

# アバランシェ・フォトダイオード の低温領域における特性

広島大学理学部物理科学科

クォーク物理学研究室

丸山悠 B034168

主査 杉立徹 教授

副査 佐藤仁 助教授

指導教官 杉立徹 教授

# 要旨

アバランシェ・フォトダイオード (APD) は、自己増幅作用を持つフォトダイオードである。この APD は $10^2$  程度の増幅率を持ち、通常フォトダイオードよりも微弱な光の検出に適している。現在、CERN 研究所の LHC 加速器施設において、高温のクォーク・グルーオン・プラズマの性質を調べるための高エネルギー重イオン衝突実験 (ALICE 実験) が予定されており、この APD は ALICE 実験で使用する電磁カロリメータ (PHOS 検出器) に用いる。PHOS 検出器は APD の熱ノイズを抑えるために $-25^{\circ}\text{C}$  で運転される。

本研究では、PHOS 検出器における光子のより精密な測定を可能にするため、APD の低温領域 ( $10^{\circ}\text{C} \sim -35^{\circ}\text{C}$ ) での増幅率の温度依存性を精密に測定した。また、APD は入射光子の波長によって量子効率が変わるため、発光波長の違う単色 LED ( $365\text{nm} \sim 850\text{nm}$ ) を用いた。使用した LED の発光量の規格化のために光電子増倍管での測定を同時に行った。

本研究の結果、APD の増幅率は温度の低下に伴い増加することがわかり、 $-25^{\circ}\text{C}$  での PHOS 検出器の運転に際して重要なデータを得ることができた。

# 目次

## 1. 序論

1.1 実験の背景

1.2 実験の目的

1.3 概要

## 2. 導入

2.1 ALICE 実験

2.2 PHOS 検出器

2.3 PWO 結晶

2.4 APD

## 3. 実験

3.1 実験器具

3.1.1 LED

3.1.2 PMT

3.2 LED の選別

3.2.1 選別の条件

3.2.2 LED の種類

3.2.3 選別の方法

3.2.4 結果

3.2.5 LED の決定

3.3 APD の増幅率の測定

3.3.1 セットアップ

3.3.2 シングルフォトエレクトロンについて

3.3.3 回路

3.3.4 増幅率の求め方

## 4. 結果

4.1 増幅率の温度依存性

4.2 増幅率の波長依存性

## 5. 考察

5.1 増幅率について

5.2 TDC について

5.3 増幅率の波長依存性について

## 6. 結論

## 7. 謝辞

## 8. 参考文献

## 9. 付録

# 1. 序論

## 2.1 実験の背景

宇宙開闢（ビッグバン）直後、わずか数十万分の一秒の間、高温高密度の宇宙はクォーク・グルーオン・プラズマ（QGP）相と呼ばれる現在とは全く異なった物質状態にあった。現在、私達の日常世界においては、クォーク3個が結びついて閉じ込められた状態を作っているが、高温高圧の状態になると、閉じ込めが破れクォークやその糊付けの役割をしていたグルーオンが自由に飛び交う状態、つまり物質の新しい形態に相転移する。この新しい形態を QGP という。私達はこの QGP を探索することで宇宙誕生の謎に迫り、物質宇宙の起源と時空発展の解明を行う。

現在、欧州の CERN 研究所の LHC 加速器施設において、高温の QGP の性質を調べるための高エネルギー重イオン衝突実験（ALICE 実験）が予定されている。この ALICE 実験は LHC 加速器に導入される4実験の中でクォーク物質探求に最適化した唯一の実験装置である。複数の検出器の情報を総合してクォーク物質についての高精度の探索を行う。

この ALICE 実験が備える電磁カロリメータのひとつに高性能光子検出器（PHOS）がある。PHOS 検出器とは、鉛タングステン酸結晶（PWO 結晶）と APD からなり、エネルギー分解能及び、2粒子分離分解能の双方に優れている。その動作原理は、PWO 結晶に光が入射すると微弱な蛍光を発生し、それを APD が正確に読み出すというものである。PHOS 検出器は ALICE 実験では APD の熱ノイズを抑えるために $-25^{\circ}\text{C}$ で運転される。

## 2.1 実験の目的

PHOS 検出器は低温領域において、光子の精密な測定が可能となる。それは PWO 結晶の発光量が増加することでエネルギー分解能が上がるからである。そうすると、低温領域における PWO 結晶の発光量、そして APD の増幅率の詳しいデータが必要となる。PWO 結晶の発光量は詳しく調べられているが、APD の低温領域での増幅率はあまり知られていない。本研究はその APD の低温領域での増幅率を明らかにすることを目的とした。

更に、発光波長の違う単色 LED（365nm～850nm）を用いて、APD の増幅率の波長依存性を測定した。

実験方法は、まず波長依存性を測定するため、複数の LED の中から PWO 結晶の発する蛍光の減衰時間よりも十分短い時間の中で発光量の大きいものを12本選別した。そして、温度依存性を測定するために APD を恒温槽に入れ、 $10^{\circ}\text{C}$ から $-35^{\circ}\text{C}$ の各温度で LED の光を当て、その増幅率を測定した。更に APD の応答時間の揺らぎも測定した。

使用した LED の発光量の規格化のために光電子増倍管での測定を同時に行った。その際に光電子増倍管の増幅率の温度依存性も確認する必要があるが、それはシングルフォトエレクトロンを測定することにより確かめた。

本研究の結果、APD の増幅率は温度の低下に伴い増加することがわかり、 $-25^{\circ}\text{C}$ での PHOS 検出器の運転に際して重要なデータを得ることができた。

## 1.3 概要

本文の概要は、第 2 章の導入で本研究を行う上での基礎知識を述べる。第 3 章の実験は、3.1 節では本実験で使用する LED の選別の方法、そして選別した LED について述べる。3.2 節では APD の増幅率の測定に入り、まずは実験装置のセットアップを説明する。セットアップの中で測定器の位置とシングルフォトエレクトロンの確認に関する説明をする。そして、回路についての説明をし、3.2 節の終わりに得られたデータから APD の増幅率の求め方について説明する。第 4 章では本実験における結果を述べる。第 5 章ではその結果を基に考察を行う。そして、第 6 章で結論を述べる。第 7 章で謝辞、第 8 章で参考文献、第 9 章には付録を載せる。

## 2. 導入

この章では本実験を行うに当たっての基礎知識をまとめた。その内容はまずは本実験の動機ともなる ALICE 実験についてふれ、ALICE 実験装置の電磁カロリメータである PHOS 検出器について述べる。そして PHOS 検出器を構成する PWO 結晶、APD についての説明をする。

### 2.1 ALICE 実験

現在、欧州の CERN 研究所の LHC 加速器施設において、ALICE 実験が予定されている。LHC 加速器とは世界最大衝突エネルギーとなる核子対当たり衝突エネルギー 5.5TeV の鉛+鉛原子核衝突を実現する加速器である。

LHC 加速器には、ALICE、ATLAS、CMS、LHCb という 4 つの実験があるが、ALICE 実験は 4 つの実験の中でクォーク物質探求に最適化した唯一の実験装置である。図 2.1 にこの ALICE 実験装置の完成予想図を載せる。

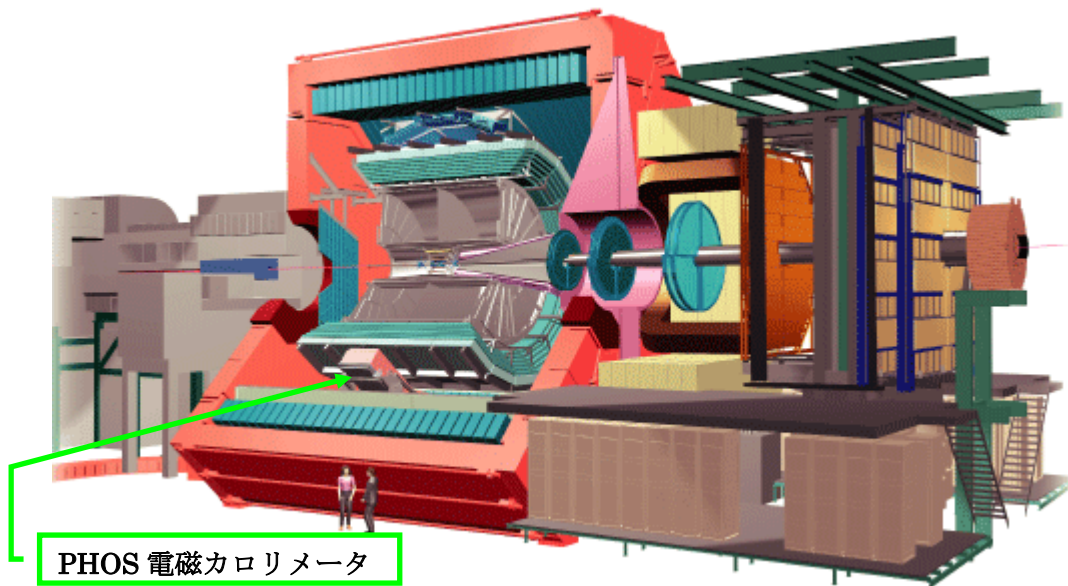


図 2.1 ALICE 実験装置完成予想図<sup>1</sup>

ALICE 実験は巨大なソレノイド電磁石の中心にビーム衝突点をおき、衝突点を囲むように様々な検出器を配置している。ALICE 実験はこれらの検出器により得られる複数の情報を総合してクォーク物質についての高精度の探索を行う最新鋭の複合型スペクトロメータである。

<sup>1</sup> 参考文献[9]

## 2.2 PHOS 検出器

QGP におけるクォーク物質の基本的物性を特定する最も理想的な信号は、熱輻射による熱光子を捉えることである。平衡状態に達したクォーク物質が熱輻射する光子には熱光子以外に様々な雑音光子が含まれる。雑音光子が重畳するエネルギー分布から如何にして目的とする熱光子のエネルギー分布を正確に抽出できるかが重要な鍵である。その入射する光子のひとつひとつを分離してそれぞれのエネルギーを精度良く測定することが出来るのが、ALICE 実験装置が備える高性能光子検出器 (PHOS) である。

PHOS 検出器は約 2 万チャンネルの検出素子からなる電磁カロリメータであり、エネルギー分解能及び 2 粒子分解能の双方が世界最高分解能である。図 2.2.1 に PHOS 検出器の概観図を載せた。

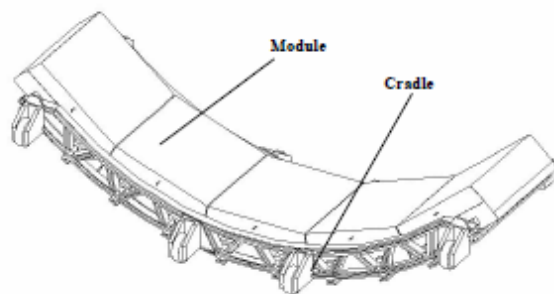


図 2.2.1 PHOS 検出器概観図<sup>2</sup>

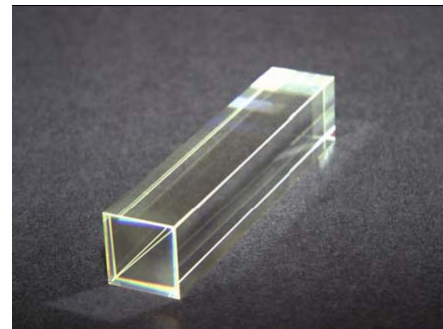


図 2.2.2 PWO 結晶の写真<sup>3</sup>

PHOS 検出器の検出素子は PWO 結晶と APD から構成される。PWO 結晶の写真は図 2.2.2 に示す。PHOS 検出器とは、PWO 結晶が発する蛍光を APD が捉え、それを電気信号として読み出すものである。

## 2.3 PWO 結晶

PWO 結晶は他の無機シンチレータと比較して短い放射長をもつ。放射長とは電子が物質に入射してから、そのエネルギーが  $1/e$  になる長さである。そしてモリエール半径が短いため、荷電粒子の制動放射による電子のシャワーの横の広がりも抑えることができる。よって、PHOS 検出器において近接するふたつの粒子を分離する能力 (2 粒子分離分解能) が優れているといえる。しかし、PWO 結晶は他の無機シンチレータと比べても蛍光量は小さい。また、発光減衰時間は PWO 結晶が特に短い。(表 2.3 参照)

<sup>2</sup> 参考文献[11]

<sup>3</sup> 参考文献[1]



表 2.3 無機シンチレータの性質<sup>4</sup>

物質	密度 [ $g/cm^2$ ]	放射長 [ $cm$ ]	モリエール 半径[ $cm$ ]	発光減衰 時間[ns]	相対発光量
PWO	8.28	0.89	2.2	5~15	0.01
BGO	7.13	1.12	2.4	300	0.15
NaI	3.67	2.59	4.5	250	1.00
CsI	4.53	1.85	3.8	565	0.40

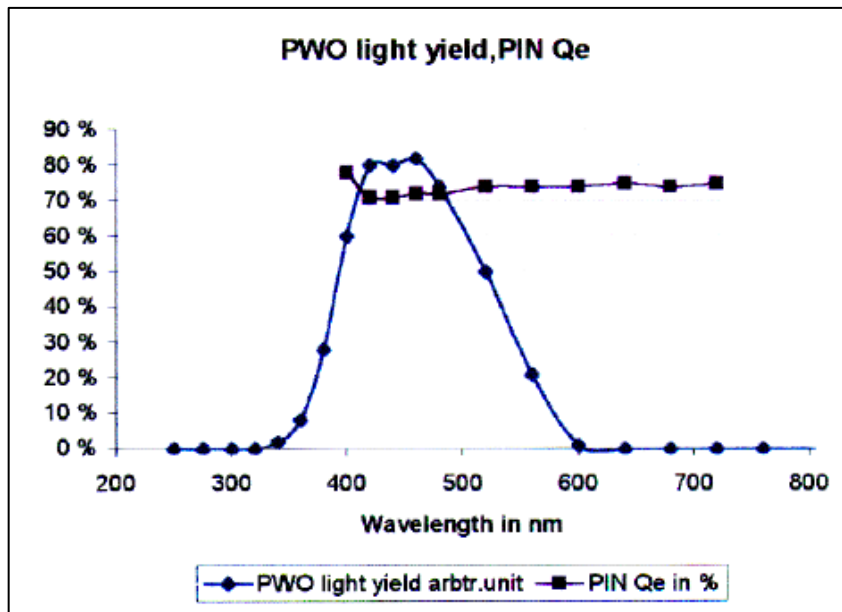


図 2.3 PWO 結晶の発光量の波長分布<sup>5</sup>

図 2.3 が PWO 結晶の発光量の波長分布である。見ると、350nm から 600nm 付近までの波長の蛍光を発し、そのピークは 430nm 付近にあることが分かる。

## 2.4 APD

PWO 結晶が発する微弱な蛍光を正確に読み出すのが APD である。正式名称をアバランシェ (なだれ) 光半導体素子といい、電圧を印加することにより増幅作用を持つフォトダイオードである。 $10^2$  程度の増幅率を持ち、通常フォトダイオードよりも微弱な光の検出に適している。磁場中でも正確な読み出しができ、高い量子効率を持っている。この APD により PHOS 検出器の高エネルギー分解能が実現される。ここで APD の基本構造および動作原理について述べる。まず半導体について説明し、それからフォトダイオード、APD について説明していく。

<sup>4</sup> 参考文献[5]、<sup>5</sup>参考文献[10]

## ●半導体について

ダイオードとは p 型半導体と n 型半導体の接合した半導体デバイスである。

p 型半導体とは価電子帯に電子の不足した所（ホール）が存在し、n 型半導体は伝導体に電子が存在する。pn 接合体の接合部分のエネルギー図を下に示す。

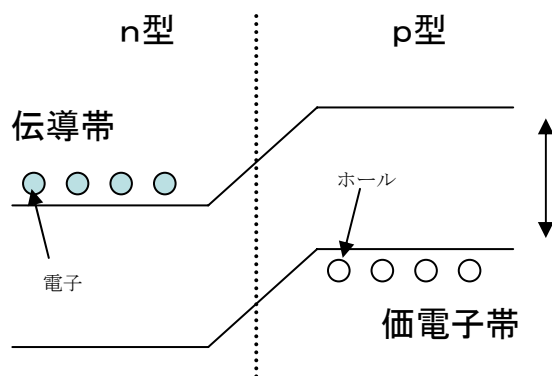


図 2.4.1 pn 接合半導体

p n 接合付近においてはホールも電子も存在しない領域（空乏層領域）が存在する。外部から電圧を印加しない状態だと電流は流れない。

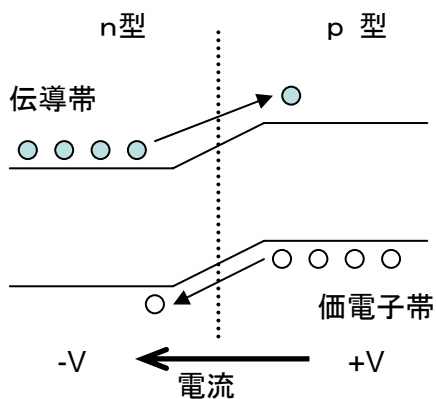


図 2.4.2 順方向バイアス

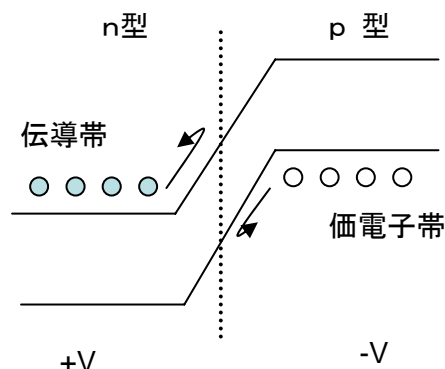


図 2.4.3 逆方向バイアス

ここで p n 接合に順方向に電圧を印加すると、図 2.4.2 のように電子が p 型領域に、ホールが n 型領域に流れ込み、電流が流れる。また p n 接合に逆方向に電圧を印加した場合、図 2.4.3 のように p 型と n 型の壁が高くなり、空乏層領域が増し、電流は流れない。

p 型から n 型へ順方向に電圧を印加することを順方向バイアスといい、逆方向に電圧を印加することを逆方向バイアスという。

## ●APDの原理

フォトダイオードは逆方向バイアスで使用される半導体である。pn 接合部に禁制帯の幅以上のエネルギーの光が当たると、格子にエネルギーを与えられて電子とホールが発生する。今、空乏層には逆方向バイアスがかかっているため、電子が n 型領域に、ホールが p 型領域に流れ込み、電流が流れる。

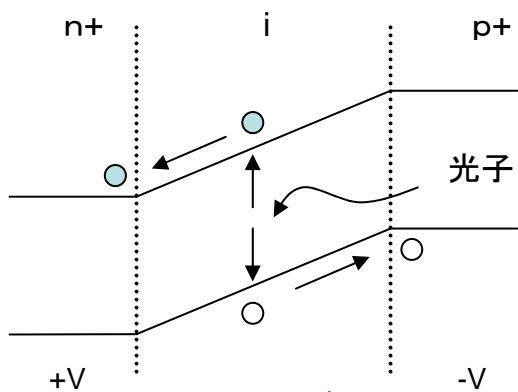


図 2.4.4 フォトダイオード  
エネルギー図

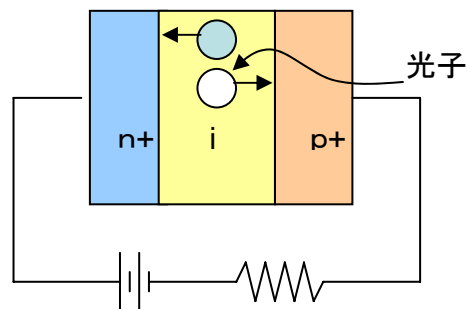


図 2.4.5 フォトダイオードのモデル図

ここで i 領域とは半絶縁体の領域であり、このデバイスが逆方向バイアスされると、印加電圧はほとんど i 領域に加わる。このため電子とホールはそれぞれ n 型領域、p 型領域にドリフトしやすくなる。これがフォトダイオードの光を検出する動作原理である。

APD の原理はフォトダイオードと変わらないのだが、アバランシェ領域が新たに加わっている。光子が入射するとやはり、電子とホールができる。電圧が印加されているので、それぞれは加速され電子は n+p 領域へと入る。この領域に入ると、図 2.4.7 のように加速された電子が格子とイオン化衝突を起こし、電子ホール対を生成する。そして、その生成されたホールがまた格子と衝突し、電子ホール対を生成するというなだれ現象を引き起こす。そしてこの増幅された電子が電気信号として検出される。これが APD の原理である。

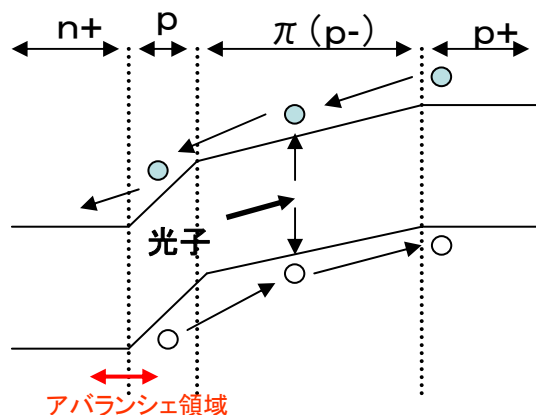


図 2.4.6 アバランシェ・フォトダイオード  
エネルギー図

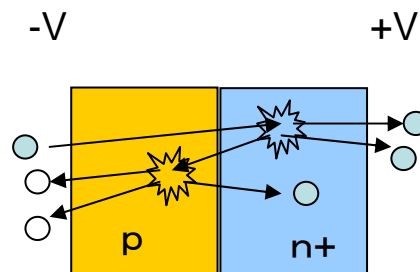


図 2.4.7 アバランシェ領域における  
電子ホール対生成

本実験で使用した APD は浜松ホトニクス社の S8644-55 という型のものである。下にその写真と、基本的な性能を載せた。

図 2.4.8 の APD は前置増幅器（プリアンプ）に取り付けられているが、このプリアンプは APD から信号を読み出すのに用いられている。プリアンプは APD の電荷量を電圧値に変換して出力している。今回、その変換係数はプリアンプのテスト入力にある電圧を加えて、出力信号を測定することで求めた。

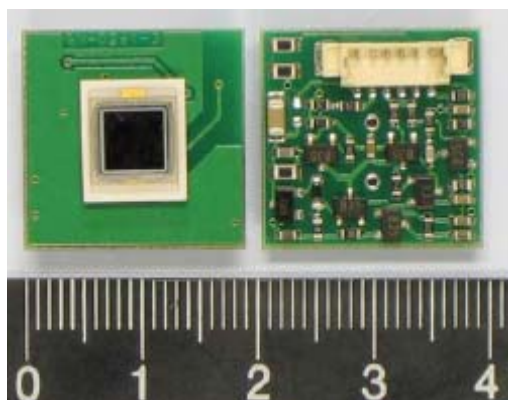


図 2.4.8 APD を載せた前置増幅器<sup>6</sup>

表 2.4 APD 性能表<sup>6</sup>

項目	諸元
パッケージ	セラミック
外形寸法	10.5×9.0 mm
感受寸法	5×5 mm 正方形
最短感応波長	320 nm
最長感応波長	1000nm
最大感応波長	600nm
感応度	0.24 A/W @420nm
量子効率	70 % @420 nm
最大暗電流	50 nA
標準暗電流	5 nA
遮断周波数	40 MHz
端子間容量	80 pF
降伏電圧	400 V
雑音係数	0.2 @420 nm
利得	50 @420 nm

<sup>6</sup> 参考文献[1]

## 3. 実験

本実験は低温領域での APD の増幅率を測定する。まず 3.1 節では実験を行う上での機器についての説明をする。そして、3.2 節では、APD の増幅率を測定するに当たって波長依存性も調べたいので、広い波長域に渡る LED の中から本実験で使用すべき LED の選別を行うことを述べる。続いて、3.3.1 節では APD の増幅率の測定のセットアップを述べる。セットアップでは APD と PMT を同時に配置する。これは APD の増幅率を測定するに当たり、APD に入射する光量が知りたいので PMT で同時に測定することにより APD に入射する光量を規格化することが目的である。続いて、3.3.2 節では低温領域における PMT の増幅率の指標のためシングルフォトエレクトロンを測定することを述べる。3.3.3 節では本実験における回路図を示し、どのような経路でシグナルを測定しているのかを説明する。3.3.4 節では得られたデータを増幅率にする解析方法について述べる。

### 3.1 実験機器

ここでは APD の増幅率を測定するために使用した実験機器を説明する。

#### 3.1.1 LED

LED とは、正式名称は発光ダイオードといい、順方向に電圧を加えた際に発光する半導体素子のことである。アノード（陽極）とカソード（陰極）があり、アノードに正電圧をかけた際に発光する。発光波長は紫外線領域から可視光線領域、赤外線領域にまで及ぶ。本実験では、365nm~940nm までの波長の LED を用意した。

LED の発光原理を簡単に説明する。LED は先の 2.4 節の APD で説明した p 型半導体（荷電子帯にホールが存在する）と n 型半導体（伝導体に電子が存在する）が接合した p n 接合型半導体である。逆バイアスでは電流は流れないが、順バイアスでは電流が流れる。電流が流れると、電子がホールと結合することで光や熱を放出する。放出するエネルギーによって発光波長も異なる。

LED は指向特性があり、図 3.1.1 のように角度によって発光量に違いがある。また、発光量はワット (W) またはカンデラ (cd) で表される。カンデラとは光源の明るさの強さを表す単位であり、1 カンデラはおよそろうそく一本分の輝きである。

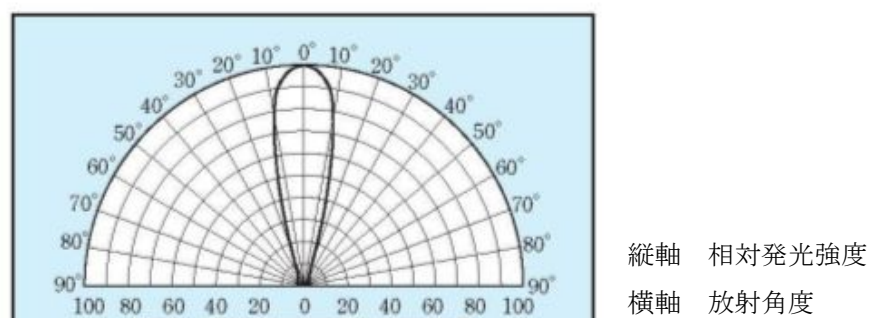


図 3.1.1 LED の指向特性

### 3.1.2 PMT

光電子増倍管とは、光電効果を利用し入射した光子を電子に変え、その電子を増幅する機能を持った高感度光検出器である。本実験では、APD の他に光電子増倍管も検出器として使用したのでここで簡単に説明する。

光電子増倍管の構造を図 3.1.2.1 に示す。

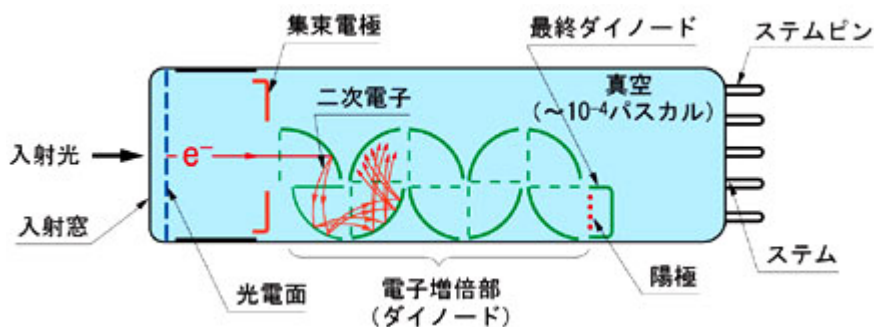


図 3.1.2.1 光電子増倍管の構造図<sup>7</sup>

まず、光子が光電面に入射すると、光電効果によって電子が発生する。光電効果とは、光子が物質に吸収されたとき、物質内の電子が励起され放出される現象のことである。その電子が集束電極によって導かれ、第一ダイノードに当たる。その結果、電極から複数の二次電子が叩き出される。ダイノード間に高電圧が印加されているので二次電子は次のダイノードへ当たり、また複数の電子を叩き出す。この作用によって、入射した電子はおおよそ  $10^5 \sim 10^6$  倍に増幅される。

光子と電子の変換効率は物質によって決まっており、この変換効率を量子効率という。量子効率は入射光子の波長にも依存している。また光電子増倍管は真空管内で増幅するためにノイズが少ないという特徴を持っており、微弱光の測定に適している。

本実験は浜松ホトニクス社の R7056 という高い増倍率の光電子増倍管を用いた。受光面の物質は量子効率の高いバイアルカリを用いている。本実験では PMT に入射した光量の計算のため R7056 の量子効率の波長依存性のデータ (図 3.1.2.2) を参考にした。

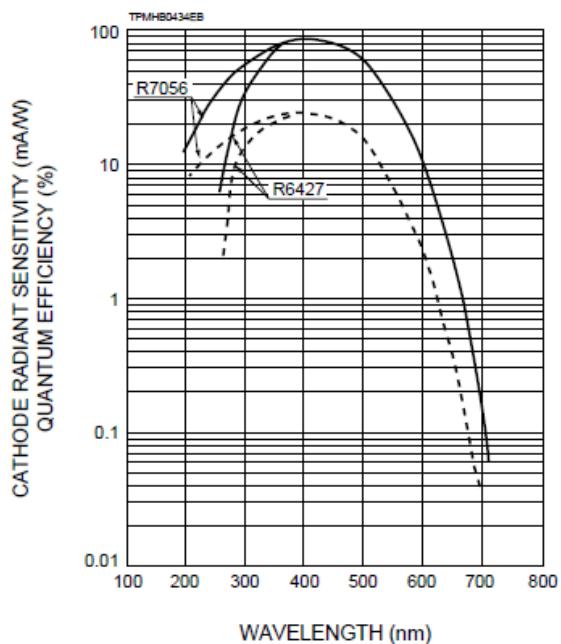


図 3.1.2.2 PMT の量子効率の波長<sup>7</sup>

<sup>7</sup> 参考文献[8]

## 3.2 LED の選別

APD の増幅率を調べるためには、光源が必要である。本実験では、光源に複数の LED を用いることにより、様々な波長の光で測定することを可能にした。今回購入した全ての LED で測定を行うのは時間がかかりすぎるので、必要なものだけを選別した。ここでは LED の選別の条件と方法を挙げ、使用すべき LED を決定するところまで述べる。

### 3.2.1 選別の条件

基本的には全波長の中から広範囲にわたる波長で APD の増幅率を測定できるように選別する。しかし、波長の似通った LED もあるので、それはある条件で選別する必要がある。APD の増幅率を測定する際には、PWO 結晶の発するシンチレーション光を想定した光源を使用したいので、使用すべき LED は 1~100ns 程度の時間の間により多く発光するものが望ましい。

更に本実験では、低温領域での APD の応答性についても測定する。よって、APD の応答性の揺らぎを調べるため、LED の応答性の良いものを選別する必要がある。つまり、LED に電圧をかけてから発光するまでの揺らぎが少ないものを使いたい。よって、以下に使用する LED の条件を二点挙げる。

#### 条件①

PWO の発光時間 (10ns~100ns) より十分に短い時間に、より多く発光するもの

#### 条件②

LED に電圧をかけてから発光するまでの時間の揺らぎの少ないもの。

この条件①、②に当てはまる LED を選別した。

### 3.2.2 LEDの種類

本実験に際し、22本のLEDを購入した。以下にその購入した22本のLEDを示す。表の内のいくつかのLEDの写真を図3.2.2に示す。

表 3.2.2 購入したLED

LED No	波長[nm]	指向角度[°]	LED No	波長[nm]	指向角度[°]
1	365	100	12	565	60
2	380	100	13	591	40
3	400	30	14	592	
4	430	60	15	595	60
5	465		16	611	40
6	468	40	17	620	60
7	470	45	18	630	40
8	470	30	19	641	
9	500	30	20	660	60
10	517		21	850	12
11	525	30	22	940	

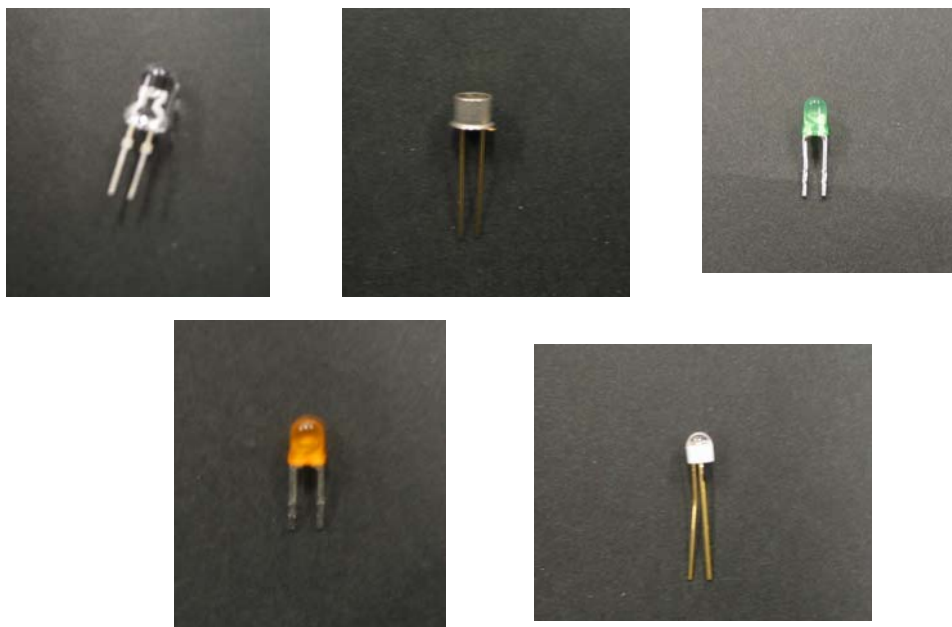


図 3.2.2 様々な波長のLEDの写真

(左上から 500nm、365nm、565nm、620nm、940nm のLED)



### 3.2.3 選別の方法

3.2.1 節の条件を満たす LED を選別する方法として、全種類の LED を一つずつ、パルスジェネレータのパルスを入れて発光させ、その発光量を記録する。更にパルスジェネレータのパルスの幅を広げていき、LED の発光量の変化を記録する。そのデータを基に全ての LED を評価する。LED の発光量は光電子増倍管で測定し、そのデータは CSADC を用いて読み出しをした。

以下にこの測定のセットアップとオシロスコープで確認した PMT のシグナルを示す。

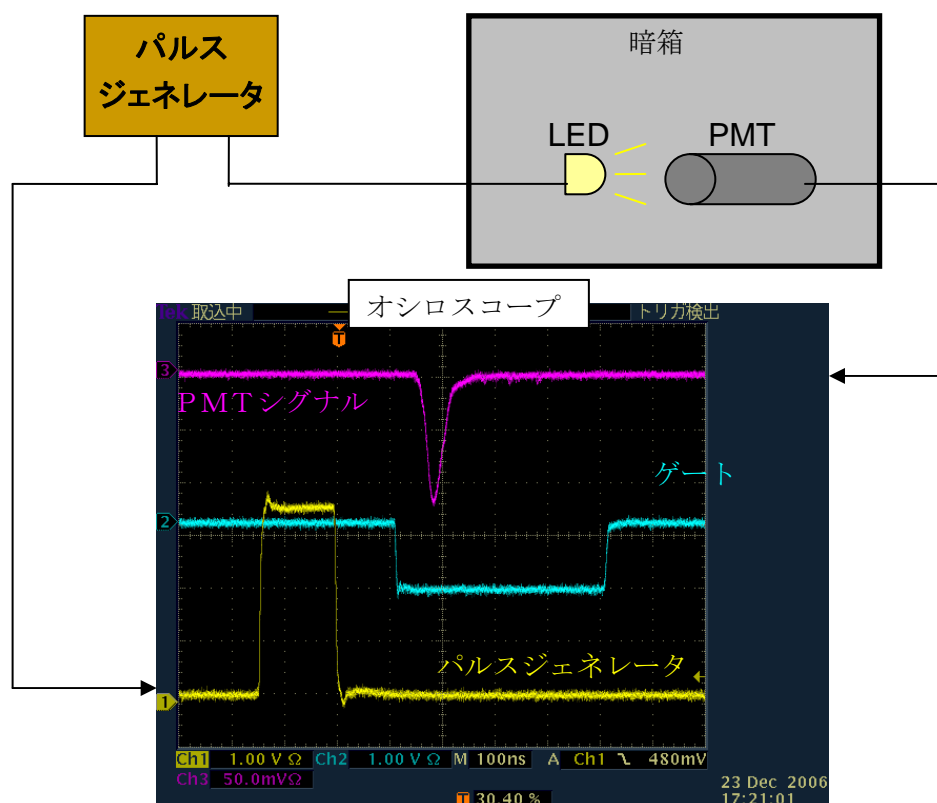


図 3.2.3.1 LEDの選別のセットアップ

ここで APD の応答性の揺らぎについて説明する。APD の応答性の揺らぎは、図 3.2.3.2 のようにパルスジェネレータの出力と APD の出力の時間間隔の揺らぎを測定することで求める。求めたい時間揺らぎは APD シグナルの揺らぎである。しかし、実際に測定できるのはパルスジェネレータの出力と APD シグナルの時間揺らぎである。つまり、LED の応答時間揺らぎも含んでいる。よって、ここで LED の応答時間揺らぎが少ないものを使うことで、APD の応答時間揺らぎを正確に評価できる。

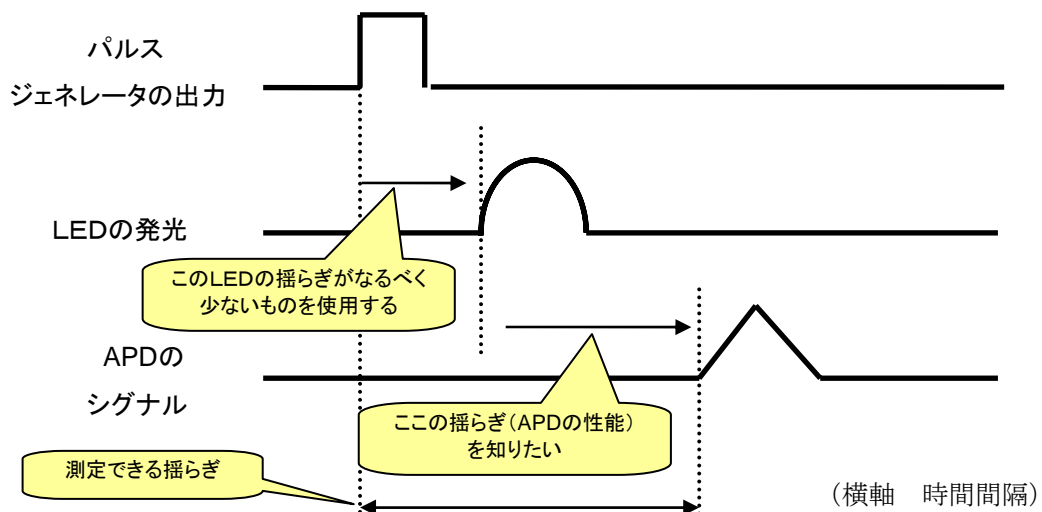


図 3.2.3.2 APD 測定時のシグナルの時間関係

図 3.2.3.2 と対応させたパルスジェネレータ、LED、PMT のシグナルの時間関係について図 3.2.3.3 に示す。LED の揺らぎはパルスジェネレータの出力から LED の発光までの応答時間揺らぎだが、実際に測定できるのはパルスジェネレータの出力から PMT のシグナルまでの時間間隔の揺らぎである。PMT の応答時間の揺らぎは  $0.5\text{ns}$  程度なので、パルスジェネレータの出力から PMT のシグナルまでの時間間隔の揺らぎを測定すれば、LED の発光までの応答時間の揺らぎを評価することが出来る。時間間隔の揺らぎは TDC を用いて読み出した。

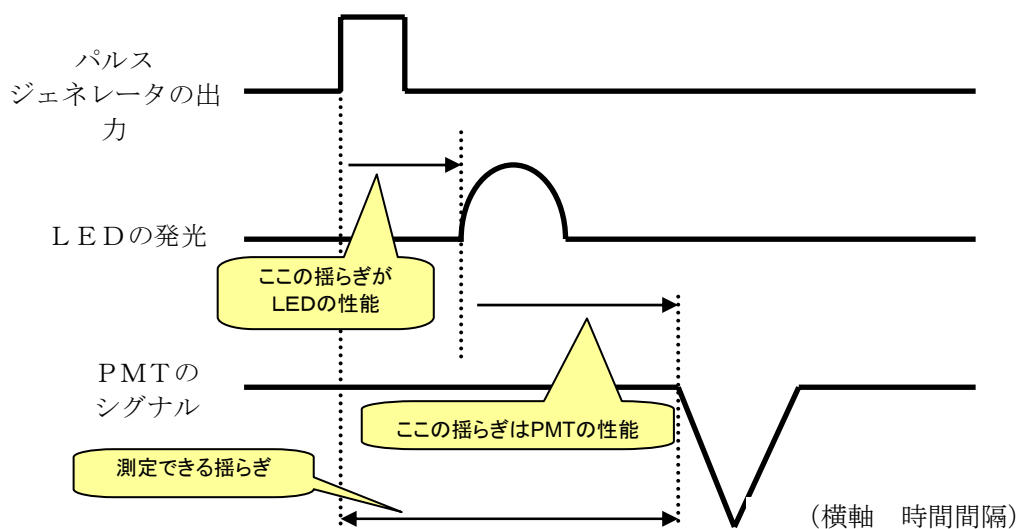


図 3.2.3.3 LED の選別でのシグナルの時間関係

### 3.2.4 結果

図 3.2.4.1 の上のグラフが各 LED の光量と下のグラフが各 LED の時間揺らぎの測定の結果を示す。グラフの横軸は LED に入力するパルスの幅であり、縦軸は CSADC のチャンネル数である。それぞれ、LED の発光時間と光量に対応している。横軸のエラーバーはパルスジェネレータの目盛り幅を目で見たときの誤差、縦軸のエラーバーは光量のヒストグラムの RMS 値である。

LED No 1 ~ 4 までのデータ。

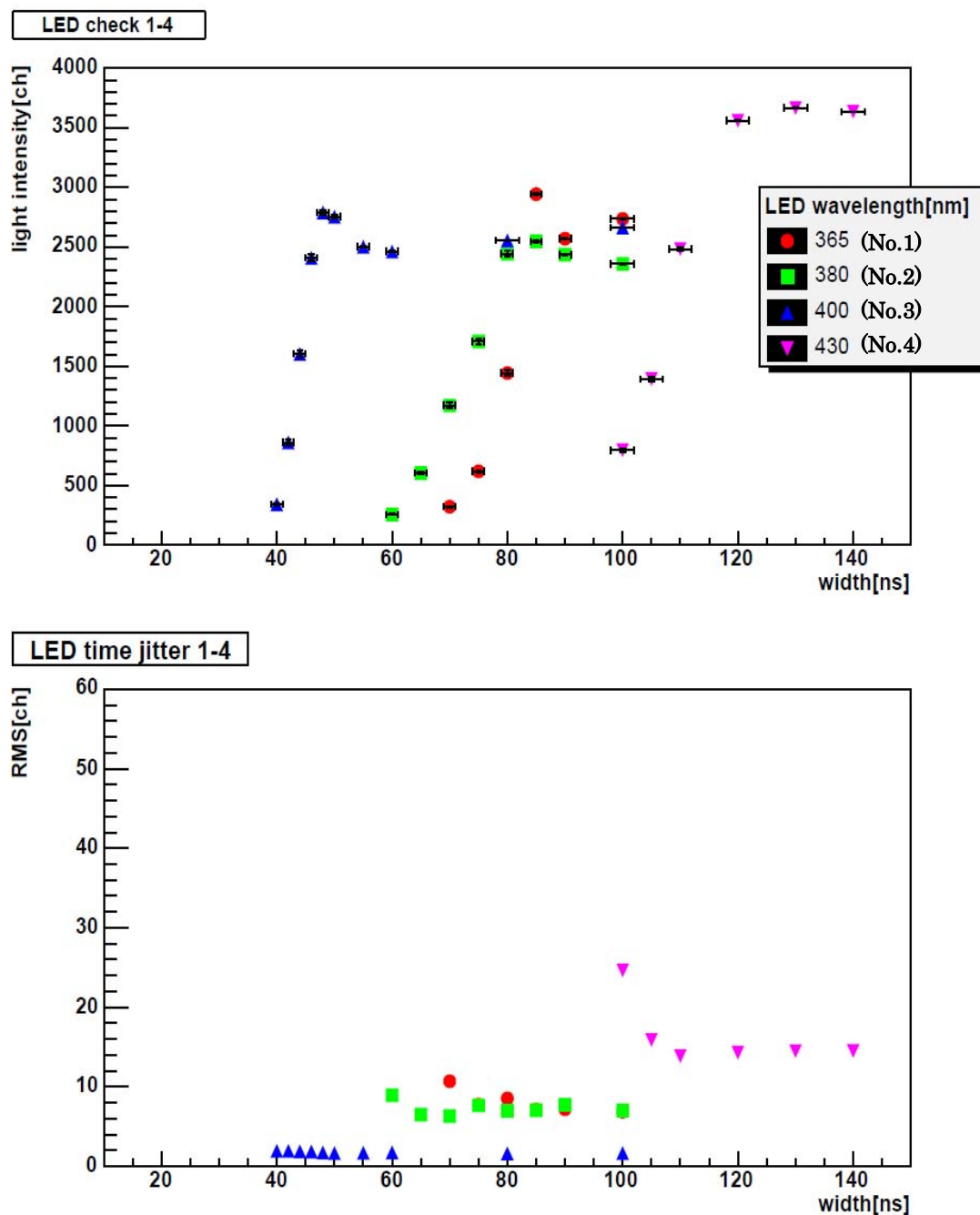


図 3.2.4.1 LED の発光量と時間揺らぎ (1-4)

LED No5~8 までのデータ。

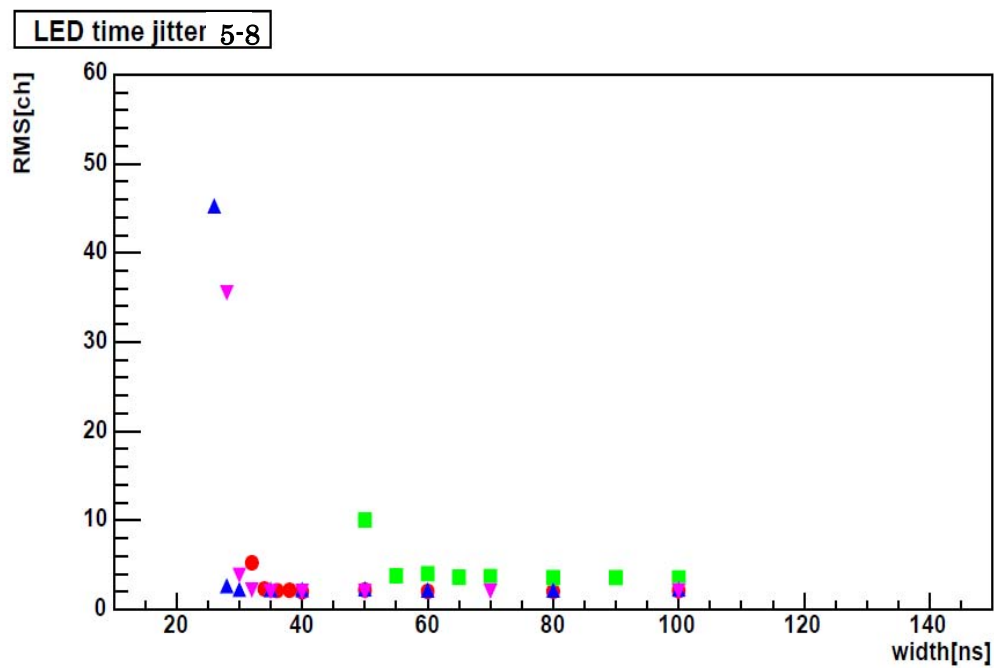
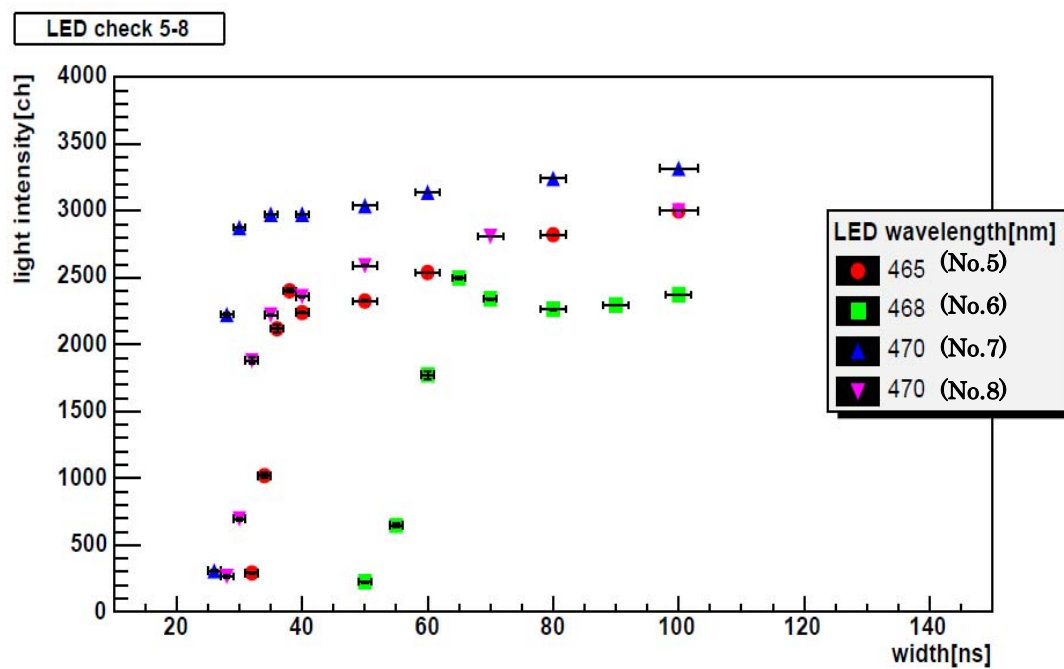


図 3.2.4.2 LEDの発光量と時間揺らぎ (5~8)

LED No9~12 までのデータ。

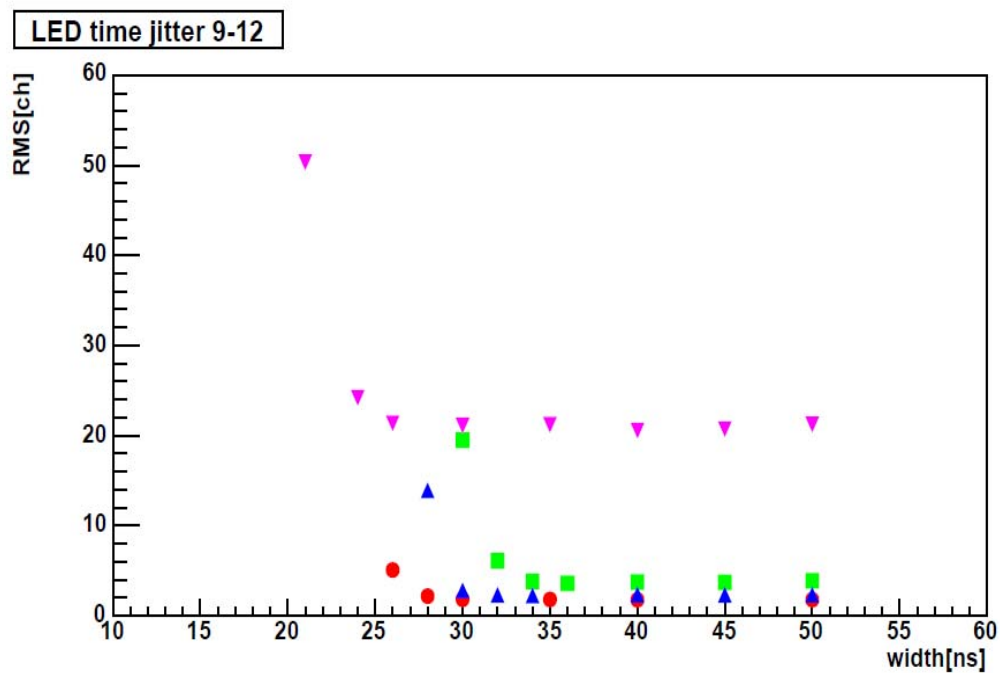
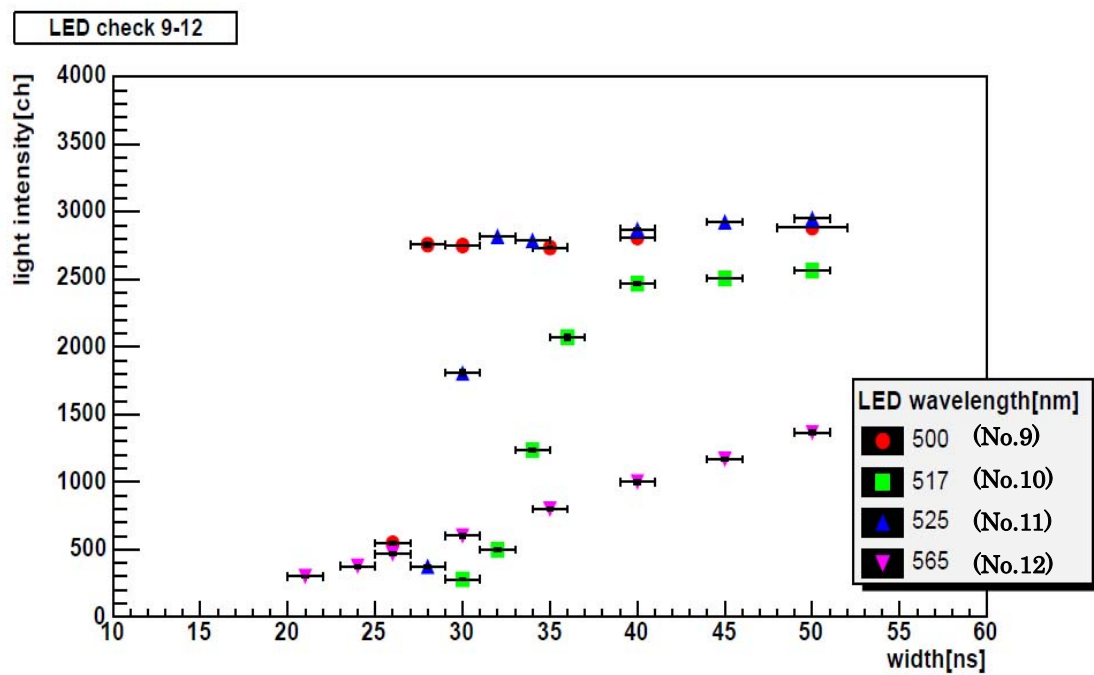


図 3.2.4.3 LEDの発光量と時間揺らぎ (9~12)

LED No13~16 までのデータ。

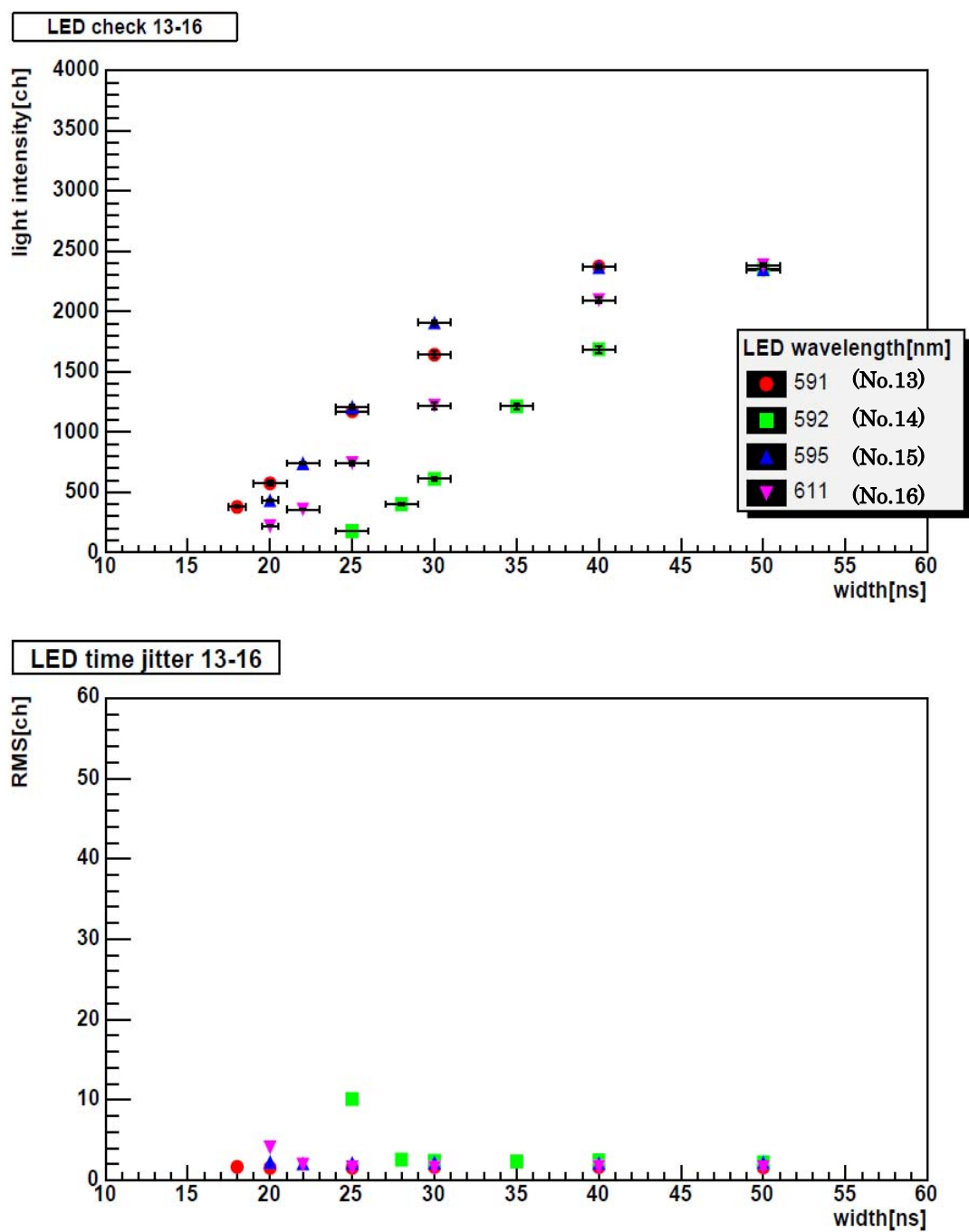


図 3.2.4.4 LEDの発光量と時間揺らぎ(13~16)

LED No17~21 までのデータ。

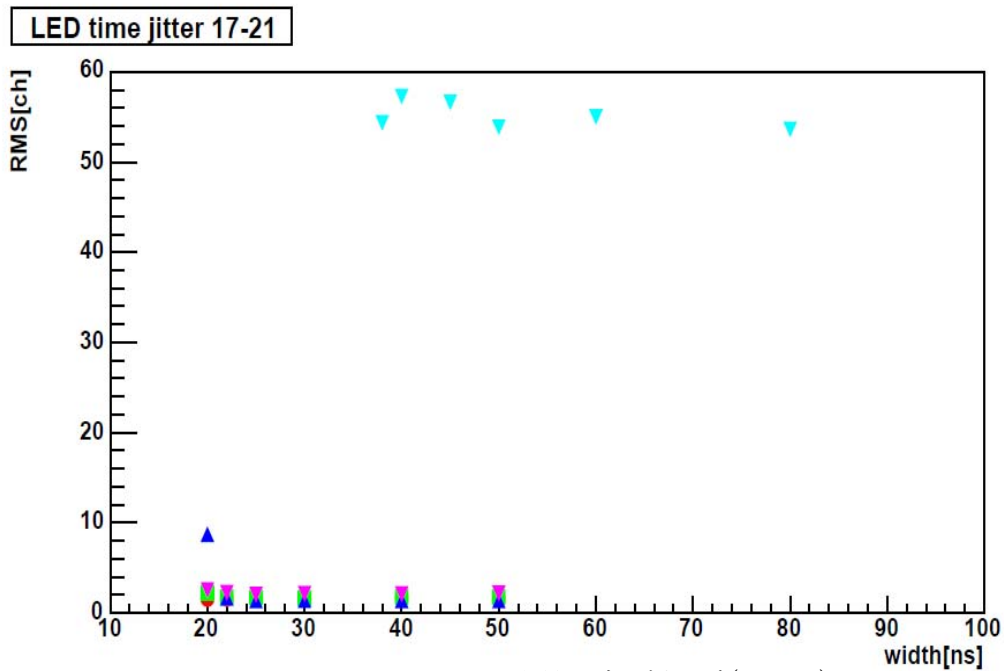
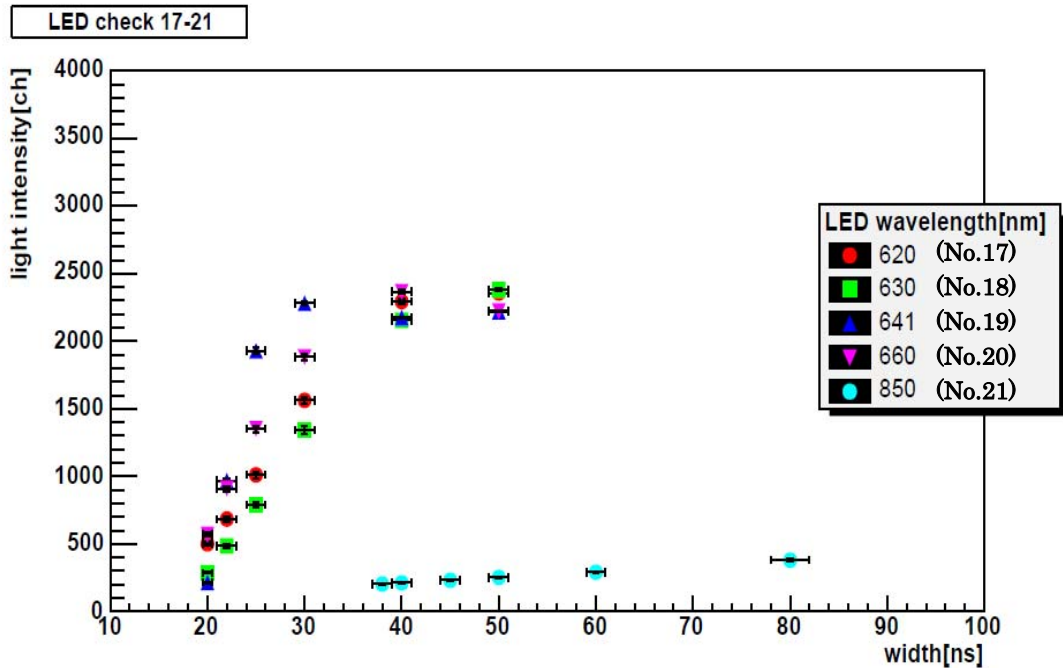


図 3.2.4.5 LED の発光量と時間揺らぎ (17~21)

図 3.2.4.1~5 のグラフはいずれもパルス幅が広がるにつれ、光量も増加していることが分かる。また、中にはあるパルス幅を超えると光量がほぼ一定値となるものがある。これは PMT の測定できる電荷量を超えたからだとと思われる。TDC の RMS 値の方はパルス幅が広くなるにつれて小さくなっていることが分かる。以上の結果より LED の選別を行う。

### 3.2.5 LED の決定

3.2.4 の結果から LED を選別し、APD の増幅率を求める実験において使用する LED を決定した。3.2.1 節の選別条件をもう一度示す。

- ・ PWO の発光減衰時間（10ns～100ns）より十分に短い時間に、より多く発光するもの
- ・ LED に電圧をかけてから発光するまでの時間の揺らぎの少ないもの。

全波長にわたって APD の増幅率の測定をしたいので、波長がなるべく偏らないように選別を行った。同程度の波長の中では上の条件を満たす LED を選別した。以上の方法で LED を 12 本選別した。表 3.2.5 に選別した LED を載せる。この 12 本の LED を用いて、APD の増幅率の波長依存性及び、温度依存性を求めた。

表 3.2.5 LED の決定

LED No	波長[nm]	指向角度[°]
1	365	100
2	380	100
3	400	30
4	430	60
7	470	45
9	500	30
10	517	
11	525	30
15	595	60
17	620	60
20	660	60
21	850	12



### 3.3 APD の増幅率の測定

この 3.3 節では、まず実験のセットアップを説明し、そのセットアップの中で APD と PMT の位置に入る光量を補正するための測定を述べる。そして低温領域での PMT の増幅率をシングルフォトエレクトロンで確認することを述べる。そして本実験の回路図の説明をする。最後に得られたデータから APD の増幅率を計算する手順を述べる。

#### 3.3.1 セットアップ

本実験のセットアップを示す。

恒温槽内に実験のセットアップを写真に撮ったものを図 3.3.1.1 に、外から全体の外観を撮ったものを図 3.3.1.2 に載せた。

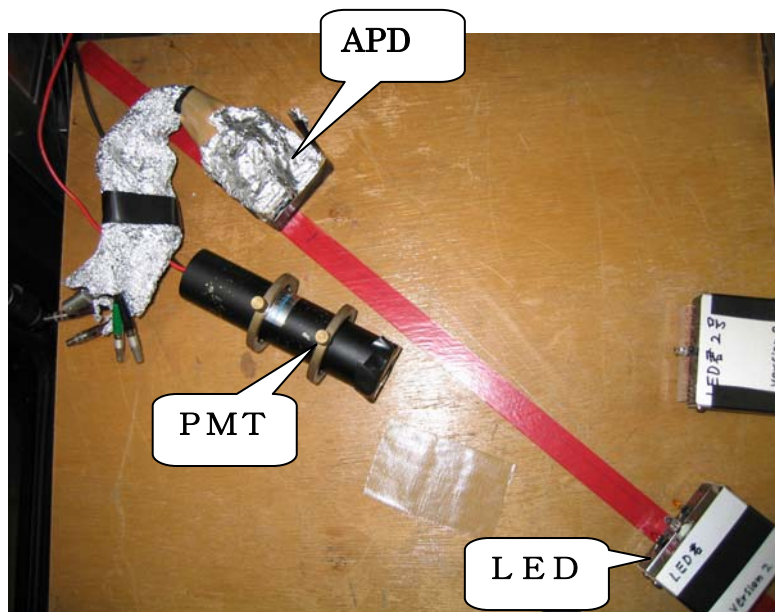


図 3.3.1.1 恒温槽内のセットアップの写真



図 3.3.1.2 恒温槽の写真

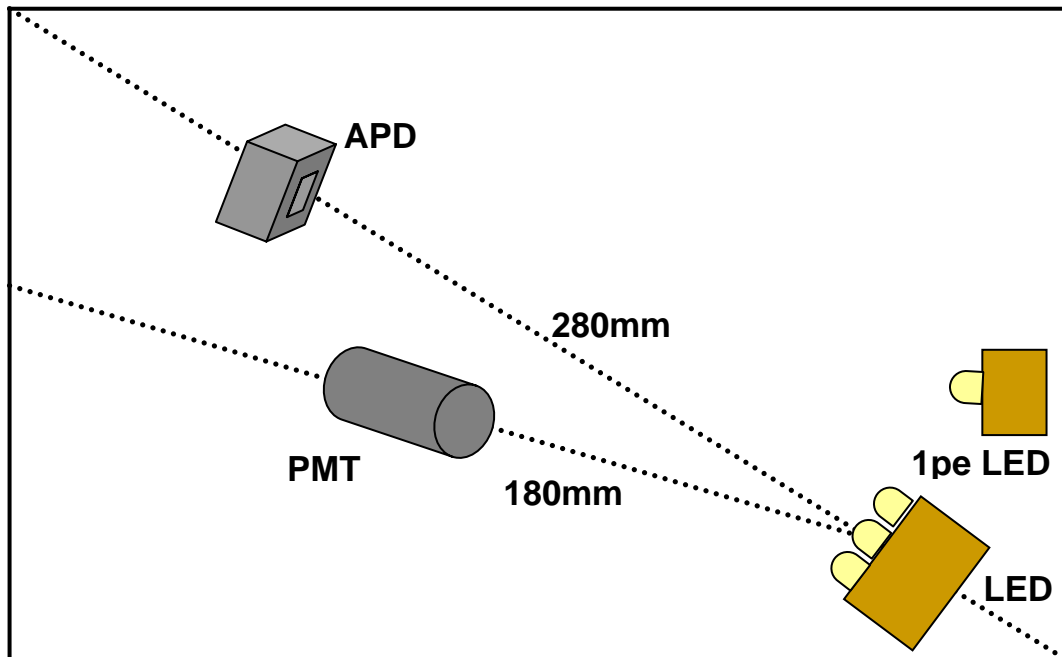


図 3.3.1.3 恒温槽内のセットアップ図

この装置をそのまま恒温槽の中に入れて温度を下げて測定する。LED は一度に3つ付けて、測定できるようにした。シングルフォトエレクトロンで PMT の増幅率を確認するため、それ専用の LED (1peLED) を装置内に取り付けた。

APD の増幅率を決定するために APD に入る光量を測定する必要がある。今回の実験では、LED の光を APD で検出すると同時に PMT でもその光を検出することで APD に入る光量の基準とした。PMT で APD に入る光量を規格化するためには、APD と PMT に同光量入射するか、もしくは入射する光量がどれだけ違うか知る必要がある。前者については LED の指向性より恒温槽内の距離では同光量入射させることが出来ない。よって、APD と PMT に入射する光量の違いを知っておかなければならない。

図 3.3.1.3 のセットアップとは別に APD と PMT の位置に入射する光量を求めるため次のようなセットアップで測定する。

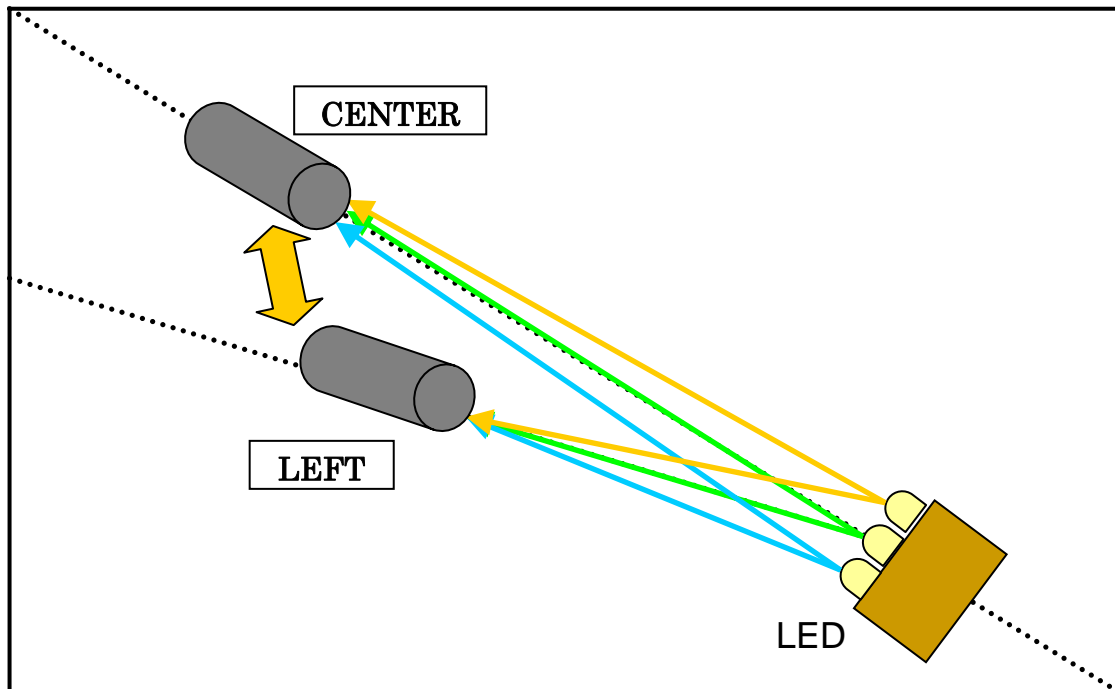


図 3.3.1.4 恒温槽内のセットアップ図Ⅱ

このセットアップでは CENTER の位置が図 3.3.1.3 での APD の位置に当たり、LEFT の位置が図 3.3.1.3 での PMT の位置に当たる。PMT を CENTER と LEFT の二つの位置に置いた状態を各 LED で測定することにより、図 3.3.1.3 での APD と PMT に入射する光量の違いを求める。各 LED は指向性の違いがあるので全ての LED でこの測定を行う必要がある。

APD と PMT に LED の光を入射させ、同時に測定するわけだが、PMT の増幅率に比べ、APD の増幅率は $10^{-3}$ 程度に小さいので、同じ光を測定することが出来ない。よって、図 3.3.1.5 のように受光面を小さな穴が開いた黒紙で覆うことにより、PMT に入射する光量を減らすことにした。この減光率を測定すると、およそ $5 \times 10^{-4}$ 程度であった。

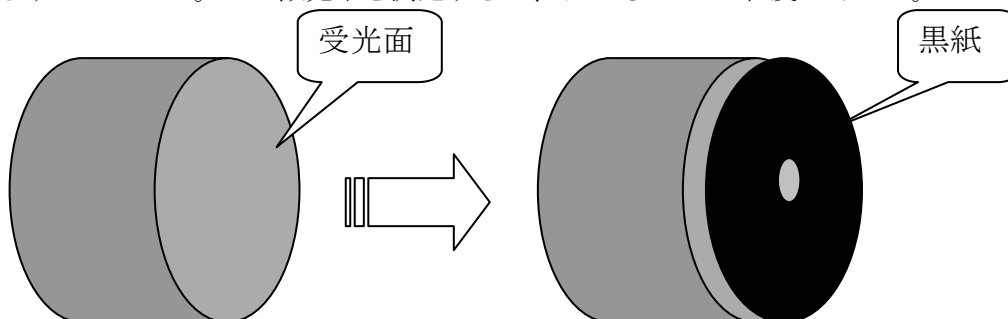


図 3.3.1.5 PMT の受光面

ここで温度を下げたときに関する疑問が出てくる。温度を下げたときに PMT の増幅率は変化しないのかということである。よって、PMT の増幅率の変化も同時に測定を行う。ここではシングルフォトエレクトロンを PMT で測定することによってこの問題を解決する。

### 3.3.2 シングルフォトエレクトロンについて

シングルフォトエレクトロンとは光子が PMT の光電面に入射した際に、光電効果によって発生する 1 光電子のことである。それが増倍されることによって信号を捉えることが出来る。つまり、低温領域においてもシングルフォトエレクトロンを PMT で確認することが出来れば、PMT の増幅率を知ることができる。

シングルフォトエレクトロンは二つの理由により特定できる。まず、一つ目は PMT の HV を上げると、PMT の増幅率が増加することにより、シングルフォトエレクトロンの ADC スペクトルのピークチャンネルが増加することである。もう一つはシングルフォトエレクトロンと思われるピークが確認できた後、LED の光量を減少させる。すると、シングルフォトエレクトロンの場合にはピークの位置は変わらずに、ピークのカウンタ数が減少する。

ここで、本実験で使用した PMT (R7056) でシングルフォトエレクトロンが確認できるかテストを行った。まず、微小光量を入れたときの PMT のシグナルをオシロスコープで確認する。

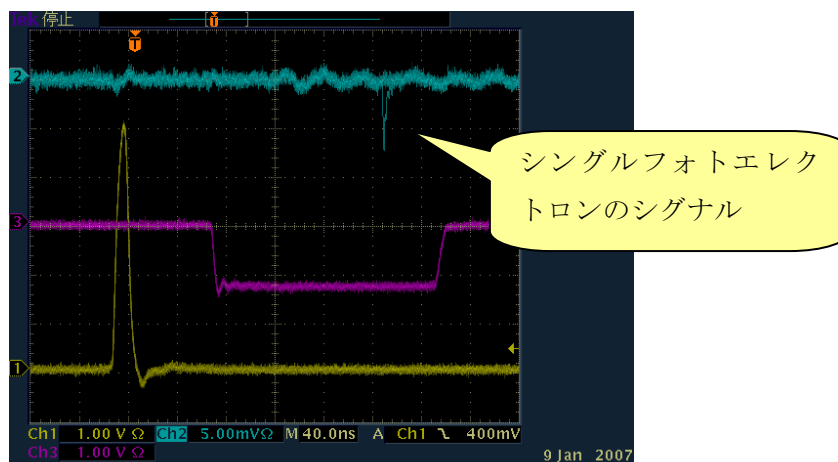


図 3.3.2.1 シングルフォトエレクトロンの確認

続いて HV を変えて ADC スペクトルを測定する。

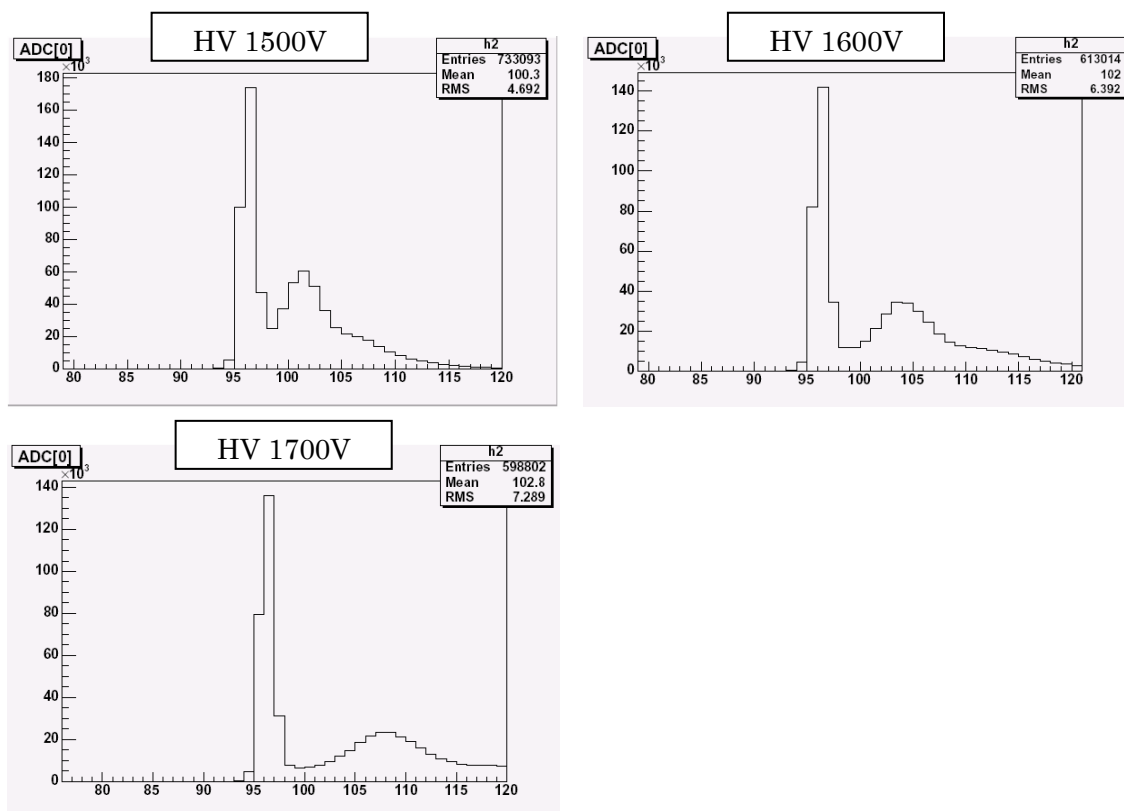


図 3.3.2.2 HV を変えてシングルフォトエレクトロンを確認

以上の3つのヒストグラムが PMT の HV を 1500V、1600V、1700V に変えたものである。ヒストグラム 96ch にあるピークはペDESTAL である。シングルフォトエレクトロンらしきピークは 1500V では 101ch、1600V では 103ch、1700V では 107ch に確認できる。このヒストグラムより、HV を上げるとシングルフォトエレクトロンのらしきピークチャンネルが増加していることがわかる。

続いて、光量を増減させた。

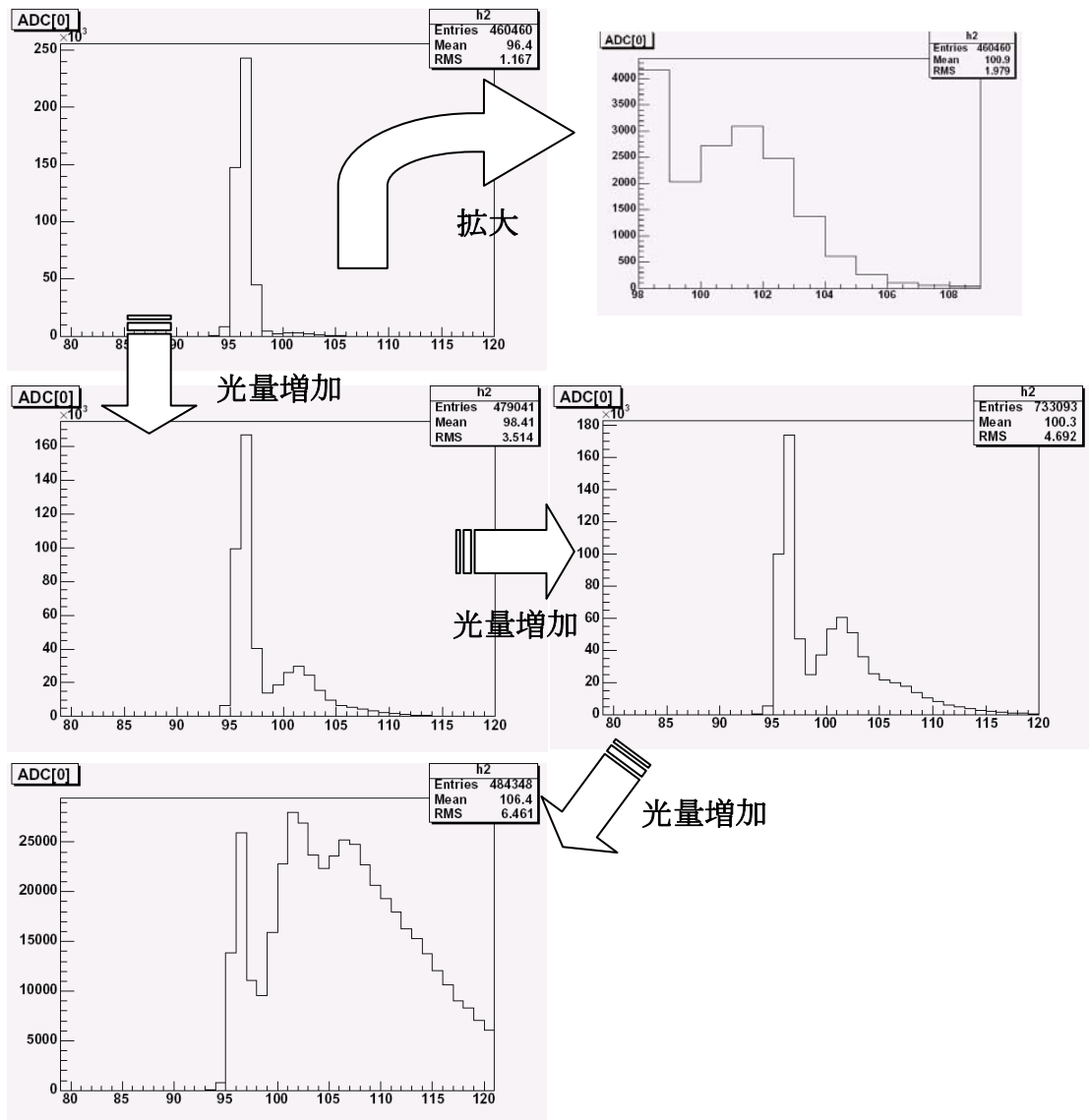


図 3.3.2.3 光量を変えてシングルフォトエレクトロンを確認

図 3.3.2.3 の各ヒストグラムは光量を変化させたときのものである。四回、光量を変化させたが、どのヒストグラムでもシングルフォトエレクトロンらしきピークは 101ch にあることが見て取れる。最も光量を増加させたときに関しては、シングルフォトエレクトロンのピークの横に二つの光電子のピークを確認できる。

HV を変えるとピークチャンネルが増加し、光量を変化させてもピークの位置が変わらないことによりシングルフォトエレクトロンを観測することが出来たと言える。

温度を変えて APD の増幅率を測定する際に常にこのシングルフォトエレクトロンのピーク的位置を確認することで PMT の増幅率を確認している。

### 3.3.3 回路

本実験の回路図を示す。

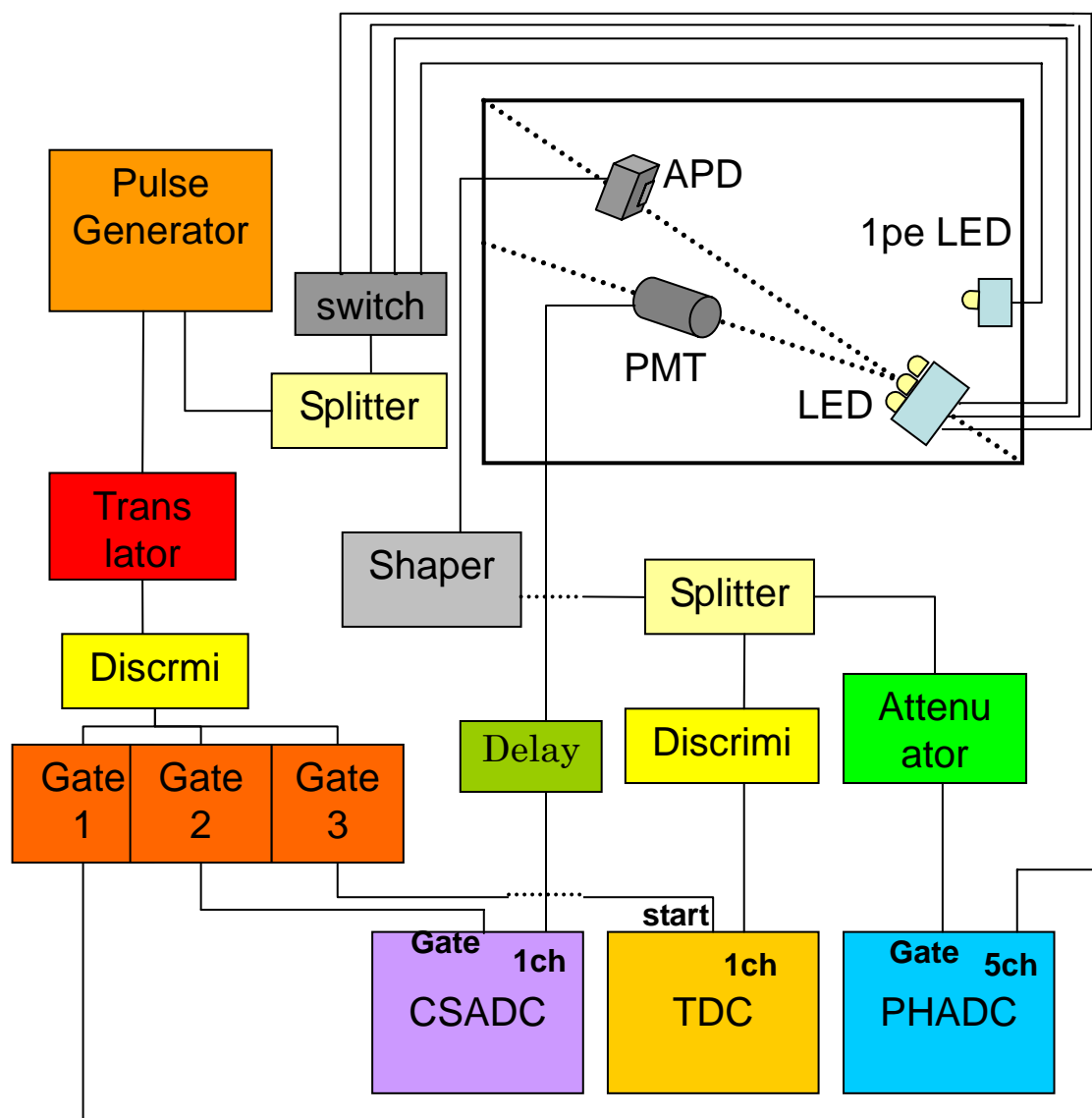


図 3.3.3.1 回路図

ここで **Discrimi** は **Discriminator**、**Gate** は **GateGenerator**、**Shaper** は **ShaperAmplifier** の略である。各モジュールに関する簡単な説明は付録に載せた。

図 3.3.3.1 の回路図の説明をする。まず、パルスジェネレータで LED を光らせるのだが、4つの LED からケーブルを恒温槽外に取り出すことにより、外から4つの LED のどれを光らせるか選べるようにした。また、パルスジェネレータの AUX.OUT (LED への出力パルスと同期した出力) を反転させた信号を3つのゲートジェネレータに入力する。3つのゲートジェネレータからはそれぞれ CSADC と PHADC のゲート入力、TDC のスタート入力へ信号を伝える。CSADC のゲート入力信号の幅は LED によって発光時間に差があるためにその都度変える。PHADC のゲート入力信号の幅はおよそ  $10\mu\text{s}$  である。TDC のスタート入力は APD の信号から作られるストップ信号が入ると時間間隔を測定できるようにタイミングを合わせている。

LED が発光した後の各検出器の信号を説明する。まず、PMT からの出力信号は CSADC に入力するのだが、LED によっては応答時間に差があるために、LED ごとに異なる Delay をかけている。ここで CSADC に入力される PMT シグナルをオシロスコープで確認すると、図 3.3.3.2 のようになった。続いて、APD からの出力信号はまずシェイパーアンプに入力することで信号を整形する。ここで信号を整形させると PHADC で信号を読み込むことが出来るようになる。シェイパーアンプ入力前の波形は図 3.3.3.3 で、入力後の波形は図 3.3.3.4 である。この信号をスプリッターで二つに分け、片方は NIM 信号に変え TDC のストップ信号として入力し、もう片方は PHADC に入力する。この時、このまま信号を PHADC に入力すると信号が大きすぎて読み取れないので、アテニューエータを間に入れて信号を二分の一に減衰させた。

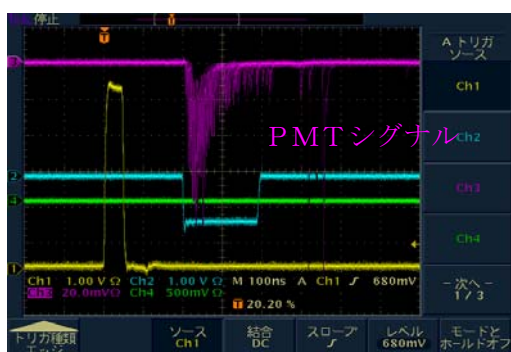


図 3.3.3.2 PMT シグナル

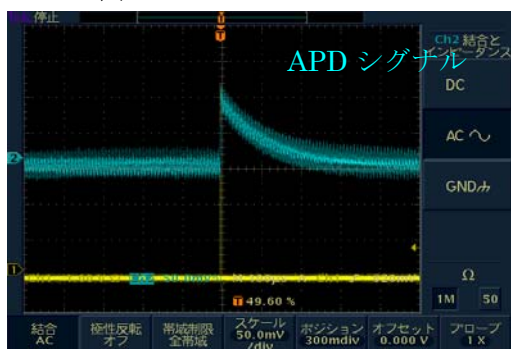


図 3.3.3.3 APD シグナル  
(プリアンプ出力)

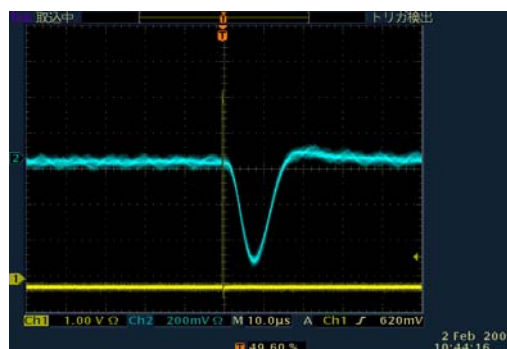


図 3.3.3.4 APD シグナル  
(シェイパーアンプ出力)



### 3.3.4 増幅率の求め方

本実験では、図 3.3.3.1 に示した通り電荷量の測定に ADC を用いている。その電荷量は ADC ではチャンネル数で記録される。ここでは PHADC のチャンネル数を電荷量の単位 pC に変換する係数を求める。CSADC に関してはシングルフォトエレクトロンを測定して、そのチャンネル数から直接電子数を求めているので、ADC の変換係数を求める必要は無い。

変換係数の求め方とは、予め電荷量の方かった信号を PHADC に入れチャンネル数を求める。予め電荷量の方かるとはその信号をオシロスコープで確認するということである。

PHADC の場合、チャンネル数を変換すると電圧値になる。電荷量に変換するには PHADC 入力前のシェイパーアンプの増幅率、またプリアンプの増幅率を求める必要がある。このプリアンプで APD の電荷量を電圧値に変換しているのである。

APD の信号から PHADC のチャンネル数になるまでを図にしてみる。

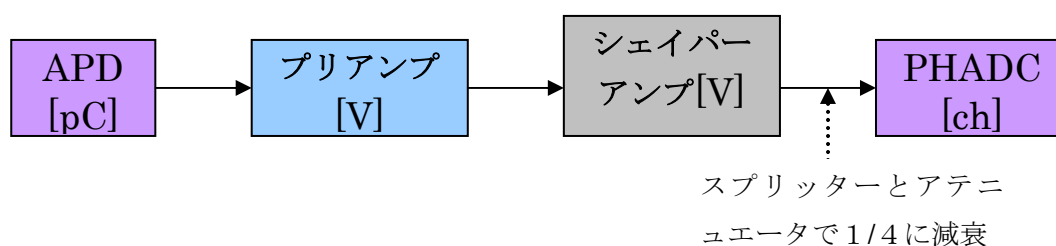


図 3.3.4.1 APD から PHADC までのシグナル伝達

どうやって APD から PHADC までの変換係数を求めるかというと、プリアンプのテスト入力端子より電圧を入力することでプリアンプに電荷を蓄えることが出来る。電荷量の方かったものを入力できるので、プリアンプの増幅率、そしてシェイパーアンプの増幅率を決定できて、PHADC のチャンネル数との対応をつけることが出来る。プリアンプのテスト入力端子に入力する電圧はパルスジェネレータを用いた。

そして、実際にテスト入力の電圧を 60mV から 1300mV まで変化させ、それぞれのモジュールの増幅率がどうなるか調べた。

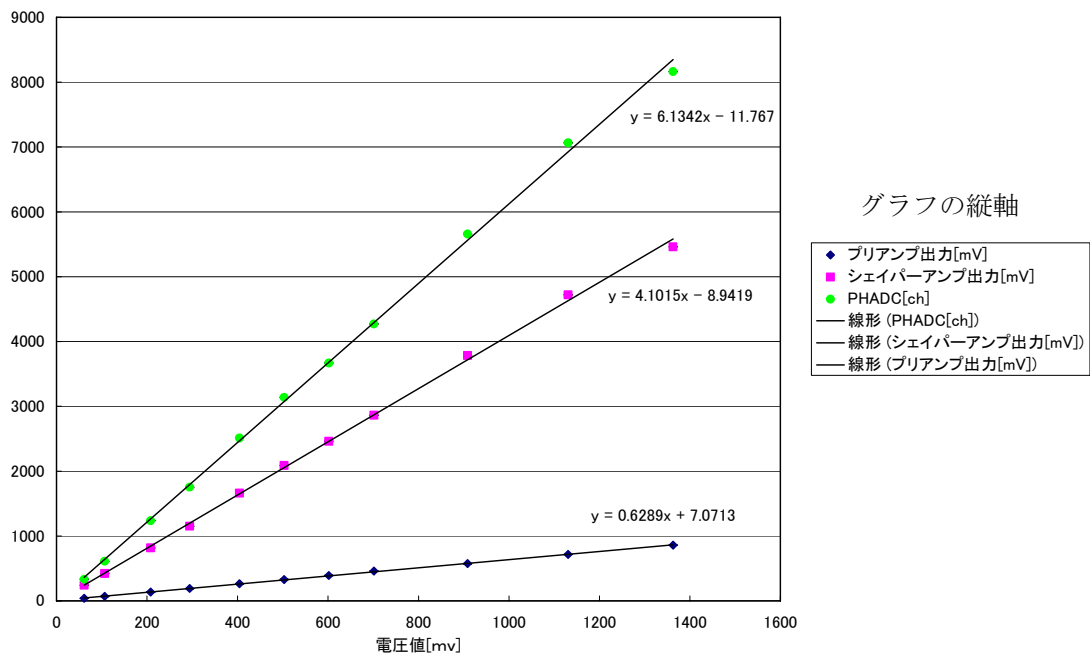


図 3.3.4.2 テスト入力後の各モジュールの出力量

このグラフはテスト入力の電圧値に対する各モジュールの出力電圧量、またはチャンネル数である。これを見ると、どのモジュールもテスト入力の電圧量に対して出力量に線形性があることがわかる。つまり、入力電圧が変わっても変換係数はどのモジュールもほぼ一定である。続いて、テスト入力信号がプリアンプに入力されたときに蓄えられる電荷量と PHADC のチャンネル数の比をテスト入力の電圧量ごとにプロットしてみる。この比が本実験で用いたい変換係数となる。

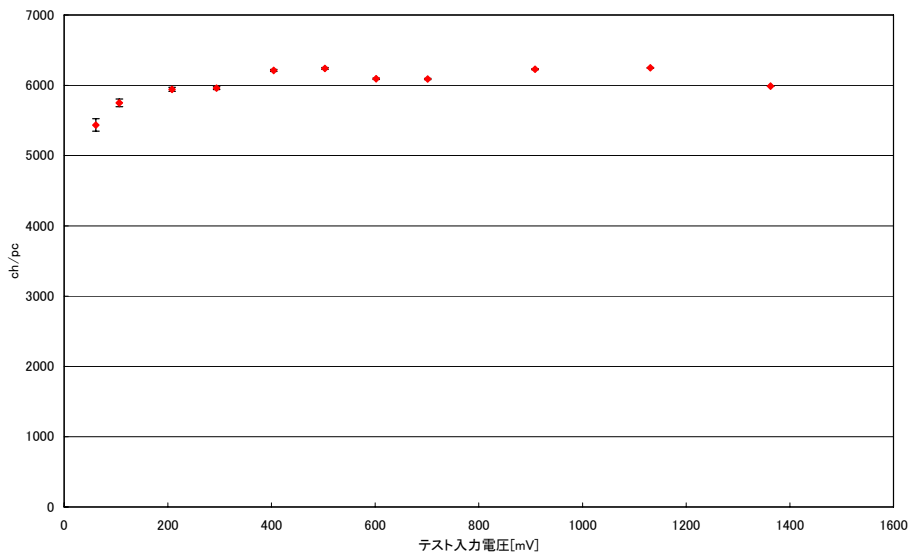


図 3.3.4.3 PHADC の ch 数 / プリアンプの電荷量 [pC]

図 3.3.4.3 のグラフにおける ch/pC 比の平均値は図 3.3.3.2 における PHADC のデータの近似線の傾きと一致する。この変換係数は各点の平均値をとる。

よって APD の出力電荷量から PHADC のチャンネル数への変換係数[ch/pC]は、 $6017 \pm 236$  となる。今回、実際に使いたいのは、チャンネル数から電荷量への変換なのでこれの逆数、 $(1.665 \pm 0.069) \times 10^{-4}$  [pC/ch]となる。またアテニューエータとスプリッタで減衰させている分を計算に入れると、 $(6.659 \pm 0.277) \times 10^{-4}$  [pC/ch]となる。これを  $C_F$  とする。

### ●増幅率の計算

以上で APD の増幅率を計算する準備が整った。まず、求めたい APD の増幅率は APD の増幅前の電子数を  $A_{electron}$ 、増幅後の電子数を  $A_{Gain}$  とおくと以下の式のようになる。

$$Gain = \frac{A_{Gain}}{A_{electron}}$$

ここで、測定から得られるデータは PHADC と CSADC のチャンネル数であるが、これをそれぞれ  $A_P$  と  $A_C$  とおく。これは ADC のペDESTALを引いた値とする。 $A_P$  と  $A_C$  はそれぞれ APD、PMT の電荷量に対応する。これから  $A_P$  が  $A_{Gain}$  となり、 $A_C$  が  $A_{electron}$  となるように変換する。

まず、 $A_P$  の方は先ほど求めた [pC/ch] の変換係数を使うと、APD の出力電荷量に変換できる。そして、電子数に変換するには素電荷量で割ってやればよい。式で表すと、

$$A_{Gain} = \frac{A_P \times C_F}{e}$$

となる。素電荷量  $e = 1.602 \times 10^{-19}$  [C] である。

続いて、 $A_C$  の方を変換していく。この PMT で確認したシングルフォトエレクトロンのチャンネル数を  $A_1$  とおくと、PMT に入った電子数 ( $P_{electron}$ ) は、

$$P_{electron} = \frac{A_C}{A_1}$$

となる。これを量子効率 ( $QE_P$ ) で割ると、PMT に入った光子数 ( $P_{photon}$ ) が求まる。

$$P_{photon} = \frac{P_{electron}}{QE_P}$$

ここで、APD に入る光子数 ( $A_{photon}$ ) に変換するために、PMT と APD の位置による補正 ( $C_{Position}$ ) と受光面積による補正 ( $C_{area}$ ) を入れると、

$$A_{photon} = P_{photon} \times C_{Position} \times C_{area}$$

となる。 $C_{area}$  は PMT の黒紙による減光も含んでいる。これに APD の量子効率 ( $QE_a$ ) をかけると、APD が増幅する前の電子数  $A_{electron}$  が求まる。

$$A_{electron} = A_{photon} \times QE_a$$

これで APD の増幅率 *Gain* までを導き出すことが出来た。実際に値を入れて計算すると以下の式のようにになった。

$$Gain \sim 39.26 \times \frac{A_1 \times QE_p}{C_{Position} \times QE_a}$$

$C_{Position}$ 、 $QE_p$ 、 $QE_a$  は LED によって変わり、 $A_1$  は温度によって変わる。

## 4. 結果

### 4.1 増幅率の温度依存性

代表例として、波長 430nm の LED を用いて、APD の増幅率の温度変化を調べたものを載せる。他の波長の LED のデータは付録に載せる。

まずは、各温度で LED の光を PMT と APD で検出したとき、それぞれの ADC と、APD の TDC のヒストグラムを下に示す。

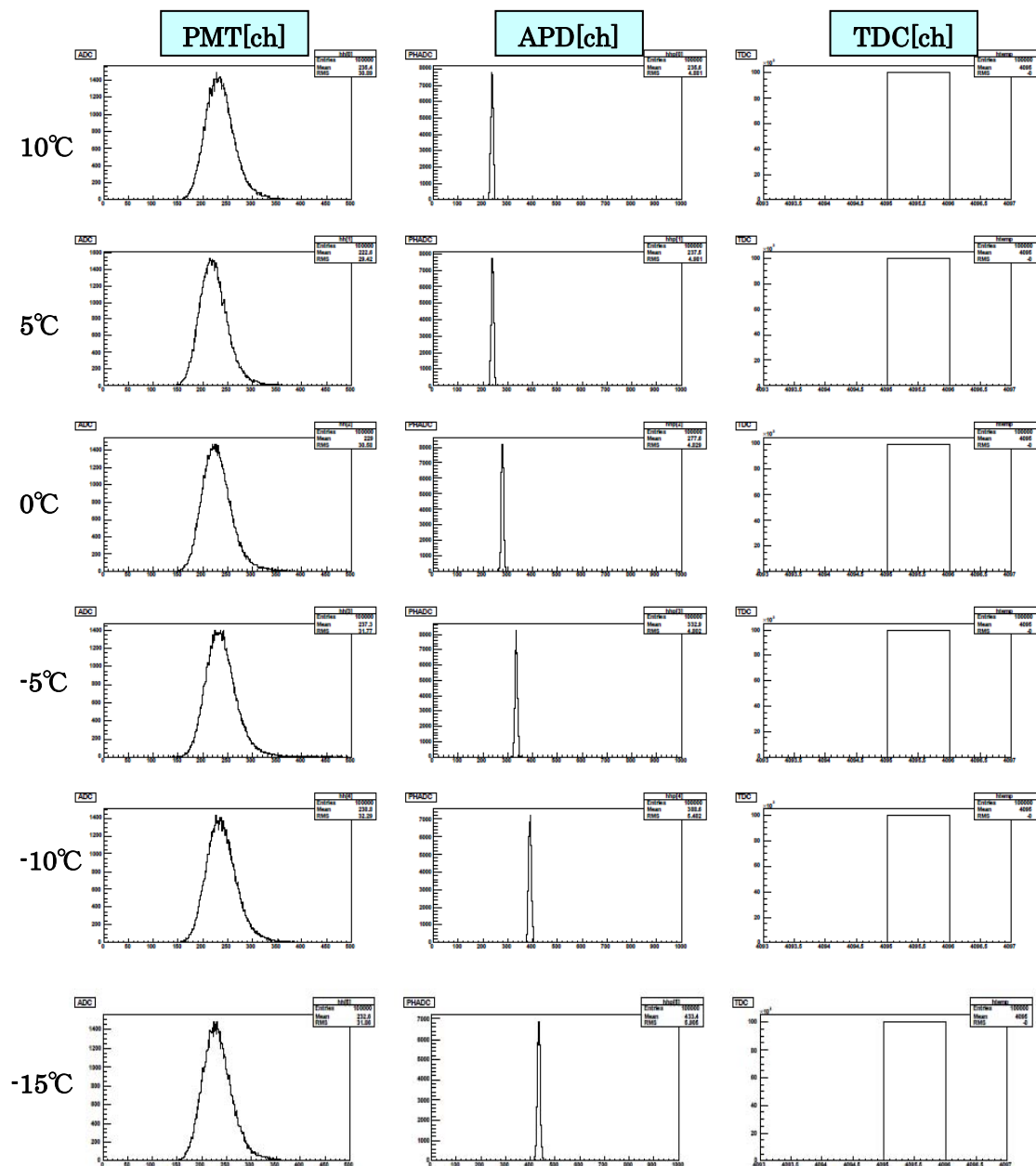


図 4.1.1 ADC と TDC のヒストグラム (10~-15°C)

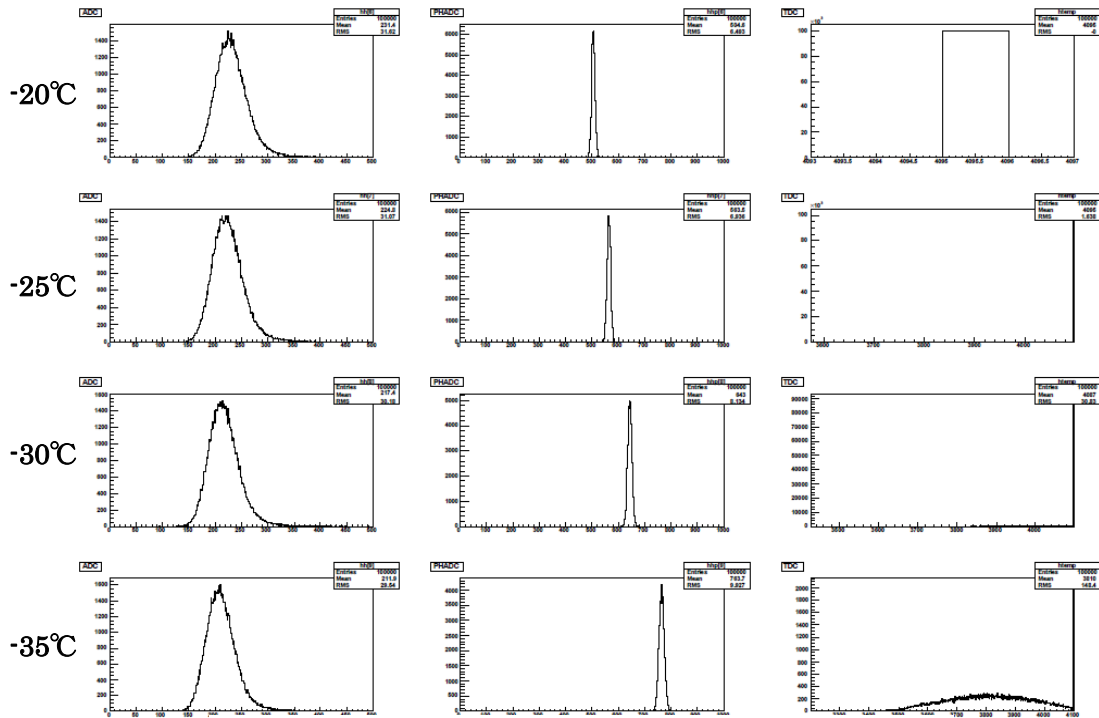


図 4.1.2 ADC と TDC のヒストグラム (-20~-35°C)

このヒストグラムは、横軸はチャンネル数、縦軸はカウント数であり、横軸のスケールを揃えている。図 4.1.2 を見ると、TDC 以外はガウス分布でヒストグラムが取れていることが分かる。

続いて、上の測定の結果を各温度でまとめたグラフを示す。

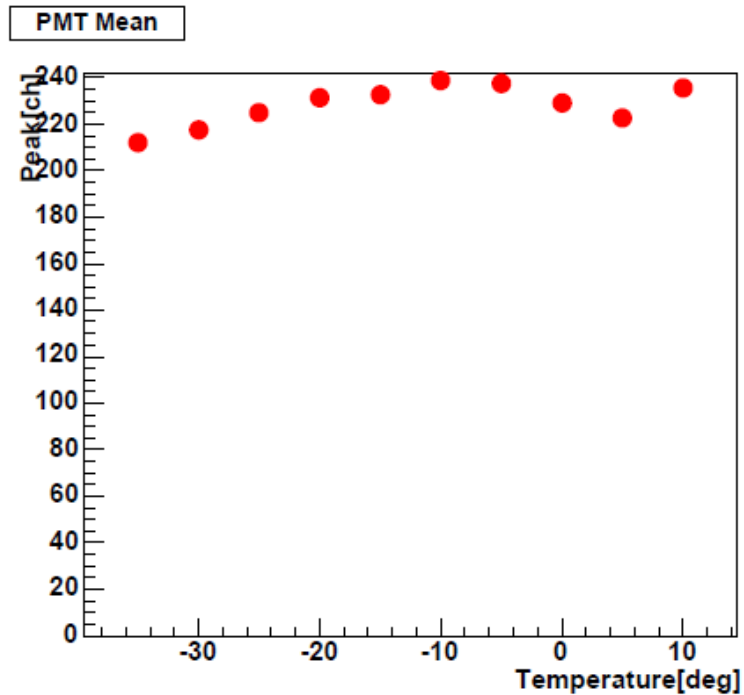


図 4.1.3 CSADC の Mean 温度分布 (PMT)

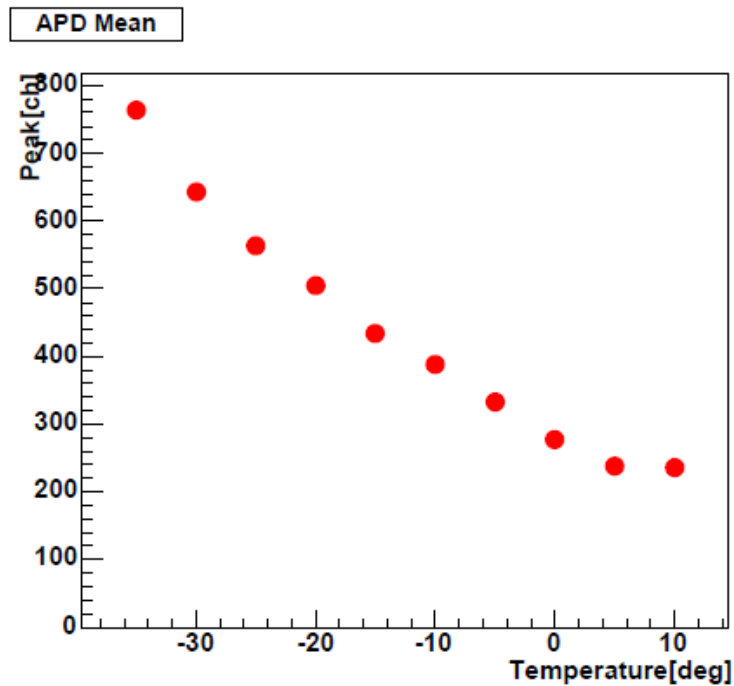


図 4.1.4 PHADC の Mean 温度分布 (APD)

図 4.1.3 より CSADC の Mean は温度が下がってもほとんど変わらないが、図 4.1.4 より PHADC の Mean は温度が下がるにつれて増加していることが分かる。PMT と APD に当てる LED の光量は一定にしているが、別の LED に変える際に光量を変えているので、同じ LED としても温度によっては光量が若干異なっている。その変化は図 4.1.3 を見れば確認できる。温度によって光量が変化したとしても、PMT と APD が捉えている光は同じものであるので増幅率には影響しないと考えられる。

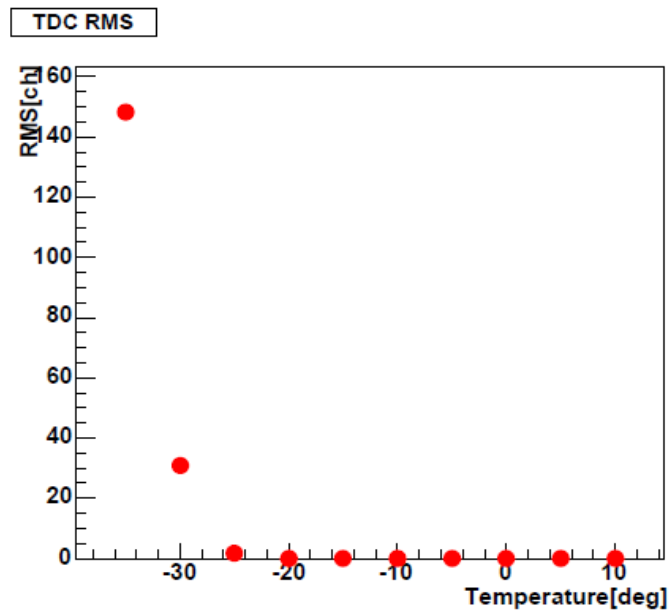


図 4.1.5 TDC の RMS 温度分布 (APD)

図 4.1.5 の TDC のサマリープロットに関しては、図 4.1.2 の TDC ヒストグラムを見ての通り、オーバーフローしているので測定が正しく出来なかったと思われる。TDC に関しては後のページの考察で詳しく解説する。

続いて、各温度でのシングルフォトエレクトロンを捉えた ADC ヒストグラムを示す。ヒストグラムの横軸はチャンネル数であり、縦軸はカウント数である。

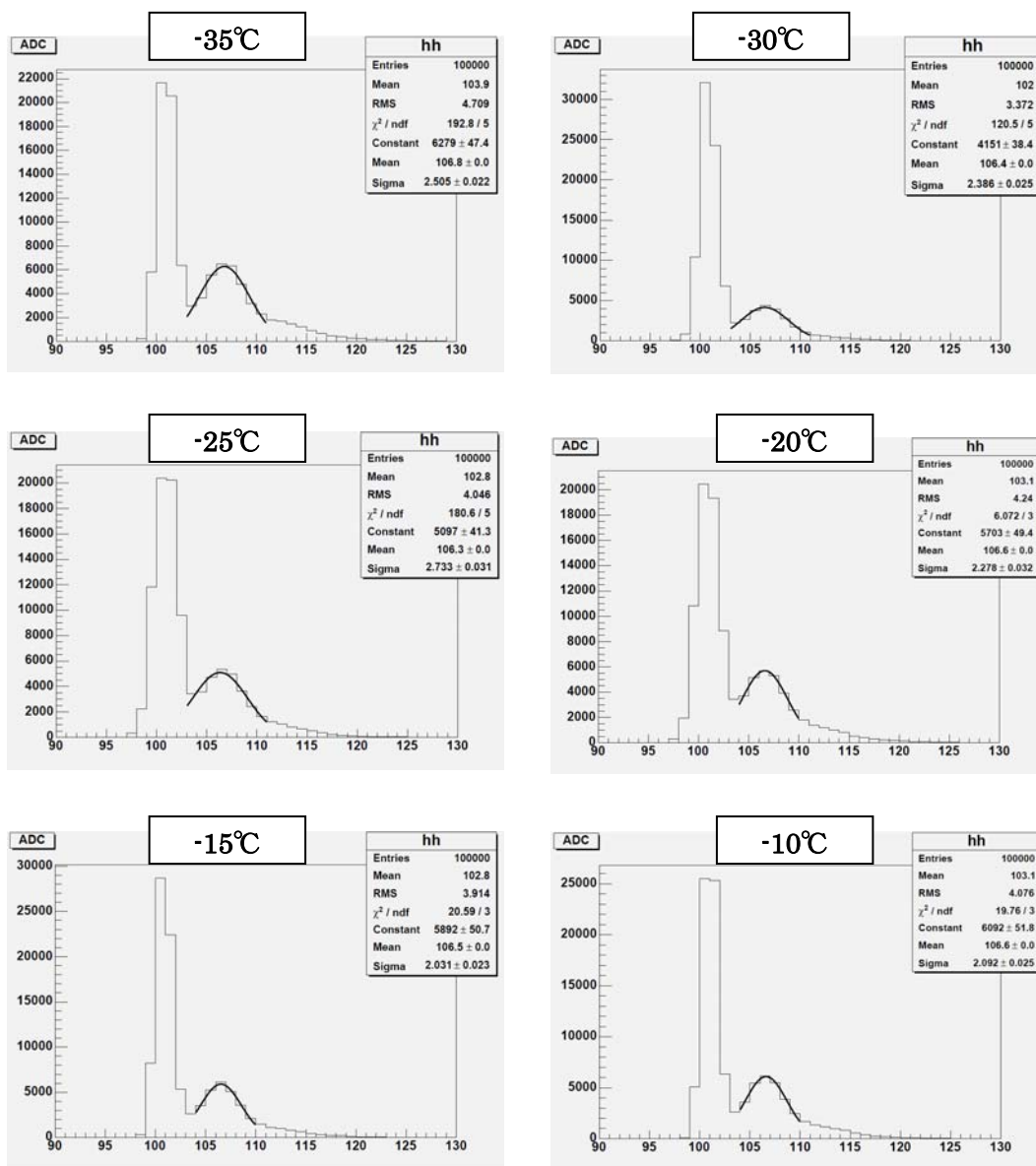


図 4.1.6 シングルフォトエレクトロンの ADC ヒストグラム (-35~-10°C)



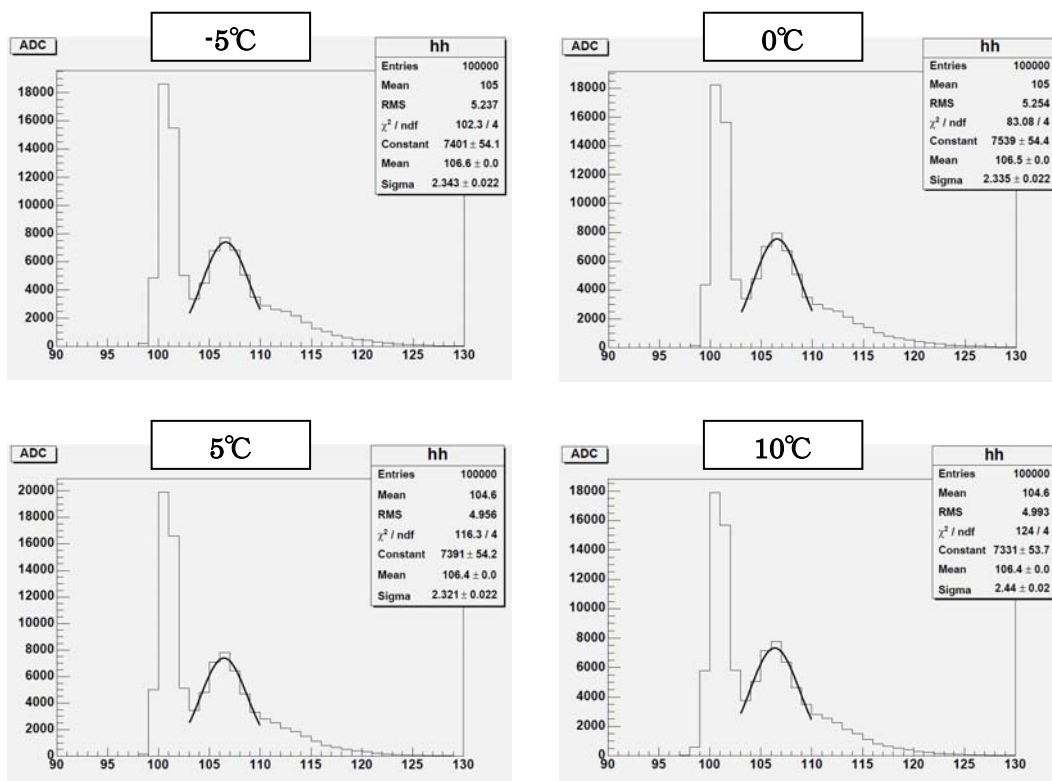


図 4.1.7 シングルフォトエレクトロンの ADC ヒストグラム (-5~10°C)

各温度でのシングルフォトエレクトロンのヒストグラムはガウス関数でフィッティングした。温度が変わることでシングルフォトエレクトロンのピークの位置が若干変わっていることがフィッティング関数の Mean チャンネル数から分かる。この Mean の値は PMT で観測する LED の光量を求めるのに用いた。

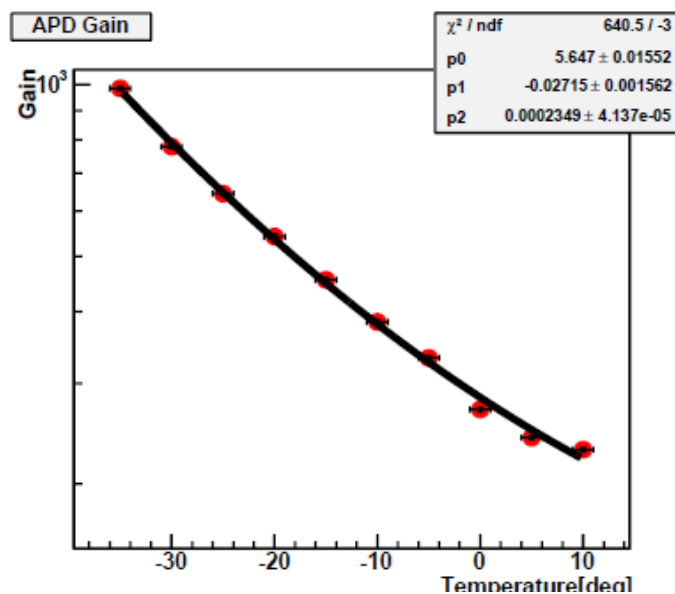


図 4.1.8 APD の増幅率の温度分布

図 4.1.8 のグラフが本実験の目的である低温領域における APD の増幅率の温度依存性である。縦軸のエラーバーは標準偏差であり、横軸のエラーバーは恒温槽内の温度分布の誤差である。縦軸はログスケールにしているので、温度が下がっていくほど、APD の増幅率は指数関数的に増加していることが分かる。

このプロットにフィッティングを行った関数を下に示す。

$$f(x) = \exp\left[P_0 + P_1x + P_2x^2\right]$$

P0、P1、P2 は図 4.1.8 に与えられている定数である。

縦軸の増幅率の単位は electron 数 / electron 数である。つまり、APD が増幅した後の電子数を、増幅前の光子数で割ったものである。

## 4.2 増幅率の波長依存性

以上の測定は先に選んだ 1 2 本の LED 全てで行った。以下にその増幅率を示す。

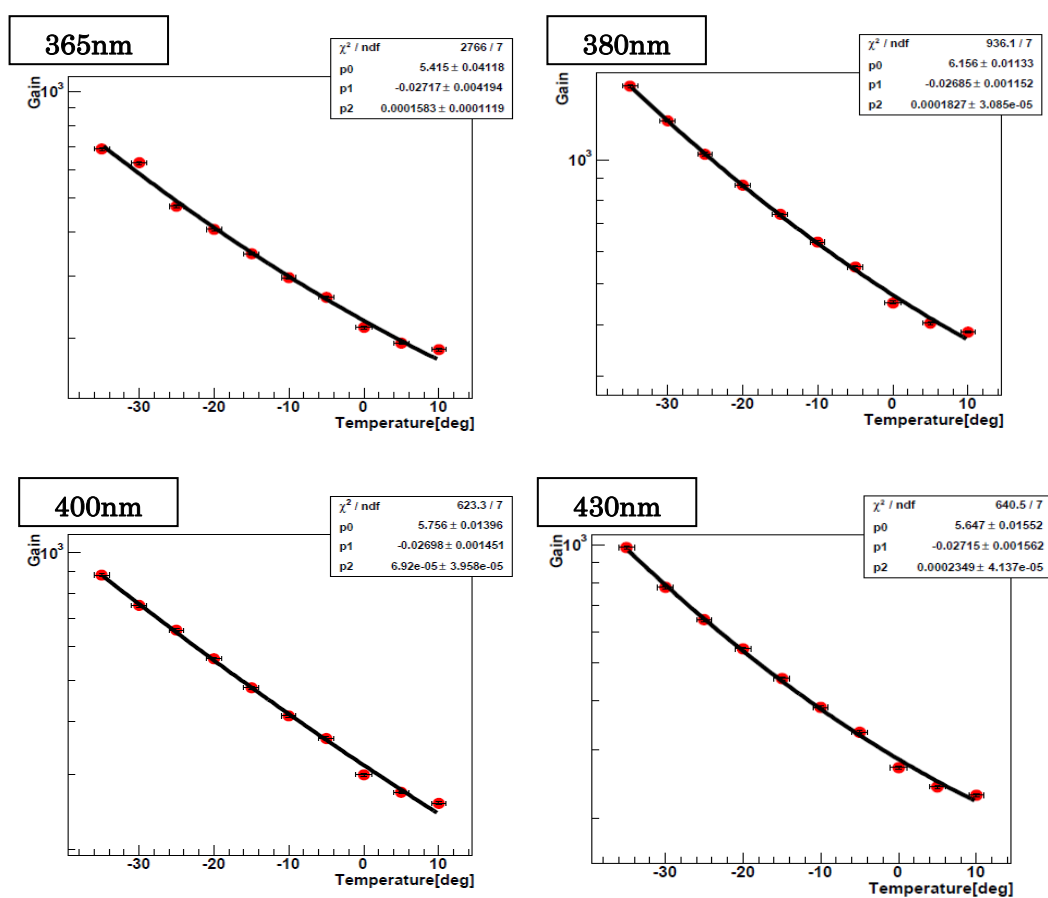


図 4.2.1 各波長の増幅率の温度分布 (365~430nm)

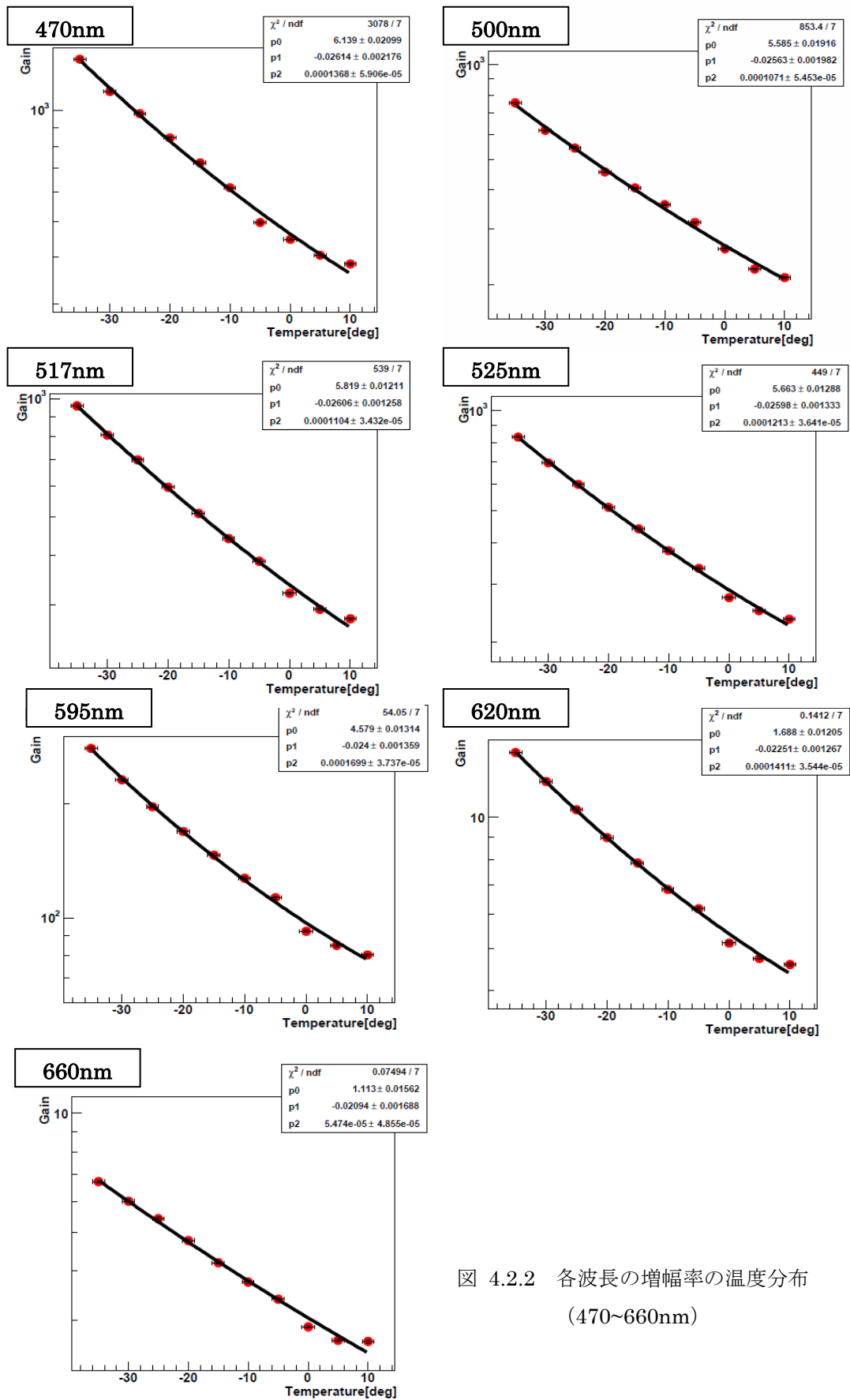


図 4.2.2 各波長の増幅率の温度分布 (470~660nm)

図 4.2.1~2 の各グラフの縦軸はスケールを揃えておらず、それぞれプロットが確認しやすいところでスケールしている。各グラフを見ると、増幅率はどれも温度が下がるにつれて指数関数的に増加している。

次に、以上のグラフをまとめたものを示す。

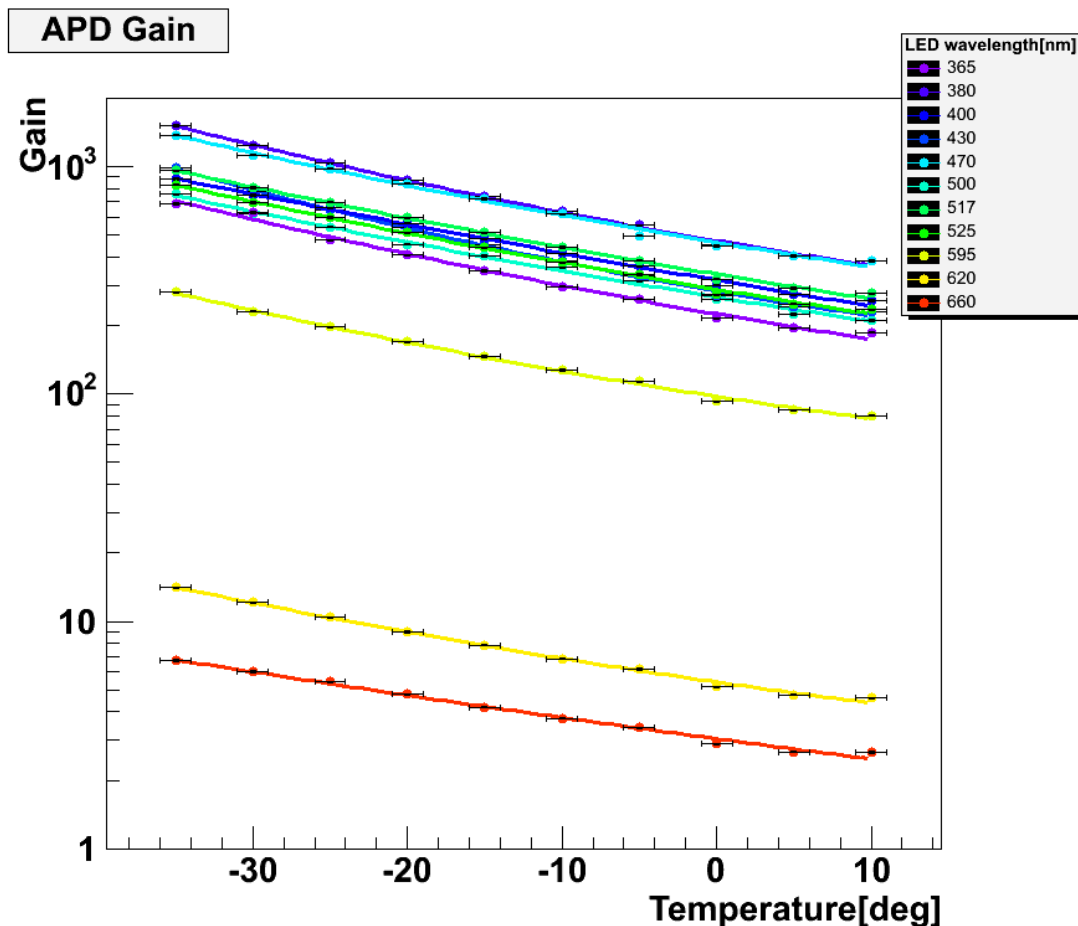


図 4.2.3 全波長の増幅率の温度分布

ここでは各波長のフィットカーブにそれぞれの波長に対応する色をつけた。プロットしている波長の中で 850nm の LED が含まれていないが、その LED は放射角度が狭く、PMT にほとんど光が入らないので ADC データを得ることが出来なかったためである。

続いて、温度ごとに増幅率の波長依存性をまとめたものを示す。

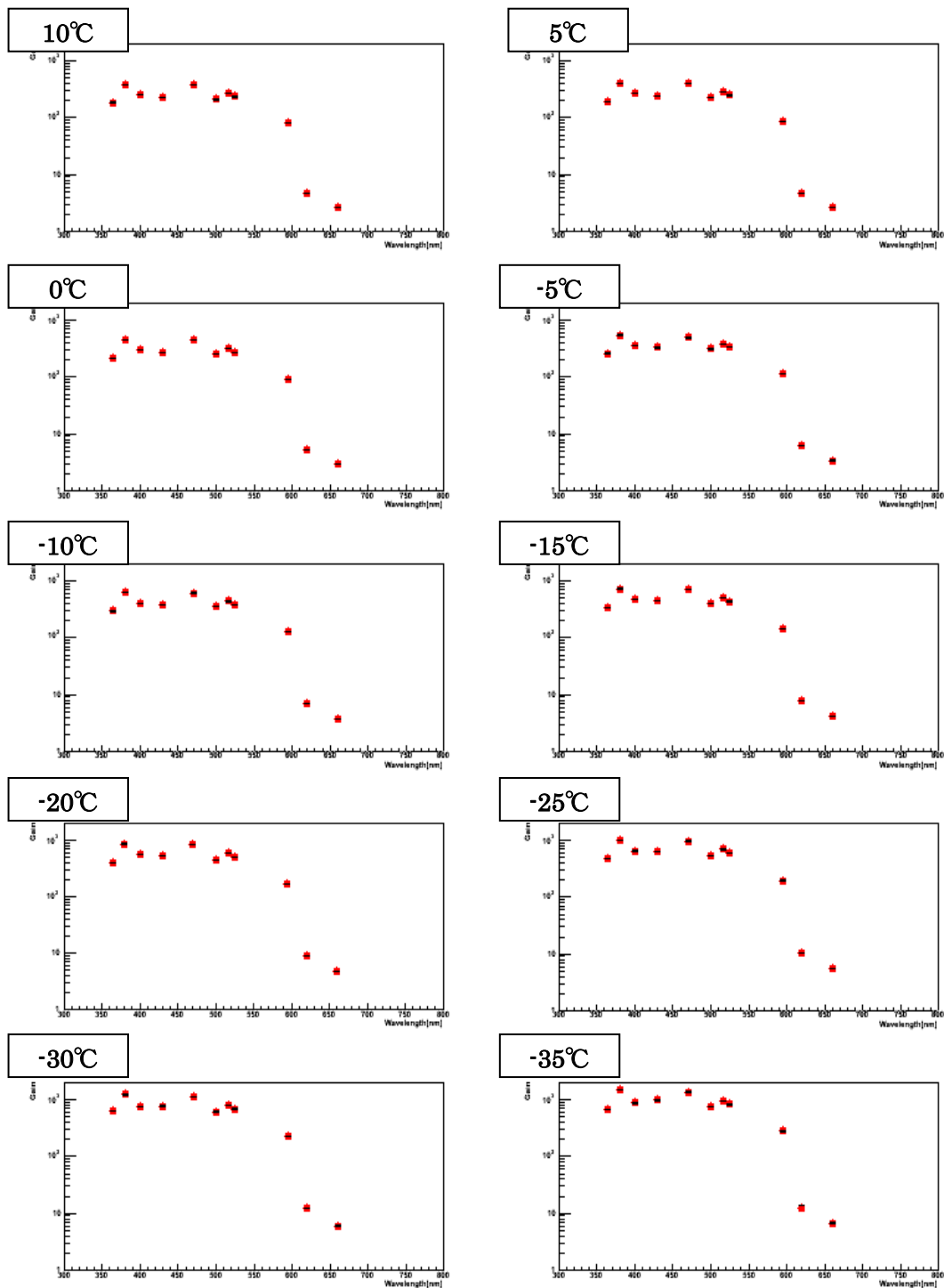


図 4.2.4 各温度における増幅率の波長分布

図 4.2.3 と図 4.2.4 のグラフより、各波長の増幅率は温度が下がるとともに一様に増加していることが分かる。また波長が近赤外領域の LED に関してはそれより短い波長に比べて増幅率が低いことが分かる。そして、温度が一定のときは 350nm から 550nm の波長の LED の増幅率は波長に対してばらつきがあるが、似かよった分布をしていることが分かる。

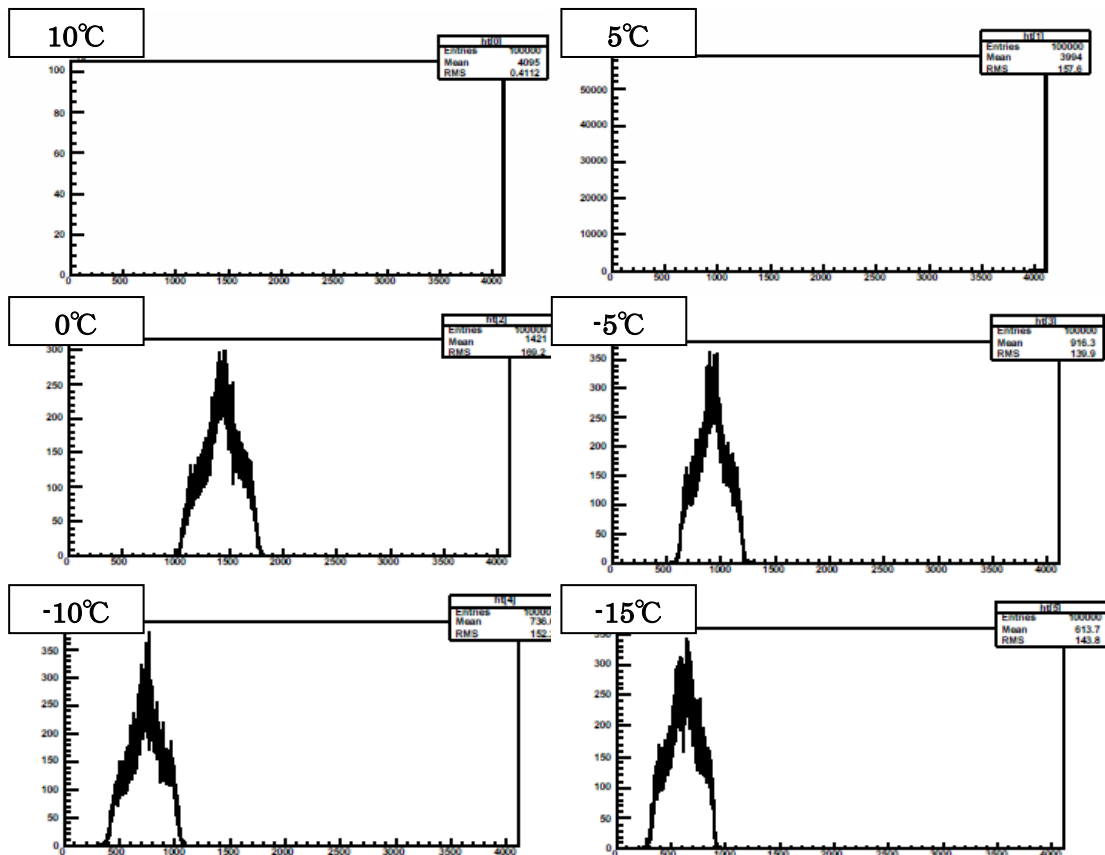
## 5. 考察

### 5.1 増幅率について

本実験の結果より、APD の増幅率は温度が低くなるとともに指数関数的に増加することが確認できる。その増幅率は波長 430nm の LED に関して言えば、10°Cでは 230 倍、-35°Cでは 980 倍となり、温度を 45 度下げることにより増幅率の倍率はおよそ 4.3 倍になることが分かる。この結果は APD にかける HV を 380V にして測定した結果である。HV を変えることでも APD の増幅率が変化するので、その変化を測定する価値はある。

### 5.2 TDC について

また APD の TDC に関しては、図 4.1.1~2 のようにほとんどの温度で TDC がオーバーフローしてしまっているのが確認できるが、原因としては LED を 3 つ同時に測定しているからだと思われる。なぜなら、LED によって発光するまでの応答時間が違うので、一つの LED の TDC に合わせると、他の LED がそれよりも応答時間が長いと測定できない場合が考えられる。波長 430nm の LED と同時に測定した波長 365nm の LED の TDC 分布を確認する。このヒストグラムは横軸がチャンネル数で、縦軸がカウント数である。



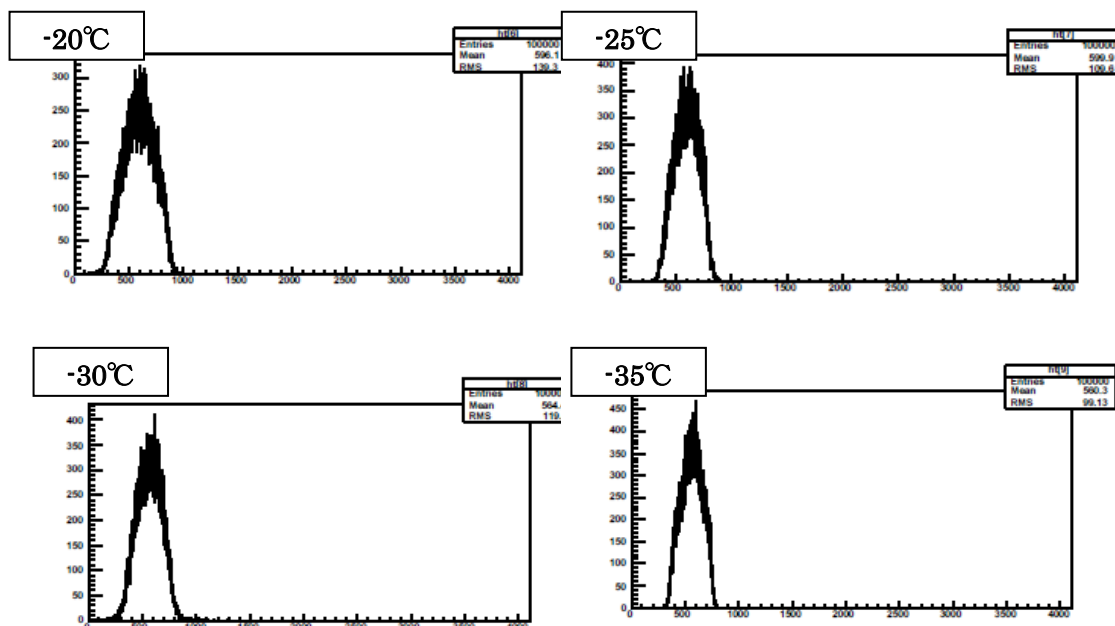


図 5.2.1 TDC ヒストグラム (横軸は全て同スケール)

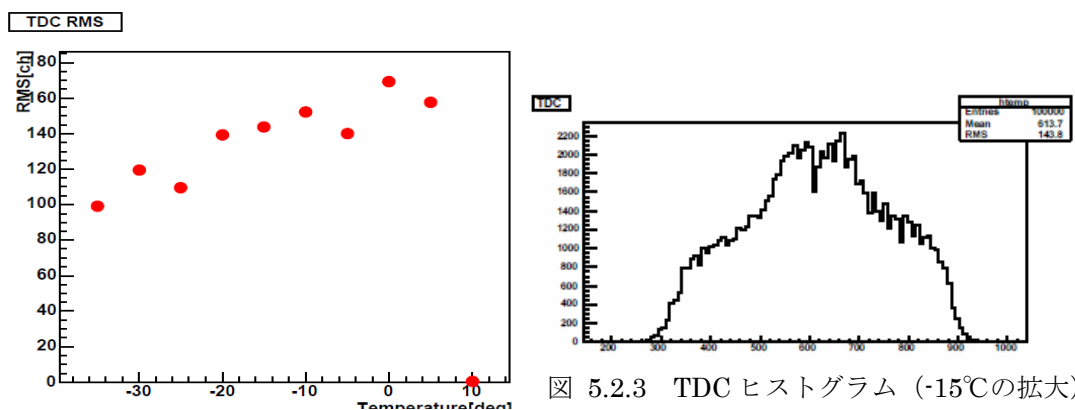


図 5.2.2 TDC の RMS 温度分布

図 5.2.3 TDC ヒストグラム (-15°Cの拡大)

このデータは波長 500nm の LED の TDC ヒストグラムであるが、0°C以下に関してデータは取れている。そして、RMS をサマリープロットしてみると、温度が下がるにつれて RMS も小さくなっていることが分かる。つまり、APD の応答時間の揺らぎが小さくなっているということである。

ここで各温度のヒストグラムを見てみると、一見正常にヒストグラムが取れているように見えるが、例えば-15°Cのときを拡大してみると、図 5.2.3 のようにヒストグラムに 2 成分が含まれているように見える。TDC の入力信号は APD の出力信号をディスクリミネータを通した信号である。APD にはノイズがのっており、それがディスクリミネータのしきい値を超えて TDC に入ることによって分布が広がった可能性がある。この状態では正確な RMS 値が分からないので、今後、測定方法を考え直して再測定する。

### 5.3 増幅率の波長依存性について

本実験では増幅率の波長依存性も調べるために異なる波長の LED を用意し、それぞれについて測定した。また、それぞれの波長の増幅率の温度依存性も調べた。

結果の図 4.2.1、図 4.2.2 より、どの波長の LED も温度が下がるとともに指数関数的に増加することが分かる。ここで 10°Cにおける波長と増幅率のグラフをピックアップして見てみる。

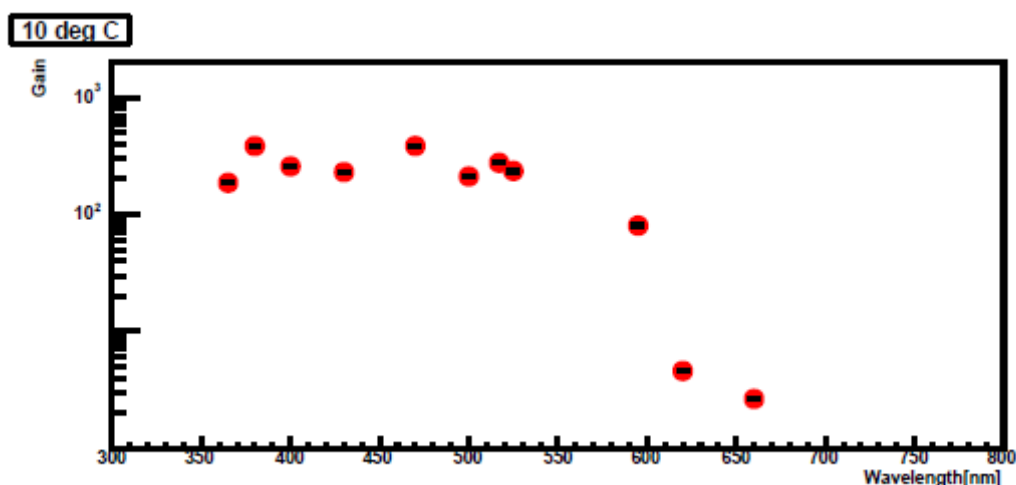


図 5.3.1 増幅率の波長分布 (10°C)

図 4.2.2 を見たときと同様に赤外領域に近い LED の増幅率が小さく、それより短い波長の LED の増幅率が大きい傾向がある。

今回求めた増幅率とは、APD 内部のアバランシェ領域において、光電子が格子と衝突して電子ホール対を次々と生成していく過程であるので、増幅率は波長とは相関性はないはずである。しかし、図 5.3.1 を見ると、誤差の範囲以上でばらつきがある。

この原因をまず誤差に注目して考えてみる。今回の誤差としてこのグラフに入れたものは ADC データの統計誤差のみである。しかし、これ以外に PMT と APD の位置に入る光量の補正のために、PMT を二箇所測定したときの系統誤差を考える必要がある。このとき、PMT を特定の二箇所に置いて位置の補正を測定し、その後 APD と PMT をその二箇所に置いて増幅率を測定するが、その位置を厳密に合わせるができない。よって、置いた位置のずれによって誤差が生じる。この誤差がどの程度であるか調べた。



まず、3.2.2 節のセットアップの図 3.2.2.4 における Center と Left の位置で LED の光を PMT で測定する。このとき Center と Left の位置から PMT を 2mm 程度ずらして測定する。2mm とは置いた位置の誤差として考えられる範囲である。

測定した結果、Left の位置で 5mm 程度ずらすと、チャンネル数は 250ch 程度の差がある。Center の位置では 30ch 程度の差がある。これを増幅率の誤差に含めてみる。

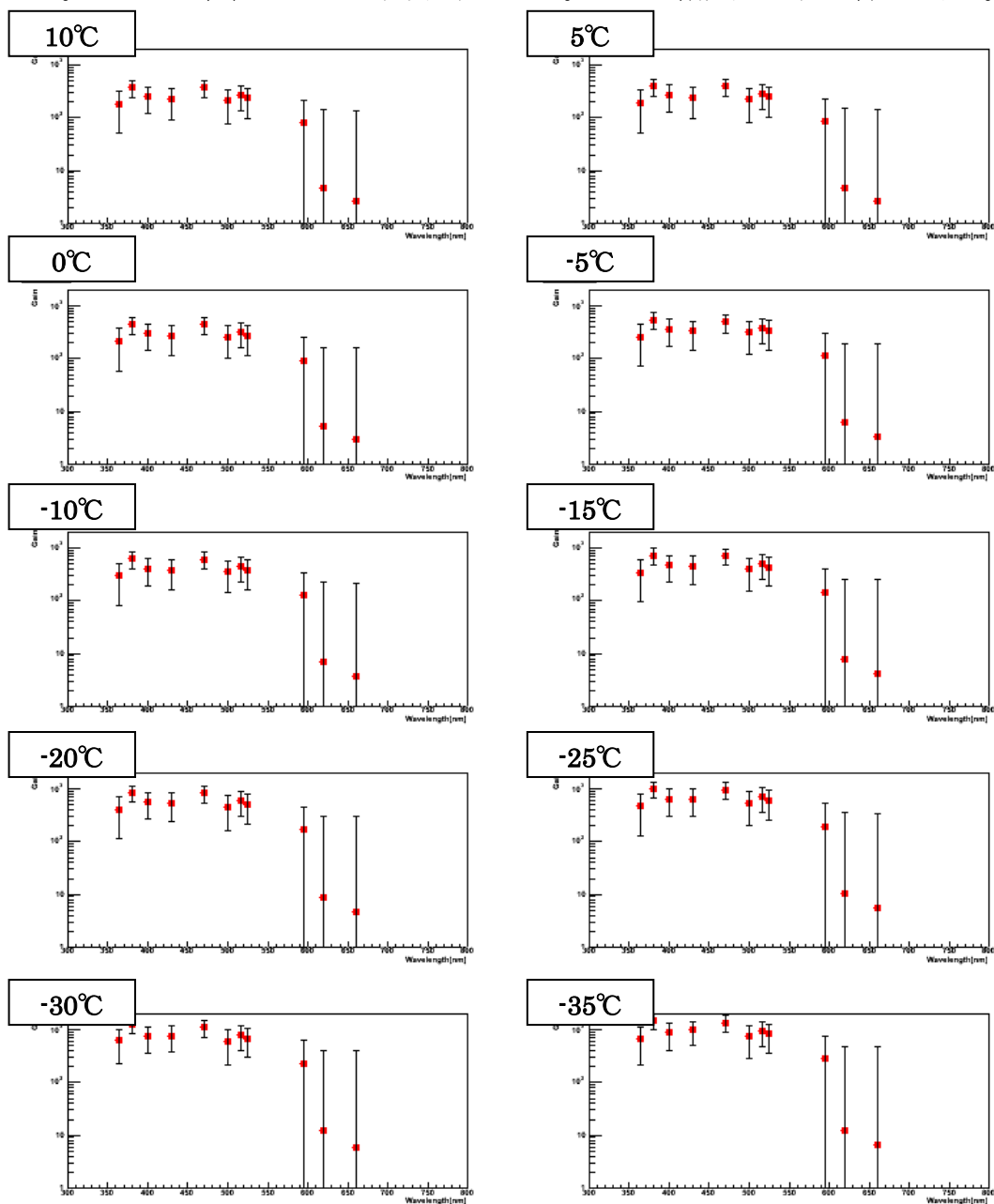


図 5.3.2 増幅率の波長分布 (位置によるエラーバー追加)

今、ある一つの LED (波長 517nm) に関しての誤差の値を他の波長の LED にも近似的に当てはめたのが図 5.3.2 のグラフである。グラフを見ると、350nm から 550nm までの波長の範囲に関して言えば、誤差の範囲の中で一定値をとると言える。

600nm 以上の波長範囲の LED に関していえば、二点以上も他のところと外れているので測定の見誤差とは言いにくい。ではなぜこのようなプロットになったのかというと、考えられるのは、今回、PMT の量子効率に浜松ホトニクス社のデータを使用していることが挙げられる。PMT には個体差があり、今回用いた PMT の量子効率は浜松ホトニクス社のデータの値とは厳密には一致していない可能性がある。また、その量子効率のデータは常温のときのものである。つまり、今回の測定は PMT の量子効率は温度に依存しないとして計算している。これは実際に量子効率を測定しなければ分からないので、今回は深くは言及しないことにした。

系統誤差はまだ、受光面積の計算、PMT の受光面を減光させたときの計算、等に入ってくると思われる。ここではその言及については避けるが、今後の測定に際して考慮に入れておく必要がある。

以上より、APD の増幅率の測定を再度行うことにする。そして、再度測定を行うにあたって、今回生じた問題のため測定方法を変える必要がある。まず、PMT の量子効率の温度依存性の問題だが、これは PMT を恒温層の外において測定することで、常温の量子効率のデータが使えるようにする。その際に、今回のように PMT と APD に同時に光量を入れたい。そのために LED の光を光ファイバーを使って分けて、PMT と恒温槽内の APD の両方に届くようにする。これで LED の光を 2 分割出来るため、APD と PMT に同光量入れることが出来る。これで PMT と APD を置く位置の誤差を考える必要がなくなる。

最後に、今回用いた PMT の正確な量子効率の値に関してだが、これは実際に量子効率を測定する必要がある。その方法とは、予め発光量のわかる光源を PMT に入射させると、入射する光子数と変換された電子数が分かるので量子効率が計算できる。その際に、特定波長を調べなければならないのでプリズムなどで分光させる必要がある。

## 6. 結論

本実験の測定の結果より、APD は温度を下げることにより増幅率が指数関数的に増加することが分かった。その増幅率は PWO 結晶の発光波長のピーク値である 430nm の LED では、10°C で約 230 倍、-35°C では約 980 倍である。また ALICE 実験で PHOS 検出器が動作する温度の -25°C では約 640 倍である。これは APD にかける HV の値が 380 V のときの増幅率である。今後、HV の値を変えたときの増幅率の測定も行う予定である。

本実験のデータより、APD の低温領域における増幅率が得られた。これは磁場中でも読み出し可能な光検出器である APD の低温領域における重要なデータとなり、また PHOS 検出器の運転における重要な資料となった。

APD の特性を更に理解するために、今後の実験において HV を変えて APD の増幅率の測定する予定である。それが得られたならば、PHOS 検出器にとってさらに有益なデータとなるだろう。

また、本実験によって、PMT の個体別の量子効率の測定等の新たな課題が出来たので、今後その研究を進めていく予定である。

## 7. 謝辞

本実験を行うにあたって、この論文の題目を与えてくださった杉立先生には大変感謝しております。また、本研究室の指導教官の志垣先生、本間先生、そしてスタッフの鳥井さん、洞口さんには多大なるご指導、ご支援をいただき、有難うございました。

そして、共同研究者の成田さんには忙しい中、私と共に研究をしてくださり、また本研究の事をいろいろと教えていただき、有難うございました。最後になりましたが、本研究室の榎本さんをはじめとする先輩の方々、そして同輩の方々にも、いろいろと私の面倒を見てくださり、有難うございました。今回、この卒業論文を書き上げることが出来たのは皆様のお陰です。本当に有難うございました。

## 8. 参考文献

- [1] 杉立徹 研究成果報告書  
『LHC-ALICE 実験 PWO 結晶 電磁カロリメータ読み出し系の開発』
- [2] 永江知文・永宮正治 共著 『原子核物理学』 裳華房
- [3] 伊藤新太郎 『やさしい LED のはなし 光エレクトロニクス入門』  
日本放送出版協会
- [4] Ben G.Streetman 菊池誠・大串秀世・黒須楯生・松本和彦 共訳  
『接合型半導体』 東海大学出版会
- [5] 成田拓人 2005 年度広島大学卒業論文  
『タングステン酸鉛結晶の蛍光温度特性』
- [6] 久保武史 2005 年度広島大学卒業論文  
『APD 読み出し二次元位置感応型プラスチックシンチレーション検出器の開発』
- [7] 広島大学クォーク物理学研究室ホームページ  
『<https://www.hepl.hiroshima-u.ac.jp/quark/>』
- [8] 浜松ホトニクス社ホームページ  
『[http://jp.hamamatsu.com/index\\_f.html?dir=/&lang=ja&ext=xml](http://jp.hamamatsu.com/index_f.html?dir=/&lang=ja&ext=xml)』
- [9] ALICE 実験ホームページ  
『<http://aliceinfo.cern.ch/>』
- [10] Photodiode read-out of the ALICE Photon Spectrometer PbWO4 crystals  
『[http://ph-collectif-lecc-workshops.web.cern.ch/ph-collectif-lecc-workshops/LEB99\\_Book/calorimetry/skaali.pdf](http://ph-collectif-lecc-workshops.web.cern.ch/ph-collectif-lecc-workshops/LEB99_Book/calorimetry/skaali.pdf)』
- [11] The ALICE Photon Spectrometer – PHOS  
『[http://www.fys.uio.no/elg/alice/dirPHOS/Jan01/PHOS\\_LHCC\\_2001.pdf](http://www.fys.uio.no/elg/alice/dirPHOS/Jan01/PHOS_LHCC_2001.pdf)』

## 9. 付録

- 回路図の中に載せたモジュールについて簡単に説明する。

### ディスクリミネータ

アナログ信号がディスクリミネータに入力されたとき、その信号がある閾値を超える場合に NIM 信号を出力する。閾値と NIM 信号の幅は変えることが出来る。

### スプリッタ

入力された信号を二等分にし、二つの信号を出力する。出力信号の大きさは入力信号の半分になる。

### ゲートジェネレータ

NIM 信号がゲートジェネレータに入力されたとき、ある遅延時間と幅をもった信号を出力する。遅延時間と幅は変えることが出来る。ADC の Gate に入力する信号などに用いられる。

### アテニューエータ

入力された信号を減衰させるモジュールである。  
本実験では ADC で読み込むことの出来ない大きな信号をアテニューエータを通して減衰させた。

### トランスレータ

NIM 信号が入力されたとき、その信号を反転させて出力する。  
本実験ではパルスジェネレータの正の出力信号をディスクリミネータに入力させるため、トランスレータに通して反転させた。

### シェイパーアンプ

前置増幅器（プリアンプ）からの出力信号を時定数  $2 \mu s$  で整形し、PHADC に入力することでその電圧のピーク値を測定することが出来る。

### パルスジェネレータ

正または負の極性を持つパルス信号を出力する。パルス遅延時間、持続時間、振幅などを変えることが可能である。本実験では LED を発光させるのとプリアンプの変換係数を調べるのに用いた。

## CSADC

CAMAC 規格のモジュールであり、データ処理を行う。任意のゲート時間内にアナログ信号が入力されたとき、その電荷量を積分してデジタル値として記録する。本実験では光電子増倍管からの出力電荷量を測定するのに用いた。

## PHADC

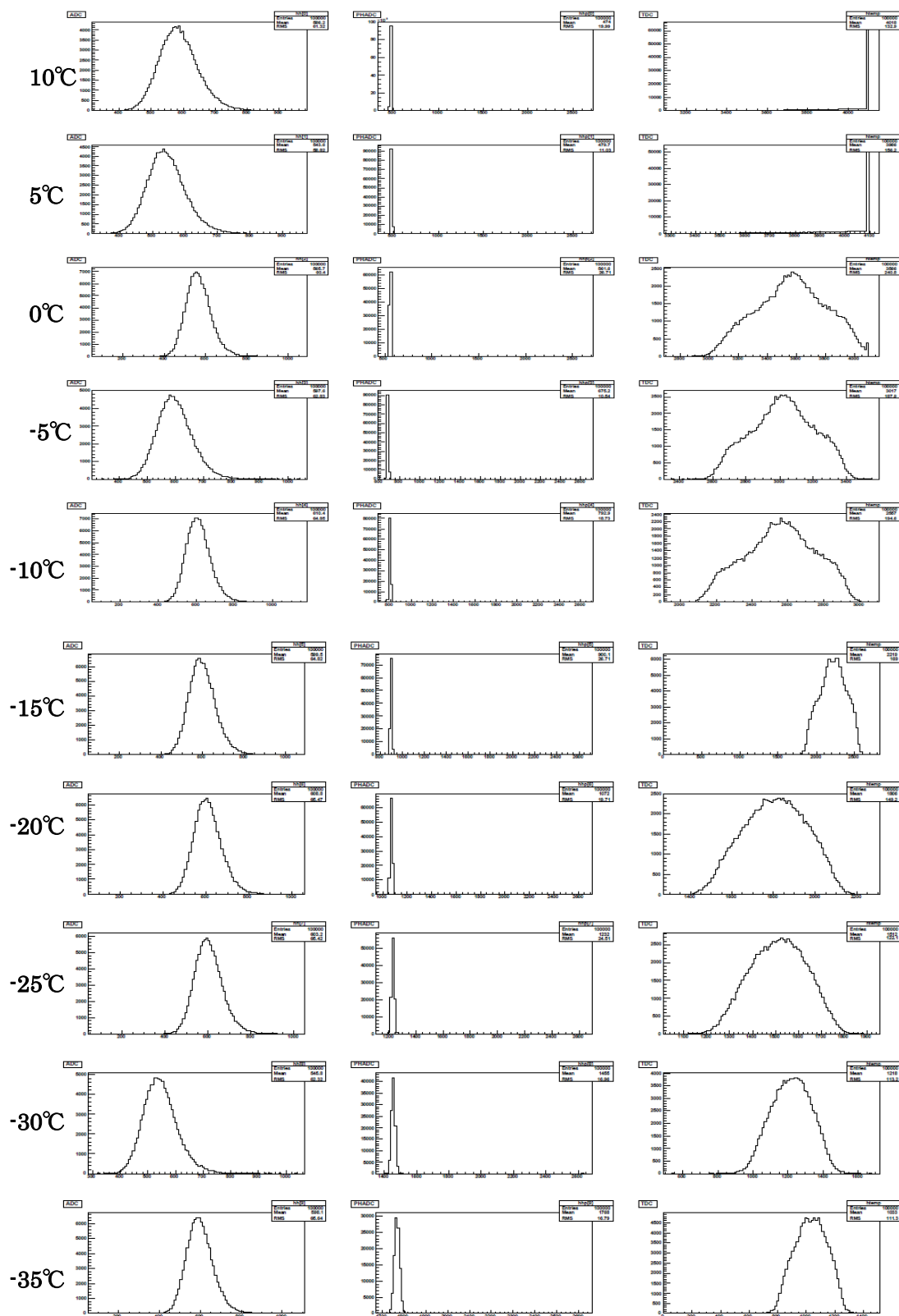
CAMAC 規格のモジュール。任意のゲート時間内にアナログ信号が入力されたとき、その信号のピーク電圧をデジタル値として記録する。本実験ではシェイパーアンプを通した後の APD の出力信号を測定するのに用いた。

## TDC

CAMAC 規格のモジュール。スタートに NIM 信号が入力されてからモジュールの各チャンネルに NIM 信号の入力があるまでの時間間隔を測定する。

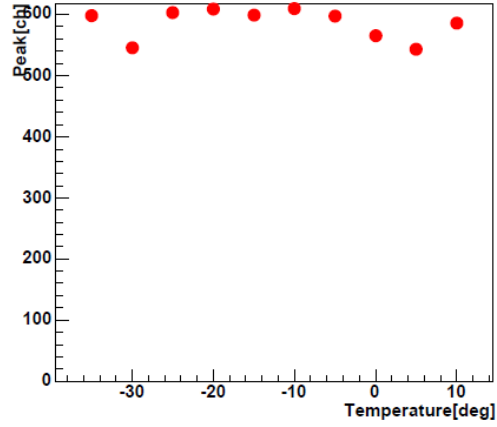
● 各波長の LED の CSADC、PHADC、TDC、増幅率の温度分布を載せる。

365nm

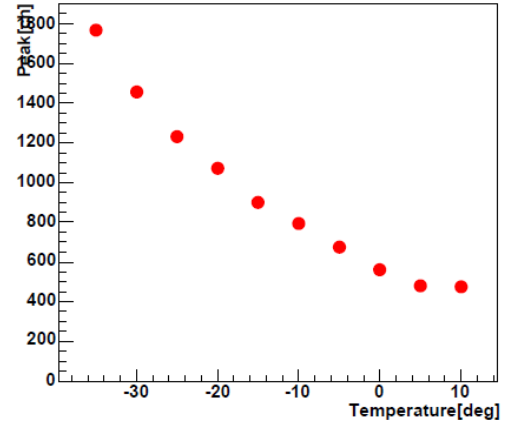




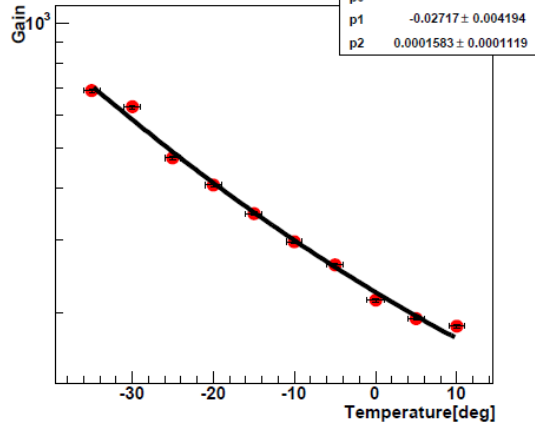
PMT Mean



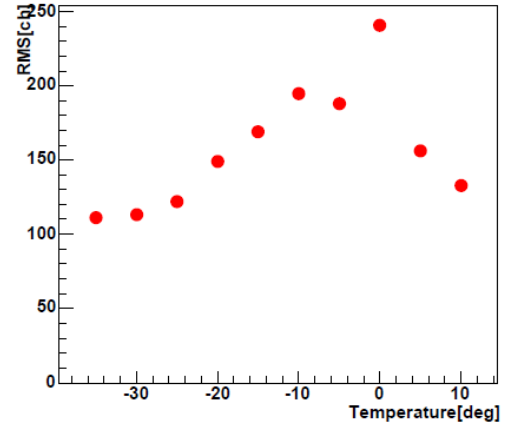
APD Mean



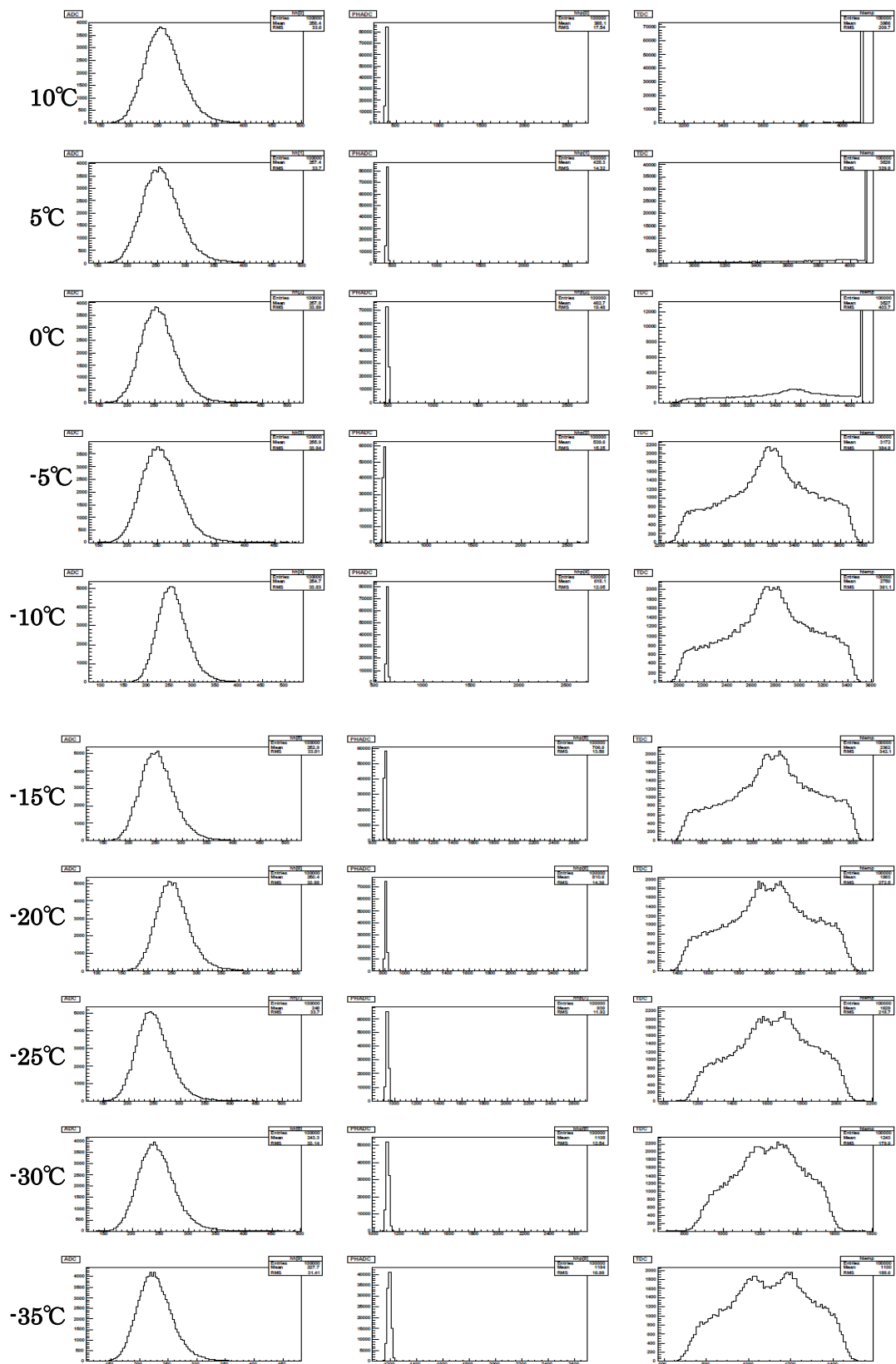
APD Gain



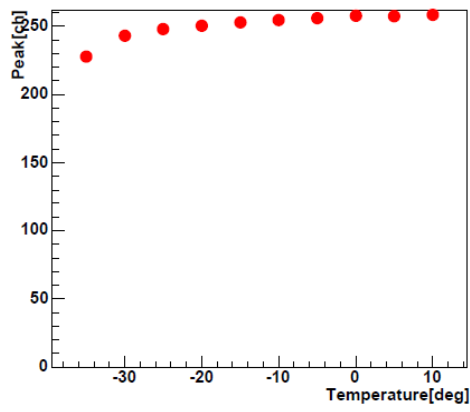
TDC RMS



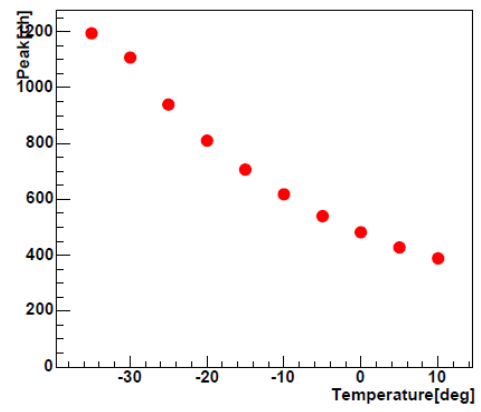
380nm 以下のヒストグラムは全て上から 10°C~-35°Cまで 5°C刻みで下がる。



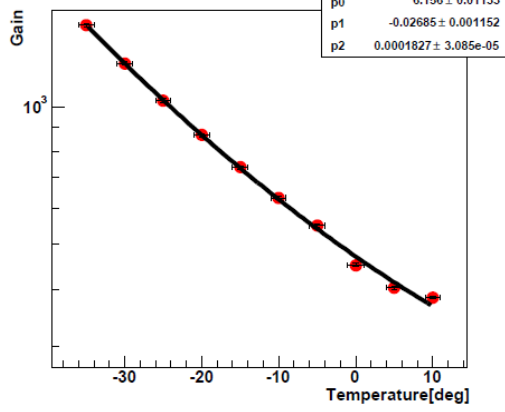
PMT Mean



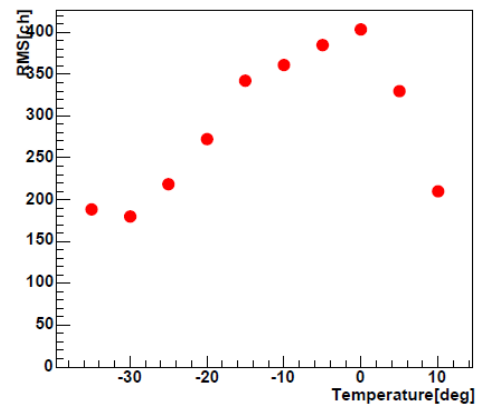
APD Mean



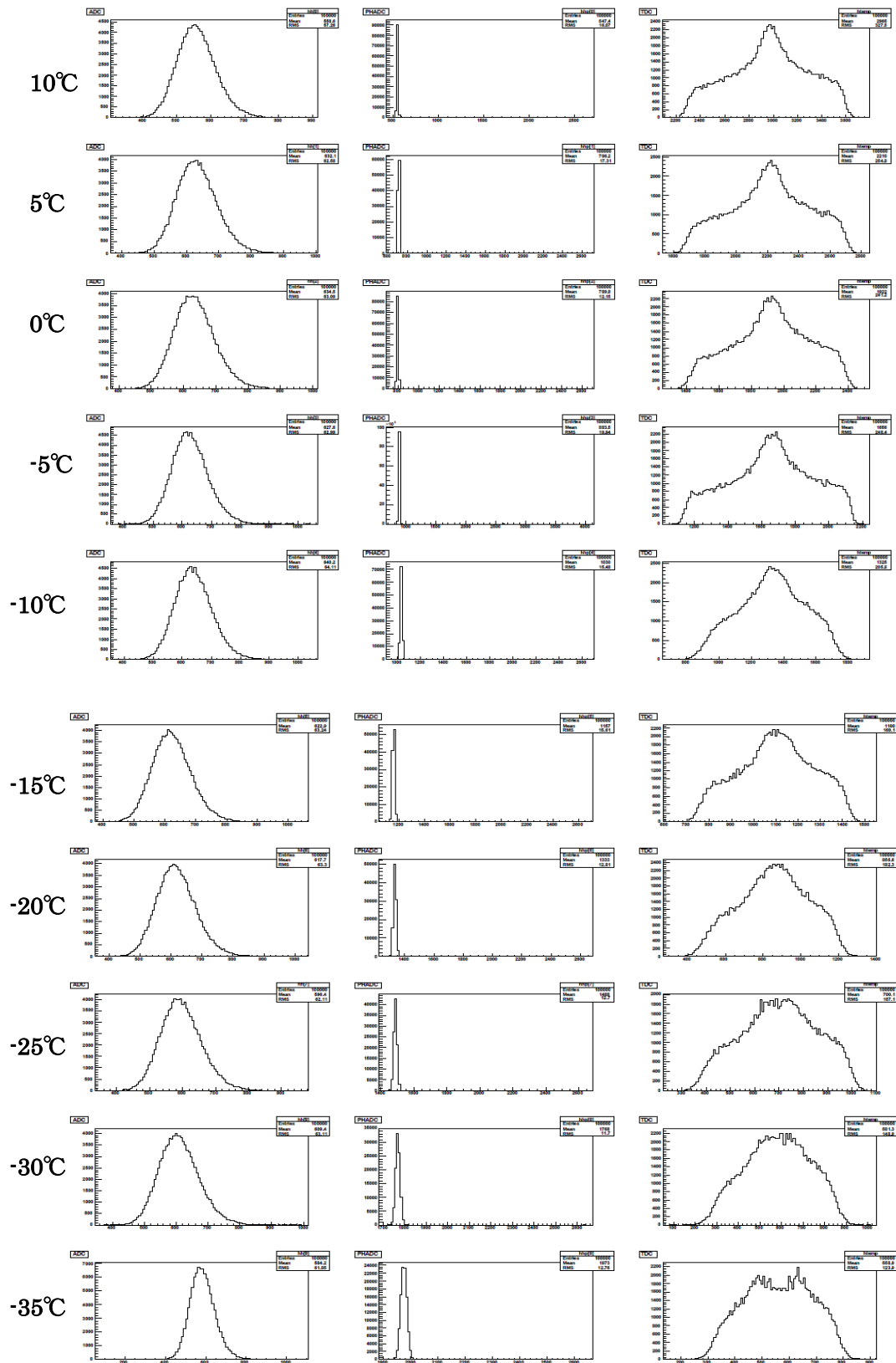
APD Gain



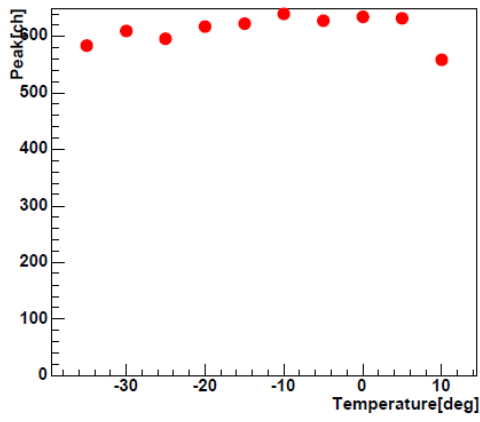
TDC RMS



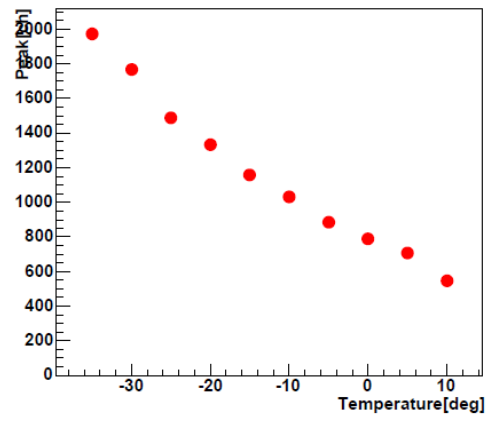
400nm



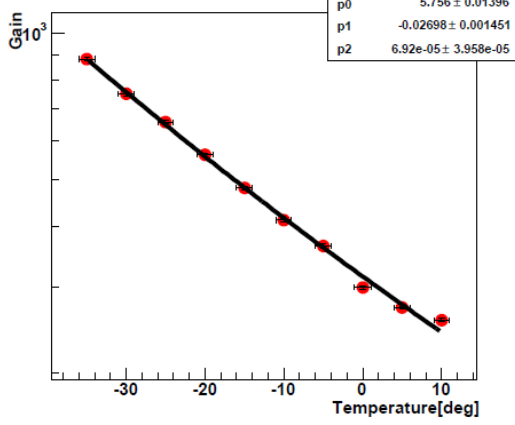
PMT Mean



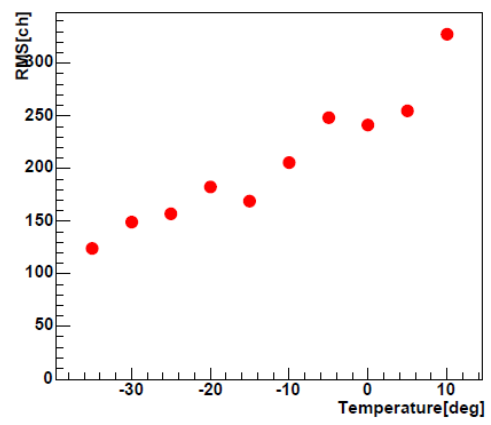
APD Mean



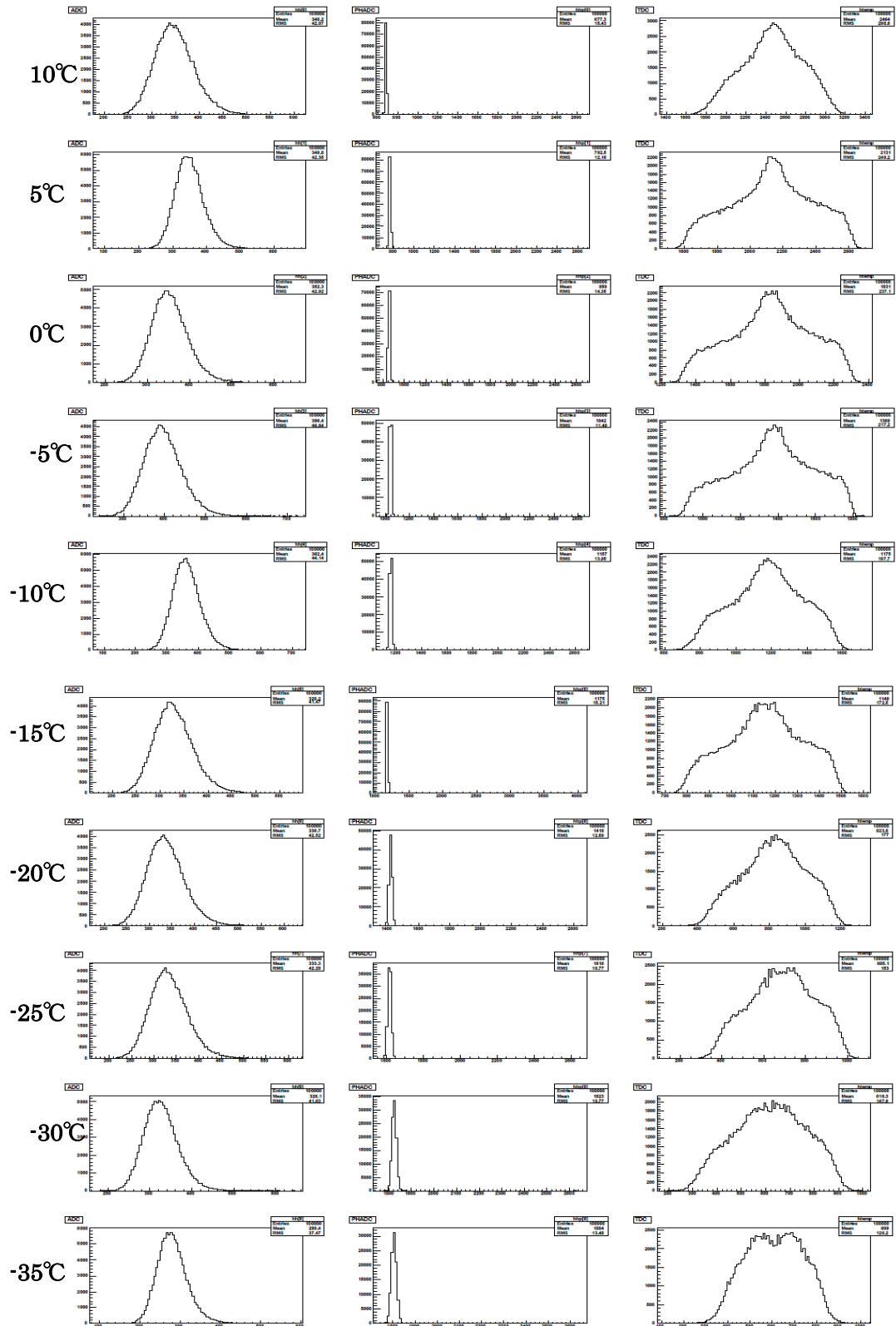
APD Gain



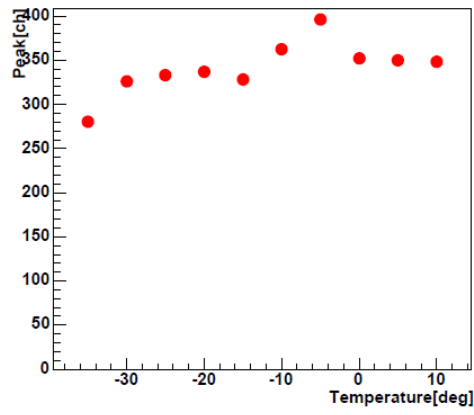
TDC RMS



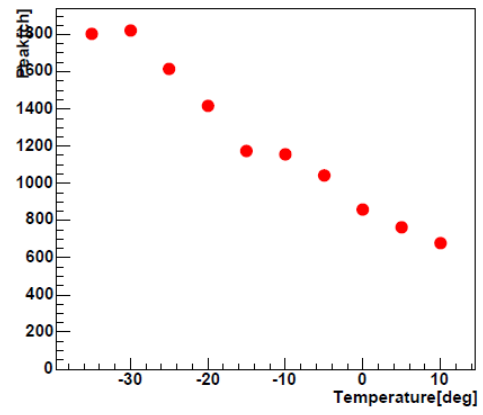
470nm



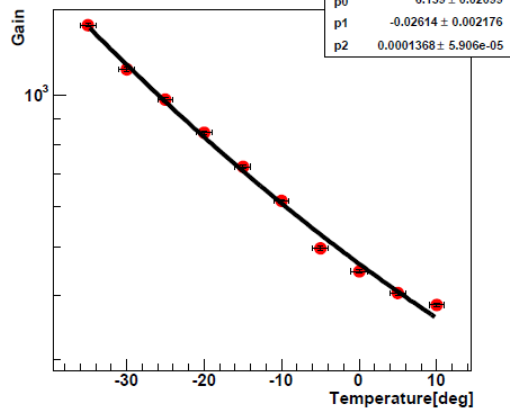
PMT Mean



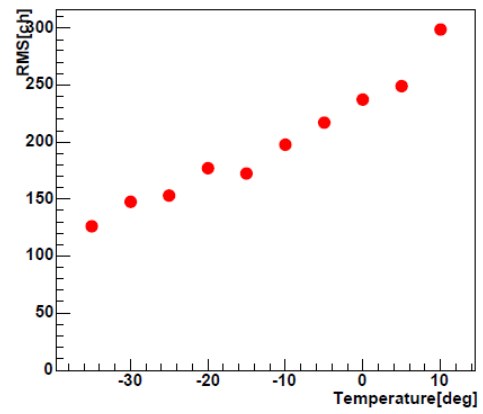
APD Mean



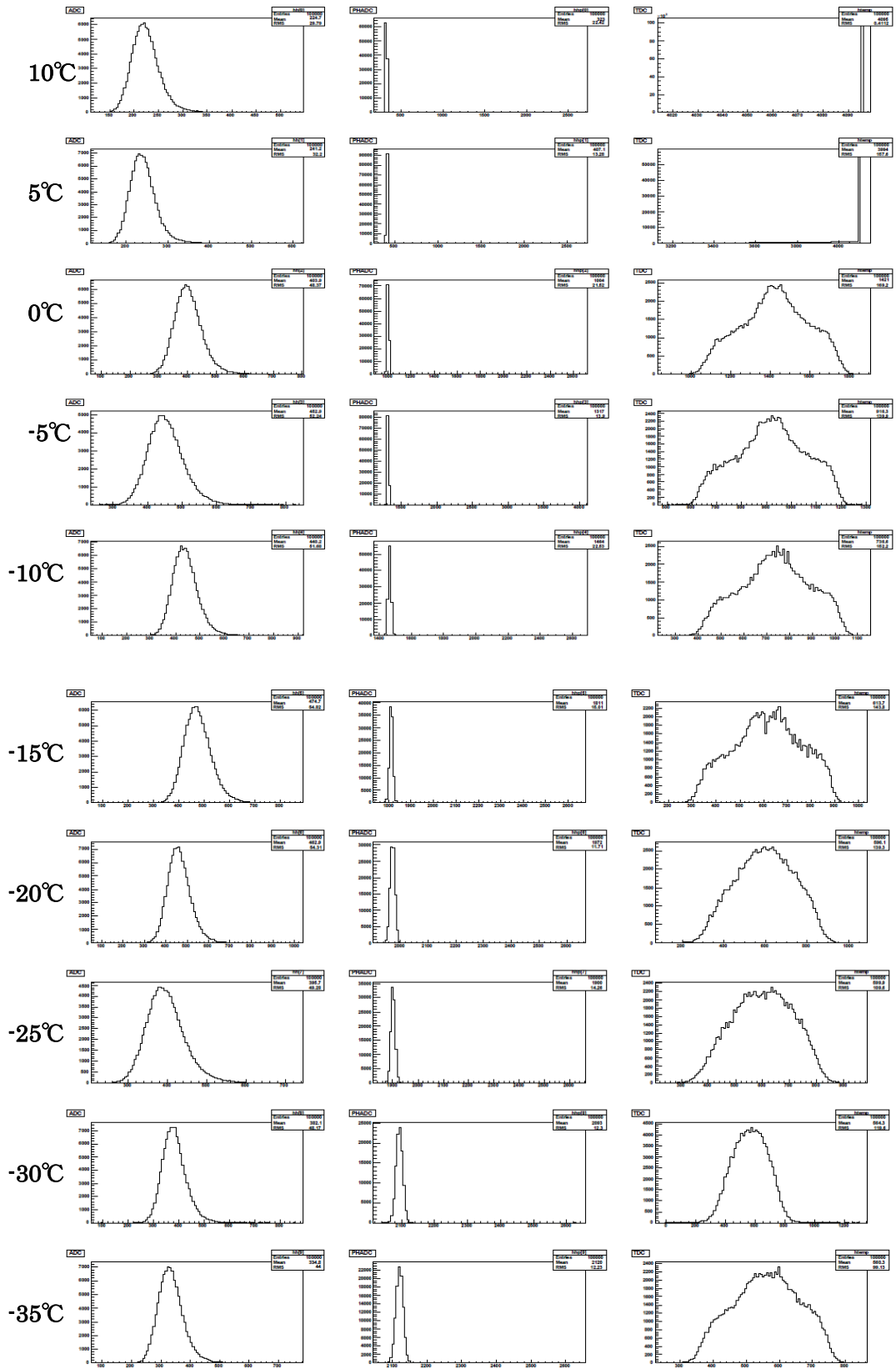
APD Gain



TDC RMS

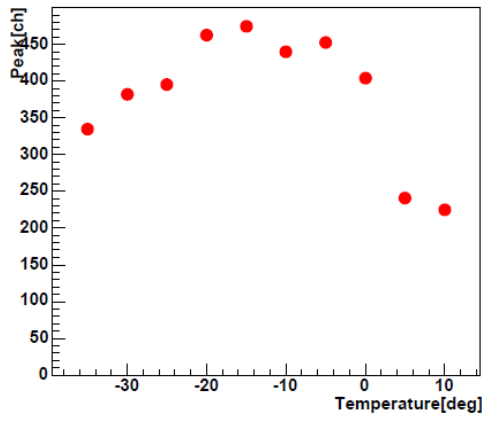


500nm

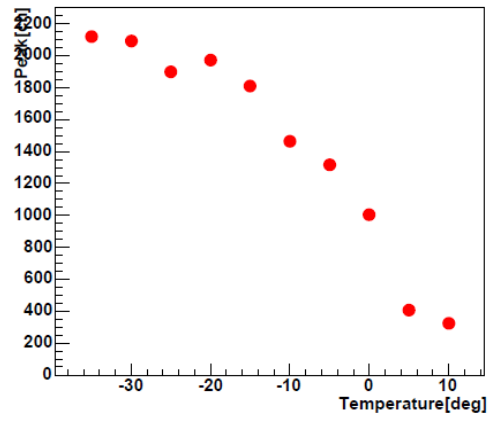




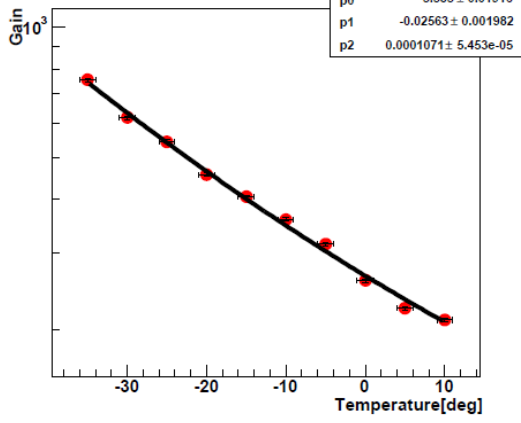
PMT Mean



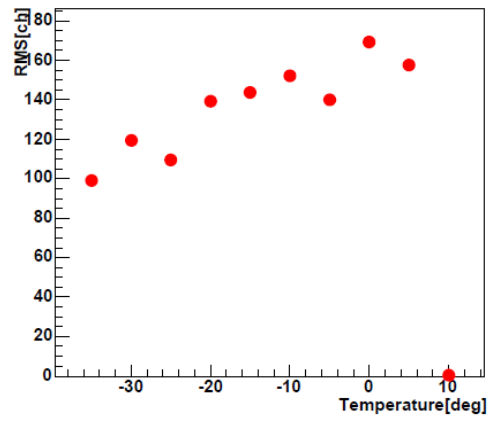
APD Mean



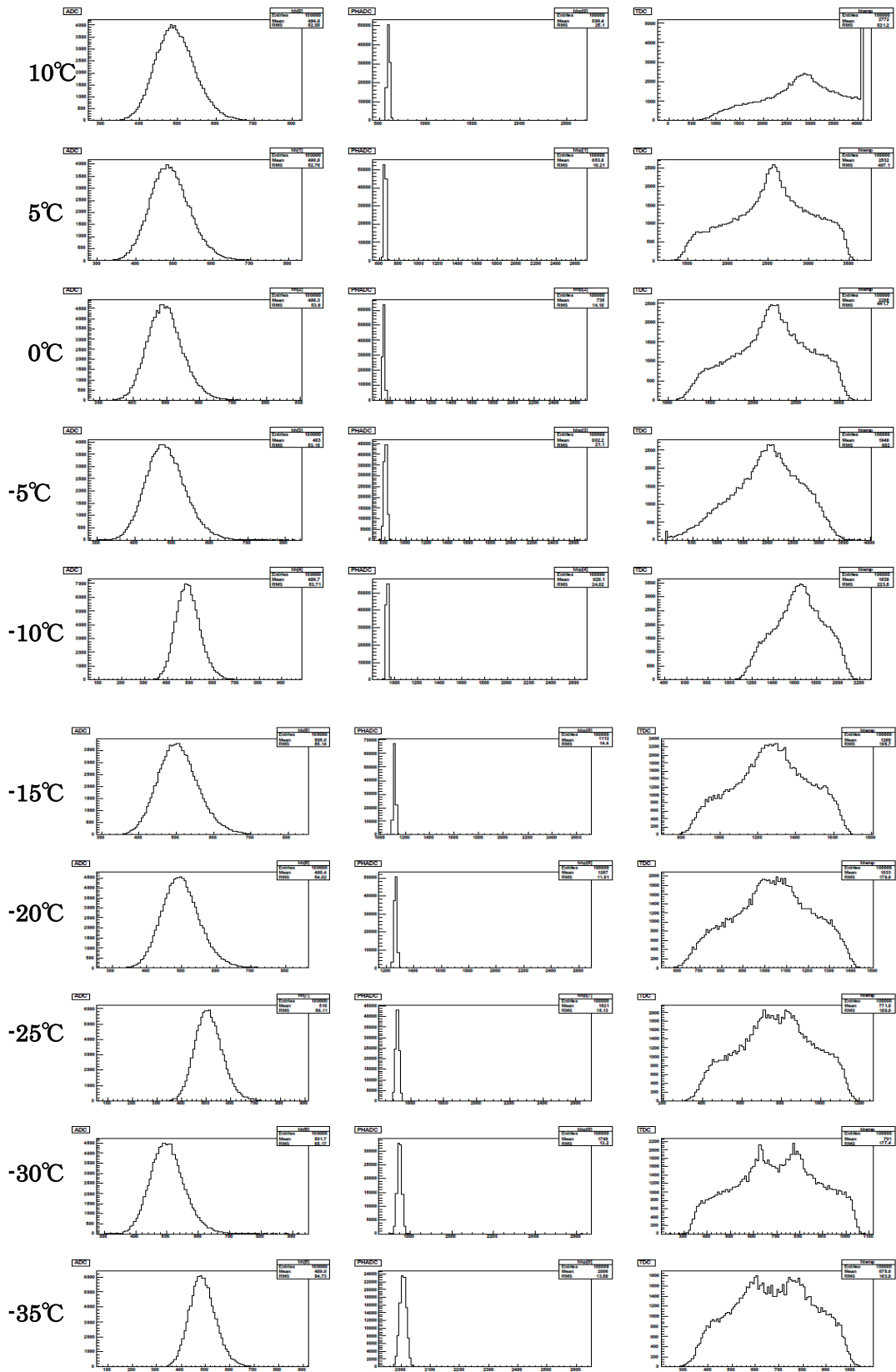
APD Gain



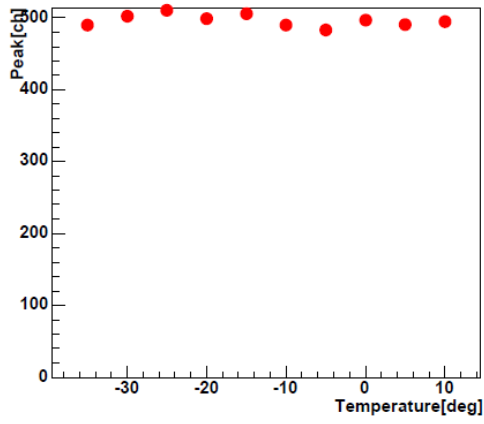
TDC RMS



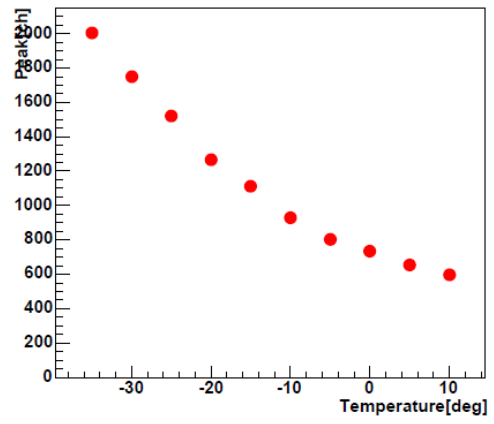
517nm



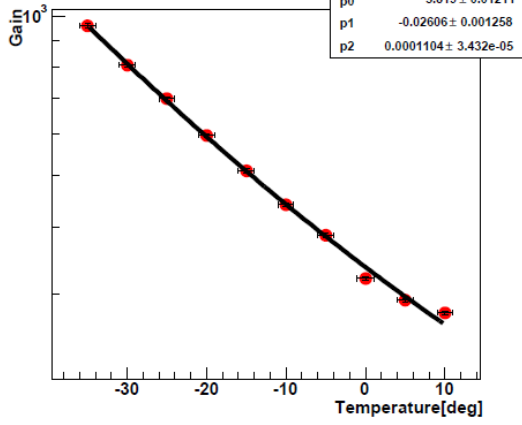
PMT Mean



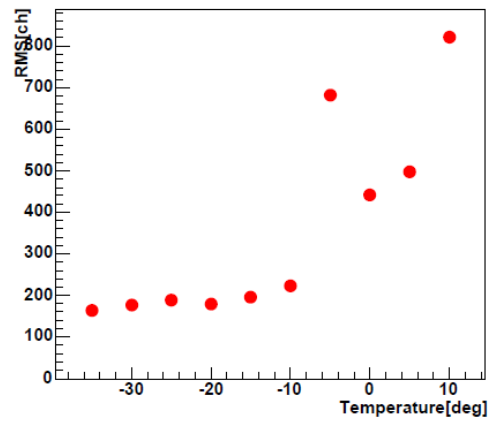
APD Mean



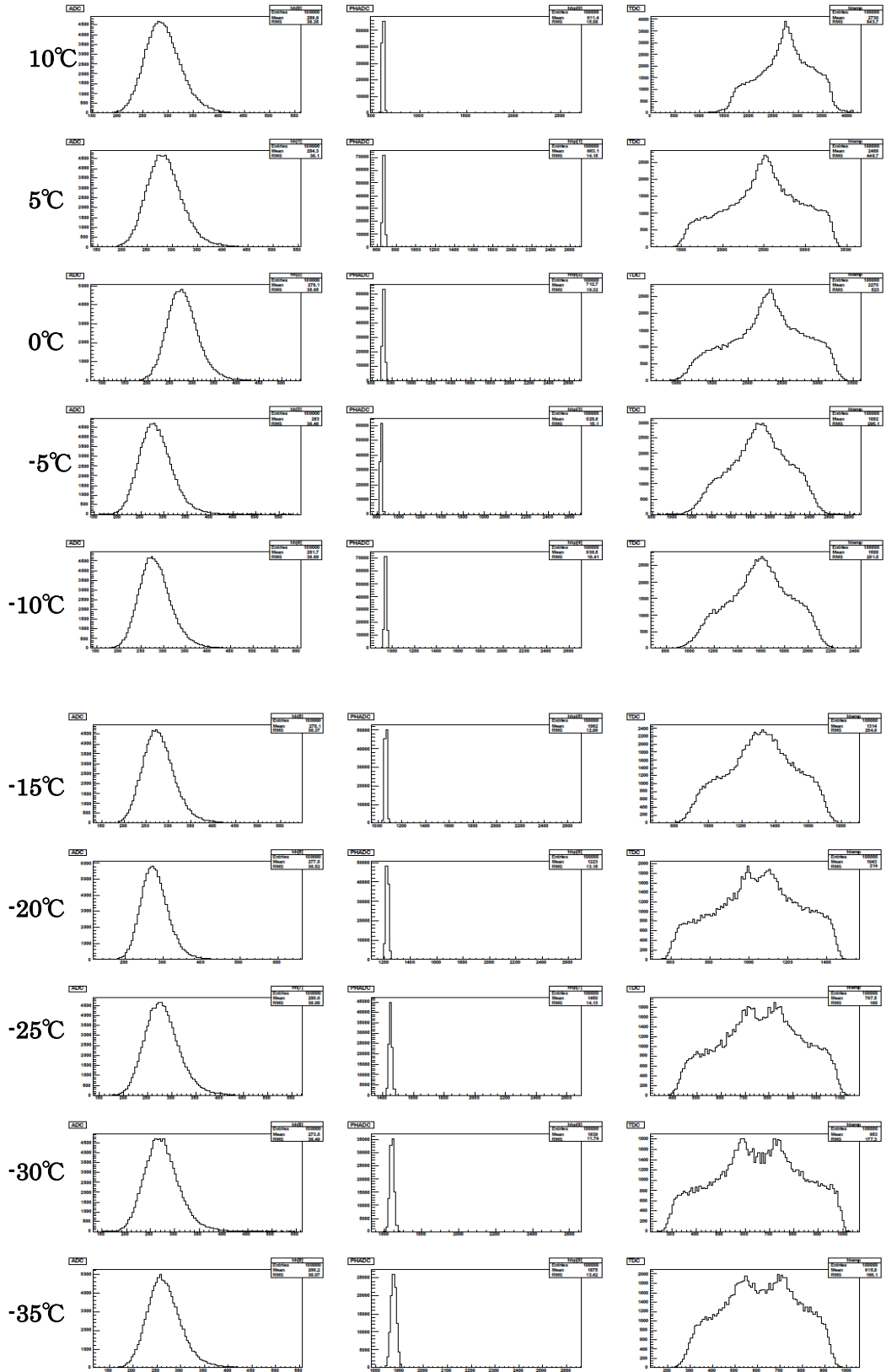
APD Gain



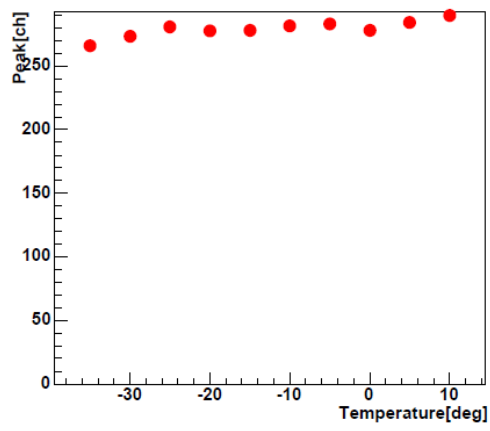
TDC RMS



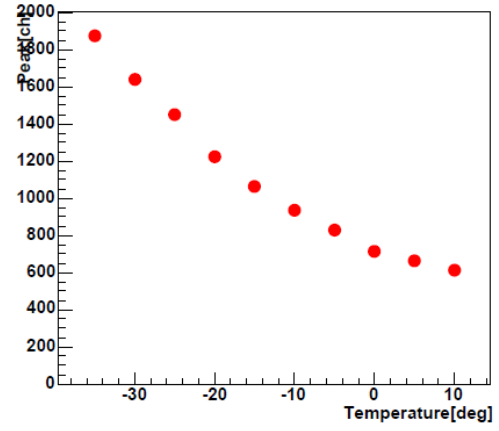
525nm



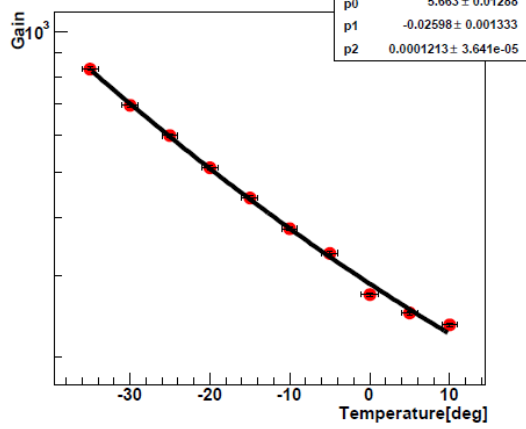
PMT Mean



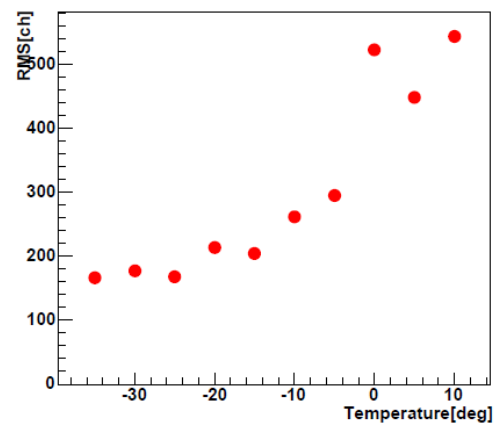
APD Mean



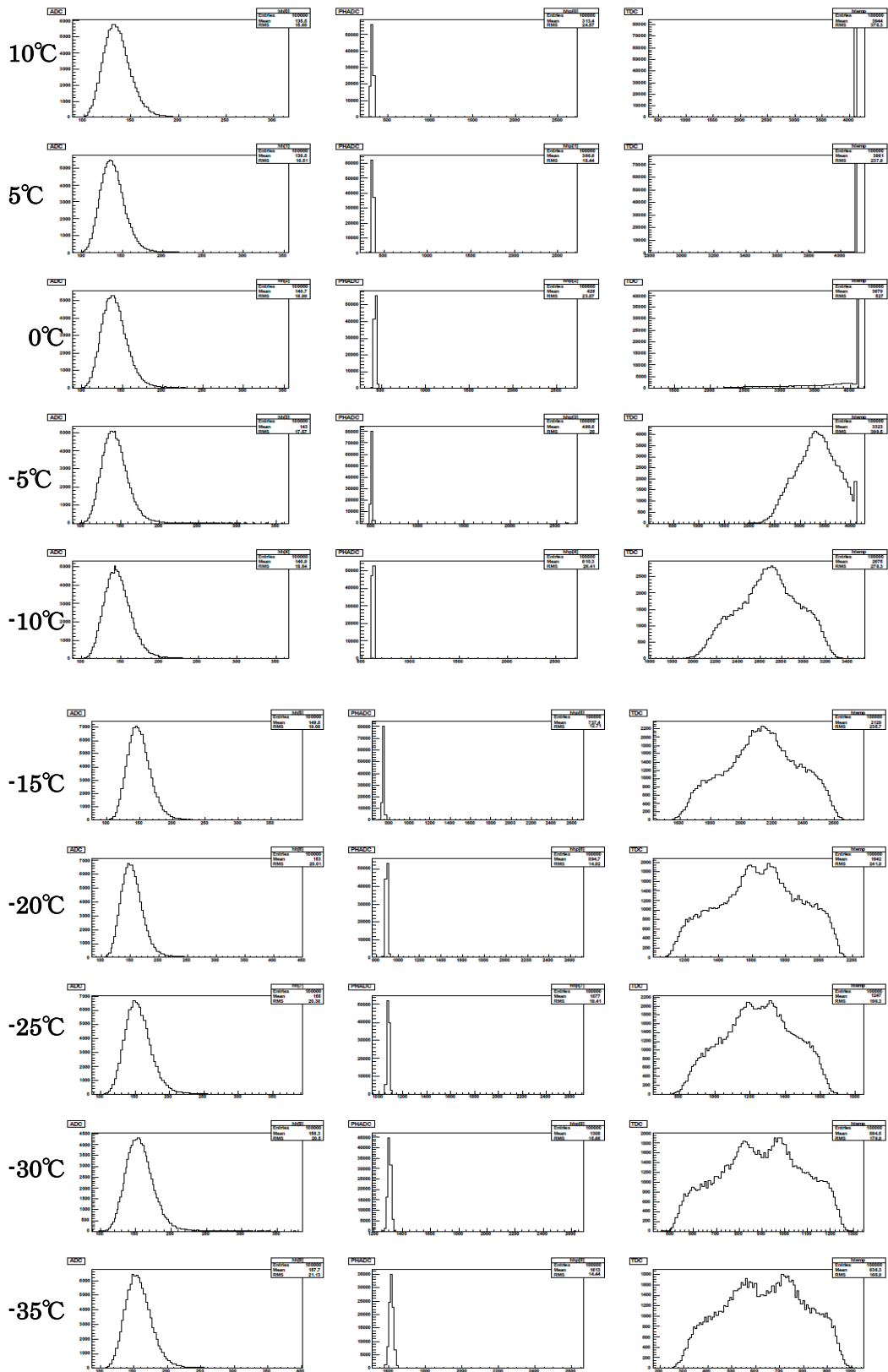
APD Gain



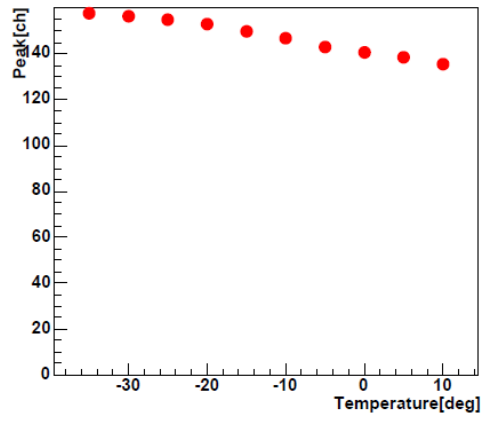
TDC RMS



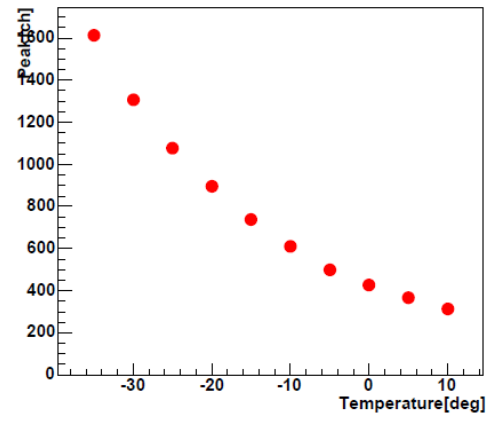
595nm



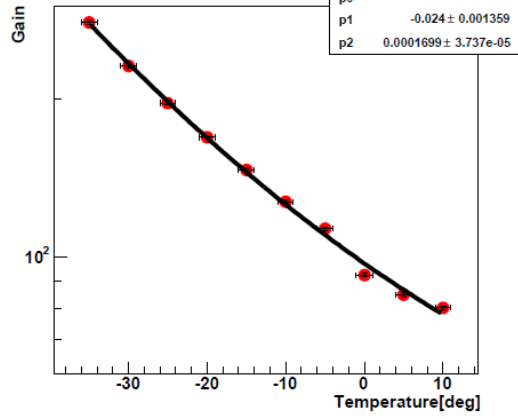
PMT Mean



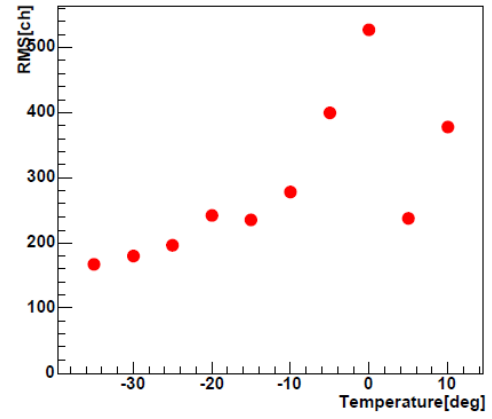
APD Mean



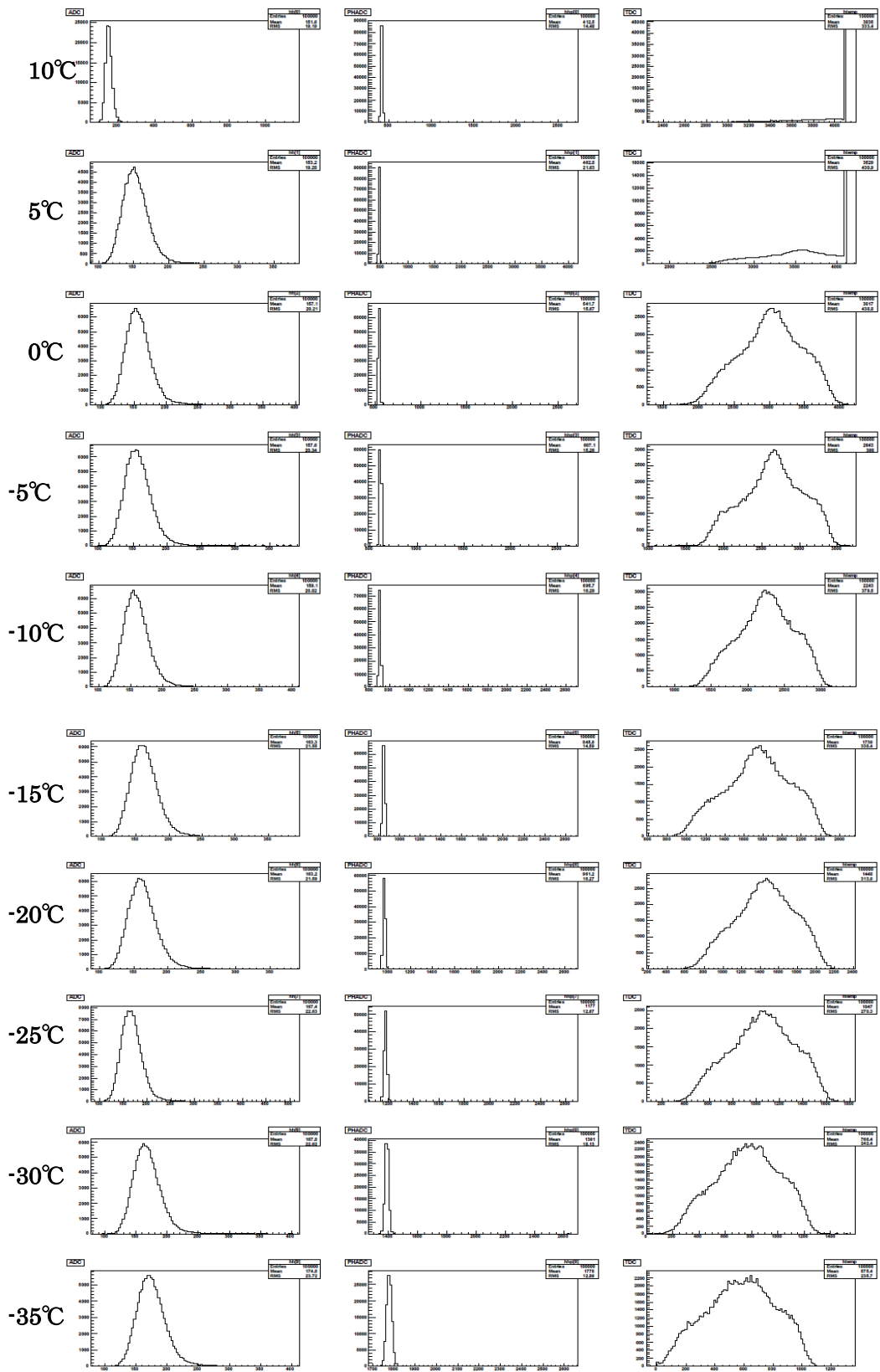
APD Gain



TDC RMS

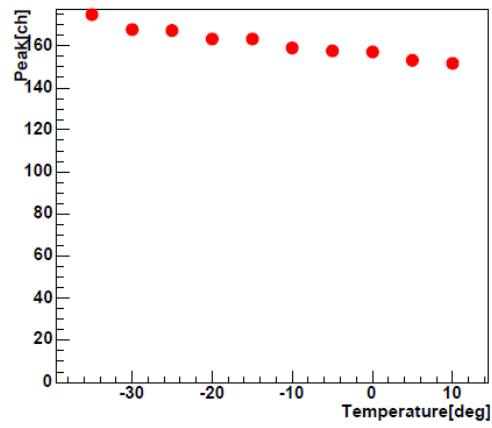


620nm

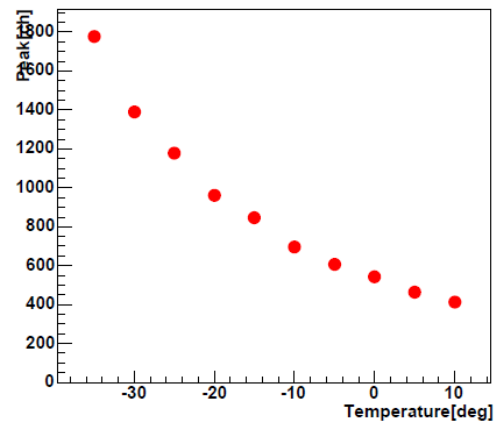




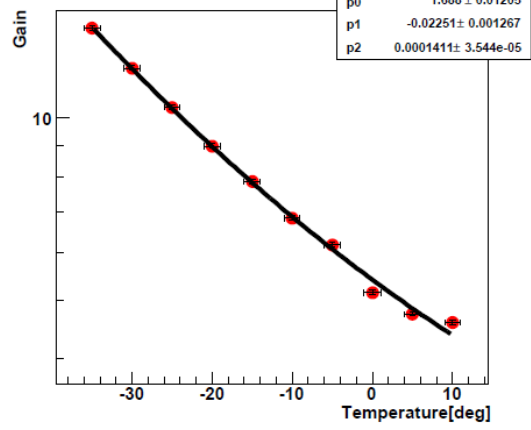
PMT Mean



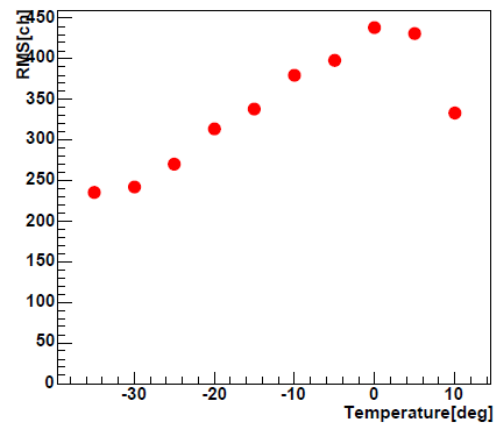
APD Mean



APD Gain



TDC RMS



660nm

