

2021 年度

卒業論文

大型水チェレンコフ検出器の較正に用いる
光拡散ボールの性能向上

指導教員 西村 康宏

慶應義塾大学理工学部物理学科西村研究室

岡崎 玲大

61803895

2022年1月31日

概要

大型の水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置であるスーパーカミオカンデでは、光検出器として約 11000 本の口径 20 インチ光電子増倍管が取り付けられている。ニュートリノが水と反応すると最終的にチェレンコフ光を放射し、その光は光電子増倍管によって検出される。検出された光の光量や検出された時間は、反応したニュートリノの種類、位置、エネルギーを決定するうえで重要な情報となるため、光電子増倍管の利得や時間分解能を正確に得ることが望ましい。スーパーカミオカンデでは、酸化マグネシウムを混ぜた光拡散ボールであるディフューザーボールを用いてキャリブレーション光源からの光を散乱し、光電子増倍管の時間較正を行っている。しかし、ボールから放出される光の光量が一律ではないとキャリブレーションに時間がかかり、光の放出時間がばらついてふらつきが大きくなると分解能を悪く見積もってしまう恐れがある。

そこで、本論文では現在スーパーカミオカンデで使用されているディフューザーボールからの性能向上を目指し、酸化マグネシウムの濃度やボールの大きさを調整し、光散乱における等方性、光量減衰率、時間分解能への影響を測定した。その性能を現在スーパーカミオカンデで使用されているものと同型のボールと比較した結果について論ずる。

目次

第1章 背景	8
1.1 ニュートリノについて	8
1.1.1 ニュートリノの発見	8
1.1.2 ニュートリノ振動	10
1.2 スーパーカミオカンデ	11
1.2.1 チェレンコフ光	11
1.2.2 スーパーカミオカンデの構造	12
1.2.3 SK-Gd プロジェクト	13
1.3 ハイパーカミオカンデ	14
1.4 光電子増倍管	14
1.4.1 基本構造	14
1.4.2 光電子増倍管の時間特性	16
1.4.3 スーパーカミオカンデ、ハイパーカミオカンデの光電子増倍管	17
1.5 検出器のキャブリレーション	18
1.6 ディフューザーボールの役割と時間分解能への影響	18
1.7 本研究の目的	21
第2章 実験装置	22
2.1 光源	22
2.1.1 レーザーダイオード	22
2.1.2 窒素レーザー	23
2.2 光検出器	23
2.2.1 光電子増倍管	24
2.2.2 アバランシェフォトダイオード (APD)	24
2.2.3 マルチピクセルフォトシカウンター (MPPC)	26
2.3 ディフューザーボール	27
2.3.1 SKで使用しているディフューザーボール	27
2.3.2 本実験で用いたディフューザーボール	27
2.4 オシロスコープ	31
第3章 ディフューザーボールの性能	32
3.1 目的	32

3.2	窒素レーザーの光量及び時間分解能測定	32
3.2.1	レーザーの光量比較、窒素レーザーの時間分解能測定のセットアップ	32
3.2.2	レーザーの光量比較、窒素レーザーの時間分解能測定の測定手法 . . .	35
3.2.3	レーザーの光量比較、窒素レーザーの時間分解能測定の結果	37
3.3	ディフューザーボールの等方性	37
3.3.1	等方性確認測定のセットアップ	39
3.3.2	等方性確認測定の測定手法	40
3.3.3	等方性確認測定の結果	42
3.4	ディフューザーボールによる光量減衰	45
3.4.1	光量減衰測定のセットアップ	45
3.4.2	光量減衰測定の測定手法	45
3.4.3	光量減衰測定の結果	46
3.5	ディフューザーボールによる時間分解能への影響	48
3.5.1	時間分解能への影響のセットアップ	49
3.5.2	時間分解能への影響の測定手法	50
3.5.3	時間分解能への影響の結果	50
第4章	結論と今後の展望	58
	謝辞	59
	参考文献	60

目次

1.1	クォークとレプトン [4]	8
1.2	β 線のエネルギースペクトル [2]	9
1.3	チェレンコフ放射 [9]	11
1.4	チェレンコフ光の概図 [10]	11
1.5	スーパーカミオカンデ検出器イメージ図 [4]	12
1.6	SK-Gd プロジェクト [4]	13
1.7	PMT の構造 [11]	15
1.8	上昇時間、下降時間定義 [3]	16
1.9	PMT の検出信号 [3]	17
1.10	PMT の時間分解能 [3]	17
1.11	ベネシアンブラインド型ダイノード [14]	18
1.12	ボックス&ライン型ダイノード [14]	18
1.13	SK の PMT の光電子数に対する光検出時間のばらつき [16]	19
1.14	HK の PMT の光電子数に対する光検出時間のばらつき [16]	19
1.15	ディフューザーボールによる SK のキャリブレーション [15]	20
2.1	LDB-100-405	22
2.2	SK の PMT における QE 分布 [4]	23
2.3	光電子増倍管 (H3178-51)[6]	24
2.4	APD	25
2.5	MPPC	26
2.6	MPPC の構成 [7]	27
2.7	MPPC による信号の波形 [7]	27
2.8	SK で使用されているディフューザーボールの構造	28
2.9	SK 型ボール	28
2.10	濃度・厚さの異なるディフューザー板	29
2.11	ディフューザー板の濃度×厚さに対する信号検出までの時間のばらつき	30
2.12	濃度 100000 ppm のディフューザーボール (左からそれぞれ直径 10 mm、15 mm、 20 mm、25 mm、30 mm)	30
2.13	オシロスコープ (wavesurfer 3024z)	31
3.1	レーザーの光量比較のセットアップ	33

3.2	レーザーの光量比較のセットアップの実際の写真	34
3.3	PMT の絞り	34
3.4	MPPC の絞り	34
3.5	窒素レーザーの時間分解能測定の設定アップ	35
3.6	窒素レーザーとボール 1(直径 10 mm) を使用して時間分解能を測定したときの実際のセットアップ	36
3.7	窒素レーザーと SK 型ボールを使用して時間分解能を測定したときの実際のセットアップ	36
3.8	窒素レーザーとボール 1(直径 10 mm) を用いた時の検出時間のばらつき	38
3.9	窒素レーザーと SK 型ボールを用いた時の検出時間のばらつき	38
3.10	等方性確認測定の設定アップ	39
3.11	縦方向と横方向	41
3.12	縦方向の回転の実験器具の固定	41
3.13	横方向の回転の実験器具の固定	41
3.14	ボール 5(直径 30 mm) の縦方向等方性	43
3.15	ボール 5(直径 30 mm) の横方向等方性	43
3.16	SK 型ボールの縦方向等方性	44
3.17	SK 型ボールの横方向等方性	44
3.18	ボール側面から出る光の光量とボールの直径との関係	49
3.19	ボール側面から出る光の光量とボールの直径との関係	49
3.20	時間分解能への影響測定の設定アップ	49
3.21	ボール 1(直径 10 mm) のトリガータイミングから閾値を超えた波形の平均	51
3.22	SK 型ボールのトリガータイミングから閾値 6 mV を超えた波形の平均	51
3.23	ball1 から拡散された光が MPPC で検出された時の波高	52
3.24	ボール 1(直径 10 mm) を空気中で測定	53
3.25	ボール 1(直径 10 mm) を水中で測定	53
3.26	ボール 2(直径 15 mm) を空気中で測定	53
3.27	ボール 2(直径 15 mm) を水中で測定	53
3.28	ボール 3(直径 20 mm) を空気中で測定	53
3.29	ボール 3(直径 20 mm) を水中で測定	53
3.30	ボール 4(直径 25 mm) を空気中で測定	54
3.31	ボール 4(直径 25 mm) を水中で測定	54
3.32	ボール 5(直径 30 mm) を空気中で測定	54
3.33	ボール 5(直径 30 mm) を水中で測定	54
3.34	SK 型ボールを空気中で測定	54
3.35	SK 型ボールを水中で測定	54
3.36	ファイバーからの光を空気中で直接測定	55

3.37	空气中測定時のボールの体積× MgO 濃度に対するトリガータイミングから信号が閾値を超えるまでの検出時間のばらつき σ	56
3.38	空气中測定時のボールの体積× MgO 濃度に対するトリガータイミングから信号が閾値を超えるまでの時間の検出時間のばらつき σ	56

第1章 背景

1.1 ニュートリノについて

宇宙を構成する物質は素粒子であるレプトンとクォークで形成されている。ニュートリノはそのうちのレプトンの一種であり、電荷を持たずスピンは 1/2 である。








	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 1.1: クォークとレプトン [4]

ニュートリノには、電子ニュートリノ ν_e 、ミューニュートリノ ν_μ 、タウニュートリノ ν_τ の 3 種類のフレーバーがあり、それぞれに対して反粒子が存在する。

1.1.1 ニュートリノの発見

ニュートリノは電荷を持たず、弱い相互作用のみ反応する素粒子である。そのため大気中には大量のニュートリノが存在しているにも関わらず、観測することが難しくその存在が予想されてから発見に至るまで 20 年以上の年月がかかった。

ニュートリノは 1930 年にヴォルフガング・パウリによってその存在が予想された。[4] ニュートリノの存在が明らかでなかった当時は、原子番号が n である放射性原子核 ${}_nA$ が β 崩壊をすると、 ${}_nA$ よりも原子番号が 1 だけ大きい ${}_{n+1}B$ に遷移し、電子のみを放射するという (1.1) 式のような反応がおこると考えられていた [1]。



しかし、この反応モデルは実験結果と矛盾があった。(1.1) 式の β 崩壊が ${}_nA$ が静止した状態から起こるとし、 ${}_nA$ 、 ${}_{n+1}B$ 、電子の質量をそれぞれ m_A 、 m_B 、 m_e 、 β 崩壊後の ${}_{n+1}B$ 、電子の運動量をそれぞれ \vec{p}_B 、 \vec{p}_e であるとして、自然単位系 ($c=1$) でその矛盾について説明する。

この崩壊における運動量保存則より、

$$\vec{p}_B + \vec{p}_e = \vec{0} \quad (1.2)$$

この (1.2) 式から $\vec{p}_B = -\vec{p}_e$ であるから β 崩壊後の ${}_{n+1}B$ と電子の運動量の大きさは等しい。その運動量の大きさを p として、エネルギー保存則から

$$m_A = \sqrt{p^2 + m_B^2} + \sqrt{p^2 + m_e^2} \quad (1.3)$$

が成り立つ。また相対論より、それぞれの質量には

$$m_A > m_B + m_e \quad (1.4)$$

という関係があるため、 p は 1 つの値をとる。この時、 β 崩壊後の m_B 、 m_e のエネルギー E_B 、 E_e も

$$E_B = \sqrt{p^2 + m_B^2} \quad E_e = \sqrt{p^2 + m_e^2} \quad (1.5)$$

と、1 つの値に定まる。特に、 $m_B \gg p$ の時、

$$E_B = \sqrt{p^2 + m_B^2} \simeq m_B \quad (1.6)$$

となり、

$$E_e = \sqrt{p^2 + m_e^2} \simeq m_A - m_B \quad (1.7)$$

となる。このように、ベータ崩壊後の電子は一定のエネルギーを持つはずである。しかし、 β

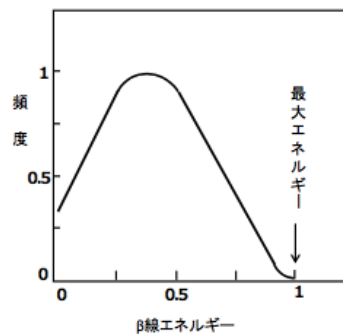


図 1.2: β 線のエネルギースペクトル [2]

線のエネルギーを実際に測定すると、図 1.2 のように (1.7) 式で表される値を最大値として連続的な値をとるので理論と測定結果が矛盾するという問題があった。

そこで、パウリはこの β 崩壊の問題を解決するために、電氣的に中性で、透過力が大きく、か

つ軽い粒子の存在を仮定した。この粒子こそが、今日知られているニュートリノである。その後、エリニコ・フェルミは、 β 崩壊によって放出される電子やニュートリノ、さらには崩壊後の原核の原子番号が1つ大きくなる要因となる陽子はもともと崩壊前の原子核に存在していたわけではなく、崩壊時に原子核中に存在していた中性子が消滅して陽子が生成され、その際に電子とニュートリノ (正確には反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$) が生成されるという以下の式で表した。



フェルミはこれを中性の意味である「ニュートラル」と小さいという意味の「イノ」を用いて「ニュートリノ」と1933年に命名した。

このように β 崩壊の理論が完成されたが、ニュートリノの反応性の低さゆえに、その検出は容易ではなかった。そこで、フレデリック・ライネスとクライド・コーワンはニュートリノ (実際に観測したのは反電子ニュートリノ) を間接的に検出することを目指した。(1.8) 式の反応の向きを逆転させると



となり、これは逆 β 崩壊と呼ばれる反応過程である。この反応を用いれば、(1.8) 式の β 崩壊によって放出される反電子ニュートリノを何らかの標的に当てることによって、陽電子が生成され、その陽電子も直ちに周囲の電子と対消滅して2個の光子が放出される。また、この逆 β 崩壊によって原子核中の陽子は中性子へと変化するため原子核内で核子の組み換えが起こり、その原子核が再度安定化する際にも光子が放出される。したがって時間差で2度の光子放出を観測することによって間接的に反電子ニュートリノを間接的に検出することができる。ライネスとコーワンは、この原理を利用して、原子炉から大量に放出される反電子ニュートリノを用いて反電子ニュートリノの間接検出を目指した。ニュートリノの反応性の低さから観測は困難であったが、1956年について観測された事象数がフェルミの理論と一致し反電子ニュートリノの検出に成功した。

1.1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動の発見の前には太陽ニュートリノ問題と大気ニュートリノ異常という理論予測と実験値が相いれない問題があった。

太陽ニュートリノ問題とは太陽の中心部では核融合により電子ニュートリノ ν_e が生成されるが、これを地球上で観測したとき、太陽中の核反応を記述する標準太陽模型で予言される事象数の半分以下しか ν_e を観測できないという問題である。[4] 宇宙から地球に降り注ぐ高エネルギーの粒子である宇宙線は地球の大気中に存在する原子核に衝突し生成される大気ニュートリノと呼ばれる電子ニュートリノ ν_e とミューニュートリノ ν_μ を生成する。しかし、その成分比が ν_μ の数が小さいために理論値と異なる。これが大気ニュートリノ異常である。この成分比の異常は特に地球の裏側から飛来する大気ニュートリノに顕著に見られた。これらの問題はニュートリノ振動によって解決した。ニュートリノ振動とは、ニュートリノが

空間を飛行中に3種類のフレーバー間を時間とともに遷移していく現象のことであり、1998年にスーパーカミオカンデで発見された。太陽ニュートリノ問題であれば太陽で生成された電子ニュートリノが他のフレーバーのニュートリノに遷移してしまうため、電子ニュートリノの観測数が著しく低くなってしまふ。実際、他のフレーバーの数を合わせると標準太陽模型で予言される事象数とほとんど等しくなる。また、大気ニュートリノ異常については、 ν_μ が ν_τ に遷移してしまうために ν_e と ν_μ 成分比が理論値と一致しないということになる。

1.2 スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデ (Super-Kamiokande; SK) は岐阜県飛騨市にある神岡鉱山内の地下1000 mに位置する大型水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置である。太陽ニュートリノ、大気ニュートリノ、人工ニュートリノなどの観測を通じてニュートリノの性質を解明することを目的として、1996年4月から観測が開始された。[4]

1.2.1 チェレンコフ光

ニュートリノは電荷がなく、反応性が極めて低いため検出が困難である。スーパーカミオカンデでは、ニュートリノと水との衝突で始まる一連の反応を経て放射されるチェレンコフ光を通じて検出している。ここでは、チェレンコフ光が放射される仕組みについて説明する。

ニュートリノはごくまれに物質に衝突すると、荷電粒子をたたき出す。スーパーカミオカンデでは大量の標的として水を用いて観測数を増やしている。さらに、たたき出された荷電粒子によって放射されるチェレンコフ光を観測することによってニュートリノを検出する。

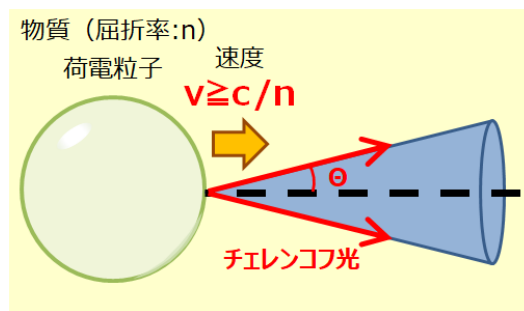
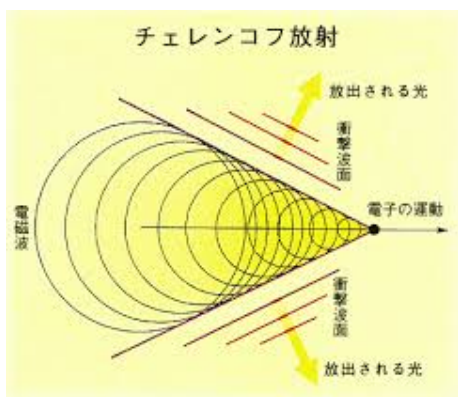


図 1.4: チェレンコフ光の概図 [10]

図 1.3: チェレンコフ放射 [9]

次に荷電粒子からチェレンコフ光が放射される仕組みについて説明する。屈折率 n の物質中を走る荷電粒子の速度 v がその物質中の光の速度以上、すなわち $v \geq c/n$ (c : 真空中の光速

度) となると図 1.3 のように荷電粒子周囲の電磁場が遅れて重なり合い衝撃波となる [10]。この衝撃波こそがチェレンコフ光である。チェレンコフ光が放射される角度は図 1.4 のように荷電粒子の進行方向と衝撃波の波面がなす角を θ とすると

$$\cos \theta = c/(nv) \quad (1.10)$$

である。スーパーカミオカンデでは荷電粒子が移動する媒質は水であり、放射されたチェレンコフ光は光センサーによって観測される。

1.2.2 スーパーカミオカンデの構造

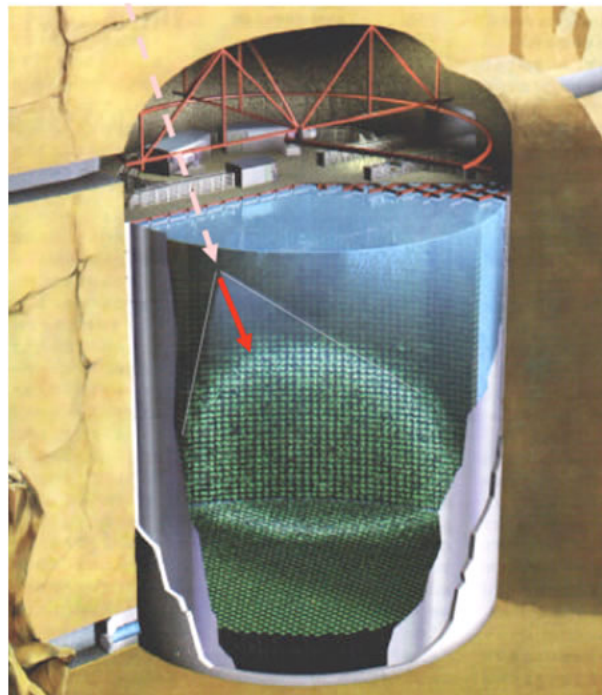


図 1.5: スーパーカミオカンデ検出器イメージ図 [4]

スーパーカミオカンデ検出器は直径 39.3 m、高さ 41.4 m の円筒形の 2 層式のステンレス製の水タンクの内外に 5 万トンの超純水で満たされている。[4] 水槽内外の壁面には光センサーである光電子増倍管が合計約 13000 本が取り付けられており、内水槽と外水槽の間は光を通さないように遮光している。スーパーカミオカンデ検出器のイメージ図を図 1.6 に示す。

内水槽には口径 20 インチの光電子増倍管が内向きに 11129 本取り付けられており、壁面のおよそ 40 % が光電面でおおわれている。この光電子増倍管によって、荷電粒子から発されるチェレンコフ光の光量の大きさと時間を観測し、荷電粒子の電荷の方向を決めることができる。2001 年 11 月に 1 個の光電子増倍管が破損して、その衝撃波が水中を通じて伝わり約半

数の光電子増倍管が破損してしまうという事故が起きた。そのため、2002年には破損が連鎖しないようにアクリルと繊維強化プラスチックからなる衝撃波防止ケースを光電子増倍管に取り付けた。

一方、外水槽には口径8インチの光電子増倍管が外向きに1885本取り付けられている。宇宙線ミュオンや岩盤等から放出される γ 線といった電荷を持つ粒子が水槽中でチェレンコフ光を出し、ニュートリノの測定のノイズとなってしまうので、外水槽でミュオンと γ 線由来のチェレンコフ光を検出することによって、それらと外水槽を素通りして内水槽で反応をするニュートリノによるチェレンコフ光とを区別するという役割が外水槽にはある。

1.2.3 SK-Gd プロジェクト

SK-Gd プロジェクトは2020年の8月から観測が開始された[4]。このプロジェクトでは、スーパーカミオカンデの純水にレアアースの一種であるガドリニウムを加えることにより反ニュートリノ検出感度の向上を目指したものである。反電子ニュートリノが(1.9)式で表される反応をした際に生成される中性子をガドリニウムが捕獲し、ガンマ線を放出する。そのガンマ線が電子を生んでチェレンコフ光を放出するため、(1.9)式による反応が起きて生成された陽電子によるチェレンコフ光が放出され、ガンマ線によるチェレンコフ光が放出されるという特徴的な現象が起こる。この現象によって検出される信号は、ノイズによっては起こりえないので、ノイズとニュートリノの反応を区別することができる。

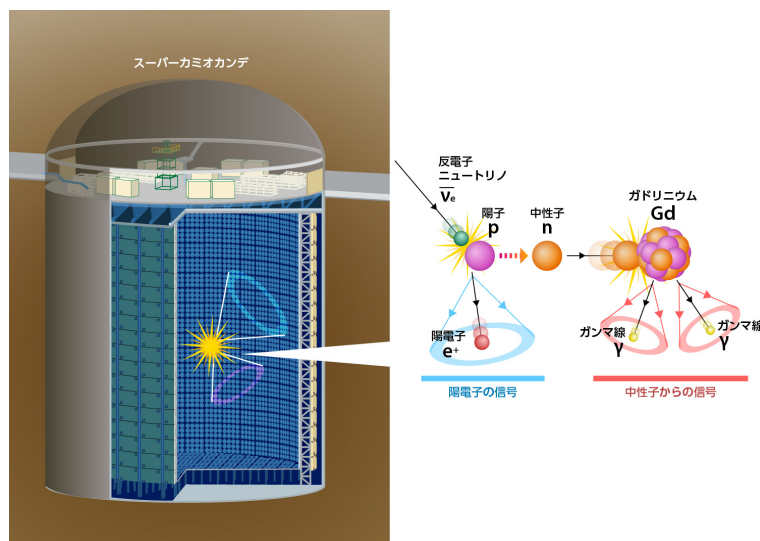


図 1.6: SK-Gd プロジェクト [4]

ガドリニウムの中性子捕獲率は非常に高く、0.01%の濃度で50%の効率で中性子を捕獲することができ、0.1%の濃度になると90%の効率で中性子を捕獲することができる。ガド

リニウムは硫酸ガドリニウム八水和物としてスーパーカミオカンデのタンク内に流入されており、2020年の8月17日からはガドリニウムの濃度は0.01%であったが、今後も濃度を上げ捕獲率を増やす予定である。

1.3 ハイパーカミオカンデ

ハイパーカミオカンデ (Hyper-Kamiokande; HK) は、岐阜県の神岡鉱山内地下 650 m に建設が進められており、2027年に観測開始予定の高精度の光センサーを備える大型水チェレンコフ検出器である [5]。検出器は直径 68 m、深さ 71 m の円筒形のタンクに超純水を満たすもので、タンクの体積は 26 万トン、有効体積は 19 万トンでスーパーカミオカンデの約 10 倍である。スーパーカミオカンデ同様、水槽は内水槽、外水槽の 2 つの水槽で構成されている。内水槽の壁面にはスーパーカミオカンデのものよりも検出精度を改良した口径 20 インチの光電子増倍管を約 40000 本光センサーとして敷き詰める予定である。また、外水槽では口径 8 cm の光電子増倍管を約 10000 本壁面に設置し、スーパーカミオカンデの時と同様の原理でノイズとニュートリノの反応を識別する予定である。

ハイパーカミオカンデでは、その検出器の大きさゆえ、取得にスーパーカミオカンデで 100 年かかるデータを約 10 年で取得することができるため、スーパーカミオカンデでは見ることが困難であったまれな現象を見ることが可能になる。主に目的とする観測は、陽子崩壊、CP 対称性の破れ、宇宙ニュートリノなどである。

1.4 光電子増倍管

ここでは、光センサーである光電子増倍管 (Photomultiplier tube; PMT) の基本原理及びその性能について記述したのち、SK で使用されている PMT と HK で使用予定の PMT について説明する。

1.4.1 基本構造

PMT は基本的にはガラス管に封じられた真空管であり図 1.7 で示したような構造をしている。PMT に入射した光はまずガラスでできた入射窓を通過し、金属でできた光電面に当たる。その際、外部光電効果によって光電子が放出され、集束電極で加速と収束がなされるその後、PMT に高電圧をかけることによって PMT 内に生じる電場によって光電子は加速され、それぞれのダイノードへ衝突する。光電子はまず、第 1 ダイノードに衝突して二次電子が放出され電子が増倍され、その後第 2 ダイノード以降も同様にダイノード衝突がなされ、最終ダイノードへとカスケード式に電子が増倍されていく。ここで 2 次電子の放出比 δ はダイノード間の電圧 E の関数として、

$$\delta = aE^k \quad (1.11)$$

と表される。[3] ただし、 a は比例定数であり、 k は電極の構造や材質で決まる定数で $0.7 \sim 0.8$ の値をとる。

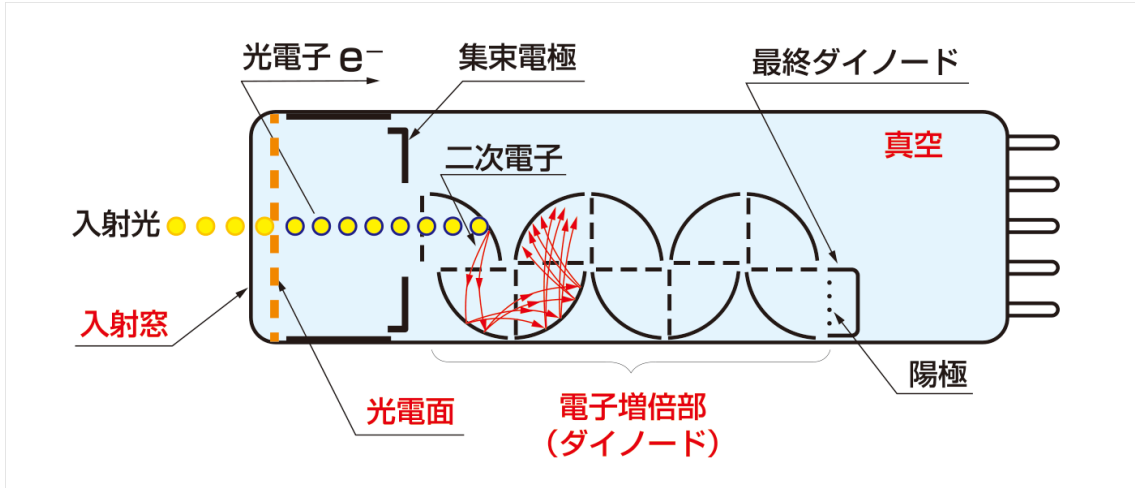


図 1.7: PMT の構造 [11]

さらに、光電面から放出される光電子流 I_k とその光電子流が第 1 ダイノード当たることによって放出される二次電子流を I_{d1} とすると、第 1 ダイノードにおける二次電子流放出比 δ_1 は、

$$\delta_1 = \frac{I_{d1}}{I_k} \quad (1.12)$$

と表される。同様にして、第 n ($n \geq 2$) ダイノードにおける二次電子流放出比 δ_n は

$$\delta_n = \frac{I_{dn}}{I_{d(n-1)}} \quad (1.13)$$

である。このようにして、最終ダイノードでも二次電子流が放出されて陽極により電子の信号として取り出される。このとき、第 1 ダイノードに当たった電子流の $10^5 \sim 10^7$ 倍の電子流が陽極に入る。ここで注意したいのが、初めに光電面から放出された光電子全てが増倍に寄与するわけではない。光電面からでた光電子の数と最終的に陽極から出力されるパルス数の割合を収集効率という。第 2 ダイノード以降は電子が抜けることがほとんどないので、収集効率は通常光電面から放出された光電子が第 1 ダイノードに当たる確率に大きく依存する。この収集効率 α を用いて、陽極に流れる電流 I_p は、

$$I_p = \alpha I_k \prod_{k=1}^{n_l} \delta_k \quad (1.14)$$

と書ける。ただし、ダイノード数を n_l とした。この (1.14) 式から

$$\frac{I_p}{I_k} = \alpha \prod_{k=1}^{n_l} \delta_k \equiv \mu \quad (1.15)$$

とすると、(1.15) 式の第 1、2 項は PMT 内の電流の増倍率を表している。これをゲインといい、 μ とする。 $\alpha=1$ として、等分割デバイダの場合を考えるとゲイン μ の PMT に供給される電圧への依存性は、(1.11)、(1.15) 式より、

$$\mu = (aE^k)^n = a^n \left(\frac{V}{n_l + 1} \right)^{kn} = AV^{kn} \quad (1.16)$$

となる。ただし、 A は定数をまとめたものである。

光電面に照射された光子もすべて光電子に変換されるわけではない。光電面から放出される光電子数を光電面に入射した光子数で割った値を量子効率という。この値は入射する光の波長に依存する。

1.4.2 光電子増倍管の時間特性

PMT に入射した光子が光電子として、その光電子が検出されるまでかかる時間特性について述べる。それぞれの PMT の時間特性は、光電面から放出された光電子が陽極にたどり着くまでの走行時間によって主に決まる。また、光電子の走行距離は電極の構造によって変わるため、走行時間は電極の構造と PMT への供給電圧へ大きく依存する。[3]

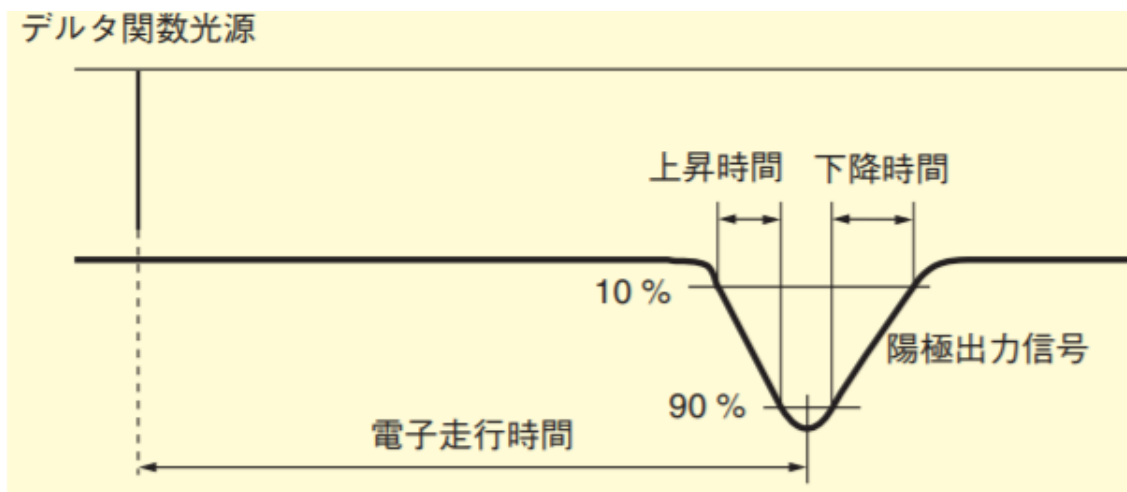


図 1.8: 上昇時間、下降時間定義 [3]

波形の上昇時間は図 1.8 に示されるように波高の 10 % から 90 % に達するまでの時間、下降時間は波高が 90 % から 10 % まで戻る時間とされる。一般の PMT では、下降時間は上昇時間よりも 2、3 倍程度長く、パルスの半値全幅 (Full Width at Half Maximum; FWHM) は上昇時間の約 2.5 倍となる。

出力されるパルス波形の位置は図 1.9 のように同じ PMT で測定していたとしてもそれぞれ

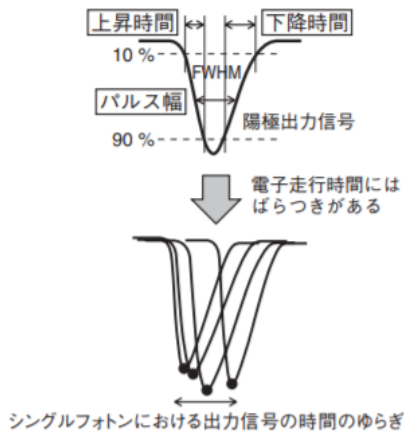
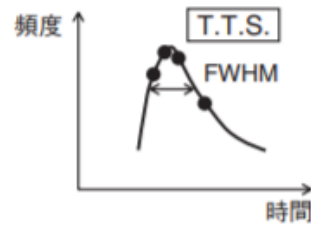


図 1.9: PMT の検出信号 [3]



THBV4_0416JA

図 1.10: PMT の時間分解能 [3]

の光電子の走行時間は全く同じではないためばらつく。そのため、1 光電子のみの波形を測定する場合には PMT に光が入射されてから検出されるまでの時間もばらつきが現れる。この検出されるまでの時間の頻度をグラフにすると図 1.10 のようになり、このグラフの半値全幅が小さいほど時間分解能がよいということになる。このばらつきが大きい場合には PMT の時間分解能が悪く、チェレンコフ光が検出される時間が正確ではなくなり、ニュートリノが反応した場所の特定が正確に行われなくなってしまう。

1.4.3 スーパーカミオカンデ、ハイパーカミオカンデの光電子増倍管

ここでは SK で使用されている PMT と HK で使用予定の PMT について説明する。それぞれの PMT の基本的な情報を表 1.1 に示す。

表 1.1: SK と HK の PMT[11][12]

検出器	SK	HK
型名	Hamamatu R3600	Hamamatu R12860
収集効率	70 %	90 %
量子効率	22 %	33 %
電子走行時間のばらつき	2.2 ns	1.0 ns
ダイノードの形	ベネシアンブラインド型	ボックス&ライン型

表 1.1 から分かる通り、SK の PMT より HK の PMT は量子効率や収集効率も上がり、性能がよくなっている。特に 2 つで大きく異なるのはダイノードの形である。

R3600 のベネシアンブラインド型は図 1.11[14] に示されるような形状で、光電子の電界収集が容易であるという利点を持つが、その反面、電子がたどる経路がばらばらなため、時間分

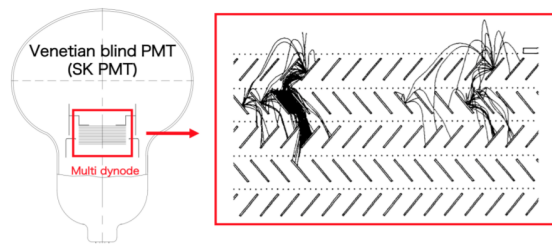


図 1.11: ベネシアンブラインド型ダイノード [14]

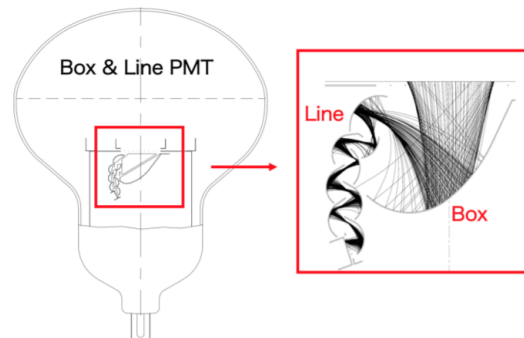


図 1.12: ボックス&ライン型ダイノード [14]

解能が悪くなってしまうたり、第1ダイノードに当たらないことも多いためゲインが変わってしまうという欠点を持つ。その一方で、R12860のボックス&ライン型は図1.12に示されるような形状で、光電子の電界収集もよいことに加え、光電子の経路は1通りであり、第1ダイノードに当たらないことも少なくなっているというようにベネシアンブラインド型の欠点を克服したダイノードである。

1.5 検出器のキャリブレーション

ここではSKにおけるPMTの較正(キャリブレーション)について説明する。水チェレンコフ検出器において荷電粒子が放出するチェレンコフ光がPMTで電子信号として検出される。同じタイミングでそれぞれのPMTに照射したとしても、その光が電子の信号として検出される時間はそれぞれ全く同じではなく、PMT内の光電子の走行時間によってばらつきが出てしまう。そこで複数のPMTに同時に光を照射しその検出時間の違いを調べ、それぞれのPMTの検出時間を補正することができればニュートリノの反応場所をより正確に決めることができる。また、それぞれのPMTによって量子効率や収集効率の違いによって利得にばらつきがある。[15]その利得のばらつきを調整することができれば反応したニュートリノのエネルギーや種類をより正確に決めることができる。このような検出時間の補正や利得の調整をするために、SKでは光拡散ボールを用いたキャリブレーションが行われている。

1.6 ディフューザーボールの役割と時間分解能への影響

ディフューザーボールは、SKでPMTをキャリブレーションすることを目的に使用されている光拡散ボールである。このディフューザーボールに光ファイバーを入れることで、光ファイバーから出る光はボール内の散乱物質と衝突してボールの外へ出ていく。散乱体としては可視光から紫外線に対して高い反射率を示す酸化マグネシウム(MgO)の粒体を使用し、球体状の樹脂中に混ぜている。このディフューザーボールによる光の散乱が等方的かつ時間のばら

つきが小さければ、光電子増倍管のキャリブレーションをより正確に行うことができる。SKでは図 1.15 のように窒素レーザーを光源としてキャリブレーションを行っている。図 1.13、1.14 は光電子数に対してそれぞれ SK、HK の PMT を SK の水中でディフューザーボールから拡散された光の検出時間のばらつきをグラフにしたものである。[16] 縦軸の σ_t はトリガータイミングからの検出時間をヒストグラムにし、ガウス関数でフィットしたときの幅である。ヒストグラムが非対称であったため、フィットの際にヒストグラムのピーク位置を中心に左右異なった幅でフィットしている。図 1.13 の赤色の点はピーク位置より早い時間を、緑色の点はピーク位置より遅い時間のガウス関数でフィットしたときの幅である。また、図 1.14 の青色の点はピーク位置より早い時間を、桃色の点はピーク位置より遅い時間のガウス関数でフィットしたときの幅である。光電子数が多いほどタイムウォークが小さくなり検出器と回路の時間分解能の影響が主になる。大光量の際は図 1.13、1.14 でも検出時間のばらつきは 0.5 ns 程度になっている。そこで、ディフューザーボールから拡散された 1 光電子が検出されるまでの時間のばらつきが 0.5 ns 以下であれば、時間キャリブレーションをする際に、ディフューザーボールによる時間分解能への影響は小さくなる。そのため、本研究ではディフューザーボールを用いて 1 光電子を測定したときの時間のばらつきが 0.5 ns 以下になることを目標にした。

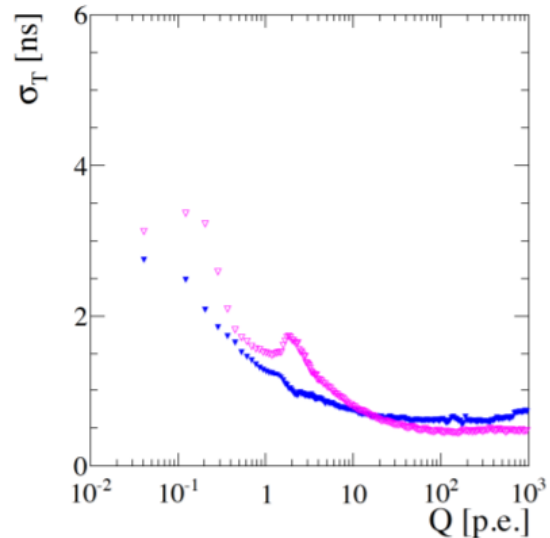
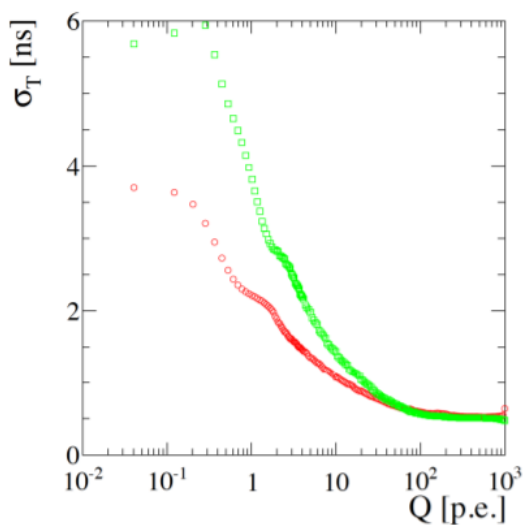


図 1.13: SK の PMT の光電子数に対する光検出時間のばらつき [16]

図 1.14: HK の PMT の光電子数に対する光検出時間のばらつき [16]

また、SK の水槽の中心部にボールを置いて光を拡散させても壁面の PMT でタイムウォークの電荷と時間の相関を全ての光量で取得する。そのため、電子回路で取得できる最大光量

で時間を計測できるほどの光量を保てるほどディフューザーボールの光量減衰が大きくない必要がある。

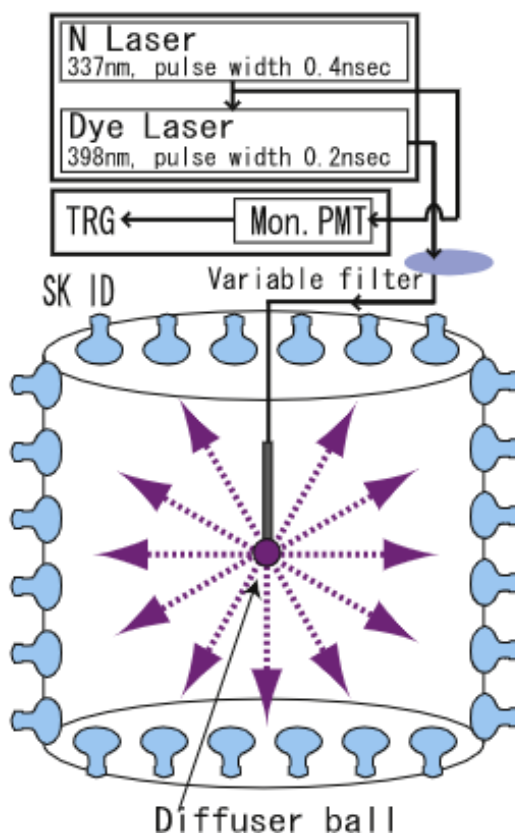


図 1.15: ディフューザーボールによる SK のキャリブレーション [15]

本研究では、様々な大きさや濃度のディフューザーボールから、キャリブレーションをするのに最適なものを選び出すことを目的の一つとしている。そのために、それぞれのボールにおける光検出までの時間のばらつき、すなわち時間分解能が悪いと正確なキャリブレーションができないため、ボールによる時間分解能への影響は小さくある必要がある。そこで、その時間分解能への影響の評価について、ここでは述べる。

光拡散ボールに光源のレーザーを入れ、その光が実験室で検出にいたるまでの全体の時間のばらつき σ_{tot} は、

$$\sigma_{tot} = \sigma_{LD} \oplus \sigma_{fib} \oplus \sigma_{ball} \oplus \sigma_{out} \oplus \sigma_{PD} \quad (1.17)$$

で表される。ただし、 σ_{LD} はレーザーの光発振における時間のばらつき、 σ_{fib} はレーザー光がファイバーを伝う際に生じる時間のばらつき、 σ_{ball} はディフューザーボールに入射され

た光がボール内の粒子に衝突してしまうことによるボール表面に光がたどり着くまでの時間のばらつき、 σ_{out} はボールの内外における屈折率の差によって、ボール表面にたどり着いた光がボールの外へ出ていく時間のばらつき、 σ_{PD} は光検出器が光を信号として変換するまでにかかる時間のばらつきを示す。また、これらの時間のばらつきは単純な数値の足し合わせではないことを示すため、+記号ではなく、 \oplus 記号を用いた。実際、

$$\sigma_{others} = \sigma_{LD} \oplus \sigma_{fib} \oplus \sigma_{out} \oplus \sigma_{PD} \quad (1.18)$$

とすると、 σ_{ball} は

$$\sigma_{ball} = \sqrt{\sigma_{tot}^2 - \sigma_{others}^2} \quad (1.19)$$

と評価することができる。

1.7 本研究の目的

ニュートリノが水と衝突して荷電粒子が生じ、その荷電粒子が水中を走ることによってチェレンコフ光が放出される。スーパーカミオカンデでは内水槽壁面に取り付けられた約 11000 本の光電子増倍管でチェレンコフ光を検出しており、検出した光の光量や検出時間は反応したニュートリノの種類、位置、エネルギー特定に重要な情報となっている。しかし、それぞれの光電子増倍管内の光電子の走行時間にばらつきがあるとチェレンコフ光を検出するまでの時間が正確な情報ではなくなってしまう。そこで、現在スーパーカミオカンデでは光拡散ボールであるディフューザーボール内部に窒素レーザーを照射させ、内水槽壁面の複数の光電子増倍管に光を入射することによってキャリブレーションを行っている。このキャリブレーションが正確に行われるためにはディフューザーボールから出てくる光が等方的で、壁面の光電子増倍管に光をとどかせるためにボールによって光量が減衰されすぎず、ボールから出てくるまでの時間にばらつきが小さい必要がある。スーパーカミオカンデで使用されているものからの性能向上を目指し、違う濃度・大きさのボールを用意し、等方性、光量減衰率、時間分解能について調べ、スーパーカミオカンデで使われている型のものと比較することに加え、キャリブレーションに適した濃度や大きさを選ぶことを目的とする。

第2章 実験装置

2.1 光源

ここでは、本実験で扱った2種類の光源であるレーザーダイオードと窒素レーザーについて記述する。

2.1.1 レーザーダイオード

本実験では、図 2.1 の珠電子社製の LDB-100-405 のレーザーダイオードを使用した。こ



図 2.1: LDB-100-405

のレーザーダイオードはパルス幅 50 ps のレーザー光源を内部発振器とともに超小型基板に収めたものであり、USB インターフェイスを使用してレーザー強度やパルス幅を自由にカスタマイズすることができる。その他の仕様は表 2.1 に示す。

表 2.1: LDB-100-405 の仕様

平均出力	269 μ W
ピーク出力	659 mW
波長	405 nm

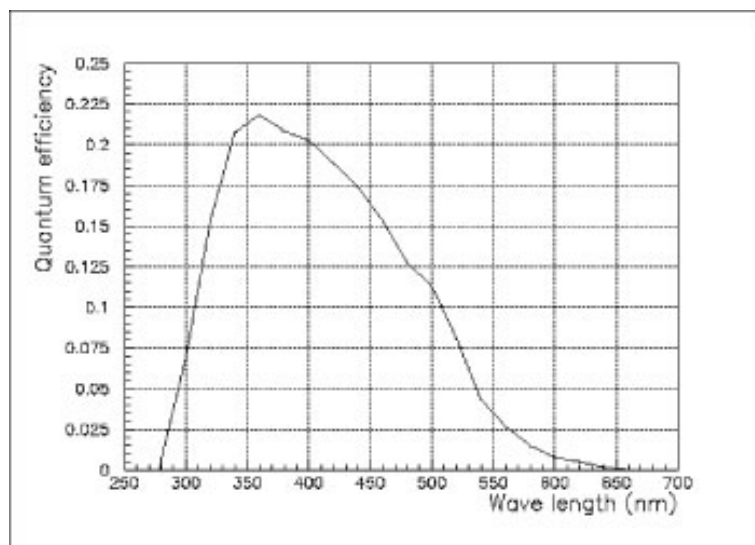


図 2.2: SK の PMT における QE 分布 [4]

2.1.2 窒素レーザー

SK では高出力の窒素レーザーを光源として使い、ディフューザーボールによる時間のキャリブレーションを行っている。そこで窒素レーザー光をディフューザーボールに照射させた際にボールから出てくる光の光量や時間分解能を調べるため、実際にSKのキャリブレーションに使用されている USHO KEC-100 を使用して測定をした。USHO KEC-100 は励起光源の窒素レーザーと色素レーザーが一体型設計になっており、各レーザー間の光路調整が不要である。窒素レーザーと色素レーザーの仕様を表 2.2 に示す。図 2.2 に示す各波長に対するSKのPMTの量子効率(2.2節で説明する)をグラフにしたQE分布において、窒素レーザーの波長337.1 nmに対する量子効率は悪い。色素レーザーでは波長を、量子効率が高い波長に調整できる。

このレーザーは進行波放電励起方式によって短パルスを実現しており、高電圧高速放電回路を扱うことによって高出力であるという特長をもつ。また、色素レーザーの励起光源である窒素レーザーはガスフロータイプであるため、レーザー発振のたびに少しずつ出力が低下する封じ切りタイプと比べて高い安定性を持つ。

2.2 光検出器

ここでは、光拡散ボールを入れた時の光量や時間分解能を測定する光センサーとして使用した光電子増倍管、マルチピクセルフォトンカウンター (Multi-Pixel Photon Counter; MPPC)、

窒素レーザー波長	337.1 nm
色素レーザー波長	360~720 nm
窒素レーザーパルス幅	0.6 nm
色素レーザーパルス幅	0.2 nm(波長 480 nm)
色素レーザー出力	15 μ J~75 kW(波長 510 nm)

アバランシェフォトダイオード (Avalanche Photodiode; APD) モジュールの 3 種類について記述する。

2.2.1 光電子増倍管



図 2.3: 光電子増倍管 (H3178-51)[6]

本実験では、型番 H3178-51 の光電子増倍管を使用した。PMT の基本的な説明は 1 章 4 節の通りで、この型番の性質を表 2.3 に示す。

-1500V の電圧をかけて光源からの 1 光電子の時間分解能や光量を測定するために使用した。

2.2.2 アバランシェフォトダイオード (APD) モジュール [8]

アバランシェフォトダイオードモジュールは APD、温度補償バイアス回路、I/V 変換回路を一体化した高感度の光センサーである。本実験で使用した APD は図 2.4 である。

表 2.3: 光電子増倍管 (H3178-51) の性質 [6]

管径	38 mm
電子走行時間	40 ns
電子走行時間のばらつき	4.5 ns
ダイノードの形	ラインフォーカス型
ゲイン	7.9×10^5



図 2.4: APD

APD は逆電流を印加することによって、アバランシェ増倍によって高い受光感度を実現し微弱な信号の測定を可能にしている。アバランシェとはなだれという意味であり APD に入射した光子が半導体の原子に当たることによって光電子が放出され、その光電子が強い電場によって加速され、更に原子と衝突して電子を放出するということを繰り返し、なだれのように電子を増やしていく反応がアバランシェ増倍である。

本実験では型名 C12702-11 の APD モジュールを使用した。また、この APD の温度補償バイアス回路では、APD モジュールに印加された電圧を APD に必要な +200 V 程度の電圧まで昇圧させる高電圧発生部、電圧制御部に温度情報を伝える温度センサー、温度センサーの情報からバイアス電流を制御して増倍率の温度安定性を実現する電圧制御部から構成されている。この温度補償バイアス回路は、周囲の温度によって変わってしまう APD のゲインを一定に保つ役割がある。また、I/V 変換回路では、APD の微小な光電流を高 S/N に増幅する役割を持つ。本研究では、サチュレーションしにくい、周囲の温度に影響されにくいという特徴か

らリファレンスの役割で電源コネクタケーブルを用いて電源と接続し、BNC ケーブルによってオシロスコープと接続しその波形を見た

2.2.3 マルチピクセルフォトンカウンター (MPPC)[7]

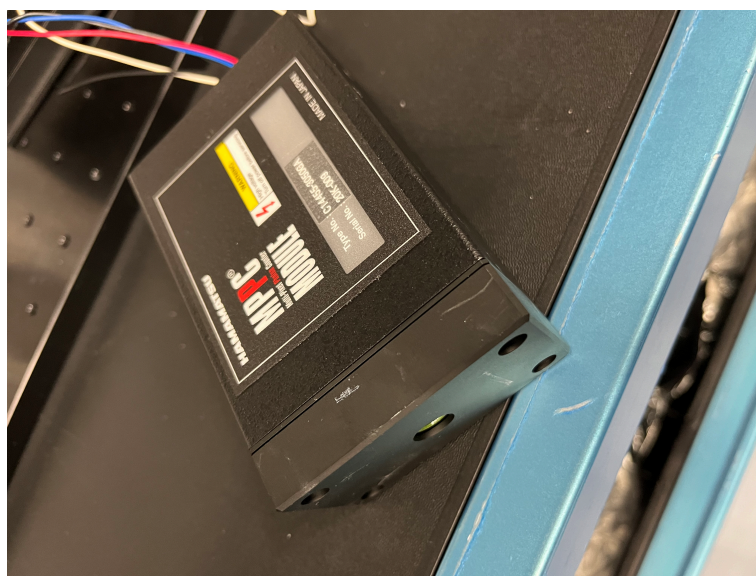


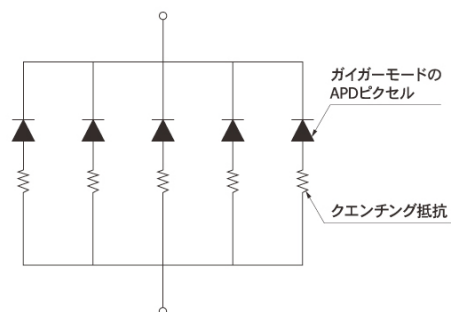
図 2.5: MPPC

マルチピクセルフォトンカウンターは、ガイガーモード APD をマルチピクセル化したフォトンカウンティングデバイスである。また、低電圧で動作し、高い増倍率、高い検出効率、高速応答、優れた時間分解能でフォトンカウンティング性能を持ちながら、磁場に影響されず、衝撃に強いという測定環境に対しても優れた特性を持つ。

APD の逆電圧を降伏電圧以上にして動作させ、光を入射させると光量に関わらず素子固有の飽和出力が発生される状態をガイガーモードと呼び、この状態では 1 光子の検出にも大きな出力を得ることができる。この出力を次の光子を検出するためにこの放電を止める必要があるが、そのためにそれぞれの APD に直列にクエンチング抵抗を接続して、APD のアバランシェ増倍を短時間で止めるという構造を設けている。

このような過程を踏まえて出力される波形は図 2.7 のような形で、APD のガイガー放電時の出力電流は鋭く立ち上がり、クエンチング抵抗によってガイガー放電を止めるときの出力電流は緩やかに立ち下がる。

MPPC のそれぞれのピクセルに入射した光子は同じ波形を出力する。複数のピクセルに同時に光子が入射された場合には図 2.7 のように波形の重ね合わせとして出力される。しかし、



KAPDC0029JA

図 2.6: MPPC の構成 [7]

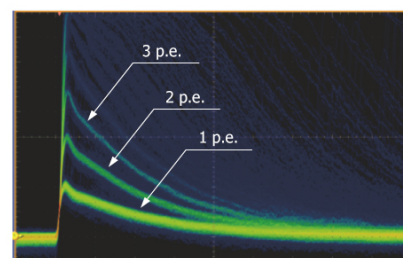


図 2.7: MPPC による信号の波形 [7]

1つのピクセルには1つの光子しか同時に検出することができないため、大光量の測定には向いていない。本研究では優れた時間分解能をもつという特徴から MPPC はトリガータイミングから小さい光量の光の検出までの時間測定に用いた。

2.3 ディフューザーボール

ここでは、現在 SK で使用されているものと同じ型のディフューザーボール (以下では SK 型ボールと記す) と新しく使用することを目的とした大きさ、濃度を変えたディフューザーボールについての性質を記述する。

2.3.1 SK で使用しているディフューザーボール

SK で使用されているディフューザーボールは光ファイバーの出口部分に大きさ 5 mm、濃度 10000 ppm の散乱体があり、その周りに直径 50 mm、濃度 1500 ppm のボールがある構造をしている。散乱物質としては粒径 5.8 μm の酸化マグネシウムを使用している。このようにボール内部に散乱体を配置させる理由としては、散乱体がない場合には光ファイバーから出た光が等方的に広がらず、ファイバーの正面と後方で出てくる光の光量が大きく異なってしまうからである。

2.3.2 本実験で用いたディフューザーボール

本研究では SK 型ボールとは異なる大きさ・濃度のディフューザーボールを用意しその性能について評価することが目的の1つである。ここでは、実際に測定に用いたディフューザーボールの濃度および大きさの決め方について述べる。SK または HK でキャリブレーションを

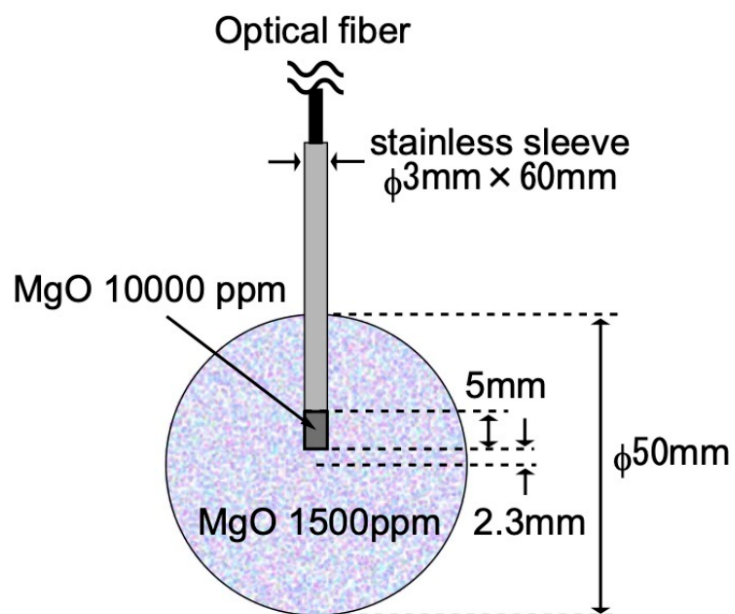


図 2.8: SK で使用されているディフューザーボールの構造

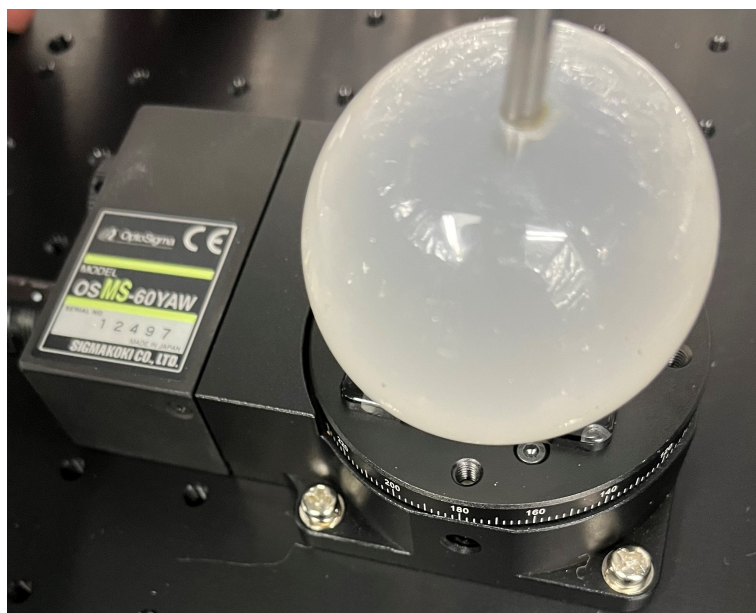


図 2.9: SK 型ボール

するには等方的に光が拡散され、ディフューザーボールによる光の検出時間までのばらつきが 0.5 ns 以下になるディフューザーボールを使用することが望ましい。等方的に光を拡散させるには MgO 濃度が高いものが良いが、MgO 濃度が高いほど時間分解能が悪くなってしまふ。そこで、濃度・大きさがどれほど時間分解能に影響があるかを調べた。図 2.12 のような濃度 2000 ppm、3000 ppm、5000 ppm、10000 ppm で、それぞれの濃度に対し厚さが 2 mm、5 mm、10 mm のディフューザー板 12 種類をレーザーと MPPC の間に挟んだ時の濃度および厚さによる時間分解能への影響を調べていた。



図 2.10: 濃度・厚さの異なるディフューザー板

この測定においてはレーザーの同期出力のタイミングから光検出器での信号が閾値を超える時間を測定し、その標準偏差で時間のばらつきを調べていた。その結果は横軸をディフューザー板の濃度×厚さ、縦軸を時間のばらつきとした時、図 2.11 のようなグラフとなりこのグラフを log の関数でフィットした。ただし、この赤い点は SK 型ボールを濃度 1500 ppm、厚さ 25 mm としてグラフ上に示した点である。このフィットした関数を用いると 100000 ppm で厚さ 10 mm では 0.4ns である。そのため 100000 ppm で半径が 10 mm 程度であれば光が等方的に拡散されつつ、時間分解能が悪くなりすぎないという見込みで図 2.12 のような濃度 100000 ppm、直径 10 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm のボールを用意した。それぞれ直径の小さい順に以下ではボール 1、ボール 2、ボール 3、ボール 4、ボール 5 と記す。

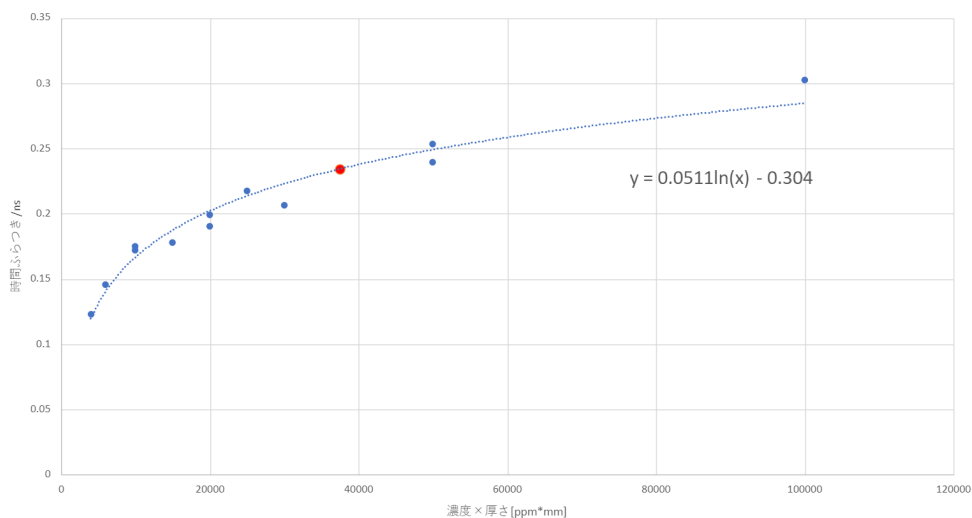


図 2.11: ディフューザー板の濃度×厚さに対する信号検出までの時間のばらつき

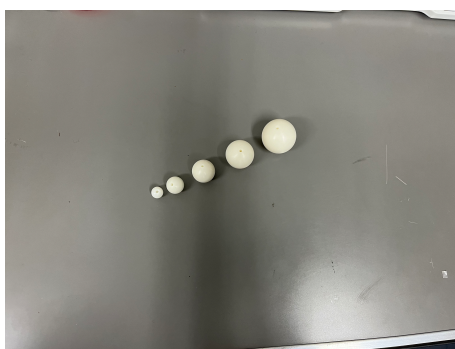


図 2.12: 濃度 100000 ppm のディフューザーボール (左からそれぞれ直径 10 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm)

2.4 オシロスコープ

本実験では信号の波形を見るために TELEDYNE LECROY の wavesurfer3024z というオ



図 2.13: オシロスコープ (wavesurfer 3024z)

シロスコープを使用した。このオシロスコープは図 2.13 のように 4 つのチャンネルがある。本実験ではレーザーダイオードの同期出力などのチャンネルをトリガーとして測定をした。またトリガーの種類はエッジトリガーであり、指定した波形の立ち上がり、あるいは立下りがある場合にトリガーを作動させるというものだ。

本実験では、オシロスコープを用いて主に光検出器で検出された光量と 1 光電子の時間分解能を測定した。光量はオシロスコープの計測機能で、信号の波形を積分した電荷の平均値を計算することによって求めた。また、光電子の時間分解能は、オシロスコープを有線 LAN で接続し、波形データを他の PC で保存し、解析した。

第3章 ディフューザーボールの性能

3.1 目的

光ファイバーからの光をディフューザーボールで光を拡散させることによって SK や HK で PMT のキャリブレーションを行うためには、以下の3つの点が重要である。

- 様々な方向に同じ光量の光を PMT へ照射する。
- SK の水槽の中心部にボールを置いて光を拡散させても壁面の PMT でタイムウォークの電荷と時間の相関を全ての光量で取得するため、電子回路で取得できる最大光量で時間を計測できるほどの光量を保つ。
- PMT の時間キャリブレーションするためにディフューザーボール自体では時間分解能が大きく悪くならない。

つまり、等方的に光を拡散することができ、内部で散乱して出ていく光の光量を大きく下げず、散乱によって時間分解能大きく悪化させないディフューザーボールが必要である。これら、3つの観点について現在 SK で使われているディフューザーボールと新しいディフューザーボールを比較し、それぞれの観点でボールの濃度および大きさとの依存性を調べた。

3.2 窒素レーザーの光量及び時間分解能測定

SK では窒素レーザーを光源としてディフューザーボールに光を入れ、PMT の時間キャリブレーションを行っている。この窒素レーザーとレーザーダイオードの比較をするために、まず窒素レーザーの光量や時間分解能を評価する測定を行った。

3.2.1 レーザーの光量比較、窒素レーザーの時間分解能測定のセットアップ

レーザーの光量比較をしたセットアップ、窒素レーザーの時間分解能を調べたセットアップの順に説明する。

レーザーの光量を測定するセットアップを図 3.1 に示す。光源からの光は分岐ファイバーによって、ディフューザーボールの中へ入射させる光と、リファレンス用の APD に直接入射させる光に分岐させた。光を 99.1% : 0.9% に分岐させる分岐ファイバー使用し、99.1% の方をディフューザーボールの中へ入れ、0.9% の方をリファレンス用の APD に直接接続した。

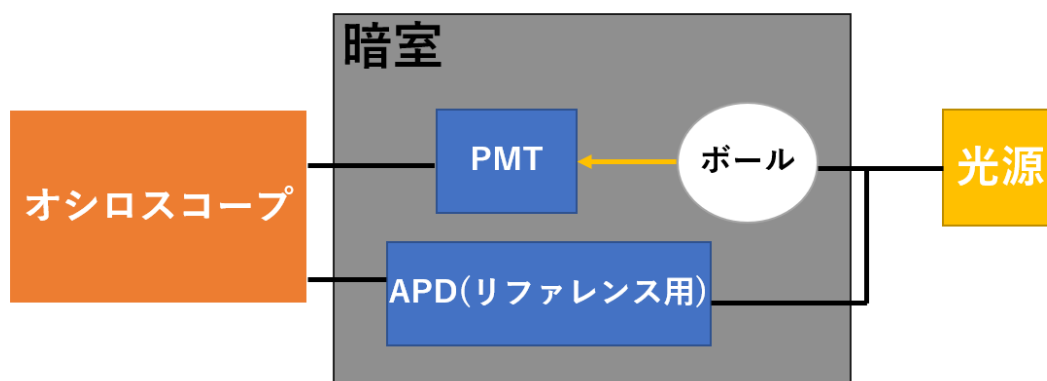


図 3.1: レーザーの光量比較のセットアップ

ディフューザーボールにはボール 1(直径 10 mm)を使用した。ディフューザーボールの中心から 5 cm 離れた位置に PMT の受光面がくるように固定した。この実験においては、窒素レーザーの光量が大きすぎたためリファレンス用の APD はサチュレーションしてしまっていたため、窒素レーザーからの光がこの APD に入射したタイミングでトリガーをかける目的として使用した。また、PMT に入射する光を絞るため図 3.3 のように PMT の光電面にファイバーの接続部品を使って光を絞り、他の部分は黒テープで遮光した。この部品により直径 4 mm の円形まで光電面を絞ることができた。この測定の実際のセットアップは図 3.2 の通りである。

次に、窒素レーザーの光の時間分解能を測定する簡単なセットアップを図 3.5 に示す。基本的には窒素レーザーの光量を測定したときと変わらず、光源から発振された光はディフューザーボールの内部に入射する光と、リファレンス用の APD に直接入射させる光とに分岐させ、リファレンス用の APD の信号でトリガーをかけた。この測定では、光検出器として MPPC を使用したが、窒素レーザーの光量が大きく MPPC 入射する波形がサチュレーションしてしまったので、窒素レーザーの光量を測定したときと同様にして図 3.4 のように受光面を絞った。しかし、この状態でも MPPC はサチュレーションしていたため光を、50%対 50%に分岐させるファイバーを使用して、分岐元をボールの方へ向けて光を受け取り、その光を MPPC と PMT の方へ分岐させ光量を落とすとした。また、この測定ではディフューザーボールとして SK 型ボールとボール 1(直径 10 mm)を使用した。

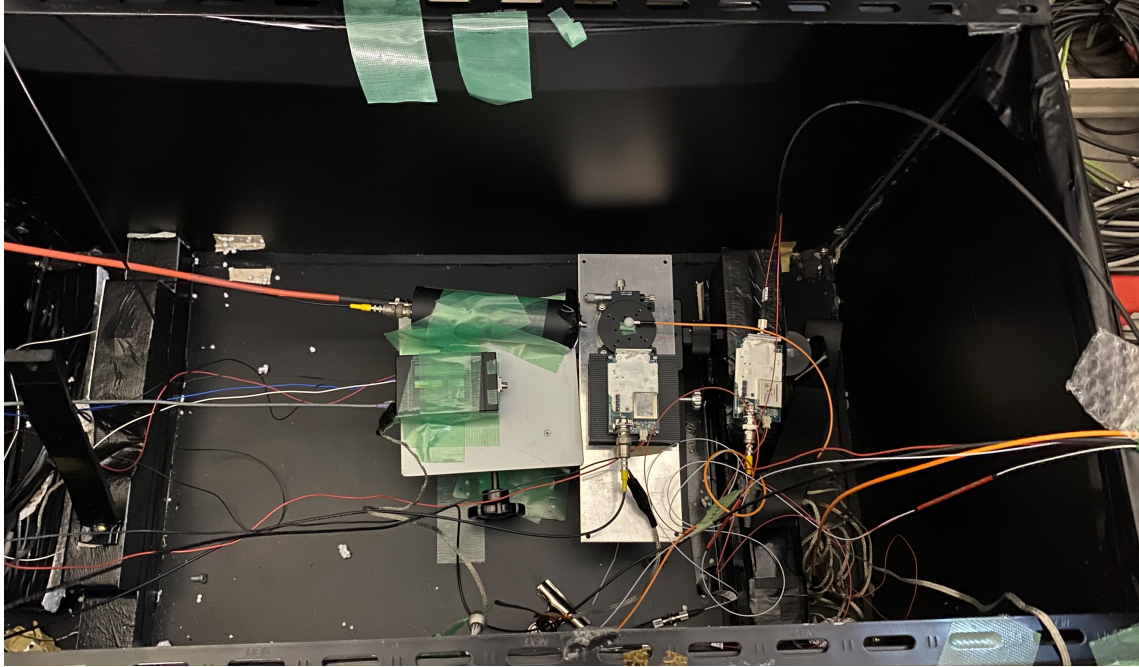


図 3.2: レーザーの光量比較のセットアップの実際の写真

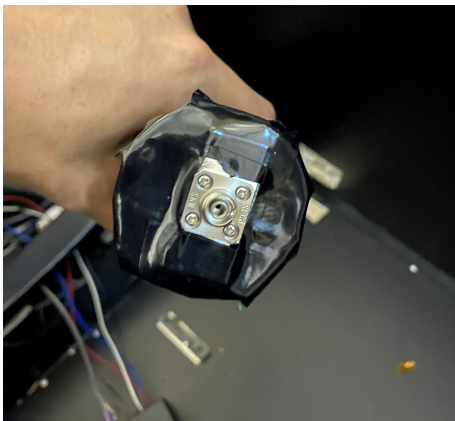


図 3.3: PMT の絞り

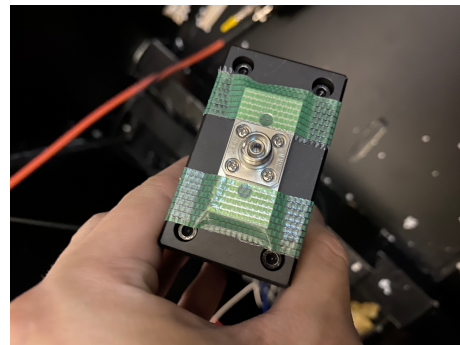


図 3.4: MPPC の絞り

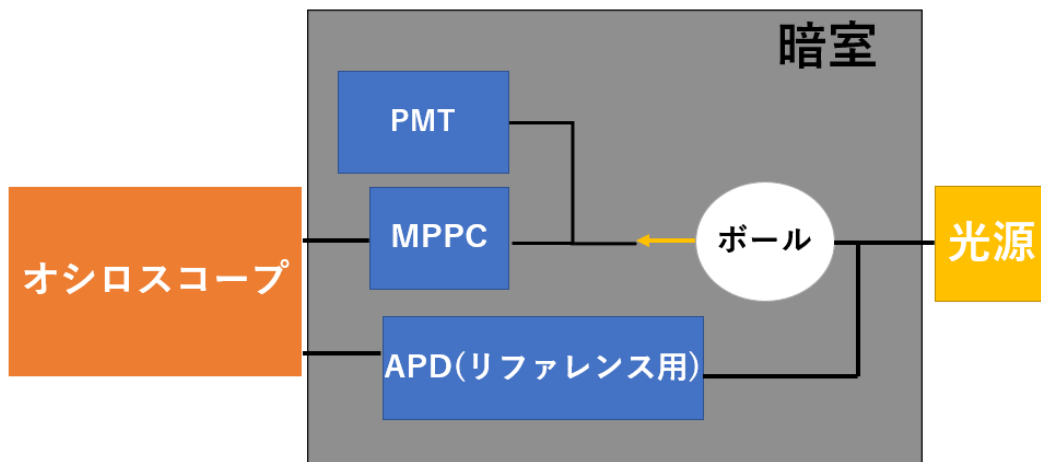


図 3.5: 窒素レーザーの時間分解能測定の設定アップ

3.2.2 レーザーの光量比較、窒素レーザーの時間分解能測定の測定手法

レーザーの光量比較をした測定手法、窒素レーザーの時間分解能を調べた測定手法の順に説明する。

光量比較の測定では、光源として窒素レーザー、またはレーザーダイオードを用いた。レーザーダイオードの設定は電流値 199.0 mA、パルス幅 9000 ps にした。この設定でのレーザーダイオード、または窒素レーザーを接続したときに、オシロスコープに表示される PMT に入射した光の波形の面積の大きさを 500 回以上記録し、その平均と標準偏差をそれぞれ記録した。

窒素レーザーの光の時間分解能の測定では、ボールによって MPPC で検出される光量が異なり、SK 型ボールで測定するときはサチュレーションしてしまった。MPPC の受光面とボールの距離が離れるほど光量が減る。そこで、ボールからの距離をそれぞれ表 3.1 のように変えて測定した。また、表 3.1 の距離でそれぞれ測定したときの実際のセットアップの写真を図 3.6、3.7 に示す。

表 3.1: 窒素レーザー時間分解能測定時のボール中心から MPPC 受光面までの距離
測ったボール ボール中心から MPPC 受光面までの距離/mm

測ったボール	ボール中心から MPPC 受光面までの距離/mm
ボール 1(直径 10 mm)	7
SK 型ボール	300

それぞれのボールを使用した際に、オシロスコープで MPPC の波形を 10000 ppm のボールは 10000 回取り、SK 型ボールでは 12600 回取って、波形解析によって検出時間のずれから

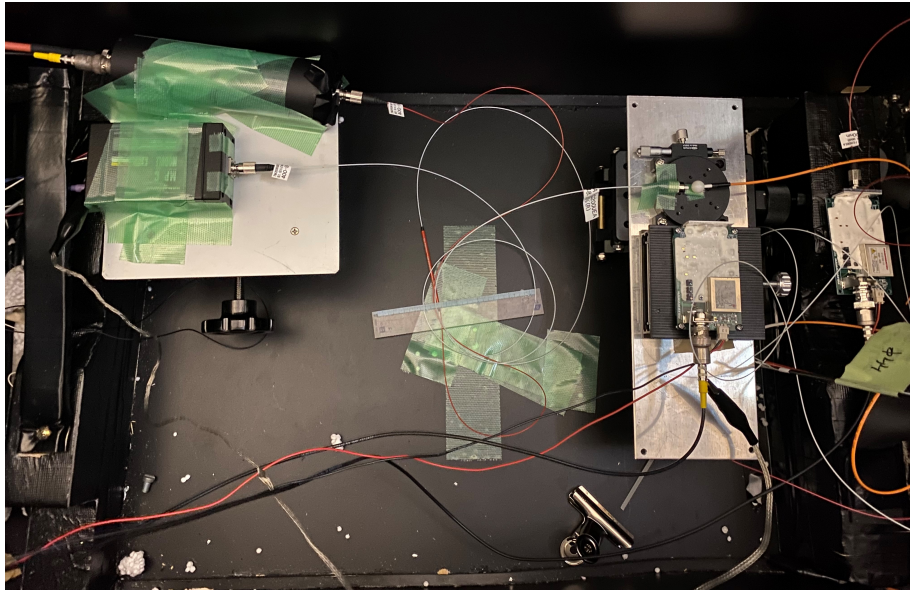


図 3.6: 窒素レーザーとボール 1(直径 10 mm) を使用して時間分解能を測定したときの実際のセットアップ

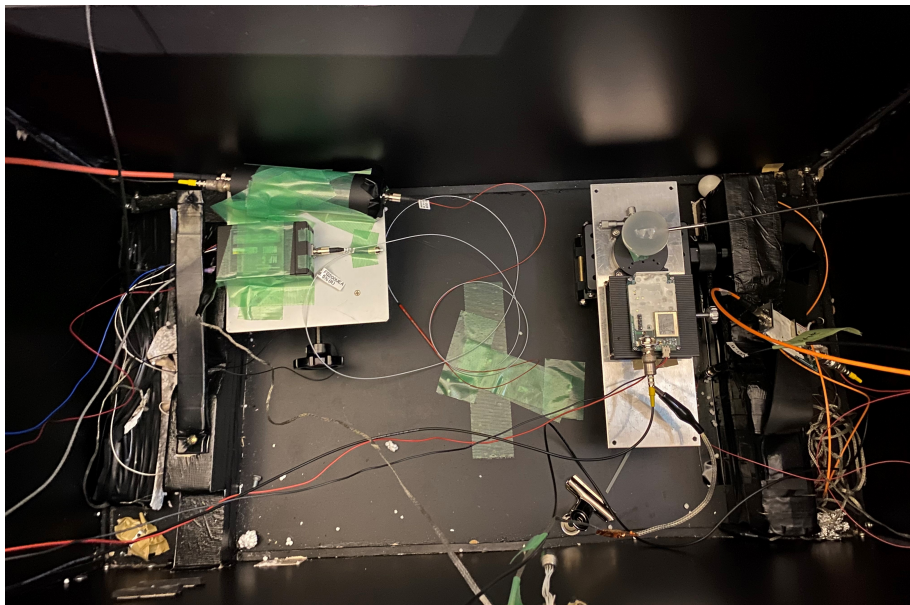


図 3.7: 窒素レーザーと SK 型ボールを使用して時間分解能を測定したときの実際のセットアップ

時間分解能を評価した。

3.2.3 レーザーの光量比較、窒素レーザーの時間分解能測定の結果

レーザーの光量比較をした結果、窒素レーザーの時間分解能を調べた結果の順に説明する。まず、レーザーダイオードと窒素レーザーの光量を比較するために測定した結果を示す。レーザーダイオードまたは窒素レーザーから発振した光をディフューザーボールに入射させボールから拡散された光をPMTで検出し、オシロスコープに表示された波形の面積の大きさを500回以上測定した平均値と標準偏差を表3.2に示す。波形面積を用いて光量比較をすると、レーザーダイオードに対する窒素レーザーの相対的な光量の大きさは21.37であった。

表 3.2: レーザーの光量比較

レーザーの種類	平均値/pWb	標準偏差/pWb
レーザーダイオード	44.38	35.78
窒素レーザー	946.9	221.0

次に、窒素レーザーの時間分解能について結果を述べる。窒素レーザーをSK型ボールまたは、ボール1(直径10mm)を用いた時のそれぞれ、トリガーをかけたタイミングから信号が閾値を超えるまでの時間を横軸に、エントリー数を縦軸にとったヒストグラムを図3.8、3.9に示す。

このそれぞれのグラフについて1光電子の波高で選別し、信号検出時間ごとのヒストグラムを作成した。それぞれのヒストグラムをガウス関数でフィットし、そのフィッティングパラメータである幅 σ を求めると表3.3のようになった。ただし、図3.8においてはピークが2つ存在した。通常は1光電子の電荷で選別したときのトリガータイミングからの信号検出までの時間のヒストグラムではこのようなダブルピークは存在しない。図3.6のセットアップ内で光が反射してMPPCにつながれたファイバーの先端に入射したことによりダブルピークができてしまった可能性がある。その解釈では、図3.8の左のピークがボールから出た光が直接MPPCにつながれたファイバーの先端に入った時のもので、右のピークが反射によるものだと考えられる。その考えから、1つめのピークを窒素レーザーとボール1(直径10mm)を使用したときの時間分解能とみなした。表3.3において、それぞれのピークを左フィット、右フィットとした。また、両方のピークごとフィッティングした時を全フィットとした。

3.3 ディフューザーボールの等方性

光ファイバーからの光がディフューザーボールによって拡散される際に、ボールから出てくる光の光量がボールの方向によってどれほど変わっていくのかを測定した。

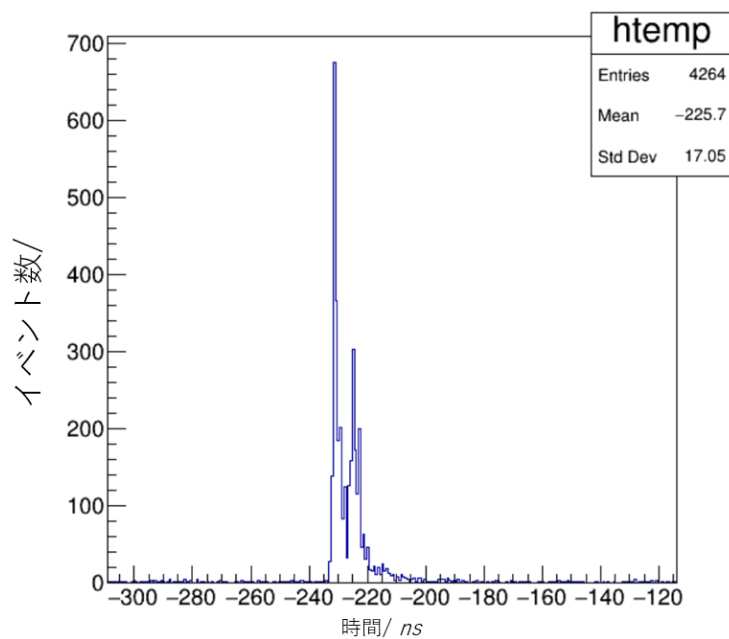


図 3.8: 窒素レーザーとボール 1(直径 10 mm) を用いた時の検出時間のばらつき

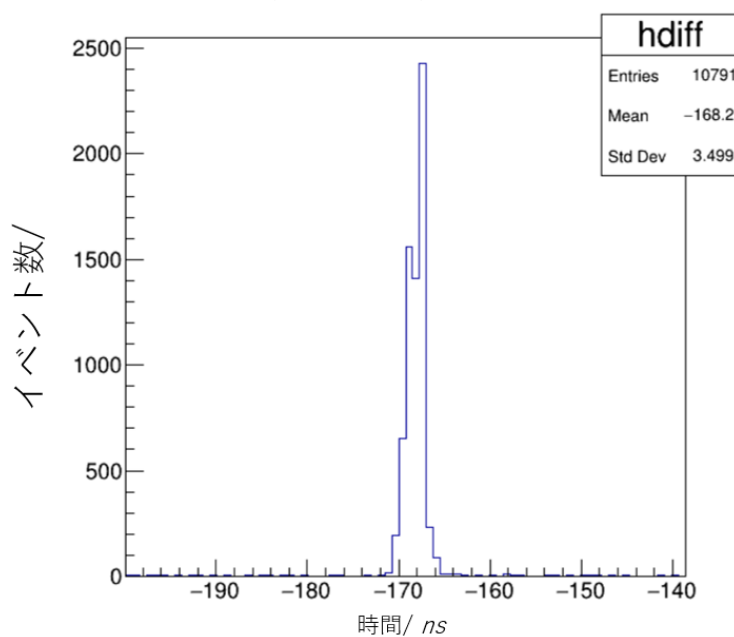


図 3.9: 窒素レーザーと SK 型ボールを用いた時の検出時間のばらつき

ボールの種類	検出時間幅のばらつき σ / ns
SK 型ボール	0.9664 ± 0.0089
ボール 1(直径 10 mm) 左フィット	0.5001 ± 0.0016
ボール 1 右フィット	1.764 ± 0.006
ボール 1 全フィット	3.604 ± 0.052

3.3.1 等方性確認測定の設定アップ

この測定のための簡単なセットアップを図 3.10 に示す。ディフューザーボールは回転台の上に

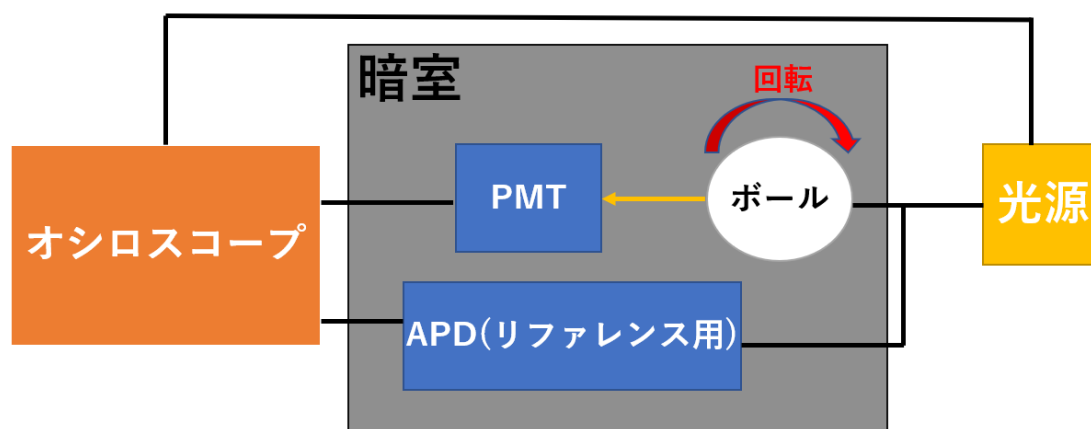


図 3.10: 等方性確認測定の設定アップ

固定し自由に回転できるようにした。この実験ではディフューザーボールとして SK 型ボールとボール 5(直径 30 mm)を使用した。ボールが小さすぎるとファイバーが向いている方向と逆から出てくる光がファイバーの接続部分によって隠れてしまい PMT に光がとどかない可能性があったため、濃度 100000 ppm のボールを代表して一番直径の大きいボール 5(直径 30 mm)を使用した。リファレンス用の APD は、レーザーなどの時間による光量のばらつきを相殺するためにリファレンス用の APD の波形面積の大きさを基準に測定できるように使用した。ディフューザーボールに入射する光の光量が小さいと光検出器で検出できないことに加え、リファレンス用の APD には分岐させた光を直接入射させるため、その光量が大きすぎるとサチュレーションして正しく光量を測定できなくなってしまう。そのため、ディフューザーボールへと向かう光の光量の方がリファレンス用の APD に向かう光の光量より大きくなるように 99.1 %:0.9 %に分かれる分岐ファイバーを使用した。ディフューザーボールで拡散された光は APD もしくは PMT の光検出器で検出され、その信号の波形はオシロスコープで波形を見た。リファレンス用の APD からの信号の波形も同様にしてオシロスコープで見た。オシロスコープにレーザーダイオードの同期出力をつなぎ、その信号でトリガーをかけた。また、

使用した光検出器はいずれも微弱な光を検出するので、光ファイバーを入れたディフューザーボールとともに暗室に入れ、その暗室に暗幕をかけるなどして十分に遮光した。

3.3.2 等方性確認測定の測定手法

回転台にディフューザーボールを固定し、それぞれ縦方向、横方向に回転させ光検出器でディフューザーボールから出てくる光の光量を測定した。縦方向の回転は図 3.11 のようにファイバーの向き、横方向の回転はファイバーと垂直な向きを軸として回転とした。

ボール 5(直径 30 mm)、SK 型ボールともに縦方向、横方向の回転をさせた時ディフューザーボールから出てくる光を、PMT で検出した。縦方向の回転は図 3.12 のようにファイバーの先端が検出器を向いている時を 0 度として測定し、角度が大きくなるにつれて左側面、背面、右側面、正面となるように回転をさせた。横方向の回転は図 3.13 のようにファイバーの先端が下を向くようにしてボールを固定、回転させた。また、この測定でレーザーの設定は表 3.4 に示す。

表 3.4: 等方性確認測定におけるレーザーの設定

測ったもの	レーザーのパルス幅/ps	レーザーの電流値/mA
ボール 5(直径 30 mm)	4000	199.0
SK 型ボール	4000	100.0

またこの測定では、それぞれの角度でオシロスコープで表示された波形の面積を積分した値の 500 回以上の平均および標準偏差をそれぞれ記録した。また、それぞれの角度の時にリファレンス用の APD に入射した光の波形も同様にその面積の平均値と標準偏差を記録した。

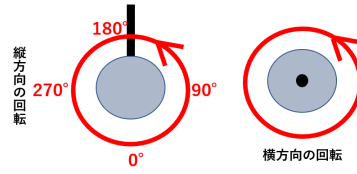


図 3.11: 縦方向と横方向

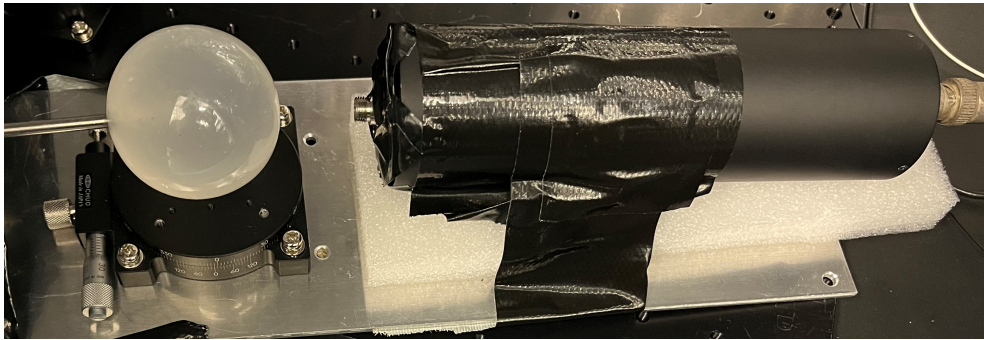


図 3.12: 縦方向の回転の実験器具の固定

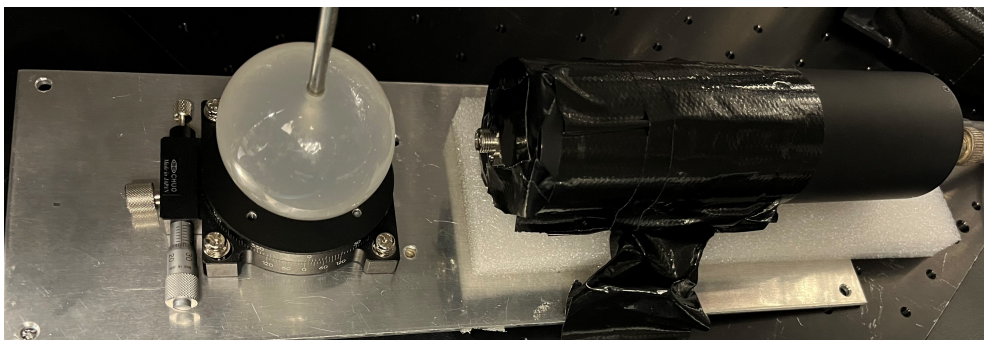


図 3.13: 横方向の回転の実験器具の固定

3.3.3 等方性確認測定の結果

横軸が回転角(ファイバー正面が0度、角度が大きくなるにつれて左側面、後面、右側面)、縦軸がそれぞれのディフューザーボールの縦または横方向に回転させたときにボールから出てくる光の波形の面積の値をリファレンス用のAPDに入射した光の波形の面積の値で割った値であるグラフを図3.14~3.17に示す。図3.14~3.17におけるバーは標準偏差を表す。

SK型ボールの縦方向に回転させた時はボールの背面の方から出てくる光量は極端に小さくなった。また、それぞれのボールの縦もしくは横方向に回転させたときのそれぞれの角度における波形の面積の500回以上分の平均値を各ボールの各回転角ごとの平均値と標準偏差および、その平均値に対する標準偏差の割合を表3.5に示す。

表 3.5: それぞれのボール・方向の光量のばらつき

測ったもの	平均値	標準偏差	(標準偏差/平均値)/%
ボール 5(直径 30 mm) 縦方向	1.40	0.477	34.2
ボール 5(直径 30 mm) 横方向	0.911	0.0632	6.94
SK 型ボール縦方向	81.0	98.5	122
SK 型ボール横方向	26.3	6.29	23.9

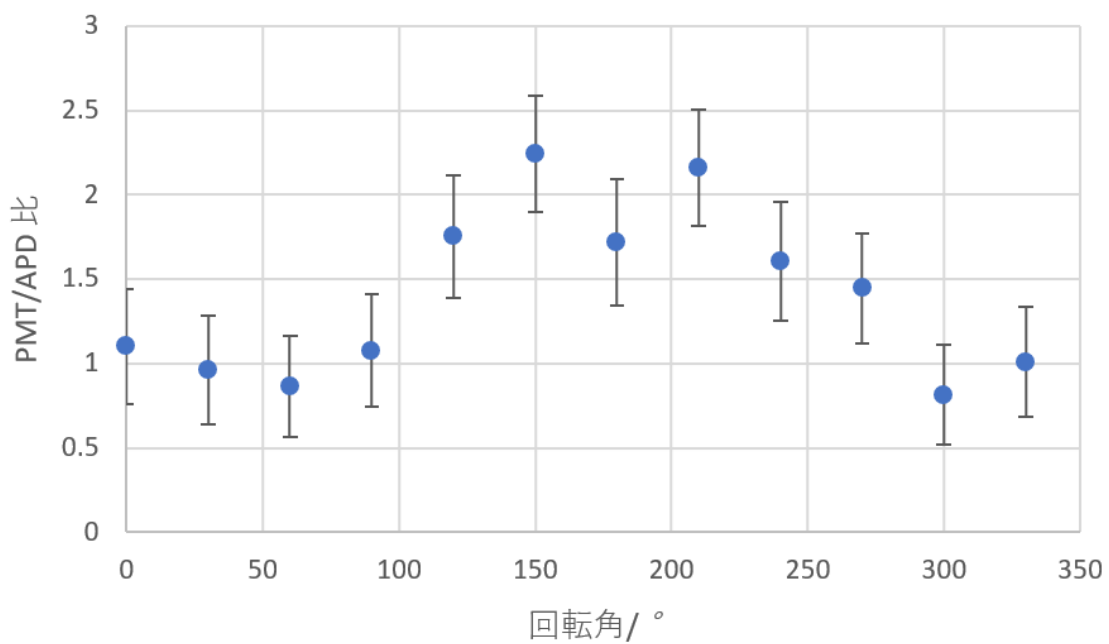


図 3.14: ボール 5(直径 30 mm) の縦方向等方性

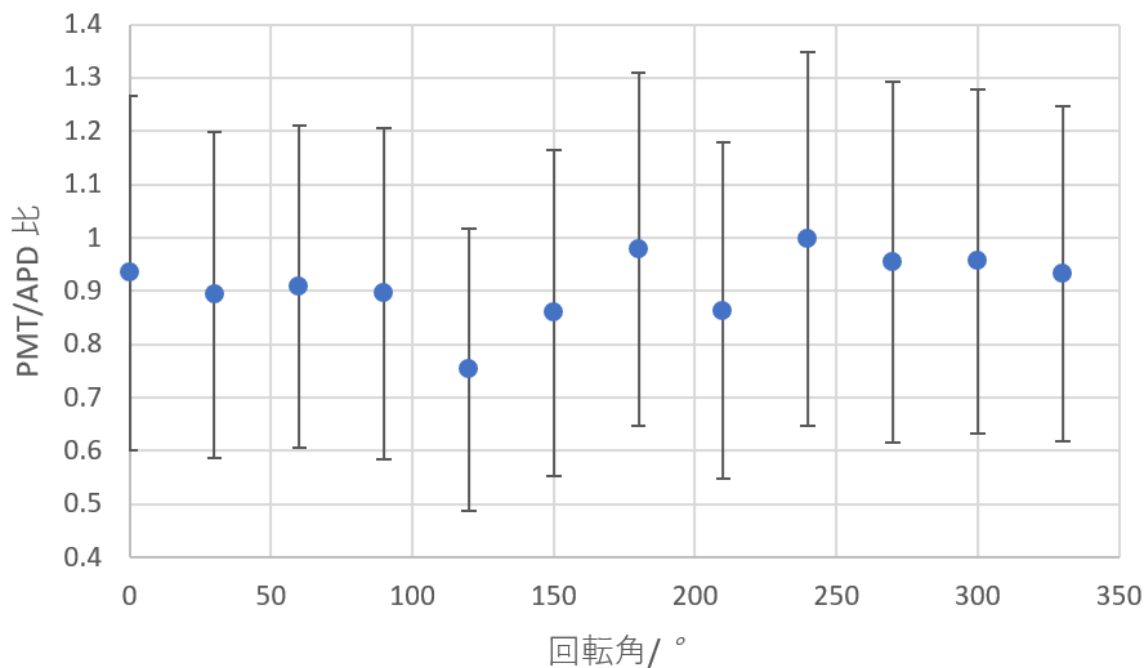


図 3.15: ボール 5(直径 30 mm) の横方向等方性

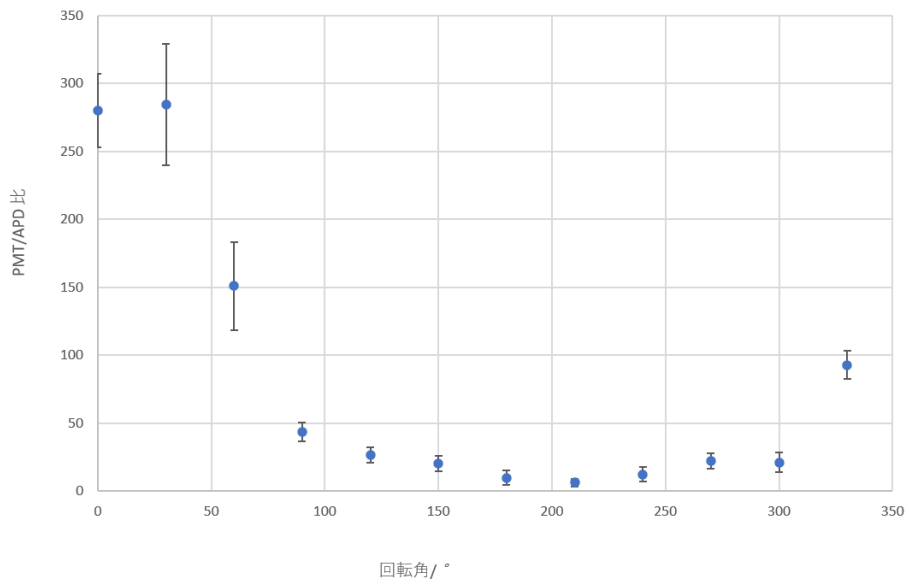


図 3.16: SK 型ボールの縦方向等方性

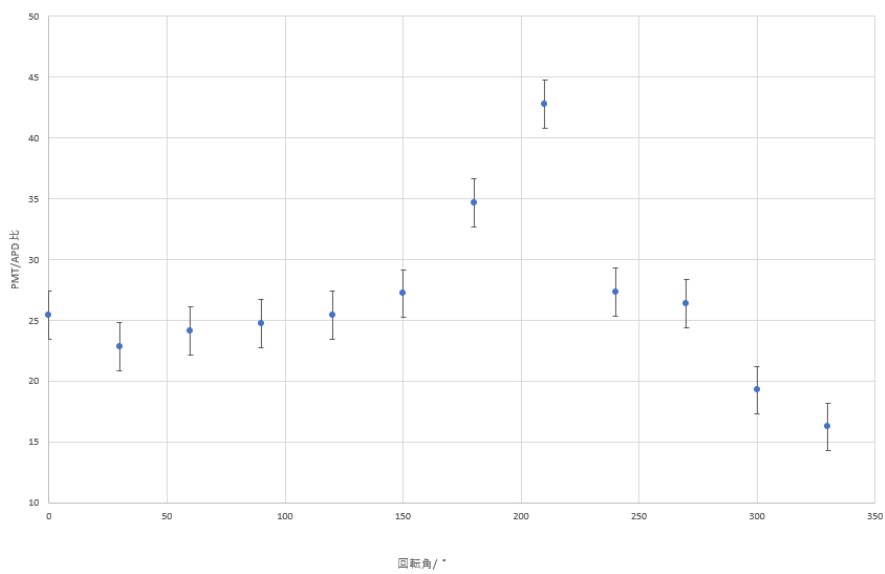


図 3.17: SK 型ボールの横方向等方性

3.4 ディフューザーボールによる光量減衰

ここでは、ディフューザーボールによってボールに入れた光がどの程度減衰されて出てくるかを調べた。ボール1~5(直径10 mm~30 mm)から拡散される光の光量を比べることでボールの大きさと光量減衰の関係や、ボール1~5(直径10 mm~30 mm)とSK型ボールから拡散される光の光量をを比べることによって濃度と光量減衰の関係を調べることを目的とした。

3.4.1 光量減衰測定の設定アップ

この測定の設定アップは図3.10に示したものと同じで、ただ回転台を回転させずに測定した。この実験では光検出器としてPMTを用いて測定し、ボールの中心からPMTの光電面までの距離は10.0 cmであった。また、ディフューザーボールから拡散される光がまっすぐPMTの絞りに届くようにボール1~3(直径10 mm~20 mm)のときはスペーサーを用いて回転台の高さを高くした。また、ボール4、5(直径25 mm、30 mm)のときはスペーサーを外して測定した。また、SK型ボールを測定するときはPMTの下に発砲スチロールを挟み、ボールに入れられたファイバーの高さとそろえた。

3.4.2 光量減衰測定の測定手法

ボール1~5(直径10 mm~30 mm)およびSK型ボールにファイバーを差し込み、ファイバー正面または側面から出てきた光の信号の波形の面積を測定した。レーザーの設定はいずれもパルス幅4000 psで電流値はそれぞれ表のようにして測定を行った。

表 3.6: 光量減衰測定におけるレーザーの電流値の設定

測定したボール	電流値/mA
ボール1(直径10 mm) 正面	98.0、150.0
ボール1(直径10 mm) 側面	150.0
ボール2(直径15 mm)	150.0
ボール3(直径20 mm)	150.0、199.0
ボール4(直径25 mm)	199.0
ボール5(直径30 mm)	199.0
SK型ボール正面	98.0
SK型ボール側面	150.0

それぞれのボールによってPMTで検出される信号波形の大きさが異なりレーザーの設定をすべて同じにするとボールによっては、信号波形が大きすぎてオシロスコープの画面からはみ出してしまったため、電流値のみを変えて測定した。電流値を変えて測定するときは1つのボールで2パターン電流値で測定した。

レーザーの光量比較の測定と同様にオシロスコープに表示された PMT とリファレンス用の APD の信号波形の面積を同時にデータを取ることを 500 回以上繰り返しその平均値及び標準偏差を記録した。

3.4.3 光量減衰測定の結果

まず、それぞれのボール正面または側面から出た光が PMT、もしくはリファレンス用の APD で検出された 500 回以上の波形の面積の大きさの平均値および標準偏差を表 3.7、表 3.8 に示す。

表 3.7: それぞれのボール・レーザー設定における波形の面積の大きさ (正面)

測ったボール	電流値/mA	PMT 波形面積/nWb	APD 波形面積/pWb
SK 型ボール	98.0	4.821 ± 0.364	12.76 ± 5.488
ボール 1(直径 10 mm)	98.0	0.6348 ± 0.1362	6.743 ± 3.819
ボール 1(直径 10 mm)	150.0	5.945 ± 0.4001	127.9 ± 6.7
ボール 2(直径 15 mm)	150.0	2.526 ± 0.255	143.9 ± 18.9
ボール 3(直径 20 mm)	150.0	1.026 ± 0.171	138.7 ± 12.3
ボール 3(直径 20 mm)	199.0	1.651 ± 0.211	224.8 ± 12.0
ボール 4(直径 25 mm)	199.0	0.7671 ± 0.0.1461	222.02 ± 19.44
ボール 5(直径 30 mm)	199.0	0.4352 ± 0.1718	213.29 ± 8.92

表 3.8: それぞれのボール・レーザー設定における波形の面積の大きさ (側面)

測ったボール	電流値/mA	PMT 波形面積/nWb	APD 波形面積/pWb
SK 型ボール	150.0	5.412 ± 0.368	120.9 ± 11.0
ボール 1(直径 10 mm)	150.0	4.526 ± 0.367	120.1 ± 6.2
ボール 2(直径 15 mm)	150.0	2.715 ± 0.260	129.5 ± 7.4
ボール 3(直径 20 mm)	150.0	1.257 ± 0.192	119.5 ± 7.6
ボール 3(直径 20 mm)	199.0	1.691 ± 0.113	223.0 ± 14.9
ボール 4(直径 25 mm)	199.0	0.7887 ± 0.1424	235.2 ± 12.2
ボール 5(直径 30 mm)	199.0	0.4064 ± 0.1131	219.3 ± 6.9

それぞれのボール正面または側面から出た光が PMT で検出された 500 回以上の波形の面積の大きさの平均値をリファレンス用の APD で検出された 500 回以上の波形の面積の大きさの平均値で割った。その値と標準偏差について、ボール正面から出た光については表 3.9、ボール側面から出た光については表 3.10 にまとめた。

また、10000 ppm のボールに関して、ボールから出る光の光量とボールの直径との関係を調べるために、表 3.9、3.10 において電流値を変えたボールで、APD の波形面積の大きさに

表 3.9: リファレンス用 APD 波形の大きさに対する PMT の信号波形の大きさ (正面)

測ったボール	電流値/mA	PMT 波形面積/APD 波形面積
SK 型ボール	98.0	377.9 ± 165.0
ボール 1(直径 10 mm)	98.0	94.14 ± 57.01
ボール 1(直径 10 mm)	150.0	46.47 ± 3.96
ボール 2(直径 15 mm)	150.0	17.56 ± 2.91
ボール 3(直径 20 mm)	150.0	7.398 ± 1.397
ボール 3(直径 20 mm)	199.0	7.347 ± 1.018
ボール 4(直径 25 mm)	199.0	3.455 ± 0.724
ボール 5(直径 30 mm)	199.0	2.040 ± 0.810

表 3.10: リファレンス用 APD 波形の大きさに対する PMT の信号波形の大きさ (側面)

測ったボール	電流値/mA	PMT 波形面積/APD 波形面積
SK 型ボール	150.0	44.78 ± 5.10
ボール 1(直径 10 mm)	150.0	37.68 ± 3.63
ボール 2(直径 15 mm)	150.0	20.97 ± 2.344
ボール 3(直径 20 mm)	150.0	10.51 ± 1.74
ボール 3(直径 20 mm)	199.0	7.582 ± 0.716
ボール 4(直径 25 mm)	199.0	3.354 ± 0.630
ボール 5(直径 30 mm)	199.0	1.852 ± 0.519

対する PMT の波形面積の大きさが 2 種類の電流値のときに同じになるようにし、ball1(直径 10 mm) における波形面積の大きさの比を 1 として他のボールにおける波形面積の大きさの比を補正した。その補正後の値はそれぞれ表 3.11、3.12 に示す。

表 3.11: 100000 ppm ボールの直径と補正後の面積の大きさの比 (正面)

測ったボール	補正後の PMT 波形面積/APD 波形面積
ボール 1(直径 10 mm)	1
ボール 2(直径 15 mm)	0.3778
ボール 3(直径 20 mm)	0.1592
ボール 4(直径 25 mm)	0.07487
ボール 5(直径 30 mm)	0.04421

表 3.12: 100000 ppm ボールの直径と補正後の面積の大きさの比 (側面)

測ったボール	補正後の PMT 波形面積/APD 波形面積
ボール 1(直径 10 mm)	1
ボール 2(直径 15 mm)	0.5564
ボール 3(直径 20 mm)	0.2790
ボール 4(直径 25 mm)	0.1234
ボール 5(直径 30 mm)	0.06816

この、表 3.11、3.12 をグラフで表したものを図 3.18、3.19 に示す。

ここで、強度が I_0 であった光が媒質中を距離 x mm だけ進んだときに媒質に光が吸収され、強度が I になったとすると、 I と I_0 の関係は減光係数 σ_e を用いて

$$I = I_0 e^{-\sigma_e x} \quad (3.1)$$

と表される。ファイバーから出された波長 405 nm の光がディフューザーボールによって吸収されたと考えて、(3.1) 式を用いてボールの直径とボールから出てくる光の光量の関係をフィットしたものが図 3.18、3.19 の実線である。正面から出てくる光と直径の関係は、 $y = 4.120e^{-0.157x}$ 、側面の方は、 $y = 4.185e^{-0.138x}$ であった。

3.5 ディフューザーボールによる時間分解能への影響

ここでは、ディフューザーボールによる光電子検出の時間分解能への影響がどれほどあるかを測定した。

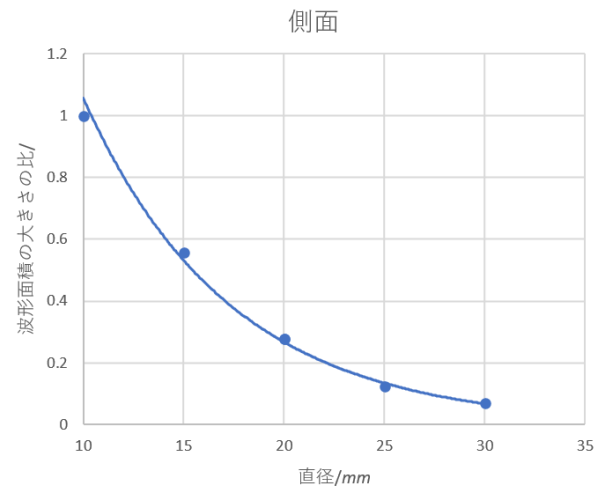
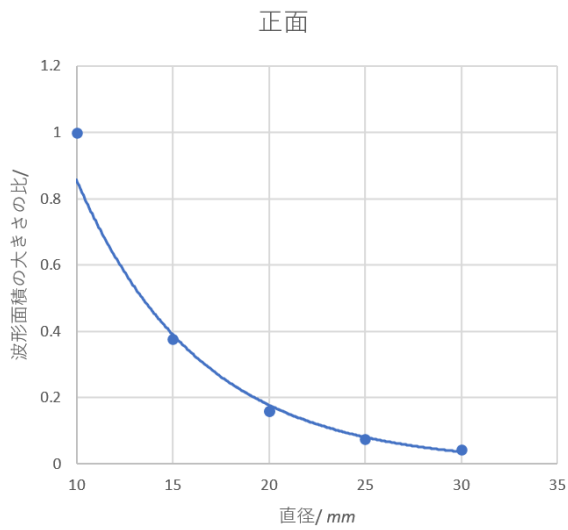


図 3.18: ボール側面から出る光の光量とボールの直径との関係

図 3.19: ボール側面から出る光の光量とボールの直径との関係

3.5.1 時間分解能への影響のセットアップ

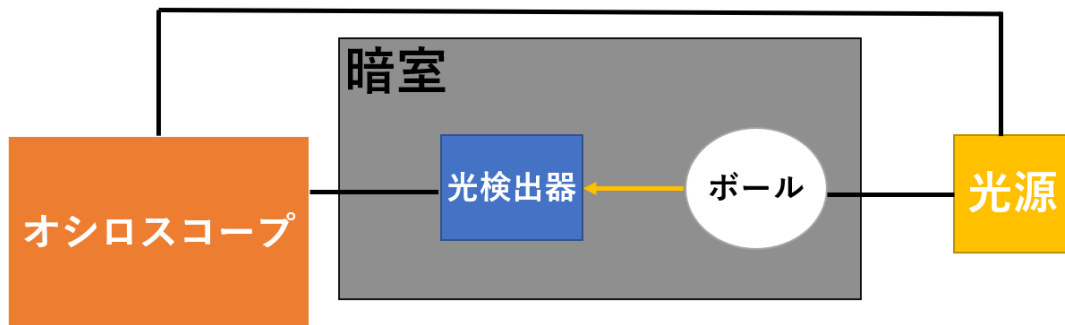


図 3.20: 時間分解能への影響測定のセットアップ

この測定の簡単なセットアップを図 3.20 に示す。この実験では光検出器として MPPC を用いた。

3.5.2 時間分解能への影響の測定手法

まず、PMT を使用してボール 1～5 およびディフューザーボールを使用しない状態で、ファイバー正面方向から拡散される光が検出される時間のばらつきを調べた。この時レーザーダイオードの設定はいずれもパルス幅は 300 ps で、ボールの大きさによってオシロスコープで 1 光電子が見えるような光量にするために電流の値を表 3.13 のように変えて測定をした。

表 3.13: ボール 1～5 およびボール不使用時の正面の時間分解能測定におけるレーザーの電流値

測ったもの	電流値/mA
ボール 1(直径 10 mm)	180.0
ボール 2(直径 15 mm)	199.0.0
ボール 3(直径 20 mm)	199.0
ボール 4(直径 25 mm)	199.0
ボール 5(直径 30 mm)	199.0
ボールなし	140.0

また、光検出器として MPPC を使用して SK 型ボール、100000 ppm の 5 種類の大きさのボールを空気中または水中でファイバーを差し込んでその時間分解能をそれぞれの状況で比較するため測定をした。また、ファイバーから出てくる光を空気中でのみ、直接 MPPC の受光面に照射した。それぞれレーザーの同期出力をトリガーにして閾値を超えた波形を 10000 回分記録した。オシロスコープでオフセットが加わった 1 光電子の波高が 10 mV 程度であったため、閾値は 6 mV で設定した。

3.5.3 時間分解能への影響の結果

ここでは記録した 10000 回分の波形がトリガーがかかってから閾値を超えるまでの時間をヒストグラムで表し、そのヒストグラムの広がりから時間分解能を評価した。MPPC で同時に検出した光電子数が異なると波形の大きさが変わり、検出時間のばらつきは変わる。本研究では、1 光電子で時間分解能を評価する。そのためには、10000 回分の波形から MPPC に 1 光電子のみが入った時のデータを選ぶ必要がある。100000 ppm のそれぞれの大きさのボール、SK 型ボール、ボールを使用しない時で、1 光電子を信号の波形の高さで評価したとき、ペDESTAL や 2 光電子と 1 光電子の分離がよく、波高の範囲を決めた。ここではボール 1(直径 10 mm) のデータを他の代表として扱い、説明する。閾値 6 mV を超えた波形の高さに対するイベント数は図 3.23 で表され、オシロスコープで見た時に 1 光電子の波高が 10 mV 程度で 10 mV と 20 mV、さらには 30 mV 周辺でもピークをむかえている。波高が 10 mV 周辺の波形をペDESTAL や 2 光電子の波形を含まないように、1 光電子の波高は 9 mV から 16 mV で

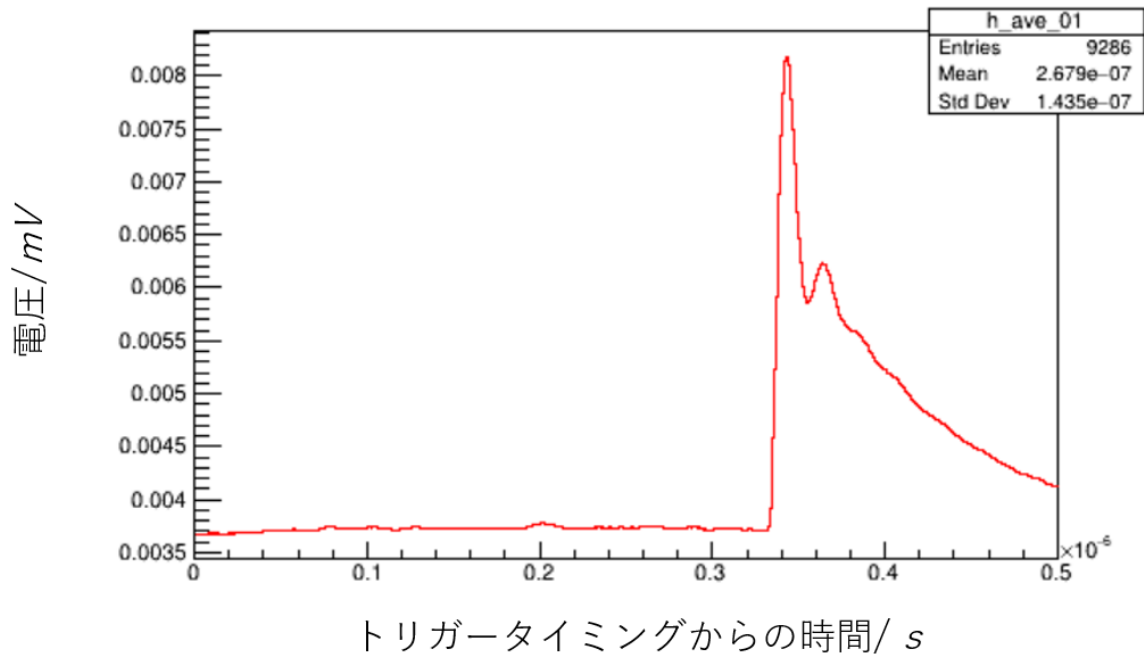


図 3.21: ボール 1(直径 10 mm) のトリガータイミングから閾値を超えた波形の平均

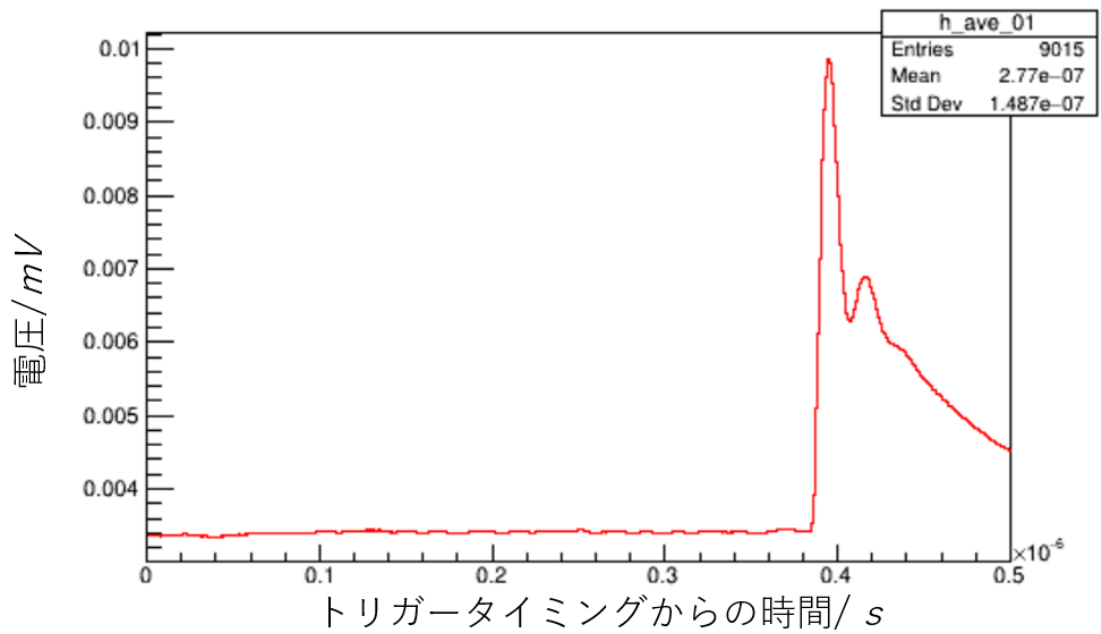


図 3.22: SK 型ボールのトリガータイミングから閾値 6 mV を超えた波形の平均

あるとした。

この波高の範囲(9 mV~16 mV)に含まれる波形が、トリガータイミングから閾値を超えるまでの時間をヒストグラムにした。この閾値を超えるまでの時間は100000 ppmのボール、ボールを使用しなかった時は図3.21の閾値を超えた信号の平均波形から340 ns付近で見た。SK型ボールについては図3.22に見られるように100000 ppmのボールと比べて50 ns程度遅かったので390 ns付近でトリガータイミングから閾値を超えるまでの時間をヒストグラムを見た。得られたヒストグラムは右側に広がっており、ガウス関数のみではフィットできなかったのでヒストグラムの左側をガウス関数で、右側を指数関数でフィットした。それぞれのボールの空気中または水中におけるヒストグラムおよび空気中でボールを使用しなかった時のヒストグラムとそれぞれのフィット結果を図3.24~図3.36に示す。

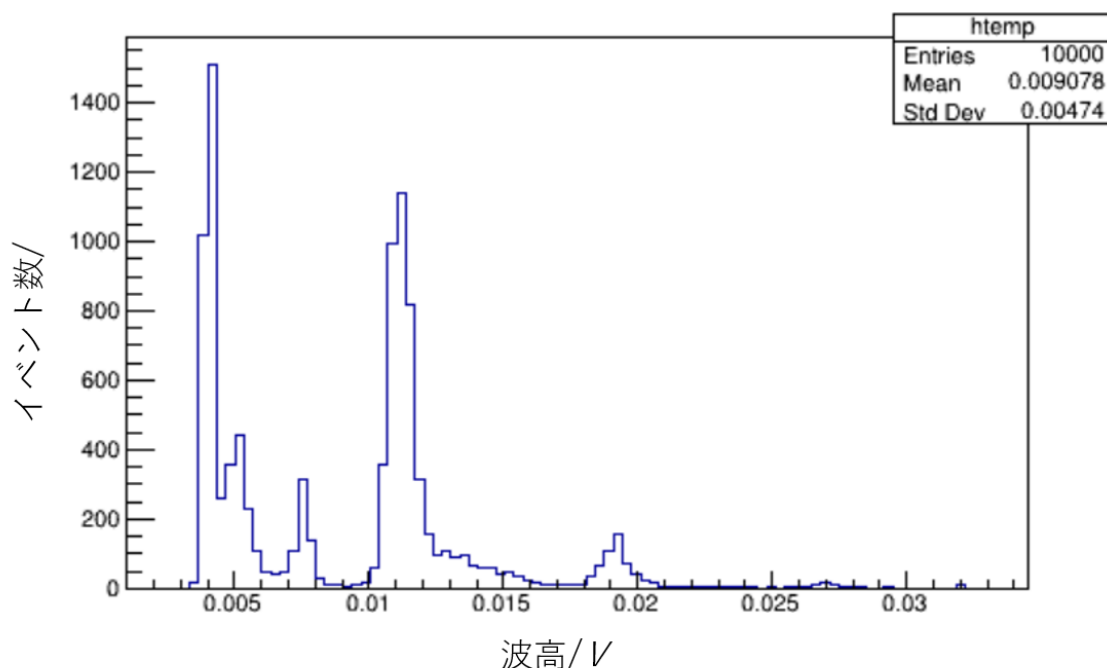


図 3.23: ball1 から拡散された光が MPPC で検出された時の波高

図 3.24~図 3.36 のようにそれぞれのディフューザーボールのトリガータイミングから信号が閾値を超えるまでの時間をイベント数ごとにヒストグラムにし、そのヒストグラムをそれぞれガウス関数と指数関数をつないでフィットすることによって、その半値全幅 (FWHM) を得ることができた。時間分解能をガウス関数の半値全幅 (FWHM) と幅 σ の比を使って半値全幅 (FWHM) の値を時間のばらつき σ で表した。その結果を表 3.14 にまとめる。また、表 3.14 における空気中で測定したときの各ボールの σ の値を σ_{tot} 、ボールを使用しなかった時の σ

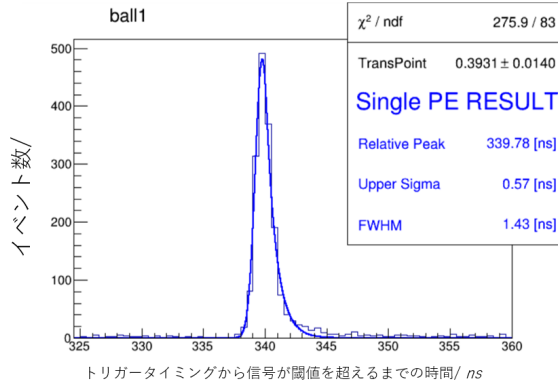


図 3.24: ボール 1(直径 10 mm) を空気中で測定

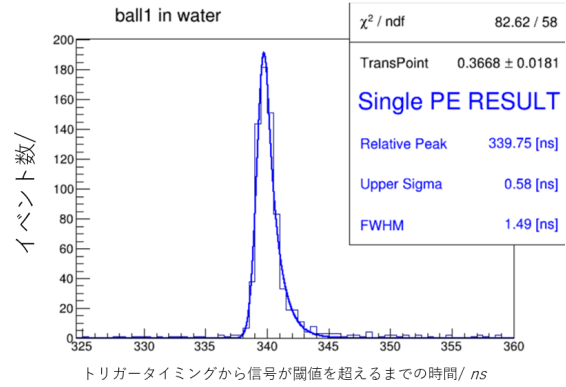


図 3.25: ボール 1(直径 10 mm) を水中で測定

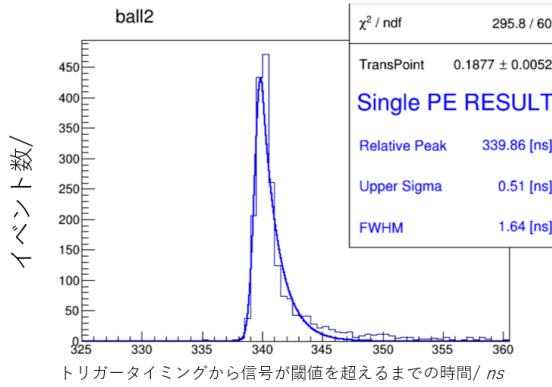


図 3.26: ボール 2(直径 15 mm) を空気中で測定

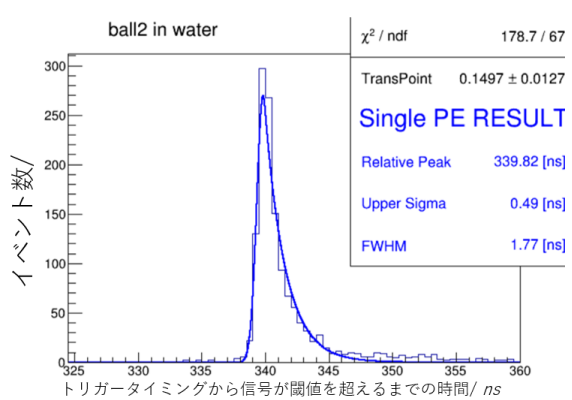


図 3.27: ボール 2(直径 15 mm) を水中で測定

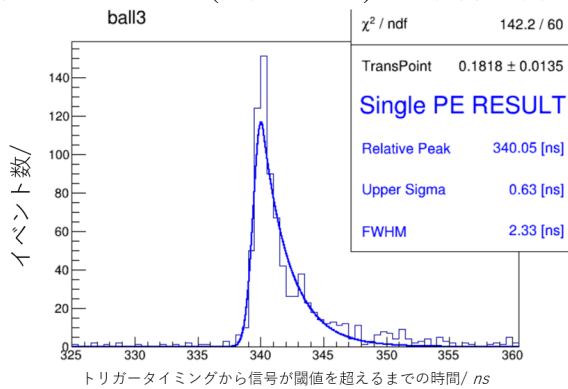


図 3.28: ボール 3(直径 20 mm) を空気中で測定

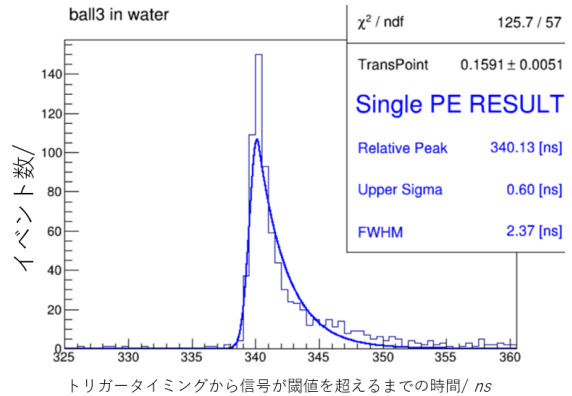


図 3.29: ボール 3(直径 20 mm) を水中で測定

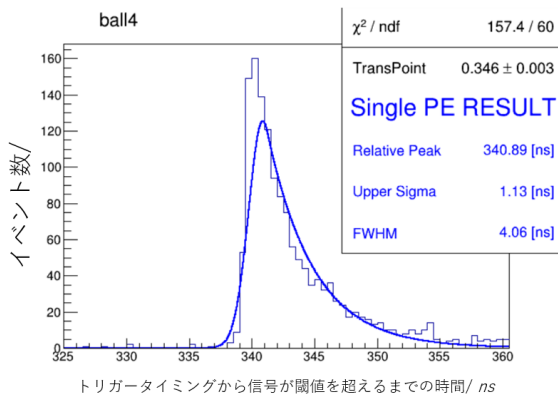


図 3.30: ボール 4(直径 25 mm) を空気中で測定

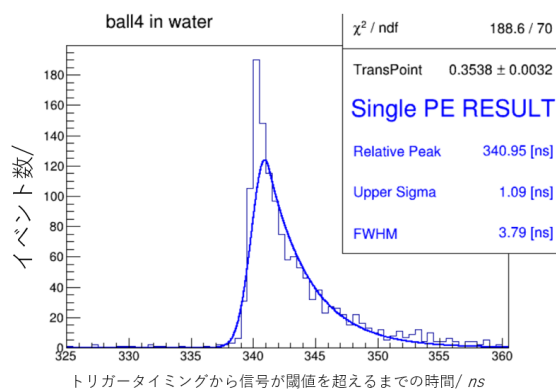


図 3.31: ボール 4(直径 25 mm) を水中で測定

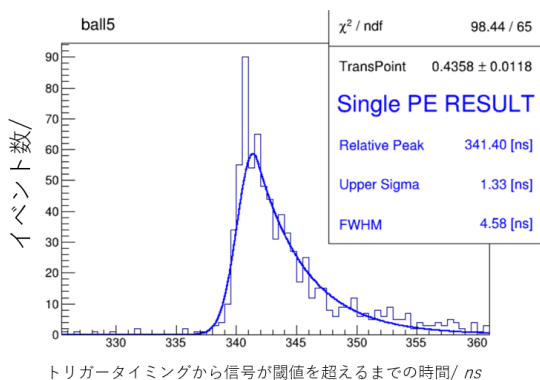


図 3.32: ボール 5(直径 30 mm) を空気中で測定

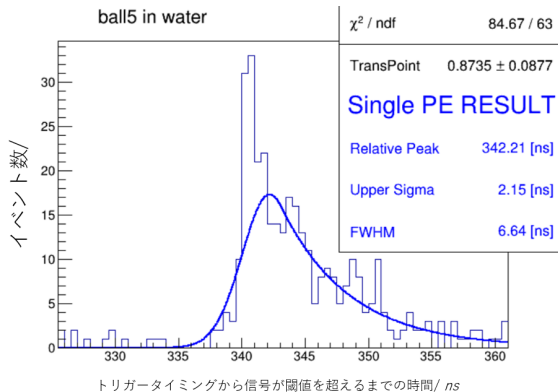


図 3.33: ボール 5(直径 30 mm) を水中で測定

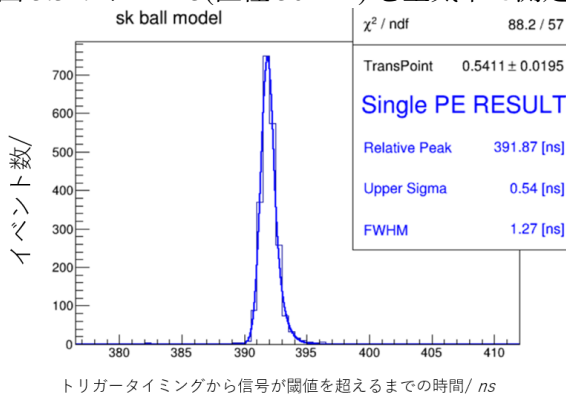


図 3.34: SK 型ボールを空気中で測定

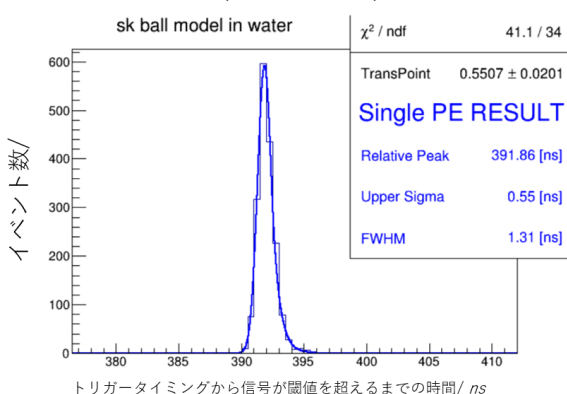


図 3.35: SK 型ボールを水中で測定

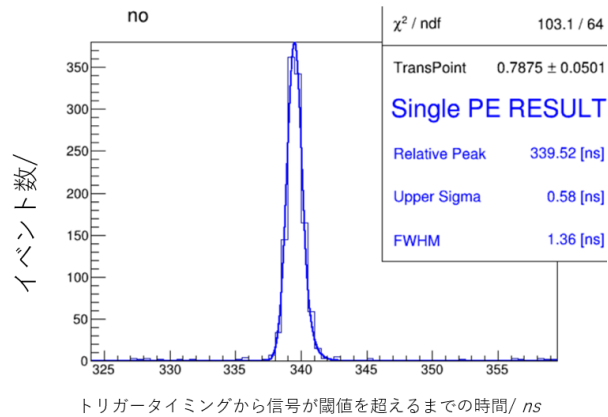


図 3.36: ファイバーからの光を空气中で直接測定

を σ_{others} として (1.19) 式に代入してディフューザーボールによる時間分解能への影響 σ_{ball} を求めた。その結果を表 3.15 に示す。

表 3.14: それぞれのボールの時間分解能

測ったもの	FWHM/ns(空气中)	σ /ns(空气中)	FWHM/ns(水中)	σ /ns(水中)
ボール 1(直径 10 mm)	1.43	0.607	1.49	0.633
ボール 2(直径 15 mm)	1.64	0.696	1.77	0.752
ボール 3(直径 20 mm)	2.33	0.989	2.37	1.01
ボール 4(直径 25 mm)	4.06	1.72	3.79	1.61
ボール 5(直径 30 mm)	4.58	1.94	6.58	2.79
SK 型ボール	1.27	0.540	1.31	0.556
ファイバー直接	1.36	0.578		

表 3.14、3.15 をもとに、空气中または水中で測定したときの、測定したディフューザーボールの体積 \times MgO 濃度を横軸に、トリガータイミングから信号が閾値を超えるまでの検出時間のばらつき σ を縦軸にしたグラフを図 3.37、3.38 に示す。

SK 型ボールの体積 \times MgO 濃度の計算は図 2.9 を参考にして算出した。図 3.37、3.38 のように 100000 ppm のディフューザーボールは濃度 \times 体積 (ボールの直径) の値が大きくなるにつれて検出時間のばらつき σ が大きくなっていき、目標値 0.5 ns より大きくなってしまっていた。SK 型ボールは 100000 ppm のボールと比べ検出時間のばらつき σ が小さく、時間分解能が 100000 ppm のボールより良くなった。空气中ではディフューザーボール内の光が外に出る際に全反射が起こりボール内の散乱長が大きくなり、水中で測定したときより時間分解能が悪くなると考えられる。しかし、表 3.14 では空气中と水中で測定したときで時間分解能に

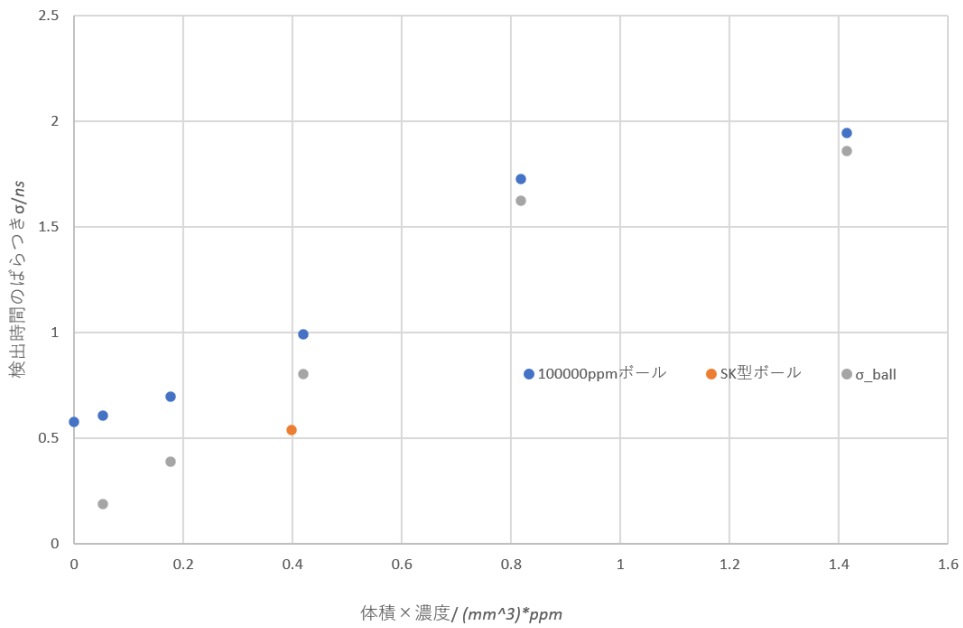


図 3.37: 空气中測定時のボールの体積× MgO 濃度に対するトリガータイミングから信号が閾値を超えるまでの検出時間のばらつき σ

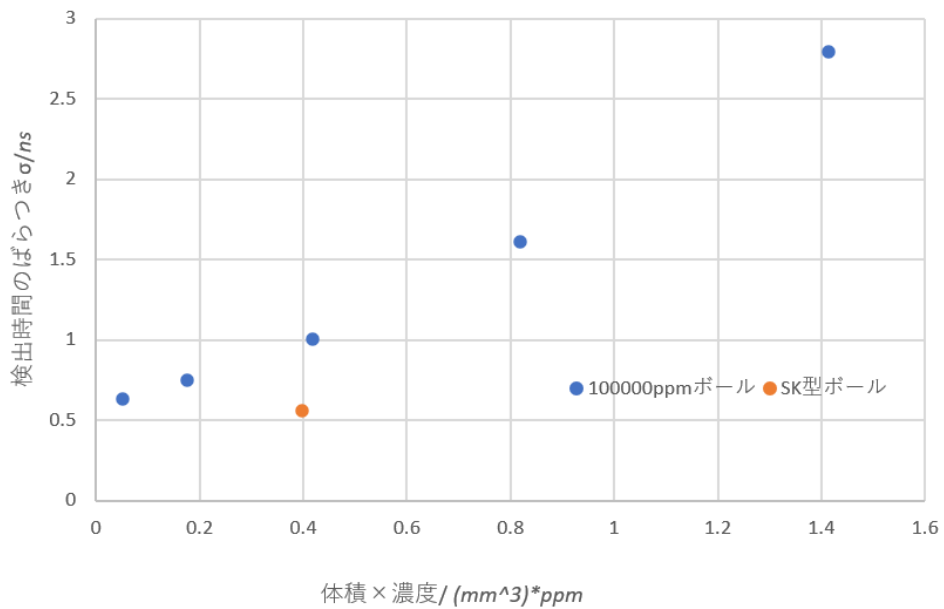


図 3.38: 空气中測定時のボールの体積× MgO 濃度に対するトリガータイミングから信号が閾値を超えるまでの時間の検出時間のばらつき σ

表 3.15: 空気中における 100000ppm のディフューザーボールによる時間分解能への影響

測ったボール	σ_{ball}/ ns
ボール 1(直径 10 mm)	0.188
ボール 2(直径 15 mm)	0.389
ボール 3(直径 20 mm)	0.803
ボール 4(直径 25 mm)	1.62
ボール 5(直径 30 mm)	1.86

大きな差はなかった。また、表 3.15 から、100000 ppm のディフューザーボールによる時間分解能の影響は、ボール 1(直径 10 mm)、ボール 2(直径 15 mm) のボールは目標値の 0.5 ns より小さくなった。

第4章 結論と今後の展望

本研究で、濃度 100000 ppm、直径がそれぞれ 10 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm のディフューザーボールと現在 SK で使用されているディフューザーと同じ型のボールの性能を次の3つの観点で評価するため測定した。

- ボールのどの方向にも一様な光量の光が出てくるかという等方性
- ディフューザーボールに光を入れることでボール外に出てくる光の光量がどれほど小さくなるかという光量の減衰率
- 光をボール内に入射して外に出てくる過程でどれほど時間のばらつきがあるかというディフューザーボールによる時間分解能への影響

まず、30度ごとに縦方向、横方向でボールを回転させて等方性の確認する測定をした。そして、各回転角で信号波形面積の大きさの平均値で標準偏差を割って各ボールの等方性を評価した。100000 ppm、直径 30 mm のボールでは、縦方向で 34.2 %、横方向で 6.94 %であった。また SK 型のボールでは縦方向 122 %、横方向 23.9 %となった。100000 ppm のボールは SK 型ボールより縦方向、横方向ともに光量のばらつきが 1/4 程度になった。

光量の減衰率に関しては、それぞれのボールで直径が大きくなるにつれて、指数関数で減衰率が大きくなることが分かった。また、今回測定した一番小さなボール 1(直径 10 mm) から出てくる光量は SK 型ボールから出てくる光の光量よりも減衰率が大きかった。

3点目に、ディフューザーボールによる時間分解能への影響であるが、濃度 100000 ppm のディフューザーボールではボールの直径が大きくなるにつれて時間分解能が悪くなり、直径が 10 mm、15 mm のボールのみ目標値の $\sigma = 0.5$ ns 以下となった。SK で使用されているディフューザーボールと同じ型のボールは、検出時間のばらつきが 0.540 ns でこのボールによって時間分解能が大きく悪くならないことが分かった。

これらの結果から、キャリブレーションをする際のディフューザーボールとして適切なボールを選ぶために、濃度は 100000 ppm より小さく、大きさについても再調整して新しいボールを作成し、その性能を評価したい。また、それらを実際 SK や HK で使用されている PMT を用いて 1 光電子をはじめ数光電子を検出する際の時間分解能を測定し、SK や HK でより精度の高い時間のキャリブレーションすることを目指したい。

謝辞

卒業研究を進める、および本論文を執筆するにあたり様々な方々に世話になりました。ささやかながら感謝の気持ちをこちらで申し上げさせていただきます。

まずは、指導教員である西村康宏先生に感謝を申し上げます。私が、実験器具の基本的な扱いや、実験解析をするための ROOT の使い方、さらには Linux の基本コマンドを丁寧に、また時には覚えきれなかったことも何回か質問した時も教えていただいたことに感謝を申し上げます。その他にも、実験に必要な器具を事前に用意していただいたり、スーパーカミオカンデでの実験にお忙しい中引率していただいたことに大変感謝しております。

また、西村研究室の先輩方に大変お世話になりました。前川雄音さんは実験器具の扱い方が全く分からなかった時から 1 から丁寧に教えていただいたことに加え、ノイズなどの影響により実験がうまく進んでいない時にいち早く気づいていただき、前川さんの方から助言をいただいて実験を潤滑に進めることができました。さらには、自身の修士論文の執筆にあたりお忙しい中私の実験指導のためにスーパーカミオカンデへ引率いただき、環境が慶應義塾大学での実験と異なりうまくいかないことが多い中、常に丁寧に助言及びご指導いただけただことに大変感謝しております。藤澤千緒里さんは、実験の基本的な扱いや概念を丁寧に教えていただいたことに加え、実験を進めていく中で感じた疑問を質問した際に、お忙しい中、丁寧にこちらの理解度に寄り添って教えていただけただことに大変感謝しております。さらには、同期の佐々木鳳杜君は、お互いに一番気軽に先生や先に教えていただいたことを共有でき、お互いの理解度を高めることができ感謝しております。

さらには、卒業論文を執筆するにあたり必要な実験するお時間や場所さらには実験器具を貸してかしていただいたスーパーカミオカンデに関わる方々に感謝申し上げます。特に、SK で使われているものと同型のディフューザーボールをお借りできたことでこのように本論文を執筆するのに必要な実験のデータをとることができました。

最後に、コロナ禍でイレギュラーなことが多い中、支えてくださった家族に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 林青司. 「ニュートリノ物理学」素粒子像の変革に向けて. サイエンス社, 2021年3月25日.
- [2] JEMIMA 一般社団法人日本電気計測器工業会. <https://www.jemima.or.jp/tech/6-02-01-02.html> (閲覧日:2021/12/29)
- [3] 浜松ホトニクス株式会社 編集委員会. 光電子増倍管-その基礎と応用- 第4版. 浜松ホトニクス株式会社, 2017年4月1日.
- [4] 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/> (閲覧日:2021/12/30)
- [5] ハイパーカミオカンデ <http://www.hyper-k.org/> (閲覧日:2021/12/31)
- [6] 浜松ホトニクス株式会社 光電子増倍管アッセンブリ <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/type/H3178-51/index.html> (閲覧日:2021/1/2)
- [7] 浜松ホトニクス株式会社 MPPC 技術資料 <https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/mppckapd9008j.pdf> (閲覧日: 2022/1/3)
- [8] 浜松ホトニクス株式会社 Si APD 技術資料 <https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/si-apdkapd9007j.pdf> (閲覧日: 2021/1/4)
- [9] M.MOri チェレンコフ放射 <http://www.ritsumeai.ac.jp/morim/cherenkov.html> (閲覧日: 2021/12/30)
- [10] 毎日を、ちょっと豊かにする情報を。 <http://blog.livedoor.jp/kingotp/archives/16061349.html> (閲覧日:2021/12/30)
- [11] 浜松ホトニクス株式会社 PMT について—光電子増倍管 (PMT) <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/pmt/aboutpmts/index.html> (閲覧日: 2022/1/2)
- [12] 浜松ホトニクス株式会社 光電子増倍管 R12860 <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/type/R12860/index> (閲覧日:2022/1/2)
- [13] 小林雄一. 長基線ニュートリノ実験に於けるキャリブレーションシステム. 1999年

- [14] A. Suzuki, M. Mori, K. Kaneyuki, T. Tanimori, J. Takeuchi, H. Kyushima, and Y. Ohashi. Improvement of 20 in. diameter photomultiplier tubes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Vol. 329(1993), No. 1, pp. 299 – 313
- [15] K. AbeY. HayatoT. IidaK. IyogiJ. KamedaY. KishimotoY. KoshioLI. MartiM. MiuraS. MoriyamaM. NakahataY. NakanoS. NakayamaY. ObayashiH. SekiyaM. ShiozawaY. SuzukiA. TakedaY. TakenagaH. TanakaT. TomuraK. UenoR.A. WendellT. YokozawaT.J. IrvineH. KajitaT. KajitaK. KaneyukiK.P. LeeY. NishimuraK. OkumuraT. McLachlanL. LabargaE. KearnsJ.L. RaafJ.L. StoneL.R. SulakS. BerkmanH.A. TanakaS. TobayamaM. GoldhaberK. BaysG. CarmignatiW.R. KroppS. MineA. RenshawM.B. SmyH.W. SobelK.S. GanezerJ. HillW.E. KeigJ.S. JangJ.Y. KimI.T. LimN. HongT. AkiriJ.B. AlbertA. HimmelK. ScholbergC.W. WalterT. WongjiradT. IshizukaS. TasakaJ.G. LearnedS. MatsunoS.N. SmithT. HasegawaT. IshidaT. IshiiT. KobayashiT. NakadairaK. NakamuraK. NishikawaY. OyamaK. SakashitaT. SekiguchiT. TsukamotoA.T. SuzukiY. TakeuchiK. HuangK. IekiM. IkedaT. KikawaH. KuboA. MinaminoA. MurakamiT. NakayaM. OtaniK. SuzukiS. TakahashiY. FukudaK. ChoiY. ItowG. MitsukaM. MiyakeP. MijakowskiR. TacikJ. HignightJ. ImberC.K. JungI. TaylorC. YanagisawaY. IdeharaH. IshinoA. KibayashiT. MoriM. SakudaR. YamaguchiT. YanoY. KunoS.B. KimB.S. YangH. OkazawaY. ChoiK. NishijimaM. KoshiyaY. TotsukaM. YokoyamaK. MartensM.R. VaginsJ.F. MartinP. de PerioA. KonakaM.J. WilkingS. ChenY. HengH. SuiZ. YangH. ZhangY. ZhenweiK. ConnollyM. DziombaR.J. Wilkes. Calibration of the Super-Kamiokande detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 737 (2014) 253- 272
- [16] Xia, Junjie. Upgrade and Calibration of Super-Kamiokande's Inner Photodetectors. Department of Physics Graduate School of Science, University of Tokyo. Master Thesis (2019)