

修士論文

Cherenkov Telescope Array 大口径望遠鏡における 焦点面検出器光電子増倍管の性能評価

埼玉大学大学院 理工学研究科 物理機能系専攻 物理学コース
田代・寺田研究室

10MP109 小山 志勇

指導教官：寺田 幸功

提出：2012年2月6日

Abstract

TeV におよぶ超高エネルギー宇宙ガンマ線観測は、宇宙線起源と予想される超新星残骸や活動銀河核での粒子加速、また銀河団の重力にとらえられたダークマターの検証など、高エネルギー物理学分野において重要なプローブとなる。また、近年の検出器の高感度化にともなって次々と新たなガンマ線天体が発見されており、現在までに観測されている TeV ガンマ線源は 100 天体を超え、天文学の新たな一分野を形成している。しかし、検出器にはいまだ性能向上の余地があり、さらなる高感度化によって 1000 を超える TeV ガンマ線源の発見と系統的研究が期待される。

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画は、大規模チェレンコフ望遠鏡群を建設し、従来よりも一桁高い感度でかつ広いエネルギー帯域での宇宙ガンマ線観測を行うことを目指す世界 25 カ国による国際共同実験計画である。CTA では大 (23 m)・中 (12 m)・小口径 (6 m) の 3 種類の望遠鏡をそれぞれ 4 台、23 台、32 台を設置することで 20 GeV から 100 TeV の広エネルギー帯域と検出感度 $\sim 10^{-14}$ erg/cm² を実現する。さらに北半球と南半球に望遠鏡群を設置すること全天観測を可能にする。

CTA 計画は 2015 年の望遠鏡の建設開始、2020 年の全望遠鏡による本格的な稼働に向けて、現在は、各望遠鏡の設計およびプロトタイプ望遠鏡の建設の段階にある。望遠鏡開発は CTA 計画に参加している各国、各研究グループ間での競合で進められている。CTA 日本グループでは大口径望遠鏡の開発に重点をおき、他のグループを圧倒的にリードして開発を進めている。

大口径望遠鏡における焦点面検出器の光検出器となる光電子増倍管は浜松ホトニクス社と共同開発を行っており、現在は光電子増倍管単体の性能評価の最終段階にある。大口径望遠鏡 1 台で合計 1855 本の光電子増倍管を用い、チェレンコフ望遠鏡の中でも最大規模の焦点面カメラとなるが、その分、エレクトロニクスなどからの発熱も大きくなると予想され、また屋外に露出しているため外部の温度環境も合わせた熱設計が求められている。現在のところ環境温度 -20 °C から 40 °C に耐えうるカメラ設計が提案されており、この温度範囲における各機器の挙動を調査してカメラ全体の熱設計の目標を明確化していく必要がある。

本研究では光電子増倍の性能評価試験に際して、新たに埼玉大学での試験系セットアップを立ち上げ、光電子増倍管からの 1 photo electron の信号をとらえることに成功し、その性能評価を行った。20 °C から 50 °C でのゲイン特性の温度依存性を測定したところ、 $\sim -1\%$ / °C 以下のゲインの降下が見られた。同じ温度条件での、Preamp 増幅率、高電圧値には顕著な温度依存性が見られなかったため、このゲインの温度依存性は光電子増倍管に内在する特性であることが分かった。

目次

第 1 章	Introduction	1
1.1	天文学における超高エネルギーガンマ線観測	1
1.2	超高エネルギーガンマ線の観測方法	1
第 2 章	Cherenkov Telescope Array 計画	7
2.1	概要	7
2.2	日本における大口径望遠鏡の開発	10
2.3	光電子増倍管の開発	13
2.3.1	光電子増倍管の原理と性質	13
2.3.2	光電子増倍管 Hamamatsu R11920-100 の開発	16
2.4	冷却系の開発	17
2.5	本研究の目的	22
第 3 章	光電子増倍管の性能評価試験	23
3.1	性能要求および実験目的	23
3.2	室温における基礎特性評価試験	24
3.2.1	各サブセットの基礎特性	24
3.2.2	1 p.e. スペクトルによるゲイン評価	24
3.2.3	HV 値に対するゲインの測定	33
3.3	温度依存試験	36
3.3.1	各サブセットの基礎特性	36
3.3.2	ゲイン測定	38
第 4 章	Conclusion	49

目 次

1.1	VHE ガンマ線の全天マップ [1]	2
1.2	X 線源、ガンマ線源、VHE ガンマ線源の数を時間の関数として示したもの（通称 Kifune Plot と呼ばれる）。2010 年現在、およそ 100 の VHE ガンマ線源が観測されている。源の数が指数関数的に増えていることがわかる。CTA では、1000 を超える VHE ガンマ線源が観測されると期待される。[2]	2
1.3	電磁シャワー (左) とハドロンシャワー (右) の模式図 [3]	3
1.4	ステレオ観測の模式図。	5
1.5	上から、北半球の MAGIC 望遠鏡 (2 x 17m, La Palma, Canaries)、VERITAS 望遠鏡 (4 x 12m, Arizona, US)、南半球の H.E.S.S. 望遠鏡 (4 x 12m, Namibia)、CAN-GAROO 望遠鏡 (4 x 9m, Woomera, Australia)。	6
2.1	CTA の想像図。大口径 (~23 m)、中口径 (~12 m)、小口径 (~6 m) のチェレンコフ望遠鏡群からなるアレイ。	8
2.2	CTA で予想される感度曲線 (赤) と現行の検出器の感度との比較。[2] エネルギー毎のガンマ線フラックスに対する閾値を表し、曲線が下にあるほど高感度である。	8
2.3	大口径望遠鏡の構造図 [2]	9
2.4	HV、Preamplifier 回路を含めた PMT ユニットの	10
2.5	PMT 7 ユニットの読み出しボード等エレクトロニクスを接続した PMT クラスターの	11
2.6	CTA Japan が開発している PMT 読み出し回路のブロック図 [2]	12
2.7	左: 接続された 3 枚のバックプレーン。右: 読み出しボードとバックプレーンを接続した様子	12
2.8	左: 分割鏡製作に用いた cold slump 法の略図。右: 1.5 m 分割鏡の試作品	12
2.9	PMT の構造図 [4]	14
2.10	デバイダ回路の概念図 (上: 陰極接地型、下: 陽極接地型、ともに 5 段ダイノードの例)[6]	14
2.11	PMT R1192-100 量子効率の測定結果 [9]	17
2.12	PMT R1192-100 アフタパルスの測定結果。左: アフタパルスの時間分布。三つのピークはそれぞれ水素 (H)、ヘリウム (He)、メタン (CH ₄) の残留ガス成分である。右: 入射光量 (p.e. 単位) に対するアフタパルスの発生確率。[10]	17
2.13	読み出しボードの熱数モデルを用いた冷却系がない場合の熱解析結果 (CTA 内部資料)	18
2.14	左: MAGIC 望遠鏡で用いられたクーリングプレート。右: クーリングプレートの概要図。プレート内の水冷パイプによりカメラ内の冷却を行う。	19
2.15	ヒートパイプによるエレクトロニクス素子の直接冷却。熱伝導の良いシリコン素材を通じてアルミプレートに熱を逃がし、ヒートパイプを使って熱浴となるクーリングプレートに素早く排熱する。	20
2.16	PMT21 ユニットの、3つのクラスターを組み合わせた状態でのミニカメラ	21

3.1	Preamp と HV 回路の予備試験のセットアップ図。破線と点線はそれぞれ、Preamp の試験と HV 回路の試験で固有の系統を表す。実線の系統は両試験で共通している。	24
3.2	パルスジェネレータから Preamp へ入力した信号 (黄) と Preamp からの出力信号 (青)	25
3.3	上段:Preamp の入力電圧に対する出力電圧、下段:横軸 0-40 mV の範囲を使って一次関数でフィットした時の残差	25
3.4	HV control 電圧に対する HV monitor 電圧の線形性	26
3.5	HV control 電圧に対する消費電力。preamp 駆動電圧を含む	26
3.6	室温試験の際のセットアップ図。Preamp からの出力信号をオシロスコープでモニターして確認する。波形データを取得する際には DRS4 evaluation board を用い、PC にデータを取り込む。	27
3.7	実際のセットアップの様子。	27
3.8	1 p.e. 波形の積分値をゲインに換算するイメージ	29
3.9	多重ガウシアンフィットによる 1 p.e. 解析の概要図。0 p.e. はペDESTAL に相当する。	29
3.10	HV 値 1300 V での光量を徐々に下げて行った時の波形ピークの分布。左上、右上、左下、右下の順で光量を下げた。	31
3.11	オシロスコープで取得した 1 p.e. 相当の波形。	32
3.12	1 p.e. 相当の波形積分値分布のフィット結果。	32
3.13	波形の積分値分布。マゼンタはフィットした多重ガウス分布を表す。ボックスにはフィット結果のパラメータを示し、p0 から p5 はそれぞれ、3.9 式における μ 、 X_0 、 σ_0 、 ΔX 、 σ 、 S に対応する。左上:HV 950 V、右上:HV 1000 V、左中:HV 110 V、右中:HV 1200 V、左下:HV 1300 V、右下:1400 V	34
3.14	HV 値に対するゲインの値。浜松ホトニクスによる測定結果との比較	35
3.15	上段:Preamp の入力電圧に対する出力電圧、下段:それぞれの温度のデータについて、横軸 0-40 mV の範囲を使って一次関数でフィットした時の残差	36
3.16	各温度における HV control 電圧に対する HV monitor 電圧の線形性	37
3.17	各温度における HV control 電圧に対する消費電力。Preamp 駆動電圧を含む。	37
3.18	HV 値 950 V における波形積分値の各温度での同時プロット。各色は赤:20°C、緑:30°C、青:40°C、マゼンタ:50°C での結果を表す。	39
3.19	HV 値 1000 V における波形積分値の各温度での同時プロット。各色の表現は図 3.18 と同一。	39
3.20	HV 値 1100 V における波形積分値の各温度での同時プロット。各色の表現は図 3.18 と同一。	40
3.21	HV 値 1200 V における波形積分値の各温度での同時プロット。各色の表現は図 3.18 と同一。	40
3.22	HV 値 1300 V における波形積分値の各温度での同時プロット。各色の表現は図 3.18 と同一。	41
3.23	HV 値 1400 V における波形積分値の各温度での同時プロット。各色の表現は図 3.18 と同一。	41
3.24	20°C のときの積分値分布。p0 から p5 はそれぞれ、3.9 式における μ 、 X_0 、 σ_0 、 ΔX 、 σ 、 S に対応する。左上:HV 950 V、右上:HV 1000 V、左中:HV 110 V、右中:HV 1200 V、左下:HV 1300 V、右下:1400 V	42

3.25	30°C のときの積分値分布。左上:HV 950 V、右上:HV 1000 V、左中:HV 110 V、右 中:HV 1200 V、左下:HV 1300 V、右下:1400 V	43
3.26	40°C のときの積分値分布。左上:HV 950 V、右上:HV 1000 V、左中:HV 110 V、右 中:HV 1200 V、左下:HV 1300 V、右下:1400 V	44
3.27	50°C のときの積分値分布。左上:HV 950 V、右上:HV 1000 V、左中:HV 110 V、右 中:HV 1200 V、左下:HV 1300 V、右下:1400 V	45
3.28	各温度における gain の HV 依存性	47
3.29	各 HV 値における gain の温度依存性	47

表 目 次

2.1	CTA の目指す性能	7
2.2	大口径望遠鏡の性能要求	9
2.3	大口径望遠鏡の光検出器に対する性能要求	16
3.1	温度、HV 値に対するゲイン値。×10 ⁵ を省略して表記している。	46

第1章 Introduction

1.1 天文学における超高エネルギーガンマ線観測

天文学はその歴史を遡ると紀元前までにおよび、科学研究としては古代ギリシャのピタゴラス学派の宇宙観に端を発したアリストテレスの地動説などが有名である。また、さらに古くは農耕のための暦の作成に起源を求めることができ、そのような背景から天文学は最も古い学問と称されることもあるが、20世紀までは可視光の天文学であった。他の波長での天文学は1960年代以降の技術発達にともなう形で始まる。通信技術の発達によって電波観測が行われるようになり、またロケット技術の発達により人工衛星の軌道投入が可能になったことで、天文衛星を用いた高精度なX線観測が盛んに行われるようになった。電波観測では、中性子星の存在を立証する電波パルサー、ビッグバン宇宙論を裏付ける宇宙背景放射の発見、X線観測では、ブラックホール天体の証拠の発見など、活動的な宇宙の高エネルギー現象が次々と明らかとなった。

ガンマ線の観測は、SAS-II、COS-Bと言った1970年代の衛星が先駆けとなり、1991年にはCGRO衛星がNASAによって打ち上げられた。CGROは20 keVから30 GeVの広帯域で従来の衛星よりも1桁高い感度で観測を行い、271のガンマ線天体を発見した。その後、2008年に打ち上げられたFermi衛星では1000を超える天体からのガンマ線放射が検出され、検出器の性能向上によって得られたデータの質と量は、ガンマ線天文学のみならず、X線や電波を含めた高エネルギー宇宙物理学全体の飛躍的な発展を促している。

数10 GeVからTeVにおよぶ超高エネルギー(VHE; very high energy)領域のガンマ線の観測には、地球大気との相互作用で発生する二次粒子のカスケードシャワーにともなったチェレンコフ光を地上の検出器によって検出する方法が用いられる。1989年にWhipple望遠鏡によって初めて確実なVHEガンマ線の観測が成功して以来、近年では検出器の高感度化にともない、H.E.S.S.、MAGIC、VEITAS、CONGAROOと言った大気チェレンコフ望遠鏡の活躍によって100程度のVHEガンマ線天体が発見されている(図1.1)。これらの天体の種別は、銀河系内では超新星残骸、回転駆動型パルサー、高密度天体の連星系など、銀河系外では活動銀河核、スターバースト銀河、ガンマ線バーストなど多岐にわたり、また未同定のガンマ線源も2割ほど存在する。図1.2は年代と観測されている天体数を示すプロットで、年を追うごとに観測天体数が指数関数的に増えてきていることから、検出器の性能向上、特に高感度化してきていることが分かる。VHEガンマ線の検出器に注目すると2020年頃に計画されているCTAプロジェクトでは1000を超える天体の発見が期待される。

1.2 超高エネルギーガンマ線の観測方法

ガンマ線はエネルギーが高くなるにつれてその強度が急激に下がってくる。人工衛星の限定された搭載スペースでは十分に有効面積が取れなくなるため、TeV領域におよぶガンマ線観測には地球大気を巨大な検出媒体としてみだて大きな有効面積を得る地上検出器による観測方法が用いられる。

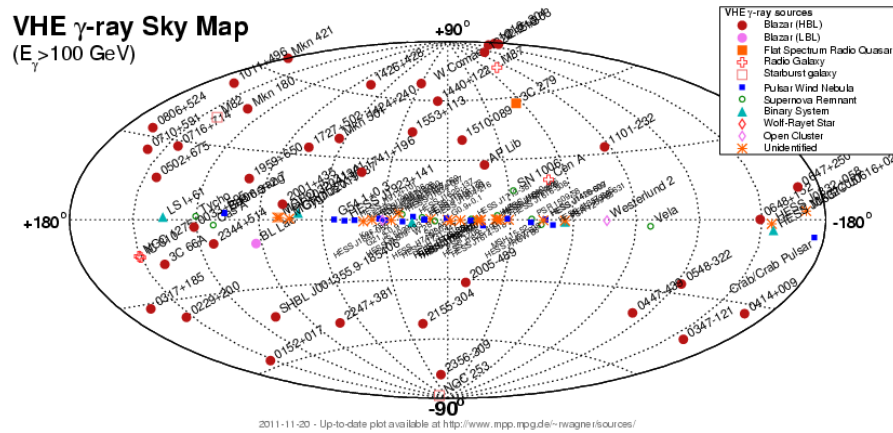


図 1.1: VHE ガンマ線の全天マップ [1]

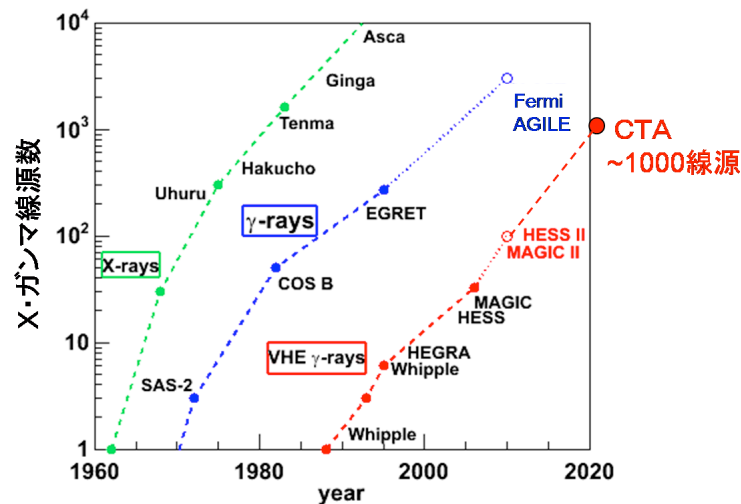


図 1.2: X 線源、ガンマ線源、VHE ガンマ線源の数を時間の関数として示したもの（通称 Kifune Plot と呼ばれる）。2010 年現在、およそ 100 の VHE ガンマ線源が観測されている。源の数が指数関数的に増えていることがわかる。CTA では、1000 を超える VHE ガンマ線源が観測されると期待される。[2]

10 GeV を超える高エネルギー粒子やガンマ線が地球大気に入射すると、大気中の原子核と相互作用を起こし、空気シャワーと呼ばれる、多数の二次粒子をカスケード生成する現象が起こる。この時、二次粒子が大気中の光速を超えて走る際に、媒質の誘電分極によってチェレンコフ光が発生する。大気チェレンコフ望遠鏡によってチェレンコフ光を検出するか、AGASA やチベット実験のようにシンチレーション検出器のアレイにより二次粒子を直接検出することで間接的に高エネルギー粒子やガンマ線を観測することができる。どちらの検出器でも宇宙線粒子とガンマ線の両方を検出する

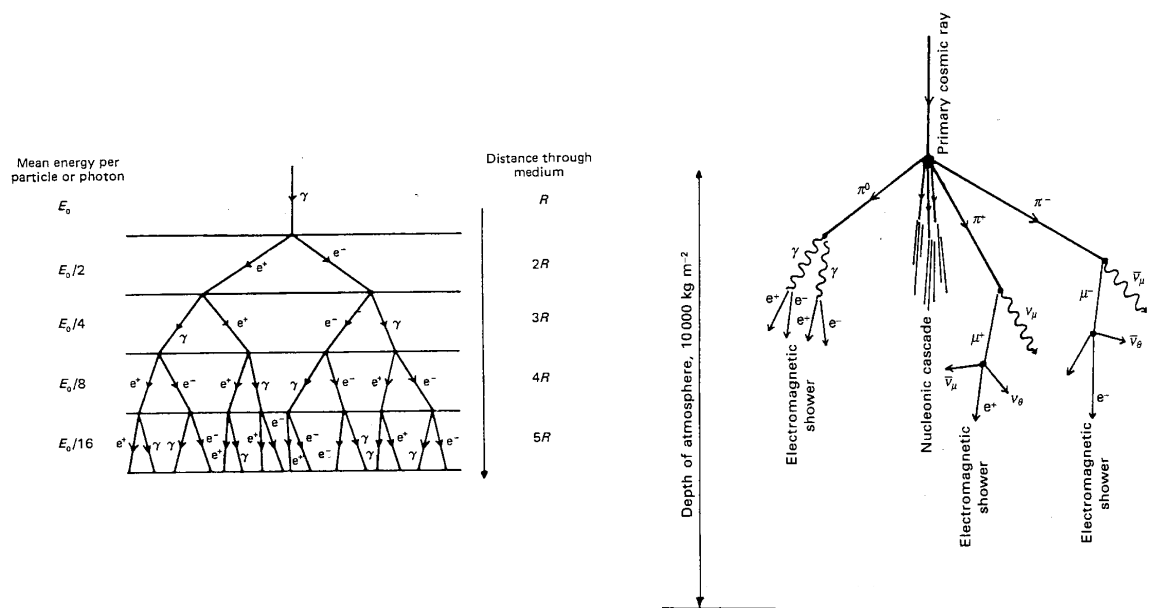


図 1.3: 電磁シャワー (左) とハドロンシャワー (右) の模式図 [3]

ことが可能だが、ガンマ線の空気シャワーは宇宙線粒子の空気シャワーに比べて、二次粒子のエネルギーが小さく地上まで到達する数が少ないため、ガンマ線観測にはチェレンコフ光を検出する方法がよく用いられる。また、宇宙線粒子の検出には大気蛍光望遠鏡によって二次粒子の軌跡を撮像するという方法も用いられ、Telescope Array にはシンチレーション検出器と大気蛍光望遠鏡の両方が用いられている。

大気チェレンコフ望遠鏡によるガンマ線観測において大きなバックグラウンドとなるのが、陽子などの宇宙線粒子の起こす空気シャワーによるチェレンコフ光で、空気シャワーの 99% 以上がこのハドロンシャワーである。したがって、地上でのガンマ線観測にはハドロンシャワー起源のイベントを取り除くことが不可欠となる。そのための手法として用いられているのが、反射鏡と焦点面カメラによってチェレンコフ光を集光、撮像するイメージング法である。その原理は、ハドロン起源とガンマ線起源の空気シャワーで発生仕方が異なることによる (図 1.3)。ハドロンシャワーでは二次粒子のパイオンが親粒子の入射軸に対して垂直な方向にも運動量を持ってシャワーが発展するため、チェレンコフ光の広がりシャワー軸を中心に比較的広い範囲に分布する。一方、ガンマ線起源の空気シャワーは電子対生成を起因として二次粒子による対生成と制動放射によるガンマ線の放出によってシャワーが発展し、発生するチェレンコフ光は半径 150 m の円内に平坦に分布する。この違いより焦点面カメラによって検出されるイメージは、ガンマ線起源ではソース中心を向いた軸を持つコンパクトな像になるのに対し、ハドロン起源ではランダムな向きの広がった像となるため、検出したイメージを楕円形で近似してやることで、ハドロン起源のイベントを効果的に取り除くことができる。チェレンコフ光を用いてガンマ線をとらえる手法そのものは 1960 年代から試みられて来たが、このイメージング法を用いることで、1989 年に Whipple 望遠鏡によるかに星雲の観測において、TeV ガンマ線の確実な検出に初めて成功した。

一つの楕円イメージからではシャワー中心の位置情報は長軸方向の一点であることしか分からないため、一台のチェレンコフ望遠鏡ではシャワー中心位置、すなわちガンマ線の到来方向を決定することは難しい。そのため、2 台以上の望遠鏡を配置して同時刻にそれぞれが検出したイメージか

ら、三角測量として、長軸方向の交点をとることでガンマ線の到来方向を特定するステレオ観測という手法が用いられる。楕円で近似したイメージを、光軸を中心に重ね合わせた空間での長軸の交点から天球上のガンマ線到来方向が分かることに加え、地上平面の空間での長軸の交点から地上に到達したシャワーの中心位置が分かる (図 1.4)。これらの情報を合わせることで、空気シャワーの発生高度を求めることができ、一次ガンマ線の角度分解能のみならず、エネルギー分解能も向上する。HEGRA グループは、カナリア諸島ラパルマに5台の解像型チェレンコフ望遠鏡を設置し1997年からいち早くステレオ観測を開始した。このような観測により、かに星雲の TeV ガンマ線放射領域は $1'.5$ 以下であることが示され、ステレオ観測による角度分解能の向上が確かめられた。

上記の観測法を基に、近年では集光鏡口径の大型化、読み出しエレクトロニクス的高速化、空気シャワーシュミレーションの高精度化などの性能向上が図られ、MAGIC、H.E.S.S.、VERITAS、CANGAROO (図 1.5) といった撮像型大気チェレンコフ望遠鏡の活躍によって、現在までに100を超えるの VHE ガンマ線源が観測されている。

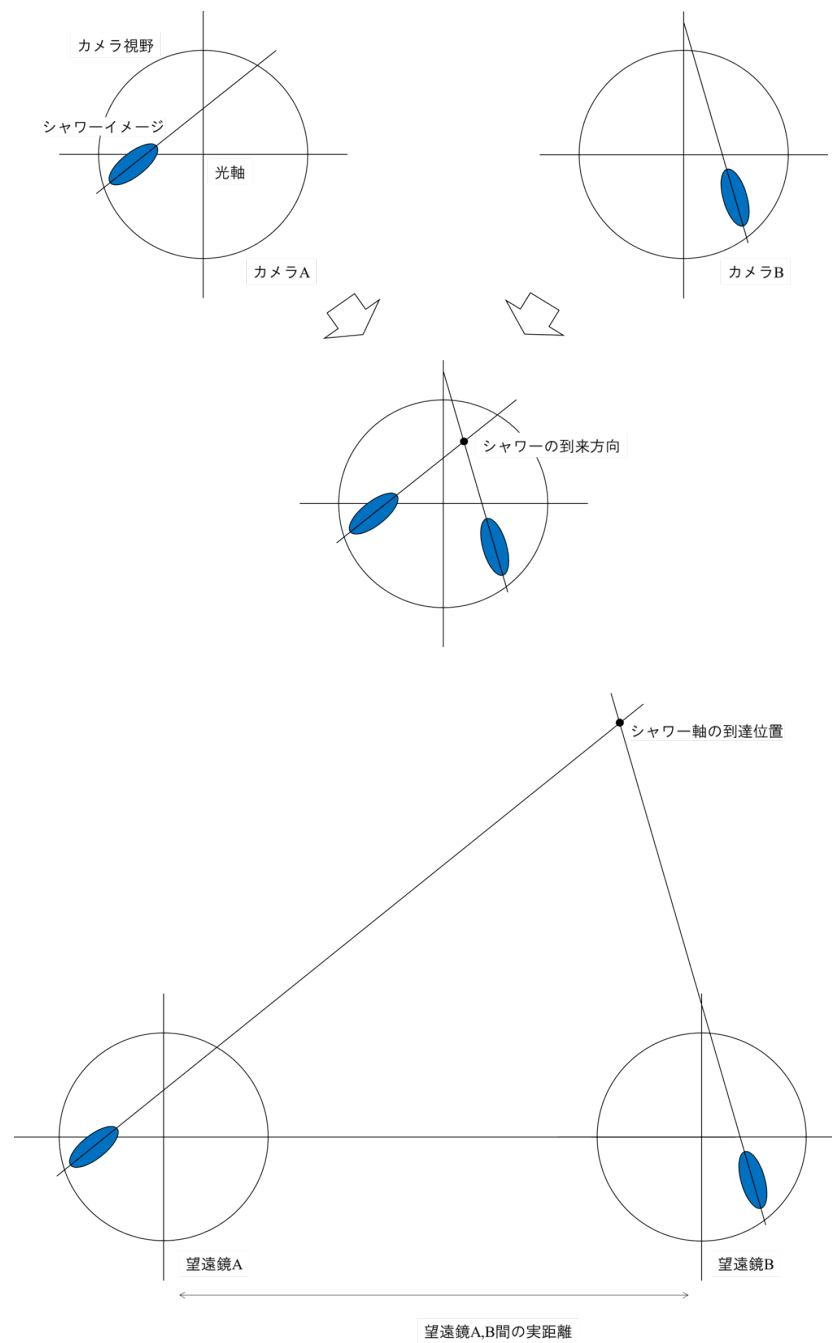


図 1.4: ステレオ観測の模式図。



図 1.5: 上から、北半球の MAGIC 望遠鏡 (2 x 17m, La Palma, Canaries)、VERITAS 望遠鏡 (4 x 12m, Arizona, US)、南半球の H.E.S.S. 望遠鏡 (4 x 12m, Namibia)、CANGAROO 望遠鏡 (4 x 9m, Woomera, Australia)。

第2章 Cherenkov Telescope Array 計画

2.1 概要

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画は、大規模チェレンコフ望遠鏡群を建設し、従来よりも一桁高い感度でかつ広いエネルギー帯域での宇宙ガンマ線観測を行うことを目指す世界 25 カ国による国際共同実験計画である。CTA では大・中・小口径の 3 種類の望遠鏡のアレイを北半球と南半球に設置することで数 10 GeV から 100 TeV の広エネルギー帯域におけるこれまでにない高い検出感度 $\sim 10^{-14} \text{erg/cm}^2$ での全天観測を実現する (図 2.1、2.2)。従来の大気チェレンコフ望遠鏡よりも一桁以上高い感度が達成されることで 1000 以上の新たな VHE ガンマ線源の発見が期待される。CTA の目指す代表的な性能値を表 2.1 に示す。

口径の異なる望遠鏡は、目的とするエネルギー帯域が異なり、数 10 GeV から 1 TeV の低エネルギー領域を 23 m 大口径望遠鏡 (4 台) が、100 GeV から 10 TeV の高エネルギー領域を 12 m 中口径望遠鏡 (23 台) が担う。銀河面領域の観測に有利な南半球のアレイには、1 TeV から 100 TeV のエネルギー領域を担う 6 m 小口径望遠鏡 (32 台) が加えて配置され、広いエネルギー領域での銀河系内宇宙線源の探査が期待される。

特に、大口径望遠鏡のエネルギー帯域は GeV 帯域の望遠鏡の決定版とされる Fermi 衛星のエネルギー帯域となめらかにつながり、Fermi 衛星と CTA 合わせて約 6 桁にわたるシームレスなデータを得る上で重要な役割を担う。大口径望遠鏡の代表的な性能要求を表 2.2 に示す。大口径望遠鏡では 23 m の反射鏡と直径 ~ 3 m の焦点面カメラによってチェレンコフ光の集光、撮像を行う。焦点面カメラは光電子増倍管 (PMT; Photo Multiplier Tube) 約 2000 本で構成される。このような大型望遠鏡は、既存の撮像型大気チェレンコフ望遠鏡の中でも最大規模となり、厳しい開発要求が課せられる。

一次ガンマ線のエネルギーが低くなるほどチェレンコフ光の密度が下がるため、23 m の大型反射鏡を用いてチェレンコフ光に対する有効面積を稼ぐことで数 10 GeV という地上で観測できるぎりぎりのエネルギー閾値を狙う。低エネルギー閾値を実現する上で重要になるのが、チェレンコフ光

項目	性能
観測エネルギー帯域	10 GeV - 10 TeV (北半球) / 10 GeV - 100 TeV (南半球)
検出感度	1 mCrab at 1 TeV
角度分解能	1-2 分角
時間分解能	≤ 1 sec (minimum nsec)
エネルギー分解能	1% at 1 TeV

表 2.1: CTA の目指す性能

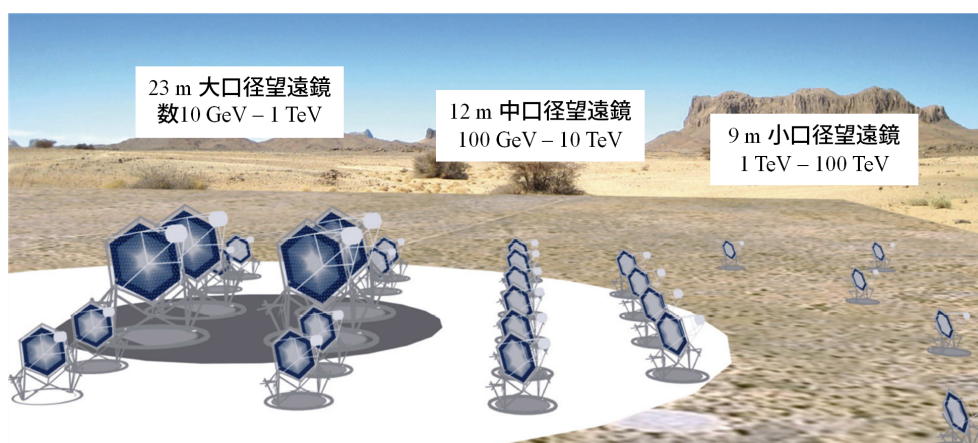


図 2.1: CTA の想像図。大口径 (～23 m)、中口径 (～12 m)、小口径 (～6 m) のチェレンコフ望遠鏡群からなるアレイ。

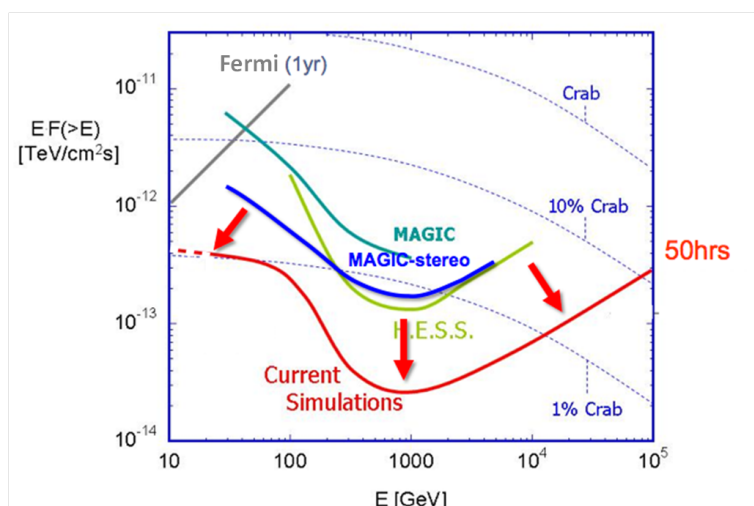


図 2.2: CTA で予想される感度曲線 (赤) と現行の検出器の感度との比較。[2] エネルギー毎のガンマ線フラックスに対する閾値を表し、曲線が下にあるほど高感度である。

に対してバックグラウンドとなる ~ 100 MHz/pixel の頻度で混入する夜光の影響を取り除くことである。そのため、高感度、低ノイズであることと同時に、nsec レベルの時間分解能が求められ、時間応答の速い光検出器と超高速エレクトロニクスの開発により、チェレンコフ光イメージの積分時間を最小にする必要がある。また、ガンマ線バーストをはじめとする種々の突発現象を捉えるため、大口径望遠鏡は総重量を ~ 50 トンとし 20 秒で 180° の旋回性能を可能にする。

項目	スペック
反射鏡サイズ	直径 23 m 以上、総面積 400 m ² 以上
カメラ直径	2.5 m (光検出面のみ)
カメラ重量	最大 2 t
視野	4-5°
ピクセルサイズ	0.1° 以下
エネルギー領域	20 GeV - 1 TeV

表 2.2: 大口径望遠鏡の性能要求

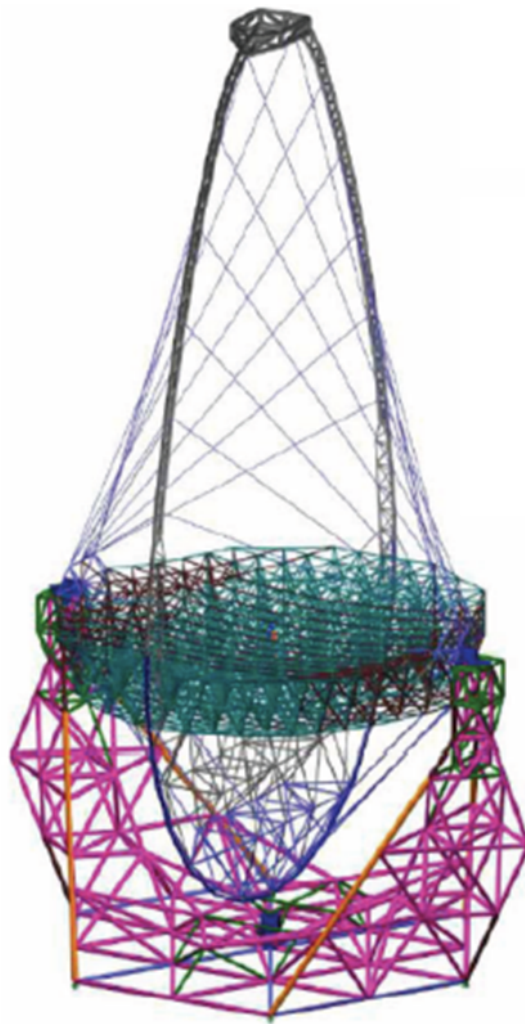


図 2.3: 大口径望遠鏡の構造図 [2]

2.2 日本における大口径望遠鏡の開発

CTA 計画は 2015 年の望遠鏡の建設開始、2020 年の全望遠鏡による本格的な稼働に向けて、現在は、各望遠鏡の設計およびプロトタイプ望遠鏡の建設の段階にある。望遠鏡開発は CTA 計画に参加している各国、各研究グループ間での競合で進められている。その中で、CTA 日本グループでは大口径望遠鏡の開発に重点をおき、ハードウェア開発では他のグループを圧倒的にリードしている。CTA 日本グループで進めている大口径望遠鏡ハードウェアの開発項目は大きく、焦点面検出器およびエレクトロニクス、反射鏡があり、それぞれのグループに分かれて相補的に開発を行っている。

焦点面検出器開発では光検出器となる PMT を中心に、集光のためのライトガイドの設計から、PMT アノード信号を増幅する Preamplifier までの開発を担当する。PMT は、高電圧電源 (HV; High-Voltage power supply) と Preamplifier を合わせて一組とした PMT ユニット (図 2.4) として浜松ホトニクス社と共同開発を行っている。メンテナンス性の観点から、この PMT ユニットの 7 本毎に束ねて後段のエレクトロニクスに接続し、PMT クラスター (図 2.5) としてカメラモジュールの単位を構成する。現在は PMT ユニット単位での開発の最終段階にあり、この後は合計数万本近くになる PMT を進める体制へと移行していく予定である。また、PMT には一本一本に増幅率のバラつきが生じ、増幅率の温度依存性も存在するため、チャンネル毎に信号増幅率を調整する必要がある。そのため、望遠鏡の運転中に、観測に弊害がないような較正光源を点灯し、常時 PMT の調整が行えるようなキャリブレーションシステムの開発が進められている。加えてカメラ全体の熱設計、冷却系の開発も、エレクトロニクス開発グループと密に協力しながら、焦点面検出器開発グループが中心になって進めている。

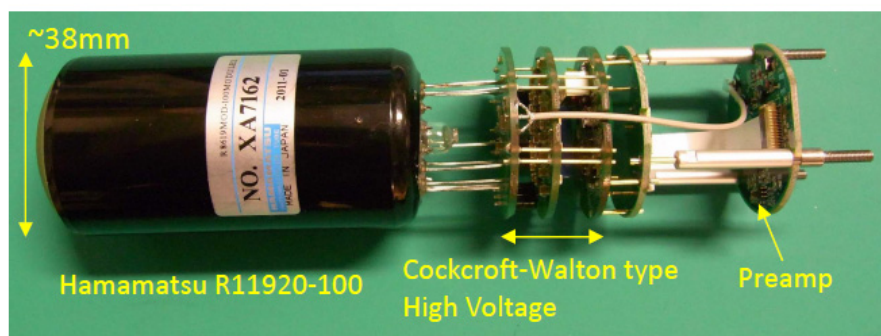


図 2.4: HV、Preamplifier 回路を含めた PMT ユニット

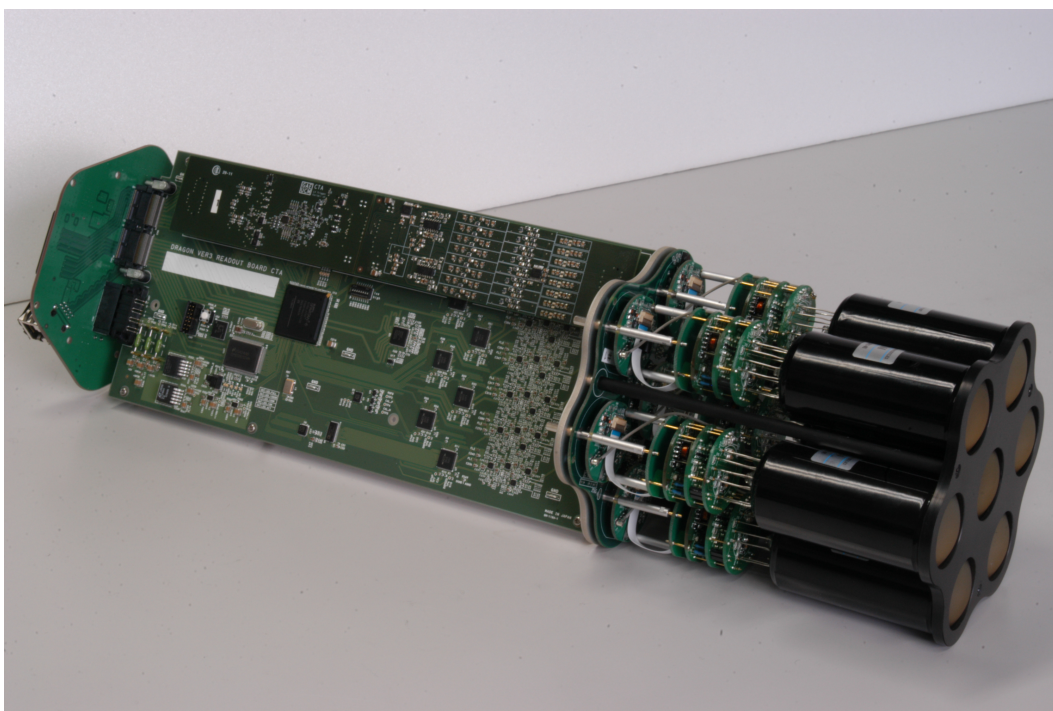


図 2.5: PMT 7 ユニットと読み出しボード等エレクトロニクスを接続した PMT クラスター

エレクトロニクス開発について。PMT 後段の読み出しボードでは、1 枚のボードで 7 チャンネルの同時読み出しを行う。PMT ユニット以降の信号読み出しの流れを図 2.6 に示す。それぞれの PMT ユニットからはプリアンプで増幅された信号が読み出しボードに入力される。これをフロントエンド部 (メインアンプ) にて、ダイナミックレンジを稼ぐために high gain、low gain の二系統に分けて信号を増幅し、アナログメモリ ASIC に入力する。同時にトリガー判定用にも信号を分岐し、こちらはイタリア製のトリガー生成回路に入力される。アナログメモリにはスイス PSI で開発された DRS4 チップを用いる。このアナログメモリは 9 系統の作動入力、1 系統につき 1024 セルのキャパシタを持ち 0.7-5 G Samples/s の波形サンプリングを行うことができる。FPGA によってトリガ閾値の設定やデータ処理を行い、読み出された波形データは KEK の開発した SiTCP プロトコルを用いてギガビットイーサネット経由で転送される。さらに、トリガ情報はバックプレーンを通してクラスター間で共有される (図 2.7)。HV コントロール電圧の供給、モニター電圧の取得などもこのバックプレーンを通して行われる。

大口径望遠鏡の反射鏡には、1.5 m 幅の六角形分割鏡が 200 枚使用され、一枚あたりの 50 kg 以下の重量、1 cm 以下のスポットサイズ、紫外線領域で 90% 以上の反射率、風雨に対する強度、雨や埃に曝された状態で 10 年以上の耐久性などの要求が課せらる。日本グループにおける分割鏡の製作では、Telescope Array の分割鏡製作の実績を持つ三光精衡と共同開発を進めている。現在、二枚のガラスシートでアルミハニカムを挟み、曲率を持たせたモールドに乗せて曲率を写し取る、Cold Slump 法によって鏡を形成し、表面の耐久度を上げるため SiO など多層膜コーティングを施した試作品が完成しており、すでに 95% 以上の反射率を達成している (図 2.8)。この試作品を用いて、耐久度のテストとして、塩水や弱酸性溶液での腐食の加速実験、CTA サイト候補地での経年劣化測定などが行われている。

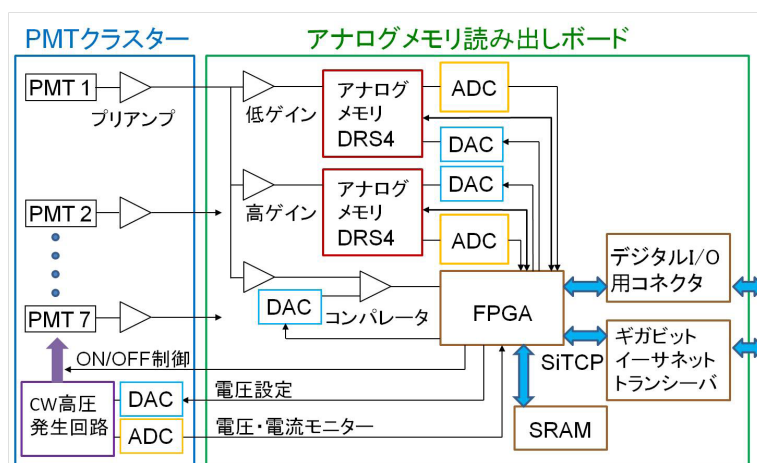


図 2.6: CTA Japan が開発している PMT 読み出し回路のブロック図 [2]

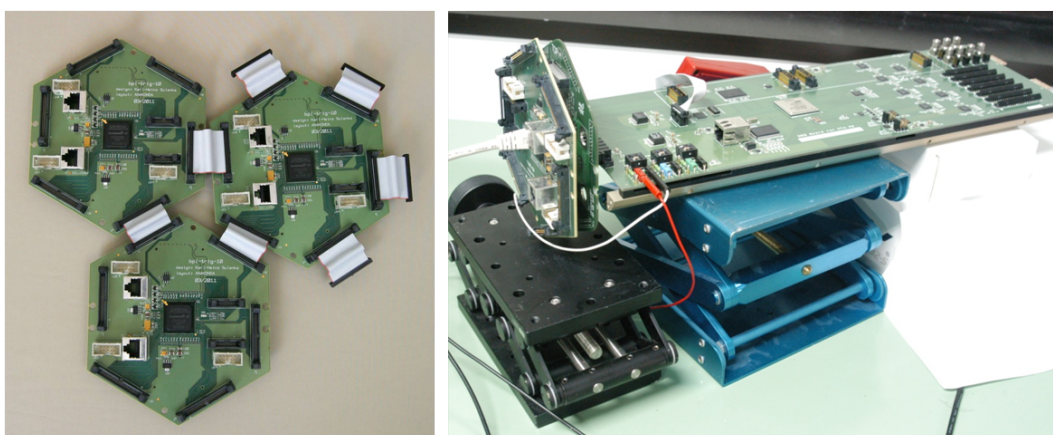


図 2.7: 左:接続された3枚のバックプレーン。右:読み出しボードとバックプレーンを接続した様子



図 2.8: 左:分割鏡製作に用いた cold slump 法の略図。右:1.5 m 分割鏡の試作品

2.3 光電子増倍管の開発

本節では、前節で説明した開発項目の中から、焦点面検出器の光検出器となる PMT の詳細について述べる。

2.3.1 光電子増倍管の原理と性質

ここでは、焦点面検出器用 PMT の開発について述べることに先立ち、PMT の原理に沿って、その諸特性について一部を抜粋して説明する。図 2.9 は PMT の原理を示す概要図である。PMT 前面のガラス窓から入射した光子は光電面内の電子を励起し光電子が真空中に叩き出される。集束電極の電場に沿って光電子が第一ダイノードに集束し、ダイノード間に印加された電圧に応じて複数の二次電子に増幅される。再び、二次電子は後段のダイノードに向かって集束、印加電圧に応じて増幅、という過程を繰り返し、最後に陽極 (アノード) 上に集められた電子がパルス信号として出力される。陽極と各陰極間には図 2.10 のように、陰極と陽極の間を複数の抵抗により分割して既定の電圧を与えるデバイダ回路によって電圧が分配される。陽極と後段の計測回路や演算回路の間の電位差をなくし接続を容易にするため、一般には陰極接地型のデバイダ回路が用いられる (2.10:上)。しかし、この方法では陰極付近の側管や面板を接地すると、ガラスのわずかな誘電性のために陰極と接地の間に微小電流が流れ、光電面の電気的な変化による劣化を招く危険性があり、ハウジングには絶縁に対して細心の注意を払う必要がある [4]。

量子効率

PMT の量子効率 η は (発生する光電子の数)/(入射した光子の数) で定義される。量子効率は光電面の材質と形状によってほぼ決定し、入射光子の波長 ν に依存した形で与えられる。

$$\eta(\nu) = (1 - R) \frac{P_\nu}{k} \cdot \left(\frac{1}{1 + 1/kL} \right) \cdot P_S \quad (2.1)$$

ここで、 R は反射係数、 k は光子の全吸収係数、 P_ν は光子吸収のうち真空レベル以上に励起される確率、 L は励起電子の平均逸脱距離、 P_S は表面に達した電子の電子の真空中に放出される確率である [4]。光電面に光子が入射すると、光子のエネルギー ($h\nu$) は光電面内の電子へと受け渡され、電子は表面に拡散していく。真空中に光電子を放出するには、このとき、光電面内の物質と真空の境界に存在する固有電位障壁を乗り越えるのに十分なエネルギーを電子が持っていなければならない。よって、広いエネルギーの光子に対応するにはこの電位障壁を低くしてやる必要があり、上式の P_S が伝導帯と電位障壁の間隔である電子親和力に強く依存する。また、電子が表面へと拡散していく際に発生する、電子-電子衝突によるエネルギー損失をできるだけ小さくする必要がある。この要素は励起電子が電位障壁を超えるエネルギーを保っていられる距離として上式では L で与えられる。金属中におけるエネルギー損失は大きく L は数 nm 程度になってしまうが、半導体でのエネルギー損失は小さく L は ~ 25 nm まで延びるため、光電面には一般的に半導体物質が用いられる [5]。

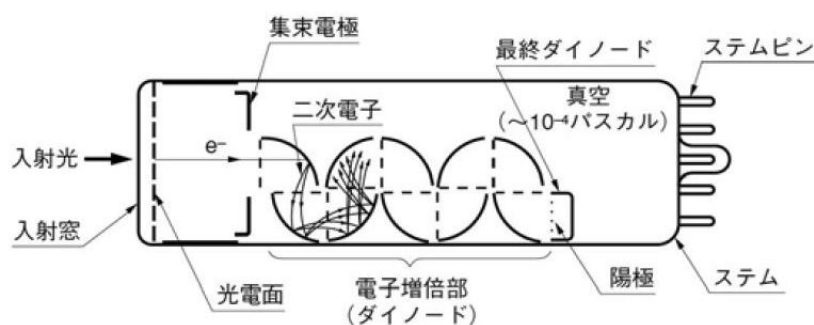


図 2.9: PMT の構造図 [4]

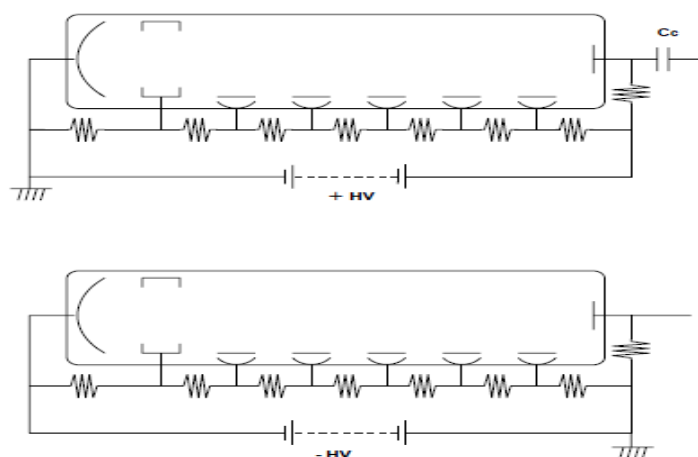


図 2.10: デバイダ回路の概念図 (上:陰極接地型、下:陽極接地型、ともに5段ダイノードの例)[6]

電子増幅 - ゲイン特性

光電面から放出された光電子はダイノード間の電圧によって加速され、ダイノードの電極表面と衝突しする。この際、ダイノード材料を適切に選ぶことで複数の電子を再放出することができ、アルカリ-アンチモン、酸化ベリリウム (BeO)、酸化マグネシウム (MgO)、ガリウムリン (GaP)、ガリウムヒ素リン (GaAsP) などが用いられる [4]。光電面をでた直後の電子は1 eV 以下のエネルギーしか持っておらず、第一ダイノードに数 100 V の高電圧を印加することでダイノードに到達する電子は印加電圧に応じた運動エネルギーを持つことになる。ダイノード材料中の電子を励起するには少なくとも 2-3 eV のバンドギャップに等しいエネルギーが必要になるため、理論的には1 個の入射電子は加速電圧 100 V 当たり 30 個程度の二次電子を生成することができる [5]。

光電子は1段から最大19段のダイノードで多段増幅され、 $10\text{-}10^{18}$ 倍の電流増幅を得てアノードに送られる。一段のダイノードによる二次電子増幅比 δ を(二次電子の個数)/(一次電子の個数)と定義すると、 n 段のダイノードで増幅され、最終的にアノードから出力される電荷の増幅率(ゲイン) G は次のように表すことができる。

$$\delta = A \cdot V \quad (A : \text{constant}) \quad (2.2)$$

$$G = \delta^n = (A \cdot V)^n \quad (2.3)$$

ここで V はダイノード間の印加電圧であり、ゲインが V^n に比例して増加することが分かる。実際には、光電子、二次電子を効率よく集束し、また電子の走行距離による時間分散をできるだけ小さくするために電子軌道解析が行われ、ダイノード間の電圧分配比が最適化される。また、磁場の影響で電子軌道が曲げられるため、環境磁場によっては電子の収集効率が変化しゲイン特性が悪くなることがある。そのため、PMTのガラス管の周囲に μ メタルや磁気シールドシートなどを巻いて環境磁場の影響を低減する加工が施される。

ゲイン特性の実測には、(1)一定の光量を光電面に照射し続け、その際に光電面から放出される光電子電流とアノード電流の比を測定する、(2)光電面で放出される光電子が1個だけになるような光量のパルス光を照射し、アノードから出力されるパルスの電荷量を測定、素電荷との比をとる、といった方法がとられる。チェレンコフ光のような微弱で頻度の少ない光子の検出を目的とするPMTの試験においては(2)の方法がとられ、放出される光電子に応じた光量を測定することから、1 photoelectron (1 p.e.) 相当の光量という単位が、しばしば用いられる。

アフタパルス

PMTでパルス計測を行う際、信号に対応するパルスの後に疑似パルスが検出される場合がある。このような出力パルスはアフタパルスと呼ばれ、強いパルス光の後の微弱な信号を検出する際のノイズ源となりうる。アフタパルスには速い成分と遅い成分があるが、一般にアフタパルスというと主に遅い成分のこと言う。速い成分の多くは第一ダイノードでの弾性散乱によって起こり、真の信号パルスの直後の数 nsec から数 10 nsec 後に発生する。時間遅れが小さく、一般には後続の信号処理回路の時定数に隠れてしまうため、あまり問題にならない場合が多い。一方、遅い成分はPMT内の残留ガスが電子との衝突によりイオン化され、正イオンが光電面に戻る際に多数の光電子を発生させることによって生じる。この現象は、一般にイオンフィードバックと呼ばれ、後段の信号計測に悪影響を与えうる。アフタパルスの大きさはイオンの種類、発生場所によって異なり、信号パルスからの遅れも数 100 nsec から数 μ sec に渡る。特にヘリウムガスはガラス窓を容易に通過し、PMT内部に侵入してイオンバランスを崩す可能性があるため使用環境には注意が必要となる。

2.3.2 光電子増倍管 Hamamatsu R11920-100 の開発

前節で述べたように、大口径望遠鏡では数 10 GeV というエネルギー閾値を目指すため、微弱なチェレンコフ光を確実に検出できなければならない。よって光検出器となる PMT には高い感度と時間応答が要求される。焦点面検出器に搭載される光検出器に求められる性能を表 2.3 に示す。特にアフタパルスに関しては、低エネルギー閾値を保ったまま高い時間分解能が要求される観測、例えば中性子星パルサーにおけるパルスプロファイルのエネルギー依存性の検証などを行う上で重要となる [2][7][8]。また、カメラ全体の条件が重量 2 t、直径 2.5 m、～2000 ピクセルとなるため、軽量、小型、また低消費電力である必要がある。

項目	要求値
ピクセルサイズ	0.1°, 50 mm
PMT 外形 (光電面直径)	1.5 インチ
有感波長領域	300-600 nm
アフタパルス確率	0.02% 以下
量子効率	35% 以上
時間分解能	1.5 ns 以下
パルス幅	2.5-3 ns (FWHM)
動作ゲイン	～ 4×10^4
ダイナミックレンジ	1～3000 p.e. 以上
消費電力	3 W/channel 以下 (エレクトロニクス込)

表 2.3: 大口径望遠鏡の光検出器に対する性能要求

焦点面検出器開発グループでは浜松ホトニクス社と共に、PMT と高電圧 (HV) 発生基板、Preamp を一体とした PMT ユニットの開発を進めており、PMT 本体は Hamamatsu R11920-100 を有力視している。R11920-100 は時間特性に優れるラインフォーカス型の 8 段ダイノードを持ち、光電面には 1.5 インチのスーパーバイアルカリを使用し、高い量子効率を実現する。電圧分割は、陰極接地型のデバイダ回路を持ち、最大 1500 V の印加電圧を光電面-第一ダイノード間はツェナーダイオードにより 300 V の定圧、後段は分割比 1:2:1:1:1:1:2:1 で電圧を分配している。HV の供給は後段のコッククロフトウォルトン型の HV 発生回路から行われる。R11920-100 との HV 基板と、Preamp LEE-39+を用いた PMT ユニット (図 2.4) の性能評価を進めており、現在のところ、表 2.3 の性能要求においてはダイナミックレンジを除く全ての項目について要求を満たすことが確認されている。量子効率とアフタパルスの測定結果を図 2.11、2.12 に表す。ダイナミックレンジに関しては Preamp 回路の再考が検討されている。

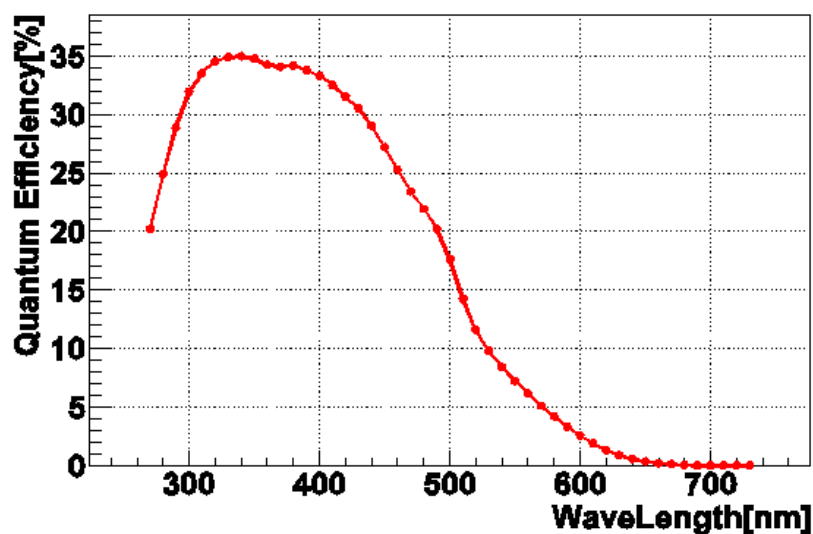


図 2.11: PMT R1192-100 量子効率の測定結果 [9]

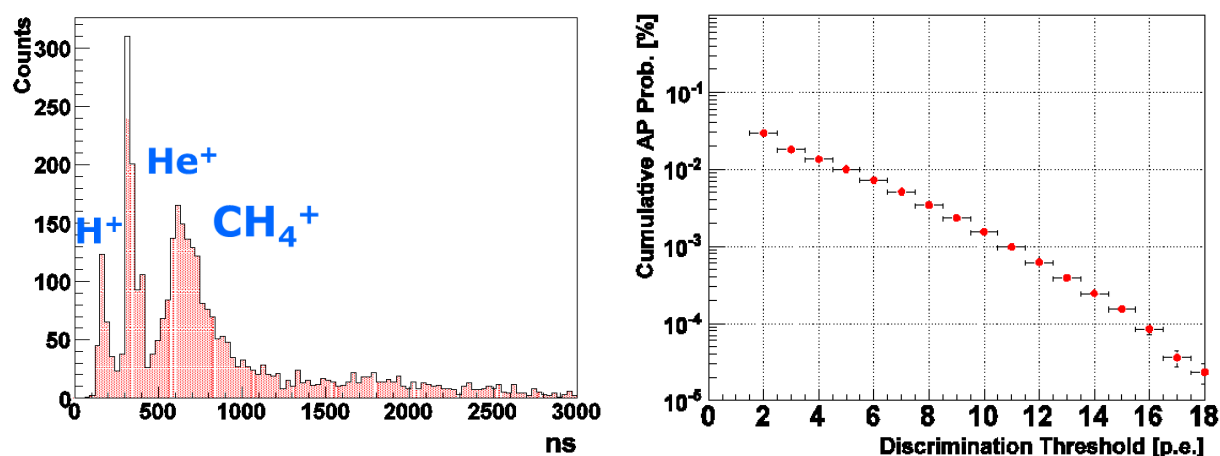


図 2.12: PMT R1192-100 アフタパルスの測定結果。左:アフタパルスの時間分布。三つのピークはそれぞれ水素 (H)、ヘリウム (He)、メタン (CH_4) の残留ガス成分である。右:入射光量 (p.e. 単位) に対するアフタパルスの発生確率。[10]

2.4 冷却系の開発

大気チェレンコフ望遠鏡では信号読み出しにかかる時間がクリティカルになるため、エレクトロニクスを最良の状態に高速動作させるためにはカメラの熱設計が重要になる。大口径望遠鏡では1台あたり1855本のPMT、256枚の読み出しボードを用いて焦点面カメラを構成し、既存の撮像型大気チェレンコフ望遠鏡のなかでも最大規模となる。そのため予想される発熱量は大きく、冷却系の開発も重要な新規開発要素となる。

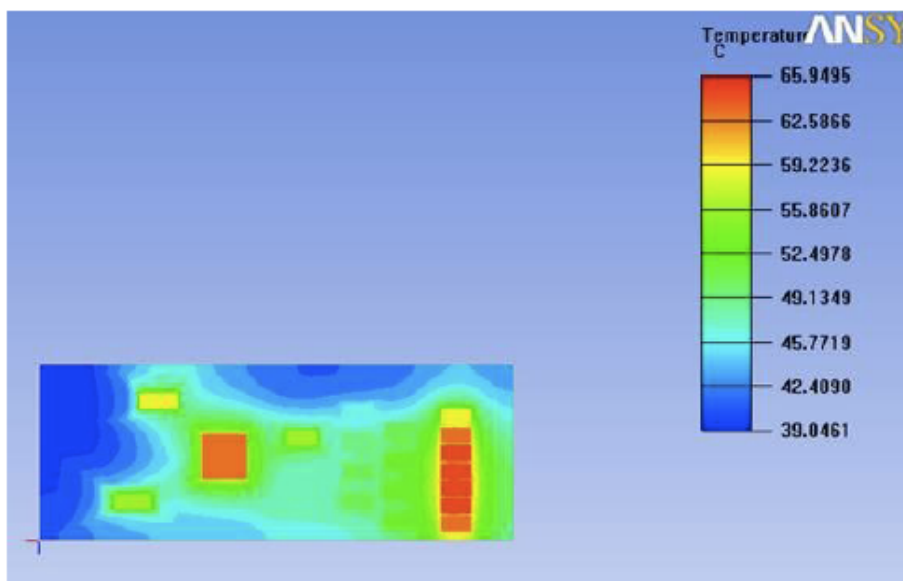


図 2.13: 読み出しボードの熱数モデルを用いた冷却系がない場合の熱解析結果 (CTA 内部資料)

読み出しエレクトロニクス全体の消費電力は～5 kW におよび、また、カメラ内の大きな熱源となるのは読み出しボード上のメインアンプや FPGA などである。読み出しボードの熱数モデルを用い、冷却系がない場合の熱解析の結果では高温最悪ケースで読み出しボードの温度が 65°C まで上昇することが分かっている (図 2.13)。エレクトロニクスの動作温度の最大値は 70°C であるため、冷却系の存在が必要不可欠となる。

カメラの冷却機構として考えられているのが図 2.14 に示す MAGIC 望遠鏡で用いられているクーリングプレートである。クーリングプレート内には水冷パイプが走っており、パイプ内に冷却水を流し続けることでカメラ冷却を行う。クーリングプレートは同時に PMT クラスターの治具の役割を果たす。CTA 大口径望遠鏡ではさらに、ヒートパイプと呼ばれる熱輸送を行う機構を用いて読み出しボード上の素子を直接冷却することが考えられている (図 2.15)。シミュレーションではこの冷却システムによって環境温度 -20°C から 40°C に対し、カメラデバイスの温度は 28°C から 48°C に抑えられると予想されている。

現在のところ、上記のような冷却系が考えられているが、開発は始まったばかりであり、各デバイスの発熱状況、性能の温度依存などを調査していくとともに、複数の PMT クラスターからなる小規模のカメラを製作し、より現実的な熱のスタディを行っていく必要がある。日本グループではこれに先駆けて、カメラ治具によって 3 つの PMT クラスターを接続してミニカメラを完成させている (図 2.16)。

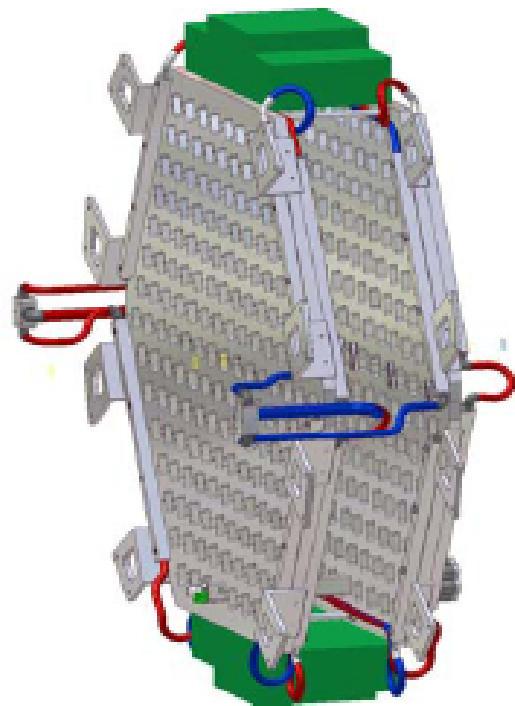


図 2.14: 左:MAGIC 望遠鏡で用いられたクーリングプレート。右:クーリングプレートの概要図。プレート内の水冷パイプによりカメラ内の冷却を行う。

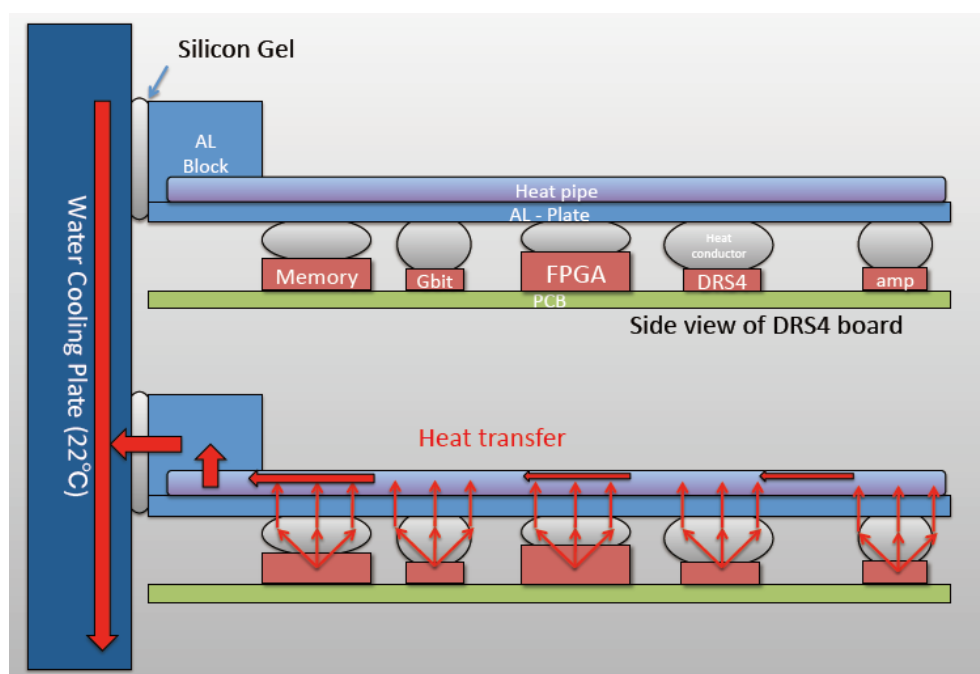


図 2.15: ヒートパイプによるエレクトロニクス素子の直接冷却。熱伝導の良いシリコン素材を通じてアルミプレートに熱を逃がし、ヒートパイプを使って熱浴となるクーリングプレートに素早く排熱する。

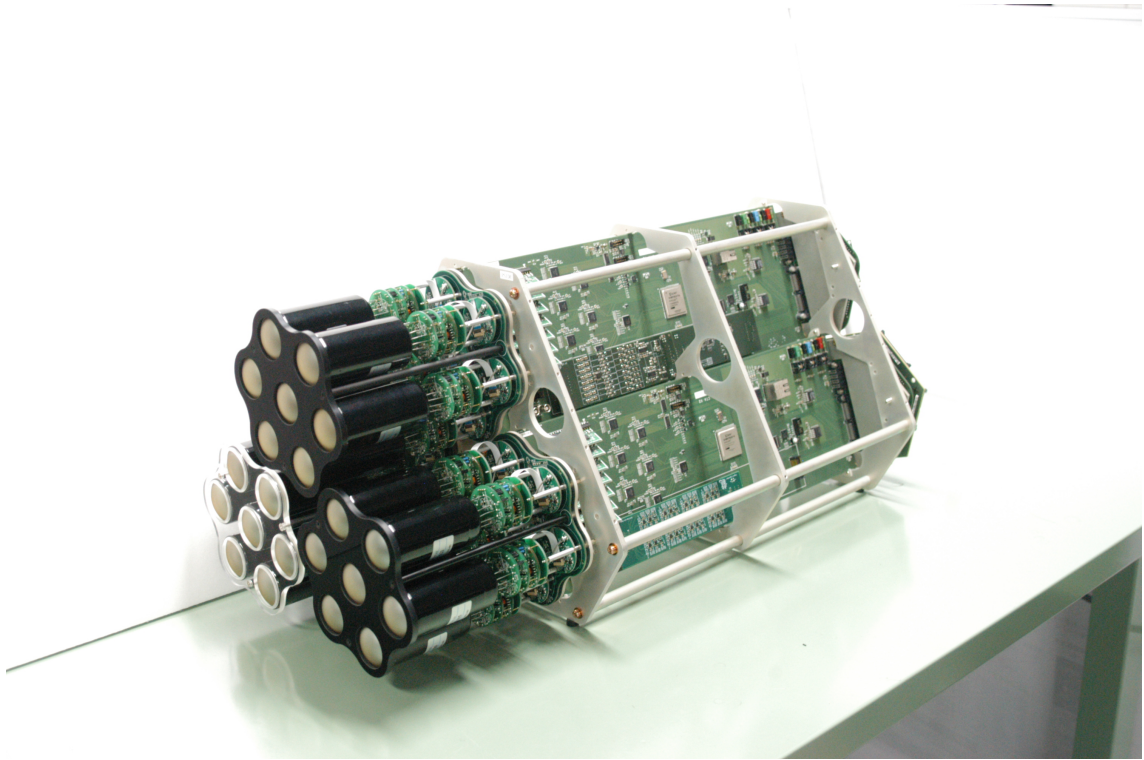


図 2.16: PMT21 ユニット、3つのクラスターを組み合わせた状態でのミニカメラ

2.5 本研究の目的

本研究では CTA 計画の中核を担う 24m 大口径望遠鏡の焦点面検出器の開発に伴い、その中核となる光電子増倍管 R11920-100 の性能評価について述べる。特に 2.4 章で述べた冷却系の開発に向けて、カメラモジュールの最小単位である PMT ユニットでの温度特性を調査することで、カメラの熱設計やキャリブレーションシステムの開発にフィードバックをかけることを目的とする。

第3章 光電子増倍管の性能評価試験

3.1 性能要求および実験目的

2.4章で述べたように、冷却システムの開発によって大口径望遠鏡におけるデバイスの温度変化は28-48°Cを抑えることが予想されている。今後ミニカメラ単位での発熱、温度依存性を実測することで要求値を明確化していくあたり、PMT単体での基礎特性の温度依存性を検証しておく必要がある。

PMTの持つ基礎特性の内、温度変化に対して依存性を持つものとして本研究ではゲイン特性に注目した。光電面材料、またはダイノード材料の温度変化で二次電子数が変化する可能性があるほか、HV回路の高電圧出力の温度依存性が考えられ、それらは結果的にゲイン特性の温度依存として現れてくる。また、HV回路はそれ自体が大きな熱源となるため、高温条件での高温条件での正常動作を確認する必要がある。温度上昇とともに熱電子の発生量が増加し、暗電流値の上昇が予想されるが、熱電子による暗電流イベントの発生頻度は比較的小さく、またPMTチャンネル毎にそれぞれ、ばらばらのタイミングで発生するのに対して、チェレンコフ光イベントは複数のPMTが同時に検出するため、PMTチャンネル間、またPMTクラスター間のトリガロジックによって暗電流起源のイベントを排除することができる。よって本研究では暗電流の評価には注目していない。

本研究では、現在、冷却系の開発によって目指されている28°Cから48°Cの温度範囲に対して、マージンを含め20°Cから50°Cの範囲でのPMTのゲイン特性および消費電力の測定を行った。ゲイン特性についてはHV回路の温度依存性、Preamp増幅率の温度依存性を同時に測定することで、各コンポーネントに分けた検証を試みた。

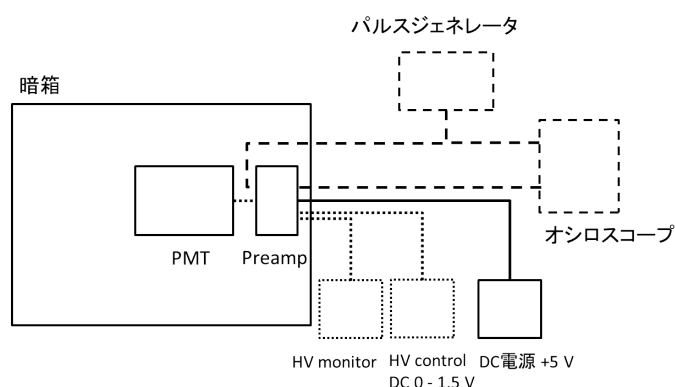


図 3.1: Preamp と HV 回路の予備試験のセットアップ図。破線と点線はそれぞれ、Preamp の試験と HV 回路の試験で固有の系統を表す。実線の系統は両試験で共通している。

なお、本研究では PMT R11920-100 シリアル番号 XA7415 を用いた。以下の PMT に関わる結果はすべてこの個体による実験結果である。

3.2 室温における基礎特性評価試験

温度依存性の測定を行う前に、まず室温環境での基礎特性を測定し、性能の確認を行った。

3.2.1 各サブセットの基礎特性

PMT ゲイン測定の予備試験として、Preamp の入力電圧に対する出力電圧増幅率の線形性と、HV control 電圧と HV monitor 電圧の線形性及び PMT ユニットの消費電力の測定を行った。

Preamp 増幅率の線形性とダイナミックレンジ測定

この実験では PMT アノードからの信号線を Preamp 基板からはずし、パルスジェネレータから信号を入力している (図 3.1)。オシロスコープを使い、入力電圧を $1\text{ M}\Omega$ インピーダンスで、Preamp の出力電圧を $50\text{ }\Omega$ インピーダンスでモニターした。この Preamp は高速信号処理に対応するため、電荷感応型ではなく、入力電圧をそのまま反転増幅している (図 3.2)。図 3.3 は入力波形の波高値に対する出力波形の波高値のプロットであり、出力電圧 1 V 、ダイナミックレンジ 3 桁に至る以前にすでに線形性を失っていることが分かる。線形性のある入力電圧の低い領域での増幅率は概ね 12 倍だった。

HV control 電圧に対する HV monitor 電圧の線形性および消費電力

PMT ユニット外部から供給される電圧は Preamp 及び HV の駆動圧 $+5\text{ V}$ と、HV control 電圧 $0-1.5\text{ V}$ の二系統であり、また HV monitor 電圧が HV 値の $1/1000$ の値として返される。測定の結果、HV control 電圧と HV monitor 電圧は $1:1$ からは外れるものの、一次関数のフィットからのズレは 1% 未満であり、線形性は良いことが分かった (図 3.4)。また、消費電力は前の Preamp 実験から、Preamp 単体の消費電力は $\sim 0.2\text{ W}$ で、入力電圧には依存しないことが分かっている。HV 回路は Preamp 基板を通して共通の駆動電圧を使用しているため、図 3.5 から、Preamp 単体の消費電力 0.2 W を差し引くと、HV 回路の消費電力は最大でも 0.04 W 以下であることが分かる。

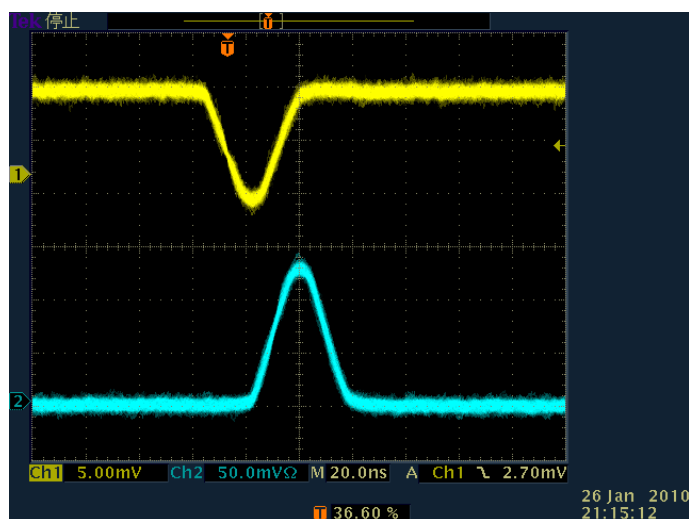


図 3.2: パルスジェネレータから Preamp へ入力した信号 (黄) と Preamp からの出力信号 (青)

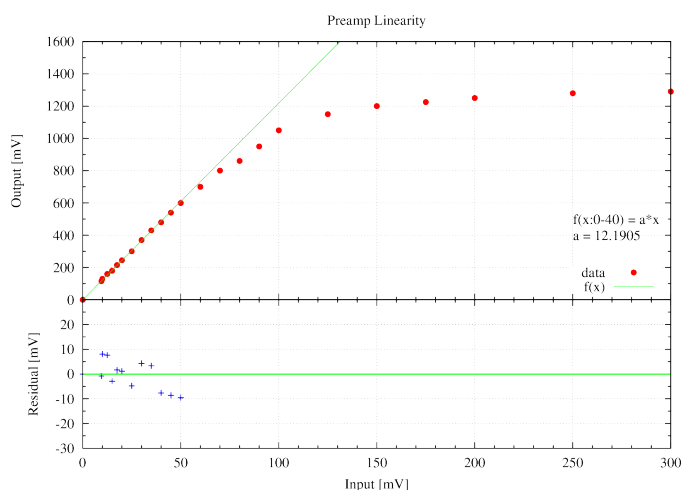


図 3.3: 上段:Preamp の入力電圧に対する出力電圧、下段:横軸 0-40 mV の範囲を使って一次関数でフィットした時の残差

波形データを取得するには DRS4 評価ボードを用いた。DRS4 評価ボードとは、PMT クラスターの読み出しボードに用いられるアナログメモリの DRS4 チップの評価版である。スイッチト・チャプタアーレイの一種で、高速、低コスト、低電力なサンプルホールド基板となっており、低速な ADC と組み合わせて高速波形読み出し (最速 5 GSamples/s) が可能な読み出しボードである。本研究では sampling clock を 2 GSamples/s に設定して実験を行った。読み出しボードには Kapstinsky パルサーから LED パルスと同期したトリガー信号を入力し、LED 光の信号のみを取り込むようにした。LED 光は光ファイバケーブルを用いて暗箱内に伝送し、FC コネクタから照射している。

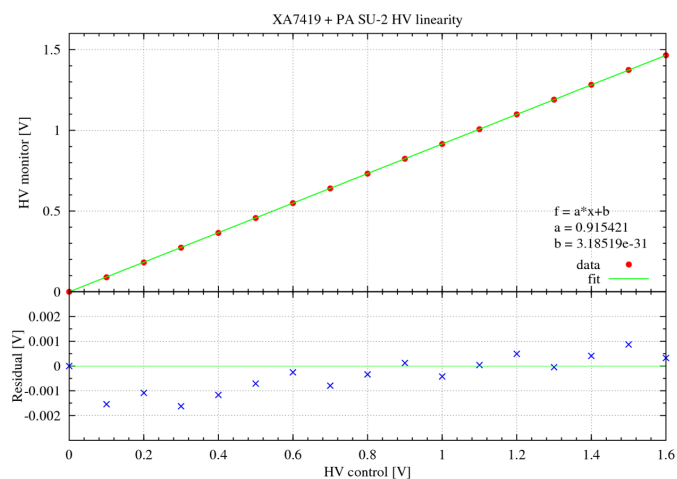


図 3.4: HV control 電圧に対する HV monitor 電圧の線形性

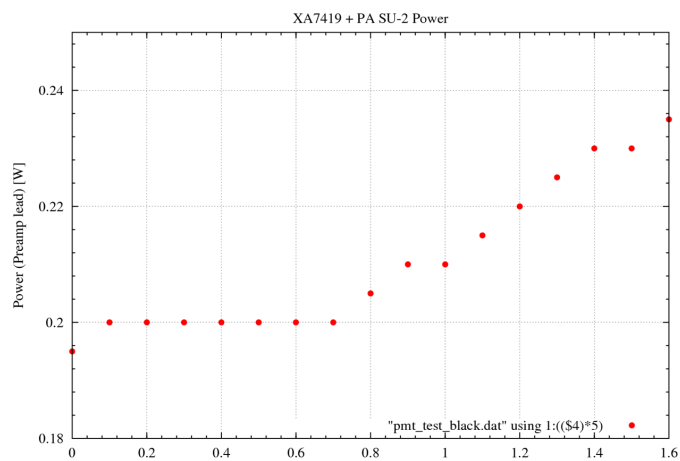


図 3.5: HV control 電圧に対する消費電力。preamplifier 駆動電圧を含む

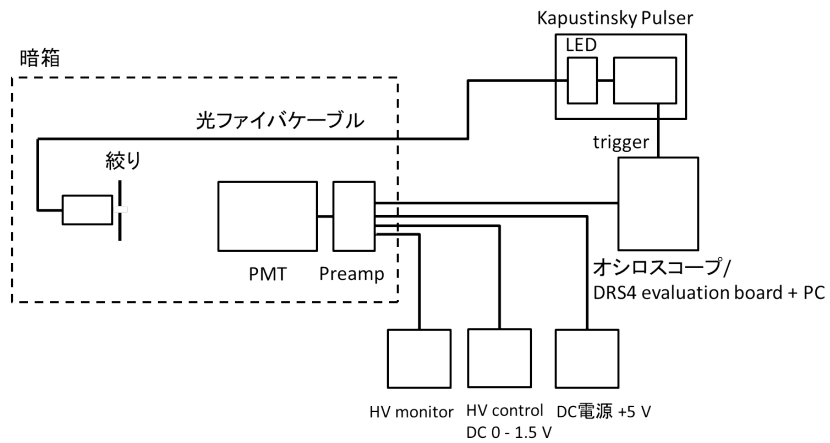


図 3.6: 室温試験の際のセットアップ図。Preamp からの出力信号をオシロスコープでモニターして確認する。波形データを取得するには DRS4 evaluation board を使い、PC にデータを取り込む。

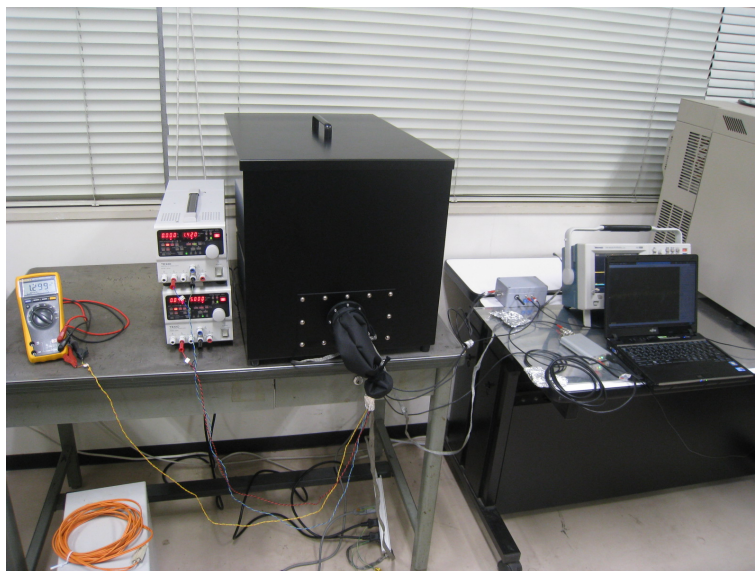


図 3.7: 実際のセットアップの様子。

解析方法

本研究で用いるゲイン測定方法では、1 p.e. 相当の光量のパルス光を PMT に照射し読みだした信号を電荷に換算し素電荷との比をとることで PMT のゲインを測定する。このとき、読み出したパルス波形を積分し、積分値が電荷に比例するため、アノード出力時の電荷量を算出できる (図 3.8)。電荷量はポアソン分布にしたがうため、波形の積分値を近似的にガウス分布でフィットすることで増幅された 1 p.e. 相当電荷量を決めることができる。しかし、1 p.e. 程度の光量を光電面に照射した際、必ず 1 つの光電子が放出されるとは限らず、LED の波長、光量の揺らぎや、光電面の波長依存性によって光電子はある程度ゆらぎを持って放出される。よって読み出される信号からは 1 p.e. だけでなく 2 p.e. が検出されることもあり、波形の積分値の分布は 1 p.e. と 2 p.e. とそれ以上のポアソン分布を足し合わせた形になる (図 3.9)。そのため、1 p.e. 解析では積分値の分布を多重ガウス分布でフィットすることで、分布のピーク値から電荷量を決定し素電荷の比を取ることで、ゲインの算出ができる。

単一の n p.e. に相当する電荷によるガウス分布 $F_{n \text{ p.e.}}$ は次のように書くのことができる。

$$F_{n \text{ p.e.}} = S \frac{e^\mu \mu^n}{n} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \exp\left(-\frac{(x - X_n)^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (3.1)$$

ここで、 S はヒストグラム全体の面積 (イベント数)、 μ は平均の入射光電子数、 X_n はこのガウス分布の平均、 σ_n はこのガウス分布の標準偏差である。またこの時 0 p.e. の分布はペデスタルに相当する。 X_n は以下のように表せる。

$$X_n = n \times (X_1 - X_0) + X_0 = n \times \Delta X + X_0 \quad (n \neq 0) \quad (3.2)$$

さらに、 σ_n は

$$\sigma_n = \sqrt{n} \times \sigma \quad (n \neq 0) \quad (3.3)$$

と表すことができる。よって全体の多重ガウス分布は

$$F_{\text{multi gauss}} = F_{0 \text{ p.e.}} + F_{1 \text{ p.e.}} + F_{2 \text{ p.e.}} + \dots + F_{n \text{ p.e.}} \quad (3.4)$$

$$= S e^\mu \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \exp\left(-\frac{(x - X_0)^2}{2\sigma_0^2}\right) \quad (3.5)$$

$$+ S \frac{e^\mu \mu^1}{1} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \exp\left(-\frac{x - X_0 - 1 \cdot \Delta X^2}{2(\sqrt{1}\sigma)^2}\right) \quad (3.6)$$

$$+ S \frac{e^\mu \mu^2}{2} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \exp\left(-\frac{x - X_0 - 2 \cdot \Delta X^2}{2(\sqrt{2}\sigma)^2}\right) \quad (3.7)$$

$$+ \dots \quad (3.8)$$

$$+ S \frac{e^\mu \mu^n}{n} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \exp\left(-\frac{x - X_0 - n \cdot \Delta X^2}{2(\sqrt{n}\sigma)^2}\right) \quad (3.9)$$

と書くことができる。この分布のパラメータは平均の入射光量 (μ)、ペデスタルの平均 (X_0) と標準偏差 (σ_0)、個々のガウス分布の平均値の差、すなわち X_0 を引いた 1 p.e. 分布の平均値 (ΔX)、1 p.e. の分布の標準偏差 (σ) からなる。

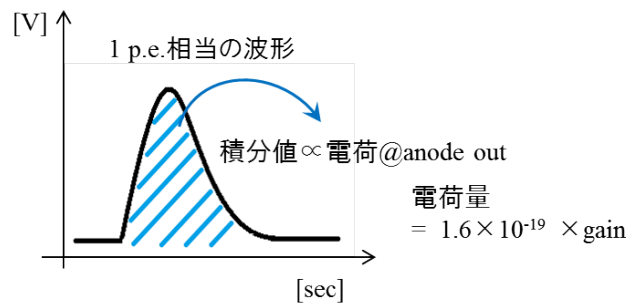


図 3.8: 1 p.e. 波形の積分値をゲインに換算するイメージ

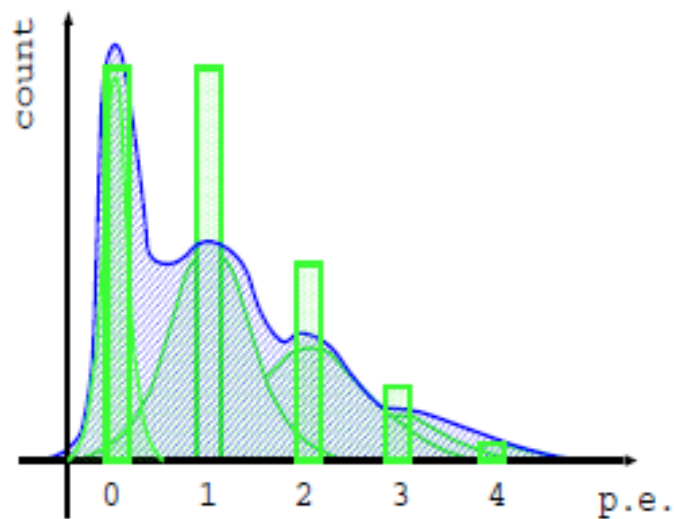


図 3.9: 多重ガウシアンフィットによる 1 p.e. 解析の概要図。0 p.e. はペDESTALに相当する。

1 p.e. の取得

1 p.e. 相当の波形データを得るためには、1 p.e. 相当の光量を設定できなければいけない。図 3.6 にある絞りをを使って光量を下げていったときに、波高値ピークが下がらない限界が 1 p.e. に相当する光量となる。1 p.e. 相当の光量ではトリガー信号に対して毎回 PMT 信号が得られるとは限らず、オシロスコープを使って目視で波高値の限界を見極めるのは困難である。そのため、ここでは DRS4 ボードを使って 1 kHz のトリガー毎に波形をサンプルし、サンプル毎に最も高い電圧値を波形のピークとしてピーク値のヒストグラムを作った。図 3.10 は絞りをを使って光量下げていったときのピーク値のヒストグラムである。この図から、光量を下げても波高値分布のピークが 50-60 mV よりは下がらない事が分かるため、50-60 mV の波形がオシロスコープで得られるときの光量を 1 p.e. 相当の光量であるとした。オシロスコープで得られた波形を図 3.11 に示す。この波形から、波形のパルス幅を読み取り、以降の解析では波形を積分する時間範囲をピークから ± 2 nsec としている。このときに DRS4 ボードで波形データを取得し、ピークから ± 2 nsec の範囲で波高値を積分し作成したヒストグラムとそれを多重ガウス分布でフィットした様子を図 3.12 に示す。ここで横軸は電圧と時間の積ではなく、電圧と ADC clock の積になっており、フィット結果から 1 p.e. のピークは ~ 220 mV $\times$ clocks にあることが分かる (3.9 式では ΔX に相当)。1 p.e. ピークの電荷量は、アノード信号が出力される Preamp の入力インピーダンスが 50 Ω であるので

$$Q = \frac{1}{R} \int v dt = 220 \times 0.5 [\text{mV} \cdot \text{nsec}] / 50 [\Omega] = 2.2 \times 10^{-12} [\text{C}] \quad (3.10)$$

(ADC clock = 0.5 nsec) となり、これを素電荷 1.6 で割った値が Preamp 出力時のゲインとなり、さらに Preamp の増幅率 12 倍で割ることで

$$PMT_{gain} = \frac{Q}{e} \frac{1}{12} = \frac{2.2 \times 10^{-12}}{1.6 \times 10^{-19} \cdot 12} = 1.15 \times 10^6 \quad (3.11)$$

と PMT のゲインを求める事ができた。

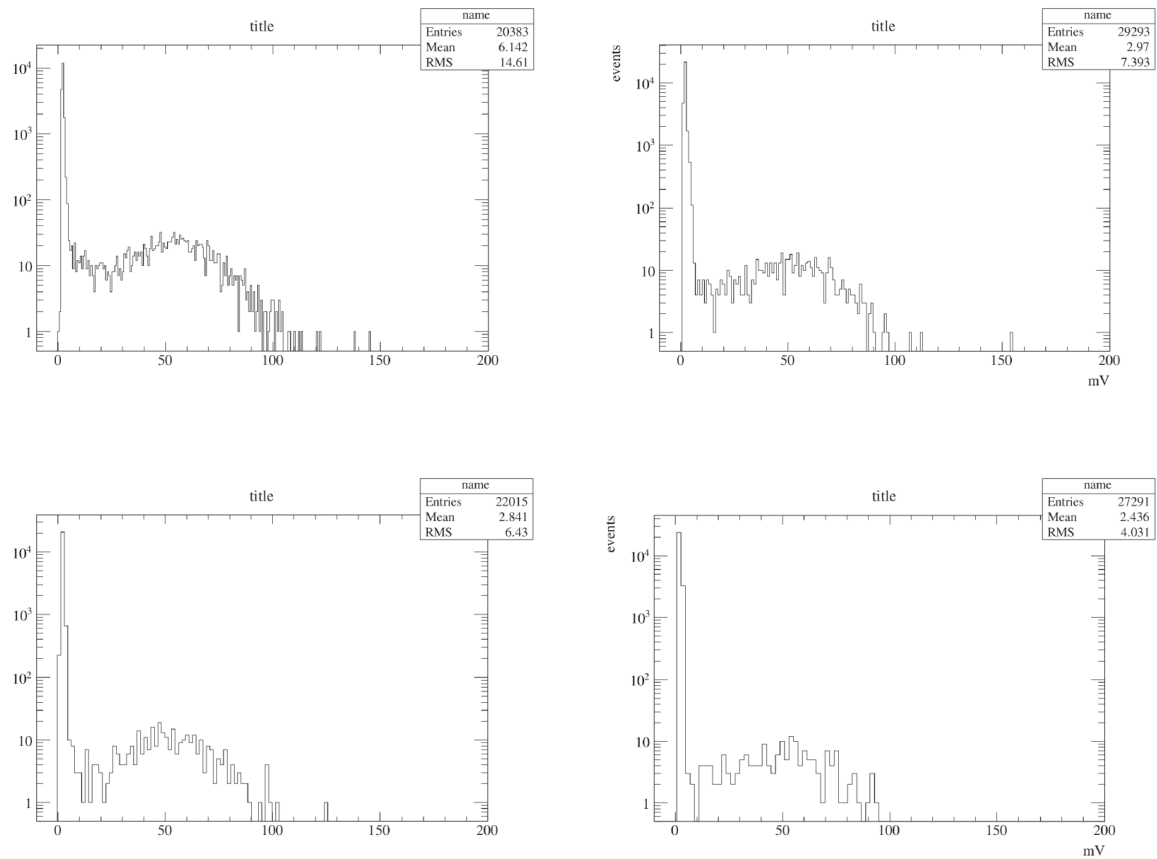


図 3.10: HV 値 1300 V での光量を徐々に下げて行った時の波形ピークの分布。左上、右上、左下、右下の順で光量を下げた。

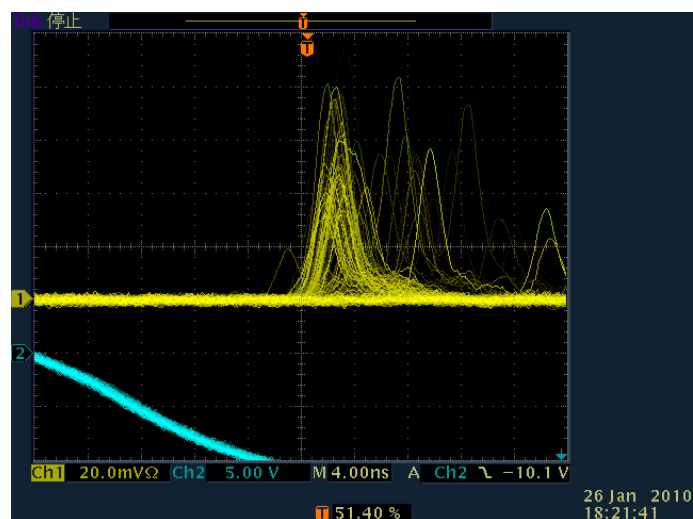


図 3.11: オシロスコープで取得した 1 p.e. 相当の波形。

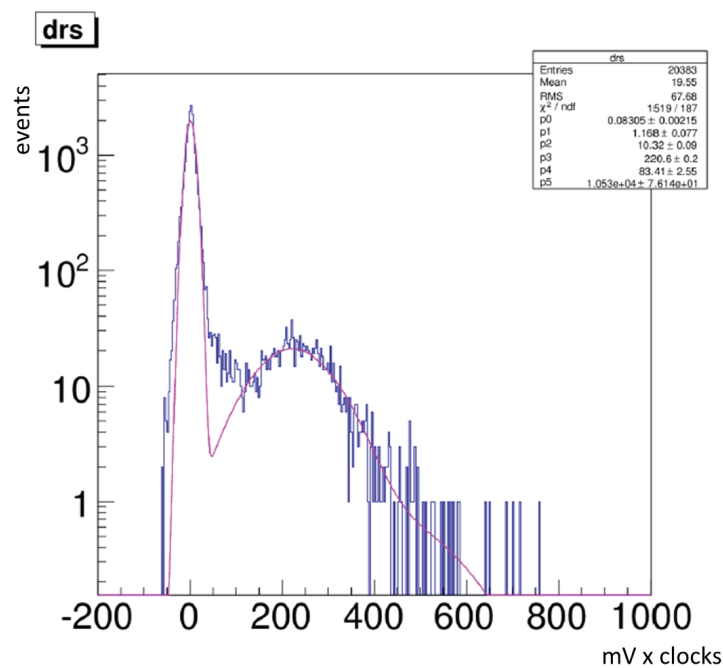


図 3.12: 1 p.e. 相当の波形積分値分布のフィット結果。

3.2.3 HV 値に対するゲインの測定

図 3.11 と同等の光量を用いて、HV の値を 950 V、1000 V、1100 V、1200 V、1300 V、1400 V と変え、DRS4 ボードにより取得した波形データから得た波形の積分値分布のプロットとそのフィット結果を図 3.13 に示す。前節で行った方法と同様に、フィット結果から獲れた 1 p.e. 分布のピーク (3.9 式での ΔX) からゲインを計算し、HV 値に対してプロットしたものが図 3.14 である。同時に浜松ホトニクス社のスペックシートとから得られたデータをプロットしている。べきは概ね一致しているが、本研究での測定値が ~ 3 倍ほど大きい理由は、浜松ホトニクスでの測定は、2.3.1 節、電子増幅-ゲイン特性で述べた (1) のゲイン測定方法、一定の光量を光電面に照射し続け、その際に光電面から放出される光電子電流とアノード電流の比を測定することで得られた値であることなどが考えられる。

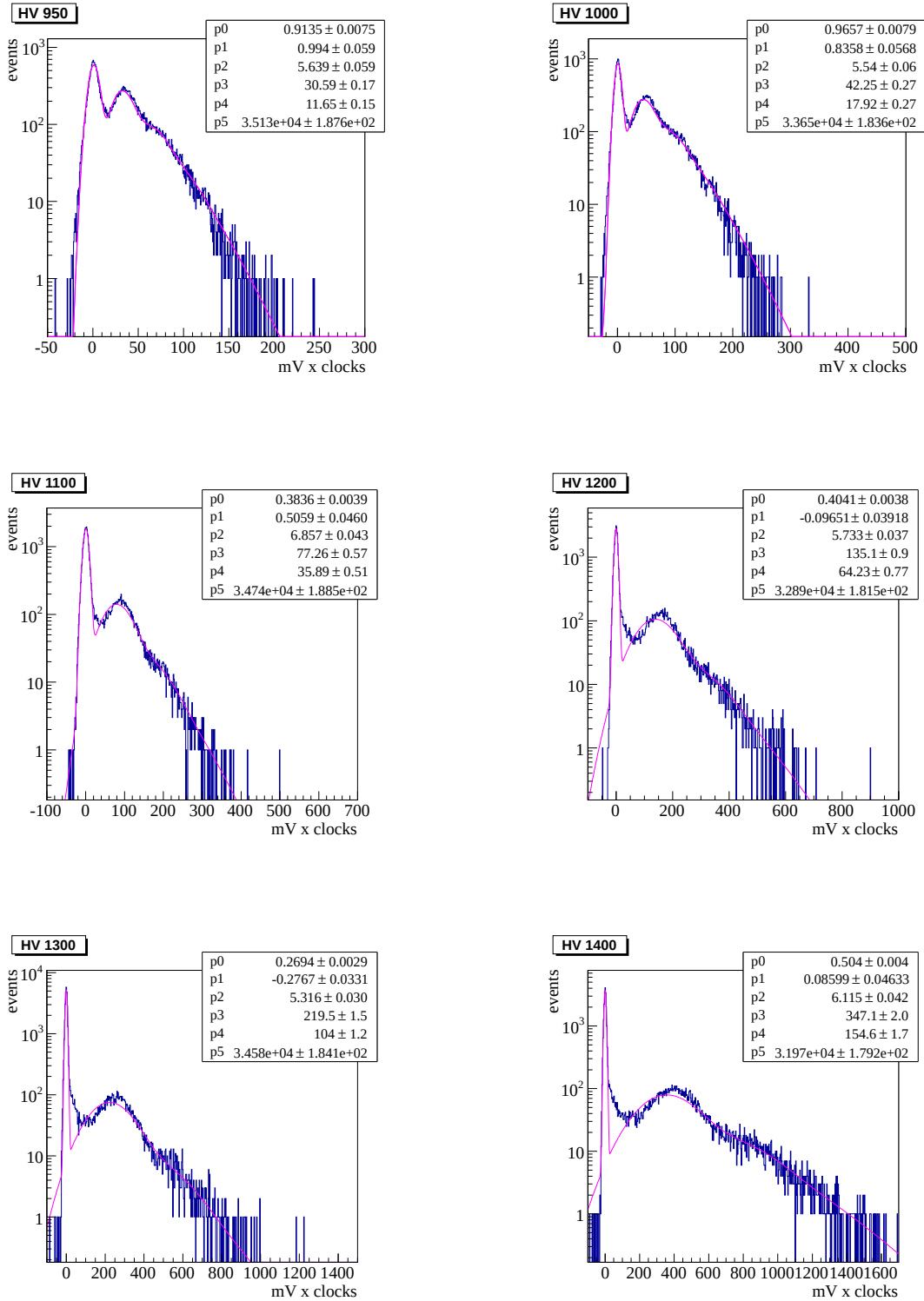


図 3.13: 波形の積分値分布。マゼンタはフィットした多重ガウス分布を表す。ボックスにはフィット結果のパラメータを示し、p0 から p5 はそれぞれ、3.9 式における μ 、 X_0 、 σ_0 、 ΔX 、 σ 、 S に対応する。左上:HV 950 V、右上:HV 1000 V、左中:HV 110 V、右中:HV 1200 V、左下:HV 1300 V、右下:1400 V

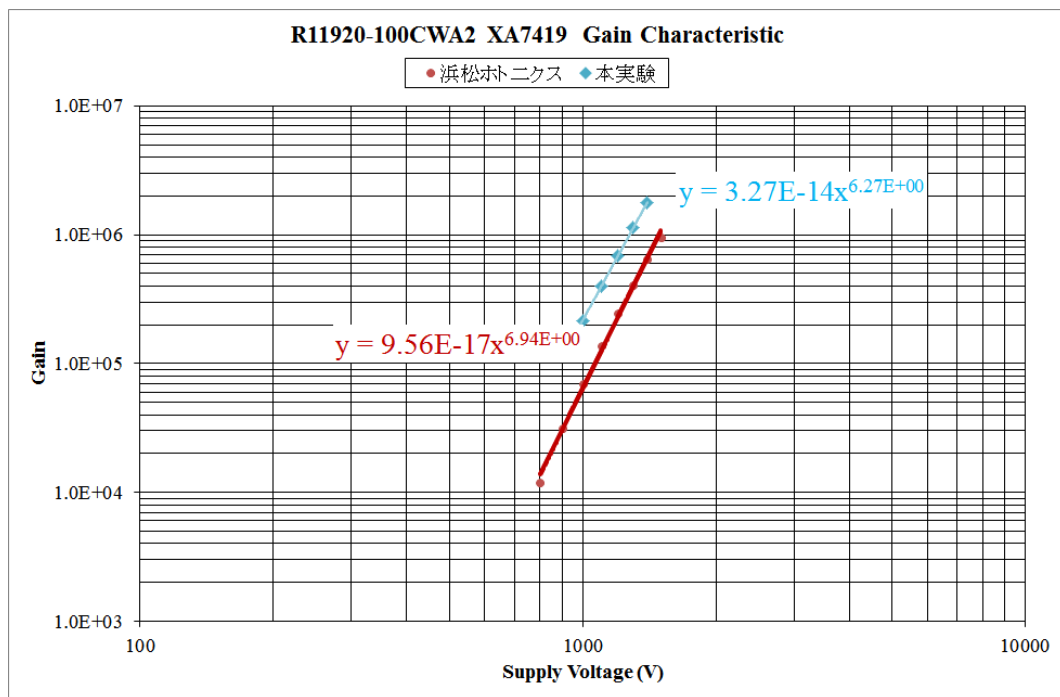


図 3.14: HV 値に対するゲインの値。浜松ホトニクスによる測定結果との比較

3.3 温度依存試験

温度依存試験では冷却系の開発によって目標とされている温度範囲 28°C から 48°C に対して若干のマージンを加えて 20°C から 50°C での基礎特性を測定した。

3.3.1 各サブセットの基礎特性

室温での試験と同様に、20°C、30°C、40°C、50°C での Preamp の増幅率、HV control と HV monitor 電圧の線形性、消費電力の測定を行った。セットアップについては図 3.1 の暗箱を恒温槽に置き換えた形になる。

図 3.15 に Preamp の入力電圧に対する出力電圧のプロットを示す。20°C から 50°C で 2.5% 程度、増幅率が低下することの他、ダイナミックレンジには温度依存性は見られない。

図 3.16、3.17 に HV control 電圧に対する HV monitor 電圧の線形性、消費電力の測定結果を示す。HV monitor の線形性には全く温度依存性は見られず、消費電力は温度上昇に対して 5% 程度の増加に止まり、最大 0.05 W 以下と言う仕様を満たしている。

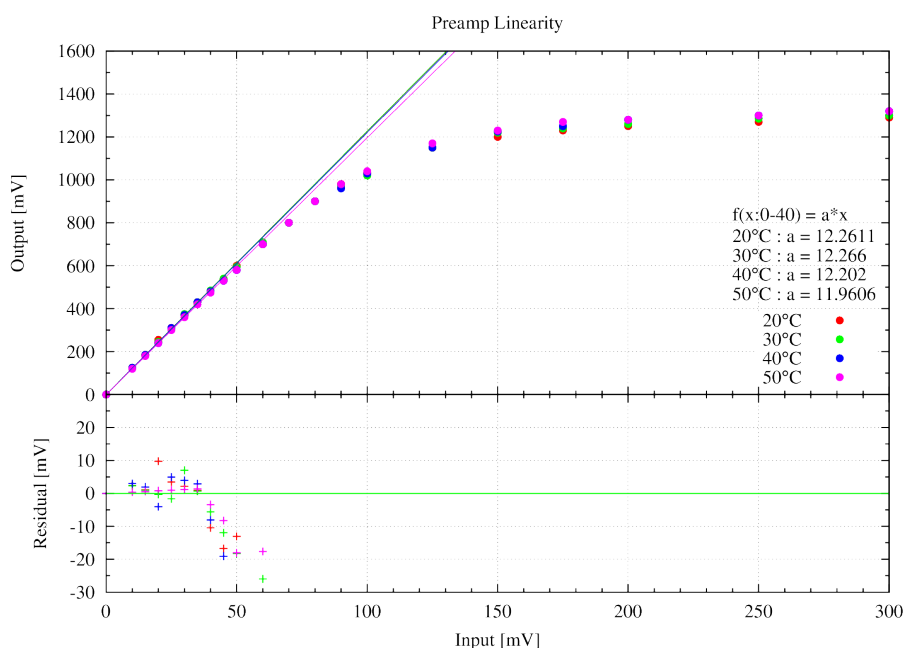


図 3.15: 上段:Preamp の入力電圧に対する出力電圧、下段:それぞれの温度のデータについて、横軸 0-40 mV の範囲を使って一次関数でフィットした時の残差

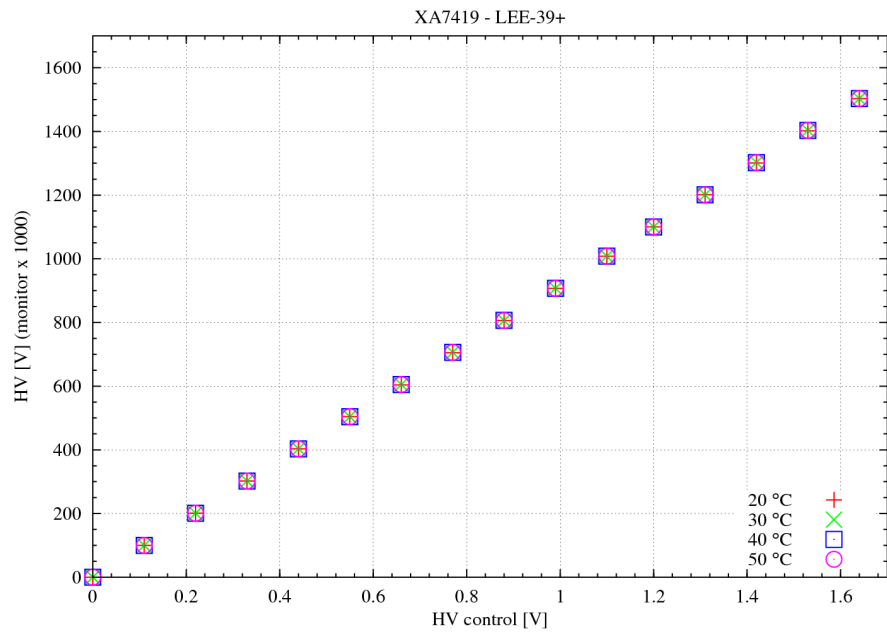


図 3.16: 各温度における HV control 電圧に対する HV monitor 電圧の線形性

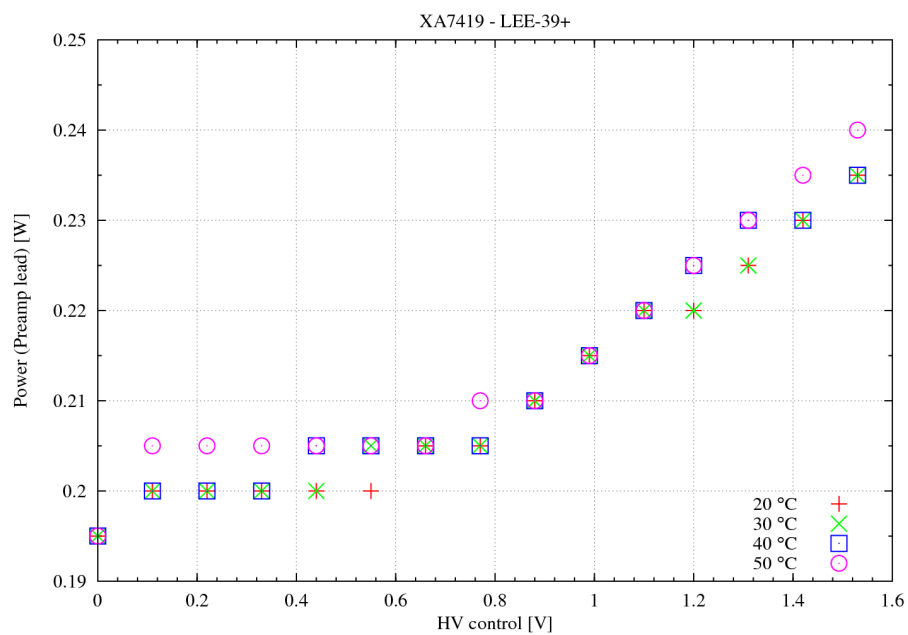


図 3.17: 各温度における HV control 電圧に対する消費電力。Preamp 駆動電圧を含む。

3.3.2 ゲイン測定

セットアップは図 3.6 の暗箱を恒温槽に置き換えた形になる。HV を印加する際には遮光を徹底するため PMT 自体をブラックシートで包む恒温槽の窓や貫通口をブラックテープでふさぐ、また恒温槽の前面をブラックカーテンで覆うなどした。照射した光量は室温での試験と同等である。

図 3.18-3.23 は各温度における波形積分値の分布を HV 値ごと同時プロットしたものであり、温度上昇にともなって 1 p.e. ピークが積分値の小さい方へシフトしていく様子が見られる。図 3.24、3.25、3.26、3.27 にそれぞれ個々の分布と多重ガウス分布でのフィット結果を示す。この結果からゲインを計算し、各温度毎の HV 対ゲインをプロットすると 3.28 のようになる。この図から温度上昇にともなってゲインが相対的に低下する様子が窺えるが、べきには目立った違いが見られないことから HV 値に対するゲインの増加率は温度によって変わらないことが分かる。3.29 は、実際に温度変動がある状況で PMT を運用した場合を考え、同じデータで横軸を温度にとって HV 値ごとにプロットした物である。計算したゲインを表 3.1 にまとめた。この表の右側の列の温度変化に対するゲイン変動の割合は、20°C と 50°C の時のゲイン値の差と、20°C から 50°C でのゲインの平均値の比を取って求めた値である。ここからゲイン温度依存性はどの HV 値でも平均的に $\sim -7\% / ^\circ\text{C}$ 程度であることが分かる。この時、図 3.27 などから窺えるように、HV 値の大きい場合ではペDESTAL の非対称性が大きく表れ、多重ガウス関数によるフィットがデータのピークをうまく表現できていないため、温度係数の HV 値に対する依存性を考察するには不定性が残るが、HV 値 1100 V 異常の結果について、多重ガウス関数のフィットに因らずに目視によってペDESTAL と 1 p.e. のピーク ch を読み取り、ゲインを計算、温度係数を求めたところ、HV 1100 V、1200 V、1300 V、1400 V のときの温度係数はそれぞれ、 $-0.67\% / ^\circ\text{C}$ 、 $-0.73\% / ^\circ\text{C}$ 、 $-0.80\% / ^\circ\text{C}$ 、 $-0.62\% / ^\circ\text{C}$ となった。よって、HV 値の高い場合では依然、大きな不定性が残るが、ゲインの温度変動はどの HV 値でも概ね $-1\% / ^\circ\text{C}$ 以下であることが言える。

また、HV control 電圧と HV monitor 電圧に温度変動が無いこと (図 3.16) から HV 値に温度依存性がないことが分かり、また Preamp 増幅率の温度変動は PMT のゲイン変動に対して十分小さいこと ($< 0.1\% / ^\circ\text{C}$) から、ゲインの $\sim -0.7\% / ^\circ\text{C}$ の温度変動は PMT 自体に内在的な温度依存性であることが分かる。

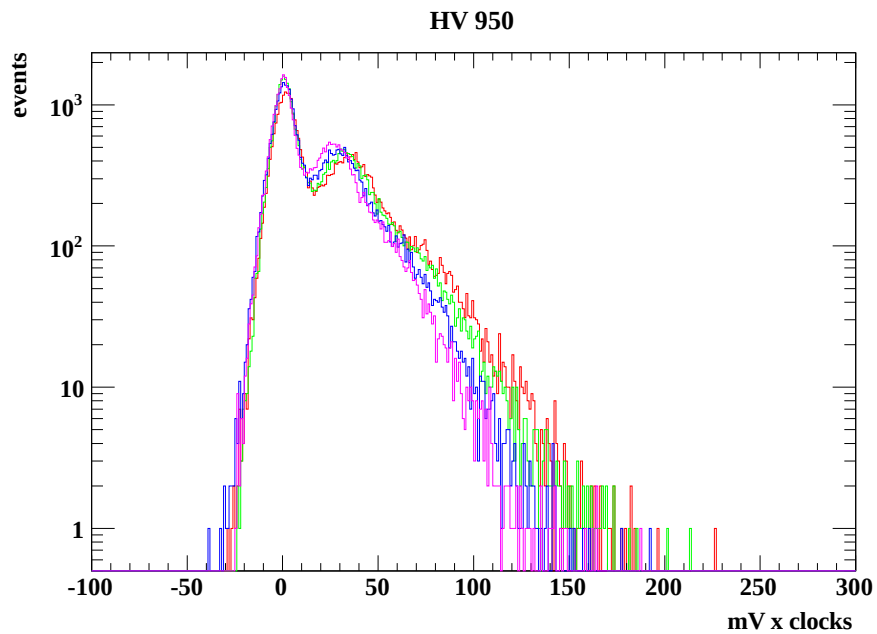


図 3.18: HV 値 950 V における波形積分値の各温度での同時プロット。各色は赤:20°C、緑:30°C、青:40°C、マゼンタ:50°C での結果を表す。

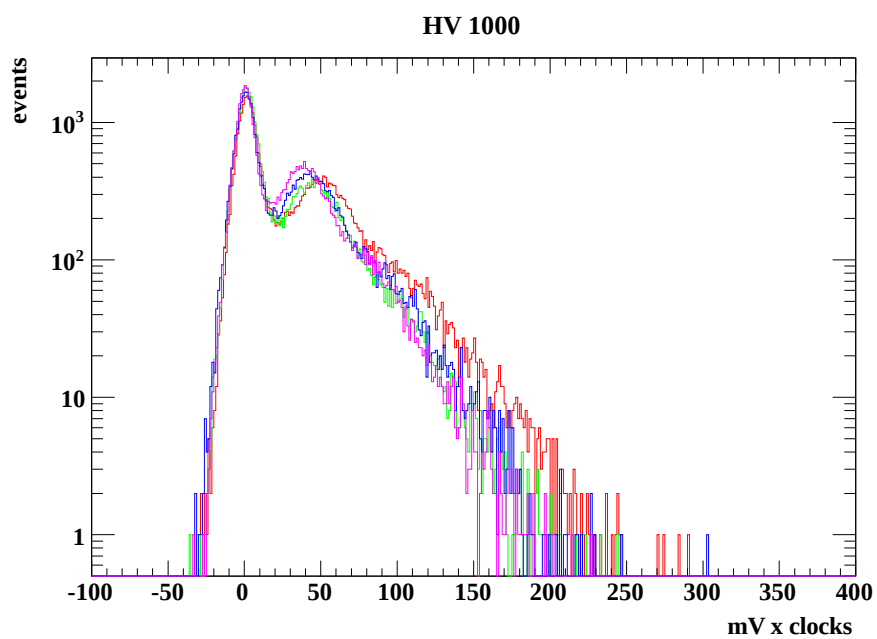


図 3.19: HV 値 1000 V における波形積分値の各温度での同時プロット。各色の表現は図 3.18 と同一。

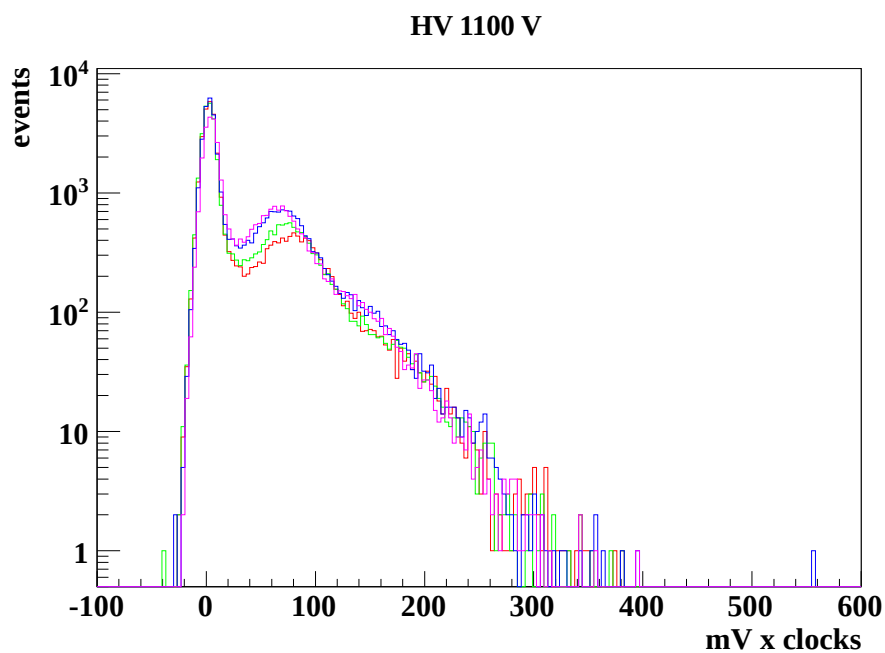


図 3.20: HV 値 1100 V における波形積分値の各温度での同時プロット。各色の表現は図 3.18 と同一。

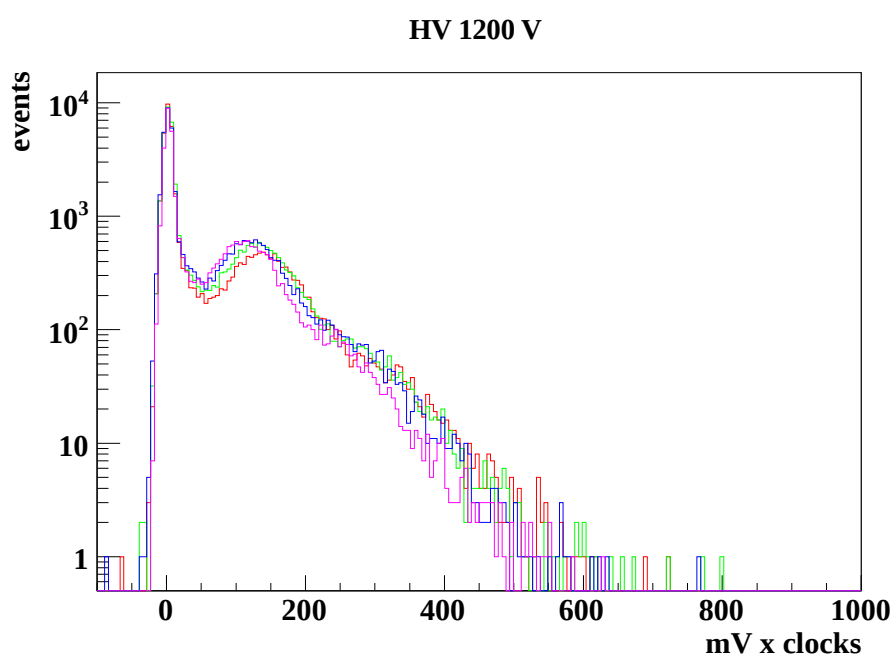


図 3.21: HV 値 1200 V における波形積分値の各温度での同時プロット。各色の表現は図 3.18 と同一。

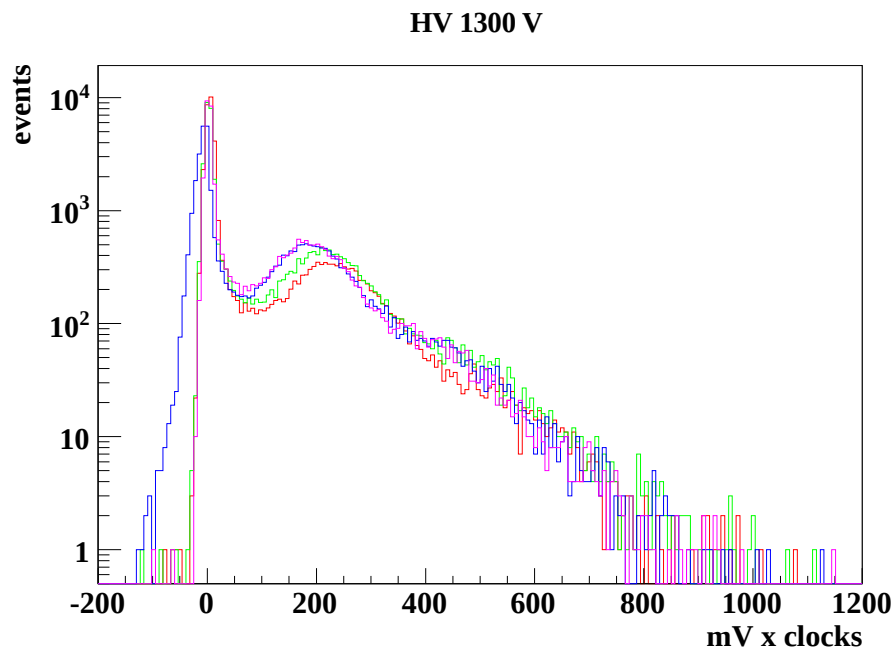


図 3.22: HV 値 1300 V における波形積分値の各温度での同時プロット。各色の表現は図 3.18 と同一。

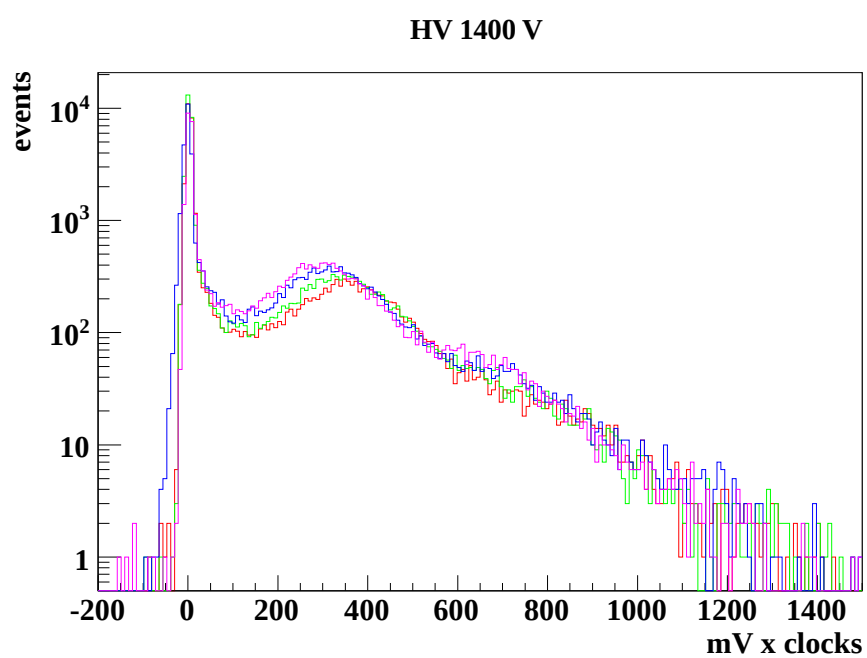


図 3.23: HV 値 1400 V における波形積分値の各温度での同時プロット。各色の表現は図 3.18 と同一。

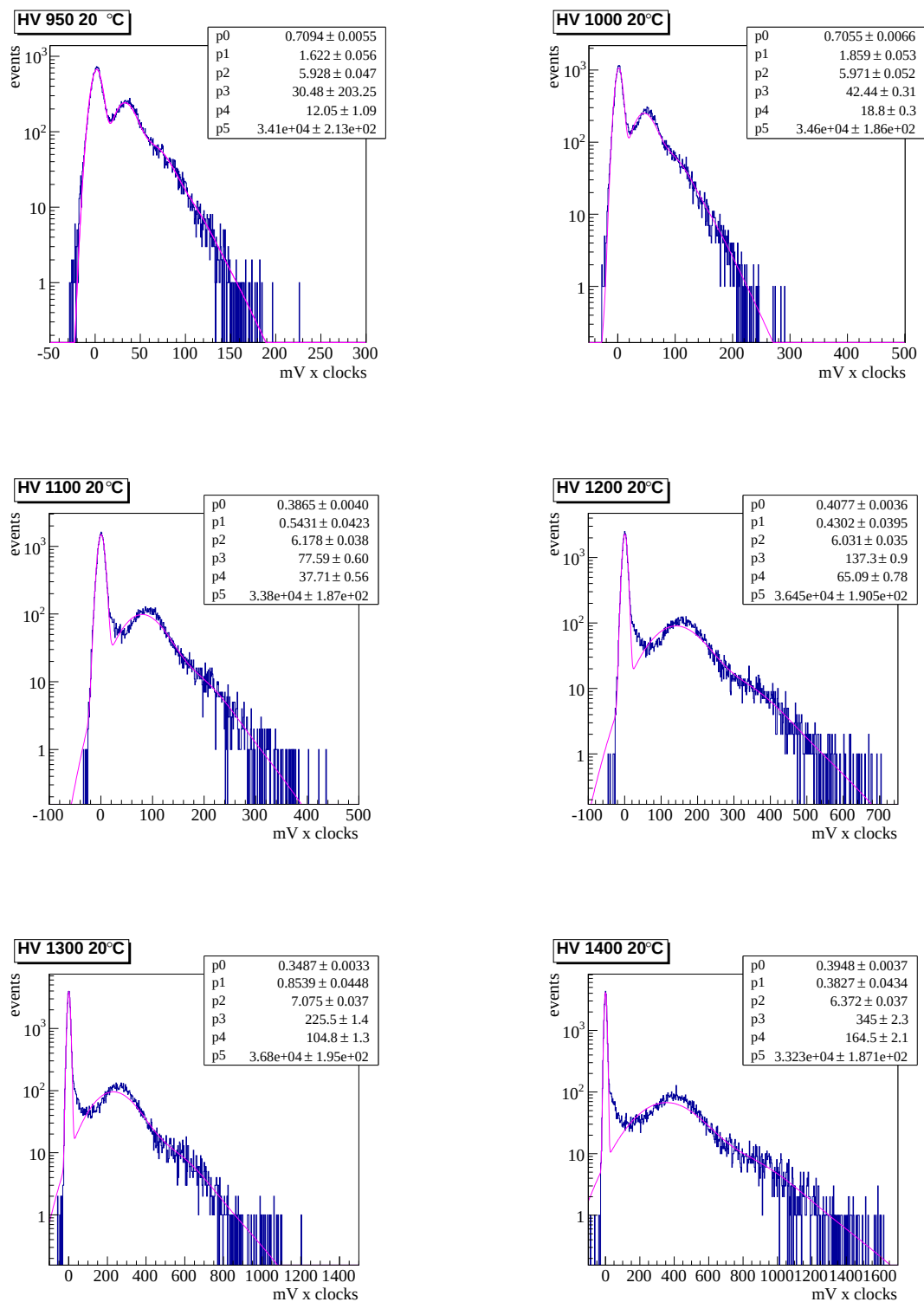


図 3.24: 20°C のときの積分値分布。p0 から p5 はそれぞれ、3.9 式における μ 、 X_0 、 σ_0 、 ΔX 、 σ 、 S に対応する。左上:HV 950 V、右上:HV 1000 V、左中:HV 110 V、右中:HV 1200 V、左下:HV 1300 V、右下:1400 V

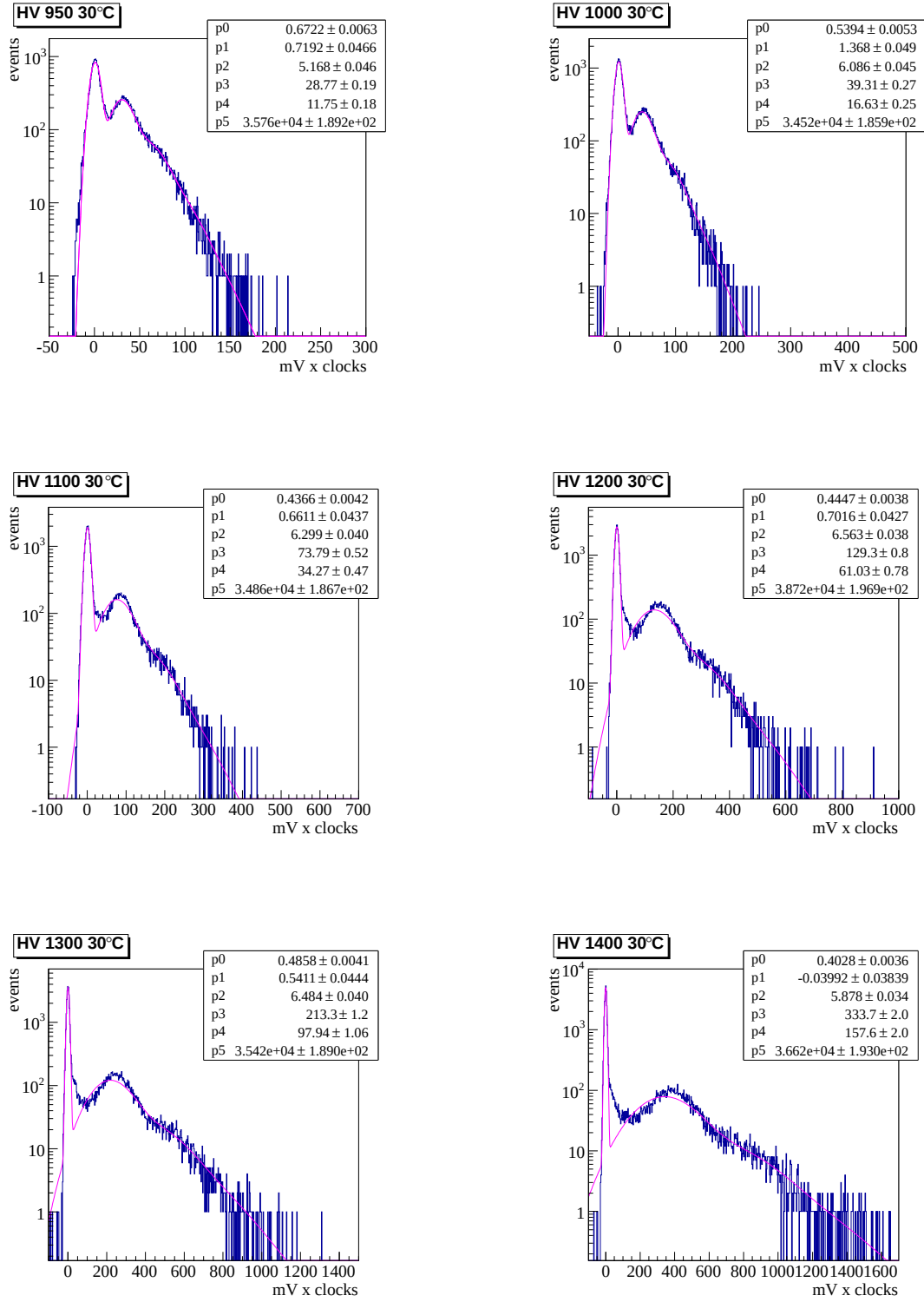


図 3.25: 30°C のときの積分値分布。左上:HV 950 V、右上:HV 1000 V、左中:HV 110 V、右中:HV 1200 V、左下:HV 1300 V、右下:1400 V

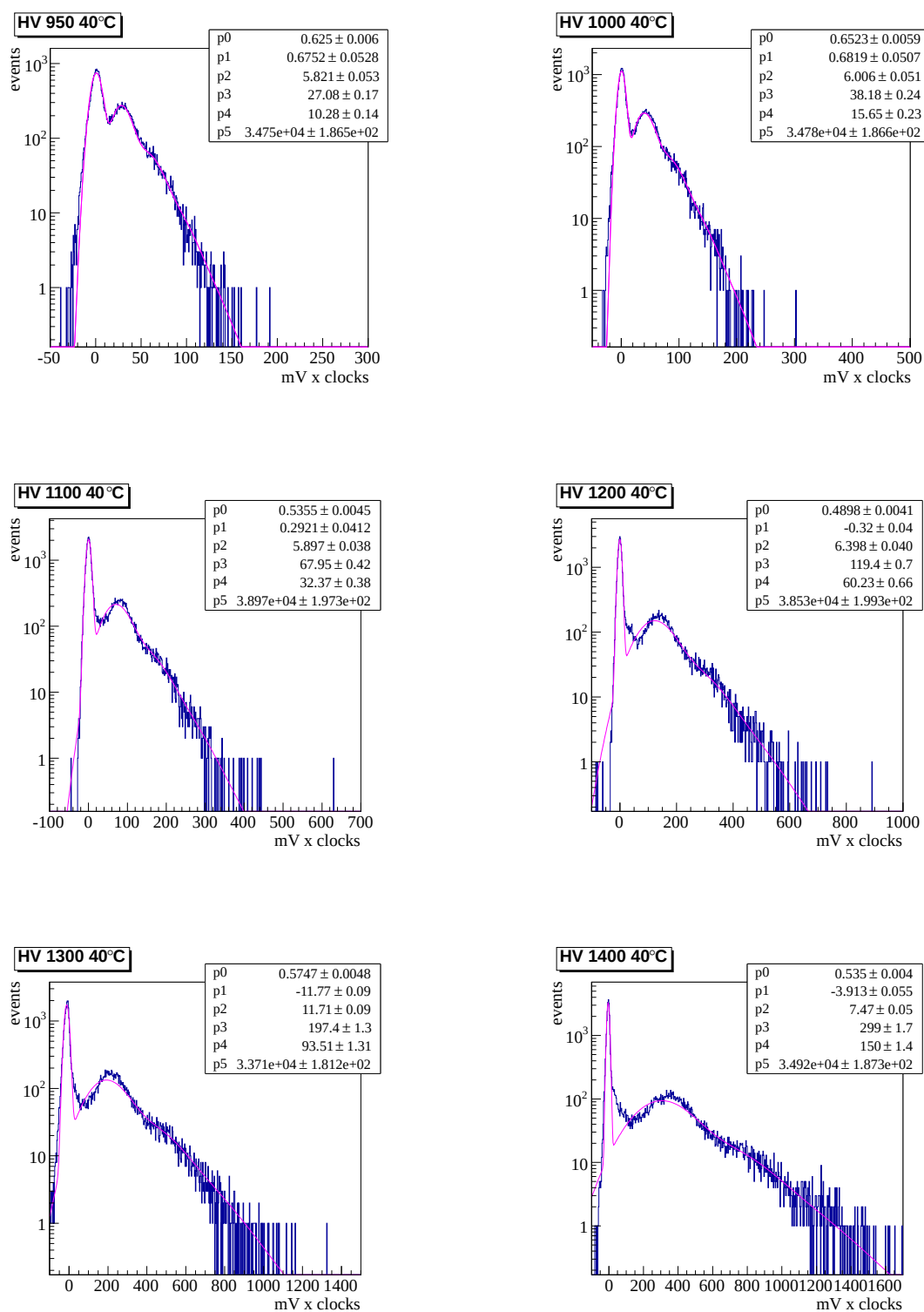


図 3.26: 40°C のときの積分値分布。左上:HV 950 V、右上:HV 1000 V、左中:HV 110 V、右中:HV 1200 V、左下:HV 1300 V、右下:1400 V

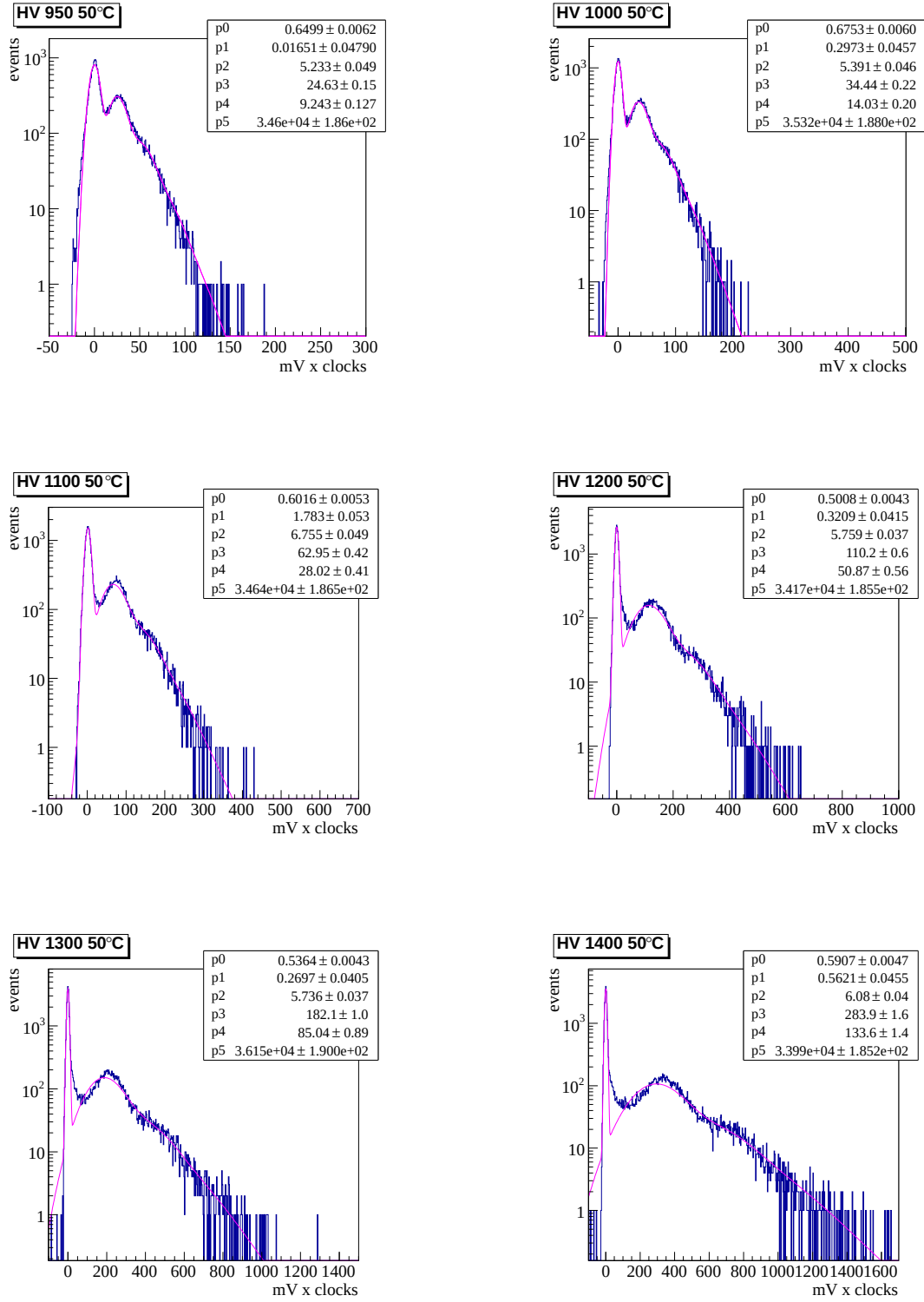


図 3.27: 50°C のときの積分値分布。左上:HV 950 V、右上:HV 1000 V、左中:HV 110 V、右中:HV 1200 V、左下:HV 1300 V、右下:1400 V

gain ($\times 10^5$)	20°C	30°C	40°C	50°C	温度変化に対する gain 変動の割合 [% / °C]
950 V	1.55	1.47	1.38	1.25	-0.70%
1000 V	2.16	2.00	1.95	1.75	-0.69%
1100 V	3.96	3.76	3.44	3.21	-0.69%
1200 V	7.00	6.59	6.08	5.62	-0.73%
1300 V	11.5	10.9	10.1	9.28	-0.71%
1400 V	17.6	17.0	15.2	14.5	-0.65%

表 3.1: 温度、HV 値に対するゲイン値。 $\times 10^5$ を省略して表記している。

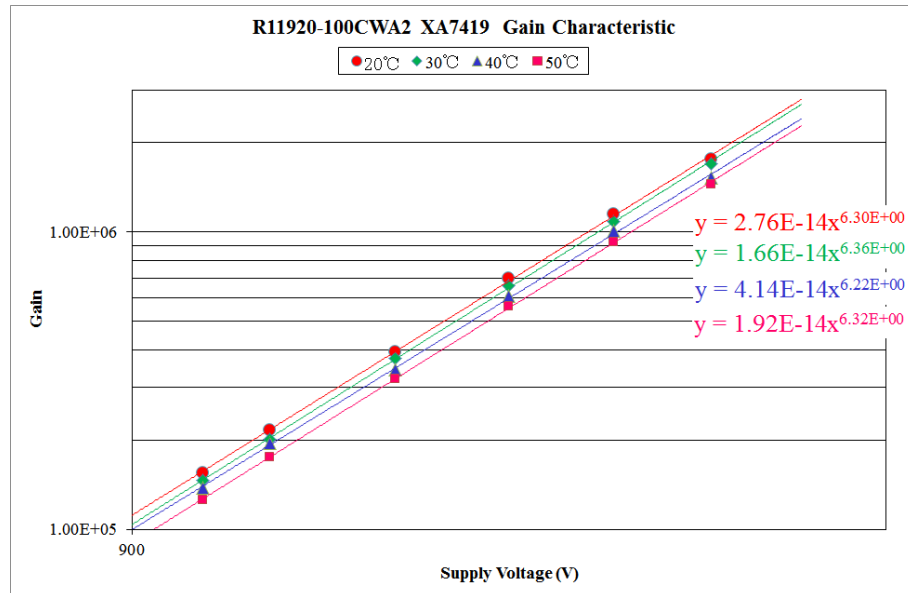


図 3.28: 各温度における gain の HV 依存性

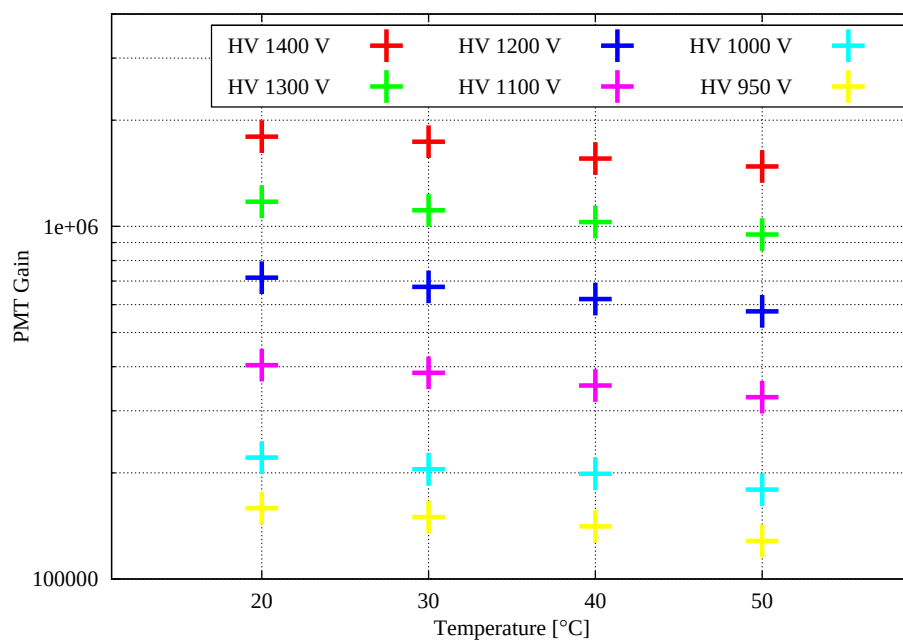


図 3.29: 各 HV 値における gain の温度依存性

第4章 Conclusion

本研究では、CTA 大口径望遠鏡の開発において、今後の重要な開発課題である冷却系の開発に向けて、冷却系の性能から予想される 28°C から 48°C の温度範囲に対して、マージンを含め 20°C から 50°C の範囲での PMT、Hamamatsu R11920-100、HV 回路、Preamp 回路を組み合わせた PMT ユニットのゲイン特性の測定を行った。その結果、ゲインの温度変動は $\sim 1\% / ^{\circ}\text{C}$ 以下であることがわかり、また、HV 値の温度依存性は認められず、Preamp 増幅率の温度依存性は十分に小さいことから、この温度変動は PMT R11920-100 に内在する温度変動であることが分かった。今後は、同じ R11920-100 において他の PMT でも同様に温度依存性を調査し、この温度変動が PMT 毎にどれだけの個性を持つかを確認、また PMT クラスター、またミニカメラ単位での試験により、チャンネル間で温度変動によるゲインのばらつきどれだけ発生するかを検討し、キャリブレーションシステムによるゲイン調整のスケールを定量化、調整していくことが重要になる。

関連図書

- [1] <http://www.mppmu.mpg.de/~rwagner/sources/index.html>
- [2] CTA-Japan コンソーシアム, 2010, Cherenkov Telescope Array 計画, <http://cta.scphys.kyoto-u.ac.jp/index.html>
- [3] Longair, M. S., 1992, High Energy Astrophysics Volume 1, Cambridge University Press, Second Edition
- [4] 浜松ホトニクス, 光電子増倍管, 第3版
- [5] Knoll, G. F., 2001, 放射線計測ハンドブック, (木村逸郎, 坂井英次訳), 日刊工業新聞社, 第3版
- [6] 土屋兼一, 修士論文 (東京大学 2001)
- [7] Ailu, E. et al., 2008, Observation of Pulsed Gamma-rays Above 25 GeV from the Crab Pulsar with MAGIC, Science, Volume 322, Issue 5905, pp. 1221-
- [8] 國澤利貴, 修士論文 (東京大学 2009)
- [9] Orito, R. et al., 2011, Proceeding of International Cosmic Ray Conference, Beijing 2011
- [10] 菅原隆希, 卒業論文 (徳島大学 2012)
- [11] Kapustinsky, J. S. et al., 1985, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A241 612-613
- [12] 上野遥, 卒業論文 (埼玉大学 2012)
- [13] Hayashida M., PhD Thesis, LMU Munchen, 2008

謝辞

はじめに、本研究にあたってこのような研究テーマを与えて下さり、ご指導頂いた寺田幸功准教授に深く感謝致します。ノイズ落としのような実験の基本的なノウハウから、サイエンスにおけるCTAの意義まで、幅広くたくさんの事を学ばせて頂きました。田代信教授にはPMT自体のハードウェアの面から、波形解析におけるソフトウェアな面まで、あすか衛星をはじめとする数多くの衛星開発の経験からのエピソードとともに、あらゆる場面でアドバイスを頂きました。CTA焦点面検出器チームの徳島大折戸玲子助教授、京大窪秀利助教授にも大変お世話になりました。4年生の上野さんには、LEDパルサーの製作という重要な役割を丸投げしてしまいましたが、すんなりとこなして頂き、とても助かりました。

また、本修論とは直接の関わりはありませんが、研究室のみなさんにも、研究に関係あることな
いこといろいろとお世話になりました。特に、D2の原山さんには私が学部4年生の頃から、実験のいろはをたたき込んで頂きました。私が色々と我儘を言って沢山ご迷惑をお掛けしましたが、今こうしてPMTに触れているのは原山さんのお蔭です。

最後に、ここには書ききれない多くの方々と、私の研究生生活を支えて頂き、見守って頂いている両親と家族に感謝の意を述べさせていただきます。ありがとうございます。