に、クロストークが無い場合の MPPC のリニアリティについて述べる。

一般に、入射光量 $N_{p.e.}$ のときの MPPC で得られる光量 N_{pixel} について考える。いま MPPC が持つピクセル数を m とすると、このとき 1 ピクセルで得られる光量 $N_{p.e.}/m$ はポアソン統計に従う。よって、 $N_{p.e.}/m$ が 0 となる確率、つまりピクセルが光子を検出しない (パルスを出さない) 確率はポアソン統計より $e^{-\frac{N_{p.e.}}{m}}$ となる。これより、1 ピクセルが光子を検出する (パルスを出す) 確率は $1 - e^{-\frac{N_{p.e.}}{m}}$ となるから、MPPC で得られる光量 N_{pixel} は

$$N_{\text{pixel}} = m \times (1 - \exp(-\frac{N_{p.e.}}{m})) \quad (3.4)$$

と表すことが出来る。3.4 式をリニアリティ曲線と呼ぶことにする。

3.7.2 測定方法

青色 LED の光を MPPC に入射させて、入射光量 (p.e.) と得られた光量 (p.e.) との相関を見た。入射光量 (p.e.) は PDE の測定のとおり同様に PMT でモニターした。測定の設定アップは図 3.14 と同じで、光源は波長変換ファイバーではなく青色 LED である。

今回、入射光量 (p.e.) のモニタリングとして、PMT の値を相対的な入射光量 (p.e.) として用いた。さらに、入射光量が小さいときはリニアリティが良く、

$$N_{\text{pixel}} \simeq N_{p.e.}$$

となることから、MPPCで得られる光量 N_{pixel} を使って、入射光量 (p.e.) を絶対値に直した。

3.7.3 測定結果

パルスリニアリティの測定結果として、HPK100Aについて述べる。

ノイズレートが 212kHz, クロストークレートが 1%程度と小さいときの、入射光量 (p.e.)-得られた光量 (p.e.) のプロットを図 3.16 に示す。ここで、 がデータであり、曲線が 3.4 式のプロットである。

図 3.16 より、クロストークレートが小さいときデータは計算と良く一致していることがわかる。このときのリニアリティのずれは入射光量が 20p.e. で 10%, 50p.e. で 20% である。

3.8 HPK400の動作電圧について

これまでの測定において HPK400 のバイアス電圧を 48.2V~49.8V までの領域でテストしてきた。しかし、約 49.3V までの領域でシグナルにサチュレーションが見られなかった。ここで、ノイズレートが 10kHz, クロストークレートが 1%以下のときの入射光量 (p.e.)-得られた光量 (p.e.) のプロットを図 3.17 に示す。ここで、 がデータであり、曲線が 3.4 式のプロットである。

図 3.17 からわかるように、データは計算から大きくずれる結果となった。データは入射光量が 130p.e. のとき計算の半分程度であり、さらにこのまま入射光量を上げ続けると 100 ピクセルに満たない程度でサチュレーションが起きた。このようにデータがリニアリティ曲線から大きくずれ、中途半端なピクセル数でサチュレーションが起こる現象はノイズレートが数百 kHz となるバイアス電圧の領域まで見られた。高いバイアス電圧では 400 ピクセル程度でサチュレーションしており¹、低いバイアス電圧において、正常に動作していないピクセルが存在すると考えられる。例えば、図 3.17 のデータのプロットはピクセル数 65 のときのリニアリティ曲線とほぼ一致する。つまり、このバイアス電圧では 400 ピクセル中 65 ピクセルしか動作していないと考えられる。

これまで、バイアス電圧を 0 から徐々に上げていきオシロスコープでガイガーモードによるシグナルが確認できた点から上をそのサンプルの動作電圧とみなしてきた。しかし今回の測定から、ガイガーモードによるシグナルが見えたとしても、全てのピクセルがきちんと動作しているとは限らないことがわかった。よってそのサンプルが持つピクセル数でのサチュレーションが確認できた点から上を動作電圧とすべきである。なお、このようなふるまいが見られたのは HPK400 だけである。

¹アフターパルスなどの影響があるため電荷量からではサチュレーションを見るのは難しく、ここではパルス波高を見た

3.9 シグナルとフォトピークに異常が見られたサンプル

最後に、シグナルとフォトピークに異常が見られたサンプルについて述べる。HPK100C²というタイプにおいて、青色LEDによる波形(図3.18)に2通りの大きさのパルスが見られた。このときのADC分布は図3.19のようになる。

また、HPK100Cのピクセル数は100,パルス幅は60ns,バイアス電圧は約50Vである。

このタイプのサンプルについてはレーザーを使って、受光面内での光の入射位置依存性を詳しく調べた。(4章参照)

3.10 基礎特性評価のまとめ

今回行った基礎特性評価の温度20℃での結果をサンプルごとにノイズレート-ゲイン相関、ノイズレート-PDE相関としてプロットしたものが図3.20と図3.21である。ここで、PDEはPMTを1とした場合の値である。また、T2Kの要求を満たしている領域を黄色の枠で示した。

これらの結果からHPK100A,HPK100Bの2サンプルにおいて、ノイズレート300kHz~1MHzの領域でT2Kから課せられるゲイン、ノイズレート、PDEの要求を満たしていることがわかる。この領域に対応するバイアス電圧の値はHPK100Aが70.8~71.8V,HPK100Bが71.2~72.2Vであり、ともに1V程度の幅となる。

HPK400についてはゲインは十分であるがPDEが不十分であり、CPTA600についてはPDEは十分でゲインが不十分という結果になった。今回測定したのは試作品の一部であり、400ピクセル以上のサンプルについてもT2Kで使用できる可能性は十分にあると考えられる。

²正式名は1-63-1A

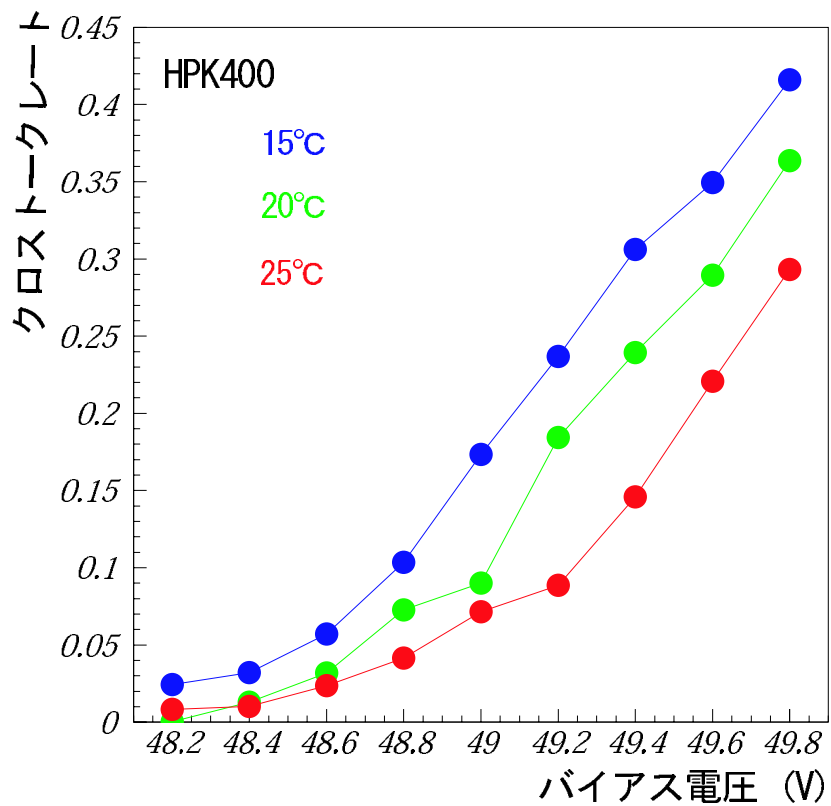
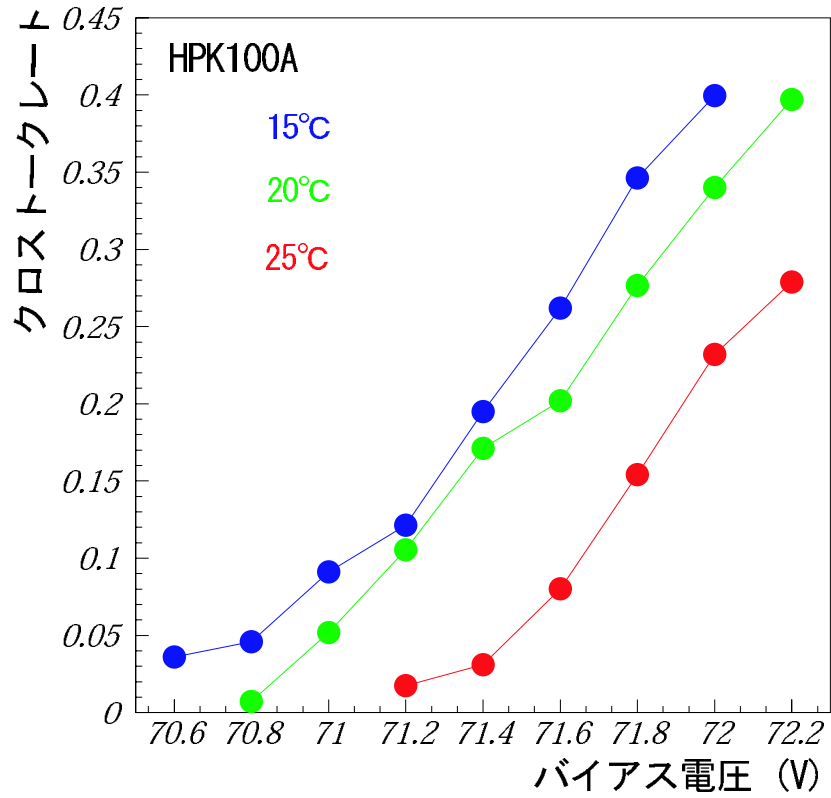


図 3.13: クロストークレートの測定結果

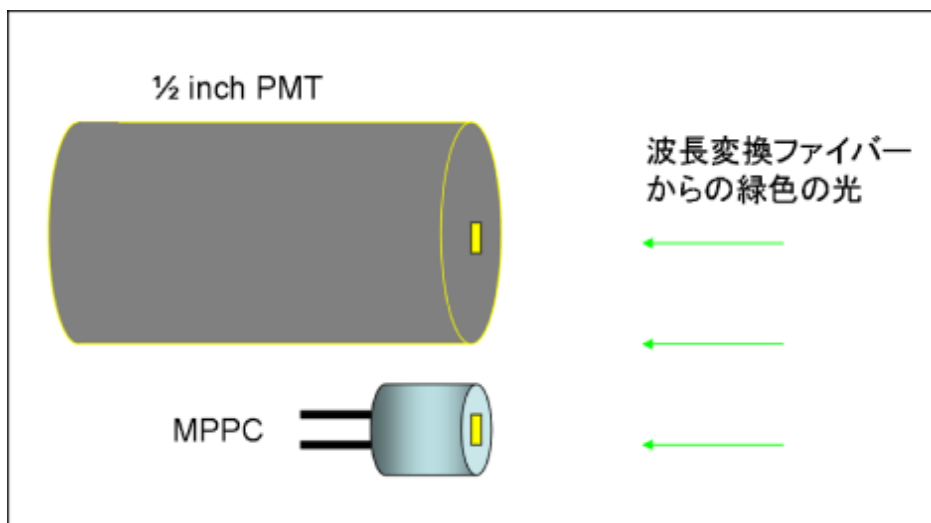


図 3.14: PDE の測定のセットアップ。四角い黄色の部分を受光面である。2つの受光面には一様で同じ強さの光が入射する。

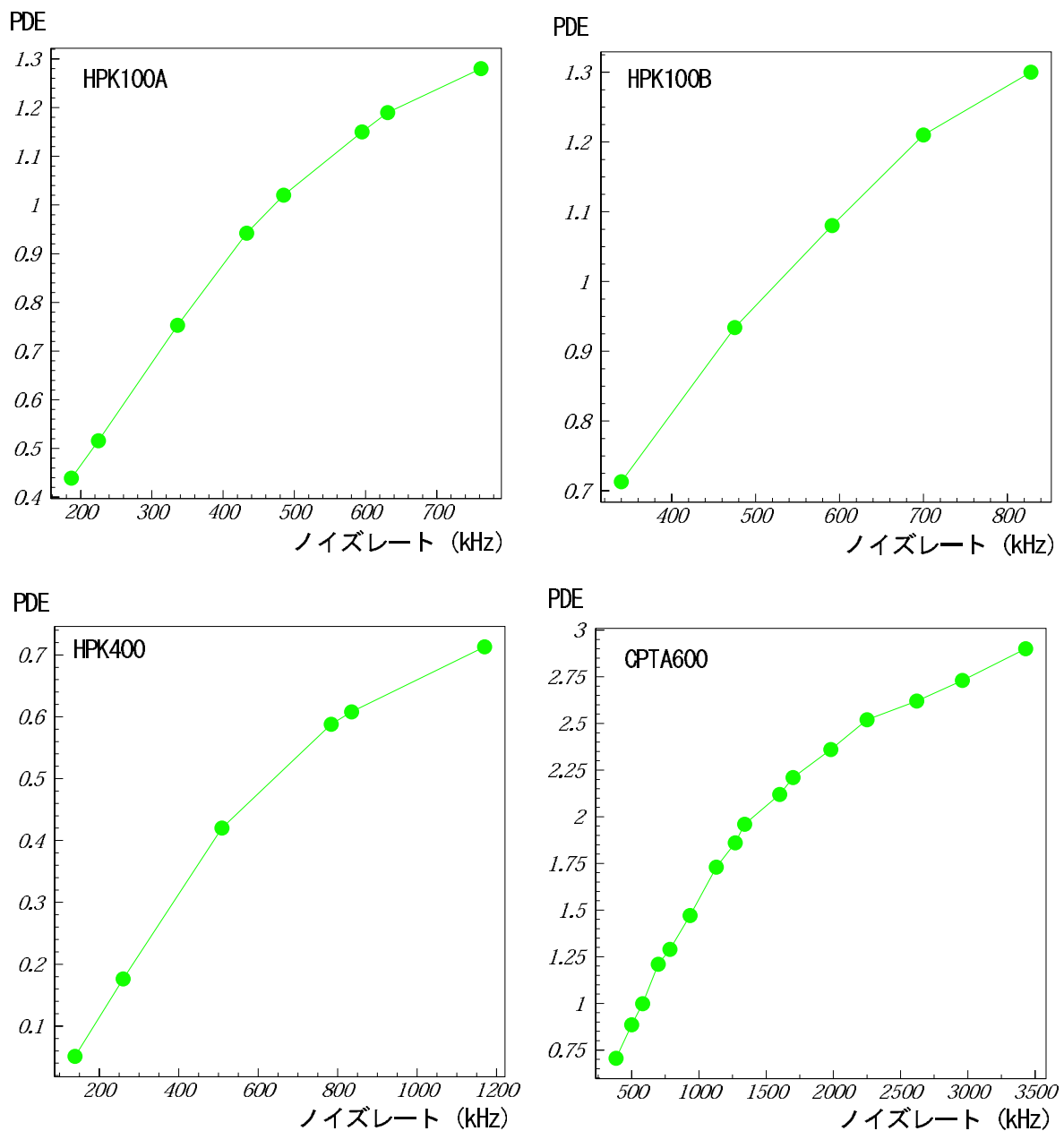


図 3.15: PDE の測定結果。温度は 20 。PDE の値は PMT を 1 としたときのもの。

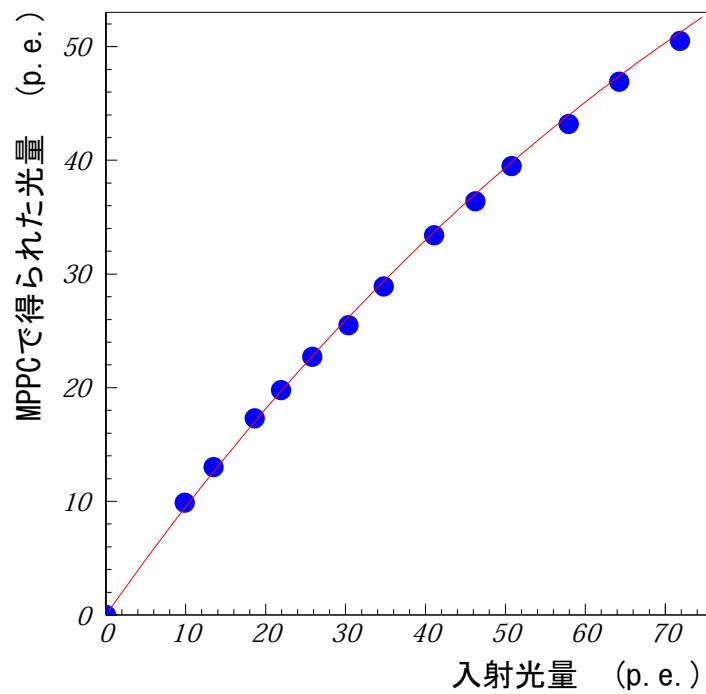


図 3.16: HPK100A のクロストークレートが小さいときの入射光量 (p.e.)-得られた光量 (p.e.) のプロット。 がデータであり、赤の曲線が 3.4 式のプロット。温度は 20 である。

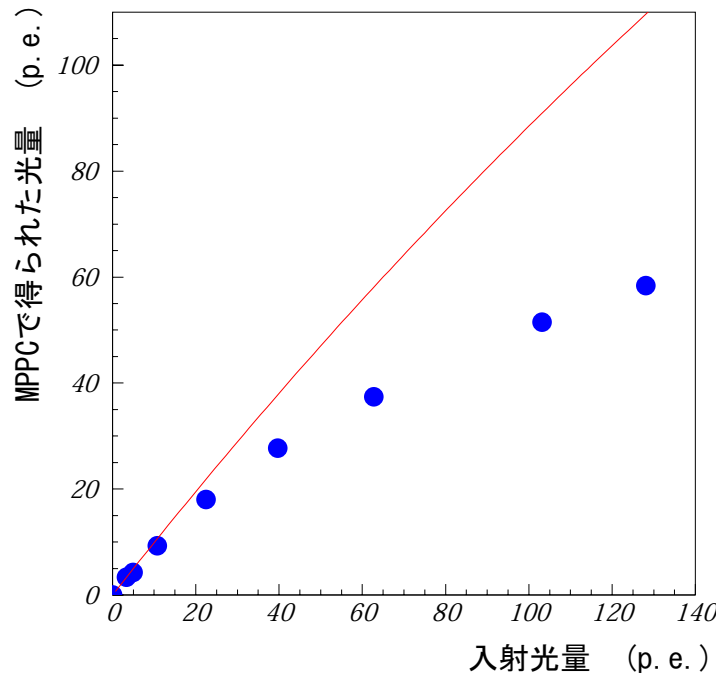


図 3.17: HPK400 のクロストークレイトが小さいときの入射光量 (p.e.)-得られた光量 (p.e.) のプロット。 がデータであり、赤の曲線が 3.4 式のプロット。温度は 20 である。

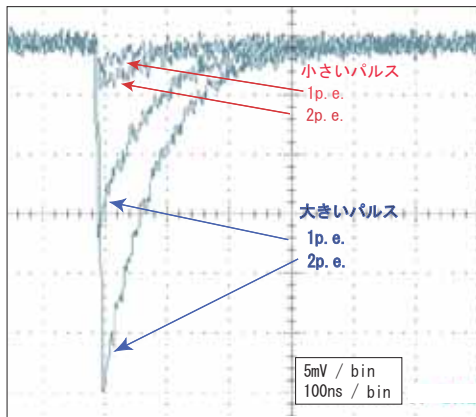


図 3.18: HPK100C の青色 LED による波形。

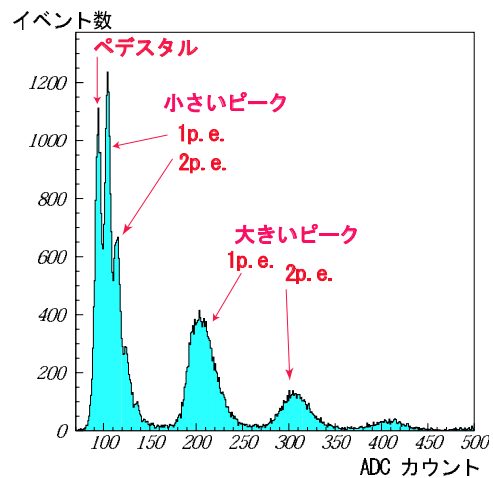


図 3.19: HPK100C の青色 LED による ADC 分布。2 通りの大きさのフォトピークが見られる。

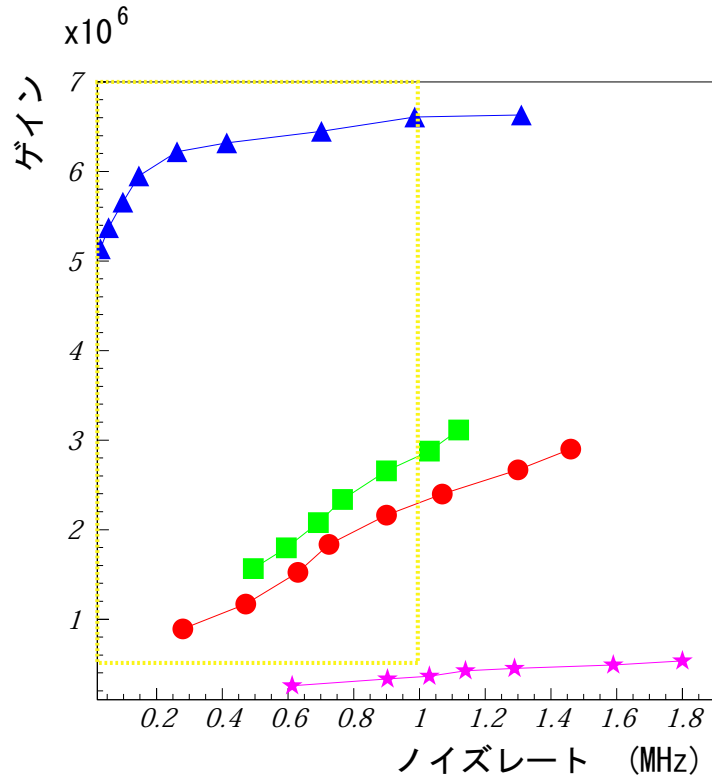


図 3.20: それぞれのサンプルのノイズレート-ゲイン相関。 :KPK100A , :HPK100B , :HPK400 , :CPTA600、温度は 20 。黄色の枠内が T2K の要請を満たす領域である。

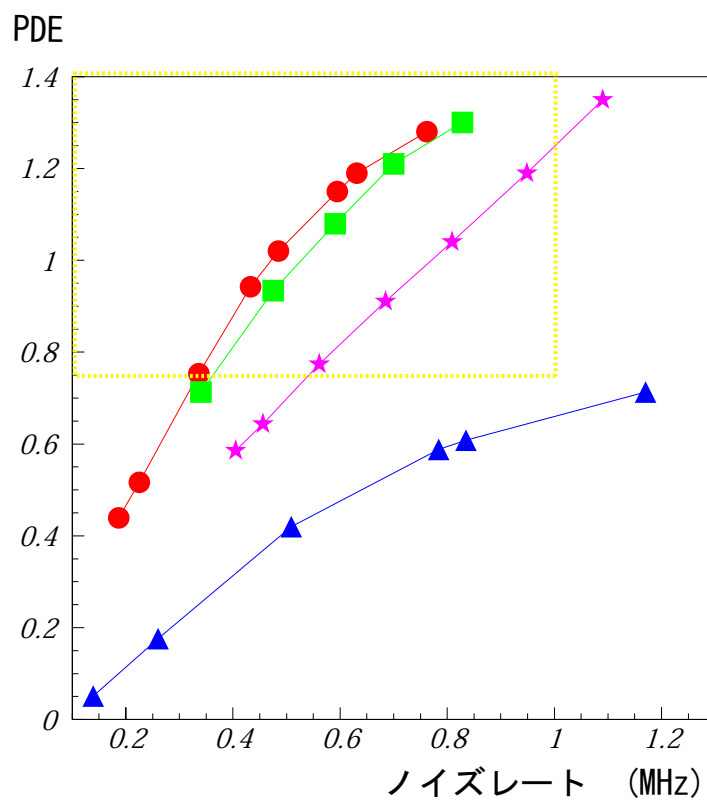


図 3.21: それぞれのサンプルのノイズレート-PDE 相関。 :KPK100A , :HPK100B , :HPK400 , :CPTA600、温度は 20 。黄色の枠内が T2K の要請を満たす領域である。

第4章 レーザーによるテスト

4.1 動機

これまで、受光面 (全ピクセル) に光を一様に当てて MPPC の性能をテストしてきた。正しく動作しているサンプルに対しても、実際に全てのピクセルが正しく動作しているかどうかを確認することは重要である。今回、1ピクセル以下のサイズに絞ったレーザー光を受光面に入射し、光の入射位置ごとの MPPC シグナルを見ることで1ピクセル内及びピクセルごとの応答を調べた。

4.2 測定したサンプル及び測定項目

これまでの測定において正しく動作していたタイプ (HPK100A) と異常がみられたタイプ (HPK100C) の2つについて、前者はピクセルごとの動作確認、後者は異常の原因究明という目的でレーザーによるテストを行った。

4.2.1 HPK100A

全てのピクセルが本当に正しく動作しているかの確認を行った。測定項目は

- 1ピクセル内での Efficiency 分布
- ピクセルごとの Gain および Efficiency のばらつき

である。

4.2.2 HPK100C

このタイプの MPPC において、受光面に一様に光を入射したときに2通りの大きさのパルスが見られた (第3章参照)。これについて、受光面内での光の入射位置によってゲインが異なっているのではないかと考え、レーザー光を細かくスキャンしてそれに対する MPPC の応答を見た。

4.3 セットアップ

レーザーによるテストのセットアップを図 4.1 に示す。

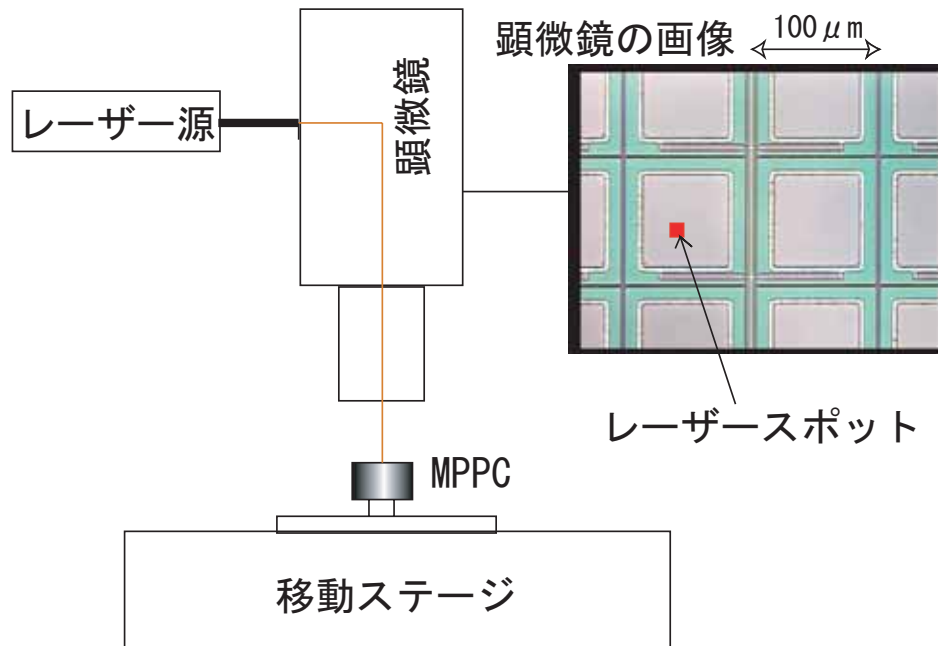


図 4.1: レーザーによるテストのセットアップ

レーザーのスポットサイズは約 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ であり、100 ピクセルの MPPC に対してピクセル内及びピクセルごとのふるまいを調べるのに充分小さいと言える。レーザー源は浜松ホトニクス製半導体レーザーで、波長 859nm 、パルス幅 50ps である。位置スキャンを行うため、 $1 \mu\text{m}$ の精度をもつ移動ステージを使った。CAMAC の ADC で、レーザーの発光タイミングで MPPC シグナルのデータを取った。今回、恒温槽は用いなかったが室温は常時 25 だった。

4.4 HPK100A

4.4.1 レーザーによるシグナルと ADC 分布

レーザー光によるシグナルを図 4.2 に示す。ここで見えている波形はいくつかのイベントの重ね合わせである。レーザー光により見られるのはほとんどが特定の 1 ピクセルによる 1p.e. パルスである。

また、レーザー光による ADC 分布を図 4.3 に示す。今回のレーザーテストにおいて、

Efficiency を MPPC シグナルの ADC 分布から、

$$Efficiency = \frac{0.5p.e.以上のイベント数}{全イベント数}$$

で定義した。なお、レーザー光の強度はモニターされていないため今回測定した Efficiency は絶対的なものではない。レーザー光による ADC 分布を図 4.3 に示す。

ADC 分布において、2p.e. 以上のイベントも多く見えていることがわかる。レーザー光は 1 ピクセル内に入射しており、またアクシデンタルにゲートに入る熱電子ノイズの影響で 2p.e. 以上に見えるイベントは少ない。例として図 4.3 のときのノイズレート 600kHz, ゲート幅 100ns を使うと、熱電子ノイズがゲートに入る確率は

$$(600 \times 10^3) \times (100 \times 10^{-9}) = 0.06$$

から、6%である。つまり、熱電子ノイズの影響で 2p.e. 以上に見えるイベントは大まかに言って 1p.e. のイベントの 6%程度である。よって、ADC 分布における 2p.e. 以上のイベントのほとんどはクロストークによるものと考えられる。

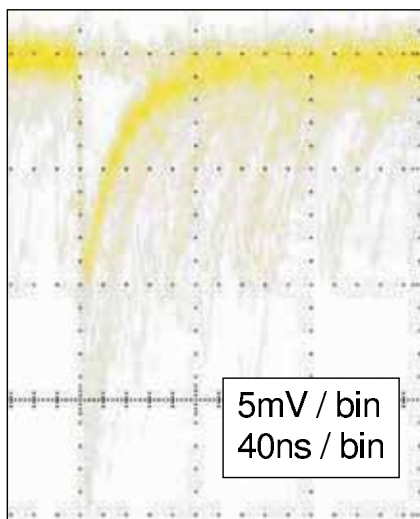


図 4.2: HPK100A のレーザーによるシグナル。主に見られるのは特定の 1 ピクセルからのシグナル (1p.e. シグナル)。

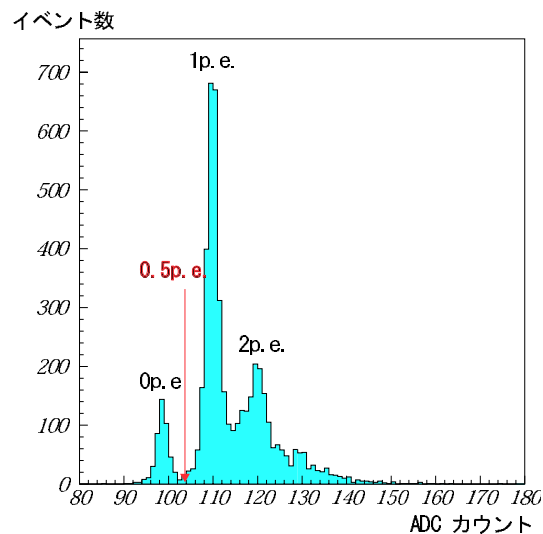


図 4.3: HPK100A のレーザー光による ADC 分布

4.4.2 1 ピクセル内での Efficiency 分布

HPK100A について、1 ピクセル ($100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$) 内でレーザーを 2 次元スキャンし、ポイントごとの Efficiency を調べた。スキャンはある 1 ピクセルについて $10\mu\text{m}$ ピッチで計 10×10 ポイント行った。

スキヤンの結果を図 4.4 に示す。

図 4.4 から、真ん中の $60\mu\text{m}\times 60\mu\text{m}$ 辺りに efficiency がフラットな領域を持っていることがわかる。また、HPK100A の 1 ピクセルにおいて、光に対して有感な領域は $70\mu\text{m}\times 70\mu\text{m}$ である (図 4.5)。これらのことから、1 ピクセル内の有感領域のほぼ全域において一様な感度で光を受光できていることがわかった。

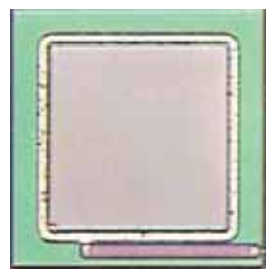
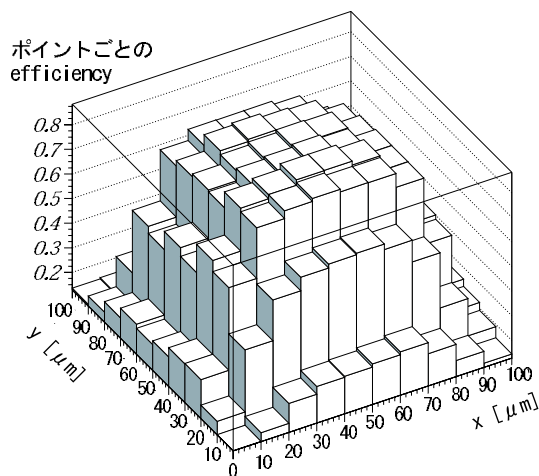


図 4.5: HPK100A の 1 ピクセル

図 4.4: HPK100A の 1 ピクセル中の Efficiency 分布

4.4.3 ピクセルごとの Gain 及び Efficiency のばらつき

HPK100A について、ピクセルごとに中心にレーザーを入射し、ピクセルごとの Gain, Efficiency を調べた。スキヤンは全ピクセル (10×10) 行った。

スキヤンの結果を図 4.6、図 4.7 に示す。ここで、図の縦軸は Efficiency, Gain とともに全ピクセルの平均値を 1 としたときの相対的な値である。

この結果から、ピクセルごとのばらつきは

$$Efficiency : \frac{R.M.S.}{Mean} = 2.5\%$$

$$Gain : \frac{R.M.S.}{Mean} = 3.6\%$$

と求まり、非常によい精度でピクセルごとの応答が揃っていることが確認された。

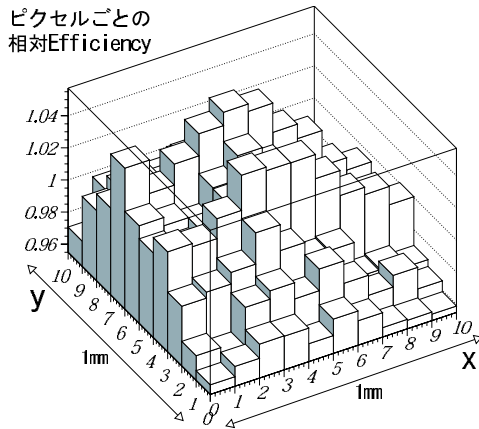


図 4.6: HPK100A のピクセルごとの相対 Efficiency 分布

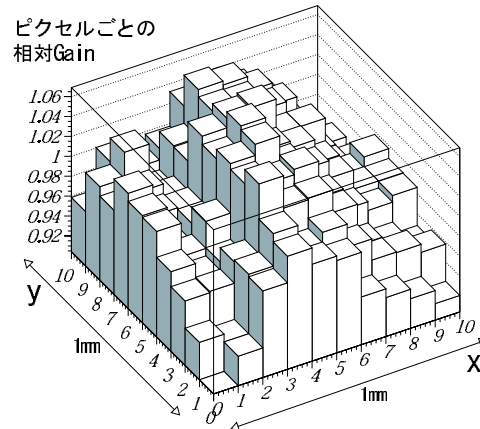


図 4.7: HPK100A のピクセルごとの相対 Gain 分布

4.5 異常が見られたサンプルに対するレーザースキャン

受光面に光を一様に入射したとき、HPK100C は 2 通りの大きさのパルスを出す。この原因として、受光面内での位置によって電子の増幅率が異なっている可能性が考えられる。この位置による電子増幅率の違いがピクセルごとの違いなのかピクセル内における違いなのかを把握するため、まずレーザ光を受光面内の適当な位置に入射し、そこでの MPPC シグナル (図 4.8) と ADC 分布 (図 4.9) を取った。ここでもこれまでと同様、2 通りの大きさのパルスが見られた。レーザースポットサイズは約 $10\mu\text{m}$ であるから、光は 1 ピクセル内の小さい範囲に入射している。よって、異常は 1 つのピクセル内で存在していると考えられる。

よって今回、1 ピクセル内でのふるまいを詳しく理解すべく、1.5 ピクセルの範囲 ($150\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$) を $10\mu\text{m}$ ピッチで計 15×15 ポイントのレーザースキャンを行った。そして入射ポイントごとのペDESTAL、小さいパルス、大きいパルスの比率を ADC 分布 (図 4.9) から以下のように出した。

$$\text{ペDESTALの比率} = \frac{\text{イベント数} (\leq c1)}{\text{全イベント数}}$$

$$\text{小さいパルスの比率} = \frac{\text{イベント数} (c1 \sim c2)}{\text{全イベント数}}$$

$$\text{大きいパルスの比率} = \frac{\text{イベント数} (\geq c2)}{\text{全イベント数}}$$

ここで、 $c1$ はペDESTALピークと小さいパルスのピークの間接点、 $c2$ は小さいパルスのピークと大きいパルスのピークの間接点である。

結果を図 4.10 に示す。また、HPK100C の 1 ピクセル中の有感領域は $70\mu\text{m} \times 70\mu\text{m}$ である。

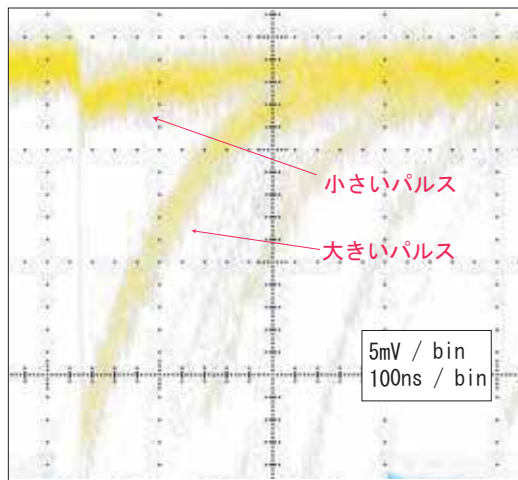


図 4.8: HPK100C のレーザーによるシグナル

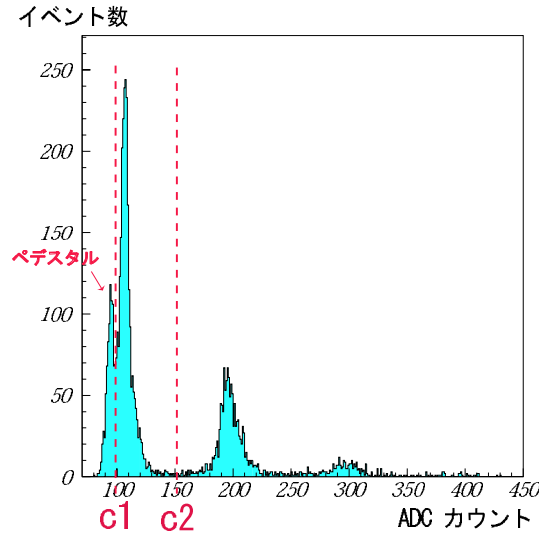


図 4.9: HPK100C のレーザーによるADC 分布

図 4.10 より、ペDESTアルと小さいパルスの位置分布はそれぞれ 1 ピクセル中の不感領域と有感領域にほぼ一致する。しかし大きいパルスの位置分布については、有感領域と不感領域との境界付近に集中している。

この結果より、HPK100C において 2 通りの大きさのパルスが見られた原因が、ピクセルの有感領域内での中央部分とエッジ部分との電子増幅率の不連続な違いにあることがわかった。

しかし、これまでの結果はある特定のバイアス電圧でのものであり、異なるバイアス電圧では LED 光による全面照射において、大きいパルスの中でも 2 通りの大きさに分かれた分布が見られる (図 4.11)。よって今回と異なるバイアス電圧において、大きいパルスを出すと考えられるエッジ部分内でさらに位置ごとの電子増幅率の違いが存在している可能性がある。

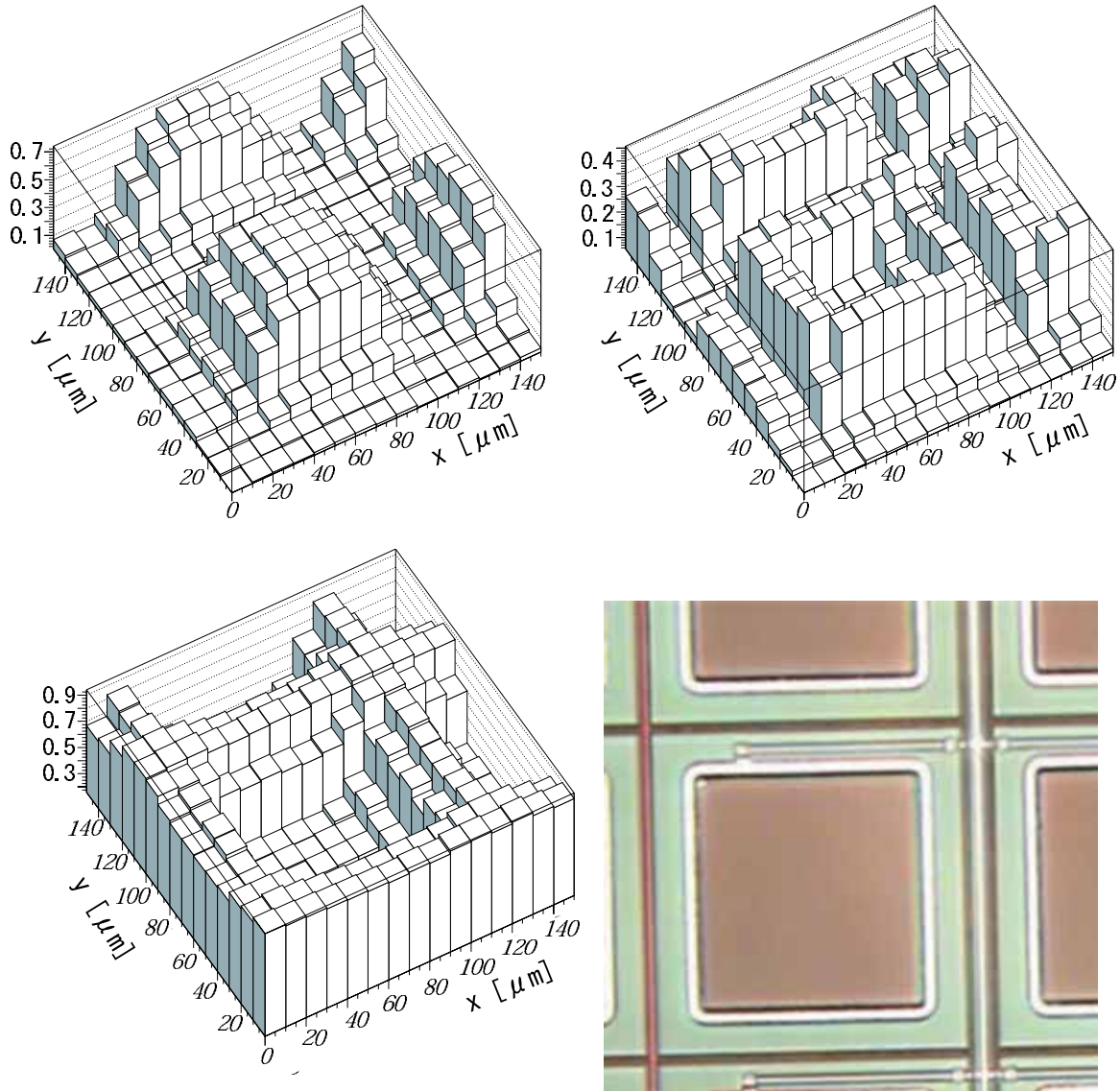


図 4.10: HPK100C の 1.5 ピクセル範囲のレーザースキャンの結果。縦軸はそれぞれシグナルにおける、小さいパルス (左上), 大きいパルス (右上), ペDESTAL (左下) の比率。右下はスキャンした領域の画像。

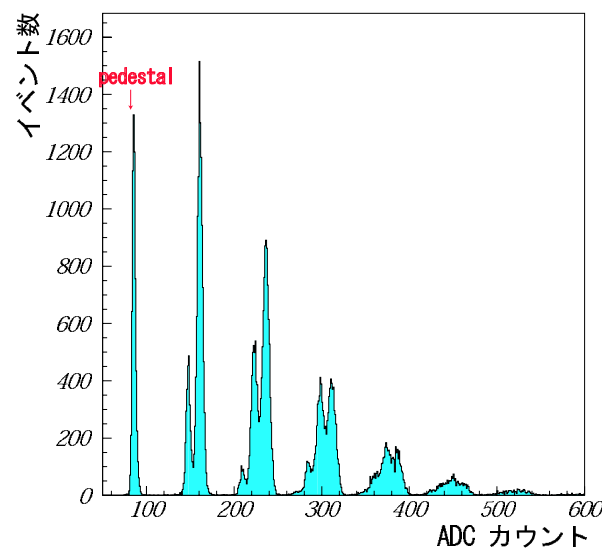


図 4.11: HPK100C の、LED で全ピクセルに照射したときの、あるバイアス電圧での ADC 分布。

第5章 ビームによるシンチレータからのファイバー読み出しのテスト

高エネルギー加速器研究機構 12GeV 陽子シンクロトロン の東カウンターホール T1 ビームラインにて、シンチレータの波長変換ファイバー+MPPC 読み出しのテストを行った。

5.1 動機

T2K 実験のシンチレータ飛跡検出器において光検出器 MPPC には以下のことが要求される。

シンチレータからの波長変換ファイバー読み出しにおいて

- MIP により 5p.e. 以上の光量が得られること
- p/π の粒子識別ができること

これらの要求を満たしているかどうかの評価を行うべくビームによる MPPC を使ったシンチレータからのファイバー読み出しのテストを行った。

5.2 セットアップ

ビームテストのセットアップを図 5.1 に示す。

ビームライン上にシンチレータを 4 層並べてそれぞれに波長変換ファイバーを通し、片側から MPPC で、もう片側からリファレンスとして光電子増倍管で読み出しを行う。セットアップの構成要素について簡単に説明する。

- ビーム
粒子は主に陽子とパイオン。運動量は $0.5\text{GeV}/c \sim 1.4\text{GeV}/c$ の範囲で変えることができる。
- シンチレータ
プラスチックシンチレータで、サイズは $1.3\text{cm} \times 2.5\text{cm} \times 50\text{cm}$ 。

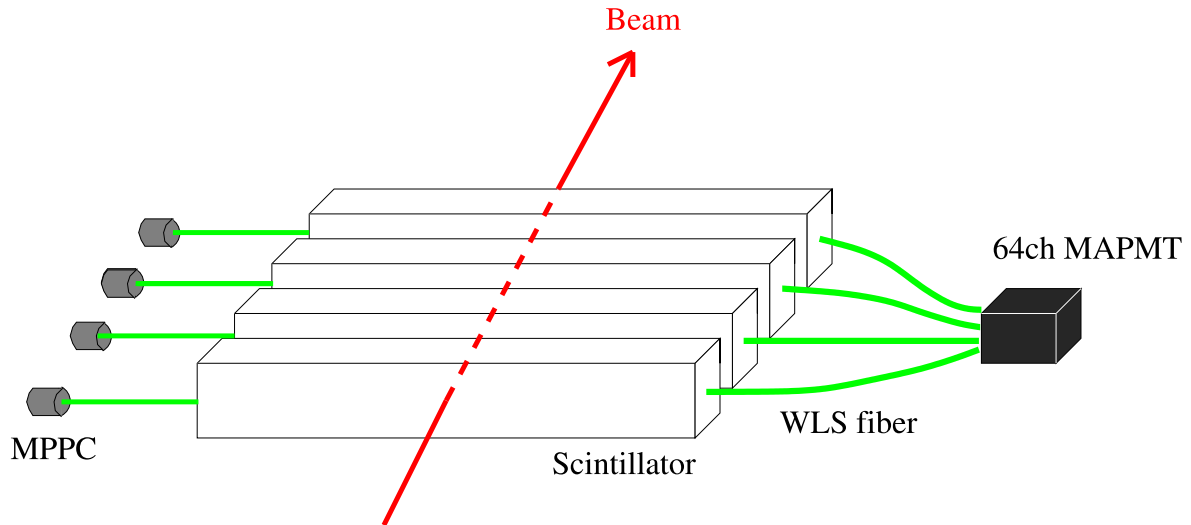


図 5.1: ビームテストのセットアップ

- 波長変換ファイバー (Wave Length Shifting fiber)
クラレ製 Y11。マルチクラッドで太さは $1\text{mm}\phi$ 。
- 光電子増倍管 (MAPMT)
浜松ホトニクス製 64ch マルチアノードタイプ。4ch だけを用いた。
- MPPC
HPK100A \times 4 及び CPTA600 \times 4 をそれぞれテストした。

また、MPPC に対しては CAMAC の ADC で、MAPMT に対しては SciBar 検出器で使われていた VME の読み出しシステムによってデータを取得した ([1])。

さらに、ビームライン上にトリガーカウンタと TOF カウンタを設置した。トリガーカウンタにより、ビームが必ずシンチレータ 4 層を貫いていることを要求し、TOF カウンタにより、通過した粒子が陽子であるかパイオンであるかを識別した。そして、両カウンタのコインシデンスのタイミングでデータを取得した。このときのカウンtrate はスピル当たり ~ 100 カウントだった。また、ビームライン上の温度はテスト中常時モニターした。結果、13~18 の範囲で変化が見られた。データごとに温度を記録し、解析はこの温度変化の影響も含めて行った。

5.3 MPPC とファイバーの位置合わせ

今回、 $1\text{mm}\phi$ のファイバーからの光を MPPC の 1mm^2 の受光面で読み出すため、MPPC とファイバーの位置合わせが重要となる。

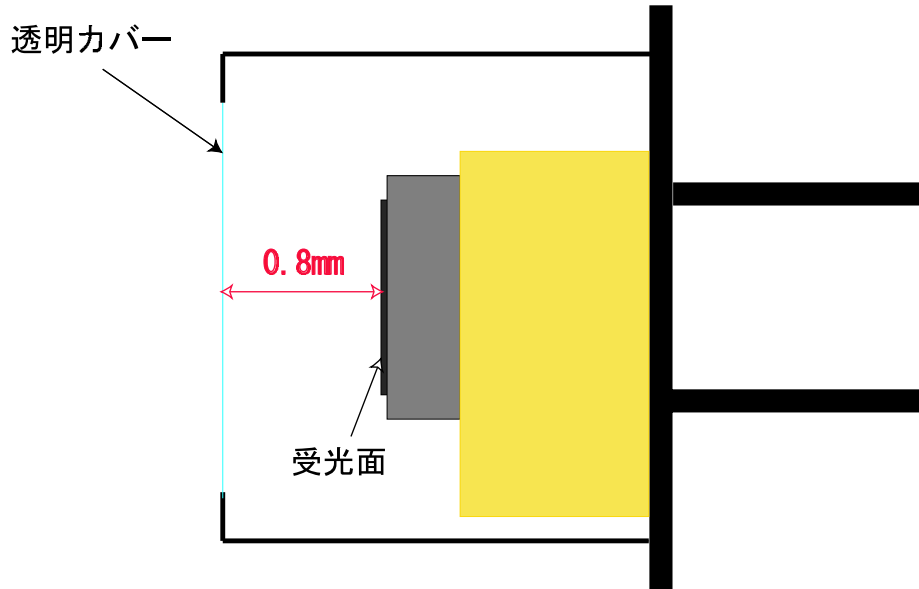


図 5.2: HPK 製 MPPC のパッケージ構造

まず、HPK 製 MPPC のパッケージ構造について述べる。

図 5.2 のように、HPK 製 MPPC は受光面とそれを保護するための透明カバーの間には 0.8mm のギャップが存在する。

このため、HPK 製 MPPC においてはファイバーを受光面に対して 0.8mm 以上近づけることができない。よって、このギャップによるファイバー軸方向 (縦方向) の光量のロスが生じることになる。

さらに、パッケージに対する受光面の横方向の位置は精度良く合わされていない。よってサンプルごとに、ファイバー軸に垂直な面内 (横方向) でのファイバーの位置合わせが必要となる。

今回ファイバーの横方向の位置合わせのため、図 5.3 で示したような固定具を用いた。

まず、図 5.3 の白い円形のパーツに MPPC をぴったりとはめ込む。MPPC のパッケージについている突起によって、MPPC を円形のパーツに対して回転しないように固定することができる。次に、立方体状のパーツの孔 (1mm ϕ) にファイバーを通し、黒いネジを使ってそれを円形のパーツに対して固定する。ファイバーの縦方向の位置は、ファイバーを孔の奥まで差し込むことで一意的に決まる。よって、この方法でファイバーを MPPC に対して固定することが出来る。

次に、ファイバーの横方向の位置を決定しなければならない。パッケージ構造上、幾何学的に位置を決めるのは難しいと考え、MPPC シグナルの大きさ、つまりどれだけロスなくファイバーからの光を検出できるかで位置を決定した。方法はまずファイバーを、端面の少し手前で台に固定しその先に立方体状のパーツをはめる。ファイバーは立方体状のパーツから少しはみ出る程度にし、もう一端には LED による光を入射する。

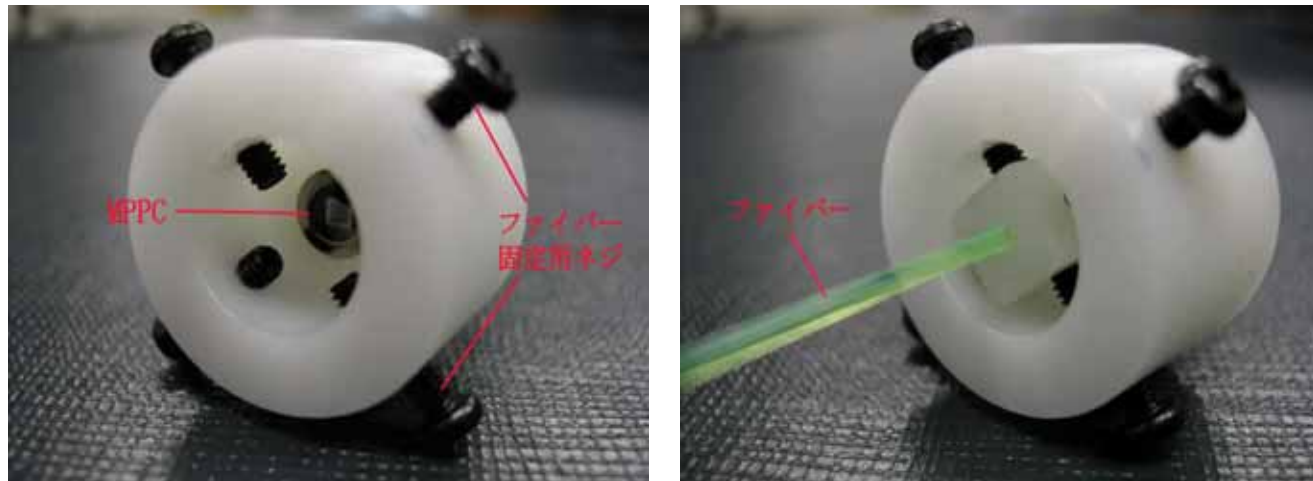


図 5.3: ビームテストで用いた HPK 製 MPPC のファイバーアラインメント用固定具。白いパーツと黒いネジはともにプラスチック製である。

そして円形のパーツにはめ込まれた MPPC を、透明カバーがファイバー端面 (パーツが付いた方) に接した状態で、移動ステージを使って横方向に 2 次元スキャンする。これにより、MPPC シグナルの光量が最大の点で、黒いネジを使って MPPC とファイバーを固定した。結果的に、この横方向のアラインメントのずれによって、サンプルにより最大で 20% の光量のロスが生じた。

これらの、HPK 製 MPPC における光量のロスは、現段階のサンプルのパッケージ構造によるものでデバイス自体の性能とは無関係である。また、パッケージ構造を光量のロスがないように改良することは十分に可能である。

今回のビームテストのために、ファイバー読み出しにおける MPPC の effective PDE の測定を行った。effective PDE とは、透明カバーと受光面とのギャップによる光量のロスを含めた PDE である。測定のセットアップを図 5.4 に示す。

測定は、移動ステージで MPPC と PMT をファイバーの横方向の平面内でスキャンし位置を合わせた状態で行った。また、この測定においてクロストークの影響は差し引かれていない。測定結果をビームテストで用いたサンプルである HPK100A の 4 つのサンプルについて示す (図 5.5)。縦軸は PMT との比 $\text{MPPC(p.e.)}/\text{PMT(p.e.)}$ である。

この結果と既に測られた PDE (図 3.15) から、受光面と透明カバーとのギャップにより 50% 程度の光量のロスが存在していることがわかった。

CPTA 製 MPPC においては、受光面はパッケージの中心に精度良く配置されており、また透明カバーと受光面間のギャップも小さい。従ってファイバーを幾何学的にパッケージの中心にアラインメントすれば理想的には光量をほぼロスせずに読み出すことが出来ると考えられる。しかし実験的にはまだ確認されていないため、検証が必要で

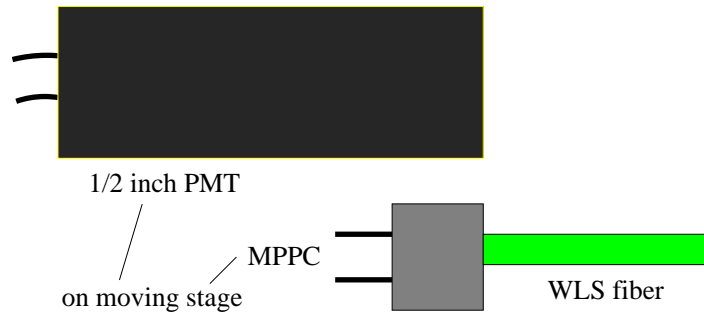


図 5.4: HPK100A のファイバー読み出しにおける effective PDE の測定。移動ステージで MPPC 及び PMT をファイバーの横方向の平面内でスキャンし位置を合わせて、光量のデータを取った。温度は 15 で、ファイバー径は 1mm^2 である。

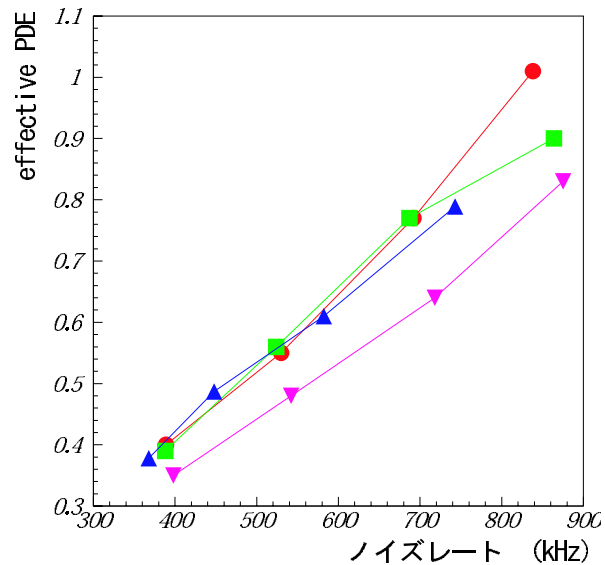


図 5.5: HPK100A のファイバー読み出しにおける effective PDE。クロストークの影響は差し引かれていない。縦軸は PMT との比 $\text{MPPC}(\text{p.e.})/\text{PMT}(\text{p.e.})$ である。温度は 15 である。

ある。

5.4 測定手順

まず動機の1つ目である、「MPPCでMIPにより5p.e.以上の光量が得られるかどうか」を確かめるべく、MIPによるMPPCシグナルを見た。パイオンは運動量1.2GeV/cでMIP粒子とみなせるから、ビームの運動量を1.2GeV/cに設定してデータを取り、TOFカウンタのデータでパイオンによるイベントだけを抜きだせば、MIP粒子によるMPPCシグナルのADC分布を得ることが出来る。

次に動機の2つ目である、「MPPCで p/π の粒子識別ができるかどうか」のテストを行なった。

そもそも陽子とパイオンの識別が可能なのは、同じ運動量であっても陽子とパイオンで物質中を通過したときのエネルギー損失が異なり、よってシンチレータの発光量に違いが生じるからである。この発光量の違いを見分けるためには読み出す光検出器が、得られる光量(p.e.)に対して良い分解能(R.M.S/Mean)をもつことが要求される。今回0.5~1.2GeV/cの運動量のビームに対し、MPPCシグナルにおける陽子とパイオンのADC分布を比較することにより、 p/π の粒子識別が可能かどうかを評価した。

5.5 測定結果

5.5.1 ビームによる生のMPPCシグナル

ビームによる生のMPPCシグナルを図5.6に示す。

4つのチャンネル全てにおいて、ビームによるMPPCシグナルが確認された。

5.5.2 MIPによる光量

今回のビームテストにおいて、リファレンスとして用いたMAPMTでMIP(1.2GeV/cの π)により平均 18.0 ± 0.8 p.e.の光量が得られた。1つのチャンネルの光量(p.e.)分布を図5.7に示す。なおMAPMTのゲインはチャンネルごとに、LED光によるADC分布の1p.e.ピークから求めた。

MPPCでMIPにより得られる光量はPDEによって変化し、これが小さいと「MIPにより5p.e.以上」という要求を満たさない可能性がある。PDEはバイアス電圧を上げれば大きくすることが出来る。しかしバイアス電圧を上げると、同時にノイズレート、クロストークレートも増加し、T2Kからの要求を満たさなくなる。実際にT2Kで使用するときには全ての要求を満たすようバイアス電圧を設定しなければならない。まず、HPK100Aの結果について述べる。

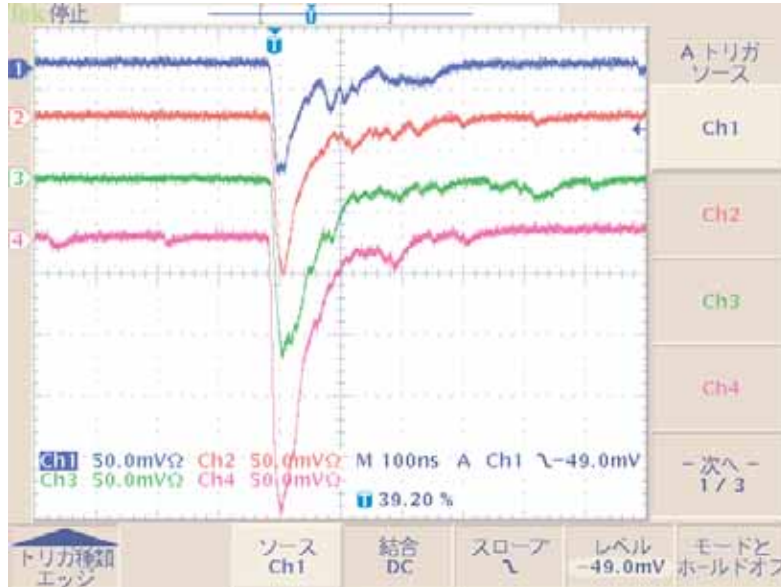


図 5.6: ビームによる生の MPPC シグナル。4ch 全て HPK 製 100A である。

今回のビームテストではバイアス電圧の設定にあたり、最低ラインとしてノイズレート 1MHz 以下であることを要求し、MPPC のサンプルごとに 2 つのバイアス電圧 (ノイズレートが 300kHz 付近と 500kHz 付近) で MIP による光量のデータを取った。

用いた 4 つのサンプルの MIP に対する、ファイバー読み出しによる effective PDE の値から期待される光量と実際に得られた光量とを比較した (図 5.8)。光量は両方ともクロストーク込みの値である。

図 5.8 から、期待される光量と実際に得られた光量にはずれが生じた。この原因については、主に effective PDE の測定誤差が挙げられ、さらに横方向のファイバーのアライメントのずれによる光量のロスの影響が考えられる。

HPK100A の最も大きい光量が得られた点について、MIP により得られた光量分布を図 5.9 に示す。このとき、温度は 15 でノイズレートは 560kHz、得られた光量 (分布の Mean) は 13.3p.e. だった。

なお、このときのクロストーク率は 0.19 であり、この値はビームテスト時と実験室での測定でよく一致した。いま単純にクロストークが同じ確率で連鎖的に起こっていくとすると、このクロストークの影響で 1p.e. は平均して、

$$1 + 0.19 + 0.19^2 + 0.19^3 + 0.19^4 + \dots = \frac{1}{1 - 0.19} = 1.23(p.e.)$$

に増加して見え、得られる光量 (p.e.) も 1.23 倍に増加して見えることになる。よって、クロストークの影響を差し引いたときの光量は

$$\frac{13.3}{1.23} = 10.8(p.e.)$$

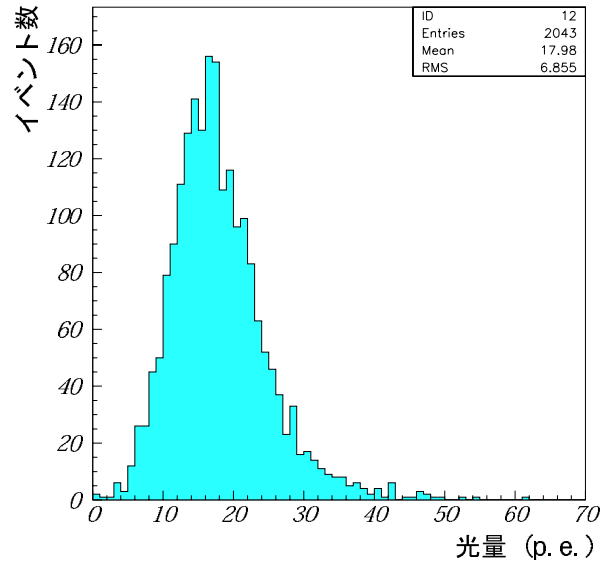


図 5.7: MIP による MAPMT の光量分布。

となる。よって、この点において十分に要請を満たしていると言える。さらに、図 5.9 において得られた光量が 5p.e. 程度に相当する MPPC のノイズレートは 4 サンプルとも 300kHz~400kHz 辺りである。ノイズレート (バイアス電圧) を上げると PDE も増加するから、ノイズレートで 400kHz~1MHz の幅広い領域において、HPK100A は要請を満たしていることがわかる。

次に CPTA600 の結果について述べる。

HPK100A と同様、CPTA600 の 4 サンプルのデータの中でノイズレート 1MHz 以下で最も大きな光量が得られたものについて、MIP により得られた光量分布を図 5.10 に示す。このとき、温度は 15 でノイズレートは 824kHz、得られた光量 (分布の Mean) は 22.0p.e. だった。

この CPTA600 のサンプルにおいて、ファイバーと受光面間の光量のロスが無いとした場合、ノイズレートが 824kHz でのクロストークを含めた PDE は 1.3 である。よって、MIP により期待される光量 (p.e.) は、

$$\text{MAPMT での光量 (18.0p.e.)} \times \text{PDE(1.3)} = 23.4p.e.$$

である。CPTA600 に対しても HPK100A の場合と同様、PDE の値には測定誤差が存在し、またファイバーと受光面間での光量のロスの可能性もあるため、これらについてさらに詳しく測定しないと厳密な評価は難しい。しかし少なくともここで得られた値は、これまでの測定と矛盾しないと言えることができる。

この結果から、クロストークを差し引いても十分に「MIP により 5p.e. 以上の光量が得られる」という T2K からの要請を満たしていることがわかる。

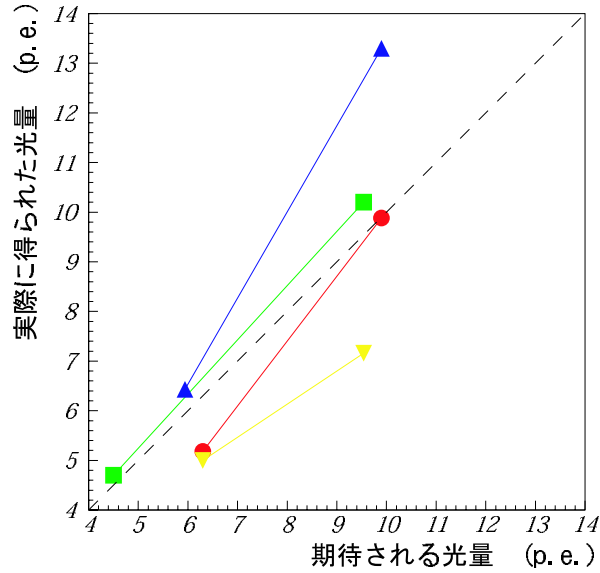


図 5.8: HPK100A の、MIP により期待される光量と実際に得られた光量の比較。両方ともクロストーク込みの値である。

5.5.3 p/π の粒子識別

シンチレータ 1 層による p/π の粒子識別度合いを評価する¹。MAPMT における、陽子とパイオンの光量分布をビームの運動量ごとに示す (図 5.11)。また、それぞれの光量分布の Mean と R.M.S. を運動量ごとに示したのが図 5.12 である。([3])

次に HPK100A 及び CPTA600 における、陽子とパイオンの光量分布をビームの運動量ごとに示す (図 5.13、図 5.14)。また、ノイズレートは HPK100A が 560kHz、CPTA600 が 824kHz で、温度は 15 である。これは MIP で最大の光量が得られたものと同じサンプル、同じ設定である。また、それぞれの光量分布の Mean と R.M.S. を運動量ごとに示した (図 5.15、図 5.16)。

ここで、MAPMT 及び MPPC2 つの p/π の識別度合いを比較するため、以下のような p/π 識別度を定義する。

$$p/\pi \text{ 識別度} = \frac{\text{Mean}(p) - \text{Mean}(\pi)}{R.M.S.(p) + R.M.S.(\pi)}$$

MAPMT 及び MPPC2 つの p/π 識別度をビームの運動量ごとにプロットしたものを図 5.17 に示す。

図 5.17 からわかるように、MPPC の p/π の識別度は MAPMT より低い値となった。しかし、MAPMT がファイバー読み出しにおいて既に確立された方法による値であるのに対し、今回 MPPC においてはファイバーと受光面とのアラインメント及びバイア

¹実機ではシンチレータ複数層のデータを使ってサンプリングを行う

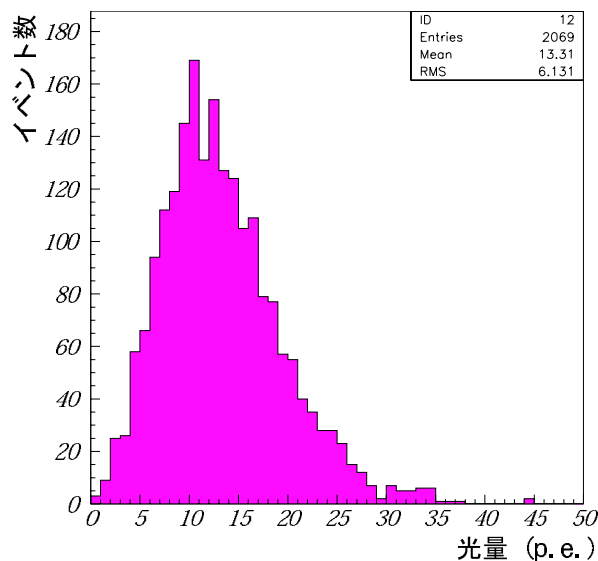


図 5.9: MIP による HPK100A の光量分布。温度は 15 でノイズレートは 560kHz。Mean は 13.3p.e.。

ス電圧の設定値が最適化されていない。特に HPK100A において、現在のパッケージ構造によりファイバーと受光面間での光量のロスが 50%程度存在すると考えられ、このロスを出来るだけ小さくすることで p/π の識別度をかなり上げられることが期待できる。

最後に、MIP から 0.5GeV/c の陽子までの光量において MPPC がリニアリティを保っているかを検証した。これまでと同じ、HPK100A のノイズレート 560kHz と CPTA600 のノイズレート 824kHz でのデータを用いた。光量のリファレンスとして MAPMT の値を使い、MAPMT の光量 (p.e.)-MPPC の光量 (p.e.) のプロットを作った (図 5.18)。また、この領域での MAPMT の光量に対するリニアリティは保証されている。

図 5.18 より、MPPC において 0.5GeV/c の陽子の光量までのリニアリティが得られていることがわかった。CPTA600 については、ピクセル数に比べてここでの光量は十分小さいため、この領域でリニアリティが得られていることは計算とも一致する結果である。しかし HPK100A については、第 3 章でのリニアリティ測定及び計算結果から、横軸 (MAPMT の光量 (p.e.)) が 60p.e. の点で 20%近くリニアリティがずれるはずである。これはクロストークを考慮した値である。しかし、測定結果からはこのずれは見られない。今回の結果の計算との不一致について、まだ原因は把握できていない。

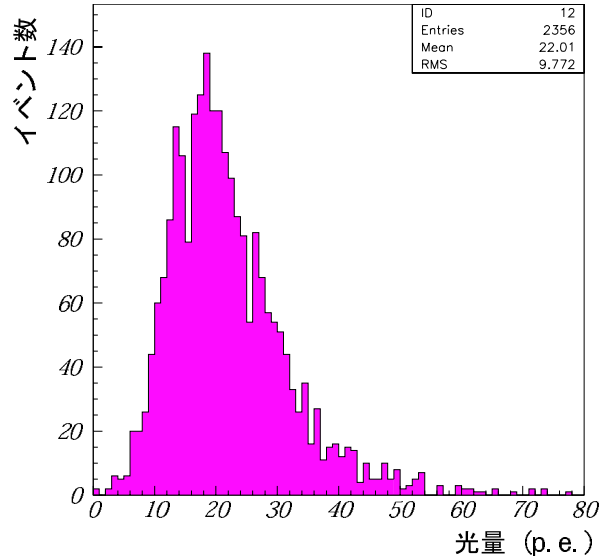


図 5.10: MIP による CPTA600 の光量分布。温度は 15 でノイズレートは 824kHz。Mean は 22.0p.e.。

5.6 ビームテストのまとめ

HPK100A と CPTA600 によるシンチレータからのファイバー読み出しのテストを行い HPK100A, CPTA600 とともにノイズレートが 400kHz~1MHz の領域で MIP により十分な光量が得られることを示した²。さらに、 p/π の識別が可能かどうかを評価した。今回の測定において、HPK100A, CPTA600 とともに p/π 識別度合いは MAPMT よりやや低い結果となった。この結果について、HPK100A の測定ではパッケージ構造による光量のロスが 50%程度生じていると考えられ、このパッケージ構造を改良することで得られる光量を増やすことができ、十分な p/π 識別度を実現できる考えられる。また、CPTA600 については MAPMT より多い光量が得られたが、 p/π 識別度は MAPMT より低い値となった。この原因である、光量 (p.e.) の分布幅については、HPK100A も含めて定量的にはまだ理解出来ておらず今後さらに詳しく調べていく必要がある。

²CPTA600 は 400kHz 以下ではゲインが小さくシグナルが確認できていない。

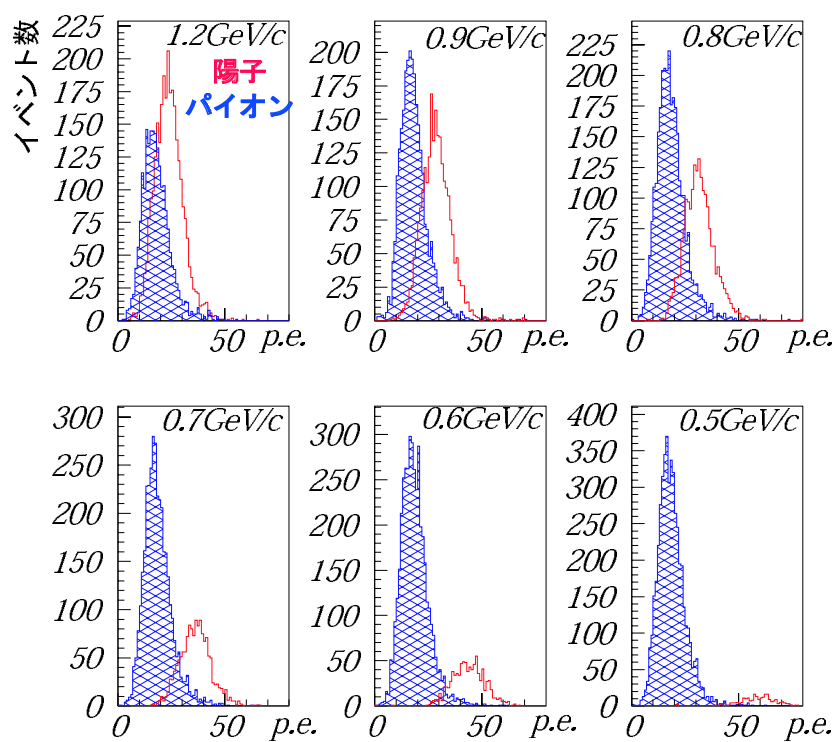


図 5.11: MAPMT における、陽子とパイオンの光量分布。赤のヒストが陽子で、青のハッチのかかったヒストがパイオンである。

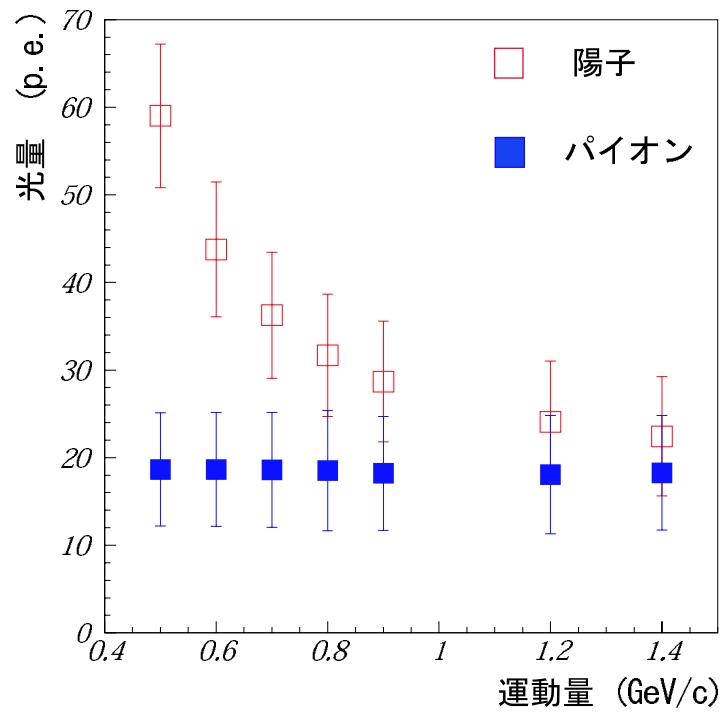


図 5.12: MAPMT における、各運動量に対する陽子とパイオンによる光量のプロット。赤が陽子、青がパイオン。エラーバーは光量分布における R.M.S である。

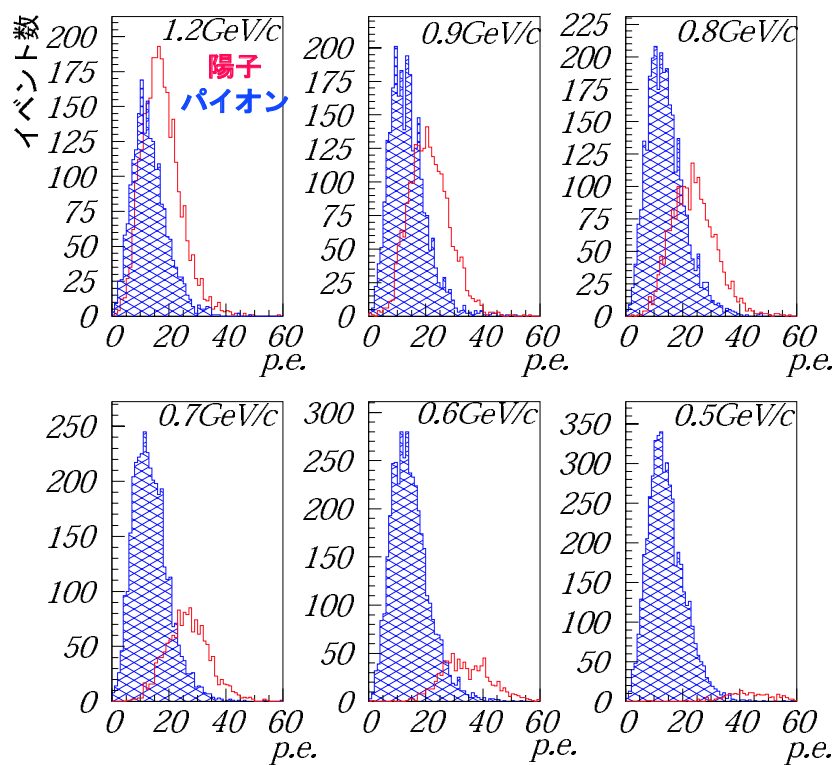


図 5.13: HPK100A における、陽子とパイオンの光量分布。赤のヒストが陽子で青のハッチのかかったヒストがパイオンである。

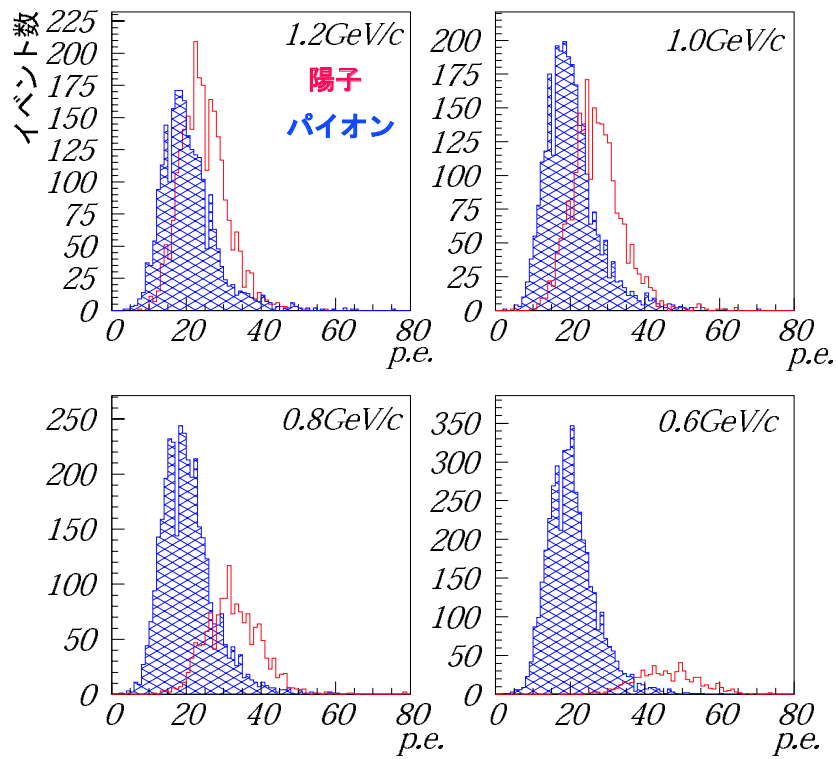


図 5.14: CPTA600 における、陽子とパイオンの光量分布。赤のヒストが陽子で青のハッチのかかったヒストがパイオンである。

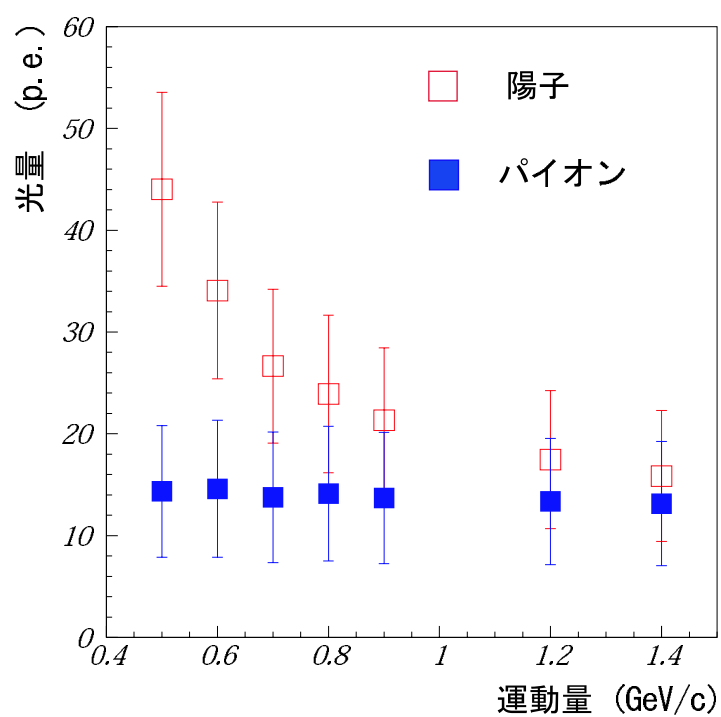


図 5.15: HPK100A における、各運動量に対する陽子とパイオンによる光量のプロット。赤が陽子、青がパイオン。エラーバーは光量分布における R.M.S である。

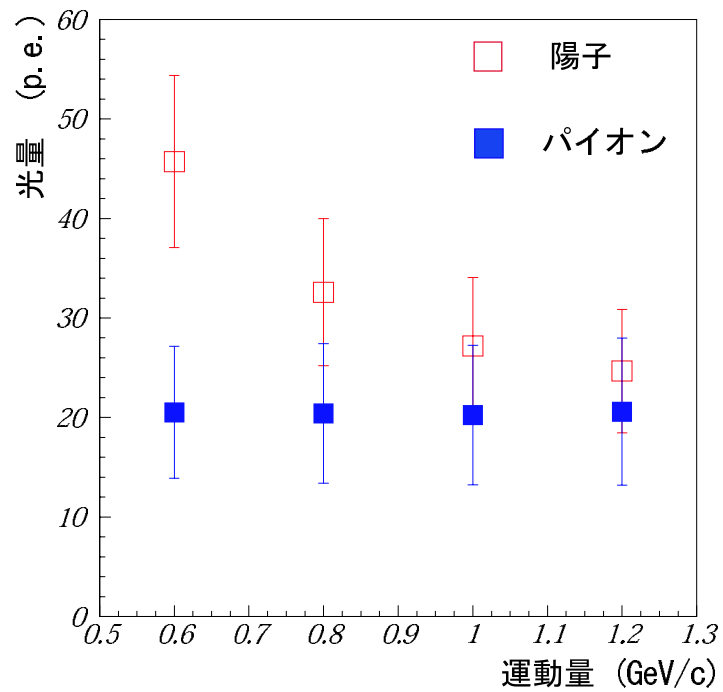


図 5.16: CPTA600 における、各運動量に対する陽子とパイオンによる光量のプロット。赤が陽子、青がパイオン。エラーバーは光量分布における R.M.S である。

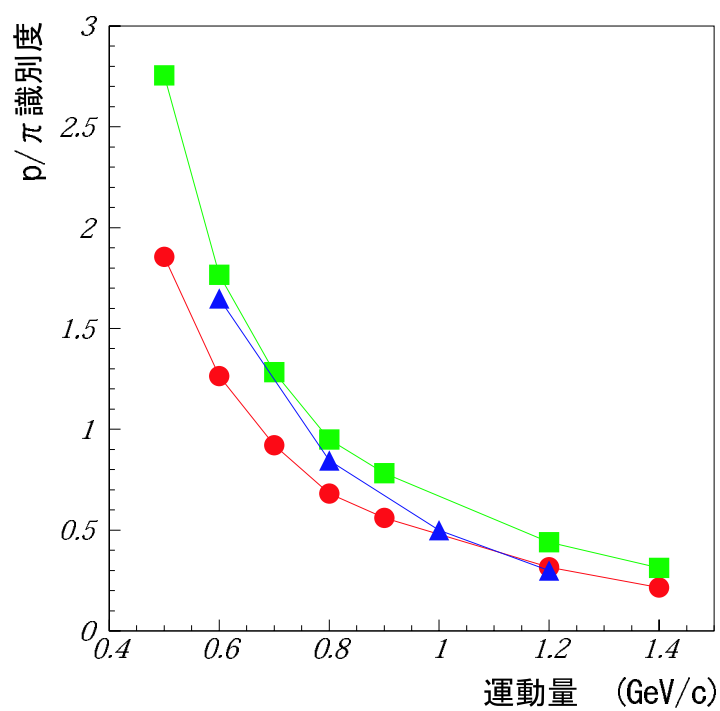


図 5.17: ビームの運動量対 p/π 識別度のプロット。 :HPK100A, :CPTA600, :MAPMT

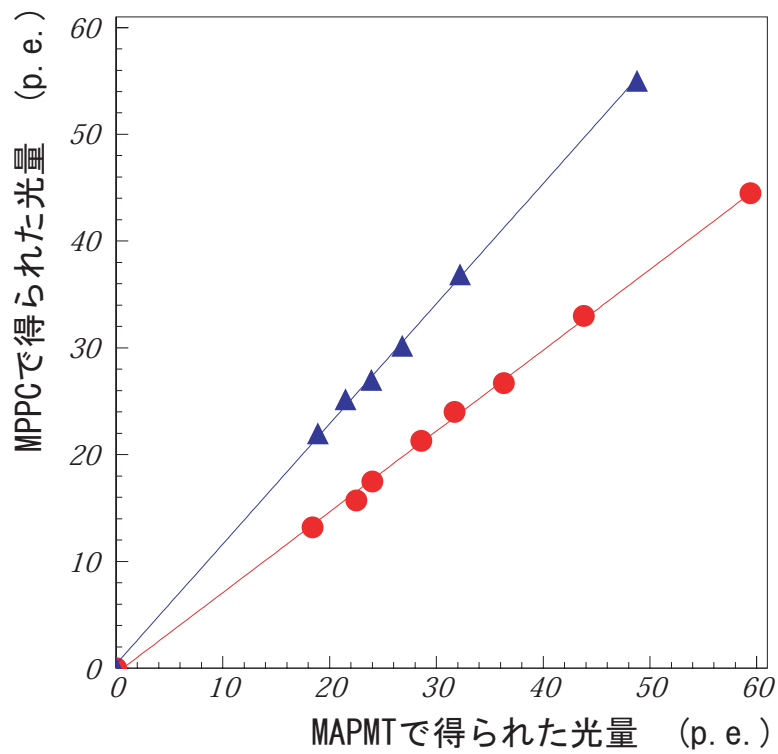


図 5.18: MAPMT の光量 (p.e.)-MPPC の光量 (p.e.) のプロット。 :CPTA600,
:HPK100A

第6章 結論

本研究では新型光検出器 Multi Pixel Photon Counter(MPPC) について、T2K 実験での実用化にむけた研究開発を行った。

浜松ホトニクス (HPK) 社製とロシアの CPTA 社製の、ともに試作品を使って測定を行った。まず MPPC の、光によるシグナル、フォトピークを観測することにより、基本動作を確認した。次に、ゲイン、ノイズレート、クロストークレート、PDE, パルスリニアリティについて印加電圧、温度依存性の測定を行った。この結果、測定した4つのサンプルにおいて、ゲインが $2 \times 10^5 \sim 6 \times 10^6$, ノイズレートが $10k \sim 2MHz$, クロストークレートが $0 \sim 40\%$, PDE が *PMT* の $0.1 \sim 3$ 倍の値が得られ、パルスリニアリティについては 100 ピクセルのサンプルで理論曲線との一致を確認した。さらに、ピクセルごとに正しく動作しているかどうかを確認するためレーザーによるテストを行い、HPK100A について、ピクセルごとのばらつきとしてゲインが 3.6%, Efficiency が 2.5% と非常に良く一致していることを確認した。これらの基本性能の測定結果から、MPPC が次世代の光検出器として十分に実用化可能な性能を有していることが確認された。特に、HPK 製においては社内でもこれらの測定は行われておらず、今回の測定結果は MPPC の実用化へむけた性能向上のためにも重要な情報であるといえる。

最後に MPPC の応用面でのテストとして、T2K 実験での使用環境であるシンチレータからのファイバー読み出しの測定を p, π のビームを使って行った。T2K 実験では、MIP 粒子に対して 5p.e. 以上の光量が得られ、 p/π を識別できることが要求される。今回のビームによるテストにおいて、HPK100A と CPTA600 において、その要求をよく満たす結果が得られた。

以上の基本、応用両面からの測定の結果、MPPC が T2K 実験での実用化に対して十分な可能性をもつ光検出器であることが示された。今回の測定において HPK100A は、ダイナミックレンジ 200 以上という条件以外は全ての条件を満たしている。また、400 ピクセルである HPK400 は PDE が不十分であり、600 ピクセルの CPTA600 はゲインが不十分である。今後の課題としては、400 ピクセルで T2K からの条件を満たすものを実現することである。現在、HPK 製の新しい 400 ピクセルのサンプルを評価中であり、すでに PDE の改善が見られており T2K 実験で使用できるサンプルとして期待される。本研究は、MPPC が T2K での実用化の段階まで進むために大きな役割を担ったと言える。

関連図書

- [1] 山本 真平.K2K 長基線ニュートリノ振動実験シンチレータトラッカーにおける読み出し用エレクトロニクスの開発, 修士論文, 京都大学大学院理学研究科,2003
- [2] P.Buzhan et.al.,An advanced study of silicon photomultiplier, ICFA Instr.Bull. 23 (2001) 28-41.
- [3] 長谷川 雅也.K2K 長基線ニュートリノ振動実験における全感知型飛跡検出器の基本性能の評価およびゲインモニターシステムの開発, 修士論文, 京都大学大学院理学研究科,2003
- [4] 平出 克樹.J-PARC ニュートリノ振動実験のための off-axis 前置検出器の基本設計および APD 読み出し系の開発, 修士論文, 京都大学大学院理学研究科,2005

謝辞

私が本論文を書き上げるに当たり多くの方々にお世話になりました。指導教官である西川公一郎先生には、お忙しい中ときには厳しくご指導頂き感謝致します。中家剛先生には、いつも適切なアドバイスをもらい、研究を進めるにあたり悩んでいる点などをクリアにして頂きました。横山将志先生には、実験を進める上で幅広く面倒を見てもらい本論文を書き上げるまで導いて頂きました。小林隆先生、早戸良成先生、市川温子先生には、いつも気軽に話しかけてくださりまた多くの助言を頂き、感謝致します。吉村浩司先生、中平武先生には、私の KEK での実験中は全面的にサポートして頂き、どうもありがとうございました。同じ高エネルギー研究室の田中秀和さん、長谷川雅也さん、山本真平さんにはよく面倒を見てもらい、またコンピュータ、ソフトウェア関係でよくトラブっていた私を助けて頂きました。久保田淳さん、平出克樹さんには私のくだらない質問などにもいつも親切に答えて頂きありがとうございました。同期の江澤孝介君、栗本佳典君、黒澤陽一君にはよく話し相手にもなってもらい、楽しく過ごすことが出来ました。田口誠君、松岡君には測定などでいろいろと手伝ってもらいました。どうもありがとう。また、本論文を最後まで読んで頂いた方へ、どうもありがとうございました。

2006年2月 信原 岳

付録A ピクセル内及びピクセルごとのクロストークレートの分布

第4章でのレーザーによるテストにおけるピクセル内及びピクセルごとの ADC 分布から、クロストークレートについても調べた。クロストークはあくまで2次的なパルスであり、それが起こるピクセル内及びピクセルごとの確率の違いは、MPPCの動作においては本質的な問題ではない。しかし、MPPCの開発においてクロストークを小さく抑えることは重要な課題であり、そのためにピクセル内及びピクセルごとのクロストークレートの分布を調べることは重要である。

ADC 分布において、熱電子ノイズを差し引いた後の 2p.e. 以上のイベントは全てクロストークによるものだと考え、今回クロストークレートを以下のように定義した。

$$\text{クロストークレート} = \frac{1.5p.e. \text{以上のイベント数}}{0.5p.e. \text{以上のイベント数}}$$

この測定において、レーザー光の強度を上げると 0.5p.e. 以上における 1.5p.e. 以上の比率は増加した。今回の測定を行うにあたり、「1ピクセルに入射する光子数を多くするとクロストークも起き易くなる」と仮定した。よって上式で定義したクロストークレートは相対的なものである。この相対的なクロストークレートを、レーザーの強度を一定にして各ポイントにおいて求めることで、クロストークレートの位置分布を求めることが出来る。なお、第3章で求めたクロストークレートは、1ピクセルが1フォトンを検出したときにクロストークを起こす確率であり、一般的な MPPC の動作上は全てこのケースとして考えて良い。

まず、1ピクセル内でのクロストークレートを図 A.1 に示す。

図 A.1 は、図 4.4 と同様、1ピクセル ($100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$) 上での 10×10 ポイントのスキャンの結果である。図 4.4 の Efficiency 分布ほどくっきりとした有感領域の境界は見えていないが、真ん中付近でクロストークレートの違いが数%と小さい領域が見られる。よって、レーザーをピクセルの真ん中付近に入射すればピクセルごとのクロストークレートの違いを数%の範囲で有意に見ることが出来ると考えられる。

クロストークレートの全ピクセル (10×10) スキャンの結果を図 A.2 に示す。

図 A.2 からクロストークレートのピクセルごとのばらつきは

$$\frac{\text{Mean}}{\text{R.M.S}} = 14.2\%$$

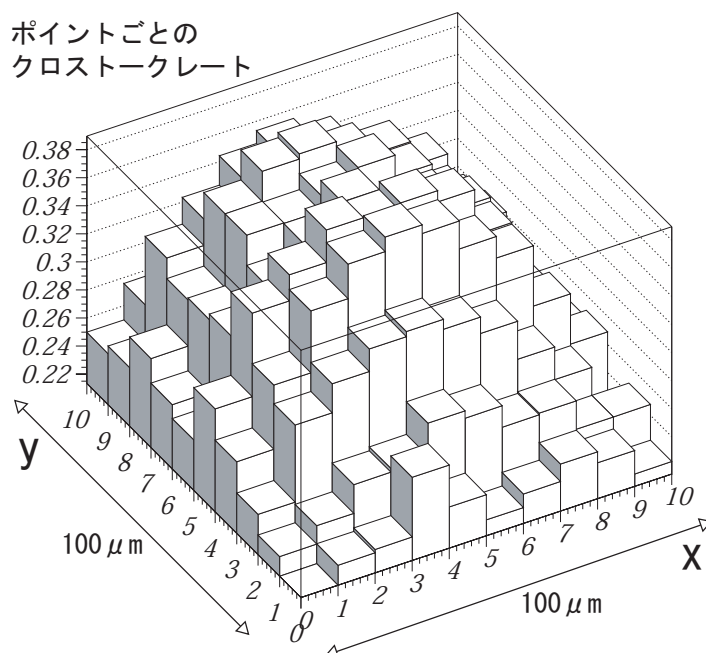


図 A.1: HPK100A の1ピクセル中のクロストークレート分布

と求まった。また、このクロストークレートの分布はゲインの分布 (図 4.7) とよく似た形となった。また、Efficiency の分布 (図 4.7) とともに x が 0~2, y が 8~10 辺りに共通点が見られる。また一般的に、受光面の中心付近にあるピクセルほど、そこから放出された光子が別のピクセルによって検出される確率、つまりクロストークレートが高くなるという考え方もできる。しかし、図 A.2 を見ると確かに中心付近で大きいように見えるが、それはゲインと Efficiency の分布でも言えることであり、今回の測定では有意にその効果が見えているとは言えない。

一方、ゲイン、Efficiency、クロストークレートは全て、バイアス電圧を上げると増加するパラメータである。第 3 章でのバイアス電圧特性の測定結果から、これらの全ピクセル分布における類似性が、ピクセルごとにかかるバイアス電圧の微妙な違いによっても矛盾は生じない。そのため、可能性の 1 つとしてここで挙げておくことにする。

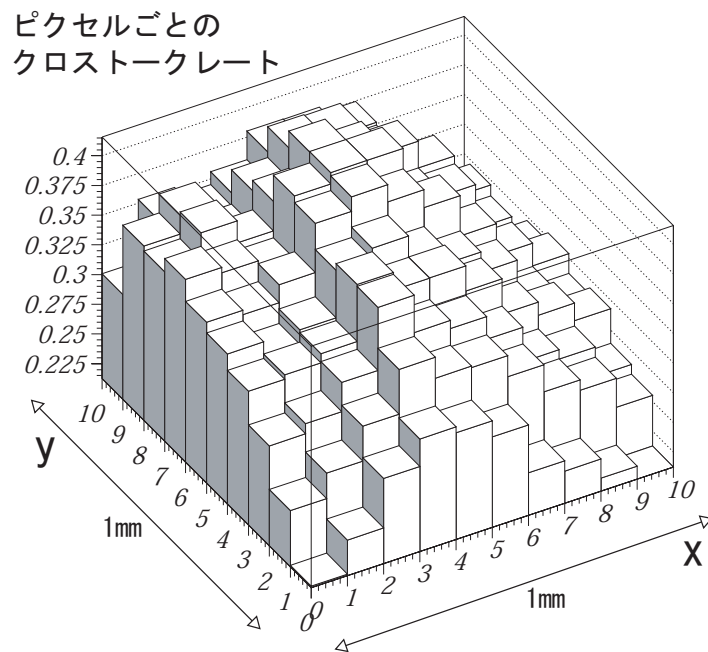


図 A.2: HPK100A のピクセルごとのクロストークレート分布

付録B 最も大きい光電子ピークが見られたサンプル

本章では示さなかったが、HPK1-43 というタイプの MPPC において最大で 45p.e. までの光電子ピークが観測された。このサンプルの、青色 LED の光によるシグナルの ADC 分布を図 B.1 に示す。この ADC 分布において、プリアンプは用いていない。

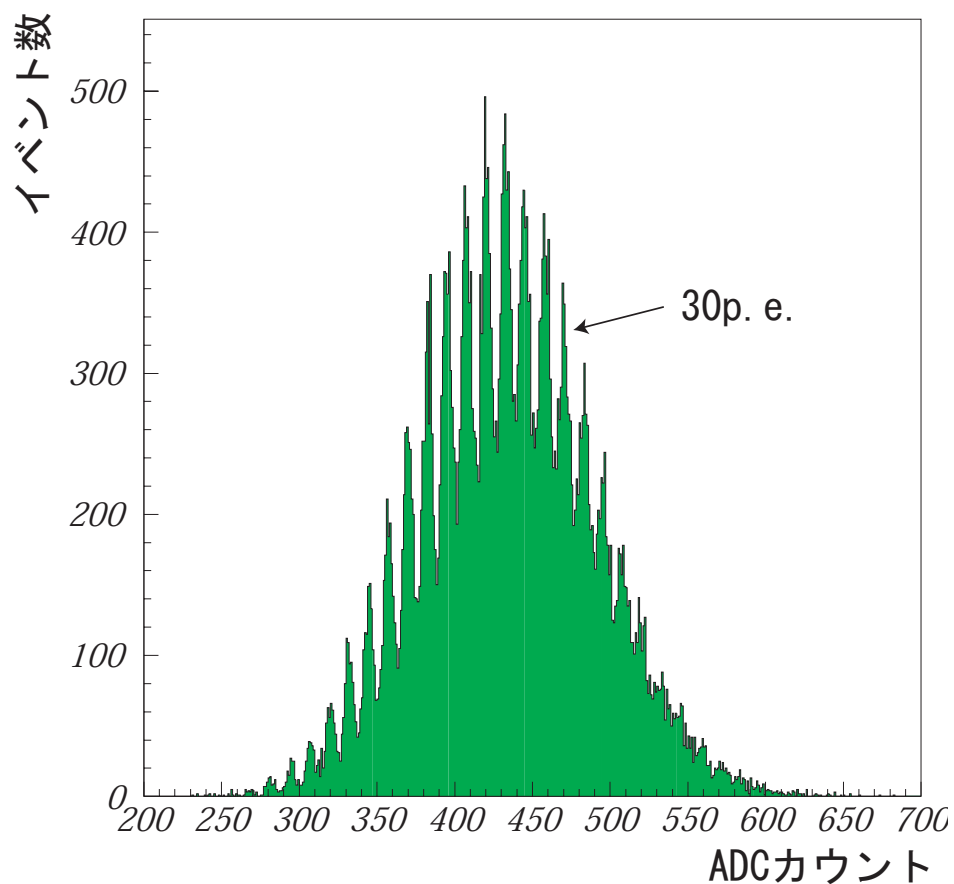


図 B.1: HPK1-43 で見られた青色 LED の光によるシグナルの ADC 分布。

なお、HPK1-43 のピクセル数は 100, シグナル幅は 100ns である。このサンプルはバイアス電圧 47.0~48.6V の範囲で動作し、ゲインは $\sim 2 \times 10^7$ と高く、ノイズレートは

500kHz以下に抑えられており、当初最も良い性能をもつサンプルだと思われた。しかし、バイアス電圧が48.0~48.3Vの領域でHPK100Cと同様に光電子ピークが2つに分離する現象が見られた(図B.2)。HPK100Cは、動作する電圧全域でこのようなふるまいが見られたのに対し、HPK1-43は動作する電圧の一部だけでこのふるまいが見られたという点が異なっている。

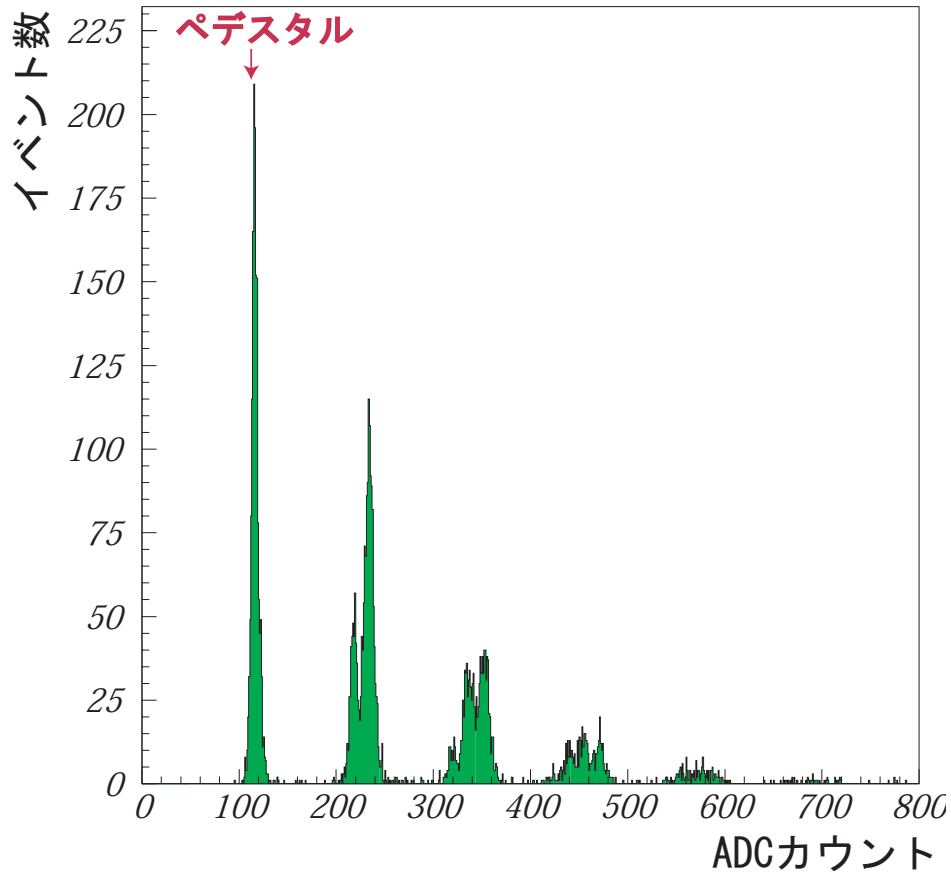


図 B.2: HPK1-43で見られた青色LEDの光によるシグナルのADC分布。

光電子ピークが2つに分離するなど、まだはっきりとふるまいが理解出来ていない点はあるものの、HPK1-43は45p.e.までの光電子ピークが見え、 $\sim 2 \times 10^7$ までの高いゲインを持つという点で、まだ開発途上である新型光検出器MPPCの潜在能力の高さを十分に示していると言える。

目 次

1.1	MPPC の受光面	6
1.2	APD の構造の概念図	6
1.3	顕微鏡によるピクセルの画像	9
1.4	MPPC の 1 ピクセルの断面の模式図	9
1.5	図 1.4 における上部-下部にかけての電場の強さ分布	9
2.1	off-axis 検出器の模式図	11
2.2	シンチレータ飛跡検出器の模式図	12
3.1	HPK400 の受光面の拡大写真	16
3.2	CPTA600 の受光面の拡大写真	16
3.3	MPPC 読み出し回路図	16
3.4	MPPC の生シグナル	17
3.5	MPPC の青色 LED による ADC 分布	18
3.6	ゲイン測定のセットアップ	19
3.7	ゲインの測定結果	20
3.8	HPK100A の光を当てていない状態での信号波形	23
3.9	ノイズレートの測定結果	24
3.10	HPK400 の微弱光による ADC 分布。	26
3.11	HPK400 の、クロストークレートが十分に小さいときの微弱光による光電子分布と、ポアソン統計から予想される光電子分布。	27
3.12	HPK400 の、クロストークレートが大きいときの微弱光による光電子分布と、ポアソン統計から予想されるクロストークが無い場合の光電子分布。	28
3.13	クロストークレートの測定結果	33
3.14	PDE の測定のセットアップ	34
3.15	PDE の測定結果	35
3.16	HPK100A の入射光量 (p.e.)-得られた光量 (p.e.) のプロット	36
3.17	HPK400 の入射光量 (p.e.)-得られた光量 (p.e.) のプロット	37
3.18	HPK100C の青色 LED による波形。	37
3.19	HPK100C の青色 LED による ADC 分布	37

3.20	それぞれのサンプルのノイズレート-ゲイン相関	38
3.21	それぞれのサンプルのノイズレート-PDE相関	39
4.1	レーザーによるテストのセットアップ	41
4.2	HPK100Aのレーザーによるシグナル	42
4.3	HPK100Aのレーザー光によるADC分布	42
4.4	HPK100Aの1ピクセル中のEfficiency分布	43
4.5	HPK100Aの1ピクセル	43
4.6	HPK100Aのピクセルごとの相対Efficiency分布	44
4.7	HPK100Aのピクセルごとの相対Gain分布	44
4.8	HPK100Cのレーザーによるシグナル	45
4.9	HPK100CのレーザーによるADC分布	45
4.10	HPK100Cの1.5ピクセル範囲のレーザースキンの結果	46
4.11	HPK100Cの、LEDで全ピクセルに照射したときの、あるバイアス電圧でのADC分布。	47
5.1	ビームテストのセットアップ	49
5.2	HPK製MPPCのパッケージ構造	50
5.3	ビームテストで用いたHPK製MPPCのファイバーアライメント用固定具	51
5.4	HPK100Aのファイバー読み出しにおけるeffective PDEの測定	52
5.5	HPK100Aのファイバー読み出しにおけるeffective PDE	52
5.6	ビームによる生のMPPCシグナル	54
5.7	MIPによるMAPMTの光量分布。	55
5.8	HPK100Aの、MIPにより期待される光量と実際に得られた光量の比較	56
5.9	MIPによるHPK100Aの光量分布	57
5.10	MIPによるCPTA600の光量分布	58
5.11	MAPMTにおける、陽子とパイオンの光量分布	59
5.12	MAPMTにおける、各運動量に対する陽子とパイオンによる光量のプロット	60
5.13	HPK100Aにおける、陽子とパイオンの光量分布	61
5.14	CPTA600における、陽子とパイオンの光量分布	62
5.15	HPK100Aにおける、各運動量に対する陽子とパイオンによる光量のプロット	63
5.16	CPTA600における、各運動量に対する陽子とパイオンによる光量のプロット	64
5.17	ビームの運動量対 p/π 識別度のプロット	65
5.18	MAPMTの光量(p.e.)-MPPCの光量(p.e.)のプロット	66

A.1	HPK100A の 1 ピクセル中のクロストークレート分布	71
A.2	HPK100A のピクセルごとのクロストークレート分布	72
B.1	HPK1-43 で見られた青色 LED の光によるシグナルの ADC 分布。 . . .	73
B.2	HPK1-43 で見られた青色 LED の光によるシグナルの ADC 分布。 . . .	74

表 目 次

3.1	サンプルの基本パラメータ	15
3.2	バイアス電圧 (V) を 0.1V、温度 (T) を 1 変えたときのゲイン (G) の変化の割合 (%)	21
3.3	測定されたピクセルのキャパシタンス	22