

2019 年度 学部卒業論文
ハイパーカミオカンデに向けた
波長変換アクリルによる
光検出効率向上の検証

慶應義塾大学理工学部物理学科
西村研究室
前川雄音
61616995

2020 年 2 月 8 日

目次

1	はじめに	4
1.1	概要	4
1.2	目的	4
2	原理	5
2.1	ニュートリノの発見	5
2.2	ニュートリノ振動	6
2.3	スーパーカミオカンデ	6
2.4	ハイパーカミオカンデ	9
2.5	チェレンコフ光	9
2.6	宇宙線	10
3	実験装置	12
3.1	光電子増倍管	12
3.2	水槽	15
3.3	防護カバー	16
3.4	VME, NIM モジュール	17
4	光検出効率の測定のための装置配置決定	19
5	結果	25
5.1	水チェレンコフ光の観測	25
5.2	従来のアクリルと WLS の比較	25
6	追加実験	31
6.1	追加実験:方法	33
6.2	追加実験:結果	36
6.3	追加実験:考察	39
6.4	追加実験:結論	39
7	結論	39

8	考察	39
8.1	波長変換材の吸収・放射波長域の考察	39
8.2	空気中の測定による屈折の考察	41
9	まとめ・展望	43

1 はじめに

1.1 概要

本論文では、ハイパーカミオカンデ実験に向けた、光電子増倍管の防護カバーに用いるアクリルに波長変換材を導入し、チェレンコフ光の検出効率を向上させることを目的としている。

ハイパーカミオカンデは核子の崩壊やニュートリノの観測を目的として設計された建設予定の検出器である。ニュートリノは 1930 年に提唱された素粒子であり、ニュートリノと相互作用して発生した荷電粒子は媒質中でチェレンコフ光と呼ばれる光を放射する。しかしニュートリノは相互作用する確率が極めて小さいため、ハイパーカミオカンデは大型の水タンクを備えている。ニュートリノの相互作用により発生した水中のチェレンコフ光を光センサで観測する。太陽ニュートリノや天体ニュートリノなどの低エネルギーニュートリノは発生させるチェレンコフ光の光量が小さく、検出光量の向上はこのようなイベントの検出感度改善につながる。

ハイパーカミオカンデの前身であるスーパーカミオカンデでは、ニュートリノ振動と呼ばれる現象が発見された。素粒子の性質を説明する枠組みである標準理論では、ニュートリノは質量の無い粒子とされている。しかし、ニュートリノ振動の発見はニュートリノにゼロでない質量があることを示しており、標準理論の拡張が必要となる。ハイパーカミオカンデ実験は、ニュートリノ振動や核子崩壊などの標準理論を越えた物理現象を捉え、新たな理論の手がかりの発見を目指している。

ハイパーカミオカンデに取り付ける光センサである光電子増倍管の感度には波長依存性がある。チェレンコフ光は短波長側に多くの光子数を持ち、短波長の光を光電子増倍管の有感な波長域に変換することで光検出効率の向上が実現されると考えられる。

ニュートリノやニュートリノ振動、スーパーカミオカンデとハイパーカミオカンデ、チェレンコフ光に関して第 2 章で説明する。本研究で行う実験の装置に関しては第 3 章で、実験方法は第 4 章で説明する。実験結果は第 5 章に示す。

1.2 目的

本実験は宇宙線ミュオンを用いて発生させたチェレンコフ光をハイパーカミオカンデで使用予定の 50 cm 径の光電子増倍管で測定する。波長変換による検出効率の変化を調

べるため、従来のアクリルを光電子増倍管のカバーとして用いる場合と、波長変換アクリルを用いる場合でチェレンコフ光の検出効率の違いを測定する。

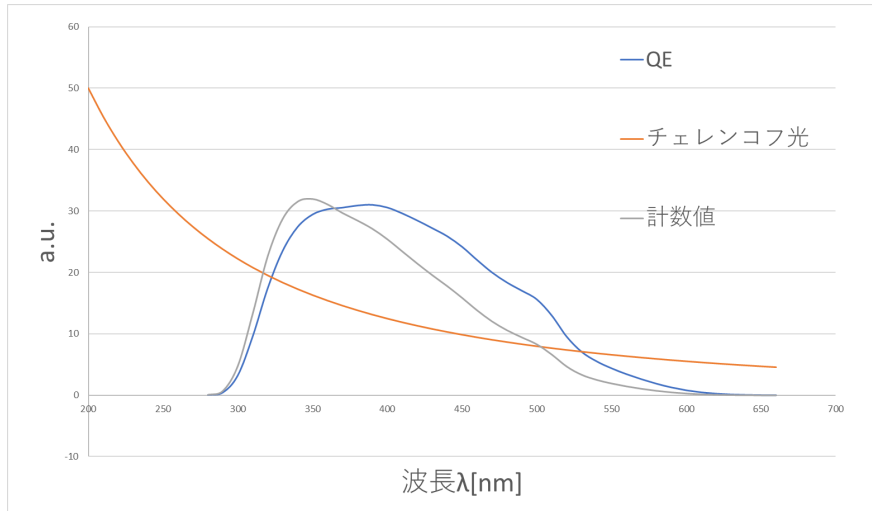


図 1 光電子増倍管の量子効率とチェレンコフ光のスペクトル

図 1 には、ハイパーカミオカンデで用いる 50 cm 径光電子増倍管の量子効率 (QE) と、チェレンコフ光のスペクトルおよび光電子増倍管で検出される光電子数 (計数值) の波長分布を示している。ただし光電子増倍管の量子効率は浜松ホトニクスから提供されたデータを使用した。図 1 から、チェレンコフ光の光子数は波長の長さに応じて単調に減少しており、光電子増倍管の量子効率の最も良い 390 nm よりも短波長である 350 nm に計数值が最も多いことがわかる。波長変換アクリルによって短波長の光を量子効率の良い波長域に変換することで、図 1 中の灰色線で表されている計数值から変化し、検出される光子数が増加すると予想される。

2 原理

2.1 ニュートリノの発見

ここでは、ハイパーカミオカンデで観測するニュートリノについて説明を行う。ニュートリノとは、中性子が崩壊し電子が放出される崩壊において、電子のエネルギースペクトルが連続であることを説明するために W.Pauli によって提唱された粒子である。Bethe と Baker によって逆崩壊によるニュートリノ検出の可能性が示唆された。

$$\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n \quad (1)$$

ニュートリノは非常に反応断面積が小さいため、検出には巨大な装置が必要となる。1951年にF.ReinesとC.Cowanによって行われた実験では、200 Lのタンク2つにカドミウムを溶解させた水を入れ、さらに1400 Lの液体シンチレータのタンク3つで構成された実験装置が用いられた。この実験により、核反応炉から放出されたニュートリノによる逆崩壊が捉えられ、反電子ニュートリノの存在が確認された[2]。現在ニュートリノには、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つのフレーバーが確認されている。

2.2 ニュートリノ振動

ハイパーカミオカンデでの研究対象の1つであるニュートリノ振動について説明する。素粒子実験の結果を良く説明する標準理論において、ニュートリノは電氣的に中性で、質量を持たないレプトンである。そのためニュートリノは弱い相互作用でしか反応を起こさず、極めて小さな反応断面積を持つ。標準理論内の相互作用では、3種類のフレーバーに対しレプトン数は保存している。しかしニュートリノ観測において、太陽からのニュートリノの数が理論より少ない「太陽ニュートリノ問題」と、大気中のニュートリノの電子ニュートリノとミューニュートリノの成分比が理論と異なる「大気ニュートリノ問題」が存在した。これらの問題の解決策として、ニュートリノのフレーバーが変化する「ニュートリノ振動」がある。後述するスーパーカミオカンデ実験でニュートリノ振動が観測され、この問題は解決された。ニュートリノ振動はニュートリノが質量を持つことを要求し、標準理論の修正が必要となる。

2.3 スーパーカミオカンデ

ハイパーカミオカンデの前身である、現行のスーパーカミオカンデについて説明する。スーパーカミオカンデはニュートリノ観測を目的とした水チェレンコフ検出器である。1996年に観測を開始し、現在も観測を続けている。スーパーカミオカンデは直径39.3 m、高さ41.4 mの円筒形のタンクに50 ktの超純水を備えており、タンクの内壁には11129本の光電子増倍管が設置されている。

ニュートリノは水中の原子核や電子と相互作用し、それに応じてチェレンコフ光と呼ばれるリング状の光を発生する。この光を光電子増倍管で検出し、ニュートリノの反応位置、

時間および運動量を測定することができる。

スーパーカミオカンデは 1998 年に大気ニュートリノ振動の発見、2001 年には太陽ニュートリノ振動の発見をし、ニュートリノ研究の結果を残した。しかし、2001 年に 6777 本の光電子増倍管が破損する事故が起こったため実験は中断し、光電子増倍管を保護する衝撃波防止カバーが必要となった。[3]

カバーは図 2 のように、光電面の部分には透明度の高いアクリルを使用し、光電面以外はガラス強化繊維プラスチック (FRP) のカバーで覆われている。

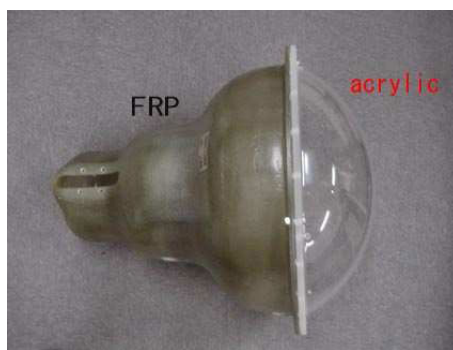


図 2 衝撃波防止カバー [4] から引用

2002 年に実験が再開し、2006 年には事故前とほぼ同数の 11129 本の光電子増倍管が取り付けられた。事故前の観測時期を SK₁、事故後を SK₂、さらにほぼ同数の光電子増倍管の設置後の観測時期を SK₃ と呼ぶ。2008 年にはデータ収集のシステムを改良し、新たに観測を始めた。この観測時期を SK₄ と呼び、現在も観測が続けられている。スーパーカミオカンデには 50 kt の水を蓄える内水槽の他に、ニュートリノ観測のノイズとなる宇宙線を識別するための外水槽がある。外水槽には 20 cm 径の光電子増倍管が一边 60 cm の波長変換プレートの中心に取り付けられている。



図 3 外水槽の光電子増倍管 [5] より引用

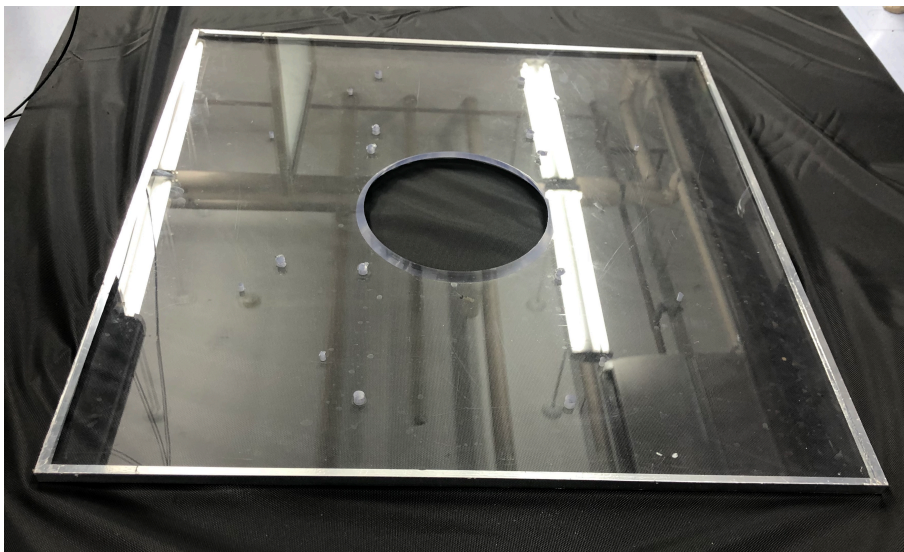


図 4 外水槽光電子増倍管用波長変換プレート

図 3 は、スーパーカミオカンデの外水槽に取り付けられている光電子増倍管である。また、図 4 には実際に外水槽用 PMT に取り付けられている波長変換プレートを示した。波長変換プレートを取り付けた光電子増倍管は、何も取り付けしていないものと比べ集光効率

が 1.5 倍向上した。[6]

2.4 ハイパーカミオカンデ

2020 年代後期に実験開始が予定されているハイパーカミオカンデ実験は、直径 68 m、高さ 71 m の円筒形タンクを用い、有効体積はスーパーカミオカンデの約 10 倍の 190 kt となる。光電子増倍管で使用予定の光電子増倍管はスーパーカミオカンデの 2 倍の感度を持ち、内水槽には約 40000 本を取り付け、高感度なニュートリノ検出を目指している。光電子増倍管の衝撃波防止カバーはハイパーカミオカンデでも取り付けられるため、防護カバー素材を波長変換アクリルに取り換えることで光検出効率の向上が期待でき、微弱なニュートリノ現象の検出感度改善の可能性につながる。

2.5 チェレンコフ光

チェレンコフ光の光量は波長が短いものほど多く、紫外領域の光を可視光に変換する波長変換材を投入したアクリルカバーを利用することで光を効率よく収集することが予想される。

本実験では水中で発生したチェレンコフ光を光電子増倍管で測定する。光電子増倍管に取り付けるアクリルカバーの種類を変え、測定データの比較を行い、光検出効率の違いを検証する。

2.5.1 チェレンコフ光の原理

チェレンコフ光は、媒質中を荷電粒子が通過する際に、粒子の速度が媒質中の光速を越えている間放出される光である。光は粒子の進行方向に対して決まった角度で放射され、円錐状に発生する。

電気量 Ze の荷電粒子が速度 $v = \beta c$ で屈折率 n の媒質中を運動しているときを考える。媒質中での光速度は $v_E = c/n$ である。チェレンコフ光の発生する条件は

$$v = \beta c > v_E = c/n \quad (2)$$

である。

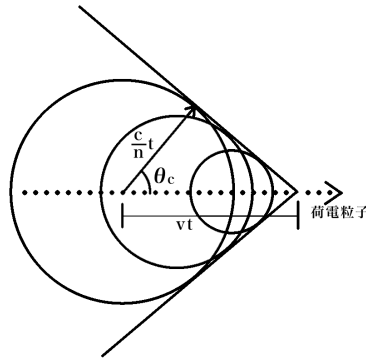


図5 チェレンコフ放射

粒子の進行方向に対して、チェレンコフ光が放出する角度を θ_c とすると、図5より

$$\cos \theta_c = 1/n\beta \quad (3)$$

となる。

2.5.2 チェレンコフ光の光子数と波長の関係

光子の単位エネルギーあたり、荷電粒子の行程の単位長さあたりの放射光子数は以下の式で与えられる。

$$\frac{d^2 N}{dE_\gamma dx} = \frac{\alpha Z^2}{\hbar c} \sin^2 \theta_c = \frac{\alpha^2 Z^2}{r_e m_e c^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right) \quad (4)$$

ここで α , r_e , m_e はそれぞれ微細構造定数、古典電子半径、電子の質量である。

また光子の波長とエネルギーの関係 $E = hc/\lambda$ を用い、単位波長当たりの放射光子数に置き換えると、以下のようなになる。

$$\frac{d^2 N}{d\lambda dx} = \frac{2\pi\alpha Z^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right) \quad (5)$$

上式からチェレンコフ光の光子数は波長の2乗に反比例し、短波長側に光子が多いことがわかる。

2.6 宇宙線

宇宙から地球大気に飛来する高エネルギーの粒子を一次宇宙線と呼び、大気中の原子核と衝突し生まれる粒子を二次宇宙線と呼ぶ。一次宇宙線の85%は陽子である。一次宇宙

線の衝突によって多くの π 中間子が生成される。

2.6.1 ミューオンの発生

地上に届く粒子は π 中間子の崩壊によって生まれたミューオンが大半を占める。 π 中間子の崩壊は以下のようなになる。

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad (6)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (7)$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (8)$$

2.6.2 ミューオンの性質

静止系におけるミューオンの寿命は 2.19703×10^{-6} s であり、質量は 105 MeV である。宇宙線ミューオンは相対論的效果により寿命が長くなるため、ほとんどのミューオンは崩壊せずに地上高度に届く。

3 実験装置

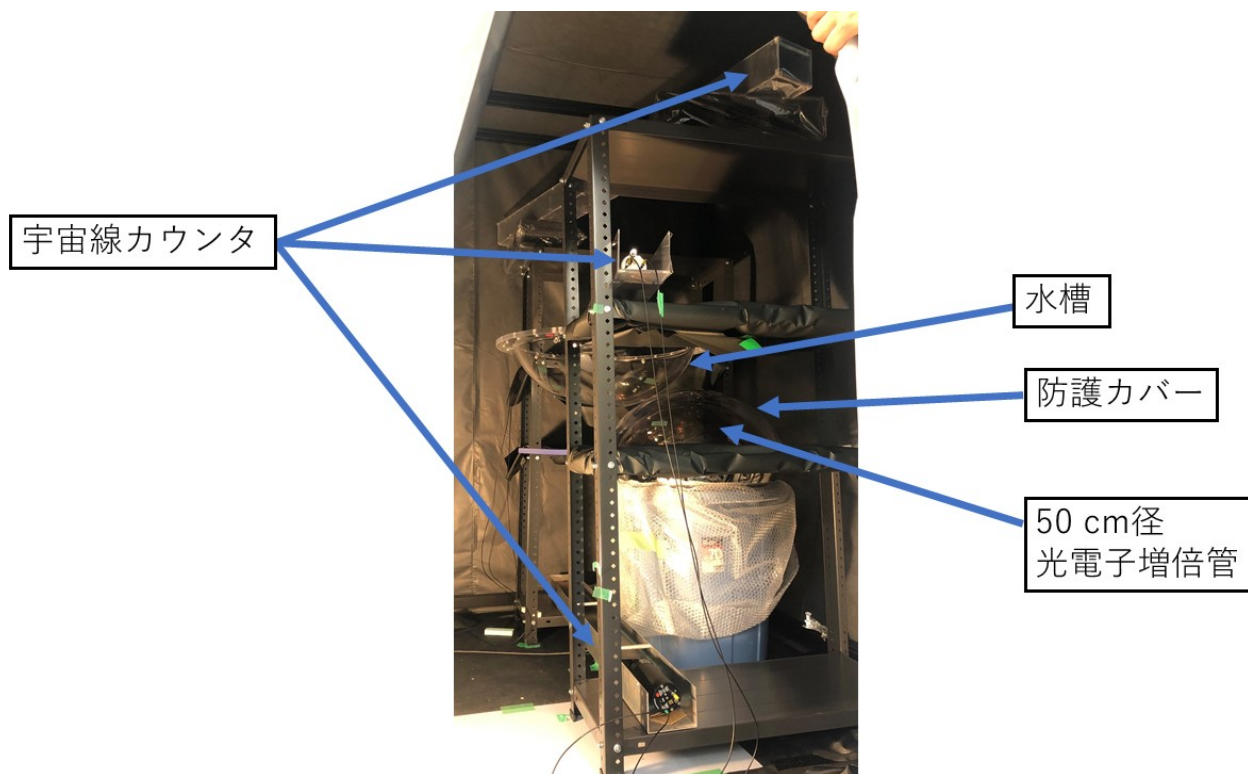


図 6 実験装置の配置

装置配置の全体図を図 6 に示した。装置は主に 50 cm 径光電子増倍管、水槽、宇宙線カウンタ、防護カバーから成る。

3.1 光電子増倍管

光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube) とは光電効果を利用した光センサである。光電面に光が入射することで発生した光電子をダイノードで増幅し、微弱な光子を検知することができる。光電子増倍管の模式図を図 7 に示した。1 光子あたり放出される電子の数を量子効率と呼ぶ。光電子増倍管の量子効率は一般的に波長依存性が存在する。

本実験では浜松ホトニクス製の R7724(5 cm 径 PMT) および R12860(50 cm 径 PMT) を

使用した。この 50cm 径 PMT はハイパーカミオカンデで使用される PMT の候補である。5 cm 径 PMT は後述する宇宙線カウンタとして、50 cm 径 PMT はチェレンコフ光を観測するために利用する。50 cm 径 PMT の外観は図 9 のようになっている。光電子増倍管の特性を表 1 に示す。

表 1 光電子増倍管の特性

項目	値	単位
感度波長範囲	300 to 650	nm
最大感度波長	420	nm
最小有効光電面	R12860	$\phi 460$
	R7724	$\phi 46$

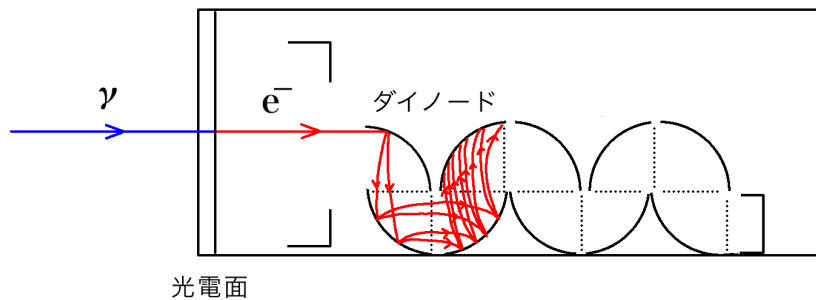


図 7 光電子増倍管の概略図

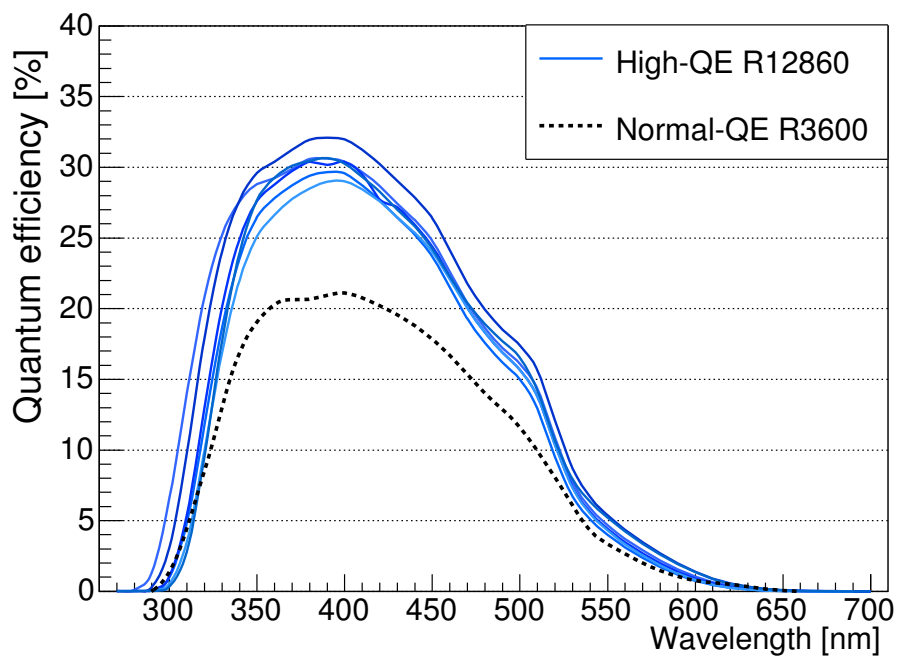


図 8 50 cm 径 PMT の量子効率 [1] から引用

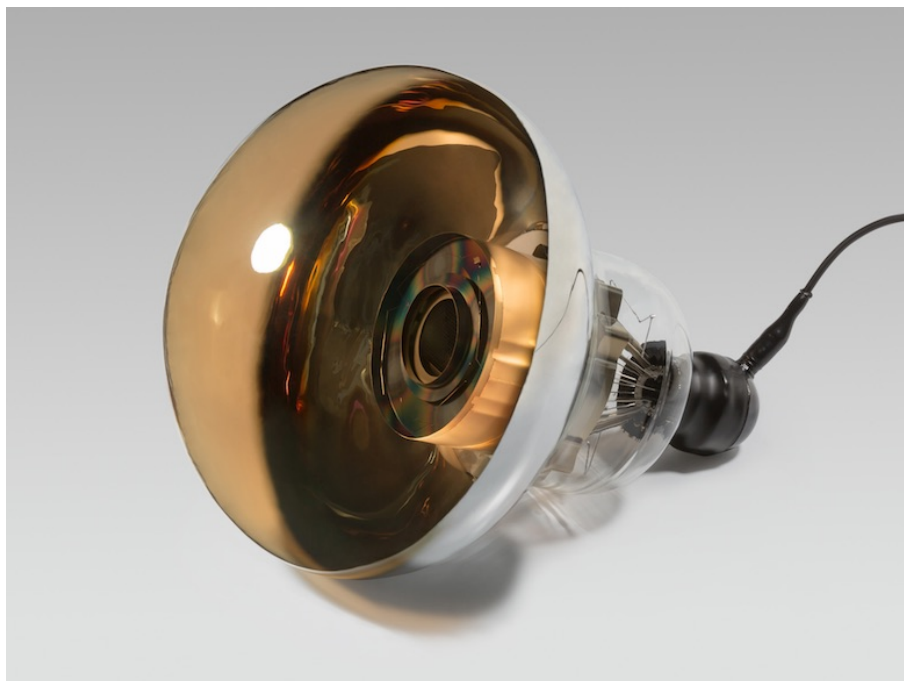


図 9 50 cm 径 PMT [1] から引用

50 cm 径 PMT の量子効率は図 8 のようになっており、350 nm から 450 nm あたりの量子効率が高く 30 % 程度である。

3.2 水槽

水を媒質にチェレンコフ光を発生させるための水槽として厚さ 15 mm、直径 54 cm の半球状の亚克力容器を用いた。水は容器の底から 7.0 cm まで入れた。水が媒質の場合、チェレンコフ角は約 42 度である。

3.2.1 宇宙線カウンタ

チェレンコフ光は水中を宇宙線が通過することで発生するため、宇宙線の水槽通過を測定のトリガーとして利用したい。宇宙線ミュオンの検出のためにプラスチックシンチレータを用いた。シンチレータに高速の荷電粒子が通過すると、物質の原子が励起される。励起された原子が基底状態に戻る際のエネルギーを光として放出し、この光をシンチレーション光と呼ぶ。光電子増倍管を用いてシンチレーション光を観測し、宇宙線の通過を確認する。プラスチックシンチレータは 105cm × 10cm × 2cm の大きさである。宇宙線カウンタとして、5 cm 径 PMT とプラスチックシンチレータをライトガイドで接続したものを 3 本用意した。宇宙線は様々な方向から飛来するが、「複数の宇宙線カウンタの通過」を条件とすることで宇宙線の方向を制限することができる。水槽の上部に宇宙線カウンタを設置し、水を通過する宇宙線を選んだ。作成した宇宙線カウンタを図 10 に示す。

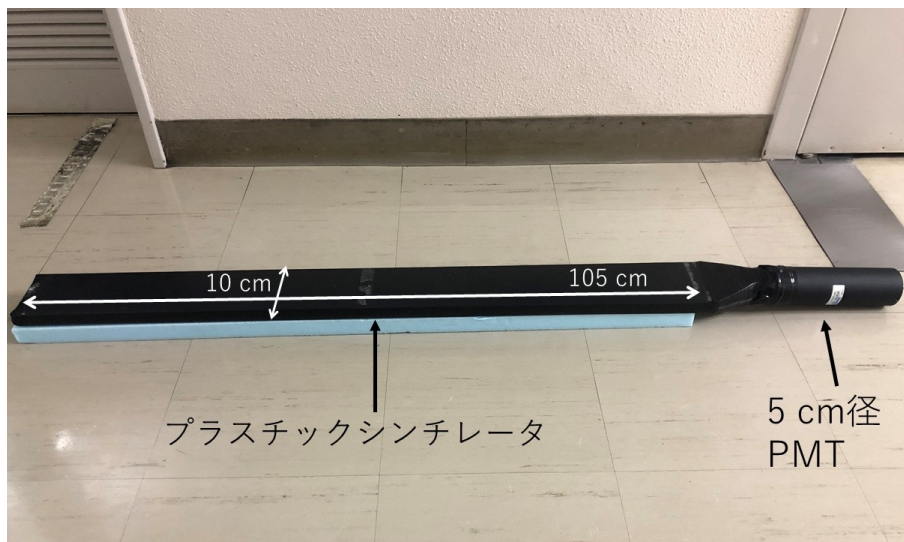


図 10 宇宙線カウンタ

3.3 防護カバー

防護用アクリルカバーは 50 cm 径 PMT の光電面を覆うように設置した。従来のアクリルと波長変換アクリル (WLS) の二種類を用意して実験を行い測定結果の比較をする。外観を図 11 に示す。カバーの大きさは縦 77 cm、横 77 cm、板厚は 15 mm、カバーの深さは 20 cm であった。

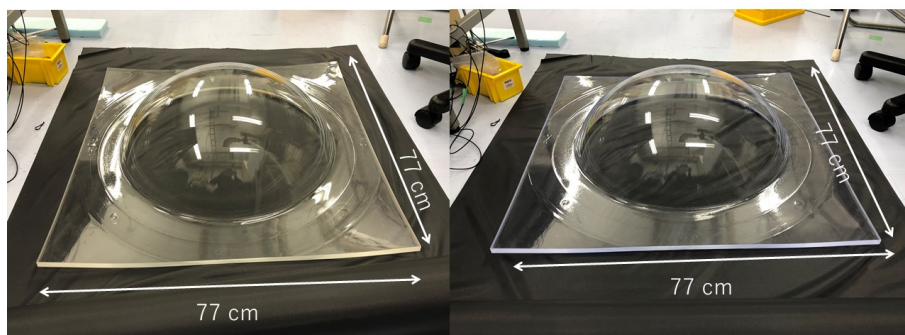


図 11 防護カバー 左：従来のアクリル 右：WLS

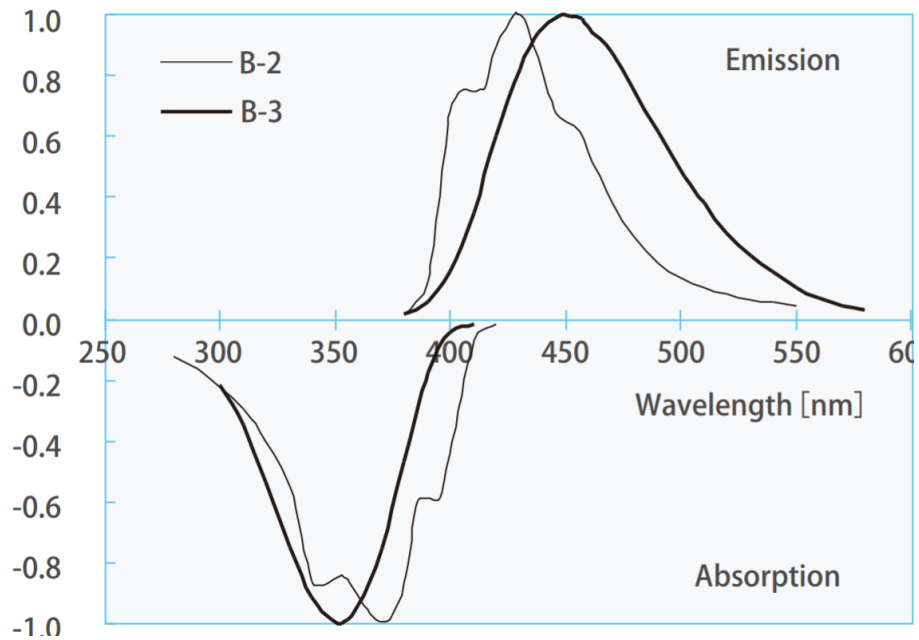


図 12 WLS の吸収・放出スペクトル [7] より引用

WLS は Kuraray の Wavelength Shifting Fibers として用いられている B-2 を使用しており、紫外光を吸収し、青色光を放出する。吸収・放出特性を図 12 に示す。吸収のピークは 375 nm、放出のピークは 437 nm である [7]。

3.4 VME, NIM モジュール

宇宙線カウンタの信号をチェレンコフ光測定のトリガーとして利用するために NIM 規格のモジュールを使用する。また、50 cm 径 PMT からのチェレンコフ光の信号は、VME 規格の ADC(Analog to Digital Converter) に入力して光量に相当するデジタル信号を得る。図 13 には、クレートに挿入されている NIM モジュールと VME モジュールの画像を示している。

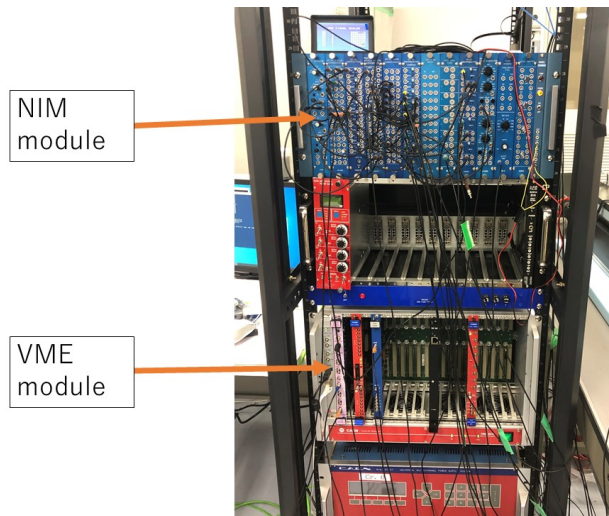


図 13 VME, NIM モジュール

3.4.1 NIM モジュール

NIM 規格 (Nuclear Instrument Modules) は高エネルギー物理の研究で広く用いられる回路の規格である。本実験では DISCRIMINATOR, COINCIDENCE, GATE GENERATOR の三種類の NIM モジュールを用いた。以下にその機能の説明を記す。

DISCRIMINATOR : 閾値を越えた電圧の信号に対し、設定した幅のパルス波を出力する装置。

COINCIDENCE : 二つの入力信号の論理積を出力する装置。

GATE GENERATOR : 入力信号に対して、ディレイと幅を設定したパルス波を出力する装置。

図 14 には DISCRIMINATOR の機能の模式図を示す。信号が閾値を越えたタイミングから、パルス波を発信する。

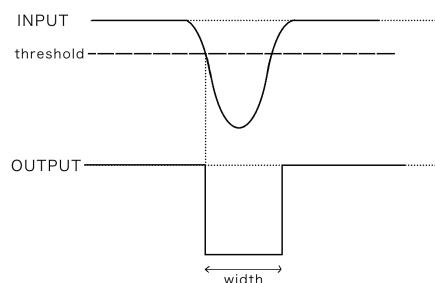


図 14 DISCRIMINATOR の機能 模式図

COINCIDENCE は図 15 に示すように、A と B の入力に対し $A \cap B$ を出力する。

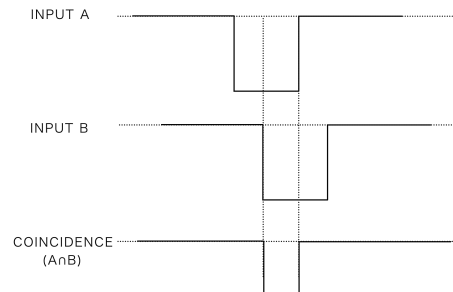


図 15 COINCIDENCE の機能 模式図

3.4.2 ADC

本実験で使用した ADC は豊伸電子の 8ch CSADC である。この ADC は GATE 入力、RESET 入力および 8 つのアナログ入力がある。GATE 信号が有効な間、アナログ信号を積分しデジタル値に変換する。チャンネルに入力された電気量に応じて ADC カウントが増加する。

$$\text{ADCcounts} = \text{charge/pC} \times 11.92 + 956.8 \quad (9)$$

式 9 には、8 つのチャンネルのうち、ch1 の電気量と ADC カウントの関係を示している。この関係を用いて測定で得られた ADC カウントから、信号を電気量として得ることができる。

3.4.3 マスタモジュール

本実験で使用したマスタモジュールは struck innovative systeme の SIS3153 である。このモジュールは Ethernet でコンピュータと接続し、コンピュータから各 VME モジュールにアクセスすることができる。このモジュールで ADC で得られたデジタル値の読み出しおよび、ADC へのリセット信号の書き込みを行う。

4 光検出効率の測定のための装置配置決定

本研究の目的である、波長変換アクリルによる光検出効率の変化を調べるため、水槽を通過した宇宙線によるチェレンコフ光を 50 cm 径 PMT で検出できるような装置の配置

を決定する。装置配置の全体は、図 6 に示している。ここでは各装置の配置について説明する。

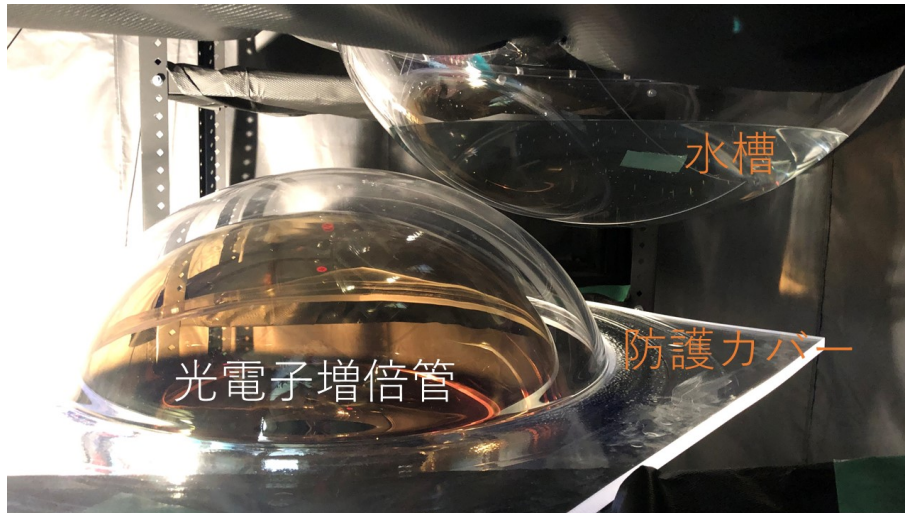


図 16 水槽の配置

図 16 に水槽と防護カバーの位置関係を示した。水中でのチェレンコフ角が約 42 度であることを考慮し、直上からの宇宙線が作るチェレンコフ光を検出できる位置に配置した。

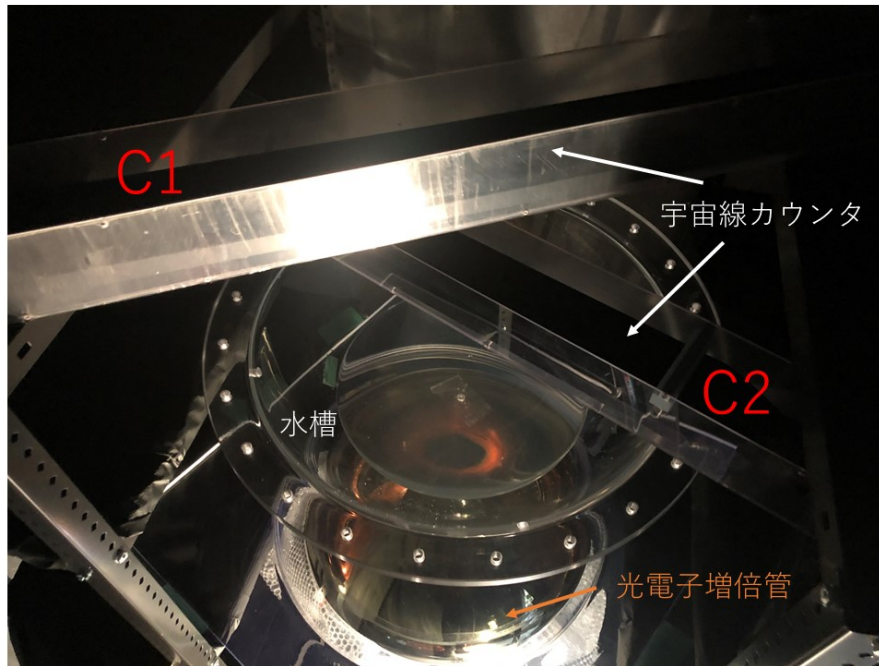


図 17 装置の配置

図 17 には、装置の上からの図を写している。2 本の宇宙線カウンタを通過した宇宙線が水槽の中心を通過するように配置している。

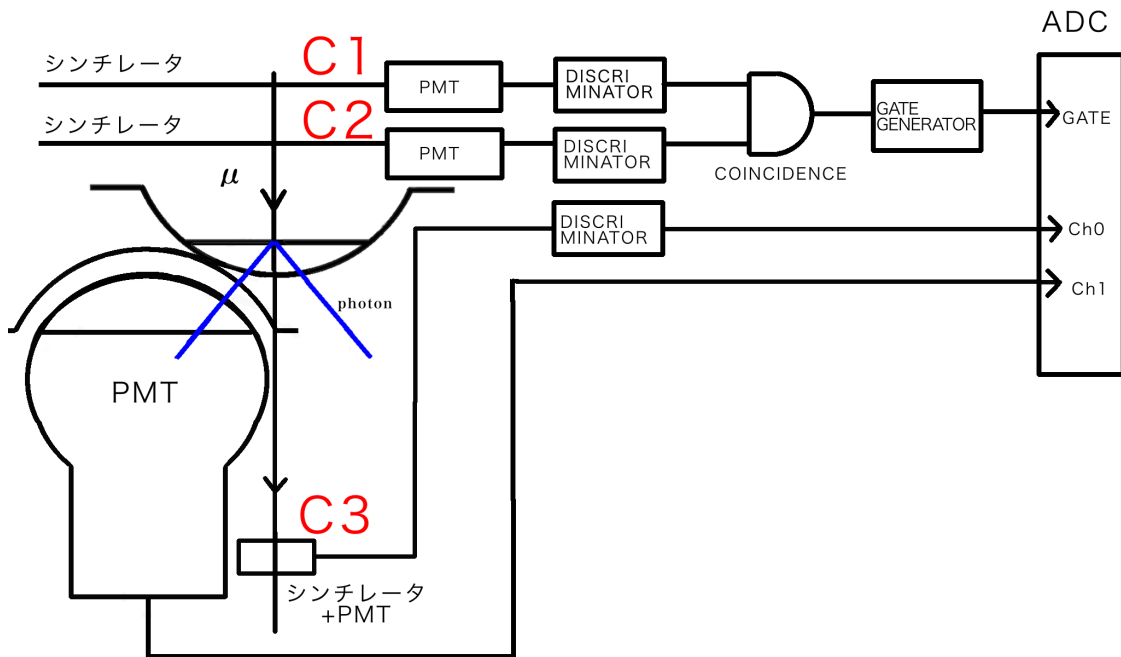


図 18 装置の配置

実験装置は図 18 のように、シンチレータと光電子増倍管を組み合わせた宇宙線カウンタを上部に二本、下部に一本配置している。宇宙線カウンタを二本用意することで上方からの宇宙線を選択することができ、さらに宇宙線カウンタを一本加えることで宇宙線の角度を制限することができる。以下では、配置した宇宙線カウンタを上から順に C1, C2, C3 と呼ぶ。C1, C2 を同時に通過した信号をすべて測定のトリガーとし、さらに、解析に向けたフィット可能なピークを得るために C3 を用いる。

シンチレータに宇宙線が通過したときシンチレーション光が発生する。光電子増倍管がシンチレーション光を電気信号に変え、この信号を DISCRIMINATOR でパルス波に変換する。パルス波が同時に来た場合、COINCIDENCE から GATE GENERATOR に信号を送る。GATE GENERATOR は 300 ns の幅のパルス波を出力し、その信号は ADC の GATE 入力に入れた。C1, C2 は 46 cm 間隔で配置した。C1, C2 を通過した宇宙線が水中でチェレンコフ光を起こすように、C1, C2 の交わる面の直下に水槽を配置した。水槽で発生したチェレンコフ光が 50 cm 径 PMT の光電面に当たるように、アクリルの防護カバーを置き、その下に 50 cm 径 PMT を設置した。50 cm 径 PMT のアナログ信号は ADC の ch1 に入力した。

また、C1 の下方 140 cm に三本目の宇宙線カウンタ (C3) を設置することで宇宙線の方向が定まり、水を通さないようなイベントを減らすことができる。

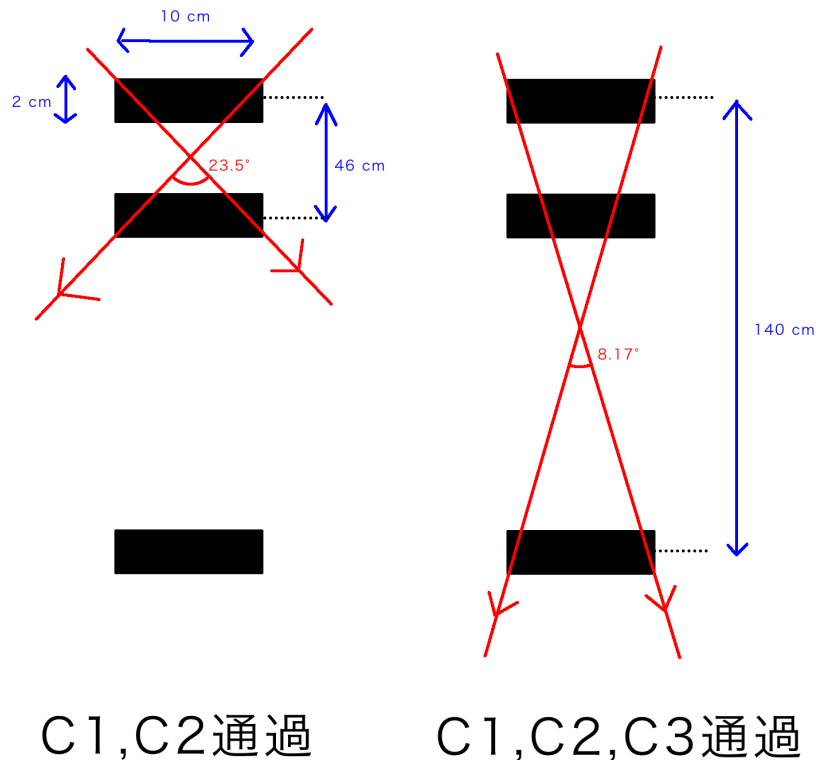


図 19 宇宙線カウンタ通過時の模式図

図 19 に宇宙線カウンタを宇宙線が通過する際の模式図を示した。C1, C2 を 46 cm 間隔で直交して配置した場合、2 本を通過する宇宙線の天頂角には約 24 度の範囲が存在する。C1 に対して 140 cm 下に設置した C3 を通過したイベントを選択することで宇宙線の来る天頂角の範囲を 8.2 度程度まで制限することができる。

C3 の出力を DISCRIMINATOR でパルス波にし、ADC の ch0 に入力した。ch0 の ADC カウントは、図 20 のように C3 を通過したイベントは 12000 あたりにカウントされ、C1, C2 のみ通過したイベントは 1000 あたりにカウントされる。ch1 に入力された 50 cm 径 PMT の ADC データのうち、ch0 の ADCcounts が 10000 を越えたデータに制限することで、宇宙線が C1, C2, C3 すべて通ったイベントを選択できる。

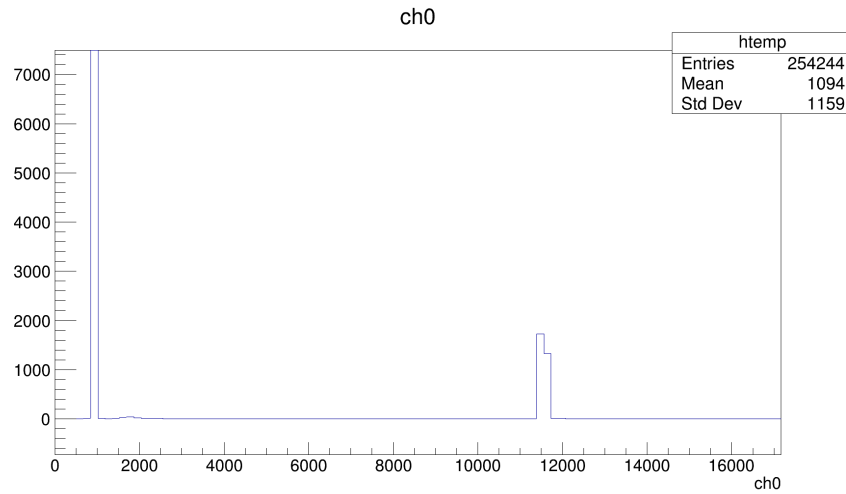


図 20 ch0 の ADC カウント

DISCRIMINATOR の閾値は共に 60 mV に設定した。また、50 cm 径 PMT の信号のタイミングと幅を合わせるため、GATE GENERATOR は幅 300 ns のパルス波を出力するようにオシロスコープで確認しながら調整した。

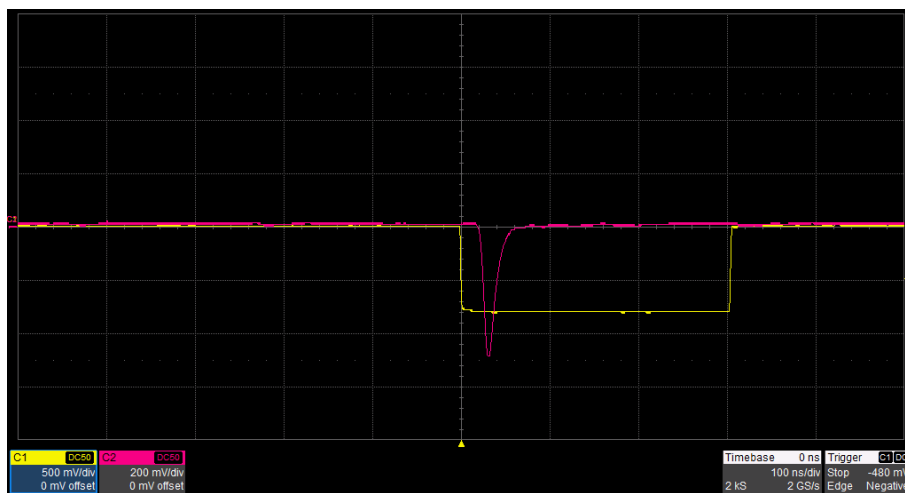


図 21 オシロスコープ上のチェレンコフ光の信号

図 21 にチェレンコフ光発生時のオシロスコープの画面を示した。黄色線で描かれている信号が GATE 信号であり、幅が 300 ns であることがわかる。赤線は 50 cm 径 PMT の信号である。ADC は GATE 信号が入力されている間に電荷の積分を行うため、GATE 信号はアナログ信号より長い必要がある。

5 結果

用意した 2 種類の防護カバーを取り換えて、チェレンコフ光の検出効率の比較を行うための実験結果を示す。

5.1 水チェレンコフ光の観測

水を媒質として宇宙線がチェレンコフ光を起こしていることを確認するため、水槽に水を入れた場合と抜いた場合で光量の測定を行い電荷分布としてヒストグラムを描いた。横軸は光電子増倍管の信号を 300 ns の間積分した電気量で描かれている。

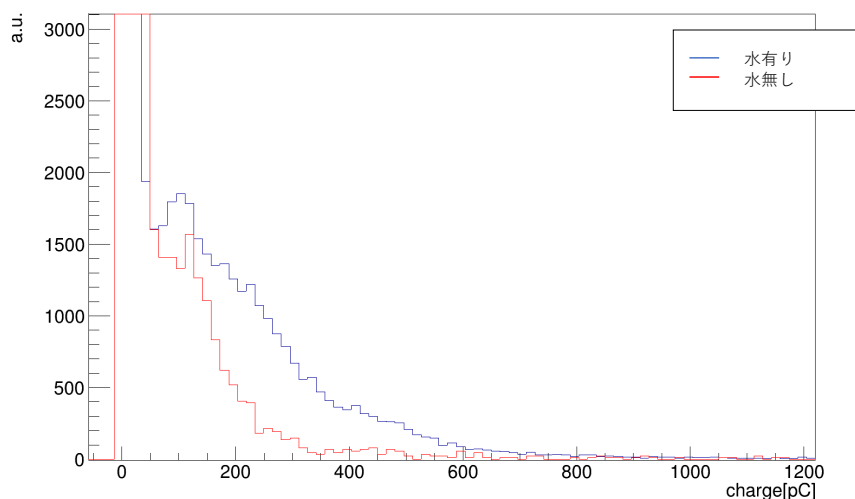


図 22 従来のアクリルでの光量 水の有無での比較

従来のアクリルでの結果を図 22 に示す。水がある場合は 200 pC から 600 pC あたりに水無しでは見られなかったイベントがあり、水によりチェレンコフ光が起きていると判断することができる。

5.2 従来のアクリルと WLS の比較

水槽の水でチェレンコフ光が観測できていることを確認した後、WLS と従来のアクリルの光量比較を行った。図 23 は WLS と従来のアクリルの C1 と C2 を通過した宇宙線によるチェレンコフ光の測定のデータである。ただし WLS のデータは 694830 Entries、従

来のアクリルは 70587 Entries であった。イベント数が異なりスケールを揃える必要があるが、宇宙線が C1, C2 を通過する頻度は 1 秒間に約 1.6 個であり、測定時間による変化はほとんど無い。そのため WLS のイベント数を従来のアクリルに合わせるため、0.1016 倍して表示している。以下のヒストグラムにおいても同様のスケール変化を行っている。

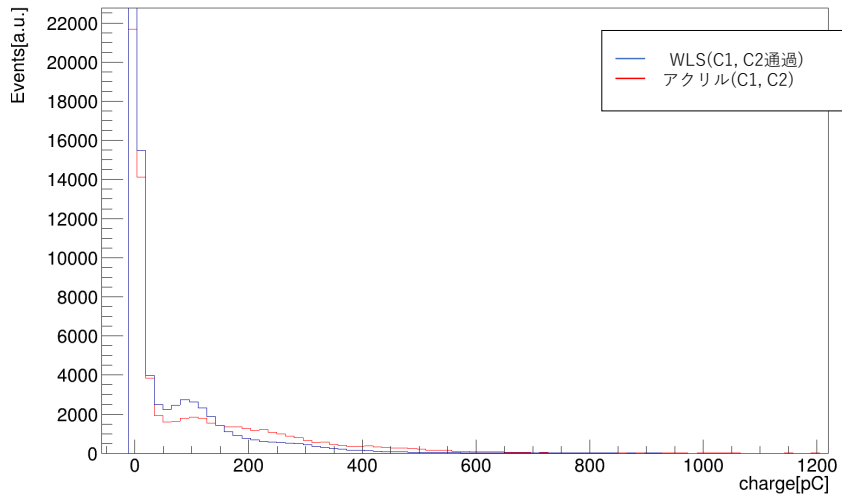


図 23 従来のアクリルと WLS での光量比較

0 pC 付近にみられる信号はペDESTALであり、宇宙線は通過したが 50 cm 径 PMT で光が検出されなかったときに起こる。まず C1, C2 通過のイベントで見た場合、図 23 から、ヒストグラム形状に変化があることを確認できた。次に、このイベントのうち C3 を通過したイベントを見る。

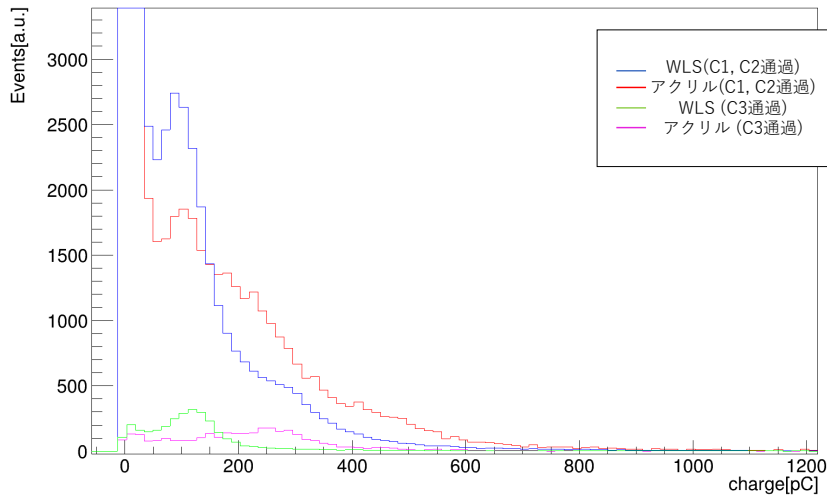


図 24 従来のアクリルと WLS での光量比較 拡大

図 24 はピークの見られた部分を拡大して表示している。ここで「C1, C2 通過」とは C1, C2 を通過したイベント全てを表しており、「C3 通過」は C1, C2, C3 全て通過したイベントを表している。拡大した図には C3 を通過した宇宙線のチェレンコフ光の信号を重ね描きしており、緑線のヒストグラムが WLS での C3 通過の信号、紫線が従来のアクリルでの C3 通過の信号である。宇宙線の天頂角範囲が制限されている C3 を通過した信号にはペDESTALが少ないため、ペDESTALの原因は、宇宙線がカウンタを斜めに通過し、水中を通らなかったことであると推測される。

WLS の C3 通過 (緑線) と従来のアクリルの C3 通過 (紫線) のヒストグラムを比較すると、従来のアクリルは WLS と比べて 200 pC から 400 pC あたりのイベント数が多いことがわかる。防護カバー中を宇宙線が通過してチェレンコフ光を発生させることもあるため、防護カバーのヒストグラムへの寄与が、カバーの変更によって変化していることも考えられる。水のみで起きたチェレンコフ光のヒストグラムを得るために、水を抜いた状態での測定を第 5.1 節と同様に WLS に対しても行い、バックグラウンドの測定をした。図 25、図 26 はそれぞれ従来のアクリル、WLS での結果である。

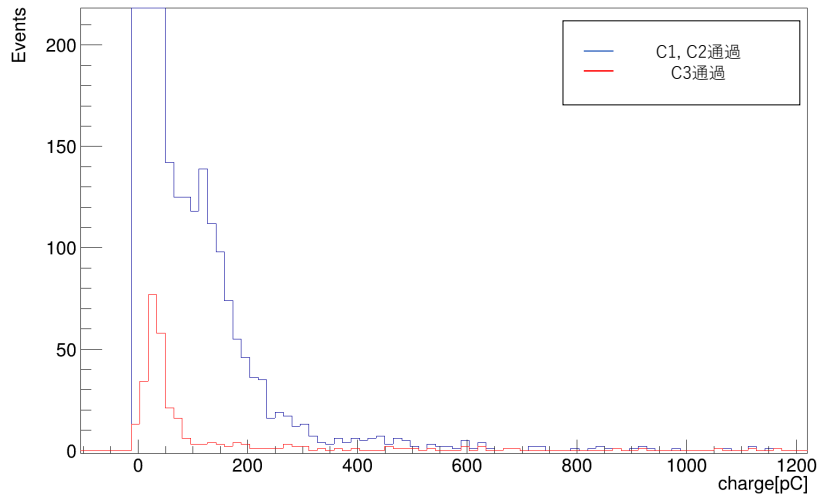


図 25 従来のアクリル:バックグラウンド

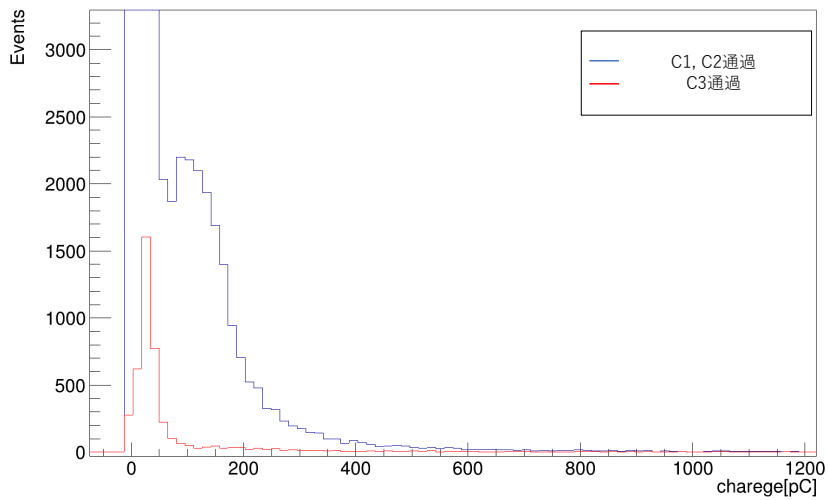


図 26 WLS:バックグラウンド

従来のアクリルと WLS のどちらも、ペDESTAL以外に 200 pC あたりまで信号がみられていることがわかり、水以外での発光 (バックグラウンド) が存在することがわかる。スケールを調整し、バックグラウンドを引くことで、水中で発生したチェレンコフ光を得ることができる。従来のアクリル、WLS の結果をそれぞれ図 27、図 28 に示す。

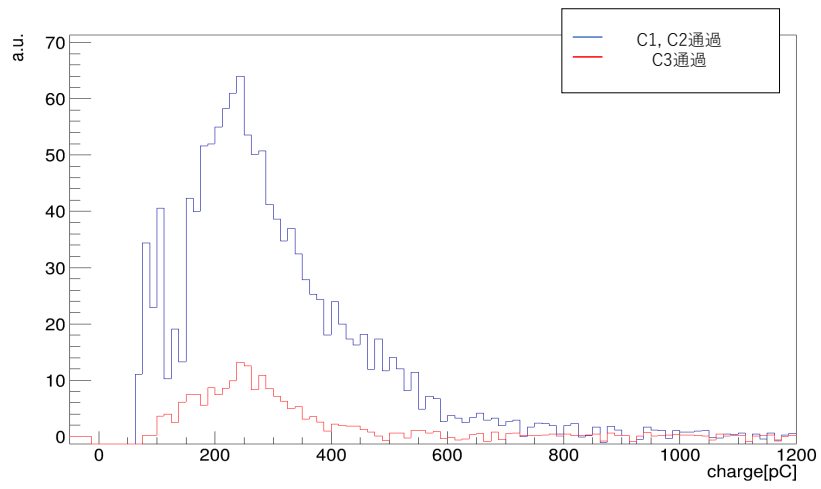


図 27 従来のアクリル:水有り-水無し (BG) のヒストグラム

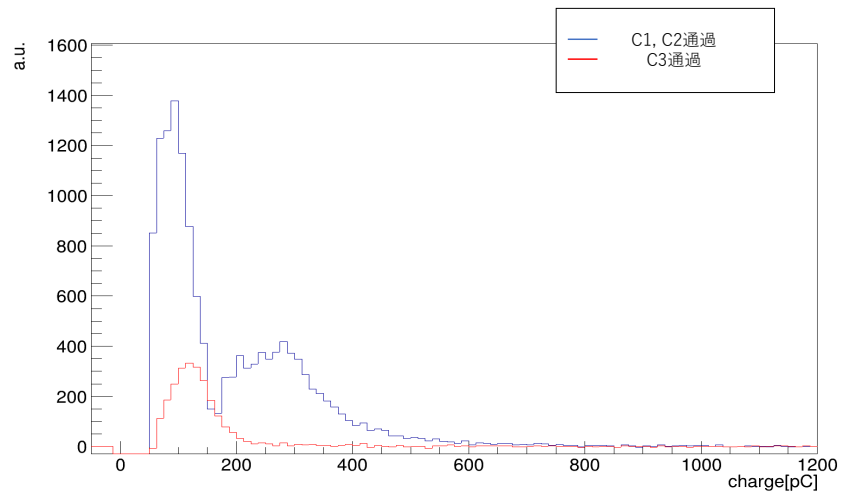


図 28 WLS:水有り-水無し (BG) のヒストグラム

図 27、図 28 の C3 を通過したイベントのピーク位置を比較するため、それぞれのピークをガウス関数でフィッティングした。

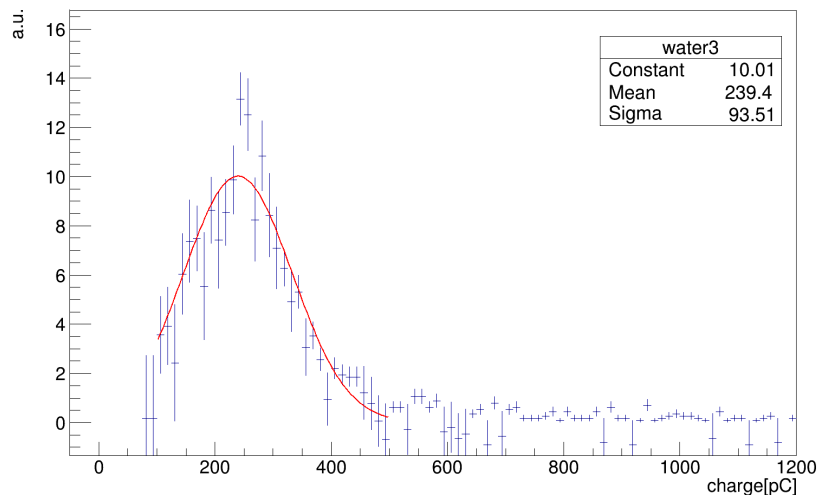


図 29 従来のアクリル:C3 通過イベントのフィッティング

従来のアクリルに対しては、100 pC から 500 pC の範囲でフィッティングを行った。結果を図 29 に示す。

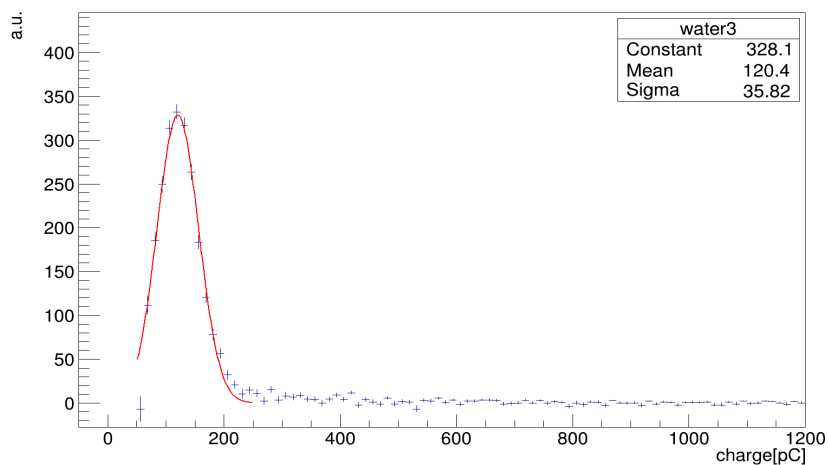


図 30 WLS:C3 通過イベントのフィッティング

WLS は 50 pC から 250 pC でフィッティングを行った。結果を図 30 に示す。従来のアクリルと WLS のフィッティング関数の平均値、標準偏差を表 2 に示した。

表 2 フィッティング関数の平均値と標準偏差

	mean/pC	sigma/pC	比率
従来のアクリル	239.4	93.5	1.00
WLS	120.4	35.8	0.50

比率は従来のアクリルを基準とした

平均値を比較すると、WLS は従来のアクリルと比べて光量が低下しており、約 50 % の割合で減少していた。

6 追加実験

以上の測定では、波長変換アクリルで光検出効率の向上は見られなかった。原因として、波長変換された光が拡散し、光電子増倍管で検出できていないことが考えられる。WLS の小片を用意し、375 nm の LED を当てることで波長変換の様子を確認した。

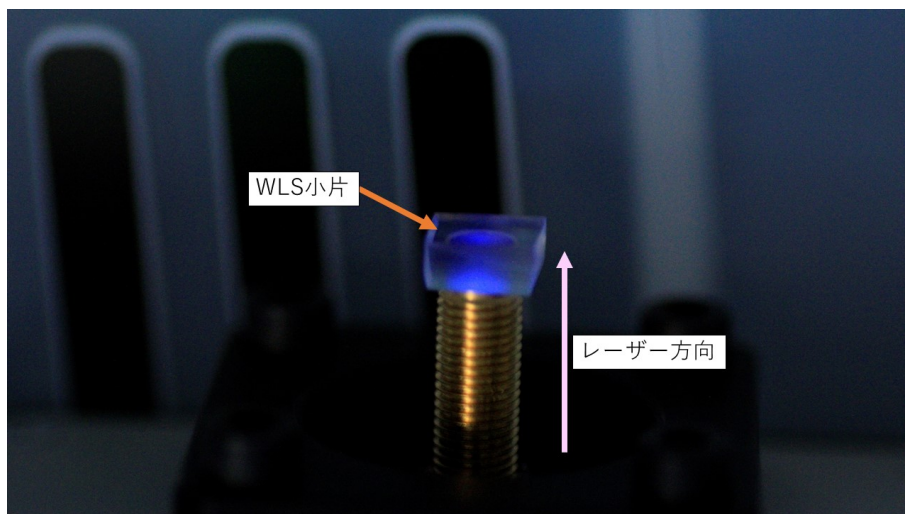


図 31 WLS の放出光

波長変換させた様子を図 31 に示した。波長変換された光は LED の光の方向に透過せず、全方位に拡散されていることがわかる。

WLS によって拡散された光量を調べるため、WLS の小片を用いて実験を行った。実験には 375 nm の LED と光電子増倍管を用いて行った。光電子増倍管は R7724 を使用し、WLS 小片は 8mm × 8mm × 3.7mm の直方体の形状をしたものを使用している。また、スーパーカミオカンデの外水槽で用いられている波長変換プレートと同素材の小片も用意して比較した。この小片は 8mm × 8mm × 5mm のサイズであった。二種類の波長変換素材を区別するために、以下ではスーパーカミオカンデ用のものを SK-WLS、もう一方を製品名に基づき B-2 とする。SK-WLS には 1,4-ビス (2-メチルスチリル) ベンゼン (bis-MSB) が混入しており、B-2 と同様に紫外光を吸収し、青色光を放射する。ヘキサン中の bis-MSB の吸収、放射スペクトルを図 32 に示す。

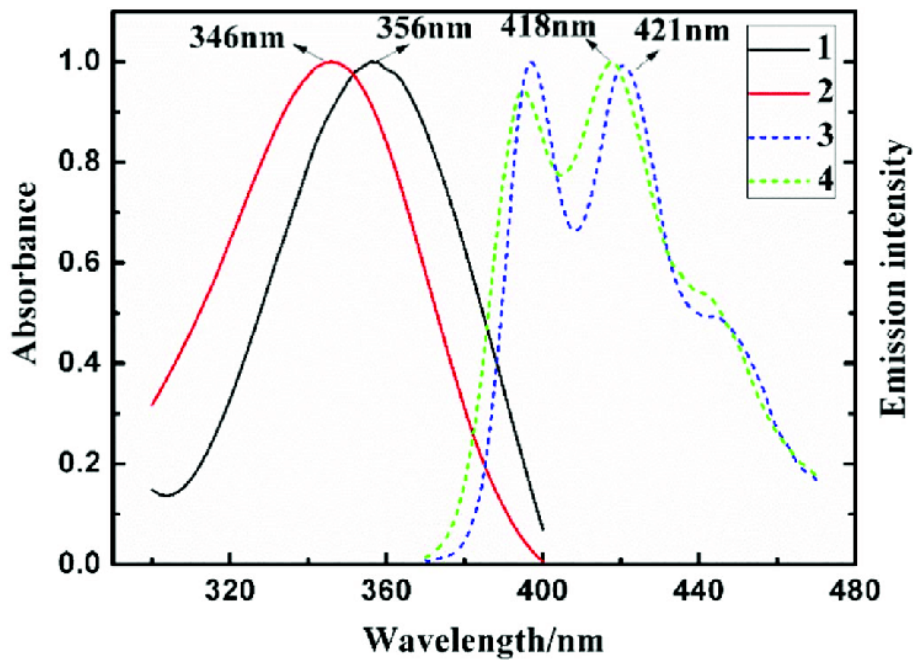


図 32 bis-MSB の吸収、放射スペクトル [8] より引用

赤の実線の 2 番のスペクトルが bis-MSB の吸収スペクトル、緑の点線の 4 番のスペクトルが放射スペクトルである。B-2 の吸収・放射スペクトルを示した図 12 と比較すると、放射スペクトルのピーク位置は類似しているが、吸収スペクトルのピーク位置は bis-MSB の方が 346 nm と小さい。

6.1 追加実験:方法

図 33 に示すように、光電子増倍管と WLS の小片を密着させ、上から LED の光を当てた。

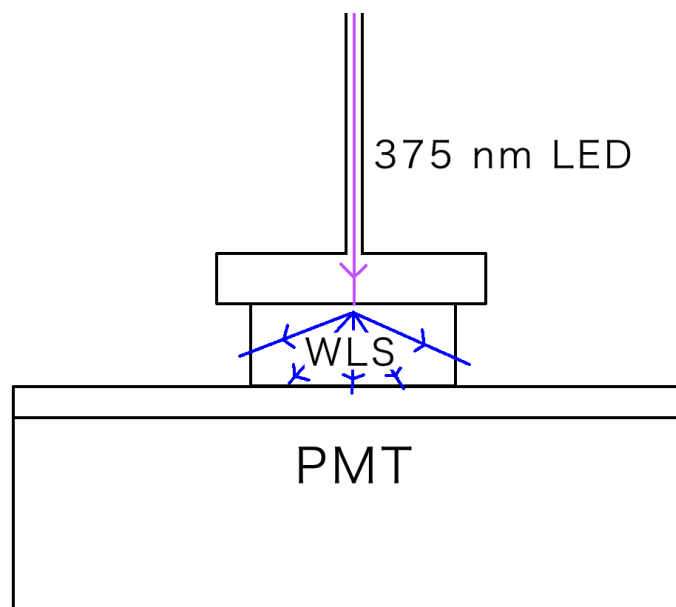


図 33 追加実験の模式図

拡散した光量を調べるため、以下の四種類の測定を行った。

- 測定 1 : B – 2 小片の側面を黒のビニールテープで覆い測定
- 測定 2 : B – 2 小片を設置しアルミで覆い測定
- 測定 3 : 直接 LED の光を光電子増倍管に入射して測定
- 測定 4 : SK – WLS 小片を設置しアルミで覆い測定

6.1.1 測定 1 : B-2 小片の側面を黒のビニールテープで覆い測定

測定 1 は図 34 のような配置をした。波長変換され拡散し、B-2 小片の側面から放射された光を遮るため、側面に黒のビニールテープを巻いた。

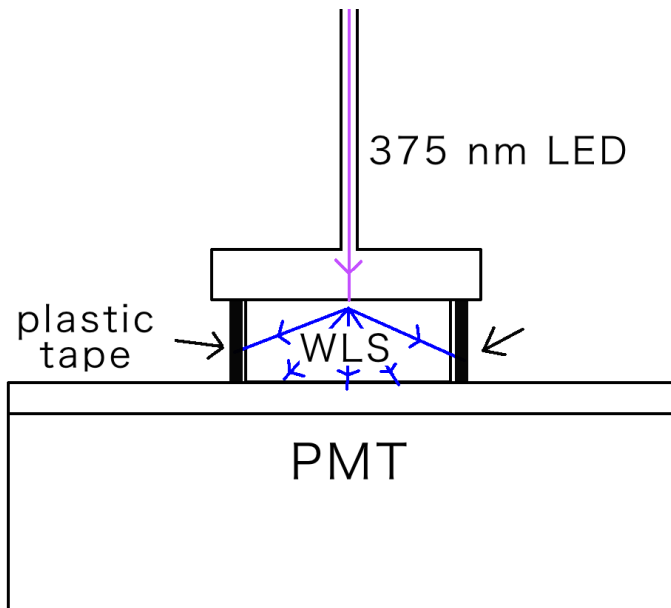


図 34 測定 1 の模式図

6.1.2 測定 2 : B-2 小片を設置しアルミで覆い測定

B-2 で拡散された光の総量を調べるため、装置の全体をアルミ箔で覆い測定を行った。

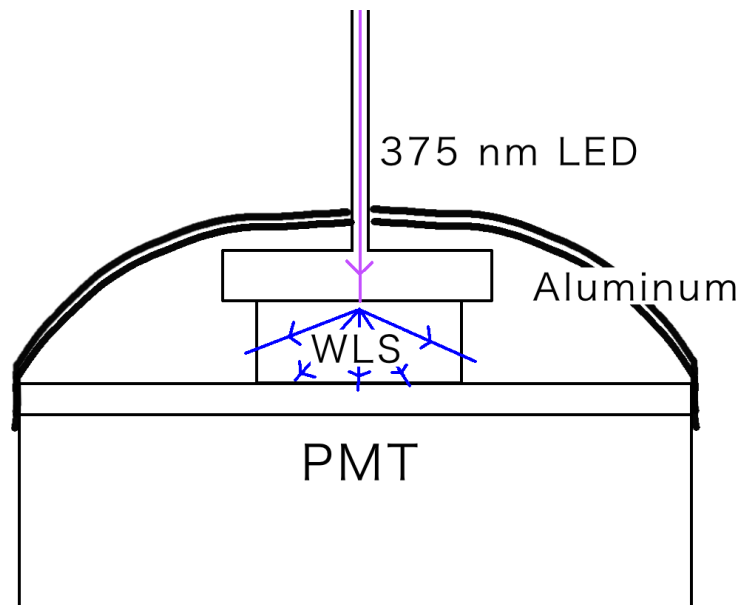


図 35 測定 2 の模式図

6.1.3 測定 3 : LED の光を直接測定

波長変換されたものと比較するために 375 nm の LED を直接光電子増倍管に入射し測定を行った。

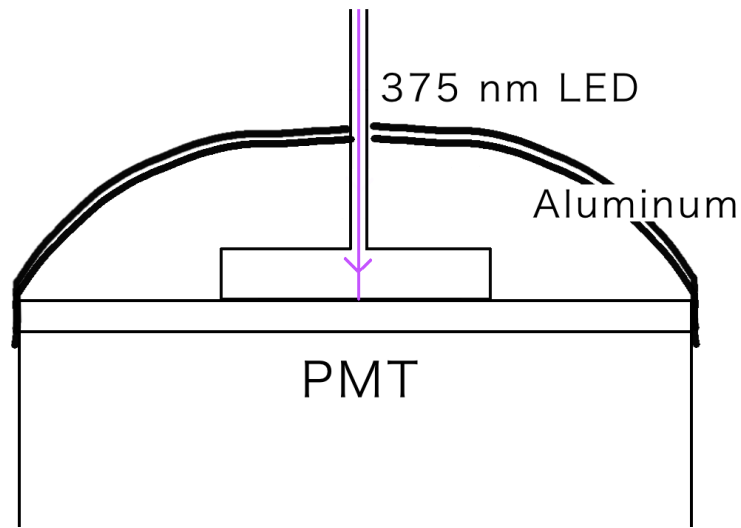


図 36 測定 3 の模式図

6.1.4 測定 4 : SK-WLS 小片を設置しアルミで覆い測定

測定 2 の B-2 小片を SK-WLS 小片に取り換えて同様の測定をした。

6.2 追加実験:結果

図 37 には測定 1 と測定 2 のヒストグラムを示す。

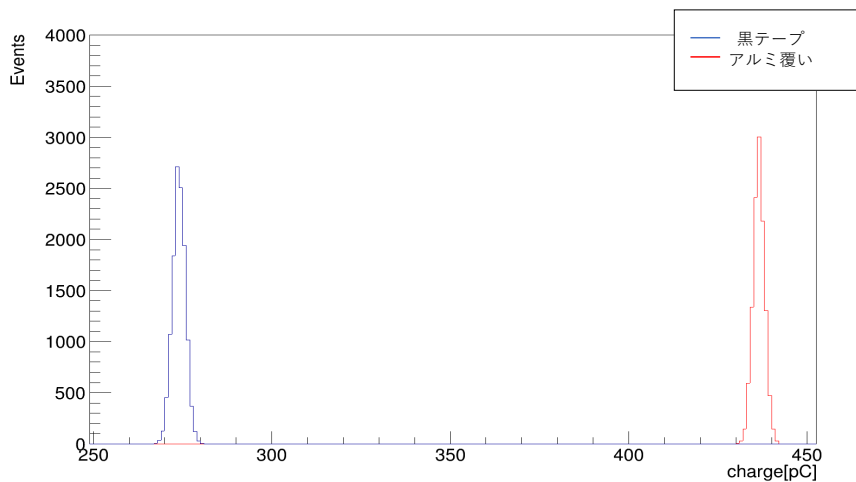


図 37 測定 1 と測定 2 の結果

結果から、ピークの平均値を比較すると 162 pC の差があり、測定 2 に対する測定 1 の割合は 0.63 であった。波長変換された光は拡散され、それが光量を減少させる原因となっていることがわかる。次に、測定 2 と測定 3 のヒストグラムを図 38 に示す。

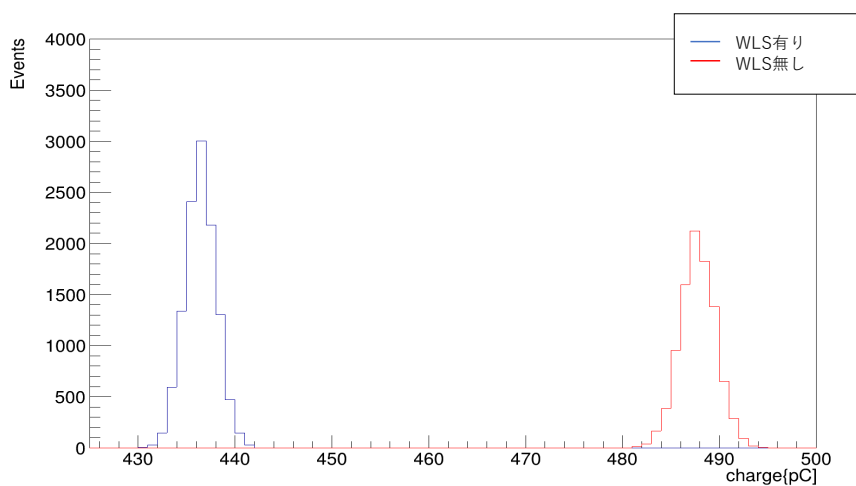


図 38 測定 2 と測定 3 の結果

ピークの平均値は、B-2 のものが直接光に対して、52 pC 下回ったものが得られた。B-2 で拡散された光をアルミ箔で集光することで、紫外光の直接の入射を越えた光量に近づいたが、上回ることはなかった。

最後に、測定 4 と測定 3 のヒストグラムを図 39 に示す。

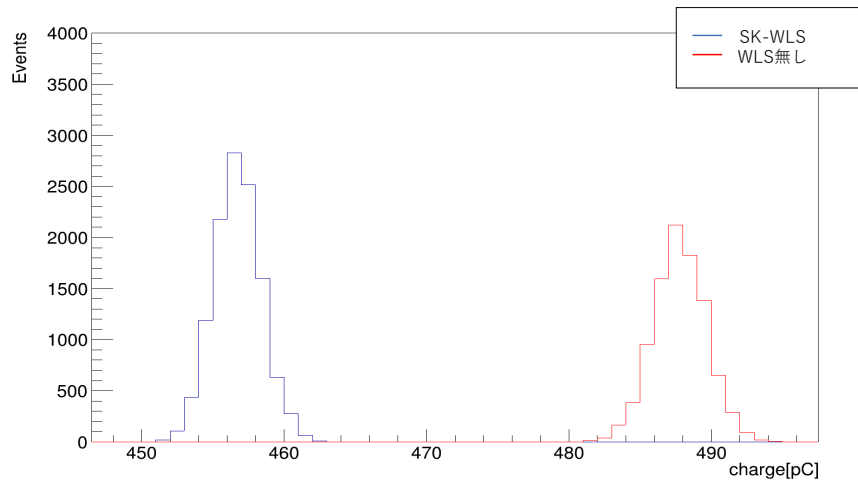


図 39 測定 4 と測定 3 の結果

ピークの平均値の差は 31 pC だけ直接光が上回った。B-2 と比べると、SK-WLS は 21 pC 増加した。

各測定イベント数と平均値、標準偏差および直接光 (測定 2) の光量に対する比率を表 3 に示す。

表 3 測定結果

	Entries	mean/pC	sigma/pC	3に対する比率
1:B-2 黒テープ	12221	273.9	1.8	0.56
2:B-2 アルミ覆い	11644	436.4	1.6	0.89
3:LED直接	9535	487.8	1.9	1.00
4:SK-WLS アルミ覆い	11844	456.7	1.7	0.94

6.3 追加実験:考察

測定 1、測定 2 の結果より、LED 光の方向に対し、小片の側面から出る光があるため、波長変換された光は拡散して放射されることが分かった。

次に、測定 2 と測定 3 を比較すると、拡散された光を集光することで、直接光の光量に近い結果が得られた。WLS の素材を SK-WLS とした測定 4 では、さらに直接光に近い光量を得られた。原因として、SK-WLS に含まれている bis-MSB は B-2 と比べて、375 nm の波長を吸収しない、そのため SK-WLS では LED 光の透過成分が多く、拡散される放射光が少なかったため光量が B-2 より増加したと考えられる。

6.4 追加実験:結論

追加実験の結果から、波長変換された光の拡散が光量の低下に繋がることがわかった。また、波長変換材の吸収スペクトルの違いによる光量の変化が確認できた。

7 結論

チェレンコフ光の短波長側の検出効率を向上させるため、波長変換アクリルを光電子増倍管カバーに使用して検出を行い、従来のアクリルと比べて光検出効率は約 50 % 減少するという結果が得られた。小片を用いた追加実験から、側面を遮光して測定した結果は直接光の光量の 56 % となり、拡散光の集光を行った結果、直接光の 89 % の光量を得ることができた。つまり光検出効率の減少は、拡散によるものが原因の一つであると言える。

8 考察

8.1 波長変換材の吸収・放射波長域の考察

防護カバーとして用いた B-2 の波長変換アクリルは、図 12 より、375 nm の光を良く吸収し、400 nm から 450 nm にかけて光を放射する。50 cm 径光電子増倍管は図 8 から、375 nm に対して約 31 % の量子効率をもち、高い感度を有する。波長変換後の 440 nm では量子効率は 26 % 程度と低下し、集光を行っても光検出効率が低下した結果が説明できる。これは 375 nm の波長をほとんど吸収しない SK-WLS で、B-2 より光量が増えた結果を得たことから説明できる。

次に、波長変換材の吸収波長の違いが、どのようにチェレンコフ光の検出光量に影響するかを定量的に考察する。吸収した光子数がすべて 50 nm だけ長波長に変換される理想的な波長変換材を仮定する。吸収波長が 300 nm から 350 nm の場合と、340 nm から 390 nm の場合で考える。この場合放出波長はそれぞれ 350 nm から 400 nm、390 nm から 430 nm である。

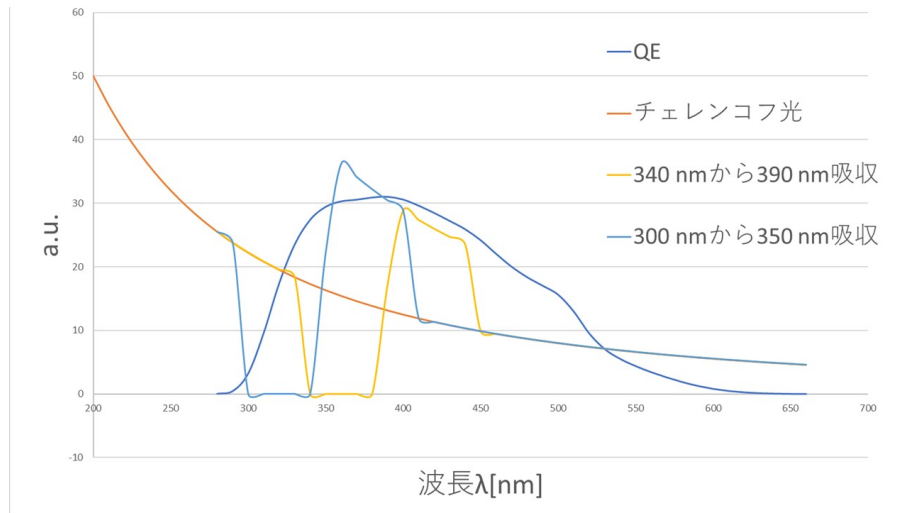


図 40 理想的な波長変換されたチェレンコフ光のスペクトル

図 40 に、理想的な波長変換が行われた際のチェレンコフ光のスペクトルを示した。300 nm から 350 nm で吸収された光は 350 nm から 400 nm に放出され、340 nm から 390 nm で吸収された光は 390 nm から 440 nm に放出されている。量子効率を $\epsilon(\lambda)$ として、300 nm から 600 nm までの検出される単位長さ通過あたりのチェレンコフ光の光子数 N は以下ようになる。

$$N = \int_{300}^{600} \frac{A}{\lambda^2} \epsilon(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

ただし A は定数である。理想的な波長変換が行われた場合、この式は以下のように変形される。ただし、吸収波長が 300 nm から 350 nm の場合と 340 から 390 nm の場合の検出される光子数をそれぞれ N_1, N_2 とした。

$$N_1 = \int_{300}^{350} \frac{A}{\lambda^2} \cdot \epsilon(\lambda + 50) d\lambda + \int_{350}^{600} \frac{A}{\lambda^2} \epsilon(\lambda) d\lambda \text{ (吸収波長 300nm から 350nm)} \quad (11)$$

$$N_2 = \int_{340}^{390} \frac{A}{\lambda^2} \cdot \epsilon(\lambda+50) d\lambda + \int_{300}^{340} \frac{A}{\lambda^2} \epsilon(\lambda) d\lambda + \int_{390}^{600} \frac{A}{\lambda^2} \epsilon(\lambda) d\lambda \text{ (吸収波長 340nm から 400nm)} \quad (12)$$

計算の都合上、波長を $\lambda = 300 \text{ nm} + 10 \text{ nm} \times k$ と 10 nm 刻みで考え、積分を数列の和として計算する。ただし k は整数である。具体的には、式 11 は、

$$N_1 = \sum_{k=0}^5 \frac{A}{(300 + 10k)^2} \cdot 10 \cdot \epsilon(350 + 10k) + \sum_{k=5}^{30} \frac{A}{(300 + 10k)^2} \cdot 10 \cdot \epsilon(300 + 10k) \quad (13)$$

と書き換えられる。式 12 も同様に変形する。計算の結果、光子数の比は、

$$\frac{N_1}{N_2} = 1.23 \quad (14)$$

となる。また、 N_1, N_2 を波長変換をしない場合の光子数 N と比べると、それぞれ

$$\frac{N_1}{N} = 1.22 \quad (15)$$

$$\frac{N_2}{N} = 0.988 \quad (16)$$

となる。以上の概算より、量子効率の低い波長域を吸収する波長変換材では光量の増加が見込まれる。さらに、吸収する波長域が光電子増倍管の高感度な波長域であった場合、波長変換によって光量が減少してしまうことがわかる。

8.2 空気中の測定による屈折の考察

ハイパーカミオカンデ実験は水中で光の測定が行われる。空気中で本実験を行ったことによる測定への影響を屈折率の点から考察する。

まず、全反射の影響を考える。全反射は少なくとも、屈折率の大きい媒質から小さい媒質に光が入射する際に起こる。空気中に装置を配置して測定を行ったため、チェレンコフ光は 50 cm 径 PMT の光電面のガラスに至るまで、

水層 → アクリル層 → 空気層 → アクリル層 → 空気層 → ガラス層

と進行している。各境界面のうち、全反射の起こる可能性がある面は、アクリル層 → 空気層のみである。空気の屈折率が 1.00 、アクリルの屈折率が 1.49 であることを考慮すると、アクリル層から空気層への入射角が 42 度を越えた光は全反射する。[9] 対して、装置

全体が水で満たされている場合チェレンコフ光は、水層 → アクリル層 → 水層となり、全反射は起きない。

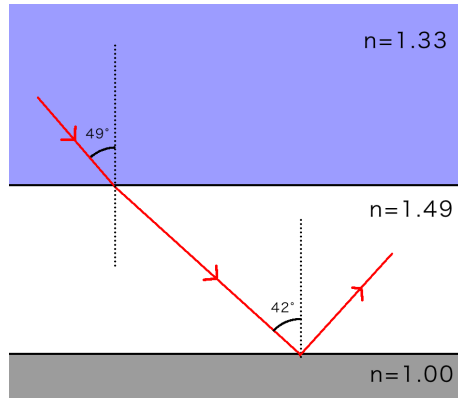


図 41 チェレンコフ光が全反射を起こす場合の模式図

チェレンコフ光の屈折の様子を図 41 に示す。水からアクリル層での屈折も考慮すると、水層からアクリル層への入射角が 49 度を越えると全反射が起こる。

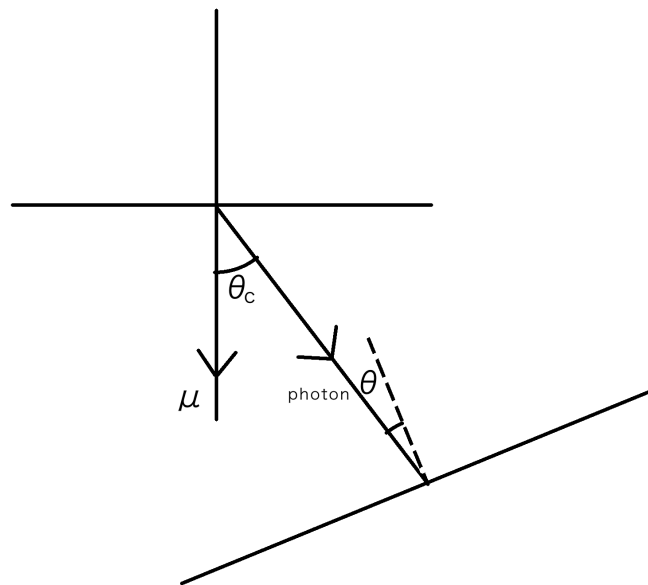


図 42 斜めの面に入射したチェレンコフ光のチェレンコフ角と入射角の関係

本実験では、水槽は半球状の曲面であり、図 42 に示すように、チェレンコフ角 θ_c の

チェレンコフ光が水平に対し傾いた面に入射した場合、入射角 θ は θ_c より小さくなる。以上より、水槽の亚克力層への入射角は水のチェレンコフ角の 42 度より小さくなる。全反射を起こす臨界角が 49 度であることから、水槽の亚克力層と空気層の間では全反射は起きない。以上より、空気中で実験を行うことによる全反射の影響はない。しかし、亚克力と空気の境界における屈折角は大きく、光の経路に大きな違いが存在する。

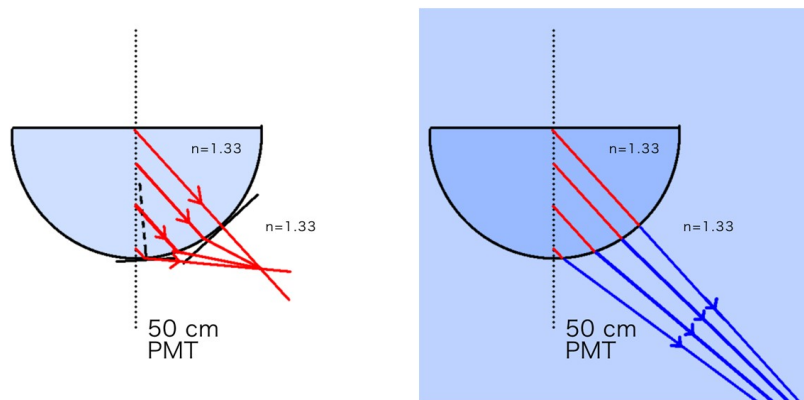


図 43 チェレンコフ光の屈折の様子 左：空気中 右：水中

図 43 には空気中および水中での光の屈折の様子を示した。空気中に透過した光は屈折角が大きく、屈折を考慮した装置の配置が必要となる。また、屈折角が大きいことから、水中と比べて、空気中の実験ではチェレンコフ光の亚克力側への反射強度も大きくなると思われる。水中で同様の測定を行うことで、チェレンコフ光の反射を抑えて測定することができるかと推測される。

9 まとめ・展望

本論文の目的であった、波長変換亚克力によるチェレンコフ光の光検出効率の向上は、防護カバーの素材を今回の波長変換亚克力カバーに取り換えるのみでは困難である。光電子増倍管の量子効率が低い波長域を補う波長変換材に加え、ハイパーカミオカンデに適した拡散光の集光手段が課題として残る。

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教官の西村康宏先生からは丁寧かつ親切なご指導を頂きました。深く感謝を申し上げます。また、同研究室のメンバーである永井雄大君にも実験のサポート並びに多くの助言をして頂き、感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration, "Hyper-Kamiokande Design Report" arXiv:1805.04163.
- [2] F.Reines, C.L.Cowan, "The Detection of Free Neutrino" Phys.Rev.92(1953)830.
- [3] "年表", スーパーカミオカンデ公式ホームページ, <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/sk/chronology.html>(参照 2020/1/25)
- [4] "光電子増倍管", スーパーカミオカンデ公式ホームページ, <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/detector/pmt.html>(参照 2020/1/25)
- [5] "検出器の構造", スーパーカミオカンデ公式ホームページ, <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/detector/index.html>(参照 2020/1/25)
- [6] The Super-Kamiokande Collaboration, "The Super-Kamiokande Detector" Nucl.INstrum.Meth.A501(2003)418-462.
- [7] "PSF プラスチックシンチレーションファイバー", Kuraray, https://www.kuraray.co.jp/uploads/5a717515df6f5/PR0150_psf01.pdf(参照 2020/1/26)
- [8] Zhanlong Zheng *et.al.*, "Theory and experiment studies of the 1,4-bis(4-methoxystyryl)benzene as a wavelength shifter of liquid scintillator" Journal of Luminescence 183 November 2016.
- [9] 国立天文台 (2020) 『理科年表 2020(机上版)』 丸善出版株式会社.