

2023 年度 卒業論文

大口径光検出器の分解能向上のための
印加電圧特性評価

指導教員 西村 康宏 准教授

慶應義塾大学工学部物理学科 西村研究室

牧野有里子

2024年2月29日

目次

概要	6
第1章 背景	8
1.1 素粒子	8
1.2 ニュートリノ	9
1.3 スーパーカミオカンデ	9
1.4 ハイパーカミオカンデ	10
第2章 光検出器	12
2.1 チェレンコフ光	12
2.2 光電変換	13
2.2.1 外部光電効果 (光電効果)	14
2.2.2 光感応素子	14
2.3 ハイブリッド光検出器 (HPD)	14
2.3.1 原理	14
2.3.2 特性	16
2.3.2.1 波高分解能	16
2.3.2.2 ゲイン	16
2.4 光電子増倍管 (PMT)	17
2.4.1 原理	17
2.4.2 種類	18
2.4.3 特性	18
2.4.3.1 収集効率	18
2.4.3.2 ゲイン	19
2.4.4 スーパーカミオカンデの光電子増倍管	21
2.4.5 ハイパーカミオカンデの光電子増倍管	22
2.5 電荷分解能	23
第3章 光検出器の分解能測定	24
3.1 目的	24
3.2 HPD の分解能測定	24

3.2.1	セットアップ	24
3.2.1.1	Hybrid Photo Detector	25
3.2.2	印加電圧を動かした分解能測定	28
3.2.2.1	測定方法	28
3.2.2.2	測定結果	30
3.2.2.3	考察	34
3.3	PMT の分解能測定	37
3.3.1	セットアップ	37
3.3.1.1	光電子増倍管	38
3.3.2	第1ダイノードのみ印加電圧を動かした場合の分解能測定	40
3.3.2.1	測定方法	40
3.3.2.2	測定結果	41
3.3.2.3	考察	47
3.3.3	第1ダイノードと第2ダイノード以降の印加電圧比が固定で全体の供給電圧を動かした分解能測定	49
3.3.3.1	測定方法	49
3.3.3.2	測定結果	49
3.3.3.3	考察	54
第4章 結論と今後の展望		58
謝辞		58
参考文献		59

目 次

1.1	素粒子の標準模型 [2]	8
1.2	スーパーカミオカンデ検出器 [2]	9
1.3	ハイパーカミオカンデ検出器 [2]	10
2.1	チェレンコフ光イメージ図 [5]	12
2.2	チェレンコフ光説明図 [7]	13
2.3	外部光電効果原理図 [8]	14
2.4	HPD 原理図 [9]	15
2.5	HPD の加速印加電圧とゲイン [9]	16
2.6	HPD の AD 逆バイアス電圧とゲイン [9]	17
2.7	PMT 原理図 [9]	17
2.8	PMT 種類 [9]	18
2.9	PMT の第 1 ダイノード間電圧と相対収集効率 [9]	19
2.10	PMT の供給電圧とゲイン [9]	20
2.11	スーパーカミオカンデ PMT のモジュール [10]	21
2.12	スーパーカミオカンデ PMT の概略図 [10]	21
2.13	ハイパーカミオカンデ PMT の概略図 [11]	22
3.1	暗箱内 HPD	24
3.2	HPD セットアップ図	25
3.3	実際の HPD セットアップ	25
3.4	使用した HPD	25
3.5	HPD 全体モジュール [13]	26
3.6	HPD プリアンプ [13]	26
3.7	コントロール電圧と加速印加電圧の関係 [13]	27
3.8	コントロール電圧と AD 逆バイアス電圧の関係 [13]	27
3.9	加速印加電圧と電子打ち込みゲインの関係 [13]	28
3.10	HPD コントロール電圧 3.0 V のオシロスコープ画面	29
3.11	HPD コントロール電圧 3.0 V の 1 光電子の電荷ヒストグラム	29
3.12	HPD コントロール電圧 3.0 V の 1 光電子の電荷ヒストグラムのフィッティング	30

3.13 HPD 加速印加電圧ごとのオシロスコープの画面	31
3.14 HPD 加速印加電圧ごとの1光電子ヒストグラムのガウシアンフィッティング	32
3.15 HPD 加速印加電圧と mean	33
3.16 HPD 加速印加電圧と sigma	33
3.17 HPD 加速印加電圧と分解能	34
3.18 HPD 加速印加電圧とゲイン	34
3.19 HPD mean と sigma とフィッティング	36
3.20 HPD mean と分解能とフィッティング	36
3.21 暗箱内 PMT	37
3.22 PMT 光源配置図	37
3.23 PMT 供給電圧回路図	37
3.24 PMT 供給電圧装置	38
3.25 PMT セットアップ図	38
3.26 実際の PMT セットアップ	38
3.27 使用した PMT の外寸 [14]	39
3.28 使用した PMT の供給電圧とゲインの関係 [14]	39
3.29 使用した PMT の回路図 [14]	40
3.30 印加電圧 1700 V のときの PMT のオシロスコープ	41
3.32 PMT 第1ダイノード印加電圧のみ変化させた測定のオシロスコープ	43
3.34 PMT 第1ダイノード印加電圧のみ変化させた測定のガウシアンフィッティング	45
3.35 PMT 第1ダイノード印加電圧のみ変化させた測定の印加電圧と mean	46
3.36 PMT 第1ダイノード印加電圧のみ変化させた測定の印加電圧と sigma	46
3.37 PMT 第1ダイノード印加電圧のみ変化させた測定の印加電圧と分解能	47
3.38 PMT 第1ダイノード印加電圧のみ変化させた測定の印加電圧とゲイン	47
3.39 PMT 第1ダイノード印加電圧のみ変化させた測定の mean と sigma のフィッティング	48
3.40 PMT 第1ダイノード印加電圧のみ変化させた測定の mean と分解能のフィッティング	48
3.41 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定のオシロスコープ	50
3.42 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定のガウシアンフィッティング	52
3.43 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定の印加電圧と mean	53
3.44 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定の印加電圧と sigma	54
3.45 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定の印加電圧と分解能	54
3.46 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定の印加電圧とゲイン	55
3.47 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定の mean と sigma のフィッティング	55

3.48 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定の mean と分解能のフィッティング	56
3.49 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定の第1ダイノードにおける mean と sigma のフィッティング	57
3.50 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定の第1ダイノードにおける mean と分解能のフィッティング	57

表 目 次

3.1	HPD の入出力ピン [13]	26
3.2	HPD 測定で印加したコントロール電圧と加速印加電圧	28
3.3	HPD 測定 ガウシアンフィッティングの結果と分解能	33
3.4	PMT 第 1 ダイノード印加電圧のみ変化させた測定のガウシアンフィッティング結果	46
3.5	全体の供給電圧を変化させた測定の実際の印加電圧	49
3.6	PMT 全体の供給電圧を変化させた測定のガウシアンフィッティングの結果	53

概要

ハイパーカミオカンデは、2027年からの観測を予定している水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置で、ニュートリノを通じて素粒子物理学や宇宙物理学の謎を解明することを目的としている。現在運用されているスーパーカミオカンデの約10倍の有効体積を持ち、観測統計量が大幅に増加するため、光検出器の精度向上が重要となる。当初新型光検出器として、PMTの増幅部分を改良したBox Line型光電子増倍管(PMT: Photomultiplier Tube)と、増幅部分のダイノードの代わりにアバランシェ・ダイオード(AD)を使用したハイブリッド型光検出器(Hybrid Photo Detector: HPD)の2種類が開発された。しかし、HPDの量産性の課題やPMTの性能の十分な向上の観点から、ハイパーカミオカンデでは4万本のBox Line型PMTが使用される予定である。

ハイパーカミオカンデにおいては、光検出器によって得られた電荷と時間の情報を用いてニュートリノ反応位置を再構成し、ニュートリノの種類、エネルギー、到来方向を決定する。正確なニュートリノ反応の再構成のために光検出器には、1光電子光量を識別可能な電荷分解能やナノ秒単位の時間分解能が求められる。

本研究では、ハイパーカミオカンデで使用予定の50cm口径PMTを使って、PMTの電荷分解能の精度向上の可能性を探るため、印加電圧特性を評価した。まず電荷分解能が高いことで知られているHPDにおいて、供給電圧に対する電荷分解能の依存性を確認した。次にPMTにおいて、HPDと同様に印加電圧を上げることにより高い分解能を得られるかどうかを確認した。第1ダイノードのみの印加電圧の依存性を確認した後、全体印加電圧の特性について考えた。

本研究において、HPDと同様にPMTの分解能が電圧に依存していることが分かった。一方HPDでの高電圧に到達する前にサチュレーションが見られことから、到達できる分解能に限界があることが分かった。また、分解能向上のための印加電圧の増加において、第1ダイノードの印加電圧における依存性が重要であることがわかった。

第1章 背景

1.1 素粒子

素粒子は物質の最小単位であり、原子等を構成している。かつて、原子が最小単位とされていたが、1897年に電子の存在が発見され、原子に内部構造があることが明らかになった。1911年に原子核が発見され、その後1919年に陽子、1932年に中性子が発見され、原子核が陽子と中性子によってできていることが解き明かされた。その後の宇宙観測技術や加速器実験技術の発達により、より小さな粒子の存在が徐々に明らかになった。1964年、陽子や中性子を構成する、クォークという素粒子の存在が予言され、1969年にはアメリカの加速器実験でクォークが存在する証拠が検出された。こうした研究の積み重ねにより、物質の最小単位である素粒子の正体が明らかになった。[1]

素粒子の種類は、粒子が従う統計によって2種類に分類され、フェルミ統計に従う粒子をフェルミ粒子、ボース統計に従う粒子をボース粒子と呼ぶ。フェルミ粒子は、物質を構成する素粒子で、クォークとレプトンとに分類される。一方ボース粒子は、力を媒介する素粒子で、素粒子間の相互作用を伝達するゲージ粒子と、素粒子に質量を与えるヒッグス粒子がある。以下に素粒子の種類について相互作用を考慮したモデルである、標準模型を表す。

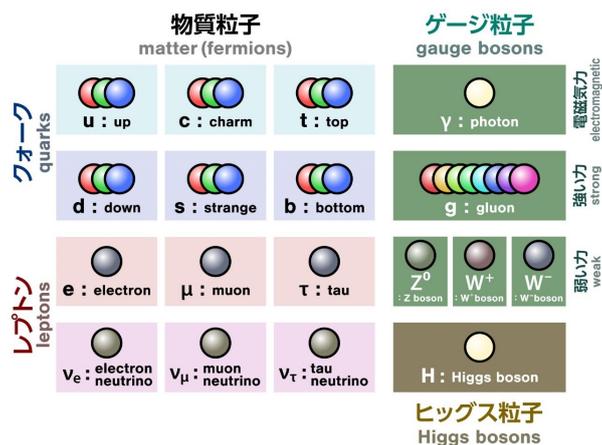


図 1.1 素粒子の標準模型 [2]

1.2 ニュートリノ

ニュートリノは、レプトン族の電子、ミュー粒子、タウ粒子の3つのフレーバーに対応した、電荷をもたず弱い相互作用しかないレプトンである。ニュートリノの発見は、1930年にパウリが、新しい粒子である「中性子」があるのではないかと仮説を立てたことから始まる。この仮説によると、電子に関連した中性子が β 崩壊中に存在し、これは強い相互作用を受けず、エネルギー保存と運動量保存が可能にするものであるとされた。その後フェルミがこの粒子をニュートリノと名付けた。実際には1952年に、ライネスらが原子炉から放出されるニュートリノの観測に初めて成功し、その存在が確認された。[3] 発見当初は、ニュートリノには質量がないと考えられていた。1998年に梶田隆章らが、3つのニュートリノのフレーバーはそれぞれに遷移しているというニュートリノ振動を発見し、ここからニュートリノに質量があることが示された。スーパーカミオカンデでは、このニュートリノ振動の性質や陽子崩壊について詳細に解明するために、現在も実験と解析が行われている。また、ニュートリノのCP対称性の破れや核子崩壊を発見するためにハイパーカミオカンデが建設中である。スーパーカミオカンデとハイパーカミオカンデについては、1.3節,1.4節で解説していく。

1.3 スーパーカミオカンデ

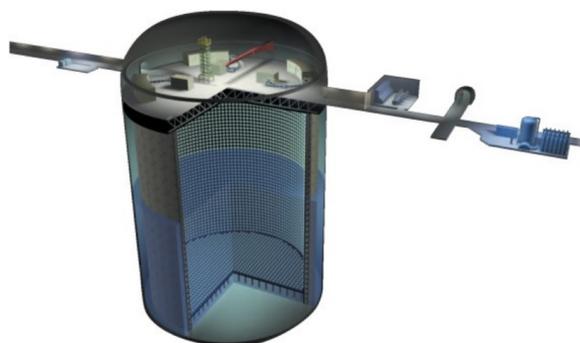


図 1.2 スーパーカミオカンデ検出器 [2]

スーパーカミオカンデは、世界最大の水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置で、1991年から建設が始まり1996年4月より観測を開始した。スーパーカミオカンデ検出器は、岐阜県飛騨市神岡鉱山内の地下1000 mに位置しており、5万トンの水を蓄えた、直径39.3 m、高さ41.4 mの円筒形水タンクと、その壁に設置された光電子増倍管と呼ばれる約1万3千本の光センサーなどから構成されている。スーパーカミオカンデの光電子増倍管については、2.4節に示す。

スーパーカミオカンデ実験の主な目的は4つある。1つ目はニュートリノの性質の解明で、太陽ニュートリノ、大気ニュートリノ、人工ニュートリノなどの観測を通じて、ニュー

トリノの性質の全容を解明することで、これは宇宙の初期に物質がどのように作られたかという謎に迫ることにつながる。2つ目はニュートリノを利用した星や宇宙の観測で、ニュートリノを使って太陽内部の活動を直接知ることや、星の爆発過程の詳細を調べることができる。ここから、宇宙の歴史を探ることにも繋がる。3つ目は陽子崩壊現象の探索で、物質に働く4つの力をまとめて説明する大統一理論が予言している、陽子が崩壊して別のより軽い粒子になることを発見しようとしている。この発見は直接、大統一理論の実証に繋がる。4つ目は超新星背景ニュートリノの観測で、2020年8月からスーパーカミオカンデの純水中にレアアースの1種であるガドリニウムを加えて観測を始め、反ニュートリノの観測感度向上と、超新星背景ニュートリノの世界初の観測を目指す。[5]

1.4 ハイパーカミオカンデ

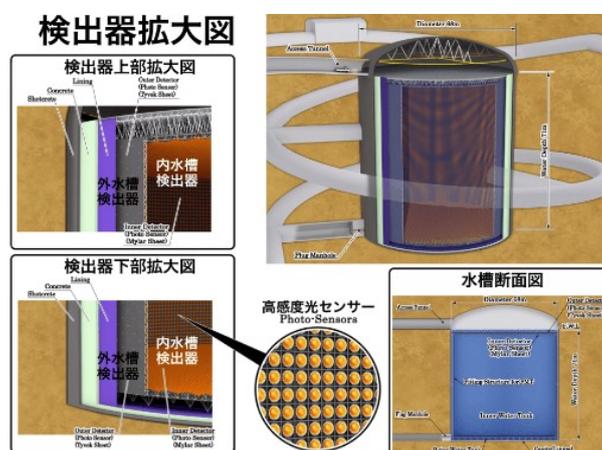


図 1.3 ハイパーカミオカンデ検出器 [2]

ハイパーカミオカンデは、現行のスーパーカミオカンデを凌駕する巨大水タンクとそのタンクの中に並べる超高感度光センサーからなる世界最大の水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置となる予定である。2020年に建設が開始し、2027年に運転を開始する予定だ。円筒部分は直径69 m、高さ73 mでドーム部と合わせると地下の人工空洞としては世界最大規模の大空間となり、検出器は直径68 m、深さ71 mの円筒形のタンクに超純水を満たしたものになる。タンクの体積は26万トン、有効体積は19万トンでスーパーカミオカンデの約10倍である。タンクの壁には大型の超高感度光センサーが4万本取り付けられ、水中で発生するチェレンコフ光をとらえる。チェレンコフ光については、2.1節で解説する。

ハイパーカミオカンデ実験の主な目的は、4つある。1つ目はCP対称性の破れを測定することである。C対称性とは粒子と反粒子を入れ替える対称性であり、P対称性とは空間対称性である。そして、CP対称性とは、粒子と反粒子を入れ替え空間反転した世界で、対称性が保存される確率を意味する。ニュートリノにおいて、粒子と反粒子の対称性の保存が崩れていることがわかることで、ニュートリノにおいてCP対称性が破れている

ことを示すことができ、これは物質の生成や宇宙の成り立ちのメカニズムを解明する手掛かりの1つとなる。2つ目はスーパーカミオカンデと同じく陽子崩壊の探索である。3つ目はフレーバーごとのニュートリノの質量の順番を決定することで、この解明によって宇宙初期の様相を理解することにつながる。4つ目もスーパーカミオカンデと同じく、ニュートリノを利用した星や宇宙の観測であり、より規模の大きな実験が行われる予定である。[6]

第2章 光検出器

2.1 チェレンコフ光

チェレンコフ光は、荷電粒子が媒体中で光速よりも速く走ると放出される光である。荷電粒子が絶縁体中を通るとその経路にそって局所的な分極を生じ、分極された分子が元の状態に戻るときに電磁波が発生する。これがチェレンコフ光として観測される。チェレンコフ光は図 2.1 のイメージのように、円錐形に放出される。

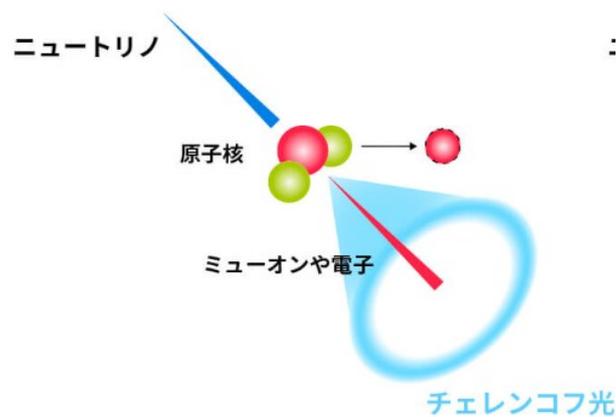


図 2.1 チェレンコフ光イメージ図 [5]

チェレンコフ光が角度 θ 内において生じ、円錐形になることはホイヘンスの波動論によって説明される。この時の説明図を図 2.2 に示す。

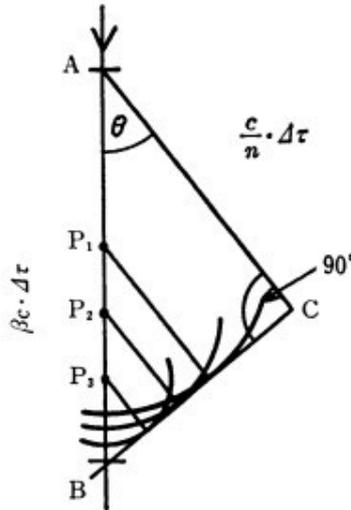


図 2.2 チェレンコフ光説明図 [7]

荷電粒子が AB 間を運動したときを考える。飛跡 AB 上の任意の点 P_1 , P_2 , P_3 から生じた波動は干渉性であるため、平面波面 BC を形成する。粒子の AB 間の運動と光の AC 間の進行とが同一時間であるとき、この干渉が起こることがわかる。ここで、媒体の屈折率を n 、真空中の光速を c 、粒子速度を v とする。このとき、この媒体中の光速は c/n で与えられ、 $\beta = v/c$ とする。時間 $\Delta\tau$ において粒子速度は βc でも表せるので、粒子は距離 $AB = \beta c \cdot \Delta\tau$ を運動し、一方光は距離 $AC = (c/n) \cdot \Delta\tau$ を進行する。これにより角度 θ において、以下の式が成り立つ。

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n} \quad (2.1)$$

これをみると、チェレンコフ光は半角度が式の円錐状に放射され指向性をもつことが確かめられる。またこの式から、荷電粒子のエネルギーならびに媒体の屈折率が大きいほど光の放射範囲が広がることがわかる。

2.2 光電変換

光検出器は、光エネルギーが光感応素子に到達すると、その光エネルギーを電気信号に変換する。これを光電変換という。光電変換は、外部光電効果 (光電効果ともいう) と内部光電効果の 2 種類に大別される。前者は真空中に光電子が放出される現象で、後者は光電子を伝導体帯へ励起するものである。[9] 光検出器の光電面には一般的に外部光電効果が使われているため、外部光電効果について詳しく説明する。

2.2.1 外部光電効果 (光電効果)

外部光電効果とは、金属や半導体の表面に光を照射すると、光の持つエネルギーによって、金属内や半導体内の電子が外界である真空空間に飛び出す現象である。金属を例にとると、図 2.3 に示すように、導体である金属ではフェルミ準位まで電子が満たされている。

そのため、電子が真空空間に出るには、電子は真空準位と仕事関数を超えるエネルギーを獲得する必要がある。そのため、光から得たエネルギーが真空準位と仕事関数の総和のエネルギーより大きく、金属の表面に到達した電子のみが真空空間に飛び出すことができる。そのため、外部光電効果が起こる電子は、物質表面の付近の電子であることが多い。この外部光電効果は、微弱な光を大きな光電流に変換することができるため、光電子増倍管や光電管の光電変換部分に使用されている。

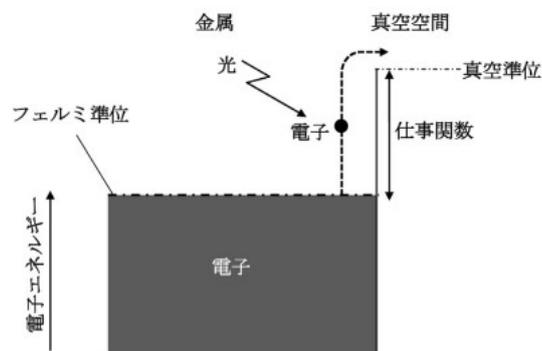


図 2.3 外部光電効果原理図 [8]

2.2.2 光感応素子

光感応素子は、光を受け取りそれに応じて電気信号を発生させる素子だ。主な種類には光電子増倍管、フォトダイオード、フォトトランジスタなどがある。簡単に説明すると、光電子増倍管は、光子が光電面に当たって複数の電子が生成され、これが電子増倍段を通過して増幅されていくものである。フォトダイオードは、光子の吸収により電子ホール対が生成され、これが電流を生じるものである。フォトトランジスタはフォトダイオードの出力信号を増幅するトランジスタが組み合わされたものである。今回は、光電子増倍管に着目して実験を行った。

2.3 ハイブリッド光検出器 (HPD)

2.3.1 原理

ハイブリッド光検出器は、HPD (Hybrid Photo Detector) とも呼ばれ、電子管に半導体素子、つまりアバランシェ・ダイオードを内蔵した光電子増倍管で、光電面から放出した

光電子を高電圧で加速し半導体素子に直接打ち込むことで、2次電子を増倍している。電子増倍の揺らぎが非常に少なく、単1光電子の分解能や安定性、時間特性に優れているという特徴がある。HPDの原理図を図2.4に示す。

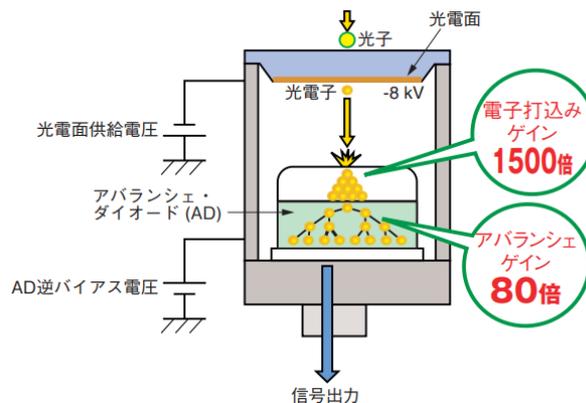


図 2.4 HPD 原理図 [9]

光を電子に変換する光電面と、打ち込み用に設計されたアバランシェ・ダイオード (Avalanche Diode:AD) が真空容器内に入っている構造となっている。原理としてはまず、光電面に光が入射すると、入射光量に応じた光電子が光電面から放出され、10 kV 程度の電圧で加速され、アバランシェ・ダイオードに打ち込まれる。この打ち込まれたときの電子の増倍を、電子打ち込みゲインと呼ぶ。アバランシェ・ダイオードでは、これらの光電子の入射エネルギーに応じた電子正孔対を生成し、2次電子を増倍している。これをアバランシェ・ゲインと呼ぶ。

HPD に内蔵されているアバランシェ・ダイオードは、およそ 3.6 eV の入射電子エネルギーにつき、1 対の電子正孔対を発生する。ここで、光電面とアバランシェ・ダイオードとの電位差、つまり加速印加電圧を V_{pC} とする。これは、光電面供給電圧と呼ぶこともある。一方、アバランシェ・ダイオードで決まるスレッシュホールド電圧を V_{th} とする。スレッシュホールド電圧とは、光電変換が開始されるために必要な最小の光エネルギーを示す。これらを用いて、電子打ち込みゲイン G_b は以下の式のようにになる。

$$G_b = \frac{V_{pC} - V_{th}}{3.6} \quad (2.2)$$

この電子打ち込みで得られた2次電子群は、さらにアバランシェ・ダイオード内部でアバランシェ増管される。アバランシェ・ゲインは、アバランシェ・ダイオード逆バイアス電圧 (AD 逆バイアス電圧) に応じて増減する。ここで、アバランシェ・ゲインを G_t とすれば、HPD 全体のゲイン G は以下の式で表せる。

$$G = G_b \times G_t \quad (2.3)$$

2.3.2 特性

2.3.2.1 波高分解能

HPD は、一般的な光電子増倍管の第1ダイノードのゲインに相当する電子打込みゲインが非常に高いため、電子増倍のゆらぎの小さい理想的な信号増幅が可能であるという特徴がある。そのため、1光電子や2光電子など、複数のピークの検出が可能である。今回この特性を利用して、HPD においても電荷分解能の測定を行った。

2.3.2.2 ゲイン

2.3.1 節で説明したように、HPD のゲインは電子打込みゲイン G_b とアバランシェゲイン G_t の積で表される。図 2.5 に加速印加電圧と電子打ち込みゲインの関係を示す。

これをみると、電子打込みゲインは式に従い、ある閾値を越えると加速印加電圧に比例して増加することがわかる。電子打込みゲインは、電子の加速電圧とアバランシェ・ダイオードの電子入射面の構造に依存するが、一般的にアバランシェ・ダイオードの電子入射面は均質なため、同じ加速印加電圧における個々の電子打込みゲインの個体差は非常に小さくなる。

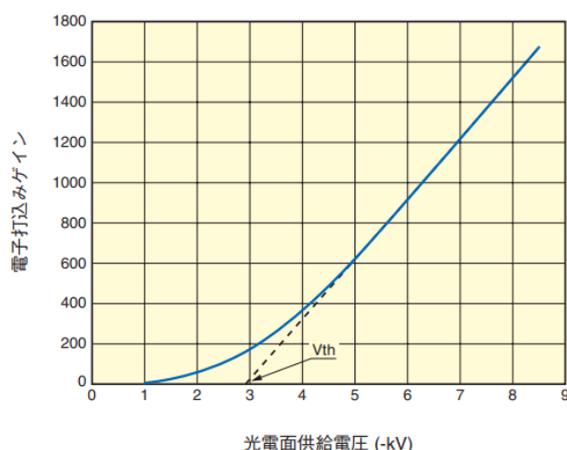


図 2.5 HPD の加速印加電圧とゲイン [9]

図 2.6 にアバランシェ・ダイオードのゲインおよびリーク電流特性を示す。アバランシェゲインは、アバランシェ・ダイオードに供給する AD 逆バイアス電圧が一定値を越えたあたりから徐々に増加し、ブレークダウン電圧付近で急激に増加する特性がある。浜松ホトニクス製 HPD では、リーク電流が 1 mA に到達する電圧をブレークダウン電圧にしている。ブレークダウン電圧付近ではゲインが急激に変化するため、HPD を安定動作させることが難しくなる。したがって、最大 AD 逆バイアス電圧は、ブレークダウン電圧から 10 V 程度下げた電圧としている。

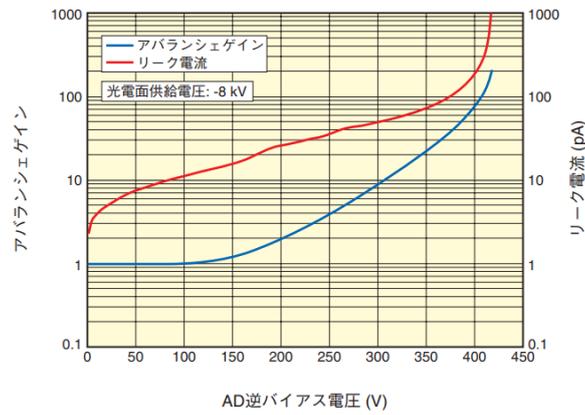


図 2.6 HPD の AD 逆バイアス電圧とゲイン [9]

2.4 光電子増倍管 (PMT)

2.4.1 原理

光電子増倍管は、PMT(Photomultiplier Tube) ともよばれ、一般的にガラスなどに封じられた真空管で、入射窓、光電面、集束電極、電子増倍部(ダイノード)、陽極より構成されている。その構造を図 2.7 に示す。

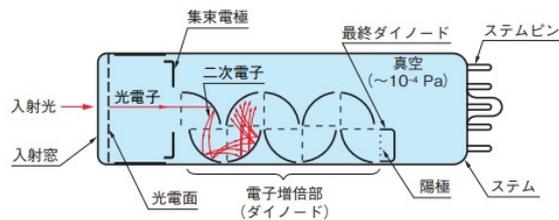


図 2.7 PMT 原理図 [9]

光電子増倍管に入射した光が信号出力される過程は、まずガラス窓を透過して入射した光が光電面内の電子を励起し、真空中に光電子を放出する。この際に外部光電効果が作用している。放出された光電子は、集束電極で加速・収束され、第1ダイノードに衝突し2次電子を放出する。これにより電子が増倍する。2次電子増倍がそれ以降の電子増倍部に衝突し、2次電子放出を繰り返していくことで次々に増倍が繰り返される。最終ダイノードより放出された2次電子群は最終的に 10^6 倍~ 10^7 倍になり、陽極より取り出され、電流として検知される。

2.4.2 種類

光検出器には、電子を増倍させるダイノードが組み込まれている。ダイノードには多くの種類があり、使用目的に応じて段数や構造を選択する。図 2.8 に、ダイノードの種類を示す。この中で、HPD では電子打ち込み型のダイノードが組み込まれており、スーパーカミオカンデではベネシアンブラインド型が使用された。ハイパーカミオカンデではボックスライン型が使用される予定である。電子打ち込み型は 2.3.1 節でも言及したように、安定して高い電荷分解能を提供する。また、ベネシアンブラインド型は大口径の光検出器として使用しやすいという特徴をもつ。ボックスライン型は従来のボックス型とライン型の組み合わせで、ボックス型より時間分解能や時間応答特性が優れておりライン型より収集効率が優れているという特徴をもつ。

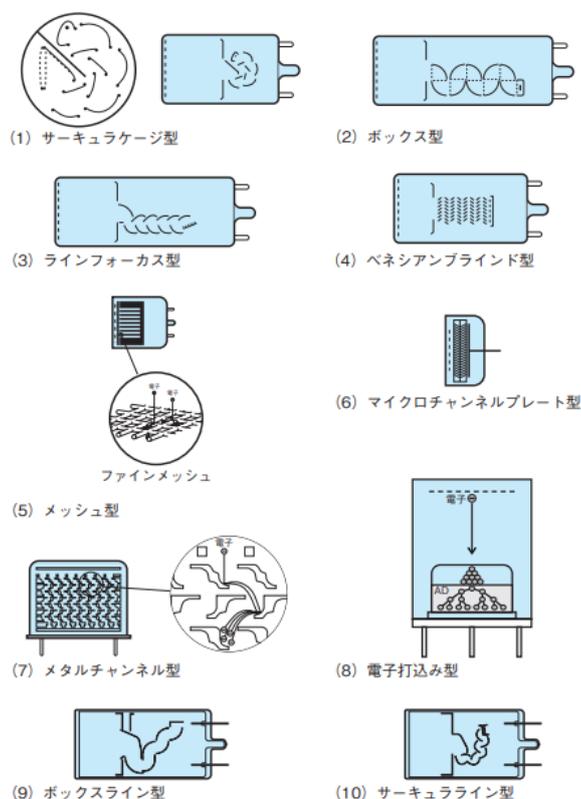


図 2.8 PMT 種類 [9]

2.4.3 特性

2.4.3.1 収集効率

光電子増倍管の電流増倍機構は、電子の軌道を考慮して設計され、効率良くダイノード間で増倍するように考慮されている。しかし、増倍に寄与しない電子も一定数存在することがわかっている。光電子増倍管において、光電面から出た光電子数と最終的に陽極から出力されるパルス数の割合を収集効率と呼ぶ。一般的に重要であるのは、第 1 ダイノード

に入射した光電子が第2ダイノード以後で抜けることなく、有効に増倍する部分である。第2ダイノード以後でも増倍に寄与しない2次電子は存在するが、後段にいくほど2次電子の数が増えるため収集効率に与える影響は少なくなると考えられる。例として、28 mm 怪ヘッドオン型光電子増倍管における陰極-第1ダイノード間の電圧に対する第1ダイノードにおける相対収集効率を図 2.9 に示す。

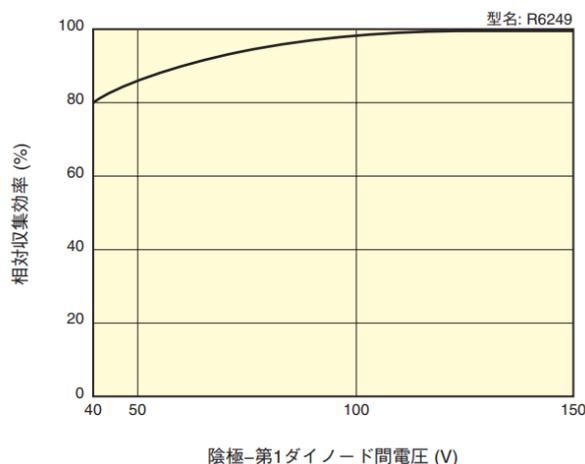


図 2.9 PMT の第1ダイノード間電圧と相対収集効率 [9]

これを見ると、陰極-第1ダイノード間の電圧が適切でない場合、収集効率に影響があることがわかる。特に電圧が低い場合は、第1ダイノードの有効部分に到達する光電子の数が少なくなり収集効率が低下するといえる。このPMTでは、陰極-第1ダイノード間には、100 V以上かけることが適当であるとわかる。この収集効率は、今回測定した電荷分解能にも直接影響を与える。また、検出効率を算出する際にも用いられている。検出効率とは、微弱な光測定において光電子増倍管に入射する信号のうち検出された割合をいい、フォトンカウンティング法においては光電面の量子効率と収集効率の積で表される。

2.4.3.2 ゲイン

ゲインは電流増倍率ともいい、信号が入力から出力までどれだけ増幅されたかを示す数値である。光電子増倍管の場合、複数のダイノードで増倍されている。まず、光電面から放出された光電子流 I_k は、第1ダイノードに入射して2次電子流 I_{d1} を放出する。この時の第1ダイノードにおける2次電子放出比は式 (2.4) になる。

$$\delta_1 = \frac{I_{d1}}{I_k} \quad (2.4)$$

さらにこの後、第 n ダイノードまで増幅を繰り返していく。このとき、第 n ダイノードでの2次電子放出比は以下の式で表される。

$$\delta_n = \frac{I_{dn}}{I_{d(n-1)}} \quad (2.5)$$

よって、陽極電流は以下の式で表される。

$$I_p = I_k \cdot \alpha \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdots \delta_n \quad (2.6)$$

これを変形すると、

$$\frac{I_p}{I_k} = \alpha \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdots \delta_n \quad (2.7)$$

となり、ここで α は収集効率を表す。ゲインを μ と表すことにすると、式 (2.7) から電子の個数と電流は比例関係にあるためゲインは

$$\mu = \alpha \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdots \delta_n \quad (2.8)$$

と表される。また、一般的に2次電子放出比は、ダイノード間の電圧 E の関数であり、以下の式になる。

$$\delta = aE^k \quad (2.9)$$

よって、収集効率を1とし、光電子増倍管のダイノードの数を n 、全体の供給電圧を V とすると、ゲインは式 (2.10) で表される。

$$\mu = (aE^k)^n = a^n \left(\frac{V}{n+1} \right)^{kn} = AV^{kn} \quad (2.10)$$

これをみると、ゲインは供給電圧の kn 乗に比例することがわかる。代表的な供給電圧対ゲイン特性を図 2.10 に示す。

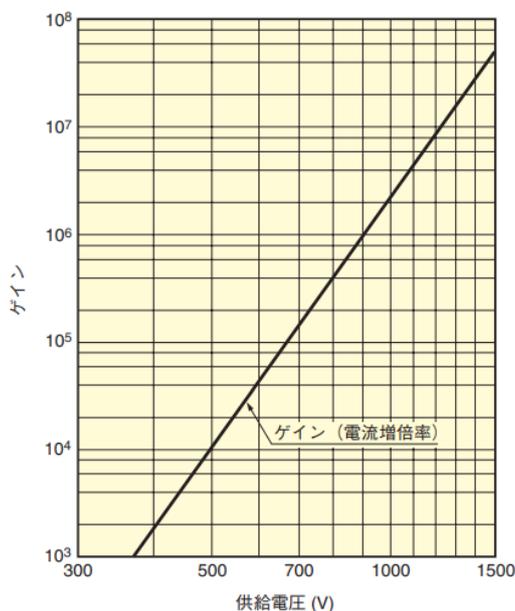


図 2.10 PMT の供給電圧とゲイン [9]

これは両対数グラフで描かれているためこの直線の傾きは kn となる。このように、供給電圧を上げる程ゲインは高くなるのがわかる。

2.4.4 スーパーカミオカンデの光電子増倍管

スーパーカミオカンデの水タンクはステンレス製のフレームによって2槽式になっており、内側を内水槽、外側を外水槽と呼んでいる。このモジュールの模式図を図 2.11 に示す。

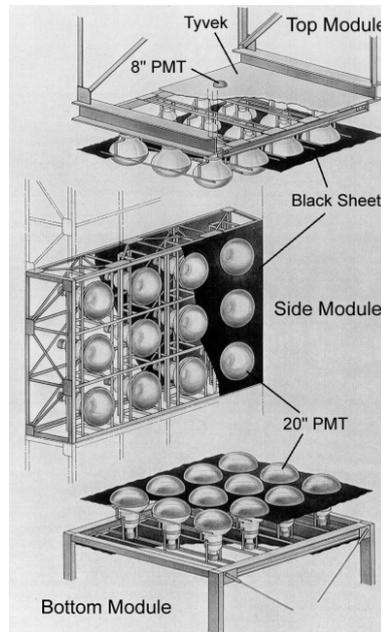


図 2.11 スーパーカミオカンデ PMT のモジュール [10]

内水槽は直径約 33.8 m、高さ約 36.2 m、体積約 3.25 万 t で、スーパーモジュールの内側に 20 cm 口径の PMT が 11129 本取り付けられている。この PMT は浜松ホトニクスと開発されたもので、図 2.12 に概略図を示す。

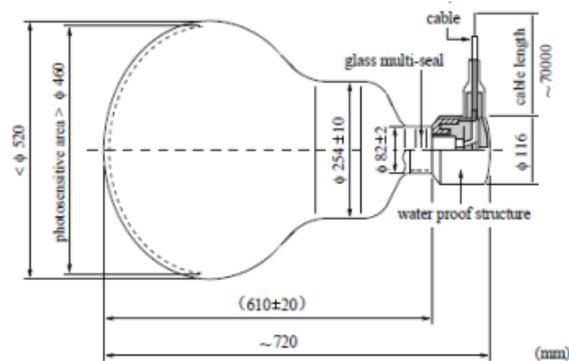


図 2.12 スーパーカミオカンデ PMT の概略図 [10]

一方、外水槽は厚さ約 2 m、体積約 1.75 万 t で、内水槽を囲むような設計となっており、スーパーモジュールの外側に 20 cm 口径の PMT が 1885 本取り付けられている。異なる

る PMT の間は、ブラックシートと呼ばれる反射率が非常に低いシートで覆われていて、内水槽と外水槽を光学的にも分離している。

2.4.5 ハイパーカミオカンデの光電子増倍管

ハイパーカミオカンデもスーパーカミオカンデと同様、内水槽と外水槽の2つの光学的に独立した検出器部から構成されている。内水槽は主検出器部であり、内水槽の側面には最大で 40000 本の 50 cm 口径の超高感度光センサーが敷き詰められる。この超高感度光センサーを用いることで、ニュートリノ反応や陽子崩壊から発生する非常に微弱なチェレンコフ光を正確に測定することができ、これにより、電子やミュオンと呼ばれる素粒子を 99 % 以上の正確さで粒子識別することができるといわれている。この光電子増倍管の概略図を図 2.13 に示す。

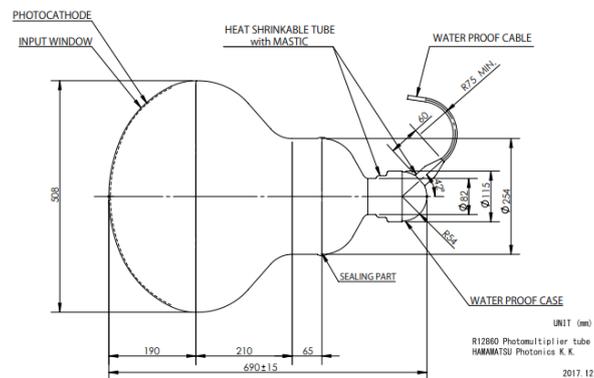


図 2.13 ハイパーカミオカンデ PMT の概略図 [11]

外水槽は内水槽の外周を覆うように設置され、外水槽の側面には最大で 10000 本の 8 cm 口径の高感度光センサーが敷き詰められる。外水槽検出器は、検出器の外から入ってくる宇宙線など、物理観測にとってノイズとなるものを識別して除去するために使われる。ノイズ事象の識別能力は 99.9 % 以上になる。

スーパーカミオカンデとの大きな違いは、設備の大きさと検出器の精度の向上である。観測統計量が大幅に増加するため光検出器の精度向上が重要視し、当初新型光検出器として、光電子増倍管の増幅部分を改良した Box Line 型光電子増倍管とハイブリッド光検出器の2種類が開発された。しかし、ハイブリッド光検出器の量産性の課題や光電子増倍管の性能の十分な向上の観点から、ハイパーカミオカンデでは4万本の Box Line 型光電子増倍管が使用される予定となった。[12] これは、スーパーカミオカンデで使われている光電子増倍管から、光検出効率・光量測定精度・時間測定精度といった基本的な性能をいずれも約2倍へ向上させた新型大口径高感度光電子増倍管であるとされている。約2倍の水圧に耐えるように強度も改良され、バックグラウンドとなる放射性物質の含有量も半分に抑えられた。光電面の金属板の形状の変更や電子の数を増幅するダイノード構造の大幅な

変更が施されている。また、複眼光センサーも併用する予定で、検出時間精度の高い直径8cmの光電子増倍管を複数束ねて密閉し、解像度を上げることが可能になっている。[6]

2.5 電荷分解能

電荷分解能は、検出された信号の電荷を正確に決定する能力を示す指標のことである。電荷分解能が高い場合、同じエネルギーの光子によって生成される電子の数を正確に計測できるため、エネルギーごとの信号の選別や背景ノイズの低減などにも役に立つ。電荷分解能は次のように定義される。

$$\text{電荷分解能} = \frac{\text{ピークの幅 (sigma)}}{\text{ピークの中心の電荷 (mean)}} \quad (2.11)$$

今回は2つの光検出器、ハイブリッド光検出器と光電子増倍管とにおいて、分解能の精度を高めるために印加電圧を変えて分解能の測定を行い、その特性について考えた。

第3章 光検出器の分解能測定

3.1 目的

ハイパーカミオカンデでは観測統計量が大幅に増加するため、光検出器の精度向上が重要となる。2.3.2.2 節、2.4.3.2 節で説明したように、ゲインの増加は印加電圧の増加に大きく影響を受ける。そのため、高いゲインを得るためには、印加電圧を高くすることが必要だと考えられる。

HPD は打ち込みゲインが高いことがわかっているため、電圧が高い場合分解能がどこまでよくなるかの指標として測定を行った。この指標に基づき、ハイパーカミオカンデで使用予定の PMT では同様の分解能が得られるかを検証した。

3.2 HPD の分解能測定

3.2.1 セットアップ

暗箱内に HPD を配置した様子を以下の図 3.1 に示す。また、光源としてレーザーが HPD に入射するように配置した。このとき、1 光電子の光量ができるように光源を設定した。

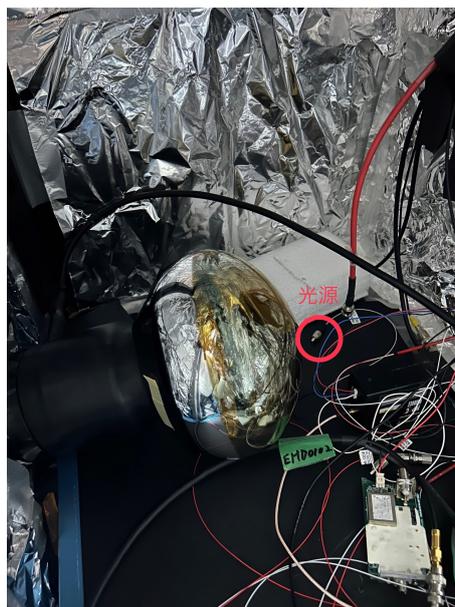


図 3.1 暗箱内 HPD

暗箱にはケーブルが通るように穴をあけ、全体を暗幕で覆った。電源電圧を用いて印加電圧を変えていき、出力をオシロスコープに繋いで波形をプログラムを用いて取得して解析を行った。オシロスコープは、チャンネル1にHPDの出力を繋ぎ、チャンネル2に光源の同期信号をトリガーとしてつないだ。全体のセットアップについては、図 3.2 に、実際の装置のセットアップを図 3.3 に示す。

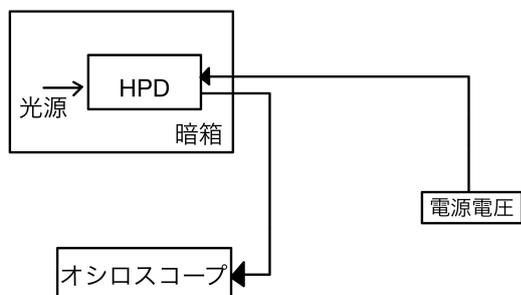


図 3.2 HPD セットアップ図



図 3.3 実際の HPD セットアップ

3.2.1.1 Hybrid Photo Detector

今回使用した HPD は、図 3.4 に示すように浜松ホトニクス株式会社製の R12112-10 を使用した。



図 3.4 使用した HPD

使用した型番は EHD00102 であった。これは 20 cm 径の HPD で、感度波長範囲は 300 ~ 650 nm、光電面はバイアルカリ、2 次電子増倍方式は半導体電子打ち込み式、ターゲット半導体は 5 mm 径のアバランシェダイオード、光電面 - ターゲット間の最大電圧 10 kV であった。

また今回使用した HPD 全体のモジュールは図 3.5 のようになっており、光検出器の部分 (HPD) とプリアンプ部に分かれています。

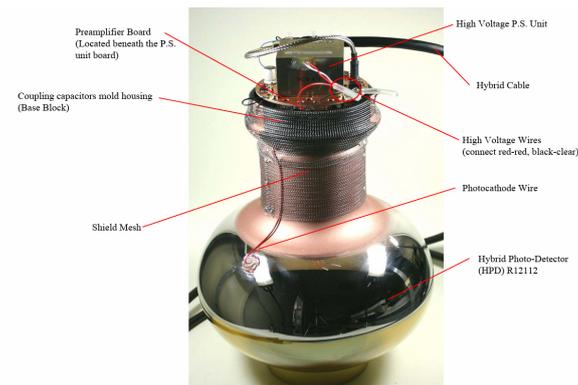


図 3.5 HPD 全体モジュール [13]

プリアンプは、HPD の信号を増幅する電子回路の一部である。これを図 3.6 に示す。光が入射すると光電子が発生し電場加速後の打ち込みで増幅され、その後プリアンプはこの増幅された信号をさらに増幅し、処理している。

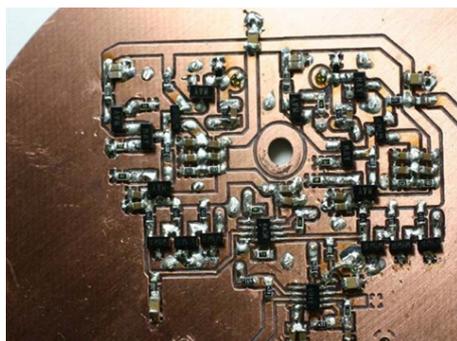


図 3.6 HPD プリアンプ [13]

プリアンプ部の基板から入力出力を行うために、電源コントロール用ケーブルをつないだ。今回の入力出力ピンの役割と条件を表 3.1 に示す。

Pin Number	Function	Description
1	Vcc	+8V to +10V
2	GND	for Power Return
3	GND	for Power Return
4	GND	for Module GND Level Referencing
5	Latch	Overload Protection Indicator
6	HV Control	Apply 0 to 4V for HV control
7	LV Control	Apply 0 to 4V for LV control
8	Enable	Apply +5V to enable the output
9	HV Monitor	Analog HV Output Monitor (0 to +4V)
10	LV Monitor	Analog LV Output Monitor (0 to +4V)

表 3.1 HPD の入出力ピン [13]

プリアンプ回路とともに2チャンネル高電圧電源が含まれており、外部入力電圧に比例した高電圧を印加できる。入力した電圧をコントロール電圧と呼ぶ。加速印加電圧とコントロール電圧と供給電圧の関係は図 3.7 に表される。

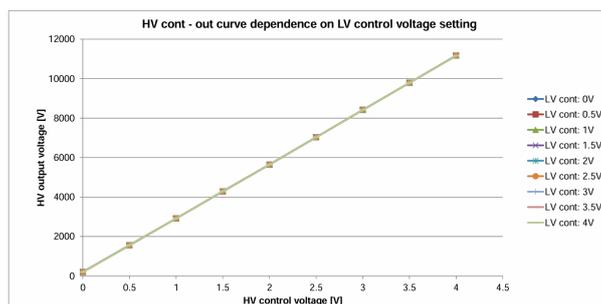


図 3.7 コントロール電圧と加速印加電圧の関係 [13]

ここからコントロール電圧と加速印加電圧の関係を算出すると式 (3.1) が成り立つことがわかった。

$$\text{加速印加電圧 } V = 2810 \times \text{コントロール電圧 } V + 100 \text{ V} \quad (3.1)$$

同様に、AD 逆バイアス電圧も電源電圧に比例した高電圧が供給される。このときの関係は図 3.8 で、ここからコントロール電圧と AD 逆バイアス電圧の関係を算出すると式 (3.2) が成り立つ。

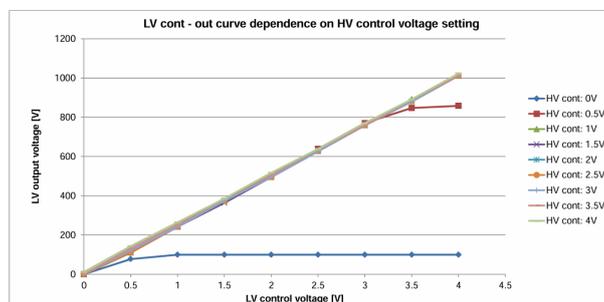


図 3.8 コントロール電圧と AD 逆バイアス電圧の関係 [13]

$$\text{AD 逆バイアス電圧 } V = 255 \times \text{コントロール電圧 } V - 10 \text{ V} \quad (3.2)$$

例として、コントロール電圧は、3.0 V で実際の加速印加電圧 (HV と呼ぶ) に 8530 V かかる。実際にかかる加速印加電圧と打ち込みゲインは図 3.9 のようになることが知られており、印加電圧の変化に対してゲインの変化が大きく影響を受けていることがわかる。また 1.25 V で実際の AD 逆バイアス電圧 (LV と呼ぶ) に 309 V かかる。この LV は固定して実験を行った。

今回は、AD 逆バイアス電圧は固定し加速印加電圧電圧のみ動かして測定を行った。ここで、

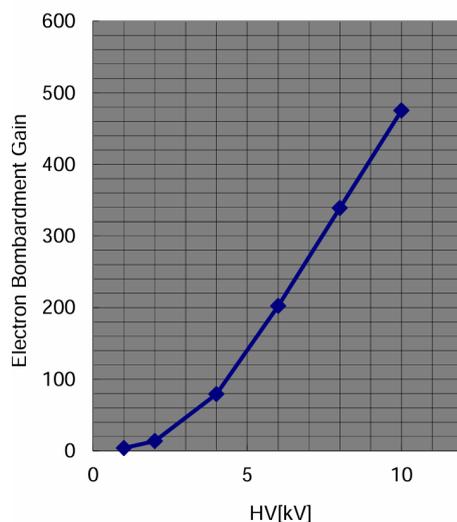


図 3.9 加速印加電圧と電子打ち込みゲインの関係 [13]

3.2.2 印加電圧を動かした分解能測定

3.2.2.1 測定方法

HV のコントロール電圧を 2.0 V から 4.2 V まで動かしていった。このとき実際に加速印加電圧にかかっている電圧は表 3.2 となっていた。

コントロール電圧 (V)	光電面供給電圧 (V)
2.2	6282
2.3	6563
2.5	7125
2.8	7968
3.0	8530
3.5	9935
4.0	11340
4.2	11902

表 3.2 HPD 測定で印加したコントロール電圧と加速印加電圧

LV のコントロール電圧は 1.25 V まま固定した。このとき、実際に AD 逆バイアス電圧にかかっていたのは 309 V であった。まずオシロスコープで 1 光電子を確認した。HV のコントロール電圧が 3.0 V、つまり実際の加速印加電圧 8530 V ときのオシロスコープの画面を例として図 3.10 に示す。

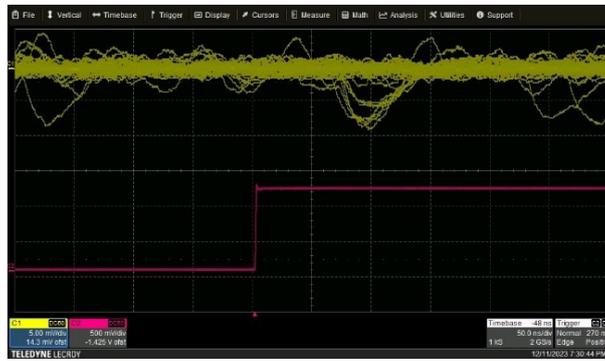


図 3.10 HPD コントロール電圧 3.0 V のオシロスコープ画面

横軸は 50 ns/div、縦軸はチャンネル 1 が 5 mV/div、チャンネル 2 が 500 mV/div を表している。また、チャンネル 2 よりトリガーをかけた。

オシロスコープの画面について左側を基準 0 %、右側を 100 % として、画面の 50 % から 90 % までを積分し、30000 イベント取得した結果から、面積を求めて解析アプリケーションである ROOT 形式に保存した。この後 ROOT を用いてヒストグラムの描画とフィッティングを行った。HV のコントロール電圧が 3 V のときの ROOT 解析後のヒストグラムを図 3.11 に示す。ROOT は欧州原子核研究機構 (CERN) によって作成された情報処理のためのフレームワークであり、高エネルギー分野で一般的に使用されている。

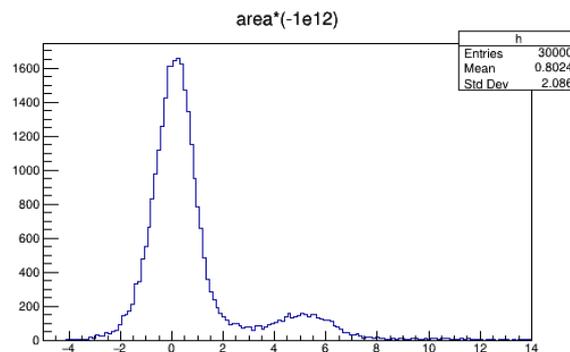


図 3.11 HPD コントロール電圧 3.0 V の 1 光電子の電荷ヒストグラム

図 3.11 は横軸が電荷を表し、単位は pC (ピコクーロン)、縦軸がイベント数を表している。横軸の値は、オシロスコープ画面について波形がないペDESTAL部分の面積が 0 にあたるようプログラムを設定した。このとき、横軸の値が 5 pC あたりでピークが見えるのがわかる。1 光電子の電荷ヒストグラムにおいて、ガウシアンを用いたフィッティングを図 3.12 に示す。ガウシアンフィッティングは、データの統計数が正規分布に従っていると仮定して、そのパラメータである平均、標準偏差、振幅を最適にフィットする手法である。

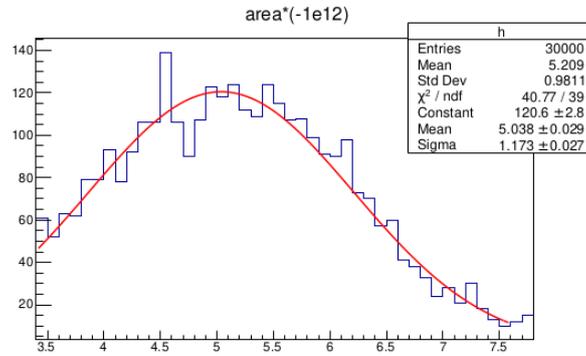


図 3.12 HPD コントロール電圧 3.0 V の 1 光電子の電荷ヒストグラムのフィッティング

式 (2.11) を用いると、今回電荷分解能は標準偏差 sigma を平均 mean で割った値で表すことができる。この時の電荷分解能の誤差は、誤差の伝播の法則を用いて以下のように算出できる。

$$\begin{aligned}\delta_w^2 &= \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \delta_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \delta_y^2 \\ &= \left(\frac{1}{y}\right)^2 \delta_x^2 + \left(-\frac{x}{y^2}\right)^2 \delta_y^2\end{aligned}\quad (3.3)$$

$$\delta_w = \sqrt{\left(\frac{1}{y}\delta_x\right)^2 + \left(-\frac{x}{y^2}\delta_y\right)^2}\quad (3.4)$$

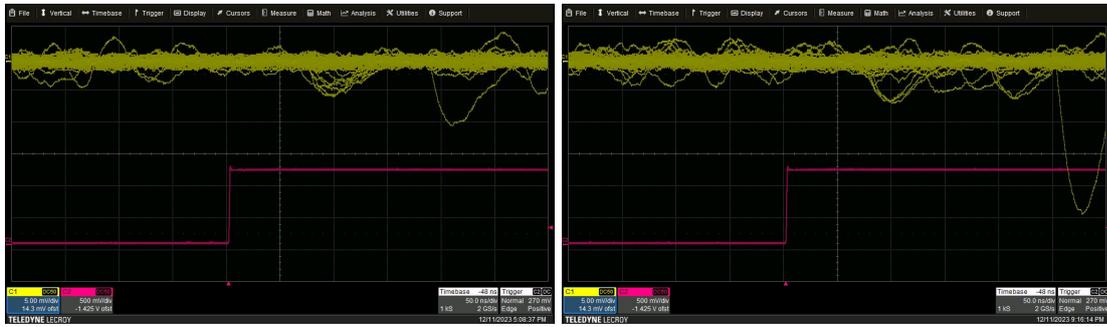
また、今回 mean は 1 光電子を増倍させて得られた光電子の電荷になっている。そのため、ゲインと mean の関係は以下の式になる。

$$\text{ゲイン} = \frac{\text{mean (pC)}}{1.602 \times 10^{-7}(\text{pC})}\quad (3.5)$$

印加電圧を変えてそれぞれヒストグラムを作成・フィッティングをし、平均、標準偏差、電荷分解能を算出し、印加電圧による特性を評価した。

3.2.2.2 測定結果

1 光電子のオシロスコープの画面を実際にかかっている加速印加電圧ごとに測定し図 3.13 に示す。



6282 V

6563 V



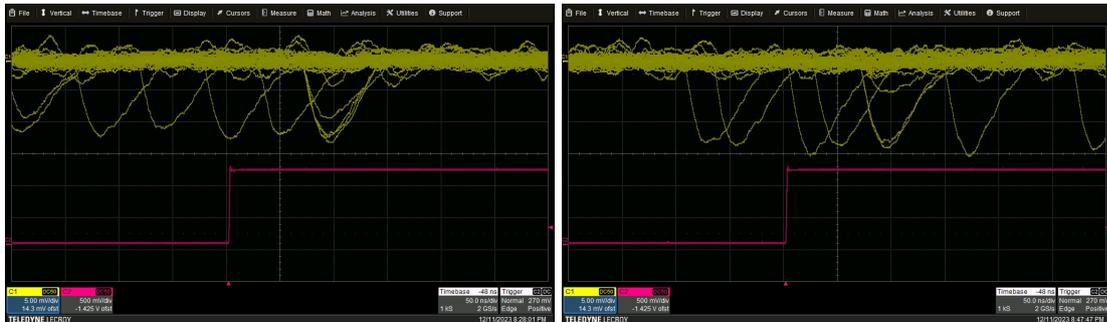
7125 V

7968 V



8530 V

9935 V



11340 V

11902 V

図 3.13 HPD 加速印加電圧ごとのオシロスコープの画面

これをみると、全体の供給電圧を増大させると、振幅も大きくなっていくことがわかる。次に、ヒストグラムを作成し、1 光電子についてガウシアンフィッティングをした図を図 3.14 に示す。

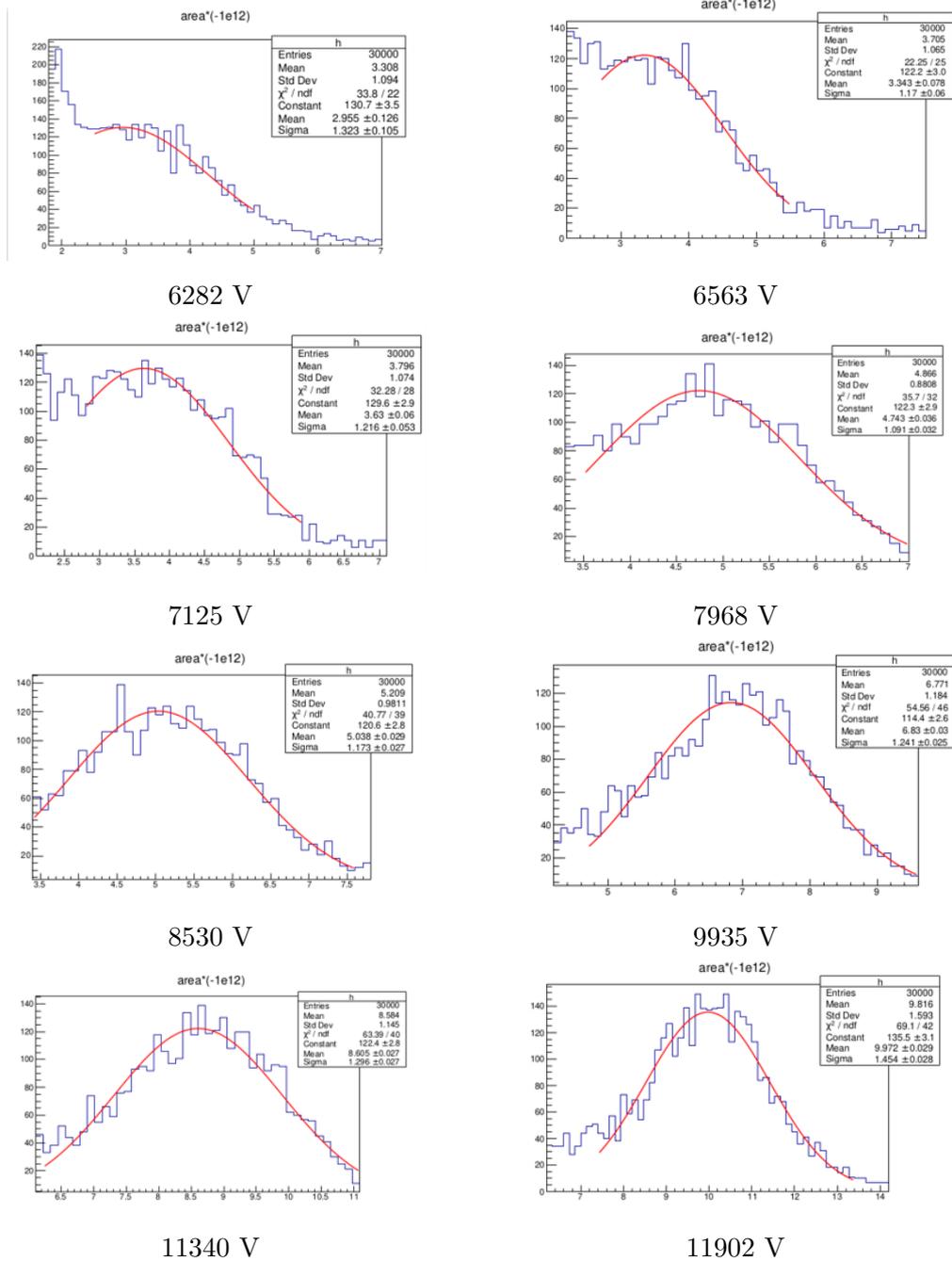


図 3.14 HPD 加速印加電圧ごとの 1 光電子ヒストグラムのガウシアンフィッティング

フィッティングした際の、平均 mean と標準偏差 sigma と算出した電荷分解能を以下の表 3.3 に示す。

コントロール電圧 (V)	光電面供給電圧 (V)	mean (pC)	mean 誤差 (pC)	sigma (pC)	sigma 誤差 (pC)	分解能	分解能 誤差
2.2	6282	3.0	0.1	1.3	0.1	0.45	0.04
2.3	6563	3.34	0.08	1.17	0.06	0.35	0.02
2.5	7125	3.7	0.1	1.2	0.1	0.32	0.03
2.8	7968	4.74	0.04	1.09	0.03	0.230	0.007
3.0	8530	5.04	0.03	1.17	0.03	0.233	0.006
3.5	9935	6.83	0.03	1.24	0.03	0.182	0.004
4.0	11340	8.60	0.03	1.30	0.03	0.151	0.003
4.2	11902	9.97	0.03	1.45	0.03	0.146	0.003

表 3.3 HPD 測定 ガウシアンフィッティングの結果と分解能

横軸を印加電圧、縦軸をそれぞれ平均 mean、標準偏差 sigma、電荷分解能にしたときのグラフを図 3.15、図 3.16、図 3.17 に示す。

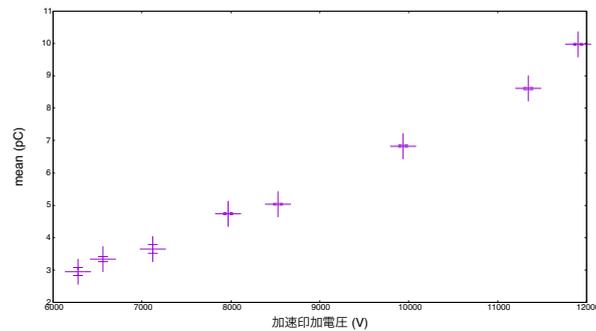


図 3.15 HPD 加速印加電圧と mean

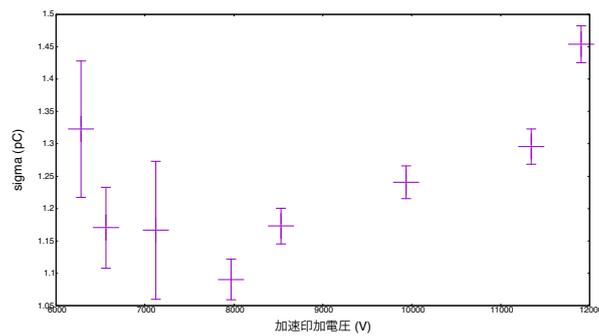


図 3.16 HPD 加速印加電圧と sigma

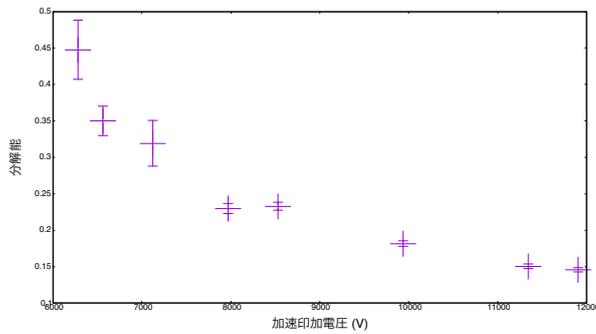


図 3.17 HPD 加速印加電圧と分解能

これをみると、印加電圧が大きくなるほど mean は増加していき、sigma は最初の 3 点を除き増加していく。また、電荷分解能においては、印加電圧に増加に対して値が減少し、分解能の精度は高まっていることがわかる。

3.2.2.3 考察

図 3.12 をみると、初めの 3 点は 1 光電子のピー信号の電荷ピークがあまり現れていない。そのためこの 3 点における mean と sigma の値は精度がよくないと仮定し、初めの 3 点を除いて考察していく。結果のグラフより、印加電圧が大きくなるほど mean と sigma は増加していくことから、式 (3.5) より印加電圧が大きくなるほど、ゲインも増加していることがわかる。また分解能の値が小さくなり、1 光電子の電荷分解能も向上していることがわかる。印加電圧におけるゲインの関係を図示し、フィッティングを行ったものを図 3.18 に示す。これをみると、印加電圧に対してゲインが線形的に増加していることが読み取れる。

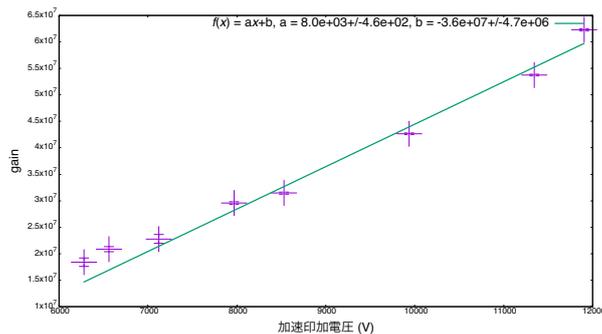


図 3.18 HPD 加速印加電圧とゲイン

これは、ゲインの式から考えることができる。2.3.1 節で説明したように、HPD のゲインは、電子打ち込みゲイン G_b とアバランシェ・ゲイン G_t の積で表される。電子打ち込みゲインについて、今回 AD 逆バイアス電圧は固定していたため、スレッショールド電圧は固定されており、加速印加電圧である V_{pC} のみを動かした。そのため、式 (2.2) より、

電子打ち込みゲインは、HV の増加の依存することがわかる。式 (2.3) において、本実験ではアバランシェ・ゲインも固定であるため、ゲインは加速印加電圧である HV のみに依存する。そのため、HV に対してゲイン、つまり meacn の測定値が線形で近似できたことは、理論的に正しいといえる。また今回のフィッティングの傾きは $(2.3 \pm 0.1) \times 10^7$ となり、印加電圧に対してゲインの増加の割合が高いことが読み取れた。

次に正規分布の性質から、今回のフィッティングについて考えていく。まず、二項分布について考える。 N 回の施行の中で n 回が成功する場合、1 回あたりの成功確率を p とすると、 n 回成功する確率は

$$P(N, n, p) = {}_N C_n p^n (1 - p)^{N-n} \quad (3.6)$$

となる。ここで試行回数の期待値は、

$$E[X] = \sum_{n=0}^N n P(N, n, p) \quad (3.7)$$

$$= Np = \mu \quad (3.8)$$

となり、これは平均 (mean) μ と同義である。また、分散は

$$V[X] = Np(1 - p) \quad (3.9)$$

のようにあらわさ、標準偏差 σ は

$$\sqrt{V[X]} = \sqrt{Np(1 - p)} = \sigma \quad (3.10)$$

となる。以上が二項分布の時の平均と標準偏差になる。ここで、正規分布で考えるため $N \gg 1, n \gg 1$ として計算すると、正規分布の時の平均と標準偏差について以下が成り立つ。

$$E[X] = Np = \mu \quad (3.11)$$

$$V[X] = Np = \mu \quad (3.12)$$

$$\sqrt{V[X]} = \sqrt{Np} = \sqrt{\mu} = \sigma \quad (3.13)$$

よって、正規分布を仮定したガウシアンフィッティングにおいては

$$\mu = \sigma^2 \quad (3.14)$$

が成り立つことがいえる。また、ガウシアンフィッティングを行う際の確率密度関数は

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (3.15)$$

であった。今回ガウシアンフィッティングした平均と標準偏差は統計数でなく電荷になっている。そのため、式 (3.14) よりにおいて定数倍が作用すると考え、

$$\text{sigma} = a \times \sqrt{\text{mean}} \quad (3.16)$$

となるような定数倍 a の値を探しフィッティングを行うと図 3.19 になった。

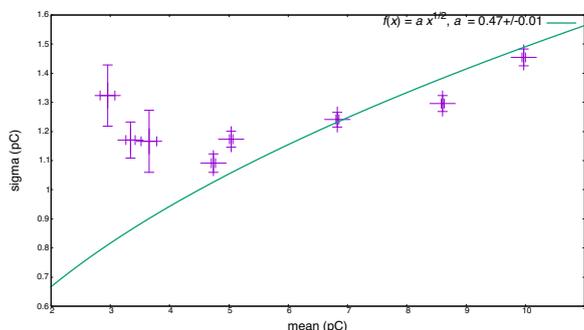


図 3.19 HPD mean と sigma とフィッティング

これをみると、式 (3.16) に対して、

$$a = 0.47 \pm 0.01 \text{ (pC)}^{1/2} \quad (3.17)$$

が定数 a の値として適切であると分かった。また、今回分解能は、式 (2.11) で表された。ここに式 (3.16) を代入すると、電荷分解能は以下の式で表されると考えられる。

よって、mean と分解能の関係についても、定数倍を用いて

$$\text{分解能} = a \times \frac{1}{\sqrt{\text{mean}}} \quad (3.18)$$

となることがわかった。ここで、mean と分解能の図を図示すると図 3.20 となり、

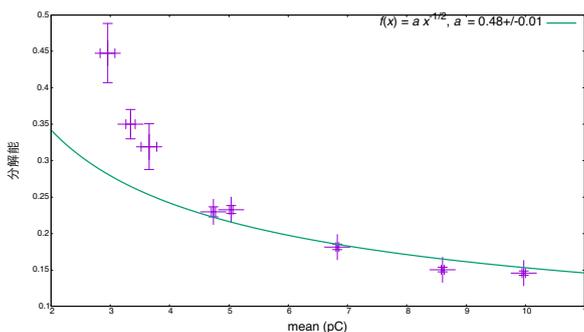


図 3.20 HPD mean と分解能とフィッティング

これをみると、式 (3.18) に対して、

$$a = 0.48 \pm 0.01 \text{ (pC)}^{1/2} \quad (3.19)$$

が定数 a として適切であるとわかった。式 (3.17)、式 (3.19) から理論的に正しいことが検証された。

3.3 PMTの分解能測定

3.3.1 セットアップ

暗箱内に以下の図 3.21 のように PMT を設置し、光源は PMT 側面に図 3.22 のように張り付け、1 光電子光量を入射した。



図 3.21 暗箱内 PMT



図 3.22 PMT 光源配置図

暗箱にはケーブルが通るように穴をあけ、全体を暗幕で覆った。今回は、第1ダイノードにかかる電圧と第2ダイノードから最終ダイノードにかかる電圧で異なる印加電圧をかけられるように回路を製作した。このときの回路を図 3.23、製作した装置を図 3.24 に示す。

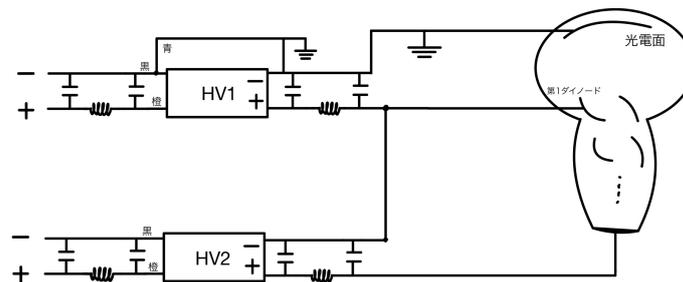


図 3.23 PMT 供給電圧回路図

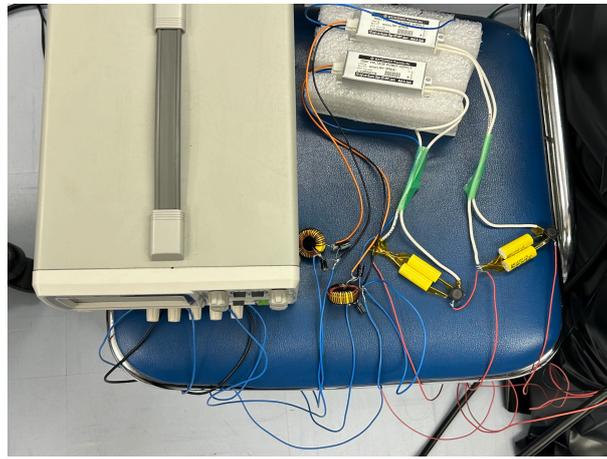


図 3.24 PMT 供給電圧装置

電源電圧を用いて印加電圧を変えていき、出力をオシロスコープに繋いで波形をプログラムを用いて取得して解析を行った。オシロスコープは、チャンネル1にPMTの出力を繋ぎ、チャンネル2に光源をつないだ。全体のセットアップについては、図 3.25 に、実際の装置のセットアップを図 3.26 に示す。

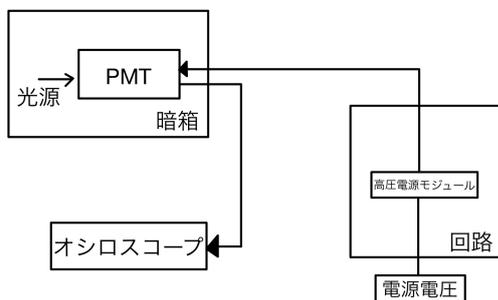


図 3.25 PMT セットアップ図



図 3.26 実際の PMT セットアップ

3.3.1.1 光電子増倍管

今回使用した光電子増倍管は、図に示すように浜松ホトニクス株式会社製 PMT の R 12860 を使用した。使用した型番は EA0047 であった。これは 50 cm 口径の PMT で、種類はヘッドオン型、受光面形状は円形、感度波長は 300~650 nm、光電面の種類はバイアルカリで窓材質は硼硅酸ガラス、ダイノードの構造はボックスライン型でダイノードの段数が 10 段のものであった。この外形寸法図に関しては図 3.27 に示す。

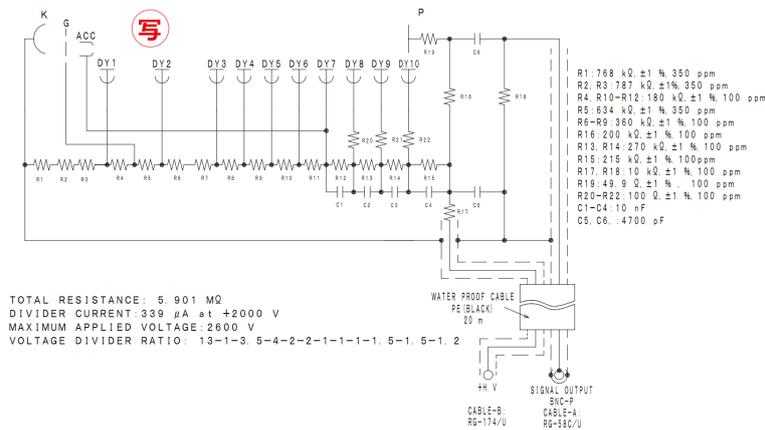


図 3.29 使用した PMT の回路図 [14]

この回路図 3.23 の回路を接続し、抵抗 R1 から R4 までにかかる印加電圧と R4 から R17 までにかかる印加電圧をそれぞれ変えることができる設計とした。R4 の抵抗値が相対的に小さいことを考慮して、前者を第 1 ダイノードまでの電圧、後者を第 1 ダイノード以降の電圧として実験を行った。R1 から R4 までの直列な抵抗の総計は 2522 kΩ、R5 から R17 までの直列な抵抗の総計は 3379 kΩ であった。ここから、全体の供給電圧が 1700 V のときには、入力から第 1 ダイノードまでにかかっている電圧は約 727 V であり、第 1 ダイノードから出力までにかかっている電圧は約 973 V と換算できる。

3.3.2 第 1 ダイノードのみ印加電圧を動かした場合の分解能測定

3.3.2.1 測定方法

全体の供給電圧が 1700 V のとき、つまり入力から第 1 ダイノードまでにかかっている電圧が 727 V、第 1 ダイノードから出力までにかかっている電圧が 973 V のときを基準とした。第 2 ダイノード以降にかかる電圧は 973 V から変えず、第 1 ダイノードにかかる電圧のみを 26 V から 1526 V まで動かしていき、全体の供給電圧を 1000 V から 2500 V まで変えて、オシロスコープで 1 光電子を確認した。全体の電圧が 1700 V のときのオシロスコープの画面図 3.30 のように、横軸は 20 ns/div、縦軸はチャンネル 1 が 500 mV/div、チャンネル 2 が 10 mV/div であった。3.2.2.1 節と同様に測定と解析を行った。

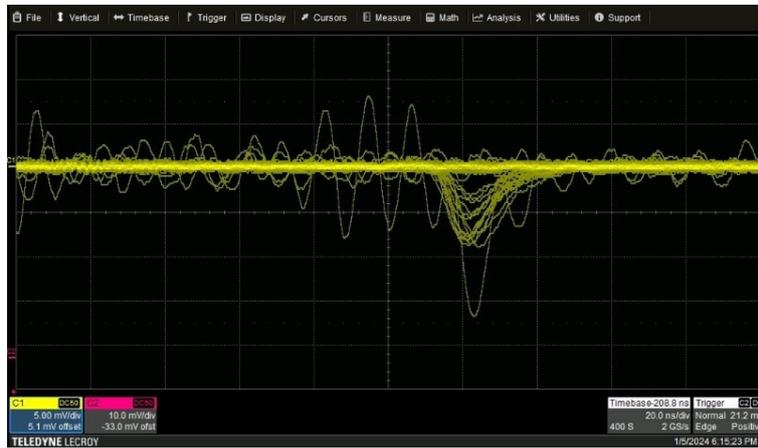


図 3.30 印加電圧 1700 V のときの PMT のオシロスコープ

3.3.2.2 測定結果

第 1 ダイノードのかかる電圧が 26 V、126 V、226 V、つまり全体の供給電圧が 1000 V、1100 V、1200 V のときは 1 光電子がオシロスコープで確認されなかった。そのため、1300 V から 2500 V までを測定・解析した。このときのオシロスコープの画面を図 3.32 に示す。



1300 V (第1 ダイノード 326 V)

1400 V (第1 ダイノード 426 V)



1500 V (第1 ダイノード 526 V)

1600 V (第1 ダイノード 626 V)



1700 V (第1 ダイノード 726 V)

1800 V (第1 ダイノード 826 V)

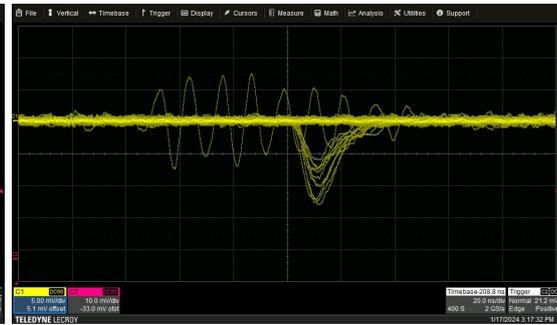


1900 V (第1 ダイノード 926 V)

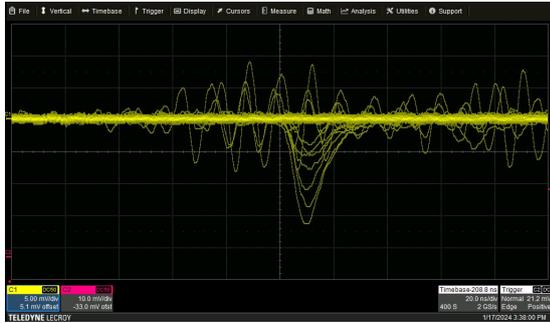
2000 V (第1 ダイノード 1026 V)



2100 V (第1 ダイノード 1126 V)



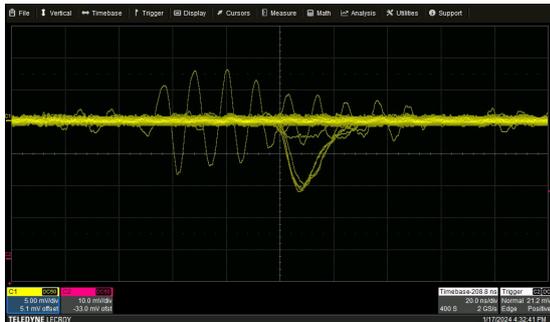
2200 V (第1 ダイノード 2226 V)



2300 V (第1 ダイノード 2326 V)



2400 V (第1 ダイノード 2426 V)

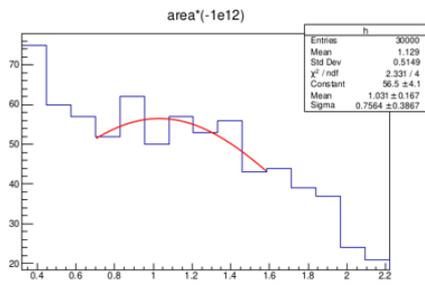


2500 V (第1 ダイノード 2526 V)

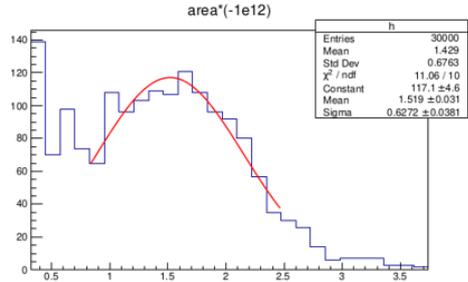
図 3.32 PMT 第1 ダイノード印加電圧のみ変化させた測定のオシロスコープ

これを見ると、印加電圧が増加するほど、振幅が増大していることがわかる。

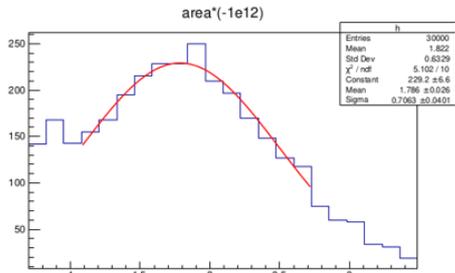
ヒストグラムを作成し、1 光電子についてガウシアンフィッティングをした図 3.34 をに示す。横軸は電荷 (pC)、縦軸は光電子の数を表している。



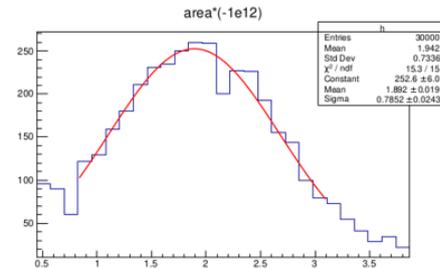
1300 (第1ダイノード 326 V)



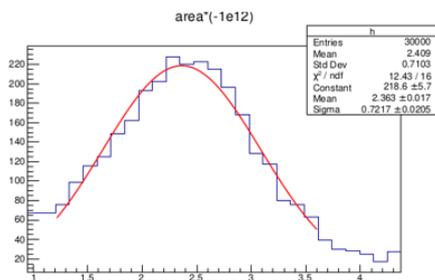
1400 (第1ダイノード 426 V)



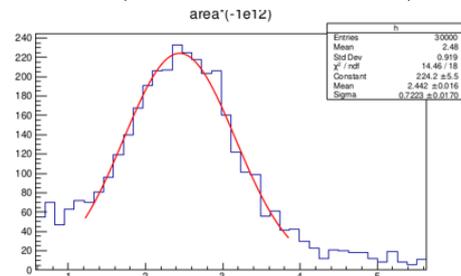
1500 (第1ダイノード 526 V)



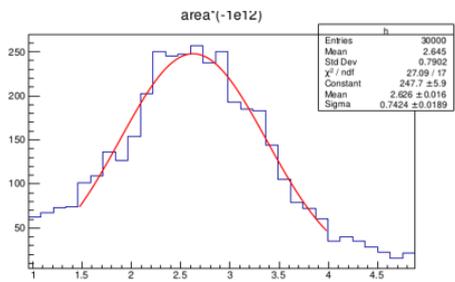
1600 (第1ダイノード 626 V)



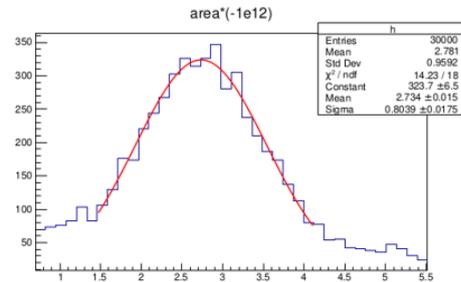
1700 (第1ダイノード 726 V)



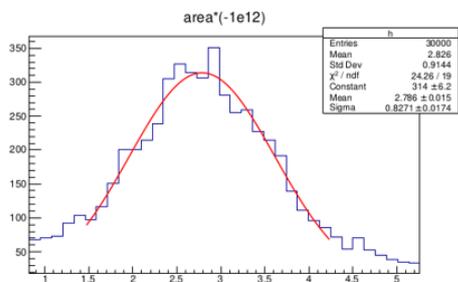
1800 (第1ダイノード 826 V)



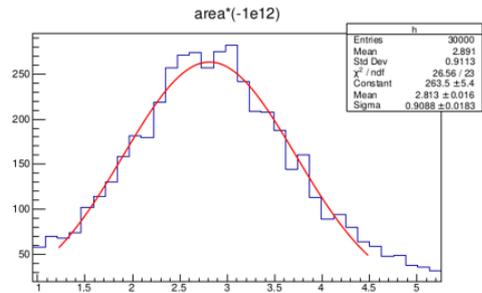
1900 (第1ダイノード 926 V)



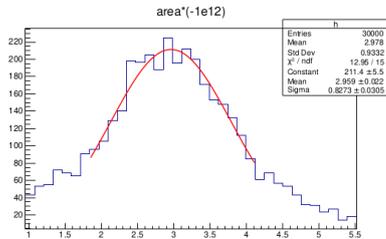
2000 (第1ダイノード 1026 V)



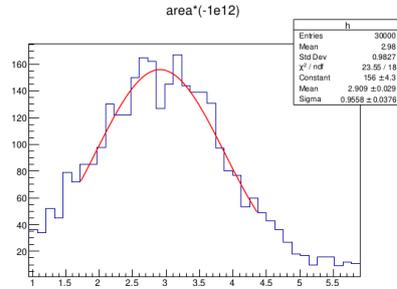
2100 (第1ダイノード 1126 V)



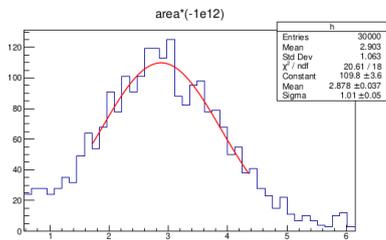
2200 (第1ダイノード 1226 V)



2300 (第1ダイノード 1326 V)



2400 (第1ダイノード 1426 V)



2500 (第1ダイノード 1526 V)

図 3.34 PMT 第1ダイノード印加電圧のみ変化させた測定のガウシアンフィッティング

これを見ると、印加電圧が増加するほど、1光電子が識別しやすくなっていることがわかる。フィッティングした際の、平均 mean と標準偏差 sigma と算出した電荷分解能を以下の表 3.4 に示す。

第1ダイ ノード電 圧 (V)	全体供給 電圧 (V)	mean (pC)	mean 誤差 (pC)	sigma (pC)	sigma 誤差 (pC)	分解能	分解能 誤差
326	1300	1.0	0.2	0.8	0.4	0.7	0.4
426	1400	1.52	0.03	0.63	0.04	0.41	0.03
526	1500	1.79	0.03	0.71	0.04	0.40	0.02
626	1600	1.89	0.02	0.79	0.02	0.42	0.01
726	1700	2.19	0.02	0.72	0.02	0.327	0.009
826	1800	2.44	0.02	0.72	0.02	0.296	0.007
926	1900	2.63	0.02	0.74	0.02	0.283	0.007
1026	2000	2.85	0.02	0.80	0.03	0.28	0.01
1126	2100	2.96	0.02	0.83	0.03	0.28	0.01
1226	2200	2.97	0.02	0.92	0.02	0.311	0.008
1326	2300	2.96	0.02	0.83	0.03	0.28	0.01
1426	2400	2.90	0.03	0.95	0.04	0.33	0.01
1526	2500	2.88	0.04	1.01	0.05	0.35	0.02

表 3.4 PMT 第1ダイノード印加電圧のみ変化させた測定のガウシアンフィッティング結果

横軸を印加電圧、縦軸をそれぞれ平均 mean、標準偏差 sigma、電荷分解能にしたときのグラフを図 3.35、図 3.36、図 3.37 に示す。

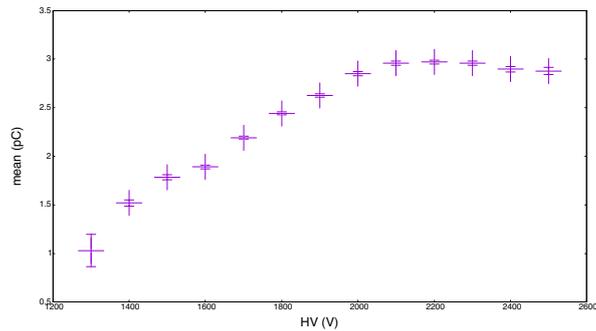


図 3.35 PMT 第1ダイノード印加電圧のみ変化させた測定の印加電圧と mean

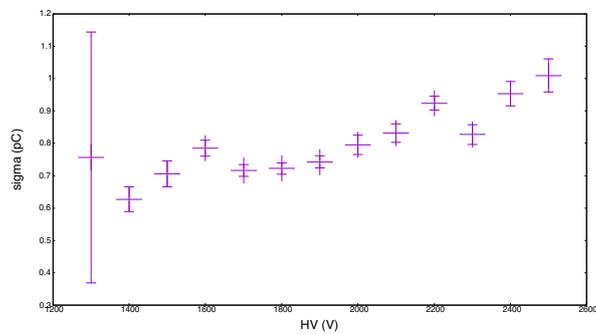


図 3.36 PMT 第1ダイノード印加電圧のみ変化させた測定の印加電圧と sigma

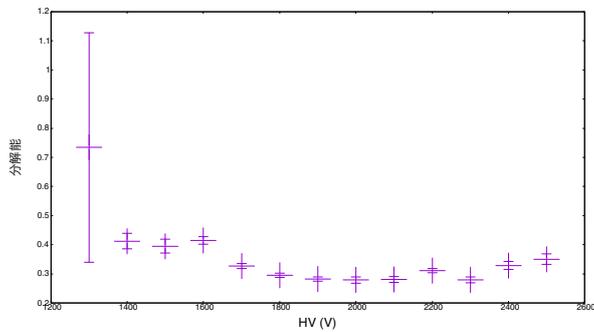


図 3.37 PMT 第1ダイノード印加電圧のみ変化させた測定の 印加電圧と分解能

これをみると、印加電圧が大きくなるほど、mean と sigma は増加していくが、mean は 2100 V のあたりから 3 pC で打ち止めになっていることがわかる。一方、電荷分解能は印加電圧が大きくなるほど値が小さくなり、分解能の精度が向上していることがわかる。しかし、mean が打ち止めになった 2100 V 以降は分解能が悪くなっていることがわかる。

3.3.2.3 考察

印加電圧の増加に対し mean が増加していることから、式 (3.5) より印加電圧の増大するほどゲイン増加していることがわかる。また分解能の値が小さくなり、1 光電子の電荷分解能も向上していることがわかる。印加電圧におけるゲインの関係を図示し、フィッティングを行ったものを図 3.38 に示す。これを見ると、第1ダイノードの印加電圧が 1100 V 付近でサチュレーションが起きていたことがわかる。

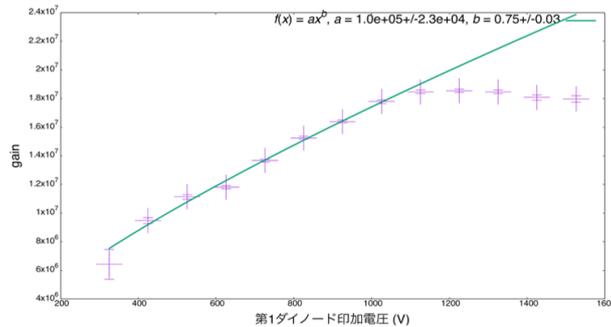


図 3.38 PMT 第1ダイノード印加電圧のみ変化させた測定の印加電圧とゲイン

ゲインの式 (2.8) から考えると、印加電圧に対してゲインが E^k 乗に増加しているはずである。ここで E は第1ダイノード間の印加電圧である。今回の結果を E^k 乗でフィッティングすると以下の式 (3.20) になり、精度よくフィッティングができ理論に対して正しかったことがわかった。

$$\text{gain} = (1.0 \pm 0.2) \times 10^5 \times E^{0.75 \pm 0.03} \quad (3.20)$$

また、3.2.2.3節と同様にガウシアンフィッティングを行ったため、mean と sigma の関係性、mean と分解能の関係性についても考察する。この時のフィッティングを行った図をそれぞれ以下に示す。

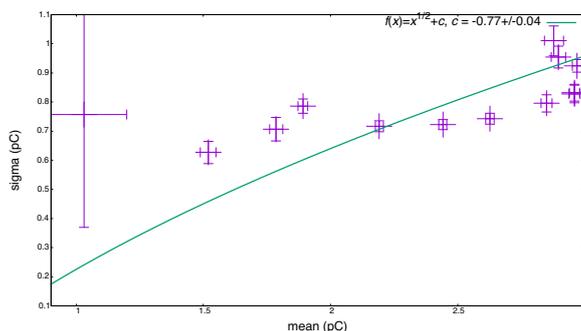


図 3.39 PMT 第1 ダイノード印加電圧のみ変化させた測定の mean と sigma のフィッティング

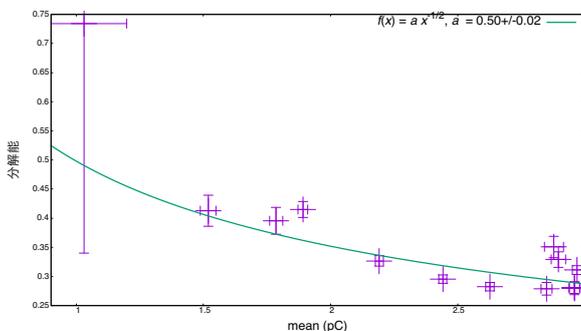


図 3.40 PMT 第1 ダイノード印加電圧のみ変化させた測定の mean と分解能のフィッティング

図 3.39 から mean と sigma においてフィッティングの定数として

$$a = 0.49 \pm 0.02 \text{ (pC)}^{1/2} \quad (3.21)$$

が適切であることがわかり、一方図 3.48 のフィットから、

$$a = 0.50 \pm 0.02 \text{ (pC)}^{1/2} \quad (3.22)$$

が適切な定数として存在することがわかり、理論に対して適切であったと考えられる。

3.3.3 第1ダイノードと第2ダイノード以降の印加電圧比が固定で全体の供給電圧を動かした分解能測定

3.3.3.1 測定方法

第1ダイノードの印加電圧のみ変化させた測定で、ゲインが 10^7 になる1700 Vの全体供給電圧を基準にした。これと同様に全体の供給電圧が1700 Vのとき、つまり第1ダイノードまでにかかっている電圧が727 V、第1ダイノード以降にかかっている電圧が973 Vのときを基準とした。この第1ダイノードと第2ダイノード以降にかかる電圧の比率が727:973に保たれるように算出・調整し、双方の電圧値を動かして、全体の供給電圧を1000 Vから2500 Vまで100 Vずつ動かしていった。このとき、それぞれにかけた電圧を表3.5に示す。

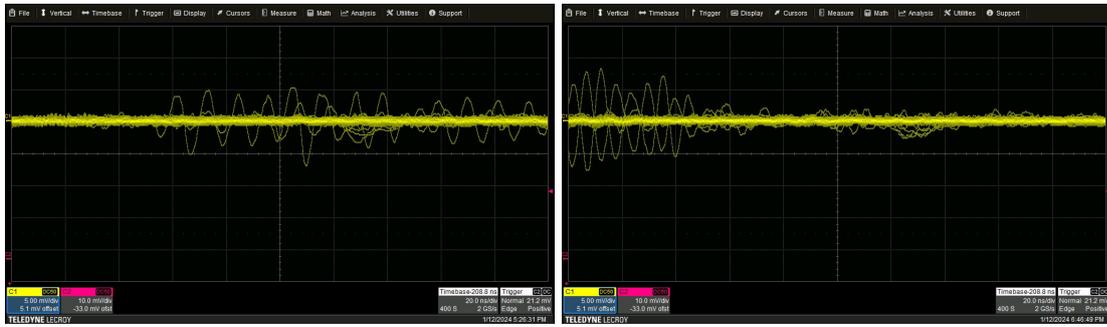
全体の供給電圧 (V)	第一ダイノードの印加電圧 (V)	第二ダイノード以降の印加電圧 (V)
1000	427	573
1100	470	630
1200	512	688
1300	555	745
1400	598	802
1500	641	859
1600	683	917
1700	726	974
1800	769	1031
1900	811	1089
2000	854	1146
2100	897	1203
2200	940	1260
2300	982	1318
2400	1025	1375
2500	1068	1432

表 3.5 全体の供給電圧を変化させた測定の実際の印加電圧

オシロスコープの設定は、3.3.2.1 節と縦軸、横軸、トリガーを同じ値に設定したが、全体の供給電圧が2000 Vを超えると、オシロスコープの画面から振幅がはみ出てしまった。そのため、2000 V以降はチャンネル1の縦軸を10 mV/divに設定した。その後の測定と解析については、3.2.2.1 節、3.3.2.1 節と同様に行った。

3.3.3.2 測定結果

全体の供給電圧が1000 V、1100 V、1200 V、1300 Vのときは1光電子がオシロスコープで確認されなかった。また、2400 V以降は波形の振幅が非常に大きくなってしまった。そのため、1400 Vから2300 Vまでを測定・解析した。このときのオシロスコープの画面を図3.41に示す。ただし、横軸は電荷 (pC)、縦軸は光電子数を表している。



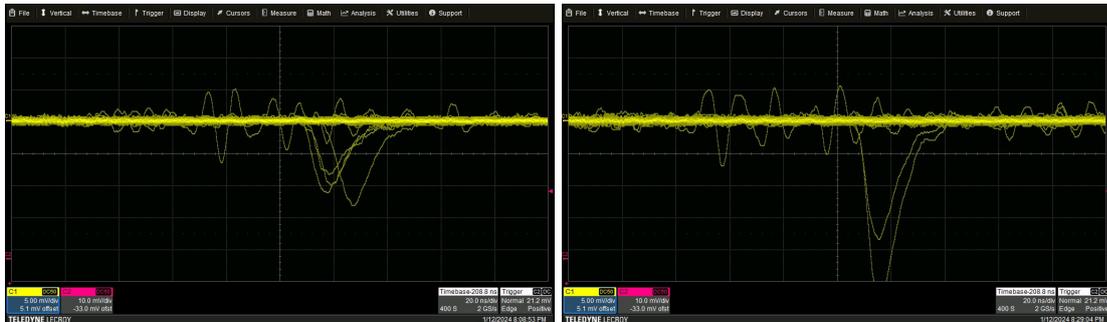
1400 V

1500 V



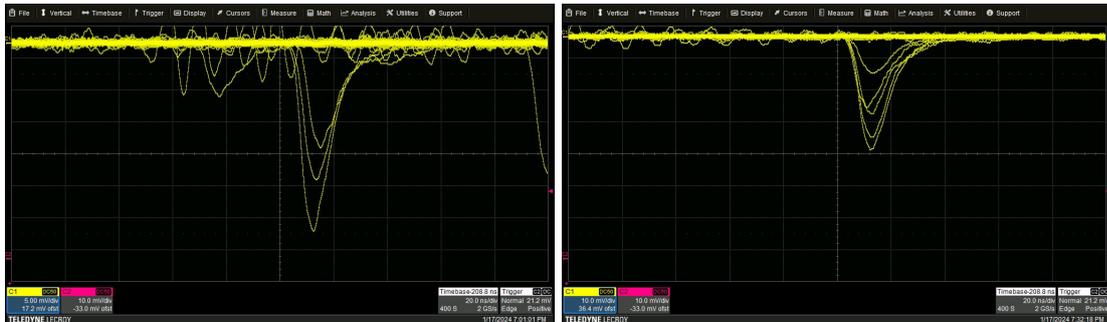
1600 V

1700 V



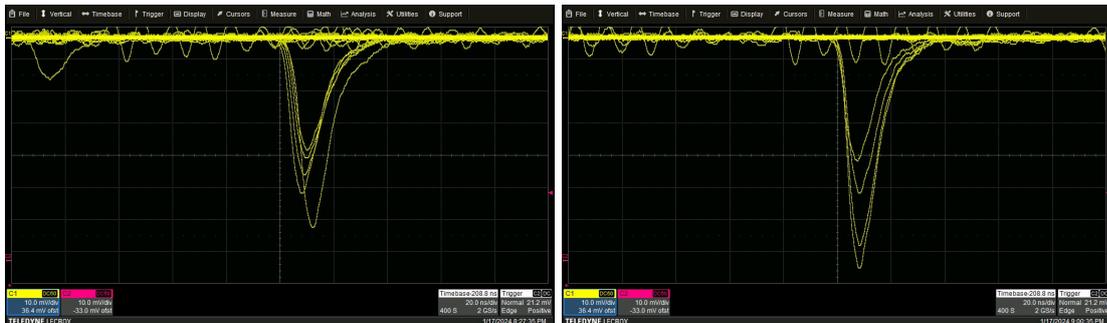
1800 V

1900 V



2000 V

2100 V



2200 V

2300 V

図 3.41 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定のオシロスコープ

これをみると、3.3.2.2節の実験結果と同様に、全体の供給電圧を増大させると、振幅も大きくなっていくが、その増大する割合は、3.3.2.2節の実験結果での増大の割合と比べて非常に大きくなった。

次にヒストグラムを作成し、1光電子についてガウシアンフィッティングをした図を図3.42に示す。

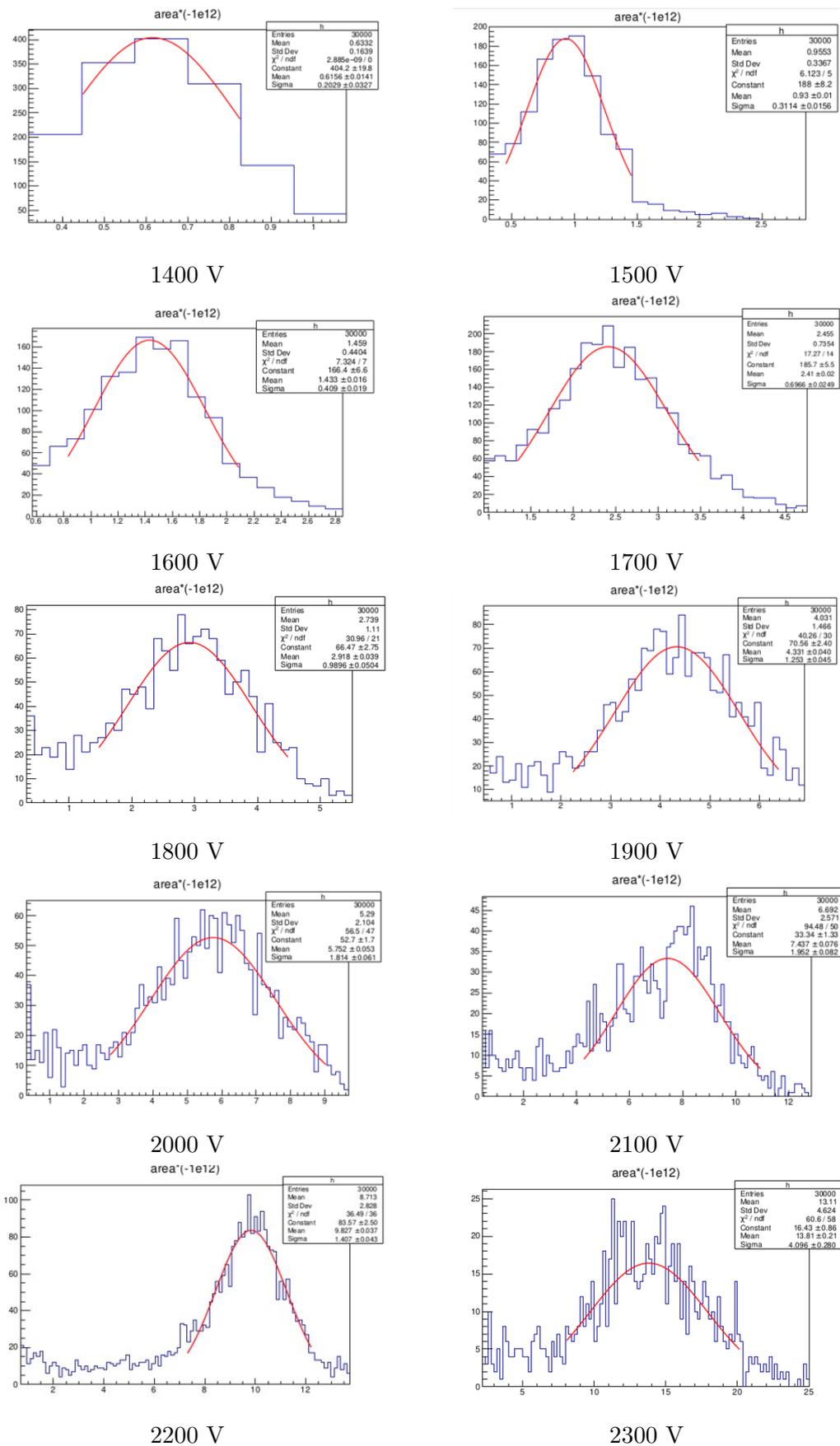


図 3.42 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定のガウシアンフィッティング

これを見ると、印加電圧が増加するほど 1 光電子が識別しやすくなっていることがわ

かる。

フィッティングした際の、平均 mean と標準偏差 sigma と算出した電荷分解能を以下の表 3.6 に示す。

全体供給 電圧 (V)	mean (pC)	mean 誤差 (pC)	sigma (pC)	sigma 誤差 (pC)	分解能	分解能 誤差
1400	0.62	0.01	0.20	0.03	0.33	0.05
1500	0.93	0.01	0.31	0.02	0.34	0.02
1600	1.43	0.02	0.41	0.02	0.29	0.01
1700	2.07	0.02	0.63	0.03	0.30	0.01
1800	2.92	0.04	0.99	0.05	0.34	0.02
1900	4.33	0.04	1.25	0.05	0.29	0.01
2000	5.90	0.07	1.73	0.06	0.29	0.01
2100	8.1	0.1	2.2	0.2	0.27	0.02
2200	10.7	0.2	3.4	0.2	0.32	0.02
2300	13.8	0.2	4.1	0.3	0.30	0.02

表 3.6 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定のガウシアンフィッティングの結果

横軸を印加電圧、縦軸をそれぞれ平均 mean、標準偏差 sigma、電荷分解能にしたときのグラフを図 3.43、図 3.44 図 3.45 に示す。

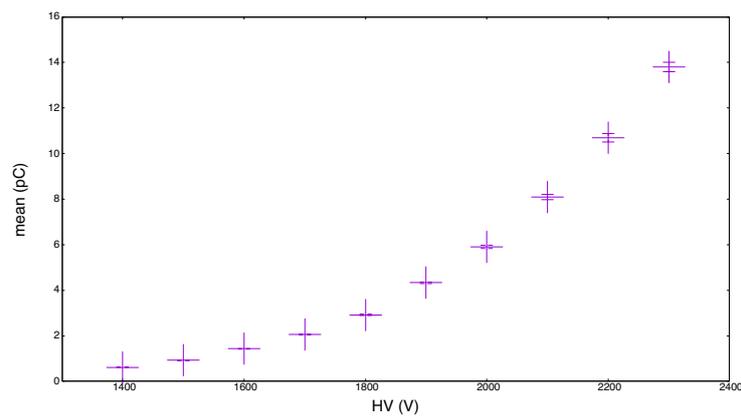


図 3.43 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定の印加電圧と mean

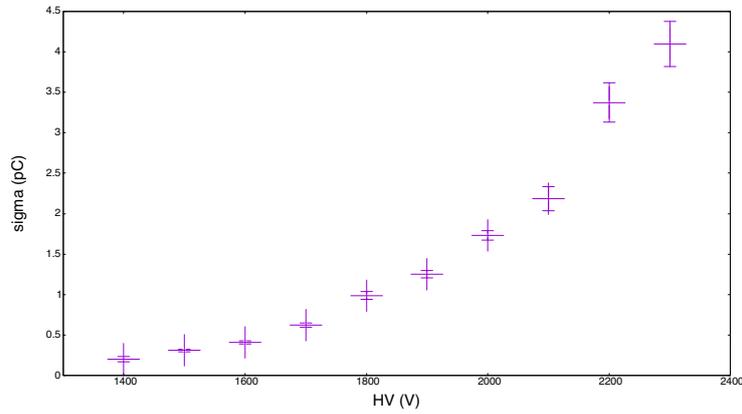


図 3.44 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定の印加電圧と sigma

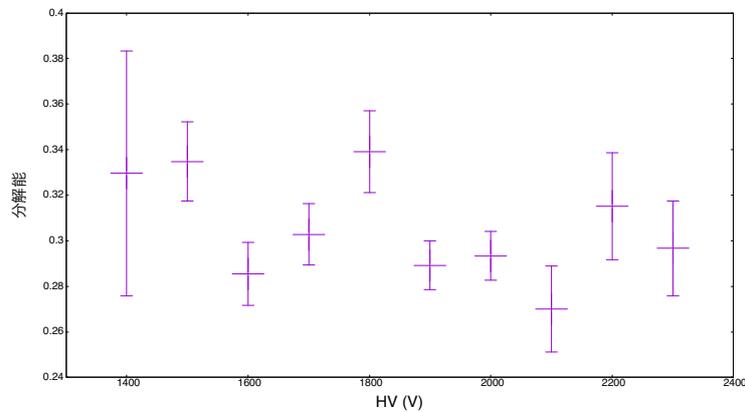


図 3.45 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定の印加電圧と分解能

これをみると、印加電圧が大きくなるほど、mean と sigma は増加していく。また、電荷分解能においては、印加電圧に増加に対して値が減少し、分解能の精度は高まっているが、分解能の精度の向上の割合は 3.3.2 節に比べると非常に小さく、ばらつきも大きいことがみてとれる。

3.3.3.3 考察

印加電圧の増加に対し mean が増加していることから、式 (3.5) より印加電圧の増大するほどゲイン増加していることがわかる。また分解能の値が小さくなり、1 光電子の電荷分解能も向上していることがわかる。印加電圧におけるゲインの関係を図示し、フィッティングを行ったものを図 3.18 に示す。

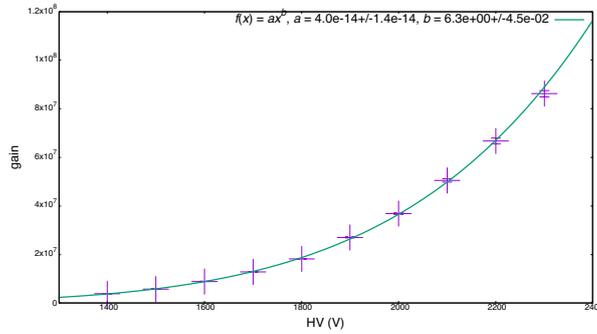


図 3.46 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定の印加電圧とゲイン

これをみると、印加電圧に対してゲインが累乗的に増加していることが読み取れる。これは、ゲインの式 (3.5) から考えることができる。印加電圧が大きくなるほど、mean と sigma は増加していくことから、印加電圧が大きくなると、ゲインが増加し、1 光電子のエネルギーの識別能力も向上していることがわかる。ゲインの増加の割合が、3.3.2 節の実験に比べて大きいことは、ゲインの式 (2.8) を用いて説明ができる。3.3.2 節の実験においては第 1 ダイノードのみ印加電圧を増大したため、収集効率 α と第 1 ダイノードの 2 次電子放出比のみしか増大しなかったが、今回の実験では収集効率 α と第 1 ダイノードの 2 次電子放出比のみでなく、第 2 ダイノードから最終ダイノードまでの電子放出比も増倍しており、その積がゲインになっていることが要因としてあげられる。mean と sigma の増加が指数関数的な増加を示したことについては、式 (2.10) から説明できる。フィットの図から、今回ゲインは供給電圧の 6.3 ± 0.05 乗に比例することがわかった。本実験で使用した PMT は 10 段階のダイノードであったので式 (2.10) において、 $n = 10$ より

$$k = 0.63 \pm 0.05 \quad (3.23)$$

であったことがわかった。

また、3.2.2.3 節と同様にガウシアンフィッティングを行ったため、mean と sigma の関係性、mean と分解能の関係性についても考察する。この時のフィッティングを行った図をそれぞれ図 3.48、図 3.48 に示すと、今回フィッティングの精度がよくないことがわかる。

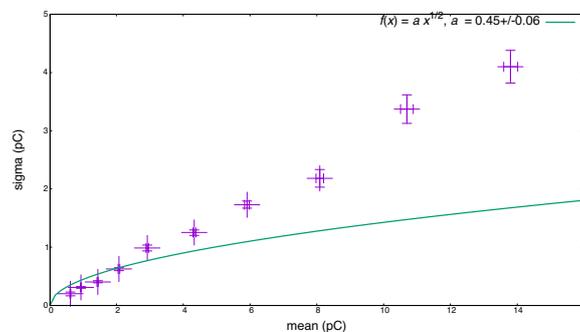


図 3.47 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定の mean と sigma のフィッティング

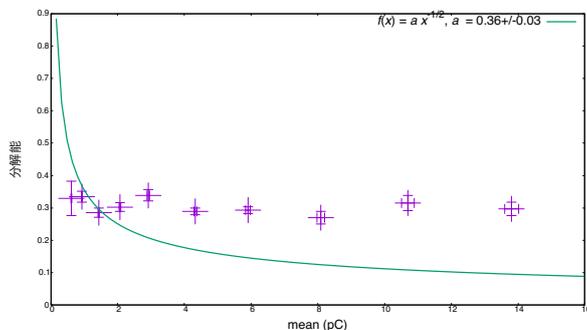


図 3.48 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定の mean と分解能のフィッティング

式 (3.16) をもとに定数倍で考えた時、mean と sigma、mean と分解能の関係性が適切に表せなかった要因について考えていく。3.3.2 節の実験では、mean と sigma、mean と分解能の関係性は式 (3.16) で説明することができた。そのため、本実験での測定においても、ゲインが第 1 ダイノードの印加電圧のみに依存すると考えた。この時、第 1 ダイノードのゲインに相当する mean について算出した。

式 (2.8)、式 (2.10)、式 (2.9) を用いると、今回ダイノードの段数が 10 段であるため $n = 10$ とすると、ゲイン μ において、

$$\begin{aligned}\mu &= \alpha \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdots \delta_{10} \\ &= (\alpha E^k)^{10} = AV^{10k} \quad (\because V = 11E)\end{aligned}\tag{3.24}$$

が成り立っている。簡単のため、 $\alpha = 1$ 、 $a = 1$ として第 1 ダイノード以降の電圧が等分配されていると考えると、

$$\begin{aligned}\frac{\delta_1}{\mu} &= \frac{1}{\delta_2 \cdot \delta_3 \cdots \delta_{10}} \\ &= \frac{1}{\left(\frac{974}{1700} \cdot V \cdot \frac{1}{10}\right)^{9k}} \\ &= \frac{1}{\left(\frac{974V}{17000}\right)^{9k}}\end{aligned}\tag{3.25}$$

となり、全体の mean に $\frac{\delta_1}{\mu}$ をかけることで、第 1 ダイノードに相当する mean が求まるため、

$$\begin{aligned}\text{第 1 ダイノードの mean} &= \text{全体の mean} \times \frac{\delta_1}{\mu} \\ &= \text{全体の mean} \times \frac{1}{\left(\frac{974V}{17000}\right)^{9k}}\end{aligned}\tag{3.26}$$

となることがわかる。mean と sigma の双方に式 (3.26) を適応して、再度式 (3.16) に基づくフィッティングを行った。この時の図を図 3.49、図 3.50 に示す。

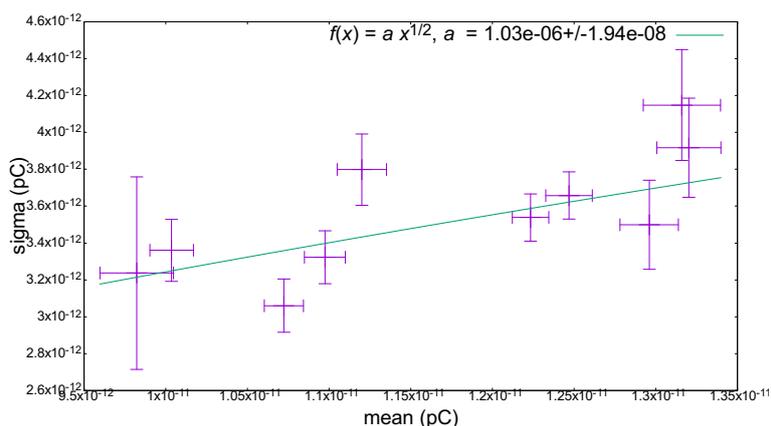


図 3.49 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定の第 1 ダイノードにおける mean と sigma のフィッティング

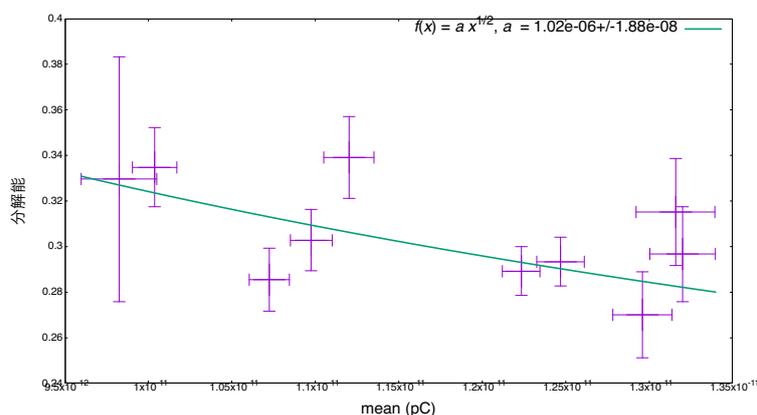


図 3.50 PMT 全体の供給電圧を変化させた測定の第 1 ダイノードにおける mean と分解能のフィッティング

この時、図 3.49 からは

$$a = (1.03 \pm 0.02) \times 10^6 \text{ (pC)}^{1/2} \quad (3.27)$$

と求まり、図 3.50 からは、

$$a = (1.02 \pm 0.02) \times 10^6 \text{ (pC)}^{1/2} \quad (3.28)$$

となることがわかり、今回の測定とフィッティングが適切であったことがわかった。

ここから、PMT の電荷分解能の印加電圧特性は、全体の供給電圧でなく第 1 ダイノードでの印加電圧に依存していることがわかった。

第4章 結論と今後の展望

本研究では、ハイパーカミオカンデで使用予定の 50 cm 口径 PMT の電荷分解能を向上させるために、光検出器の印加電圧の特性を評価した。方法としては、暗箱の中に光検出器を設置し、光ファイバーで光を入射して、オシロスコープで 1 光電子の電荷を測定した。その後電荷分解能を算出し、印加電圧との関係を考察した。HPD は加速印加電圧を動かす測定を行い、PMT は第 1 ダイノードのみの印加電圧を動かす測定と第 1 ダイノードと第 2 ダイノード以降の比を保ったまま全体の印加電圧を動かす測定の 2 通りの測定を行った。

本研究において、印加電圧の増加に伴うゲインと分解能の精度の向上が確認された。まず HPD において分解能の精度の向上が見られたため、PMT でも同様の精度向上が見られるのではないかと考えた。第 1 ダイノードの印加電圧のみを変化させたところ、1100 V 以降でサチュレーションが起きることがわかった。この後、PMT の全体供給電圧を変化させる測定をしたところ、ガウシアンによるフィッティングがずれてしまった。そこで第 1 ダイノードの印加電圧のみでガウシアンフィッティングを考えたところ、フィットの精度が向上した。ここから、PMT の分解能の精度向上のためには、第 1 ダイノードの印加電圧の依存性が重要であることがわかった。

今後の展望として、第 1 ダイノードの印加電圧をサチュレーションとまらない程度に増加させたまま、第 1 ダイノード以降の電圧もあげていき、得られるゲインの最大と最も精度の高い分解能の値、そしてその時の第 1 ダイノードの印加電圧と全体印加電圧を調べれば、PMT の分解能を最大限高められるはずである。

謝辞

本研究を行うにあたり多くの方々にお世話になりました。この場をお借りして感謝の意を述べさせていただきます。

まず、指導教員の西村康宏先生には、測定方法や解析手法、データ取得のプログラム作成など丁寧に指導していただきました。先行研究やその背景などについても教えていただき、大変勉強になっただけでなく、素粒子の面白さや実験の楽しさにも気づくことができました。お忙しいにも関わらず、丁寧なご指導と多くの助言をくださり心から感謝しています。

また、研究室の先輩方にも大変お世話になりました。前川雄音さんは、アンプのなどの装置の使い方を教えていただいたり、進捗報告の際に私が解決できなかった疑問を丁寧にかつ的確に教えてくださいました。素粒子研究における知見が広く、尊敬しております。Yu Ming Liu さんには、自身の知らなかった解析手法や研究について教えていただきました。岡崎玲大さんには、HPD を使用した際の実験装置について教えていただきました。岡崎さんがかつて使用していた装置を一部使わせていただき、そのお陰で滞りなく実験を行うことができました。小林美咲さんには、研究における疑問点だけでなく TeX のプログラムや資料作りについてもアドバイスをいただきました。常に説明がわかりやすく、尊敬しています。堀内昇悟さんは、いつも実験や解析の進捗を気にかけてくださいました。疑問点や解析法に悩んでいたら相談に乗ってくれ、助言をくださったり一緒に考えてくださったりと大変お世話になりました。ありがとうございました。同期の川端篤史君は、一緒に実験室で作業することが多く、実験器具の使用方法やデータのとり方を教えてくれたりしました。

最後に、これまでお世話になった先生方、私を支えてくれた家族に感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] 東京大学素粒子物理国際センター. 素粒子の発見と標準理論:<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/elementaryparticle/standardmodel.html> (2023.12.17)
- [2] 秋本祐希 標準模型の素粒子：HIGGSTAN：<https://higgstan.com/standerd-model> (2023.12.17)
- [3] Particles and Fundamental Interactions.Sylvie Braibant, Giorgio Giacomelli, Maurizio Spurio.978-94-007-2463-1.16 November 2011
- [4] 千葉大学ハドロン宇宙国際センター. ニュートリノとは:<http://www.icehap.chiba-u.jp/neutrinos/index.html>(2023.12.28)
- [5] 東京大学宇宙線研究所附属神岡宇宙素粒子研究施設. 検出器について. スーパーカミオカンデ. <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/about/detector/> :<https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/hk/about/research/> (2023.12.29)
- [6] 東京大学宇宙線研究所附属神岡宇宙素粒子研究施設. 検出器について. ハイパーカミオカンデ:<https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/hk/about/detector/> (2023.12.29)
- [7] 石河寛昭 チェレンコフ光および α 線の測定 RADIOISOTOPES,Vol.24,No. 10,pp.72-77,Oct. 1975
- [8] 江上典文. 光電変換の基礎. 映像情報メディア学会誌,2014,68.1: 63-67.
- [9] 浜松ホトニクス株式会社編集委員会 光電子増倍管-その基礎と応用-第4版 浜松 <https://www.overleaf.com/project/658fca96836accf9cbf48bcc> ホトニクス株式会社 2017 (2023.12.15)
- [10] FUKUDA,S,et al.The super-kamiokande detector.Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 501.2-3:418-462
- [11] Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration, K. Abe et al. Hyper-Kamiokande Design Report.Nov.2018

- [12] 西村康宏 ハイパーカミオカンデ大口径光検出器の開発 高エネルギー物理学研究者会議 研究紹介 2021
- [13] 浜松ホトニクス株式会社 8inch HPD Analog Module (EHD0098,0099,0102,0104) 仕様及び、データ 30 Jun. 2014
- [14] 浜松ホトニクス株式会社 R12860HQE 精密測定結果 (6 pcs) EA0037, EA0045, EA0046,EA0047, EA0052, EA005