

2021年度 卒業論文

ハイパーカミオカンデ光検出精度向上のための  
8 cm光電子増倍管の評価

2021年1月31日

指導教員 西村康宏

慶応義塾大学

所属 理工学部物理学科西村研究室

学籍番号 61808465

佐々木鳳杜

## 要旨

ハイパーカミオカンデ検出器は、深さ 71 m、直径 68 m の円筒型の巨大水槽からなり、地下 650 m でニュートリノや陽子崩壊などの物理観測を行う。この検出器は、宇宙から飛来したニュートリノが水槽内の原子核または電子と衝突し、はじかれた電子が水中の光の速度を超えたときに円錐状に放出されるチェレンコフ光を光電子増倍管 (PMT) で検出している。ハイパーカミオカンデは、内水槽と外水槽の 2 つの光学的に独立した検出器からなる。内水槽の側面には約 40000 本の 50 cm 径 PMT が敷き詰められる予定である。この 50 cm 径 PMT の代わりに、一部を 8 cm 径 PMT を 19 本束ねた multi-PMT を使うことで測定精度を向上させる計画がある。

今回、8 cm 径 PMT に注目し、その測定精度を評価した。第一段階として波形取得などの 3 つの測定方法で幅広い光量により時間分解能を比較して、最良の結果を得る方法を検討した。1 光電子の光量では 1.3 ns、100 光電子の光量では 0.2 ns 程度の時間分解能を得ることができた。今回評価した方法によって時間分解能に大きな差はなかった。第二段階として、8 cm 径 PMT の検出効率を測定したところ、50 cm 径 PMT と比較して約 83 % の感度を得られた。PMT の出力は光量が大きいと飽和するため、飽和現象を調査した。-5 V 台までの十分な波高出力を確認でき、地磁気があっても飽和する波高がほぼ変わらないことを確認できた。最後に 4 つの PMT を 50 cm 四方に配置して、光源をその中心においた場合と、1 つの PMT の直上においた場合で、その観測データから位置をどのくらいの精度で見積もることができるかを調査した。中心においた場合、4 つの PMT から算出した測定精度は 12 cm であった。1 つの PMT の直上においた場合、4 つの PMT から算出した測定精度は 13 cm であった。

8 cm 径 PMT を複数使用し、大光量での分解能と飽和現象を検証したことにより、高性能である 8 cm 径 PMT の性能の一部を検証することができた。また観測結果から光源の位置精度を見積もり、口径に近い 10 cm 程度の分解能を得られた。今後、8 cm 径 PMT をハイパーカミオカンデに用いることにより、ニュートリノの検出精度を向上できると見込まれる。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>導入</b>	<b>3</b>
1.1	研究背景	3
1.2	ハイパーカミオカンデ概要	4
1.2.1	ニュートリノとは	4
1.2.2	ニュートリノ振動とは	4
1.2.3	陽子崩壊とは	5
1.2.4	CP 対称性の破れとは	5
1.2.5	ハイパーカミオカンデ実験の目的	5
1.2.6	光電子増倍管とは	6
1.2.7	ハイパーカミオカンデ検出器について	7
1.3	研究目的	8
<b>第 2 章</b>	<b>時間分解能の評価</b>	<b>9</b>
2.1	実験装置	9
2.1.1	8 cm 径 PMT	9
2.1.2	レーザー	11
2.1.3	高電圧電源	12
2.2	測定手法	14
2.2.1	閾値時間による解析	14
2.2.2	波形解析	15
2.2.3	ディスクリミネータ	18
2.3	解析結果	18
2.3.1	TDC によるアナログ波形の解析	18
2.3.2	TDC によるデジタル波形の解析	19
2.3.3	アナログ波形の波形解析の結果	24
2.3.4	デジタル波形の波形解析結果	29
2.3.5	結果をまとめ	34
<b>第 3 章</b>	<b>50 cm 径 PMT に対する 8 cm 径 PMT の評価</b>	<b>36</b>
3.1	目的	36
3.2	セットアップ	36
3.2.1	PMT	36
3.2.2	スケーラー	40
3.2.3	レーザー	41
3.3	検出効率の評価方法	41
3.4	結果	44
3.5	サチレーション	46

---

3.6	セットアップ	46
3.7	結果	48
<b>第4章</b>	<b>4つのPMTから位置を特定する</b>	<b>49</b>
4.1	目的	49
4.2	原理	49
4.2.1	基準となる時間のデータの取得	49
4.2.2	位置情報の見積もり	50
4.3	セットアップ	51
4.3.1	実験器具	51
4.3.2	セットアップ	52
4.4	結果	55
4.4.1	オフセットの決定	56
4.4.2	50 cm 四方にPMTを配置し、中心から50 cmの位置に光源を配置した場合	61
4.4.3	50 cm 四方にPMTを配置し、PMT3の真上50 cmの位置に光源を配置した場合	65
4.5	研究のまとめ	68
	謝辞	<b>69</b>
	参考文献	<b>69</b>

# 第1章 導入

## 1.1 研究背景

ニュートリノ研究は、岐阜県飛騨市の鉱山の地下で行われており、初代のカミオカンデ、現在観測を行っている世界最大の水チェレンコフ検出装置であるスーパーカミオカンデが大きな役割を果たしてきた。そのスーパーカミオカンデの後継としてハイパーカミオカンデは2027年から観測を開始する予定である。スーパーカミオカンデが直径 39.9 m、深さ 41.4 m の円筒形状のタンクを 5 万トンの超純水で満たしているのに対し、現在建設中のハイパーカミオカンデは、直径 68 m、深さ 71 m の円筒形状のタンクを 26 万トンの超純水で満たす予定である。スーパーカミオカンデに対してハイパーカミオカンデは約 10 倍の有効体積を持つ。

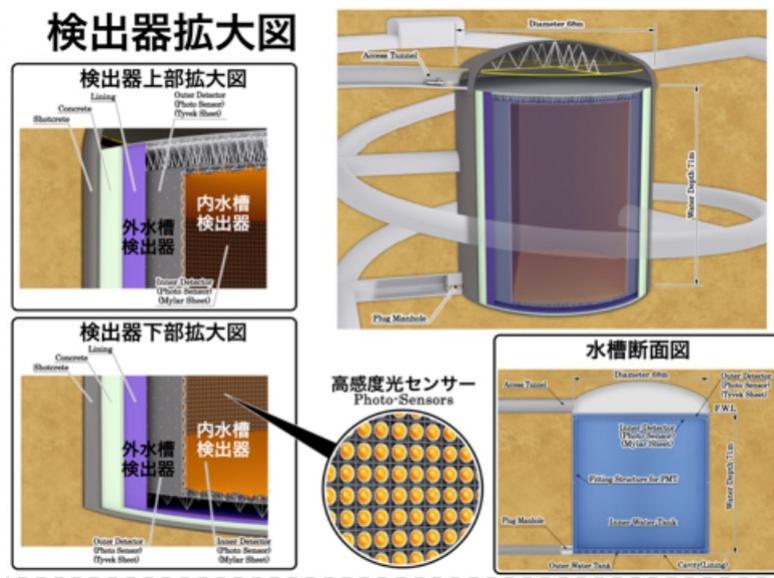


図 1.1: ハイパーカミオカンデの概要

またスーパーカミオカンデでは内水槽に 50 cm 径 PMT、外水槽に 20 cm 径 PMT が採用されていたのに対し、ハイパーカミオカンデでは内水槽に 50 cm 径 PMT、外水槽に 8 cm 径 PMT が採用される予定である。現在採用予定である 50 cm 径 PMT の構造の改良により、ハイパーカミオカンデはスーパーカミオカンデに対し、約 1.9 倍の感度を実現しうる。さらに内水槽には 8 cm 径を 19 本用いる multi-PMT で検出精度をより向上する計画がある。

## 1.2 ハイパーカミオカンデ概要

### 1.2.1 ニュートリノとは

宇宙を構成する身の回りの物質は、クォークとレプトンで形成されている。図 1.2 にその種類をまとめた。

	第一世代 (first)	第二世代 (second)	第三世代 (third)
レプトン (LEPTON)	電子ニュートリノ	ミューニュートリノ	タウニュートリノ
	電子	ミューオン	タウ
クォーク (QUARK)	アップ	チャーム	トップ
	ダウン	ストレンジ	ボトム

図 1.2: クォークとレプトンの種類

第一世代レプトンの 1 つは電子で、そのペアになっているのが電子ニュートリノだ。電子の電荷は -1 で、電子ニュートリノの電荷は 0 である。ニュートリノは電荷を持たないため、地球すら容易に通過してしまうほど他の物質と反応しない。そのため観測は非常に難しい。

そもそもニュートリノは原子核のベータ線のエネルギー分布を見て、電子のエネルギーが減衰していることから着想され、その約 26 年後に発見された。その後太陽から飛来するニュートリノが観測され、カミオカンデグループがその太陽ニュートリノの観測を開始し、その 1 カ月後に、超新星爆発からのニュートリノを観測した。その後、カミオカンデの後継であるスーパーカミオカンデが建設され、ニュートリノ振動の観測によりニュートリノには重さがあるということを発見した。

### 1.2.2 ニュートリノ振動とは

ニュートリノには重さによって 3 種類の分類がある。この異なる質量のニュートリノが混ざり合って、電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノの 3 種類のフレーバーによる分類ができる。重さの違うニュートリノが混ざり合うことをニュートリノ混合という。

ニュートリノは「粒子」であると同時に「波」としての性質ももつため、異なる質量を持つニュートリノは、異なる振動数を持つ波として、空間を伝播する。

ニュートリノのフレーバーは、質量の決まった波の重ね合わせとなり、ニュートリノが空間を飛ぶ間に波の位相が変化し、フレーバーの種類が移り変わる。この現象をニュートリノ振動といい、ニュートリノが質量を持ち、かつゼロではないニュートリノ混合がある時に起こる現象だ。

ニュートリノ振動は 1998 年にスーパーカミオカンデ実験で発見された。宇宙線が大気と衝突して生成される大気ニュートリノの中に含まれるミューニュートリノを観測すると、地球の裏側を通過してくるミューニュートリノの数が、上からくるミューニュートリノの数の半分しかなかった。これは、ミューニュートリノが地球の内部を通過する間にタウニュートリノに変化したためである。ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときのみでおこるため、この発見は

ニュートリノにわずかながら質量があることが証明した。

### 1.2.3 陽子崩壊とは

陽子はクォークの中で最も軽いアップクォークが2つと次に軽いダウンクォーク1つの組み合わせで、電荷1をもつ、バリオンの1種である。そのためバリオンの中で陽子は最も軽い。中性子は陽子よりわずかに重いため崩壊するが、陽子は崩壊しないと考えられてきた。

しかし、電磁気力、強い力、弱い力の3つを統一的に説明する大統一理論では陽子の崩壊が予言される。最も探索されている崩壊は(1.1)式のようなものである。

$$p \rightarrow e^+ + \pi^- \quad (1.1)$$

予想される陽子の寿命はとても長く、理論上崩壊があればスーパーカミオカンデでも観測は可能だが、現状観測されていない。そこで、スーパーカミオカンデの約10倍の体積をもつハイパーカミオカンデにおいて、陽子崩壊を観測することが期待されている。

### 1.2.4 CP 対称性の破れとは

粒子にはそれと反対の電荷を持つ反粒子と呼ばれるパートナーが存在する。ビッグバンによりできた宇宙初期、バリオンと反バリオンは同量存在していたと考えられるが、現在の宇宙ではバリオンが圧倒的に多く、反バリオンはほとんど観測されない。この非対称性がおきるにはいくつかの条件を必要とする説が知られており、その1つがCP対称性の破れだ。

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とは鏡像対称性である。物質と反物質の非対称性を説明するには、バリオンにおいてCP対称性が破れている必要がある。すでにバリオン自体のCP対称性が破れていることは知られているが、その破れは非常に小さく、これだけでは宇宙の物質、反物質の非対称性は説明できない。

バリオンのCP非対称性の起源はニュートリノのCP対称性も大きく寄与していると考えられている。ニュートリノと反ニュートリノにおいて、ニュートリノ振動の起きる確率に差があることが検証されれば、ニュートリノにおいてのCP対称性の破れが示される。

ハイパーカミオカンデ実験では茨城県東海村のJ-PARC加速器によってつくられたミュオンニュートリノビーム及び反ミュオンニュートリノビームをハイパーカミオカンデに打ち込み、それが電子ニュートリノもしくは反電子ニュートリノへと変化する確率の差を調べようと計画している。

### 1.2.5 ハイパーカミオカンデ実験の目的

もともと宇宙創成の瞬間は、現在知られている強い力、弱い力、電磁気力の3つの力が統一されていたとする大統一理論という考え方がある。大統一理論の検証には非常に高いエネルギーが必要なので、衝突型加速器実験で直接調べることは不可能である。しかしハイパーカミオカンデ実験では、非常にまれな陽子崩壊を探索することにより、直接大統一理論を検証できる。

ハイパーカミオカンデは巨大検出器であるため、現行のスーパーカミオカンデの 100 年分のデータを約 10 年で得ることができる。よって、これまで見えなかった素粒子のまれな現象や、対称性のわずかな破れの測定を可能にする。ハイパーカミオカンデ実験が CP 対称性の破れと陽子崩壊探索の他に目的としているものを紹介する。

ニュートリノ質量の順番の決定も目的の 1 つである。最近までニュートリノには質量がないと考えられてきたが、ニュートリノ振動の発見により、ニュートリノには 3 種類の質量があることが分かった。太陽ニュートリノ、原子炉からのニュートリノ、大気ニュートリノの観測から、それぞれの二乗差はわかったが、二乗差の絶対値しか測れないため、どちらが大きいかはわかっていない。これは、ニュートリノ質量階層性問題と呼ばれている。これには正常階層と逆階層の二種類があり、大統一理論は正常階層を予言している。宇宙初期を理解するためにこの決定は重要であるといえる。また、ニュートリノ以外のレプトンはそれぞれ反粒子と性質が異なっているが、ニュートリノは性質に違いがない可能性がある。質量階層性の決定はこの問題の解決にも深くかかわっている。

地球の裏側の大気で生成され、地球内部を通過して検出器まで飛んでくるニュートリノは地球の物質の影響を受け、ミューオンニュートリノから電子ニュートリノへ、反ミューオンニュートリノから反電子ニュートリノへ変化する。その変化の割合は質量階層性によって変わり、正常階層の場合は電子ニュートリノの出現が強められ、逆階層の場合は反電子ニュートリノの出現が強められる。質量階層による変化は、事象数にして約 5 % から 15 % だが、ハイパーカミオカンデはこの小さな変化の測定を可能にする。

ニュートリノそのものの性質を調べるだけでなく、宇宙から飛来するニュートリノの観測も行い、ニュートリノを生成するものの研究も目的としている。太陽中心部における核融合反応の際に放出される太陽ニュートリノや、超新星爆発の際に放出されるニュートリノ、宇宙全体に蓄積されている超新星背景ニュートリノの観測はこれにあたる。また、暗黒物質からのニュートリノが飛来する可能性もあり、暗黒物質の探索にもつながる。

### 1.2.6 光電子増倍管とは

前述したようにニュートリノは電荷を持たないため、観測するのが難しい。しかしニュートリノはまれに検出器中の水中の電子や原子核と衝突し、電子やミューオンを放出する。電子やミューオンは電荷を持つため、水中の光速より速くはじかれたときにチェレンコフ光という光を円錐状に放出する。これを検出するのが光電子増倍管である。以下この光電子増倍管を PMT (Photomultiplier Tube) と表記する。

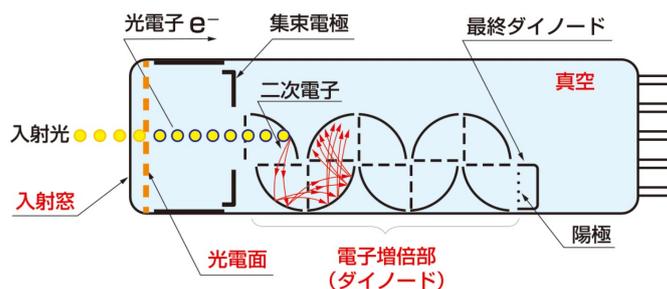


図 1.3: PMT の原理

PMT の内部構造は図 1.3 のようになっている。表面のガラス面には光電面が形成されており、光が入射した場合、光電面で光は電子に変換される。PMT には高い電圧がかかっていて、その電圧により電子は集束電極に向かって加速される。その奥にあるダイノードに衝突した際に二次電子が放出される。この衝突を繰り返すことで、最終的に電子数を約 100 万倍に増倍できる。

### 1.2.7 ハイパーカミオカンデ検出器について

前述しているように、ハイパーカミオカンデは内水槽に 50 cm 径 PMT、外水槽に 8 cm 径 PMT を採用する予定だ。観測のメインは内水槽で行われるため、外水槽は宇宙線が通ったことを確認するなど、高い検出効率を必要としない。よってカバーしなければいけない面積は全体の 1 % 程度である。よって、そこまで大きな口径の PMT は必要ない。外水槽に 8 cm 径 PMT が採用されるのには、まず 8 cm 径 PMT のほうがコストがかからないからだ。またガラス面に比例して大きくなるダークレートを抑えることができる。カバーできる面積が小さいという問題は、波長変換アクリルで PMT の周りを覆うことでカバーしている。

さらに、内水槽の 50 cm 径 PMT の一部は図 1.4 に示すように multi-PMT という、19 個の 8 cm 径 PMT を 50 cm 径内に敷き詰めたようなものを採用する予定だ。multi-PMT の利点としては、ガラス面に対して垂直に 19 個の PMT が配置されているため、50 cm 径 PMT に比べて、位置と角度の情報が正確に得られ、また時間分解能もよくなることも利点だ。以上の理由によりハイパーカミオカンデ実験に 8 cm 径 PMT を採用することが高い精度で観測することに繋がる。



図 1.4: multi-PMT

### 1.3 研究目的

カミオカンデ実験で 8 cm 径 PMT が使われるのは初めての試みである。そこで、8 cm 径 PMT の性能を知ることが本研究の大きな目的である。具体的には大きな光量での性能や時間分解能、サチレーションを知ることである。また、そこから時間分解能を最大限に引き出す測り方を知ることである。最終的には、4 つの PMT を用いた検出精度の検証を行うことである。

## 第2章 時間分解能の評価

### 2.1 実験装置

#### 2.1.1 8 cm 径 PMT

時間分解能の評価実験で使用した PMT は図 2.1、2.2 の 8 cm 径 PMT2 つである。その性能を表 2.1 にまとめた。

表 2.1: 使用した 2 つの PMT の性能

型番	BC0592	BC0679
TYPE	R14374-Y009	R14374-Y009
高電圧 / V	1250	1250
QE /	27.5	27.5
時間分解能 / ns	1.3	1.3



図 2.1: BC0592



図 2.2: BC0679

## 2.1.2 レーザー

今回光源として使用したのは、図 2.3 の浜松フォトニクス社製のレーザーで型番は C8898 である。



図 2.3: 使用したレーザー

また、光量を調節するために図 2.4 の ANDO 社製の AQ1227 型のアテネータを使用した。



図 2.4: 使用したアテネータ

### 2.1.3 高電圧電源

PMT の構造から、光電子を観測するためには高電圧を PMT にかける必要がある。今回の実験では BC0592 には正極の高電圧電源を、BC0679 には負極の高電圧電源をかけた。高電圧電源をかけるときに使用したのは、正極の高電圧電源は図 2.5 の C.A.E.N 社製の SY527 型、負極の高電圧電源は図 2.6 の REPIC 社製の RPH-034 型の高電圧電源を使用した。



図 2.5: 正極の高電圧電源 (C.A.E.N 社製 SY527)

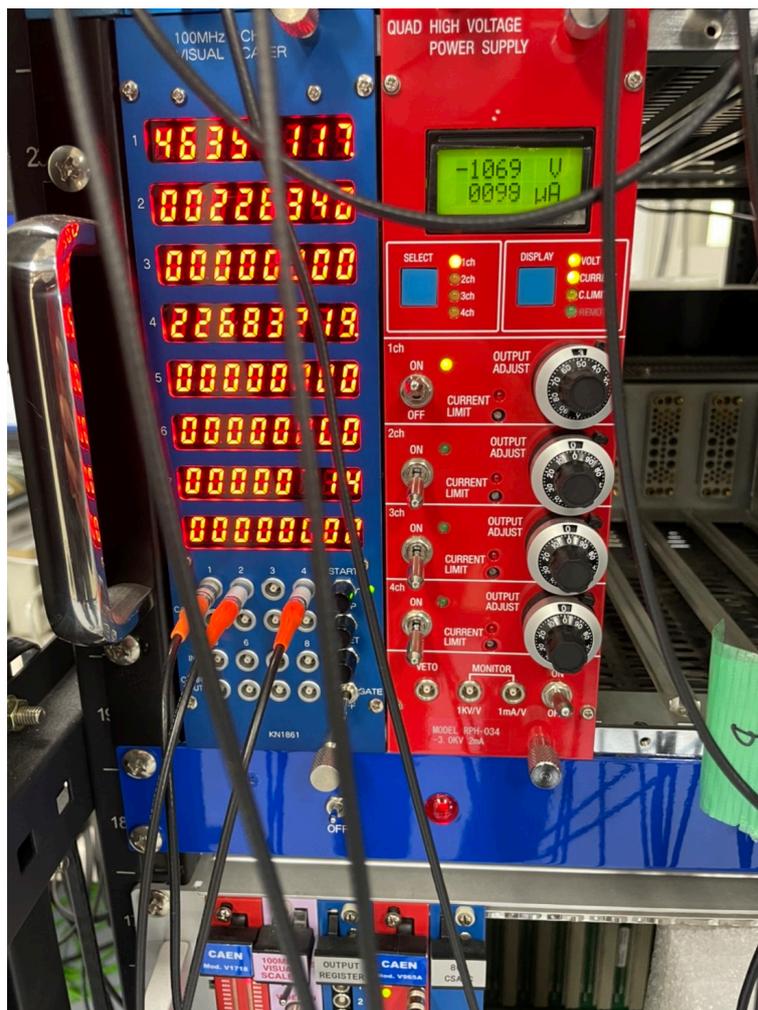


図 2.6: 負極の高電圧電源 (REPIC 社製 RPH-034)

## 2.2 測定手法

暗室の中に PMT を 2 つおき、そのそれぞれにレーザーを入射した。レーザーはアテネーターを利用して、光量を調節した。得られたシグナルを以下の方法で計測した。

### 2.2.1 閾値時間による解析

この解析で使用したのは CAEN 社製の V1290 の TDC というものである。TDC の原理について説明する。

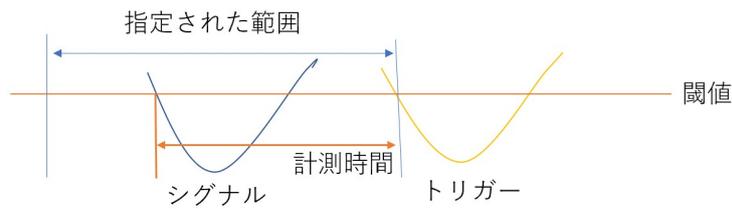


図 2.7: TDC の原理

まずトリガーとなる波が必要である。このトリガーとなる波が設定された閾値を超えた瞬間が基準点となる。この基準点から設定された範囲の時間だけさかのぼり、その時間の範囲にシグナルが閾値を超えると、基準点からシグナルが閾値を超えた瞬間までの時間を計測する。なお、この間に入ったシグナルであれば複数でも計測することができる。

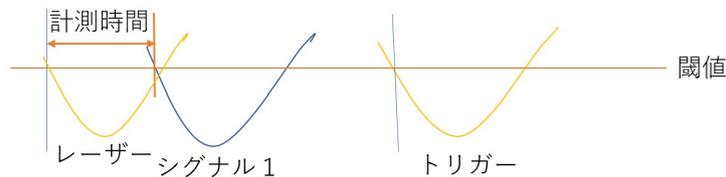


図 2.8: TDC の計測方法

本実験では入射しているレーザーの波をトリガーとしている。しかし前述したようにトリガーはシグナルより後に入射する必要があるため、レーザーの波を2つにわけ、片方をゲートジェネレータを通すことで遅らせ、もう一方はシグナルとしてTDCに入れた。2つのPMTから観測される波もシグナルとしてTDCに入れ、レーザーのシグナルとの時間差を観測した。

### 2.2.2 波形解析

観測された波形をパソコンに取り込み、解析ソフトの root により波形を解析した。PMT が出力した波形からトリガーの信号が閾値を超えてからシグナルの信号が閾値を超えるまでの時間の分布を導き、それをガウス分布でフィッティングし、時間分解能を得る。

解析手順は以下の通りである。

1. 取り込んだ波形からピークの波高値を測定。

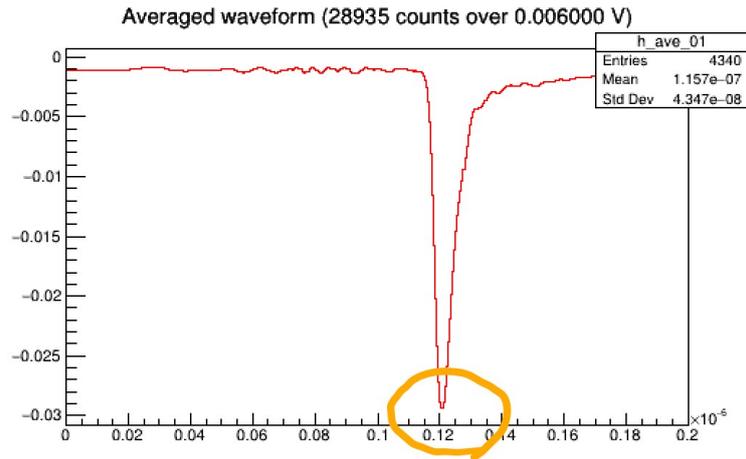


図 2.9: 取り込んだシグナルの波形。ピークの波高値を見積もる

図 2.9 では円で囲っている位置である。

2. シグナルの波高の最小値のヒストグラムから、1 光電子光量の範囲を選択した。図 2.10 は縦軸がエントリー数、横軸が波高の最小値となっている。

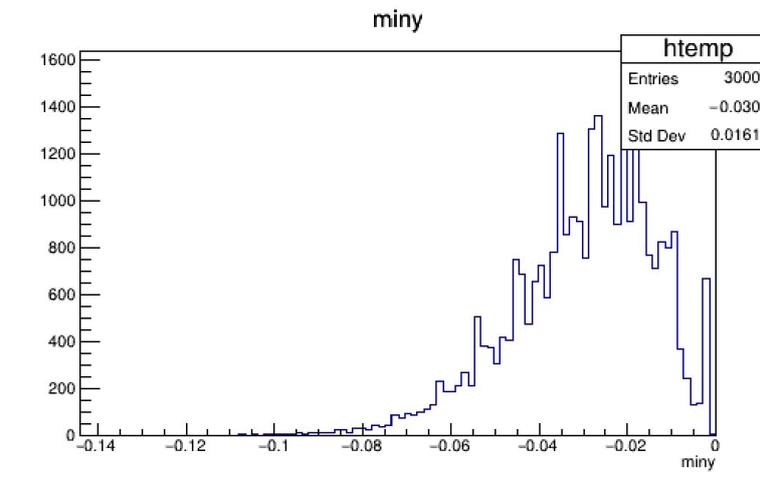


図 2.10: 1 光電子光量の波高の最小値の選択

3. この範囲で、トリガーの信号とシグナルの波形が閾値を超えるまでの時間の差を図 2.11 にしめた。

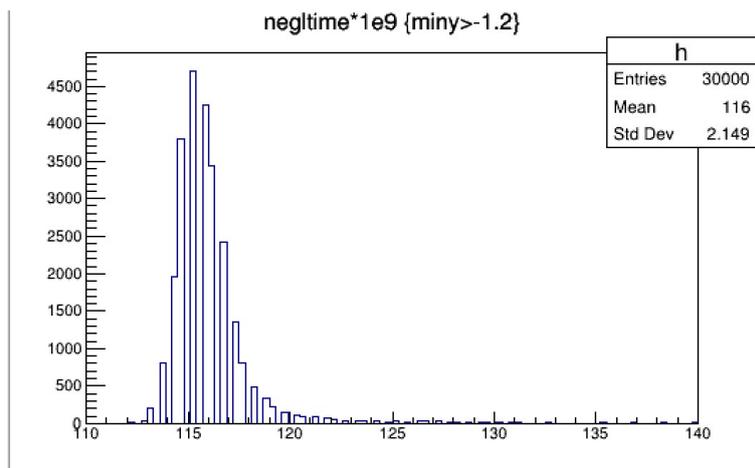


図 2.11: シグナルが閾値を超えるまでの時間

4. 図 2.11 の時間分布をガウス分布のグラフでフィッティングした。このうち sigma の数値を時間分解能として得る。

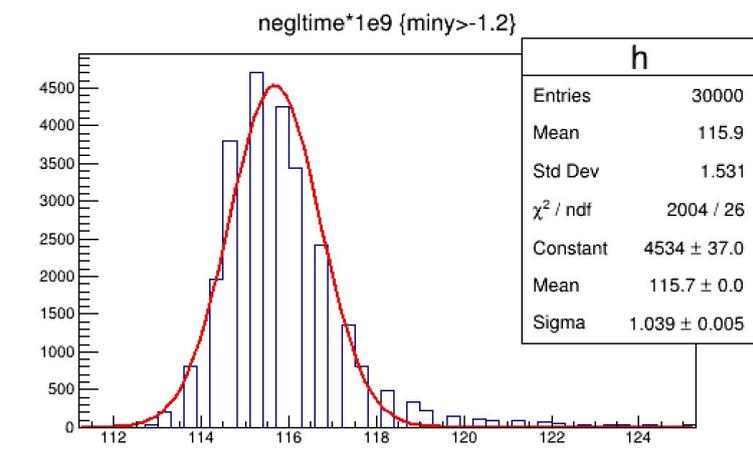


図 2.12: シグナルが閾値を超えるまでの時間分布をガウス分布でのフィッティング

5. 時間分布をガウス分布でフィッティングした結果のうち Sigma の数値が時間分解能に当たる。

### 2.2.3 ディスクリミネータ

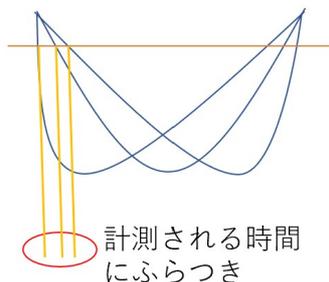


図 2.13: アナログ波形の場合の計測時間

実際に PMT で観測される波形はアナログ波形であるが、観測される光電子はそれぞれ違った波形を持って観測される。大きい光量では波形が平均化され安定しているが、小さい光量の場合波形が安定せず、ふらつきが大きくなる可能性がある。そのため、ディスクリミネータを使用してデジタル波形に変換した場合も計測した。

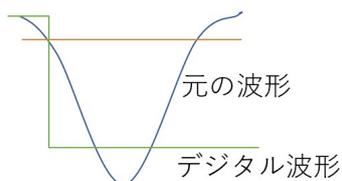


図 2.14: ディスクリミネータによる波形の変換

ディスクリミネータとは、閾値と幅を設定し、閾値を超えた時点からアナログ波形をデジタル波形に変える装置である。

ディスクリミネータの閾値を低く設定することで、波の立ち上がりの瞬間を計測することができるためふらつきが小さくなる。よってこの時間分解能の計測では、アナログとデジタルの 2 つの方法により解析した。

## 2.3 解析結果

光量はおおよそ 1 光電子に相当する 6 mV、3 光電子に相当する光量である 20 mV、10 光電子に相当する光量である 60 mV、100 光電子に相当する光量である 600 mV で観測した。

### 2.3.1 TDC によるアナログ波形の解析

tdc によるアナログ波形の解析では、波形が不安定なためうまく時間分解能を解析することはできなかった。

### 2.3.2 TDC によるデジタル波形の解析

まず 1 光電子に相当する光量である 6 mV の光量の光を BC0592、BC0679 の 2 つの PMT に入射し、そのシグナルをディスクリミネータによって、デジタル波形に変換した。そのデジタル波形を TDC によって解析した結果を示す。BC0592 のデジタル波形は tdcL1 として観測され、トリガーとなるレーザーの入射光は tdcL16 として観測されている。よって tdcL1 から tdcL16 を引いた値が、トリガーが閾値を超えてからシグナルが閾値を超えるまでの時間となる。その時間分布をガウス分布でフィッティングした。

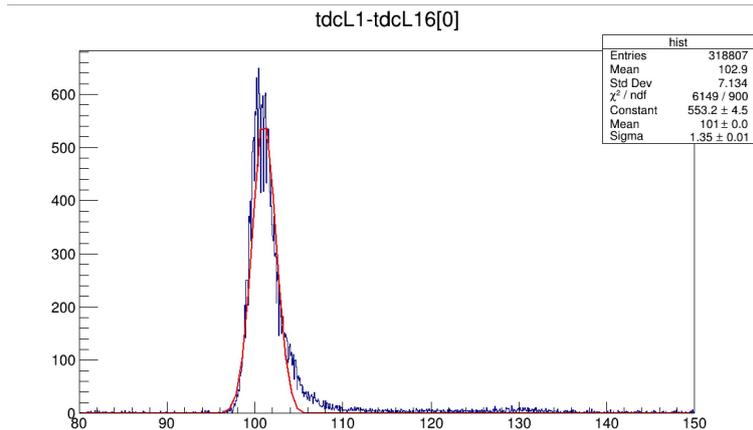


図 2.15: 光量 6 mV の光を入射したときの BC0592 の時間分布と、ガウス分布でフィッティングした結果

時間分布をガウス分布でフィッティングした結果、BC0592 の 6 mV の光を入射した場合の時間分解能は図 2.15 に示すように 1.35 ns だった。

同様に、BC0679 のデジタル波形は tdcL2 として観測されるため、tdcL2 から tdcL16 を引いた値が、トリガーが閾値を超えてからシグナルが閾値を超えるまでの時間となる。その時間分布をガウス分布でフィッティングした。

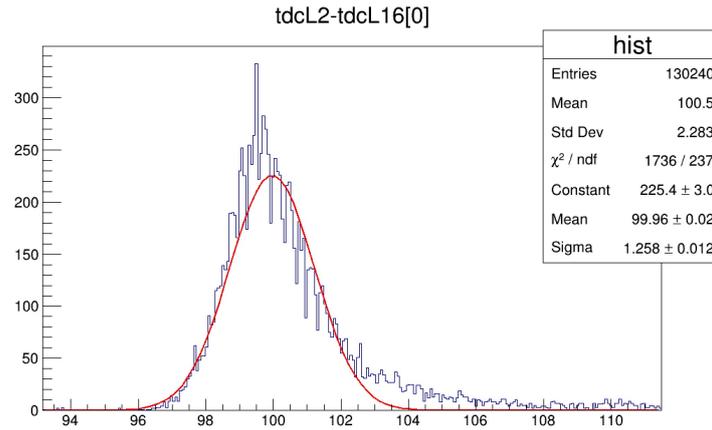


図 2.16: 光量 6 mV の光を入射したときの BC0679 の時間分布と、ガウス分布でフィッティングした結果

時間分布をガウス分布でフィッティングした結果、BC0679 の 6 mV の光を入射したときの時間分解能は図 2.16 に示すように 1.258 ns だった。

次に 3 光電子に相当する光量である 20 mV の光量の光を BC0592、BC0679 の 2 つの PMT に入射した。6 mV 同様、ディスクリミネータによってシグナルはデジタル波形として出力される。BC0592 の波形は tdcL1 として観測されている。その時間分布をガウス分布によってフィッティングした。

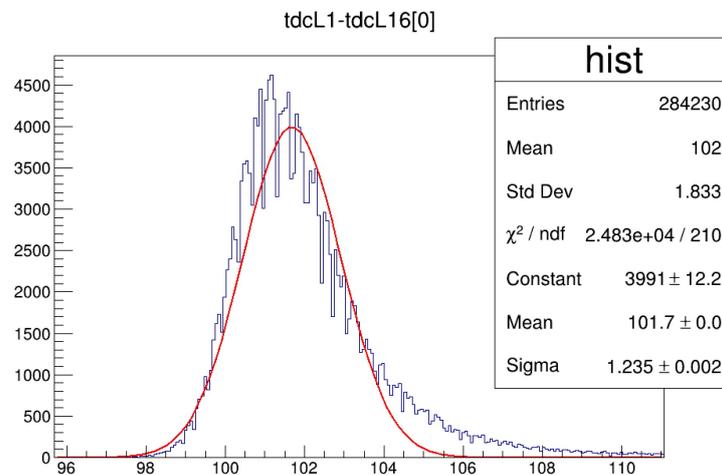


図 2.17: 光量 20 mV の光を入射したときの BC0592 の時間分布と、ガウス分布でフィッティングした結果

時間分布をガウス分布でフィッティングした結果、BC0592 の 20 mV の光を入射したときの時間分解能は図 2.17 に示すように 1.235 ns だった。

同様にして、BC0679 のデジタル波形は tdcL2 として観測されるため、tdcL2 から tdcL16 を引いた値が、トリガーが閾値を超えてからシグナルが閾値を超えるまでの時間となる。その時間分

布をガウス分布でフィッティングした。

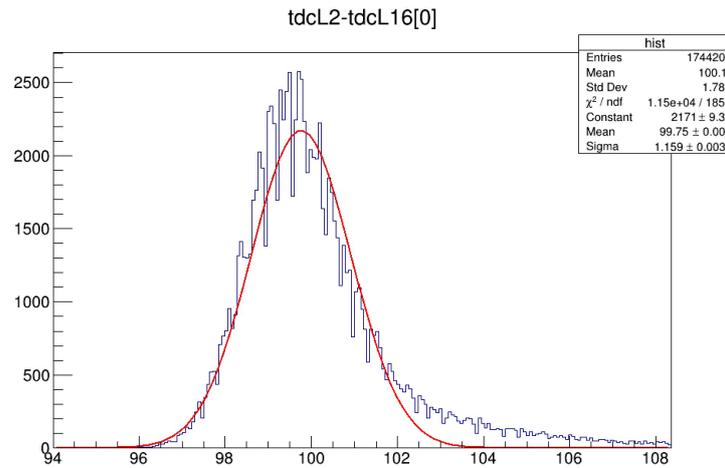


図 2.18: 光量 20 mV の光を入射したときの BC0679 の時間分布と、ガウス分布でフィッティングした結果

時間分布をガウス分布でフィッティングした結果、BC0679 の 20 mV の光を入射したときの時間分解能は図 2.18 に示すように 1.159 ns だった。

10 光電子に相当する光量である 600 mV の光量の光を BC0592、BC0679 の 2 つの PMT に入射し、そのシグナルをディスクリミネータによって、デジタル波形に変換した。そのデジタル波形を TDC によって解析した結果を示す。BC0592 のデジタル波形は tdcL1 として観測され、トリガーとなるレーザーの入射光は tdcL16 として観測されている。よって tdcL1 から tdcL16 を引いた値が、トリガーが閾値を超えてからシグナルが閾値を超えるまでの時間となる。その時間分布をガウス分布でフィッティングした。

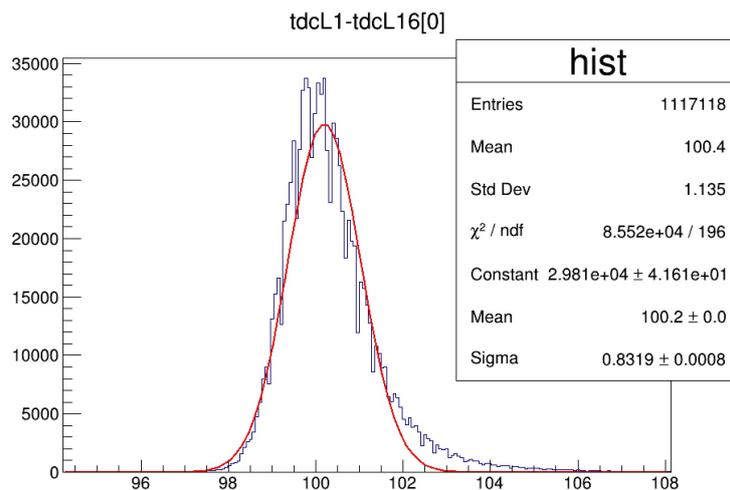


図 2.19: 光量 60 mV の光を入射したときの BC0592 の時間分布と、ガウス分布でフィッティングした結果

時間分布をガウス分布でフィッティングした結果、BC0592 の 60 mV の光を入射したときの時間分解能は図 2.19 に示すように 0.8319 ns だった。

同様に、BC0679 のデジタル波形は tdcL2 として観測されるため、tdcL2 から tdcL16 を引いた値が、トリガーが閾値を超えてからシグナルが閾値を超えるまでの時間となる。その時間分布をガウス分布でフィッティングした。

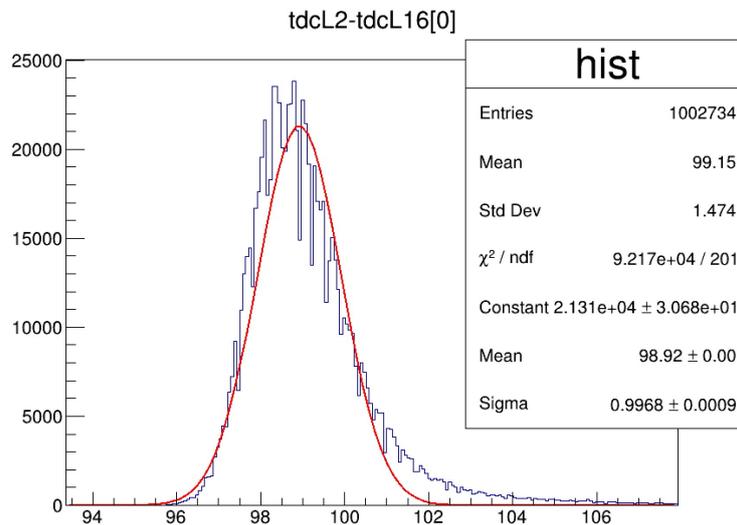


図 2.20: 光量 60 mV の光を入射したときの BC0679 の時間分布と、ガウス分布でフィッティングした結果

時間分布をガウス分布でフィッティングした結果、BC0679 の 60 mV の光を入射したときの時間分解能は図 2.20 に示すように 0.9968 ns だった。

10 光電子に相当する光量である 600 mV の光量の光を BC0592、BC0679 の 2 つの PMT に入射し、そのシグナルをディスクリミネータによって、デジタル波形に変換した。そのデジタル波形を TDC によって解析した結果を示す。

BC0592 のデジタル波形は tdcL1 として観測され、トリガーとなるレーザーの入射光は tdcL16 として観測されている。よって tdcL1 から tdcL16 を引いた値が、トリガーが閾値を超えてからシグナルが閾値を超えるまでの時間となる。その時間分布をガウス分布でフィッティングした。

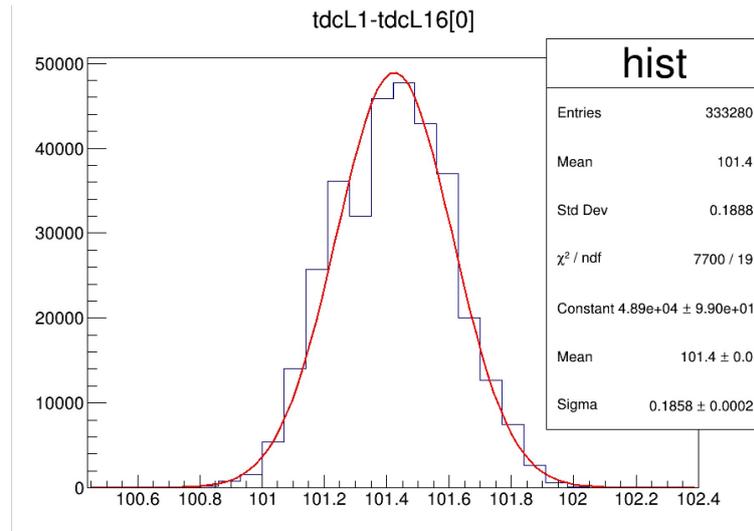


図 2.21: 光量 600 mV の光を入射したときの BC0592 の時間分布と、ガウス分布でフィッティングした結果

時間分布をガウス分布でフィッティングした結果、BC0592 の 600 mV の光を入射したときの時間分解能は図 2.21 に示すように 0.1858 ns だった。

同様に、BC0679 のデジタル波形は tdcL2 として観測されるため、tdcL2 から tdcL16 を引いた値が、トリガーが閾値を超えてからシグナルが閾値を超えるまでの時間となる。その時間分布をガウス分布でフィッティングした。

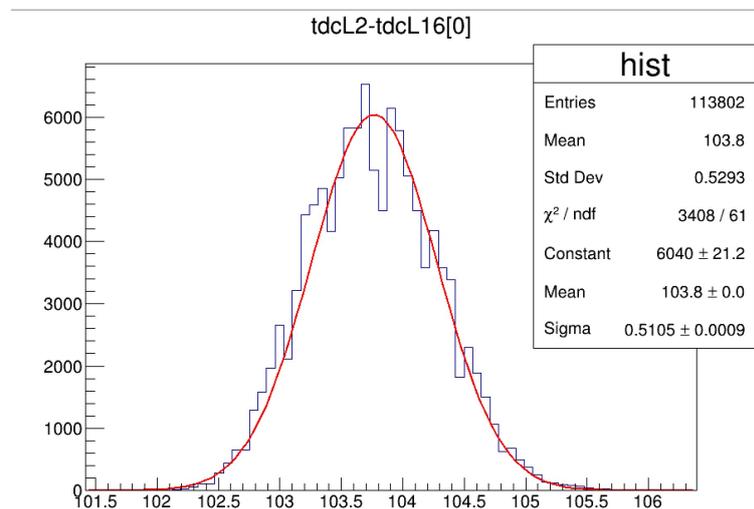


図 2.22: 光量 600 mV の光を入射したときの BC0679 の時間分布と、ガウス分布でフィッティングした結果

時間分布をガウス分布でフィッティングした結果、BC0697 の 600 mV の光を入射したときの時間分解能は図 2.22 に示すように 0.5105 ns だった。

以上の結果を表 2.2 にまとめた。

表 2.2: tdc によりデジタル波形を解析したときの時間分解能

光量 / mV	BC0592 / ns	BC0679 / ns
6	1.350	1.258
20	1.235	1.159
60	0.8319	0.9968
600	0.1858	0.5105

### 2.3.3 アナログ波形の波形解析の結果

まず、1 光電子に相当する光量の光を BC0592、BC0679 の 2 つの PMT に入射し、そのシグナルをアナログ波形のままを波形解析した。上述したように、波形から時間と波高のピーク値を確認し、それぞれ適当な範囲を指定して、時間の分布をガウス分布でフィッティングして時間分解能を算出した。

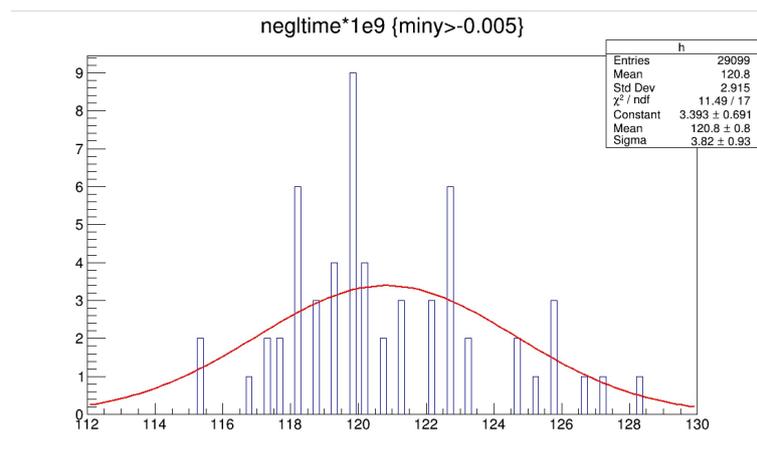


図 2.23: 光量 6 mV の光を入射したときの BC0592 のシグナルのアナログ波形を解析した結果

光量 6 mV を入射したとき、BC0592 の出力波形から得られた時間分布をガウス分布でフィッティングしたときの時間分解能は図 2.23 に示すように 3.82 ns だった。

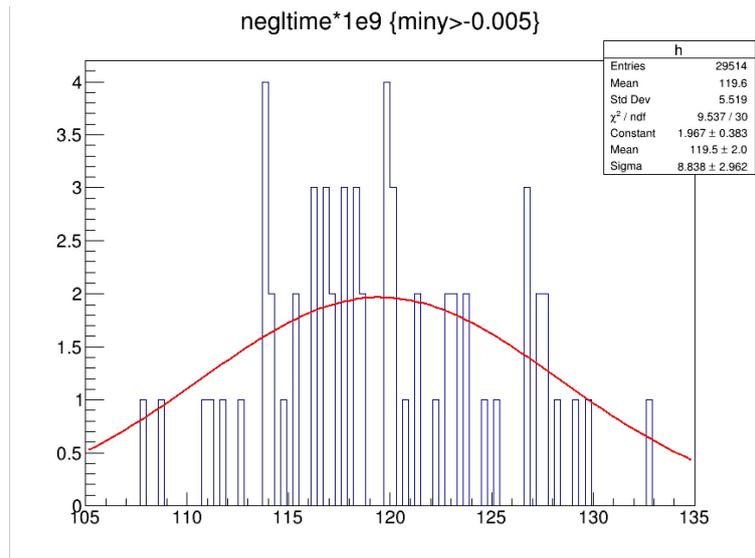


図 2.24: 光量 6 mV の光を入射したときの BC0679 のシグナルのアナログ波形を解析した結果

光量 6 mV を入射したとき、BC0679 の出力波形から得られた時間分布をガウス分布でフィッティングしたときの時間分解能は図 2.24 に示すように 8.838 ns だった。

次に 3 光電子に相当する光量の光を BC0592、BC0679 の 2 つの PMT に入射し、そのシグナルをアナログ波形のままを波形解析した。上述したように、波形から時間と波高のピーク値を確認し、それぞれ適当な範囲を指定して、時間の分布をガウス分布でフィッティングして時間分解能を算出した。

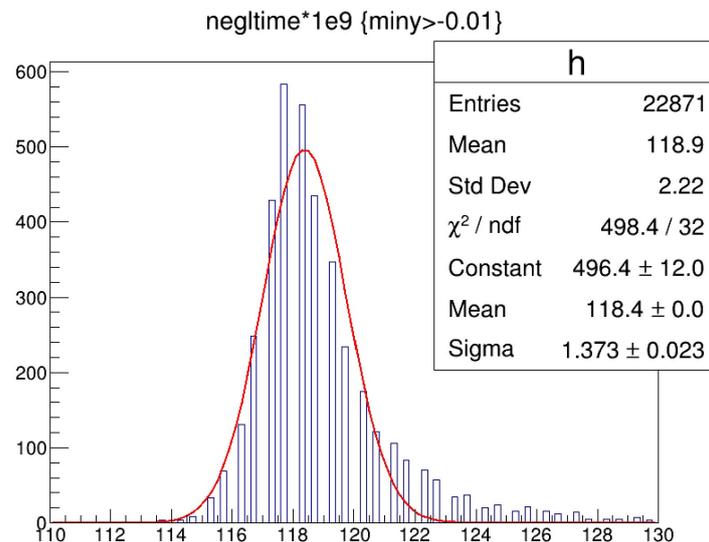


図 2.25: 光量 20 mV の光を入射したときの BC0592 のシグナルのアナログ波形を解析した結果

光量 20 mV を入射したとき、BC0592 の出力波形から得られた時間分布をガウス分布でフィッ

ティングしたときの時間分解能は図 2.25 に示すように 1.373 ns だった。

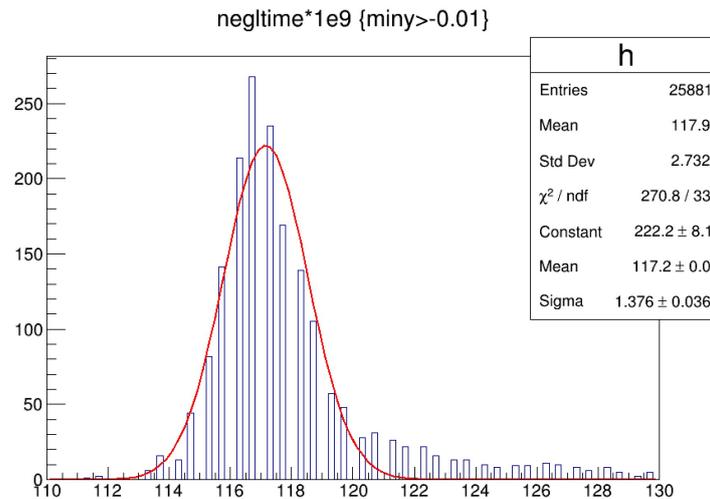


図 2.26: 光量 20 mV の光を入射したときの BC0679 のシグナルのアナログ波形を解析した結果

光量 20 mV を入射したとき、BC0679 の出力波形から得られた時間分布をガウス分布でフィッティングしたときの時間分解能は図 2.26 に示すように 1.375 ns だった。

次に 10 光電子に相当する光量の光を BC0592、BC0679 の 2 つの PMT に入射し、そのシグナルをアナログ波形のままを波形解析した。上述したように、波形から時間と波高のピーク値を確認し、それぞれ適当な範囲を指定して、時間の分布をガウス分布でフィッティングして時間分解能を算出した。

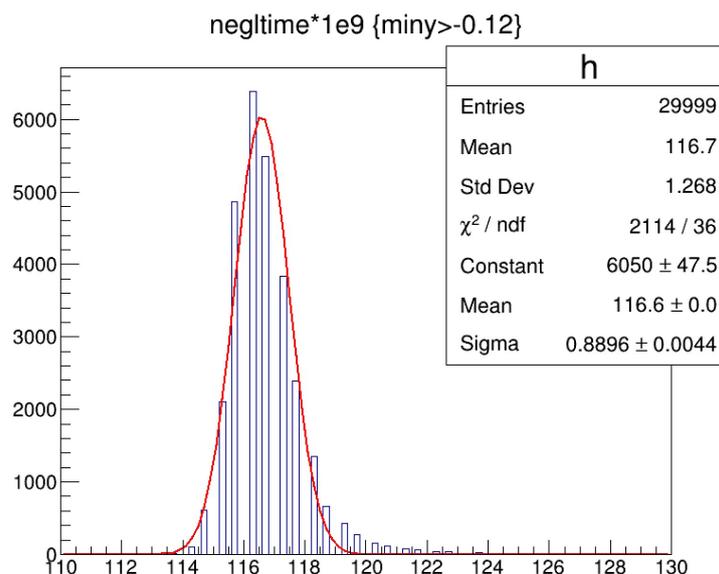


図 2.27: 光量 60 mV の光を入射したときの BC0592 のシグナルのアナログ波形を解析した結果

光量 60 mV を入射したとき、BC0592 の出力波形から得られた時間分布をガウス分布でフィッティングしたときの時間分解能は図 2.27 に示すように 0.8896 ns だった。

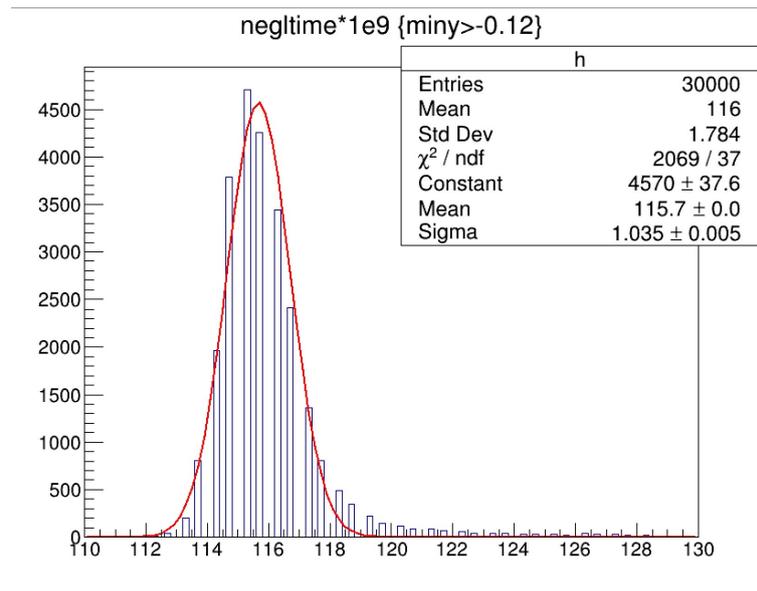


図 2.28: 光量 60 mV の光を入射したときの BC0679 のシグナルのアナログ波形を解析した結果

光量 60 mV を入射したとき、BC0679 の出力波形から得られた時間分布をガウス分布でフィッティングしたときの時間分解能は図 2.28 に示すように 1.035 ns だった。

最後に 100 光電子に相当する光量の光を BC0592、BC0679 の 2 つの PMT に入射し、そのシグナルをアナログ波形のままを波形解析した。上述したように、波形から時間と波高のピーク値を確認し、それぞれ適当な範囲を指定して、時間の分布をガウス分布でフィッティングして時間分解能を算出した。

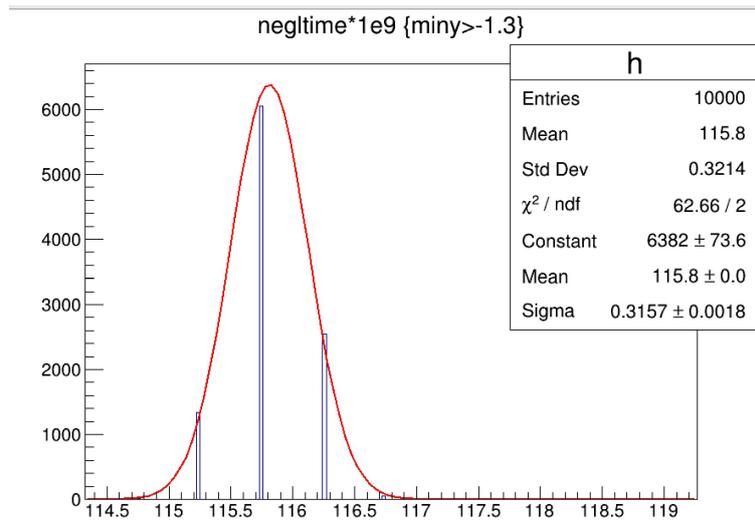


図 2.29: 光量 600 mV の光を入射したときの BC0592 のシグナルのアナログ波形を解析した結果

光量 600 mV を入射したとき、BC0592 の出力波形から得られた時間分布をガウス分布でフィッティングしたときの時間分解能は図 2.29 に示すように 0.3157 ns だった。

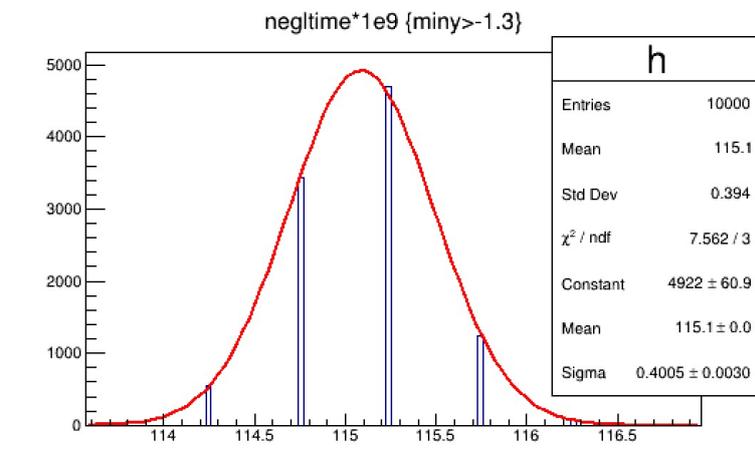


図 2.30: 光量 600 mV の光を入射したときの BC0679 のシグナルのアナログ波形を解析した結果

光量 600 mV を入射したとき、BC0679 の出力波形から得られた時間分布をガウス分布でフィッティングしたときの時間分解能は図 2.30 に示すように 0.4005 ns だった。  
以上の結果を表 2.3 にまとめる。

光量 / mV	BC0592 / ns	BC0679 / ns
6	3.82	8.838
20	1.373	1.375
60	0.8896	1.035
600	0.3157	0.4005

表 2.3: アナログ波形を波形解析したときの時間分解能

### 2.3.4 デジタル波形の波形解析結果

まず 1 光電子に相当する光量である 6 mV の光量の光を BC0592、BC0679 の 2 つの PMT に入射し、そのシグナルをディスクリミネータによって、デジタル波形に変換した。そのデジタル波形を解析した。上述したように、波形から時間と波高のピーク値を確認し、それぞれ適当な範囲を指定して、時間の分布をガウス分布でフィッティングして時間分解能を算出した。

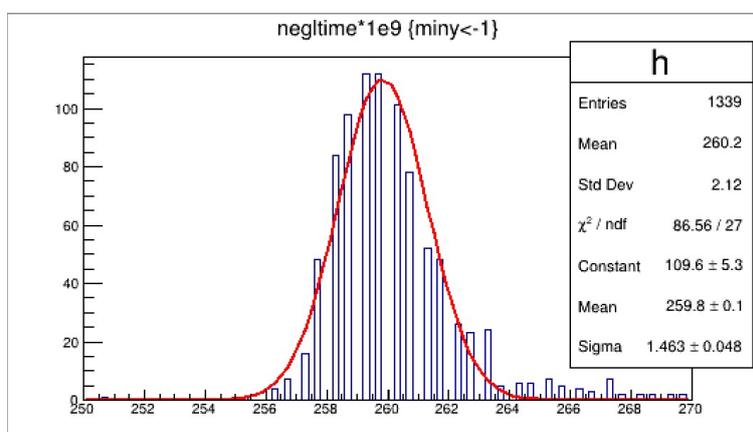


図 2.31: 光量 6 mV の光を入射したときの BC0592 のシグナルのデジタル波形を解析した結果

光量 6 mV を入射したとき、BC0592 の出力波形をディスクリミネータによりデジタル波形にし、そこから得られた時間分布をガウス分布でフィッティングしたときの時間分解能は図 2.31 に示すように 1.463 ns だった。

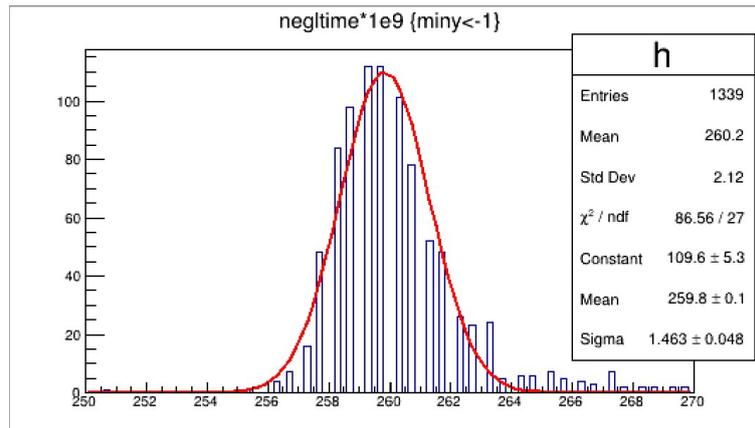


図 2.32: 光量 6 mV の光を入射したときの BC0679 のシグナルのデジタル波形を解析した結果

光量 6 mV を入射したとき、BC0679 の出力波形をディスクリミネータによりデジタル波形にし、そこから得られた時間分布をガウス分布でフィッティングしたときの時間分解能は図 2.32 に示すように 1.144 ns だった。

次に 3 光電子に相当する光量である 20 mV の光量の光を BC0592、BC0679 の 2 つの PMT に入射し、そのシグナルをディスクリミネータによって、デジタル波形に変換した。そのデジタル波形を解析した。上述したように、波形から時間と波高のピーク値を確認し、それぞれ適当な範囲を指定して、時間の分布をガウス分布でフィッティングして時間分解能を算出した。

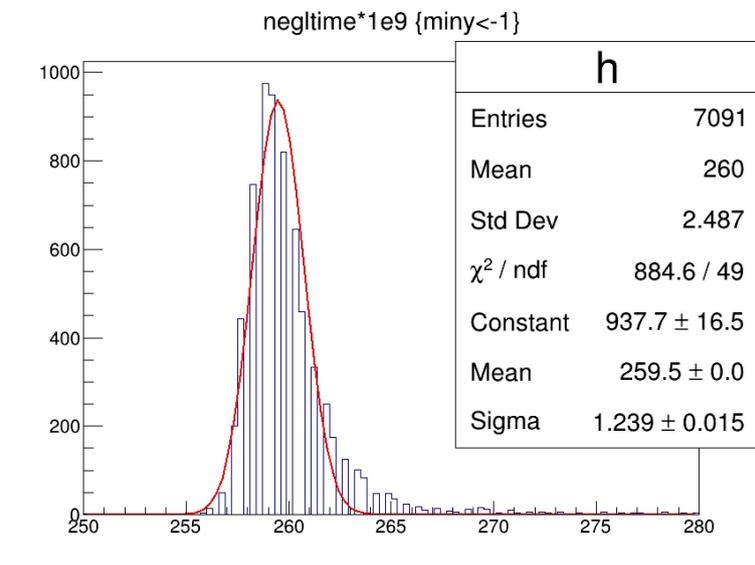


図 2.33: 光量 20 mV の光を入射したときの BC0592 のシグナルのデジタル波形を解析した結果

光量 20 mV を入射したとき、BC0592 の出力波形をディスクリミネータによりデジタル波形にし、そこから得られた時間分布をガウス分布でフィッティングしたときの時間分解能は図 2.33 に示すように 1.238 ns だった。

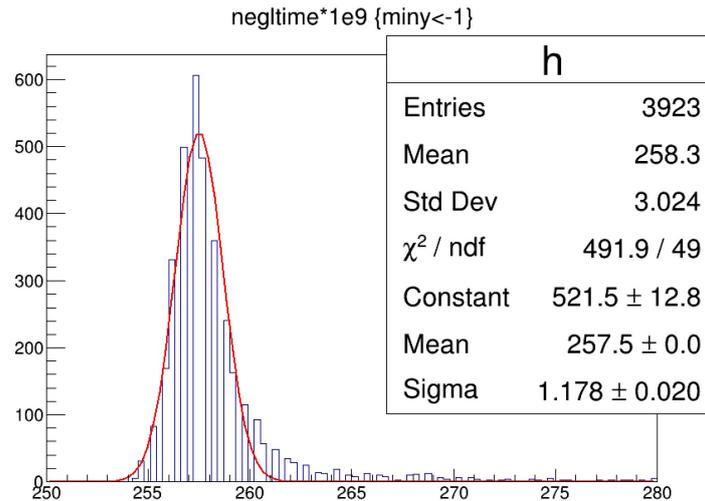


図 2.34: 光量 20 mV の光を入射したときの BC0592 のシグナルのデジタル波形を解析した結果

光量 20 mV を入射したとき、BC0679 の出力波形をディスクリミネータによりデジタル波形にし、そこから得られた時間分布をガウス分布でフィッティングしたときの時間分解能は図 2.34 に示すように 1.178 ns だった。

次に 10 光電子に相当する光量である 60 mV の光量の光を BC0592、BC0679 の 2 つの PMT に入射し、そのシグナルをディスクリミネータによって、デジタル波形に変換した。そのデジタル波形を解析した。上述したように、波形から時間と波高のピーク値を確認し、それぞれ適当な範囲を指定して、時間の分布をガウス分布でフィッティングして時間分解能を算出した。

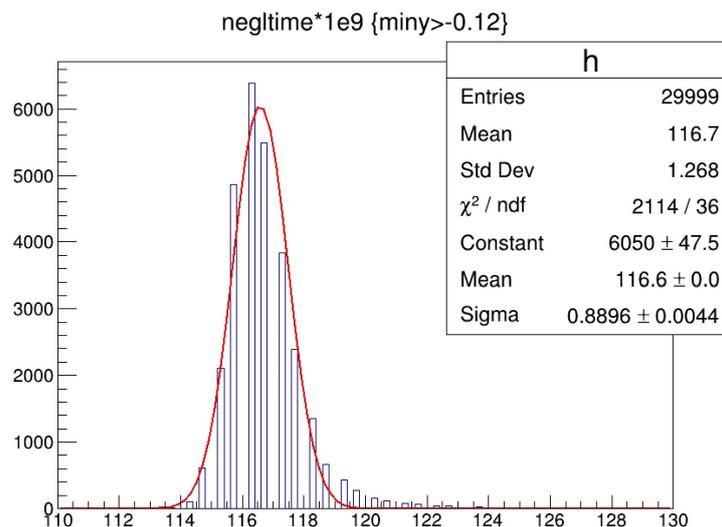


図 2.35: 光量 60 mV の光を入射したときの BC0592 のシグナルのデジタル波形を解析した結果

光量 60 mV を入射したとき、BC0592 の出力波形をディスクリミネータによりデジタル波形にし、そこから得られた時間分布をガウス分布でフィッティングしたときの時間分解能は図 2.35

に示すように 0.8157 ns だった。

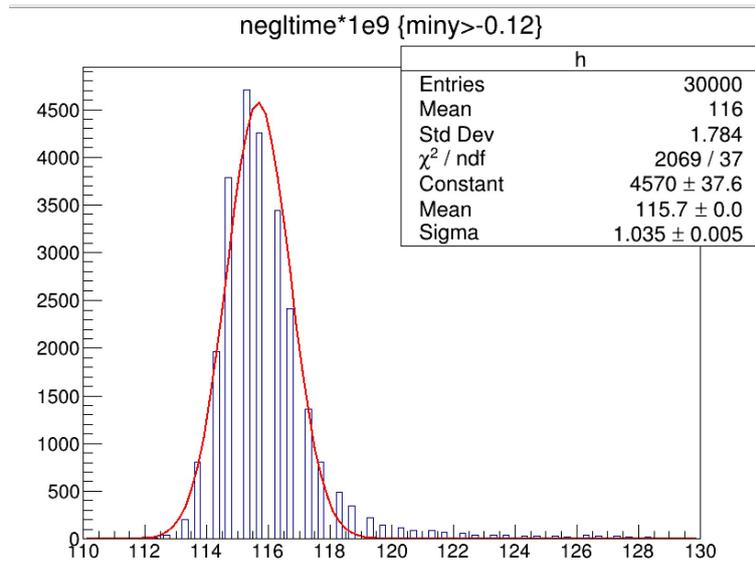


図 2.36: 光量 60 mV の光を入射したときの BC0679 のシグナルのデジタル波形を解析した結果

光量 60 mV を入射したとき、BC0679 の出力波形をディスクリミネータによりデジタル波形にし、そこから得られた時間分布をガウス分布でフィッティングしたときの時間分解能は図 2.36 に示すように 0.9800 ns だった。

最後に 100 光電子に相当する光量である 600 mV の光量の光を BC0592、BC0679 の 2 つの PMT に入射し、そのシグナルをディスクリミネータによって、デジタル波形に変換した。そのデジタル波形を解析した。上述したように、波形から時間と波高のピーク値を確認し、それぞれ適当な範囲を指定して、時間の分布をガウス分布でフィッティングして時間分解能を算出した。

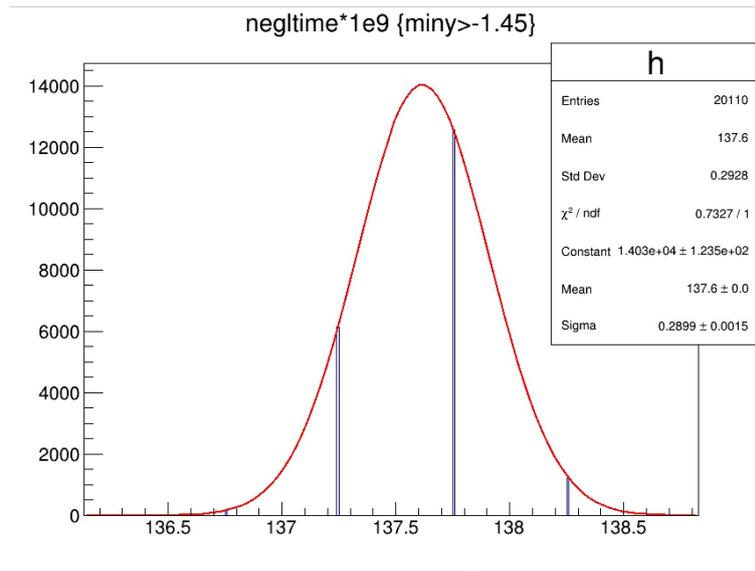


図 2.37: 光量 600 mV の光を入射したときの BC0592 のシグナルのデジタル波形を解析した結果

光量 600 mV を入射したとき、BC0592 の出力波形をディスクリミネータによりデジタル波形にし、そこから得られた時間分布をガウス分布でフィッティングしたときの時間分解能は図 2.37 に示すように 0.2899 ns だった。

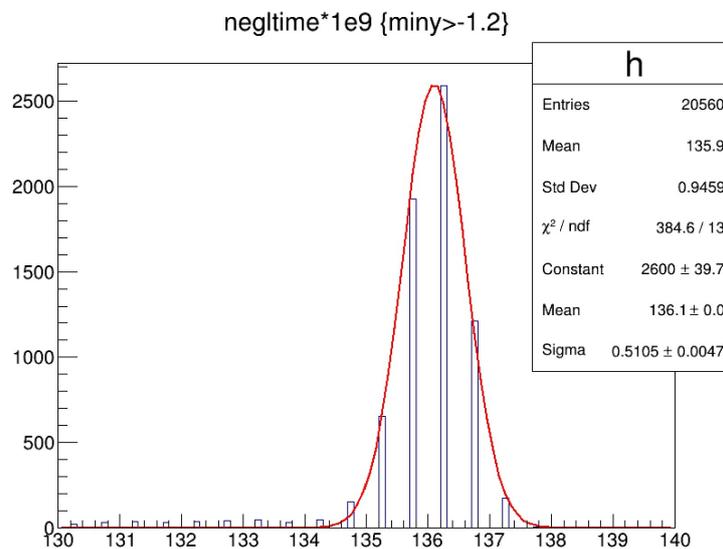


図 2.38: 光量 600 mV の光を入射したときの BC0679 のシグナルのデジタル波形を解析した結果

光量 600 mV を入射したとき、BC0679 の出力波形をディスクリミネータによりデジタル波形にし、そこから得られた時間分布をガウス分布でフィッティングしたときの時間分解能は図 2.38 に示すように 0.5105 ns だった。

以上の結果を表 2.4 にまとめた。

表 2.4: デジタル波形を波形解析したときの時間分解能

光量 / mV	BC0592 / ns	BC0679 / ns
6	1.463	1.144
20	1.238	1.178
60	0.8157	0.9800
600	0.2899	0.5105

## 2.3.5 結果をまとめ

それぞれの PMT ごとの結果をまとめなおす。まず BC0592 について表 2.5 にまとめる。

表 2.5: BC0592 の出力した時間分布をそれぞれの方法で解析したときの時間分解能

光量 / mV	デジタル波形 TDC / ns	アナログ波形解析 / ns	デジタル波形解析 / ns
6	1.350	3.82	1.463
20	1.235	1.373	1.238
60	0.8319	0.8896	0.8157
600	0.1858	0.3157	0.2899

また、この表 2.5 を図 2.39 にグラフ化した。

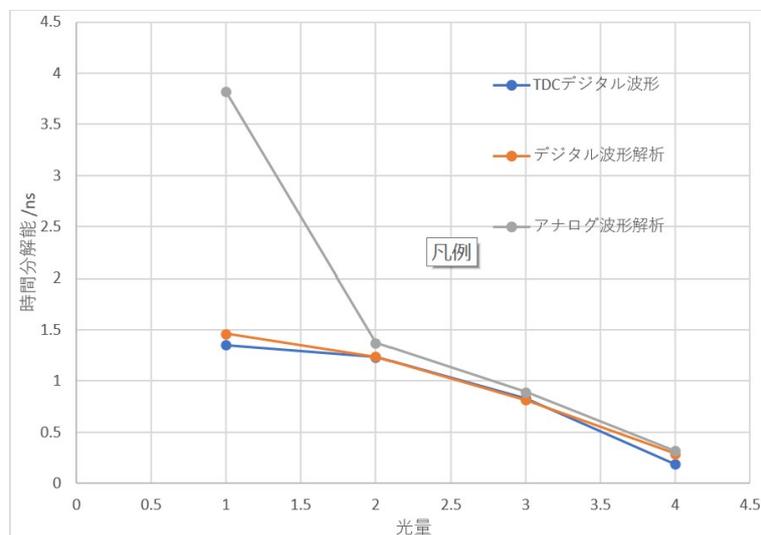


図 2.39: BC0592 の出力した時間分布をそれぞれの方法で解析したときの時間分解能

次に BC0679 について表 2.6 にまとめる。

表 2.6: BC0679 の出力した時間分布をそれぞれの方法で解析したときの時間分解能

光量 / mV	デジタル波形 TDC / ns	アナログ波形解析 / ns	デジタル波形解析 / ns
6	1.258	8.838	1.144
20	1.159	1.375	1.178
60	0.9968	1.035	0.98
600	0.5105	0.4005	0.5105

また、この表 2.6 を図 2.40 のようにグラフ化した。

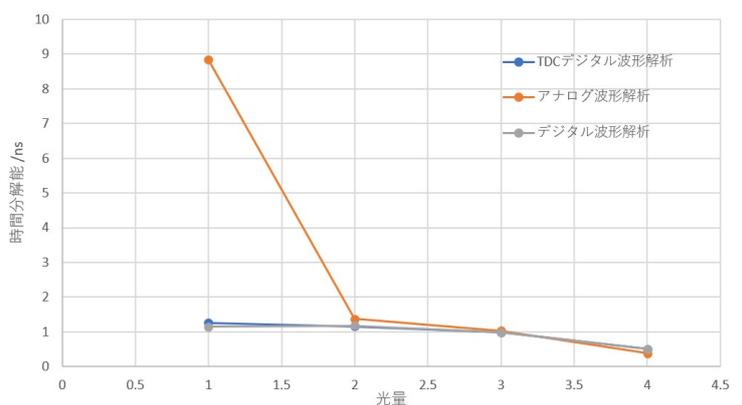


図 2.40: BC0679 の出力した時間分布をそれぞれの方法で解析したときの時間分解能

以上の結果より、低い光量での時間分解能にばらつきはあるものの、高い光量ではほとんど違いがなく、今回行ったどの解析方法でも時間分解能に差異はあまりないと判断した。また、1 光電子に相当する光量では時間分解能が約 1.3 ns、100 光電子に相当する光量では時間分解能が約 0.2 ns 程度の結果が得られ、これは解析方法して申し分ない時間分解能であると判断した。よって、4 章の実験ではデジタル波形を TDC によって解析することとした。

## 第3章 50 cm 径PMT に対する 8 cm 径PMT の評価

### 3.1 目的

現在まで、同じ大きさのPMTを同時に計測することは行われてきた。しかし、違う大きさのPMTを並べて同時に測定したことはなかった。今回50 cm 径PMTを3個並べた場合と、8 cm 径PMTを2つの50 cmPMTで挟んだ場合で光量を変え、8 cm 径PMTを50 cm 径PMTと比較して挙動を調べた。

また、サチレーションの挙動に関しても計測した。地磁気でどのくらいサチレーションに影響が出るかも観測した。

### 3.2 セットアップ

#### 3.2.1 PMT

今回実験に使ったPMTは50 cm 径PMTを3つと8 cm 径PMTを3つである。まず、50 cm 径PMTについての種類と性能をまとめる。

表 3.1: 使用した3つの50 cm 径PMTの性能

型番	EC0230-G	ED0810-C	ED0920-C
TYPE	R12860-22	R12860-22	R12860-22
高電圧 / V	1800	1740	2070
QE /	34.1	30.7	34.0



図 3.1: 50 cm 径 PMT(ED0230-G)



図 3.2: 50 cm 径 PMT(ED0810-C)



図 3.3: 50 cm 径 PMT(ED0920-C)

次に 8 cm 径 PMT についての種類と性能をまとめる。

表 3.2: 使用した 3 つの 8 cm 径 PMT の性能

型番	BC0592	BC0679	AA5853
TYPE	R14374-Y009	R14374-Y009	E1198-22-Y001
高電圧 / V	1250	1250	1250
QE /	27.5	27.5	27.5
時間分解能 / ns	1.3	1.3	1.3



図 3.4: 8 cm 径 PMT(BC0592)



図 3.5: 8 cm 径 PMT(BC0679)



図 3.6: 8 cm 径 PMT()

### 3.2.2 スケーラー

スケーラーは、PMT が光電子を検出した時にカウントするものである。今回使用したスケーラーは図 3.7 のものである。

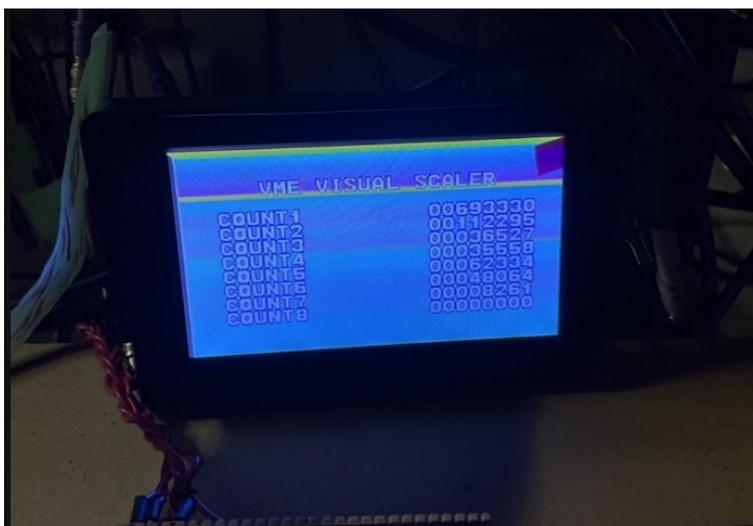


図 3.7: スケーラー

### 3.2.3 レーザー

光源とし図 3.8 の浜松フォトニクス社製の型番 C10196 のレーザーを使用している。

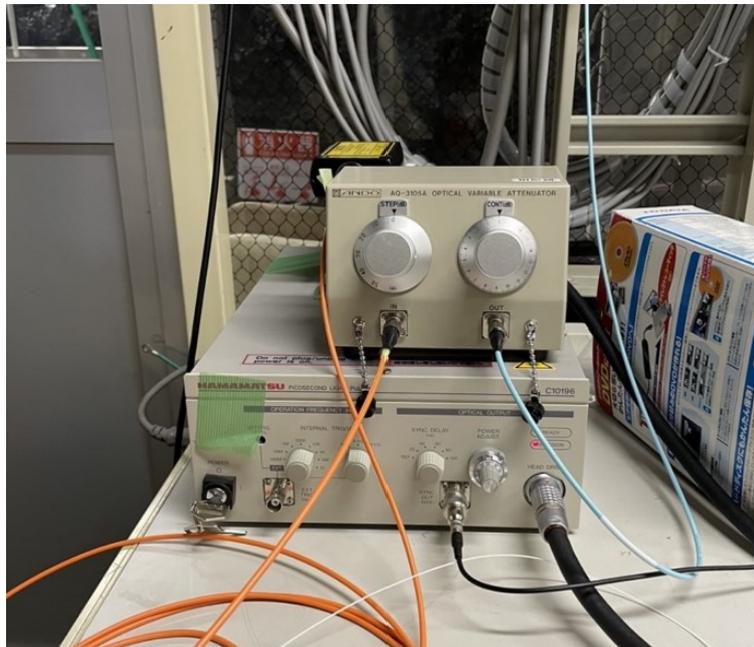


図 3.8: 浜松フォトニクス社製の C10196 レーザー

## 3.3 検出効率の評価方法

本実験はスーパーカミオカンデ実験の施設内で行った。光源はレーザーを暗室内までファイバーで引っ張った。ファイバーの先端にディフューザーボールを装着し、暗室内全体に光が広がるようにした。

比較のため、3つの 50 cm 径 PMT を並べて配置し、中心にある 50 cm 径 PMT を 8 cm 径 PMT と入れ替えて比較した。その際、8 cm 径 PMT は 50 cm 径 PMT のガラス面の高さに置いた場合と、50 cm 径 PMT の収束電極面の高さに合わせた場合の 2 通りをそれぞれ測定した。まず、50 cm 径 PMT を 3 つ並べた場合の様子を図 3.9 に示す。50 cm 径 PMT を 3 つ並べ、中心の PMT の上にディフューザーボールを付けたレーザーを配置し、そこから光を入射した。

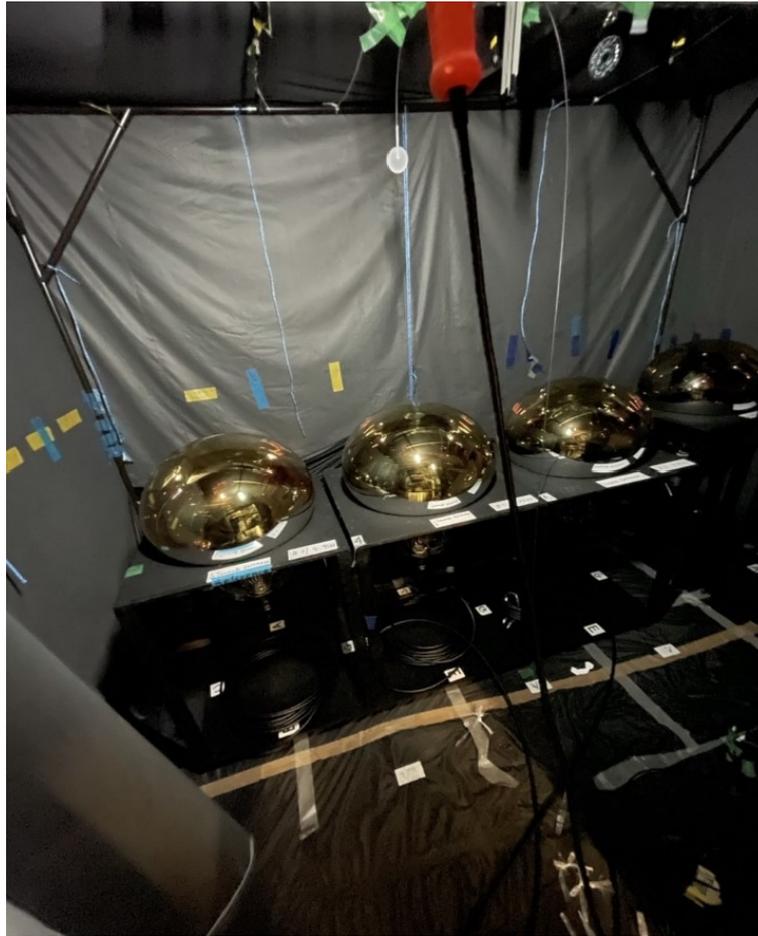


図 3.9: 50 cm 径 PMT を 3 つ並べたとき

次に、50 cm 径 PMT の光電面と同じ高さに 8 cm 径 PMT を配置したときの様子を図 3.10 に示す。台を使って 50 cm 径 PMT の光電面と同じ高さに 8 cm 径 PMT の光電面をそろえた。光源は 50 cm 径 PMT を 3 つ並べたときと同様に配置した。

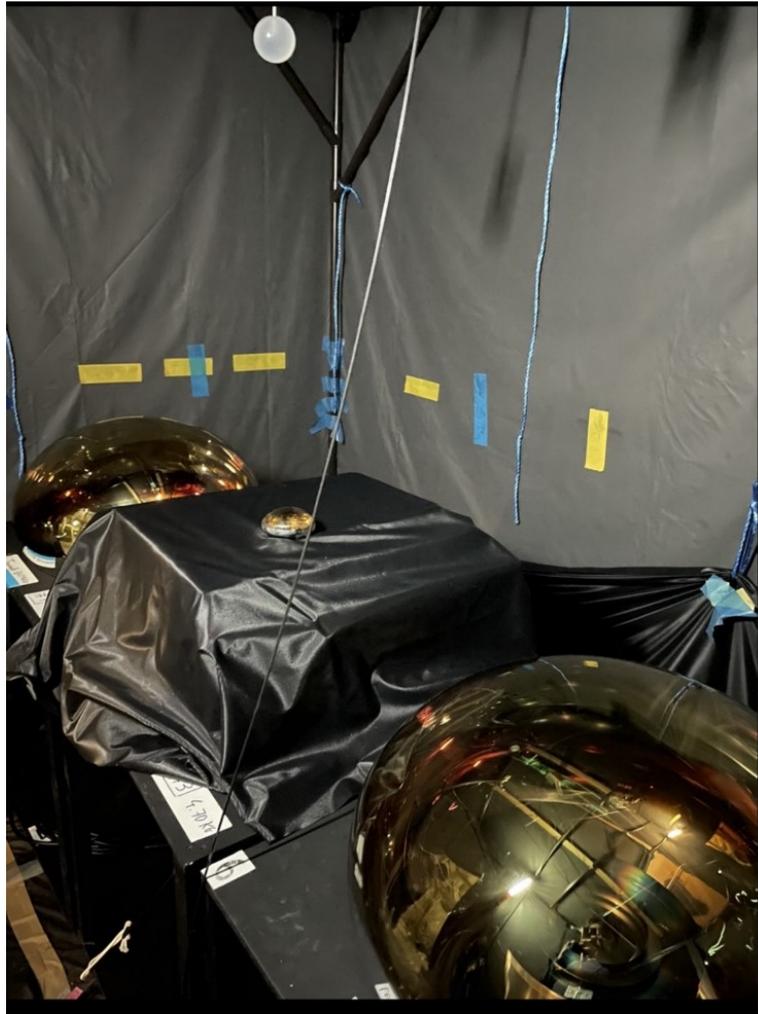


図 3.10: 8 cm 径 PMT をガラス面の高さで置いたとき

最後に、50 cm 径 PMT の集束電極の高さに 8 cm 径 PMT を配置したときの様子を図 3.11 示す。なるべく光電面の高さにそろえた場合と条件をそろえるために、先ほど使用した台を裏返し、そこに 8 cm 径 PMT を配置した。光源は 50 cm 径 PMT を 3 つ並べたときと同様に配置した。

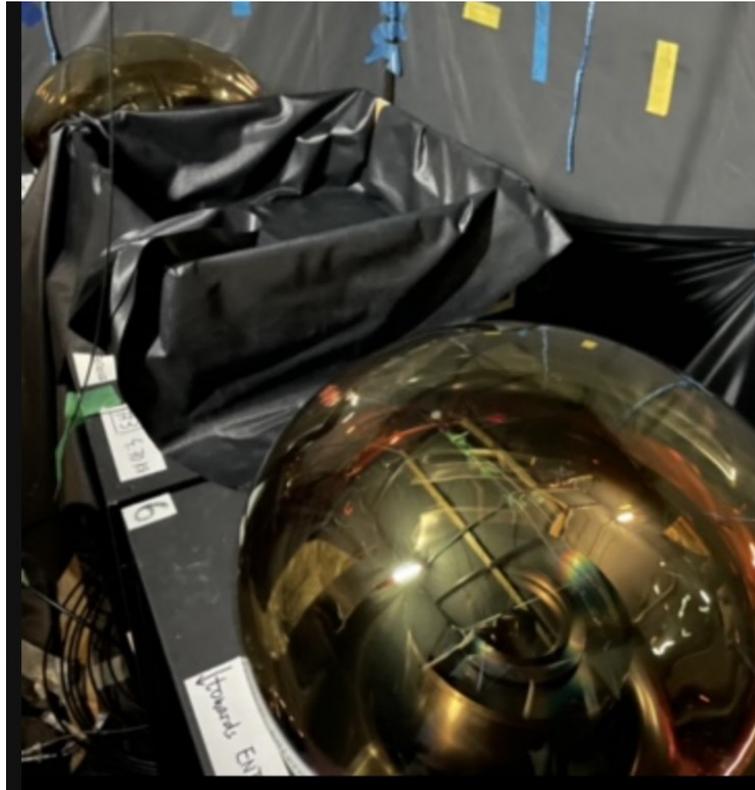


図 3.11: 8 cm 径 PMT を収束電極面の高さで置いたとき

1 光電子に相当する光量であり、ほとんどカウントのない光量である 6 mV を PMT に入射し、その光量に対し 2 mV の閾値を設定し、その光量を超えたものをスケーラーでカウントした。次に、アテネータを使い光を入射しない場合に、閾値を同じく 2 mV に設定しそのカウントもとった。これをノイズとし、光量を入れた場合からノイズを引いたものをカウントとして扱った。また両端の 50 cm 径 PMT をリファレンスに設定し、中心においた PMT とのリファレンスの比をとった。リファレンス比は、リファレンスのカウント/中心の PMT のカウントにより算出している。

### 3.4 結果

入口からみて左側に 50 cm 径 PMT の ED0810-C をおき、これをリファレンス 1 とした (以下 r1)。右側に 50 cm 径 PMT の ED0920-C をおき、これをリファレンス 2 とした (以下 r2)。それぞれ、光を入射した場合からノイズをひいたものをカウントとし、これとリファレンスの比をとった。その結果を表 3.3 にまとめた。

表 3.3: 中心の PMT とリファレンスのリファレンス比

中心の PMT	リファレンス比 (r1)	リファレンス比 (r2)
EC0230-G	0.298	0.281
BC0592(上)	10.35	7.50
BC0592(下)	1.54	27.28
BC0679(上)	9.10	8.80
BC0679(下)	3.59	32.69
AA5853(上)	19	1.2
AA5853(下)	9.36	9.38

この結果から 8 cm 径 PMT のリファレンス比にはかなりのばらつきがみてとれる。そこで結果として扱うのに妥当かどうかを s/n 比を使って評価した。S/N 比とはノイズとカウントとして扱ったものの比で、カウント/ノイズによって算出した。この比が小さすぎる場合、このカウントはノイズの誤差によってかなりの影響を受けてしまうので、正しい数字とは言えない。今回はこの S/N 比が 0.5 以上のものだけを選んで扱うことにした。それぞれの S/N 比を表 3.4 にまとめた。

表 3.4: 中心の PMT のそれぞれの s/n 比

中心の PMT	S/N 比
EC0230-G	5.88
BC0592(上)	1.76
BC0592(下)	0.08
BC0679(上)	2.33
BC0679(下)	0.01
AA5853(上)	0.08
AA5853(下)	0.79

以上の結果より妥当な結果といえるのは、BC0592 を 50 cm 径 PMT の光電面の高さにおいた場合、BC0679 を 50 cm 径 PMT の光電面の高さにおいた場合、AA5853 を 50 cm 径 PMT の集束電極の高さにおいた場合の 3 通りであるといえる。

ノイズの原因として考えられるのは 2 つある。1 つ目は設定を変える際に暗室内にライトを入れて作業していたことである。PMT は光をあてて作業すると光電面が活性化してノイズが多くなってしまう。2 つ目は高電圧電源を入れてからすぐに計測をはじめてしまったことだ。PMT は高電圧をかけた直後もノイズが多くなってしまう。今回の実験では、カウントの測定とノイズの測定は同時に行っていない。カウントの測定をした後にノイズの測定をしているため、その間にノイズが変化してしまった可能性があり、適切にノイズをひけていない可能性がある。よって S/N 比があまりに小さいものは妥当でないと判断した。

妥当であると判断したデータに関しての考察をする。まず、50 cm 径 PMT と 8 cm 径 PMT の面積比は

$$50^2/8^2 = 39.06.. \quad (3.1)$$

よって約 39 倍の面積比があると考えておおよその検出効率を比較する。EC0230-G のリファレンス比を 39 倍した値と、妥当だと判断されたもののリファレンス比を比較すると表 3.5 のようにな

る。

表 3.5: 面積比を考慮した中心の PMT とリファレンスのリファレンス比  
中心の PMT | リファレンス比 (r1) | リファレンス比 (r2)

中心の PMT	リファレンス比 (r1)	リファレンス比 (r2)
EC0230-G	11.62	10.95
BC0592(上)	10.35	7.50
BC0679(上)	9.10	8.80
AA5853(下)	9.36	9.38

表 3.6: 面積比を考慮した中心の PMT とリファレンスのリファレンス比

中心の PMT	リファレンス比	8 cm 径 PMT に換算	リファレンス比の比	QE / %
EC0230-G(50 cm 径 PMT)	0.298	11.62	1	34.1(既知の値)
BC0592(8 cm 径 PMT)	10.35	10.35	0.89	30.3
BC0679(8 cm 径 PMT)	9.10	9.10	0.78	26.7
AA5853(8 cm 径 PMT)	9.36	9.36	0.80	27.4

EC0230-G の QE は 34.1 % であるので、 $34.1 \times (8 \text{ cm 径 PMT のリファレンス比} / 50 \text{ cm 径 PMT のリファレンス比})$  を計算し、8 cm 径 PMT のおおよその QE を算出した。

表 3.7: EC0230-G のリファレンス比から算出した QE

中心の PMT	QE
BC0592(上)	30.3
BC0679(上)	26.7
AA5853(下)	27.4

概算ではあるが表 3.7 のように、3 つの 8 cm 径 PMT の QE の平均をとると、50 cm 径 PMT の QE の約 83 % の QE をもつことがわかる。50 cm 径 PMT の QE は非常に高いことが知られているため、この結果は QE の差から想定されていた通りの結果になった。

### 3.5 サチレーション

それぞれの PMT にはそれぞれ計測できる限界の光量がある。今回はその限界の光量を 8 cm 径 PMT と 50 cm 径 PMT で比較することが目的である。

### 3.6 セットアップ

今回の実験のセットアップを以下に示す。



図 3.12: サチレーション実験のセットアップ

前回の実験同様に、図 3.12 のとおり 50 cm 径 PMT を両側に配置し、比較対象にした。中心には 8 cm 径 PMT を L 字型に 3 つ並べて配置した。光源のレーザーは前回と同じであるが、ディフューザーボールを先端に着けておらず、高い位置から入射している。

今回の実験では観測装置にはオシロスコープを採用している。レーザーの光量を少しずつ上げていき、変化がなくなった光量が検出できる最大光量であるとしている。

また実験を行っている暗室内は地磁気を打ち消すように磁場がかけられている。この磁場をかける装置はヘルムホルツコイルという。ヘルムホルツコイルは大きな 2 つのコイルをその半径と同じ距離だけ離して設置するコイルのことである。両方のコイルに同じ向き、同じ量の電流を流すため、一方向に磁場を作ることができる。地磁気は一方向であるとみなせるため、地磁気の打ち消しによく使用される。地磁気を打ち消している場合と地磁気がある状態では、限界の光量にどのくらい差があるのかということも観測した。



図 3.13: 磁場を作る電流電源

図 3.13 に示すのが磁場をかける装置である。

### 3.7 結果

観測できる最大光量の波高を表 3.7 にまとめた。なお磁場は地面に平行な平面方向を (x,y) とし、地面に垂直な方向を z 方向としている。

磁場 / mG	BC0592 / V	BC0679 / V	AA5853 / V	ED0810-C / V
	1250 V	1250 V	1250 V	1740 V
地磁気を抑えた場合 (25.0,-29.9,-40.0)	-5.108	-5.081	-5.748	-7.342
地磁気がある場合 (-152,259.4,280)	-5.220	-5.032	-5.724	-6.642

表 3.8: 観測できる最大光量

それぞれ誤差は 0.001 程度であった。最大光量に関しては、50 cm 径 PMT との面積比が約 39 もあることも考慮するとかなりいい値であることがわかる。また、50 cm 径 PMT の方は地磁気の影響をかなり受けているが、8 cm 径 PMT の方は地磁気の影響をほぼ受けていないことがわかる。

## 第4章 4つのPMTから位置を特定する

### 4.1 目的

4つPMTを配置し光源の位置を設定する。PMTが得たシグナルから光源の位置をどのくらいの精度で見積もることができるのかを確かめる。

### 4.2 原理

実際の光源とPMTの位置関係が明確にわかるように、4つのPMTと光源の位置はあらかじめ設定しておく。実験により得られた時間の結果から、逆に光源の位置を見積もる。結果から見積もった位置情報が実際の位置情報と比較してどのくらいの精度かを確かめることが本実験の前提である。

#### 4.2.1 基準となる時間のデータの取得

PMTは光が入射してから、シグナルを出力するまでに少しの時間を要する。この出力するまでにかかる時間はPMTごとにわずかに違い、今回の実験では光源の位置を見積もることが目的であるため、この出力までの時間は誤差になりうる。そのため、まず基準となる時間のデータをとる。この時間をオフセットと呼ぶ。この基準となる時間のデータの条件はできるだけシンプルである方がいいため、PMTの真上から入射した。角度もできるだけ小さくしたいので、暗室内の最も高い位置に光源を配置し、PMTは最も低い位置に配置した。その結果PMTと光源の距離は157cmになった。高速を $2.99 \times 10^8 \text{ m/s}$ と考えると、光が157cmの距離を進むには $1.57 / 2.99 \times 10^8 = 5.23 / \text{ns}$ (4.1)の時間がかかる。よって得られた時間から5.23 ns引いた値がPMTに光が入射してから、シグナルを出力するまでの時間となり、これをオフセットとする。

また光量が変わるとオフセットの時間が変化してしまう。例えば、PMT1のオフセットを光量を変えてとったときの光量とオフセットの関係は図4.1のようにになっている。

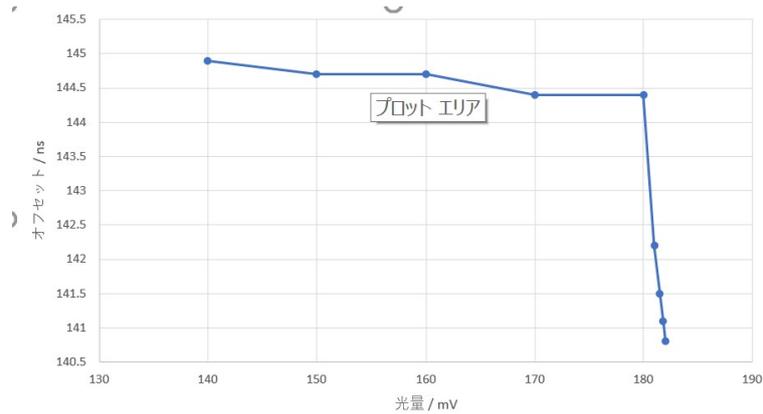


図 4.1: オフセットの求め方

光源の光を一定にして観測しても位置関係が変わると PMT に入射する光の光量は変化してしまう。そのため、この基準となる時間のデータをとる際には、光量をいくつか変えて観測した。実際に位置情報を見積もる際には、それぞれの PMT が観測した光量と同じ光量のオフセット時間を引く。

以上により、光量ごとにそれぞれの PMT のオフセットが得られたことになる。



図 4.2: オフセットの求め方

#### 4.2.2 位置情報の見積もり

実際に光源と PMT の位置関係を設定しデータをとるとき、得られた時間からオフセットを引くと、光源から PMT の光電面に光が到達するまでの時間が得られる。この時間に光速をかけることで位置の情報を見積もることができる。



図 4.3: 位置情報の求め方

## 4.3 セットアップ

### 4.3.1 実験器具

#### PMT

今回の実験では表 4.1 の 4 つの PMT を使用した。

表 4.1: 使用した 4 つの PMT の性能

型番	BC0957	BC0679	AA5853	BC0592
TYPE	R14374	R14374-Y009	E1198-22-Y001	R14374-Y009
高電圧 / V	950	1250	1250	1250 QE /
27.5	27.5	27.5	27.5	
時間分解能 / ns	1.3	1.3	1.3	1.3

#### レーザー

今回の実験では 2 章同様、光源として図 4.4 の浜松フォトニクス社製の c8898 のレーザーを使用した。



図 4.4: 光源として使用したレーザー

#### 4.3.2 セットアップ

暗室に PMT を 4 つ配置し、先端にディフューザーボールを付けたレーザーを上から入射し、そのシグナルを TDC によって観測した。2 章の結果より、シグナルの波形をディスクリミネータによりデジタル波形に変換して、その波形を TDC により解析した。

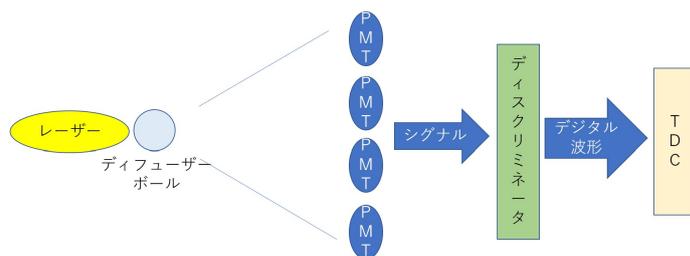


図 4.5: 本実験でのセットアップ

その中で暗室内の PMT の配置を 3 パターンに変えて測定した。

まず基準となる時間が必要であるため、図 4.6 のように 4 つの PMT をくっつけて配置し、その真上に光源をおき光を入射した。このとき、PMT の光電面とレーザーの距離は 157 cm に設定した。

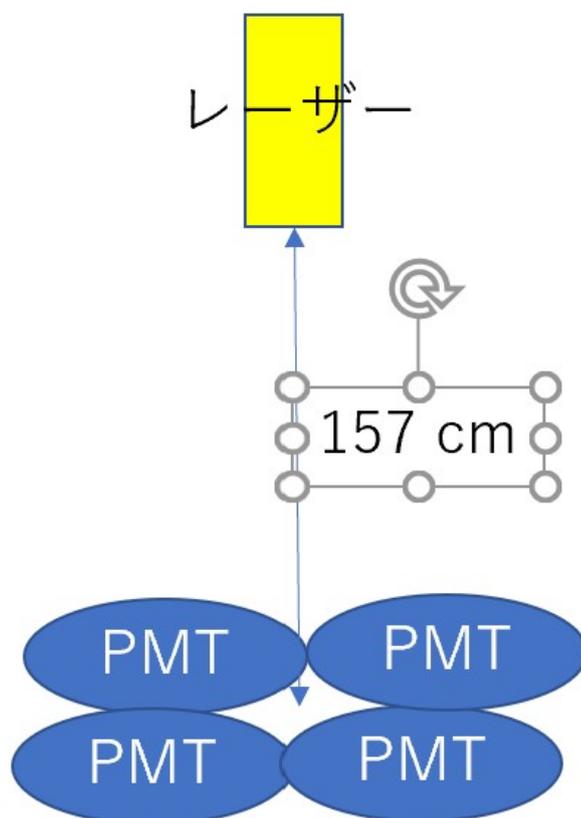


図 4.6: 基準となる時間測定のセットアップ

この条件で光量をいくつか変えてそれぞれの PMT に対してのオフセットのデータをとった。次にハイパーカミオカンデでは PMT の間隔が 50 cm であるので、図 4.7 のように 50 cm 四方

の四つ角に 8 cm 径 PMT を配置し、それぞれから均等な位置で測定するため、光源を 50 cm 四方の中心から 50 cm の高さの位置に配置した。

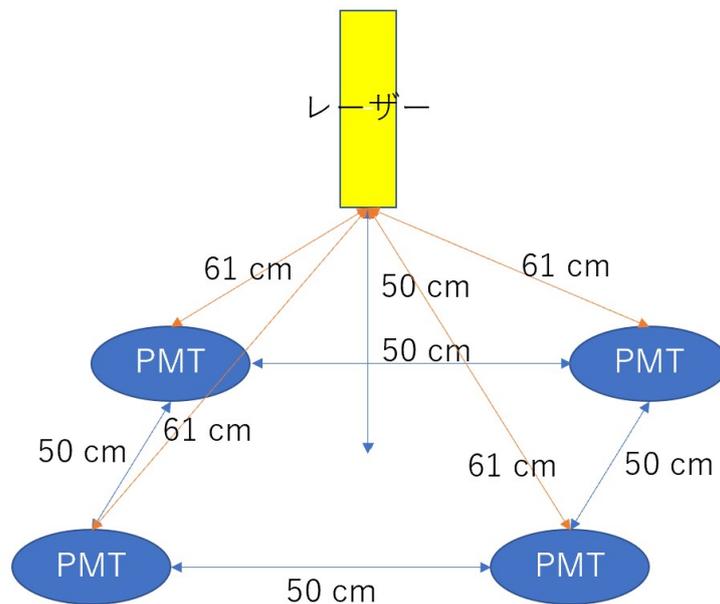


図 4.7: 50 cm 四方に PMT を配置し、光源を中心に配置したときののセットアップ

まずそれぞれの PMT が出力した光量を観測し、どの光量のオフセットを使うかをきめた。次に TDC で時間を解析し、そこから距離を見積もった。

最後に図 4.8 のように光源を PMT の正面から入射したときを検証したかったため、1つの PMT の真上に 50 cm の距離をあけて光源を配置した。

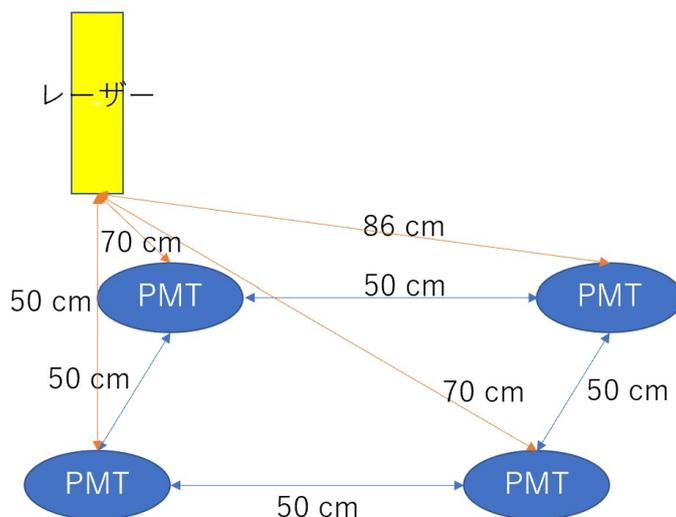


図 4.8: 50 cm 四方に PMT を配置し、1つの PMT の上に光源を配置したときのセットアップ

まずそれぞれの PMT が出力した光量を観測し、どの光量のオフセットを使うかをきめた。次に TDC で時間を解析し、そこから距離を見積もった。

#### 4.4 結果

今回、それぞれの PMT は図 4.9 のように配置した。

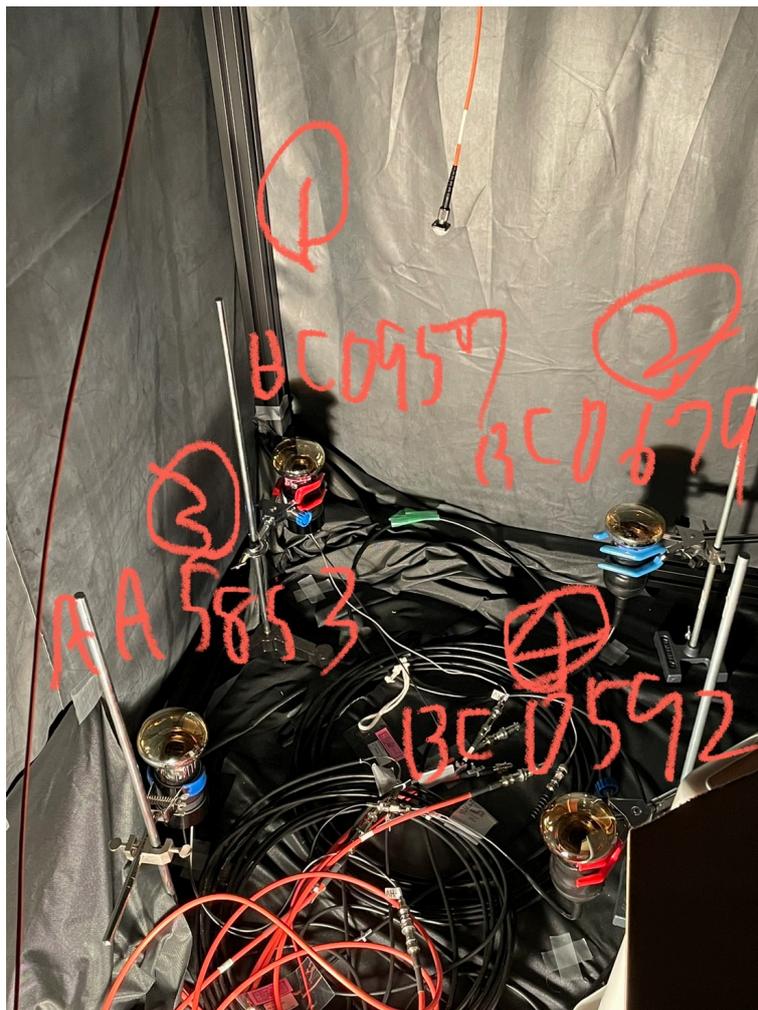


図 4.9: それぞれの PMT の配置

また簡単のためにそれぞれの PMT に番号を振り、それを以下の表 4.2 で示す。

表 4.2: 使用した 4 つの PMT の番号

型番	BC0957	BC0679	AA5853	BC0592
番号	PMT1	PMT2	PMT3	PMT4

#### 4.4.1 オフセットの決定

今回光量ごとにオフセットを出した。各光量でのオフセットのグラフを図 4.10 に示す。

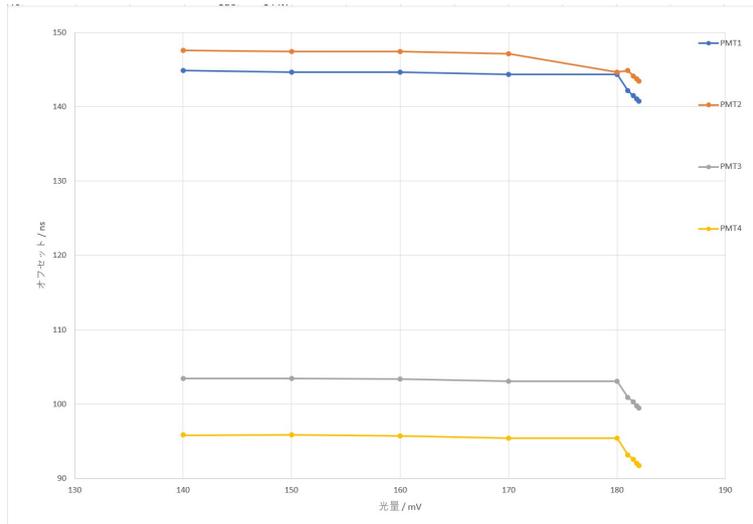


図 4.10: 光量ごとの PMT1 のオフセットの変化

この結果から、それぞれの PMT が観測した光量に最も近い光量の点でのオフセットを選んだ。

本実験で使ったものだけを示す。50 cm 四方の中心から 50 cm の高さに光源を配置した実験を実験 1、PMT3 の真上 50 cm に光源を配置した実験を実験 2 とする。

PMT1 のシグナルは tdcL1 として出力される。tdcL1 からトリガーのシグナルである tdcL16 と、光源から PMT までの距離である 157 cm を光が進むのにかかる時間である 5.23 ns を引いた時間分布をだした。これは光が光電面に入ってから、PMT が出力するまでにかかる時間の分布を出したのと同義である。この時間分布をガウス分布によってフィッティングし、光電面に光が入射してから PMT が出力するまでの時間のピーク値をオフセットの時間としている。

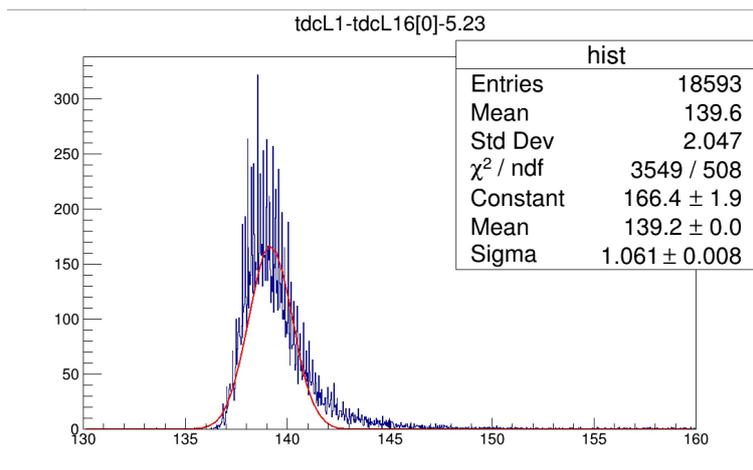


図 4.11: 実験 1 で使用した PMT1 のオフセット

PMT2 のシグナルは tdcL2 として出力される。tdcL2 からトリガーのシグナルである tdcL16 と、光源から PMT までの距離である 157 cm を光が進むのにかかる時間である 5.23 ns を引いた

時間分布をだした。これは光が光電面に入ってから、PMT が出力するまでにかかる時間の分布を出したのと同義である。この時間分布をガウス分布によってフィッティングし、光電面に光が入射してから PMT が出力するまでの時間のピーク値をオフセットの時間としている。

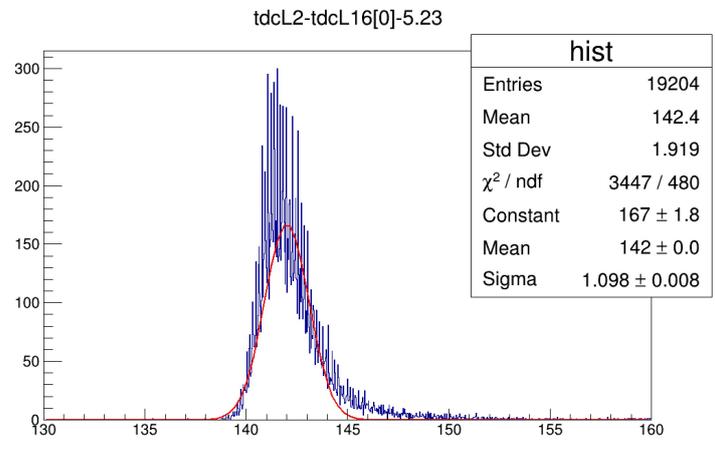


図 4.12: 実験 1 で使用した PMT2 のオフセット

PMT3 のシグナルは tdcL3 として出力される。tdcL3 からトリガーのシグナルである tdcL16 と、光源から PMT までの距離である 157 cm を光が進むのにかかる時間である 5.23 ns を引いた時間分布をだした。これは光が光電面に入ってから、PMT が出力するまでにかかる時間の分布を出したのと同義である。この時間分布をガウス分布によってフィッティングし、光電面に光が入射してから PMT が出力するまでの時間のピーク値をオフセットの時間としている。

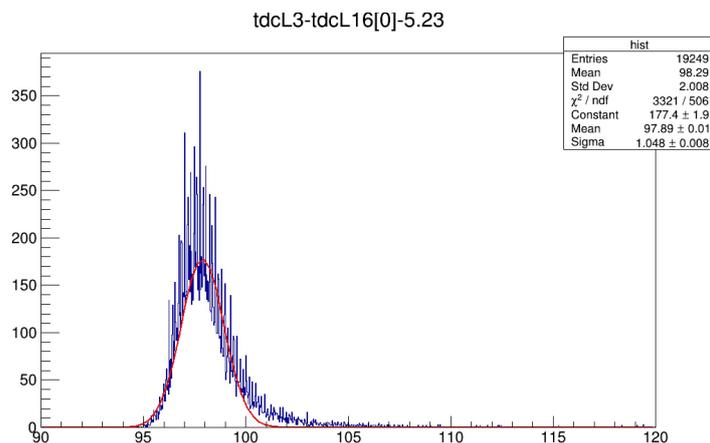


図 4.13: 実験 1 で使用した PMT3 のオフセット

PMT4 のシグナルは tdcL4 として出力される。tdcL4 からトリガーのシグナルである tdcL16 と、光源から PMT までの距離である 157 cm を光が進むのにかかる時間である 5.23 ns を引いた時間分布をだした。これは光が光電面に入ってから、PMT が出力するまでにかかる時間の分布を

出したのと同義である。この時間分布をガウス分布によってフィッティングし、光電面に光が入射してから PMT が出力するまでの時間のピーク値をオフセットの時間としている。

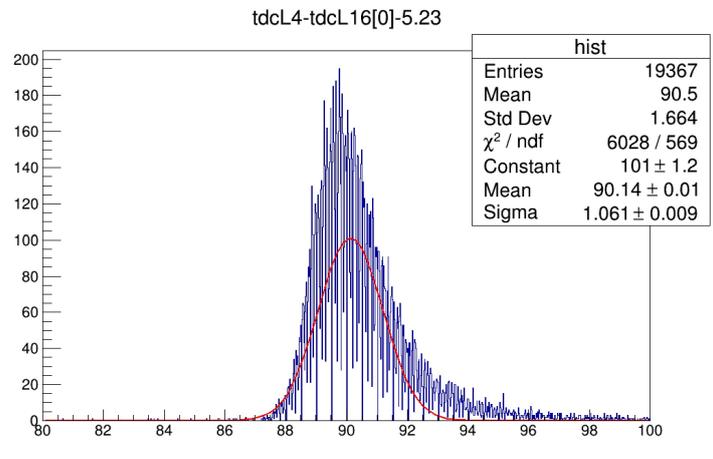


図 4.14: 実験 1 で使用した PMT4 のオフセット

この結果より、実験 1 での PMT1 のオフセットは 139.1 ns、PMT2 のオフセットは 141.9 ns、PMT3 のオフセットは 97.89 ns、PMT4 のオフセットは 90.13 ns となった。

次に実験 2 での同じ光量でのオフセットの解析をした。PMT1 のシグナルは tdcL1 として出力される。tdcL1 からトリガーのシグナルである tdcL16 と、光源から PMT までの距離である 157 cm を光が進むのにかかる時間である 5.23 ns を引いた時間分布をだした。これは光が光電面に入ってから、PMT が出力するまでにかかる時間の分布を出したのと同義である。この時間分布をガウス分布によってフィッティングし、光電面に光が入射してから PMT が出力するまでの時間のピーク値をオフセットの時間としている。

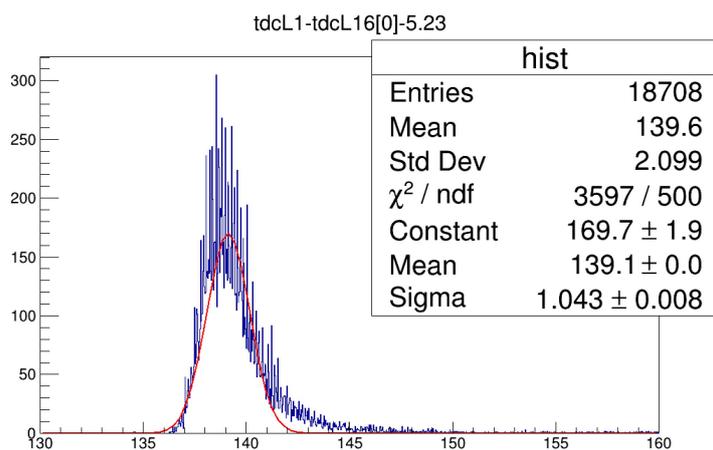


図 4.15: 実験 2 で使用した PMT1 のオフセット

PMT2 のシグナルは tdcL2 として出力される。tdcL2 からトリガーのシグナルである tdcL16

と、光源から PMT までの距離である 157 cm を光が進むのにかかる時間である 5.23 ns を引いた時間分布をだした。これは光が光電面に入ってから、PMT が出力するまでにかかる時間の分布を出したのと同義である。この時間分布をガウス分布によってフィッティングし、光電面に光が入射してから PMT が出力するまでの時間のピーク値をオフセットの時間としている。

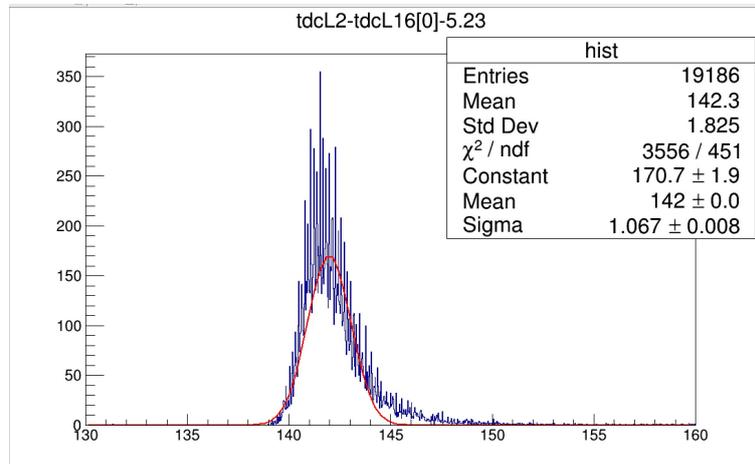


図 4.16: 実験 2 で使用した PMT2 のオフセット

PMT3 のシグナルは tdcL3 として出力される。tdcL3 からトリガーのシグナルである tdcL16 と、光源から PMT までの距離である 157 cm を光が進むのにかかる時間である 5.23 ns を引いた時間分布をだした。これは光が光電面に入ってから、PMT が出力するまでにかかる時間の分布を出したのと同義である。この時間分布をガウス分布によってフィッティングし、光電面に光が入射してから PMT が出力するまでの時間のピーク値をオフセットの時間としている。

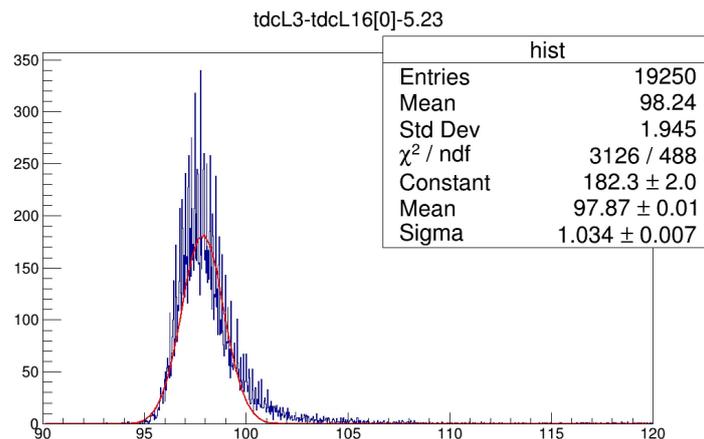


図 4.17: 実験 2 で使用した PMT3 のオフセット

PMT4 のシグナルは tdcL4 として出力される。tdcL4 からトリガーのシグナルである tdcL16 と、光源から PMT までの距離である 157 cm を光が進むのにかかる時間である 5.23 ns を引いた

時間分布をだした。これは光が光電面に入ってから、PMT が出力するまでにかかる時間の分布を出したのと同義である。この時間分布をガウス分布によってフィッティングし、光電面に光が入射してから PMT が出力するまでの時間のピーク値をオフセットの時間としている。

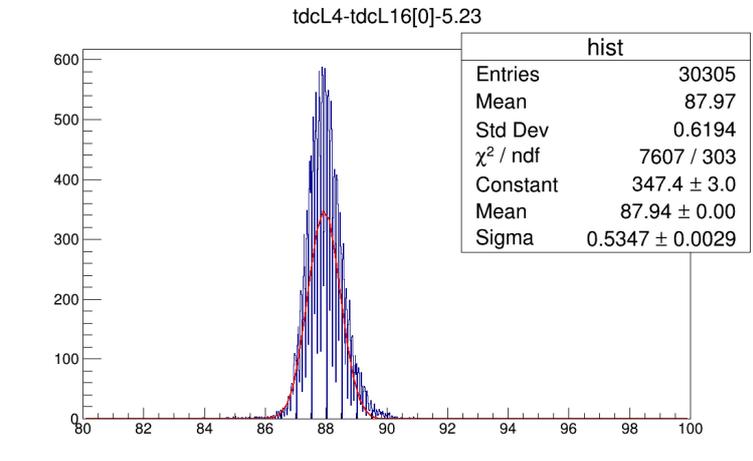


図 4.18: 実験 2 で使用した PMT4 のオフセット

この結果より、実験 1 での PMT1 のオフセットは 139.1 ns、PMT2 のオフセットは 142.0 ns、PMT3 のオフセットは 97.86 ns、PMT4 のオフセットは 87.94 ns となった。以上より使用したオフセットをまとめると以下の表 4.3 のようになる。

型番	BC0957	BC0679	AA5853	BC0592
番号	PMT1	PMT2	PMT3	PMT4
実験 1 /ns	139.1	141.9	97.89	90.13
実験 2 /ns	139.1	142.0	97.86	87.94

表 4.3: それぞれの実験で使用したオフセット

#### 4.4.2 50 cm 四方に PMT を配置し、中心から 50 cm の位置に光源を配置した場合

50 cm 四方に PMT を配置し、中心から 50 cm の位置に光源を配置した場合の、光源から光を入射してから光電面に光が入るまでの時間を見積もった。PMT1 のシグナルは tdcL1 として出力される。PMT1 の観測された光量は 30 mV だったため、30 mV 程度の光量のときのオフセットを選んだ。よって tdcL1 から、トリガーのシグナルである tdcL16 と 30 mV のオフセットである 139.1 ns を引いた時間分布をだした。これは光が光源を出てから光電面に光が入射するまでの時間分布に相当する。この時間分布をガウス分布によりフィッティングし、tdcL1-tdcL16-139.1 の時間のピーク値を光が光源を出てから PMT の光電面に到達するまでの時間の見積もりとした。

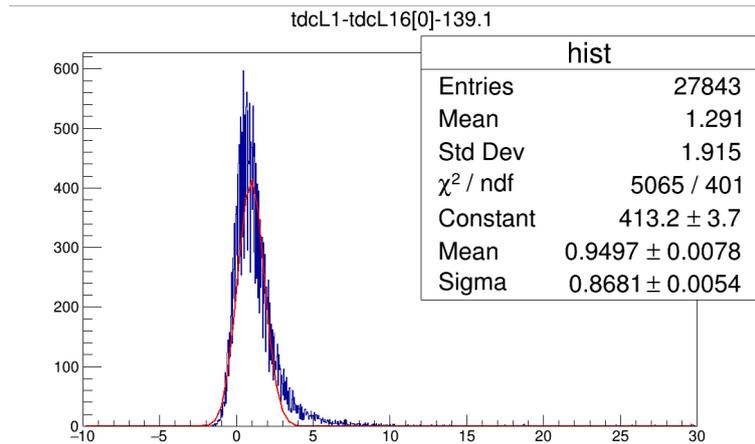


図 4.19: 50 cm 四方に PMT を配置し、中心から 50 cm の位置から光を入射したときの PMT1 の出力までの時間からオフセットを引いた時間

50 cm 四方に PMT を配置し、中心から 50 cm の位置に光源を配置した場合の、光源から光を入射してから光電面に光が入るまでの時間を見積もった。PMT2 のシグナルは tdcL2 として出力される。PMT2 の観測された光量は 27 mV だったため、27 mV 程度の光量のときのオフセットを選んだ。よって tdcL2 から、トリガーのシグナルである tdcL16 と 27 mV のオフセットである 141.9 ns を引いた時間分布をだした。これは光が光源を出てから光電面に光が入射するまでの時間分布に相当する。この時間分布をガウス分布によりフィッティングし、tdcL1-tdcL16-141.9 の時間のピーク値を光が光源を出てから PMT の光電面に到達するまでの時間の見積もりとした。

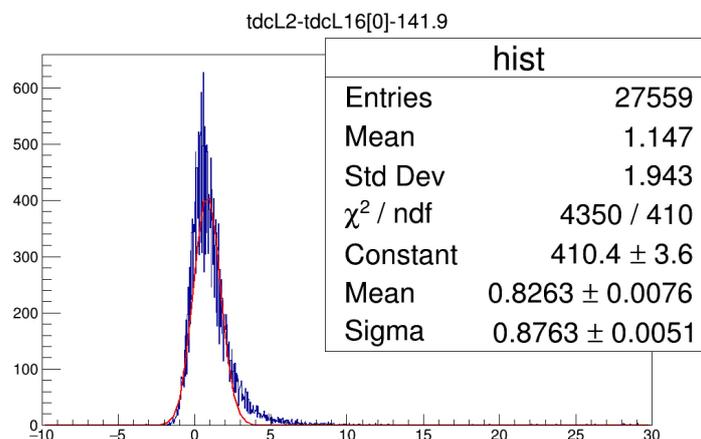


図 4.20: 50 cm 四方に PMT を配置し、中心から 50 cm の位置から光を入射したときの PMT2 の出力までの時間からオフセットを引いた時間

50 cm 四方に PMT を配置し、中心から 50 cm の位置に光源を配置した場合の、光源から光を入射してから光電面に光が入るまでの時間を見積もった。PMT3 のシグナルは tdcL1 として出力される。PMT3 の観測された光量は 35 mV だったため、35 mV 程度の光量のときのオフセットを選んだ。よって tdcL3 から、トリガーのシグナルである tdcL16 と 35 mV のオフセットであ

る 97.89 ns を引いた時間分布をだした。これは光が光源を出てから光電面に光が入射するまでの時間分布に相当する。この時間分布をガウス分布によりフィッティングし、tdcL3-tdcL16-139.1 の時間のピーク値を光が光源を出てから PMT の光電面に到達するまでの時間の見積もりとした。

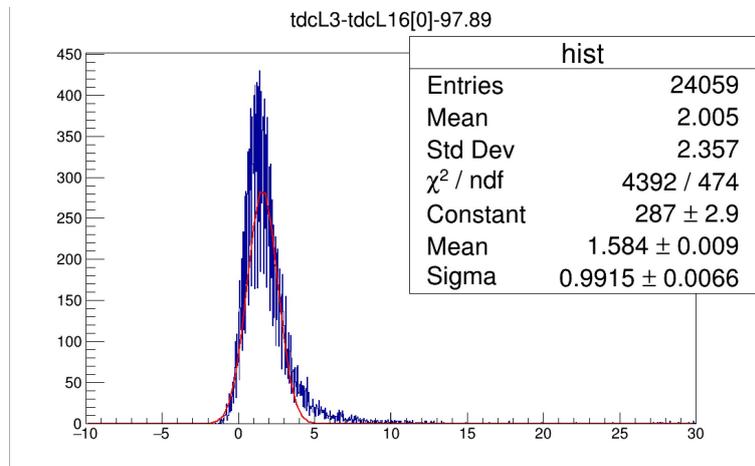


図 4.21: 50 cm 四方に PMT を配置し、中心から 50 cm の位置から光を入射したときの PMT3 の出力までの時間からオフセットを引いた時間

50 cm 四方に PMT を配置し、中心から 50 cm の位置に光源を配置した場合の、光源から光を入射してから光電面に光が入るまでの時間を見積もった。PMT4 のシグナルは tdcL4 として出力される。PMT4 の観測された光量は 30 mV だったため、30 mV 程度の光量のときのオフセットを選んだ。よって tdcL4 から、トリガーのシグナルである tdcL16 と 30 mV のオフセットである 90.13 ns を引いた時間分布をだした。これは光が光源を出てから光電面に光が入射するまでの時間分布に相当する。この時間分布をガウス分布によりフィッティングし、tdcL1-tdcL16-90.13 の時間のピーク値を光が光源を出てから PMT の光電面に到達するまでの時間の見積もりとした。

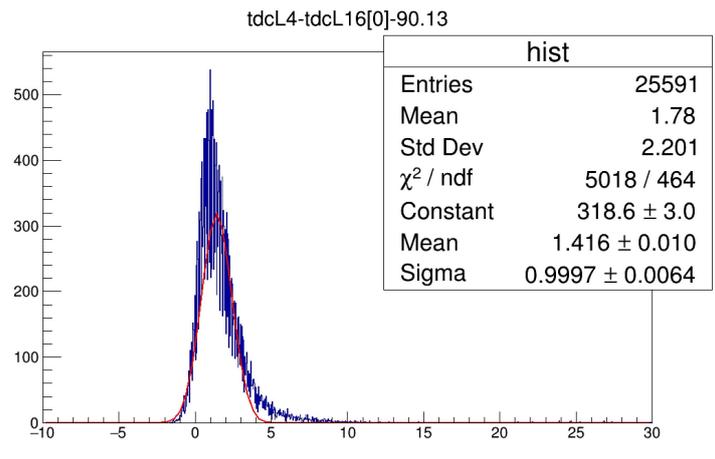


図 4.22: 50 cm 四方に PMT を配置し、中心から 50 cm の位置から光を入射したときの PMT4 の出力までの時間からオフセットを引いた時間

ここで得られた時間に光速をかけると距離が出る。それぞれの光を入射してから光電面に到

達するまでの時間とその距離ををまとめると以下の表 4.4 のようになる。

型番	BC0957	BC0679	AA5853	BC0592
番号	PMT1	PMT2	PMT3	PMT4
出力した光量 / mV	30	27	35	30
光路にかかった時間 / ns	0.95	0.83	1.58	1.41
見積もりの光源と PMT の距離 / cm	28.4	24.8	47.2	42.1
実際の光源と PMT の距離 / cm	61	61	61	61

表 4.4: 50 cm 四方に PMT をおいたときの見積もりの距離

以上の結果より大きくずれているところでは約 40 cm ほどの差がある。今回の実験では 50 cm 四方で行っているためこの差は大きく見える。しかし、この差は時間にすると約 1.3 ns 程度であり、2 章の結果からもわかるように低い光量での時間分解能はこの程度である。よって妥当な差の範囲であるといえる。また実際のハイパーカミオカンデは体積がもっと大きいので、この程度の範囲であれば十分精度のいい見積もりといえる。

またそれぞれの PMT から距離を見積もるのではなく、4 つの PMT から距離を見積もった。ある PMT から見積もられた距離を  $L_i$ 、オフセットの距離を  $L_0$  とすると、光源から PMT までの距離は

$$\sigma = \sqrt{\sum(L_i - L_0)^2} / \sqrt{4} \quad (4.2)$$

という数式で見積もられる。この距離の分布が図 4.23 になっている。この距離の分布をガウス分布でフィッティングし、その sigma の値を距離の分解能として見積もっている。

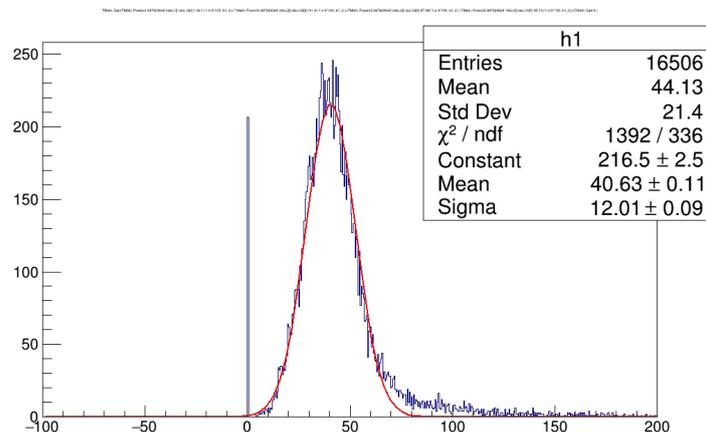


図 4.23: 50 cm 四方に PMT を配置し、中心から 50 cm の高さに光源を配置したときの 4 つの PMT での見積もり

よってずれの大きさは約 40 cm で分解能は 12 cm であった。1 つ 1 つの PMT で見積もりをした場合と差はあまり変わらないが、分解能の精度は上がっている。

#### 4.4.3 50 cm 四方に PMT を配置し、PMT3 の真上 50 cm の位置に光源を配置した場合

50 cm 四方に PMT を配置し、PMT3 の真上 50 cm の位置に光源を配置した場合の、光源から光を入射してから光電面に光が入るまでの時間を見積もった。PMT1 のシグナルは tdcL1 として出力される。PMT1 の観測された光量は 23 mV だったため、23 mV 程度の光量のときのオフセットを選んだ。よって tdcL1 から、トリガーのシグナルである tdcL16 と 23 mV のオフセットである 139.1 ns を引いた時間分布をだした。これは光が光源を出てから光電面に光が入射するまでの時間分布に相当する。この時間分布をガウス分布によりフィッティングし、tdcL1-tdcL16-139.1 の時間のピーク値を光が光源を出てから PMT の光電面に到達するまでの時間の見積もりとした。

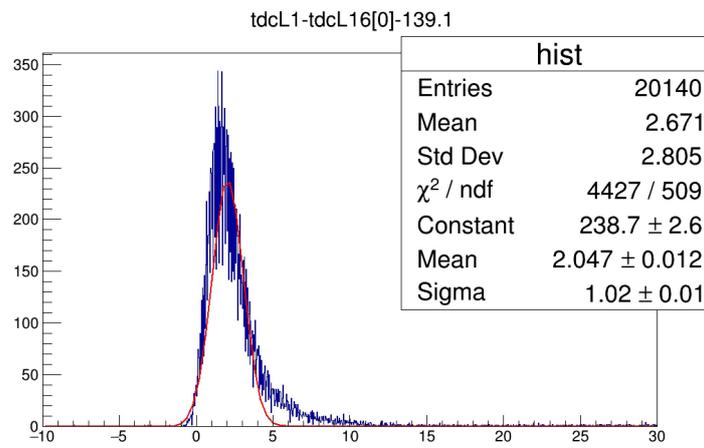


図 4.24: 50 cm 四方に PMT を配置し、PMT3 真上から 50 cm の位置から光を入射したときの PMT1 の出力までの時間からオフセットを引いた時間

50 cm 四方に PMT を配置し、PMT3 の真上 50 cm の位置に光源を配置した場合の、光源から光を入射してから光電面に光が入るまでの時間を見積もった。PMT2 のシグナルは tdcL2 として出力される。PMT2 の観測された光量は 23 mV だったため、23 mV 程度の光量のときのオフセットを選んだ。よって tdcL1 から、トリガーのシグナルである tdcL16 と 23 mV のオフセットである 142.0 ns を引いた時間分布をだした。これは光が光源を出てから光電面に光が入射するまでの時間分布に相当する。この時間分布をガウス分布によりフィッティングし、tdcL1-tdcL16-142.0 の時間のピーク値を光が光源を出てから PMT の光電面に到達するまでの時間の見積もりとした。

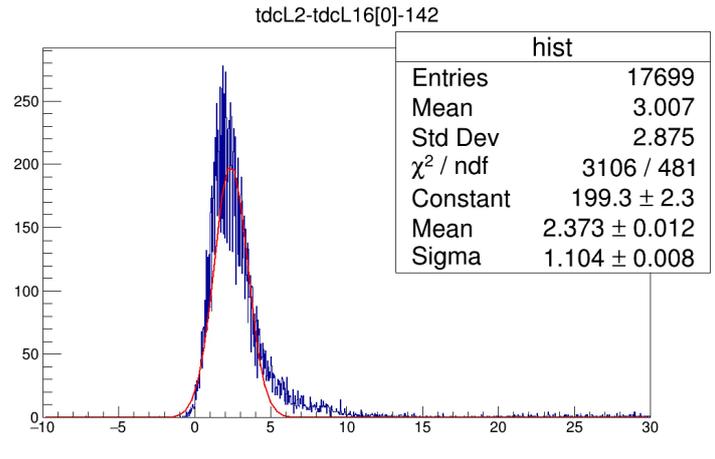


図 4.25: 50 cm 四方に PMT を配置し、PMT3 真上から 50 cm の位置から光を入射したときの PMT2 の出力までの時間からオフセットを引いた時間

50 cm 四方に PMT を配置し、PMT3 の真上 50 cm の位置に光源を配置した場合の、光源から光を入射してから光電面に光が入るまでの時間を見積もった。PMT3 のシグナルは tdcL3 として出力される。PMT3 の観測された光量は 40 mV だったため、40 mV 程度の光量のときのオフセットを選んだ。よって tdcL3 から、トリガーのシグナルである tdcL16 と 40 mV のオフセットである 97.86 ns を引いた時間分布をだした。これは光が光源を出てから光電面に光が入射するまでの時間分布に相当する。この時間分布をガウス分布によりフィッティングし、tdcL1-tdcL16-97.86 の時間のピーク値を光が光源を出てから PMT の光電面に到達するまでの時間の見積もりとした。

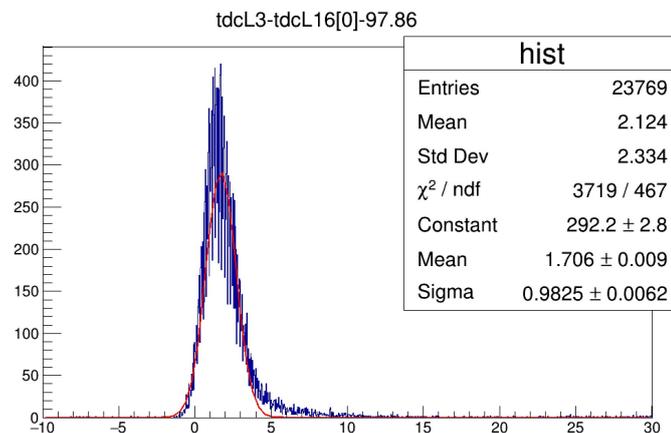


図 4.26: 50 cm 四方に PMT を配置し、PMT3 真上から 50 cm の位置から光を入射したときの PMT3 の出力までの時間からオフセットを引いた時間

50 cm 四方に PMT を配置し、PMT3 の真上 50 cm の位置に光源を配置した場合の、光源から光を入射してから光電面に光が入るまでの時間を見積もった。PMT4 のシグナルは tdcL4 として出力される。PMT4 の観測された光量は 45 mV だったため、45 mV 程度の光量のときのオフセットを選んだ。よって tdcL4 から、トリガーのシグナルである tdcL16 と 45 mV のオフセットであ

る 87.94 ns を引いた時間分布をだした。これは光が光源を出てから光電面に光が入射するまでの時間分布に相当する。この時間分布をガウス分布によりフィッティングし、tdcL4-tdcL16-87.94 の時間のピーク値を光が光源を出てから PMT の光電面に到達するまでの時間の見積もりとした。

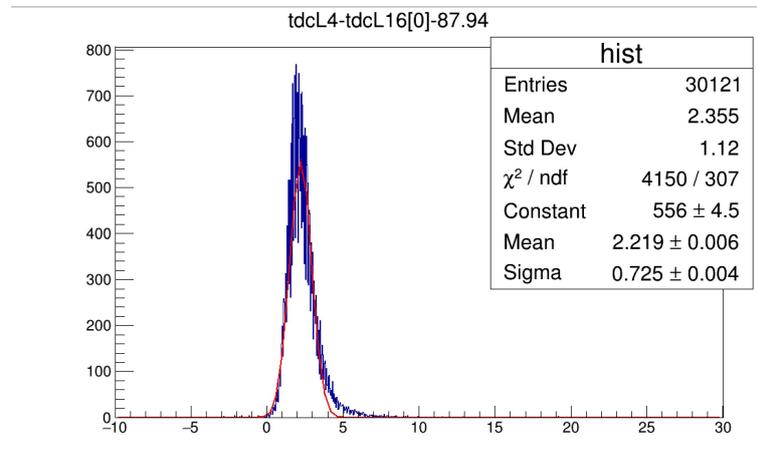


図 4.27: 50 cm 四方に PMT を配置し、PMT3 真上から 50 cm の位置から光を入射したときの PMT4 の出力までの時間からオフセットを引いた時間

ここで得られた時間に光速をかけると距離が出る。それぞれの光を入射してから光電面に到達するまでの時間とその距離ををまとめると以下の表 4.5 のようになる。

型番	BC0957	BC0679	AA5853	BC0592
番号	PMT1	PMT2	PMT3	PMT4
光路にかかった時間 / ns	2.05	2.37	1.70	2.22
見積もりの光源と PMT の距離 / cm	61.2	70.8	50.8	66.3
実際の光源と PMT の距離 / cm	70	86	50	70

表 4.5: それぞれの実験で使用したオフセット

以上の結果より大きく離れているものでも約 16 cm の差であり、これは実験 1 でも述べたようにかなり精度のいいものといえる。また真上に光源をおいた PMT3 に関してはほとんど実際の距離と見積もりの距離に差がないことから、光が PMT に入射する角度が関係していることが予想される。最も角度が大きくなる PMT2 が、最も実際の距離と見積もりの距離の差が大きいことから、角度が大きいのほど見積もりに差が生じやすくなることも予想できる。

また実験 1 同様に 4 つの PMT から距離の見積もりをした。ある PMT から見積もられた距離を  $L_i$ 、オフセットの距離を  $L_0$  とすると、光源から PMT までの距離は

$$\sigma = \sqrt{\sum(L_i - L_0)^2} / \sqrt{4} \quad (4.3)$$

という数式で見積もられる。この距離の分布が図 4.23 になっている。この距離の分布をガウス分布でフィッティングし、その sigma の値を距離の分解能として見積もっている。

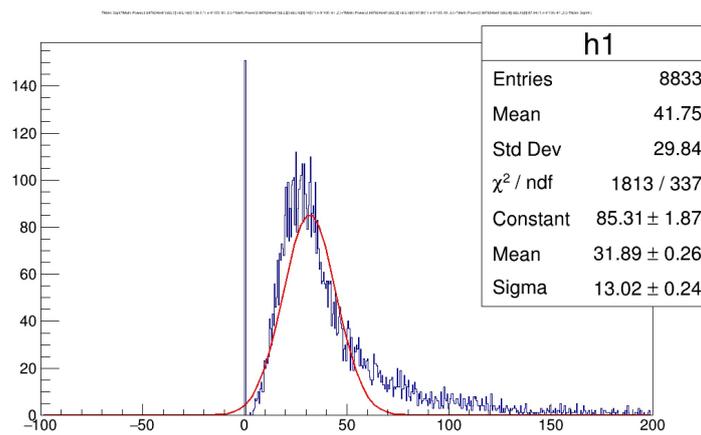


図 4.28: 50 cm 四方に PMT を配置し、PMT3 真上から 50 cm の位置から光を入射したときの 4 つの PMT からの距離の見積もり

よってずれの大きさは約 30 cm で分解能は 13 cm であった。1 つ 1 つの PMT で見積もりをした場合と差はあまり変わらないが、分解能の精度は上がっている。

## 4.5 研究のまとめ

今回、8 cm 径 PMT に焦点をあて、測定精度を評価した。低い光量での評価は今まで行われてきたが、高い光量により様々な値を評価するというのは初めての試みであった。第一段階として、アナログ波形解析、デジタル波形解析、TDC によるデジタル波形の解析の 3 つの方法で時間分解能を比較して、最良の結果を得る方法を評価した。得られた時間分解能も 1 光電子光量で 1.3 ns 程度、100 光電子光量では 0.2 ns 程度であり、高い光量では特によい時間分解能を得ることができた。今回評価した方法に大きな差はなかった。第二段階として、8 cm 径 PMT の検出効率を測定したところ、50 cm 径 PMT と比較して約 83 % の感度を得ることができた。ハイパーカミオカンデの 8 cm 径 PMT と 50 cm 径 PMT を同時に観測するのも初めての試みであった。また、PMT の出力の飽和現象も調査した。-5 V 台までの十分な波高出力を確認でき、地磁気があっても飽和する出力がほぼ変わらないことも確認できた。最後に 4 つの PMT を配置して、光源を中心に配置した場合と、1 つの PMT の直上においた場合で、その観測データから位置と時間をどのくらいの精度で見積もることができるか調査した。光源を中心に配置したとき、その位置の分解能は 12 cm であった。光源を 1 つの PMT の直上においた場合、その位置の分解能は 13 cm であった。8 cm 径 PMT を複数使用して、大光量を入射したときの分解能と出力の飽和現象の検証から、高性能である 8 cm 径 PMT の性能の一部を検証することができた。また観測結果から光源の位置精度を見積もり、口径に近い 10 cm 程度の分解能を得られた。今後、8 cm 径 PMT をハイパーカミオカンデに用いることにより、ニュートリノの検出精度を向上できると見込まれる。

## 謝辞

本論文を作成するにあたり、ご協力いただいたみなさまに感謝の意を表します。

まず指導教員である西村康宏先生に深く感謝申し上げます。ニュートリノの知識、ROOT ファイルの使い方、実験器具の使い方などたくさんのことを1から丁寧に教えていただきました。必要があれば機材もそろえて頂きました。質問や論文に関する打ち合わせも朝早くから夜遅くまで時間を問わず付き合ってくださいました。また、忙しい中スーパーカミオカンデまで引率して頂きました。

西村研究室の先輩の前川さん、藤澤さんにも深く感謝申し上げます。前川さんには、ROOT ファイルの使い方、PMT やニュートリノに関する知識などたくさん質問に答えていただきました。またスーパーカミオカンデにも同伴して頂き、実験を手伝っていただきました。私が本研究をすることに決めたのは、藤澤さんの研究について詳しく説明して頂き、PMT に興味を持ったからです。同系統ということもあり、実験器具の使い方を教えて頂いたり卒業論文の添削もしていただきました。

同研究室の同輩の岡崎君にも深く感謝申し上げます。私の理解が足りない部分や解析方法について一番質問のしやすい存在として教えていただきました。また本実験で使用したディフューザーボールについても協力していただきました。

最後に支えて頂いた家族にも深く感謝申し上げます。