

修士論文

水-ニュートリノ反応の精密測定に向けた
水ベース液体シンチレータ飛跡検出器の開発

京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻
物理学第二分野 高エネルギー物理学研究室

恩田 直人

2024年2月26日

概要

ニュートリノ振動は、素粒子物理学における標準理論を超えた現象の1つであり、この現象を精密に測定することが、この宇宙の物理への理解を深める上で重要である。宇宙における物質と反物質の非対称性は、物理学における長年の未解決問題の1つであるが、レプトンにおけるCP対称性の破れはこの問題を解決する有力な候補であり、ニュートリノ振動実験で複素位相 δ_{CP} を測定することで検証することができる。

ハイパーカミオカンデ検出器は、岐阜県飛騨市神岡町の地下に建設中であり、2027年から稼働予定の次世代の大型水チェレンコフ検出器である。この検出器を用いたハイパーカミオカンデ実験の1つに、茨城県東海村のJ-PARCで生成されるニュートリノビームを用いた長基線ニュートリノ振動実験がある。ハイパーカミオカンデ実験では、CP対称性の破れを示す $\sin\delta_{CP} \neq 0$ の発見を物理目標の一つに掲げており、感度を最大限に高めるために系統誤差の削減が重要である。特にハイパーカミオカンデ検出器と同じ水を標的としたニュートリノ反応の精密測定による削減が必要とされている。そのため、現行の前置検出器に加えて新たな水標的の前置検出器の導入が検討されている。

水ベース液体シンチレータ(WbLS)は、水に界面活性剤を用いて液体シンチレータを溶かした液体である。水を含みながらシンチレーション光を観測できることから、水をニュートリノ標的としながら不感領域の少ない検出器として利用可能であり、新前置検出器の候補として開発を進めている。WbLS検出器は、反射材によって区切られた一辺1cmの立方体のセルにWbLSが封入された構造をしており、シンチレーション光は3方向から波長変換ファイバにより読みだされ、その一端で光検出器によって検出される。

まず初めに、 $4 \times 4 \times 5 = 80$ セルからなるWbLS検出器の小型試作機を作製し、陽電子ビームを用いた試験を行なった。その結果、WbLSを用いた検出器として荷電粒子の飛跡を初めて捉え、飛跡検出器として使用可能であることを示した。ただし、その検出光量は低く、前置検出器として使用するには荷電粒子の検出効率が十分ではないことが判明した。

そこで、WbLS検出器の各要素について、検出光量が向上する可能性があるか検討を行った。WbLSの発光量の増大と反射材の反射率上昇が検出光量の向上に大きく寄与することを試算し、本研究のWbLS検出器開発における指針とした。

まずWbLSの発光量の増大を目指し、効率よく液体シンチレータを溶かすことのできる界面活性剤の選定を行った。次に選定した界面活性剤を用いてWbLSを作製し、宇宙線を用いてその光量を測定した。その結果、水の割合の低下を抑えながらビームテスト時のWbLSと比較して約1.78倍の検出光量を達成した。

その後反射材の反射率向上を目標に、3種類の白色系樹脂を用いて3Dプリンタによって小型のセル状容器を作製し、宇宙線を用いて光量を測定した。最も検出光量の大きかった樹脂でもビームテストと同じ反射材を用いたセルと同程度の検出光量であり、本研究では反射材の改良を行うことができなかった。ただし、シミュレーションとの比較の結果1番反射率高い素材は85%であり、改善の余地があることを示した。

最後に本研究で増加した検出光量をもつWbLS検出器が前置検出器として使用可能であるか評価を行った。その結果、低運動量の陽子と π^+ 粒子に対する粒子識別能力は、陽子の検出率96%以上、その時の π^+ 粒子の排除率92.5%以上となった。また、最小電離粒子に対するファイバ1本の検出効率は89%以上であった。本研究において開発したWbLS検出器では、検出器の全体で高い粒子識別能力・飛跡検出効率を持っているとはいえ、さらに2倍程度の検出光量の増加が必要であることを示した。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	ニュートリノとニュートリノ振動	1
1.1.1	ニュートリノとは	1
1.1.2	ニュートリノ振動	1
1.1.3	物質効果	3
1.1.4	ニュートリノ振動のこれまでの測定結果	4
1.1.5	ニュートリノ振動に関する未解決問題	6
1.1.6	ニュートリノと物質の相互作用	7
1.2	T2K 実験	9
1.2.1	実験概要	9
1.2.2	ニュートリノビームの生成	10
1.2.3	前置検出器群	10
1.2.4	後置検出器 スーパーカミオカンデ検出器	15
1.2.5	T2K 実験のニュートリノ振動パラメータ測定の最新結果	16
1.2.6	T2K 実験の今後の計画	17
1.3	ハイパーカミオカンデ実験	18
1.3.1	HK 実験におけるニュートリノ振動測定	18
1.3.2	期待される感度と課題	19
第 2 章	水ベース液体シンチレータを用いた前置検出器	22
2.1	検出器の概要	22
2.1.1	水を標的とする前置検出器の必要性	22
2.1.2	水ベース液体シンチレータを用いた前置検出器のデザイン	22
2.2	水ベース液体シンチレータ (WbLS)	23
2.2.1	液体シンチレータ	24
2.2.2	界面活性剤	25
2.2.3	WbLS の作製手法	26
2.3	反射材	26
2.4	波長変換ファイバ	27
2.5	MPPC	28
2.5.1	MPPC の動作原理	28
2.5.2	MPPC の特性	29

2.6	これまでの検出器開発における課題点	30
第3章	WbLS 検出器の試作機を用いたビームテスト	32
3.1	ビームテストの概要	32
3.1.1	目的	32
3.1.2	テストビームライン	32
3.1.3	検出器のセットアップ	33
3.1.4	トリガー・データ取得	37
3.2	WbLS 試作機のデータの解析手法	38
3.2.1	MPPC のキャリブレーション	38
3.2.2	ホドスコープによるイベント選択	38
3.2.3	各データセットの検出光量の計算	39
3.3	ビームテストの結果	40
3.3.1	WbLS 試作機での飛跡	40
3.3.2	WbLS 試作機の検出光量	41
3.3.3	セル内での検出光量の一様性	45
3.4	WbLS 検出器の前置検出器としての使用可能性の評価	48
3.5	章のまとめ	49
第4章	WbLS 検出器の検出光量向上可能性の評価	50
4.1	WbLS の発光量	50
4.2	セル内の光収率	53
4.2.1	反射材の反射率の影響	54
4.2.2	吸収長の影響	57
4.2.3	レイリー散乱長の影響	60
4.2.4	セル内のファイバの位置による影響	60
4.3	WLS ファイバの光収率	64
4.4	MPPC での光検出確率	64
4.5	章のまとめ	65
第5章	WbLS の発光量増大に関する測定	67
5.1	液体シンチレータを効率的に溶かす界面活性剤の選定	67
5.1.1	目的	67
5.1.2	非イオン界面活性剤の可溶化量の温度特性	68
5.1.3	温度特性の測定の概要	69
5.1.4	測定結果と考察	70
5.2	PMT を用いた WbLS の光量測定	74
5.2.1	測定の目的	74
5.2.2	測定手法	74
5.2.3	解析手法	76
5.2.4	測定結果	78

5.2.5	測定の有効性の確認	78
5.2.6	節のまとめと考察	81
5.3	WbLS セルでの光量測定	82
5.3.1	測定の目的	82
5.3.2	測定手法	82
5.3.3	解析手法	86
5.3.4	測定結果	88
5.3.5	節のまとめと考察	90
5.4	章のまとめ	91
第 6 章	WbLS 検出器の反射材の探索	93
6.1	反射材の素材を変えた WbLS セルでの光量測定	93
6.1.1	測定の目的	93
6.1.2	測定準備: 各素材の薬品耐性の試験	93
6.1.3	測定手法	94
6.1.4	解析手法	96
6.1.5	測定結果	96
6.2	Geant4 シミュレーションによる反射材の反射率の評価	97
6.2.1	目的	97
6.2.2	Geant4 を用いたシミュレーション	98
6.2.3	各素材の反射率の評価	99
6.3	シミュレーションを用いた WbLS 検出器における検出光量の評価	100
6.3.1	目的	100
6.3.2	解析手法	100
6.3.3	WbLS 検出器のセルでの検出光量	102
6.3.4	ビームテストの結果との比較	103
6.4	反射材の改善による WbLS 検出器の検出光量の向上量の評価	103
6.4.1	目的	103
6.4.2	測定手法・解析	104
6.4.3	測定結果	104
6.5	検出光量の増加量に対する考察	105
6.5.1	クロストークが検出光量に与える影響	106
6.6	章のまとめ	106
第 7 章	WbLS 検出器の前置検出器としての使用可能性の検討	108
7.1	WbLS 検出器のエネルギー・ファイバあたりの検出光量	108
7.1.1	改良したセットアップを用いた WbLS セルでの光量測定	108
7.1.2	WbLS 検出器における検出光量の算出	109
7.2	低運動量粒子の粒子識別	109
7.2.1	目的	109

7.2.2	シミュレーションのセットアップ	110
7.2.3	解析手順	111
7.2.4	粒子識別能力の評価	112
7.3	最小電離粒子に対する飛跡検出効率の評価	115
7.3.1	目的	115
7.3.2	ファイバ1本での検出効率	115
7.4	章のまとめ	116
第8章	今後の展望	118
第9章	結論	120
	謝辞	121
	参考文献	122
付録A	Geant4を用いたWbLS検出器におけるWLSファイバとMPPCのシミュレーション	125
A.1	WLSファイバのシミュレーション	125
A.1.1	捕獲率について	125
A.1.2	生存率について	126
A.1.3	脱出率について	128
A.1.4	WLSファイバのシミュレーションのまとめ	129
A.2	MPPCのシミュレーション	130
A.2.1	MPPCの光検出効率(PDE)とダイナミックレンジについて	130
A.2.2	到達率について	130
A.2.3	ファイバ端との距離とダイナミックレンジについて	131

第 1 章

序論

この章では、まず 1.1 節で、本研究で開発する検出器が測定対象とする物理現象であるニュートリノ振動について述べる。次に、検出器の導入を目指しているハイパーカミオカンデ実験について述べる。ただし、まず 1.2 節においてその前身である現在日本で行われているニュートリノ振動実験である T2K 実験について説明し、その後 1.3 節でハイパーカミオカンデ実験について述べる。

1.1 ニュートリノとニュートリノ振動

1.1.1 ニュートリノとは

ニュートリノは標準理論に含まれる粒子であり、電荷とカラー荷を持たないレプトンである。標準理論に含まれている 3 つの相互作用のうち強い相互作用と電磁相互作用が働かず、弱い相互作用のみで他の粒子と相互作用を行う。

ニュートリノは 1930 年、ベータ崩壊におけるエネルギー保存則、角運動量保存則を成り立つようにするためにパウリによって提唱された^[1]。1956 年ライネスとカワンらによる原子炉から発生する反電子ニュートリノを用いた実験によって、ニュートリノが初めて発見された^[2]。その後、1962 年にレーダーマンらによってミューニュートリノ^[3]、2000 年に DONUT コラボレーションによりタウニュートリノが発見され^[4]、荷電レプトンの 3 世代 (e, μ, τ) にそれぞれ対応するニュートリノ (ν_e, ν_μ, ν_τ) が存在することが明らかになっている。

弱い相互作用は最大限にパリティを破っていて左 (右) 巻きの粒子 (反粒子) にのみ働くため、左巻きのニュートリノ (右巻きの反ニュートリノ) しか観測されていない。右巻きのニュートリノは観測されていないため、標準模型には組み込まれたおらず、ニュートリノには左巻きと右巻き粒子によって構成される質量項が存在していなかった。しかし、1998 年にスーパーミオカカンデ (SK) 実験によってニュートリノ振動という現象が発見され、ニュートリノにもゼロではない有限の質量があることが判明した^[5]。これは標準理論には含まれていない現象であり、標準理論に対して何かしらの修正が必要であることを示している。

1.1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動は、ニュートリノの質量固有状態 $\{\nu_1, \nu_2, \nu_3\}$ と弱い相互作用の固有状態 (フレーバー固有状態) $\{\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau\}$ が混合していることで起こる。ニュートリノ混合は、 3×3 のユニタリ行列によって、

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{PMNS} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

のように表される。反ニュートリノの場合はユニタリ行列の複素共役 U_{PMNS}^* を用いて以下のように表される。

$$\begin{pmatrix} \bar{\nu}_e \\ \bar{\nu}_\mu \\ \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix} = U_{PMNS}^* \cdot \begin{pmatrix} \bar{\nu}_1 \\ \bar{\nu}_2 \\ \bar{\nu}_3 \end{pmatrix}$$

このユニタリ行列は、ニュートリノ振動^{*1}を予想したポンテコルボ、2世代 (e, μ) 間のニュートリノ混合を導入した牧、中川、坂田の頭文字をとって PMNS 混合行列と呼ばれる [6],[7]。PMNS 行列は一般に3つの混合角 $\{\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}\}$ と複素位相角 δ_{CP} によって、次のようにパラメータ化される。

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

$$\begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{CP}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix}$$

ここで $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ である。この複素位相角 δ_{CP} が0または π でない場合 PMNS 行列に複素数の成分があることになり、ニュートリノと、混合行列として複素共役を用いる反ニュートリノとの間で混合に違いが生まれ、物質と反物質である CP 対称性の破れにつながる。

次にニュートリノの質量固有状態の時間発展について考える。質量固有状態 $\{\nu_1, \nu_2, \nu_3\}$ に対応する質量をそれぞれ $\{m_1, m_2, m_3\}$ とする。運動量 \vec{p} を持つ質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$) の時刻 $t_0 = 0$ から t への時間発展は、ディラック方程式の平面波解を考えると、

$$|\nu_i(t, \vec{p})\rangle = e^{-i(\sqrt{|\vec{p}|^2 + m_i^2}t - \vec{p} \cdot \vec{x})} |\nu_i\rangle \quad (1.2)$$

となる。ここで、本論文では $\hbar = 1, c = 1$ とする自然単位形を用いている。ニュートリノの質量が運動量と比較して十分小さいとすると、 $E \simeq |\vec{p}|$, $\sqrt{|\vec{p}|^2 + m_i^2} \simeq |\vec{p}| + \frac{m_i^2}{2E}$ と近似できる。また同様にして、ニュートリノの速度は光速 c と近似され、 $t \simeq L$ となる。結局、ニュートリノの質量固有状態が距離 L 飛行した後の状態は、

$$|\nu_i(L, E)\rangle \simeq e^{-i(|\vec{p}|L + \frac{m_i^2 L}{2E} - |\vec{p}|L)} |\nu_i\rangle = e^{-i\frac{m_i^2 L}{2E}} |\nu_i\rangle \quad (1.3)$$

となる。よって $L = 0$ においてフレーバー固有状態 ν_a ($a = e, \mu, \tau$) であった状態が、距離 L 移動した後の状態は、

$$\begin{aligned} |\nu_a(L, E)\rangle &= \sum_i U_{ai}^* |\nu_i(L, E)\rangle \\ &= \sum_i U_{ai}^* e^{-i\frac{m_i^2 L}{2E}} |\nu_i\rangle \end{aligned} \quad (1.4)$$

^{*1} ただし、1957年にポンテコルボが予想したニュートリノ振動は、ニュートリノが飛行中にフレーバーを変えるニュートリノ振動ではなく、ニュートリノと反ニュートリノ間の振動であった。

と近似される。よってフレーバー固有状態 ν_a が距離 L 移動した後にフレーバー固有状態 $\nu_b (b = e, \mu, \tau)$ で観測される確率を計算すると、

$$\begin{aligned}
P_{\nu_a \rightarrow \nu_b}(L, E) &= |\langle \nu_b | \nu_a(L, E) \rangle|^2 \\
&= \left| \sum_{i,j} U_{bj} U_{ai}^* e^{-i \frac{m_i^2 L}{2E}} \langle \nu_j | \nu_i \rangle \right|^2 \\
&= \left| \sum_i U_{bi} U_{ai}^* e^{-i \frac{m_i^2 L}{2E}} \right|^2 \\
&= \sum_{i,k} U_{bi} U_{ai}^* U_{bk}^* U_{ak} e^{-i \frac{(m_i^2 - m_k^2)L}{2E}} \\
&= \sum_{i=k} U_{bi} U_{ai}^* U_{bk}^* U_{ak} + \sum_{i>k} \{ U_{bi} U_{ai}^* U_{bk}^* U_{ak} e^{-i \frac{(m_i^2 - m_k^2)L}{2E}} + (U_{bi} U_{ai}^* U_{bk}^* U_{ak} e^{-i \frac{(m_k^2 - m_i^2)L}{2E}})^* \} \\
&= \sum_i U_{bi} U_{ai}^* \sum_k U_{bk}^* U_{ak} - \sum_{i>k} \{ U_{ai} U_{ai}^* U_{bk}^* U_{ak} + (U_{bi} U_{ai}^* U_{bk}^* U_{ak})^* \} \\
&\quad + 2 \sum_{i>k} \text{Re}[U_{bi} U_{ai}^* U_{bk}^* U_{ak}] \cos \frac{\Delta m_{ik}^2 L}{2E} + 2 \sum_{i>k} \text{Im}[U_{bi} U_{ai}^* U_{bk}^* U_{ak}] \sin \frac{\Delta m_{ik}^2 L}{2E} \\
&= \delta_{a,b} - 2 \sum_{i>k} \text{Re}[U_{bi} U_{ai}^* U_{bk}^* U_{ak}] + 2 \sum_{i>k} \text{Re}[U_{bi} U_{ai}^* U_{bk}^* U_{ak}] (1 - 2 \sin^2 \frac{\Delta m_{ik}^2 L}{4E}) \\
&\quad + 2 \sum_{i>k} \text{Im}[U_{bi} U_{ai}^* U_{bk}^* U_{ak}] \sin \frac{\Delta m_{ik}^2 L}{2E} \\
&= \delta_{a,b} - 4 \sum_{i>k} \text{Re}[U_{bi} U_{ai}^* U_{bk}^* U_{ak}] \sin^2 \frac{\Delta m_{ik}^2 L}{4E} + 2 \sum_{i>k} \text{Im}[U_{bi} U_{ai}^* U_{bk}^* U_{ak}] \sin \frac{\Delta m_{ik}^2 L}{2E} \quad (1.5)
\end{aligned}$$

と表される。ここで、ニュートリノの二乗質量差 $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ を導入した。式 1.5 より、ニュートリノ質量固有状態の質量の差が 0 (ニュートリノ質量が 0 も含む) の場合、もしくは PMNS 行列の非対角成分が 0 でないかぎり、あるフレーバー固有状態 ν_a は距離 L 飛行した後に別のフレーバー固有状態 $\nu_b (a \neq b)$ として観測されることが分かる。これがニュートリノ振動である。反ニュートリノの振動確率を計算する場合は、PMNS 行列の複素共役を取るのであったから式 1.5 第 3 項のみ符号が反転する。もしくは、反ニュートリノへの変換は、CP 変換に対応するので、CPT の変換で物理は変わらない CPT 不変性を仮定すると、 $t \rightarrow -t$ つまり $L \rightarrow -L$ を考え、第 3 項のみ符号が反転すると考えても良い。

1.1.3 物質効果

今までは、真空中を飛行する自由なニュートリノの振動について考えてきた。しかし、実際にはニュートリノは非真空中を通過する際に周囲の物質による影響を受け、ニュートリノ振動にも変化が生まれる。この効果のことを物質効果と呼ぶ。この効果は 1978 年にウォルフエンシュタインによって定式化され、1985 年には、ミケイェフとスミルノフによって太陽ニュートリノではこの効果の共鳴によって大きな振動が起こっている可能性があることが示された [8], [9]。物質効果はこの 3 人の頭文字をとって MSW 効果と呼ばれることもある。図 1.1 のようにニュートリノと物質との相互作用うち、中性カレントによって引き起こされるものは全フレーバーにおいて対象であるため振動に大きな影響を与えないが、荷電カレント相互作用では、電子ニュートリノのみが電子と散乱を起こす。そのため物質中では電子ニュートリノのみポテンシャル

$$a = \sqrt{2} G_F n_e$$

の寄与があることになる。ただし、 G_F はフェルミ結合定数、 n_e は物質中の電子数密度である。真空中のニュートリノ振動では、 Δm_{ik}^2 は、式 1.5 の第 2 項では常に $\sin^2 \Delta m_{ik}^2$ の形で表れる。また、第 3 項による振動確率への寄与は小さいため、その符号を決定することができていない。物質効果を考慮したニュートリノ振動確率は非常に複雑なためこの論文において導くことはしないが、物質効果によりニュートリノ振動の位相がずれ、振動確率に $\sin \Delta m_{ik}^2$ の項が測定可能な大ききで現れるため、ニュートリノ振動測定で Δm_{ik}^2 の符号を決定するために重要な効果である。

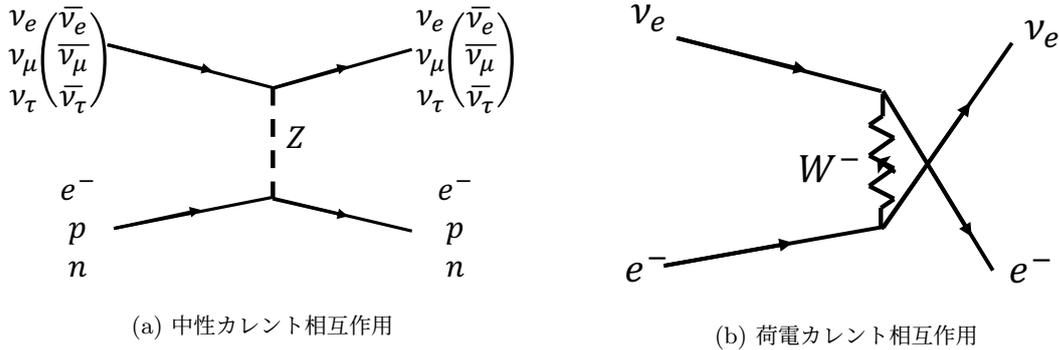


図 1.1: ニュートリノ振動と物質を構成する粒子間相互作用のダイアグラム

1.1.4 ニュートリノ振動のこれまでの測定結果

ニュートリノ振動は、1998 年にスーパーカミオカンデ (SK) による大気ニュートリノの観測によって発見された [5]。図 1.2 は、SK で観測された大気ニュートリノイベントの天頂角分布分布を示している。斜線で示された予測事象数に比べて、特に $\cos \theta < 0$ の地球の裏側から貫通してくるようなミューニュートリノ事象が明らかに少ないことが分かる。

表 1.1 に、2023 年の Particle Data Group [10] によってまとめられたニュートリノ振動パラメータの測定結果を示す。また、以下ではそれぞれの振動パラメータがどのように決定されているかについて述べる。

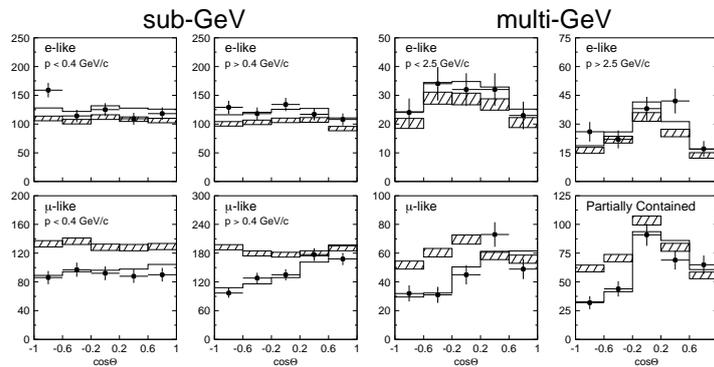


図 1.2: スーパーカミオカンデで観測された大気ニュートリノイベントの天頂角分布 [5]

表 1.1: ニュートリノ振動パラメータの測定値^[10]。順階層はニュートリノの質量階層性が $m_3 > m_2 > m_1$ の場合、逆階層は $m_2 > m_1 > m_3$ の場合である。

パラメータ	ベストフィット $\pm 1\sigma$
$\sin^2 \theta_{12}$	0.307 ± 0.013
$\sin^2 \theta_{23}$	$0.534^{+0.021}_{-0.024}$ (順階層)
$\sin^2 \theta_{23}$	$0.547^{+0.018}_{-0.024}$ (逆階層)
$\sin^2 \theta_{13}$	$(2.20 \pm 0.07) \times 10^{-2}$
Δm_{21}^2	$(7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{eV}^2$
Δm_{32}^2	$(-2.519 \pm 0.033) \times 10^{-3} \text{eV}^2$ (逆階層)
Δm_{32}^2	$(2.437 \pm 0.033) \times 10^{-3} \text{eV}^2$ (順階層)
δ_{CP}	$(1.23 \pm 0.21) \times \pi \text{ rad}$

$\theta_{12}, \Delta m_{21}^2$

θ_{12} は、SNO 実験や SK 実験による太陽ニュートリノや KamLAND 実験の原子炉ニュートリノによる (反)電子ニュートリノの生存確率によって測定されている。ここでは数百 km の長基線原子炉ニュートリノ実験の場合を考えると、生存確率は

$$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e}(L, E) \approx 1 - \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}$$

であり、 $\theta_{12}, \Delta m_{21}^2$ が測定される。また、 Δm_{21}^2 の符号は太陽中の物質効果により決定され、 $m_2 > m_1$ であることが分かっている。

θ_{13}

T2K 実験や NOvA 実験等の加速器ニュートリノや Daya-Bay 実験等の原子炉ニュートリノを用いた実験により精密に測定される。現在最も精度の良い測定をおこなっている、ベースラインが数 km の中基線原子炉ニュートリノ実験の場合反ニュートリノの生存確率は、

$$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e} \approx 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}$$

であり、 θ_{13} が測定される。 θ_{13} は他の混合角と比べると小さいため、比較的最近まで $\theta_{13} \neq 0$ であるかどうか分かっていなかったが、2012 年に Daya Bay 実験により初めて $\theta_{13} \neq 0$ が有意度 5σ で示された^[11]。

$\theta_{23}, \Delta m_{32}^2$

加速器ニュートリノや大気ニュートリノによるミューニュートリノの生存確率によって測定される。ミューニュートリノの生存確率は、

$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu} \approx 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E}$$

であり、 $\theta_{23}, |\Delta m_{32}^2|$ を測定することができる。このモードは太陽ニュートリノ振動と比べて質量効果が小さいため、 Δm_{32}^2 の符号はいまだに測定されていない。

δ_{CP}

通常のニュートリノ振動の場合、式 1.5 の第 3 項に δ_{CP} の効果は出現するが第 2 項が支配的なため測定は困難であり、加速器ニュートリノ実験において、ミューニュートリノから電子ニュートリノに振動する確率と反ミューニュートリノから反電子ニュートリノへ振動する確率を測定し差をとることによって、

$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e} - P_{\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e} \approx 2 \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \cos \theta_{13} \sin \delta_{CP} \sin \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}$$

のように δ_{CP} の寄与する項のみを測定することができる。ただし、実際には物質効果の現れ方が 2 つの振動確率で異なるため物質効果の項が残ってしまい、測定を複雑にしている。

1.1.5 ニュートリノ振動に関する未解決問題

現在のところ解決されていないニュートリノ振動に関する課題としては主に以下の 3 つが挙げられる。

レプトンにおける CP 対称性の破れ

これは、PMNS 行列の複素位相角 δ_{CP} に関する未解決問題である。前述の通り、 δ_{CP} が 0 もしくは、 π でない場合に PMNS 行列に複素数の成分が現れ、CP 対称性の破れにつながる。ビッグバン理論において、エネルギーから粒子・反粒子が対生成によって同数生まれるにも関わらず、現在の宇宙にはほとんど物質しか存在しない。この非対称性を説明するためには、サハロフの 3 条件と呼ばれる (1) バリオン数の破れ、(2) C 及び CP 対称性の破れ、(3) 熱平衡の破れが必要である [12]。このうち、(1) と (3) を満たす過程が存在することは分かっているが、(2) に関しては既に測定されているクォーク混合による CP 対称性の破れのみでは十分でないことが判明しており、更なる CP 対称性の破れの起源が必要である。もし PMNS 行列による CP 対称性の破れが十分大きかった場合、レプトジェネシスによって宇宙の物質・反物質の対称性の破れを説明できる可能性があり [13],[14]、測定が求められている*2。

質量階層性問題

現在のところ Δm_{32}^2 の符号は決定されていない。これはニュートリノ振動測定において、実際に測定されるのは $\sin^2 \frac{\Delta m_{ik}^2 L}{2E}$ であり、この項が Δm_{ik}^2 の符号に依存しないためである。 Δm_{21}^2 については太陽による物質効果によって符号が判明しているが、 Δm_{32}^2 は未だに決定されていないためニュートリノの質量階層性としては現在 $m_1 < m_2 < m_3$ となる順階層と $m_3 < m_1 < m_2$ となる逆階層の 2 パターン考えられている。 Δm_{32}^2 の符号を決定する方法としては、 Δm_{21}^2 と同様に物質効果を用いる方法とニュートリノの質量和から決定する方法などが存在する。物質効果を用いる方法としては、DUNE 実験による約 1300 km という長大なベースラインを用いて物質効果を大きくした長基線ニュートリノ振動実験やハイパーカミオカンデ実験における地球のコアを通過してくる大気ニュートリノ測定等が計画されている。また、質量和を用いる方法としては CMB 観測によるニュートリノ質量和の精密測定等がある。 $|\Delta m_{32}^2|$ が Δm_{21}^2 と比較して大きいことで順階層の場合は重いニュートリノが 1 つ (ν_3)、逆階層の場合は重いニュートリノが 2 つ (ν_1, ν_2) となり質量和が 2 倍程度異なり、質量和から質量階層性問題に取り組むことができる。B

*2 ただし、筆者の知る限り PMNS 行列の CP 対称性の破れのみで宇宙の物質・非対称性の破れを説明するためには重いマヨラナニュートリノなど実験的に未確認の粒子・過程を仮定する必要がある、ニュートリノ混合における CP 対称性の破れが十分大きかったとしても直ちに説明できる訳ではない。

θ_{23} のオクタント

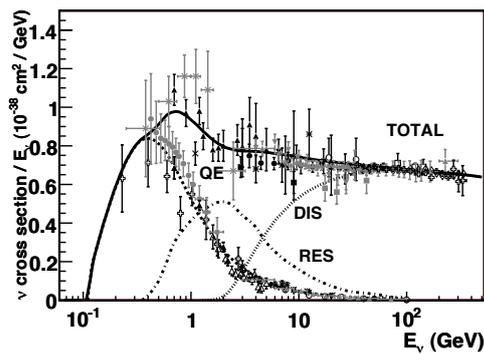
現在測定されている θ_{23} の値は、 $\sin^2 \theta_{23} = 0.534_{-0.024}^{+0.018}$ (順階層) と最大混合 $\theta_{23} = 45^\circ$ に近い。もし、 θ_{23} が最大混合の場合 ν_μ, ν_τ の間の何らかしらの対称性を示唆している可能性が高い。最大混合でない場合でも、いくつかの物理モデルは μ_τ の間の対称性の破れ方を予想しているため^[15]、オクタントの下側 ($\theta_{23} < 45^\circ$) と上側 ($\theta_{23} > 45^\circ$) のどちらであるかを含め、より精密に θ_{23} を測定することが必要とされている。

1.1.6 ニュートリノと物質の相互作用

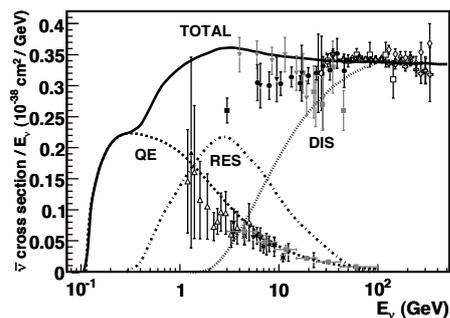
ニュートリノは電荷を持たないため、電子やミュオン粒子のように電離損失等によりその飛跡を直接測定することはできない。ニュートリノが他の粒子と相互作用した後に放出される 2 次粒子を測定することで、間接的にニュートリノが存在していたことを知ることができる。ニュートリノ振動確率はニュートリノのエネルギーに依存するため、ニュートリノの反応により放出される 2 次粒子を精密に測定し、相互作用前のニュートリノのエネルギーや運動量・フレーバーを決定することが重要である。そのため、ニュートリノと物質の相互作用を詳しく理解することがニュートリノ振動の測定を精密に行うためには必要不可欠である。

ここでは、加速器ニュートリノとして使用されるニュートリノのエネルギーが $\mathcal{O}(\text{GeV})$ の場合を考える。このエネルギーではニュートリノは核子やパートンと相互作用し、荷電カレント相互作用による CC 反応が主となる。CC 反応はその終状態の粒子や運動学によって、準弾性散乱 (QE)、共鳴 π 生成 (RES)、深非弾性散乱 (DIS) 等に分けることができる。図 1.3 は、それぞれニュートリノと反ニュートリノの CC 反応の断面積を示したもので、入射ニュートリノのエネルギーによってそれぞれの反応の起こりやすさが異なっていることが分かる。また、ニュートリノと反ニュートリノの断面積が $1/3$ から $1/2$ 異なっている。この断面積の違いは、ニュートリノと反ニュートリノの振動確率から求める δ_{CP} を測定する際に重要であり、精密に測定する必要がある。

以下、これらの CC 反応について詳しく述べる。



(a) ニュートリノ



(b) 反ニュートリノ

図 1.3: ニュートリノと核子の荷電カレント反応断面積^[16]

準弾性散乱 (QE)

この散乱は、ニュートリノのエネルギーが 1GeV 以下において支配的な CC 反応であり、ニュートリノは原子核中の核子と相互作用する。反応の始状態はニュートリノと核子であり、終状態はニュートリノのフレーバーに対応する荷電レプトンと核子である。

$$\begin{aligned}\nu_l + n &\rightarrow l^- + p \\ \bar{\nu}_l + p &\rightarrow l^+ + n\end{aligned}$$

この反応は 2 体散乱であり核子が静止しているとする、反応前のニュートリノのエネルギー E_ν は、

$$E_{\nu_l/\bar{\nu}_l} = \frac{m_{p/n}E_l - m_l^2/2}{m_{p/n} - E_l + p_l \cos \theta_l} \quad (1.6)$$

となる。ただし、 E_l, p_l, θ_l は終状態の荷電レプトンのエネルギー、運動量、入射ニュートリノ方向に対する角度を表しており、 $m_{p/n}$ は陽子/中性子の質量である。つまりニュートリノの入射方向が分かれば、終状態の荷電レプトンのフレーバー、運動量、角度を測定することで入射ニュートリノのエネルギーを再構成することが可能である。この特徴からニュートリノの入射方向があらかじめ決まっている加速器ニュートリノの低エネルギー領域で信号事象としてよく利用される反応である。

共鳴 π 生成 (RES)

このモードは非弾性散乱の一種である。ニュートリノが核子と相互作用する際に原子核にエネルギーを与えバリオンの共鳴状態へと励起させる。この共鳴状態が崩壊する際にパイ粒子と核子を放出するのがこの共鳴 π 生成である。

$$\begin{aligned}\nu_l + N &\rightarrow l + N' \\ N' &\rightarrow \pi + N\end{aligned}$$

ニュートリノエネルギーの再構成は QE 反応と同様に荷電レプトンの情報から再構成することが可能であるが、非弾性散乱のため (1.6) 式から補正が必要である。 π 粒子を検出することができなければ QE 散乱と見分けがつかないため補正を行えず、エネルギー再構成を誤る原因となる。

深非弾性散乱 (DIS)

深非弾性散乱はニュートリノのエネルギーが 10 GeV 以上において支配的な散乱である。このエネルギーではニュートリノは核子の中のクォークと相互作用を行い、終状態にはニュートリノのフレーバーに対応する荷電レプトンとハドロンのシャワーが生成される。

$$l + N \rightarrow l + h_1 + h_2 + \dots$$

入射ニュートリノのエネルギー E_ν は、ハドロンシャワーと荷電レプトンのエネルギー E_h, E_l を用いて、

$$E_\nu \approx E_h + E_l$$

と計算することができる。

これらの相互作用の他にも中性カレントによる相互作用やコヒーレント π 生成等のさまざまな相互作用がこのエネルギー領域に混在している。また、素過程以外にも、相互作用後のハドロンが原子核内での散乱を起

この終状態相互作用 (Final State Interaction, FSI と呼ばれる, 図 1.4) や、結合している核子が相互作用することにより原子核から 2 つの核子が弾き出される 2p2h 反応 (2 particle 2 hole, 図 1.5) 等により、実際に起こるニュートリノ反応は非常に複雑になる。

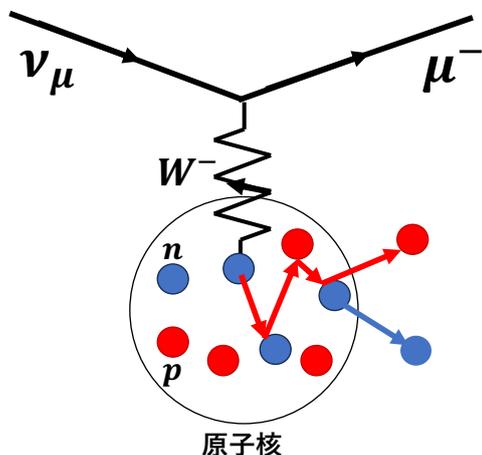


図 1.4: 終状態相互作用

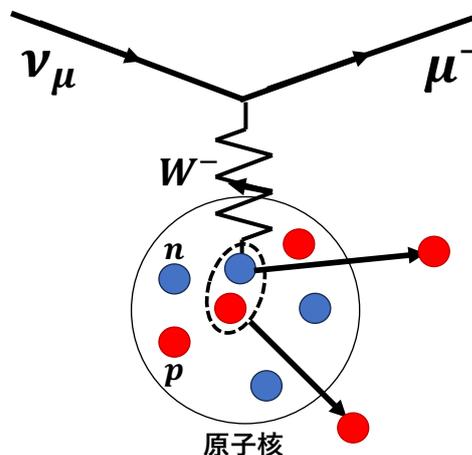


図 1.5: 2p2h 反応

1.2 T2K 実験

1.2.1 実験概要

T2K(Tokai to Kamioka) 実験は、茨城県東海村 J-PARC の加速器で生成したミューニュートリノビームもしくは反ミューニュートリノを生成地点から 280 m 離れた前置検出器群及び 295 km 離れた岐阜県神岡町にある後置検出器スーパーカミオカンデ (SK) により測定する長基線ニュートリノ振動実験である。^[17](図 1.6) T2K 実験では SK 検出器において、ニュートリノ振動がない場合に予測されるよりも (反) ミューニュートリノの事象数が減少する消失事象と、(反) 電子ニュートリノの事象数が増加する出現事象を測定し、PMNS 行列のパラメータのうち Δm_{23}^2 と θ_{23} 、 δ_{CP} と θ_{13} を精密に測定することができる。



図 1.6: T2K 実験の概要

1.2.2 ニュートリノビームの生成

茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC の加速器群は、図 1.7 に示すような 3 台の加速器で構成されている。まず、負水素イオンを線形加速器 (LINAC) によって 400 MeV まで加速し、その後、電子を剥ぎ取った陽子を RCS(Rapid Cycling Synchrotron) により 3 GeV まで加速する。最後に MR(Main Ring) で 30 GeV まで陽子を加速している。T2K 実験ではまず、この 30 GeV に加速された陽子を炭素標的に衝突させることで荷電パイ粒子 (π^+/π^-) を生成する。次に生成したパイ粒子を電磁ホーンによって集め、標的の下流の 94 m の崩壊ボリュームにおいてパイ粒子が以下のように崩壊することによってニュートリノビームを生成している。



電磁ホーンに流す電流の正負を切り替えることで、荷電パイ粒子のどちら (π^+/π^-) を集めるかを選択することが可能であり、ニュートリノビームと反ニュートリノビームを打ち分けることができる。



図 1.7: J-PARC 加速器群 [18]

Off-Axis 法

T2K 実験では、ニュートリノビームの軸と検出器の方向をあえてずらす Off-Axis 法を採用している (図 1.8)。図 1.9 下のプロットのように、Off-Axis 角が大きくなるほどニュートリノのエネルギー分布は細く、低エネルギーになる。また、T2K 実験のベースライン 295 km では、ミューニュートリノの振動確率 $P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu}, P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e}$ はそれぞれ図 1.9 上、中央のプロットのようにになっている。T2K 実験では Off-Axis 角 2.5° を採用することで、電子ニュートリノの出現確率の第一極大付近の幅が狭いエネルギー分布のニュートリノビームを得ている。

1.2.3 前置検出器群

長基線ニュートリノ振動実験において、前置検出器は、ニュートリノが振動する前のニュートリノのエネルギー分布やニュートリノ反応断面積を測定する役割を持っている。T2K 実験では、ND280, WAGASCI-BABYMIND 等の Off-Axis に置かれた検出器と INGRID というニュートリノビーム軸 (On-Axis) 上に置か

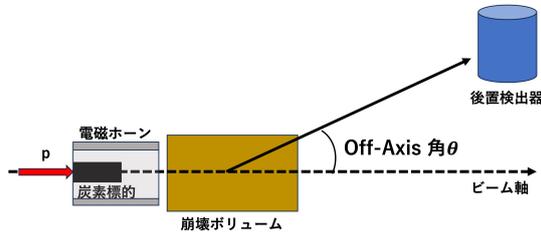


図 1.8: Off-Axis 法の概念図

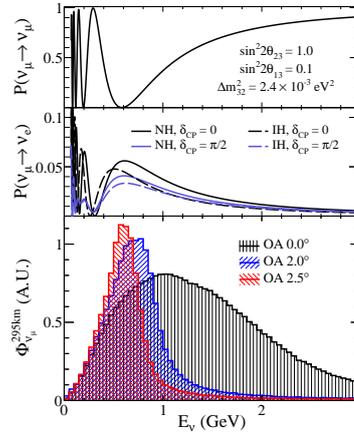


図 1.9: T2K 実験における振動確率 (上、中央) とニュートリノのエネルギー分布 (下)^[19]

れたニュートリノ検出器がある。

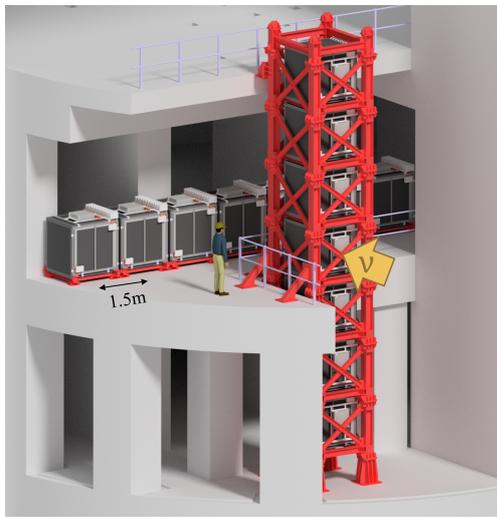
INGRID

INGRID (Interactive Neutrino GRID) は、On-Axis 上に置かれた、主にビームの安定性を測定する役割を持ったニュートリノ検出器である (図 1.10(a))。INGRID はニュートリノビーム方向と垂直方向に縦横に各 7 台、計 14 台の INGRID モジュール (図 1.10(b)) から構成されている。INGRID モジュールは鉄とプラスチックシンチレータが交互に挟まれた構造をしており、鉄を含んでいることで軽元素 (炭素や酸素) を多く含む他の前置検出器に比べ多くのニュートリノ反応を記録することが可能である。各 INGRID モジュールで得られたニュートリノイベント数をフィッティングすることで、図 1.10(c) のようにニュートリノビームの中心が測定されている。Off-Axis 法では、Off-Axis 角が変化することによりニュートリノのエネルギー分布が変わってしまう。振動後と振動前のエネルギー分布の形を比較し、ニュートリノ振動パラメータを測定するニュートリノ振動実験においては、Off-Axis 角がずれないことが重要である。そこで T2K 実験では、INGRID によりビーム中心のズレを 1 mrad 以内であることを測定した上で、ニュートリノ振動解析を行っている。

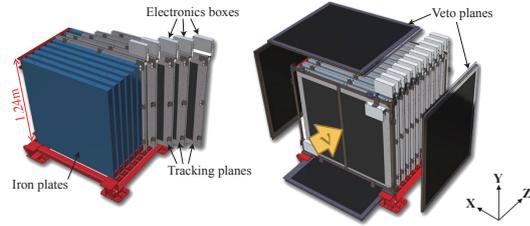
ND280 と ND280 アップグレード

ND280 は、後置検出器 SK と同じ 2.5° の Off-Axis 上にあり、陽子ビーム標的から 280 m 離れた位置に置かれた検出器である。この検出器には、約 0.2 T の磁場がかけられ荷電粒子の電荷の正負を判断することができる。ND280 は、プラスチックシンチレータと鉛、水を交互に積層した $P\bar{O}D(\pi^0 \text{ Detector})$ 、後に詳しく述べる FGD(Fine Grained Detector)、Ar ガスを用いた TPC(Time Projection Chamber)、プラスチックシンチレータを鉛シートで挟んだ構造の ECAL(Electromagnetic Calorimeter)、これらの検出器の周りを覆うプラスチックシンチレータと鉄で構成された SMRD(Side Muon Range Detector) といった多くのサブ検出器から構成されている (図 1.11)。

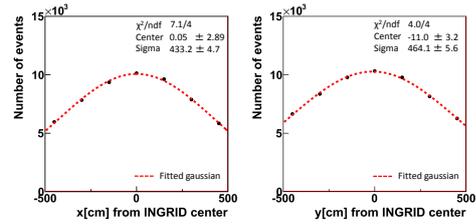
2020 年まで上記の検出器構成でデータ取得を行っていたが、2023 年度からは図 1.12 のように先頭の $P\bar{O}D$ の一部を、中心に SuperFGD、その上下に今までの TPC と同様の Ar ガスを用いた HA-TPC(High Angle TPC)、これら 2 つの検出器を覆う 6 枚の TOF(Time Of Flight) 検出器に置き換えた構成でデータ取得を行



(a) INGRID 検出器



(b) INGRID モジュール



(c) INGRID で測定したニュートリノビームプロファイル [20]

図 1.10: INGRID 検出器概要

なっている。

ここでは、水をニュートリノ標的として含む FGD とアップグレードされた検出器の主ニュートリノ標的兼検出器である SuperFGD について紹介する。

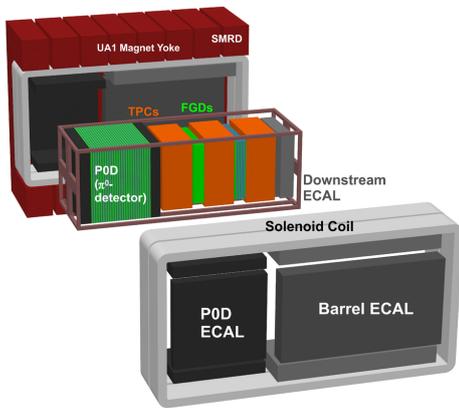


図 1.11: ND280 の外観

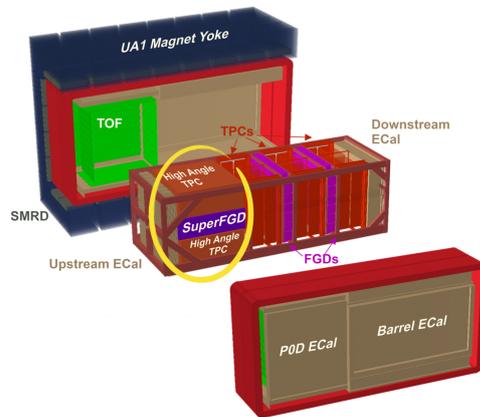


図 1.12: アップグレード後の ND280 の外観

■ FGD

FGD は、ビーム上流側の FGD1 と TPC を 1 つ挟んだ下流にある FGD2 の 2 つの検出器がある。それぞれの FGD は、図 1.13 のように $9.6 \text{ mm} \times 9.6 \text{ mm} \times 18600 \text{ mm}$ の細長いシンチレータバーを 192 本ずつビームと垂直方向に縦横に並べた XY モジュールからなる。シンチレータバーには波長変換ファイバが一本通され、ファイバの片方の端に光検出器 MPPC を設置することでシンチレータからの蛍光を検出している。FGD1 は

この XY モジュールを 15 層ビーム方向に並べた構造をしており、FGD2 は XY モジュール 7 層の間に厚さ約 2.5 cm の水の層を 6 層挟んだ構造をしている。おおよそ 50% の水を含む FGD2 のニュートリノイベントから炭素標的のみの FGD1 で測定したニュートリノイベントを比較、差し引くことで水とニュートリノ反応の測定が可能である。しかしながら、図 1.14 に示すように、FGD 検出器はその構造上大角度散乱への感度が低く、全方向へほぼ同程度の感度をもつ SK とは異なる。また、FGD では検出器内で止まるような荷電粒子に対して比較的長い飛跡 (>5 cm) を要求するため、低運動量の陽子や π 粒子等に対する検出効率が低いという弱点が存在する。特に FGD2 ではニュートリノ標的として存在する水が検出器としてのデッドスペースとなり、荷電粒子飛跡の再構成により長い飛跡が必要となる。

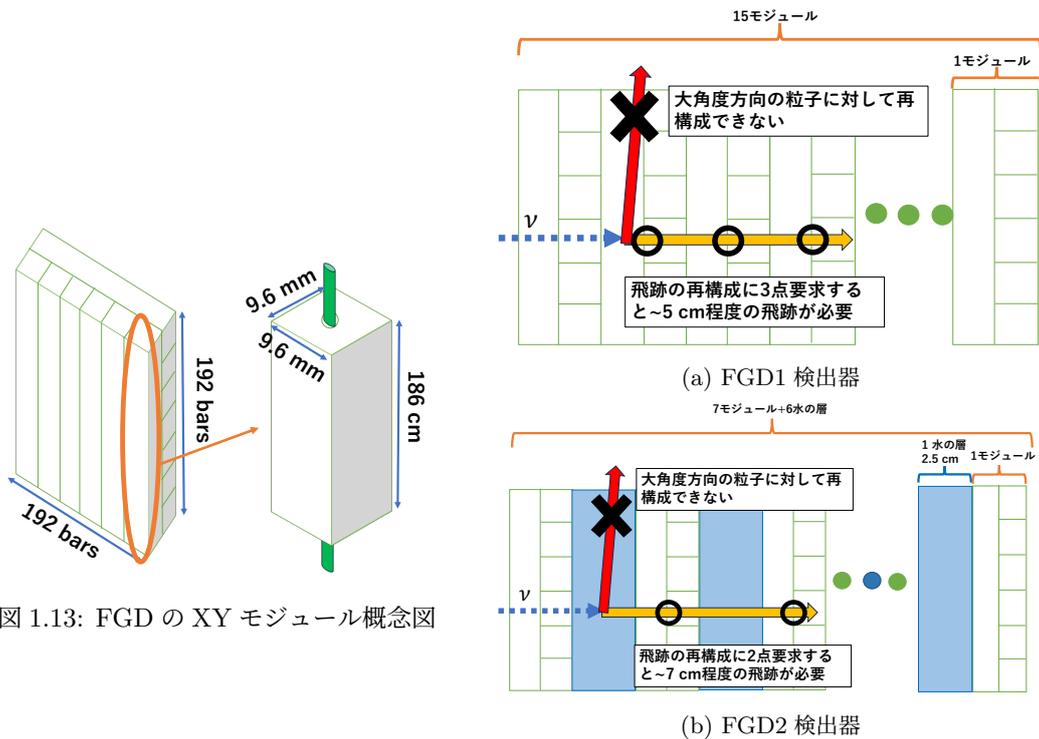


図 1.13: FGD の XY モジュール概念図

図 1.14: 各 FGD の概念図と荷電粒子検出における弱点

■SuperFGD

ND280 に新たに追加された検出器 SuperFGD は一辺 1cm のプラスチックシンチレータキューブを $56 \times 192 \times 182 \approx 200$ 万個積み重ねた構造をしている。各キューブに対し 3 方向から波長変換ファイバを通し、ファイバの片方の端に光検出器 MPPC を設置している。キューブを通過した荷電粒子によって発生したシンチレーション光を波長変換ファイバを用いて MPPC まで光として伝搬し、MPPC において電気信号に変換してデータ取得をおこなっている。SuperFGD は、その 3 次元的に対称的な構造から大角度の散乱への感度も高いという強みがある。これにより今までの FGD と比較して SK と近い位相空間でニュートリノ反応の測定が可能となった。さらに、3 次元の位置を決定するために 1 cm のキューブ 1 つからの光を検出すれば良いので、厚さ約 1 cm のシンチレータバー 2 枚の通過が必要であった FGD よりも短い 3 cm 程度の飛跡についても検出することができる。これにより、低運動量の陽子が 2 つ放出される $2p2h$ 反応や FSI などのニュート

リノ反応由来の系統誤差の削減が期待されている。

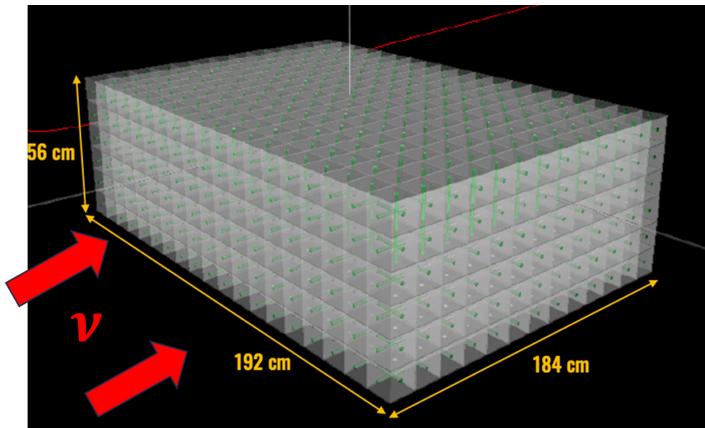


図 1.15: SuperFGD のデザイン図。キューブは少なく描かれているが実際には一辺 1 cm のキューブが敷き詰められている。

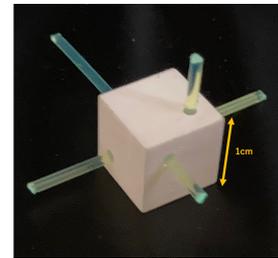


図 1.16: SuperFGD のシンチレータキューブと 3 方向の波長変換ファイバ

WAGASCI-BabyMIND

WAGASCI-BabyMIND は、 1.5° の Off-Axis 上の陽子ビーム標的から 280 m 離れた位置に置かれた検出器である。ND280 と SK とは異なる Off-Axis 角に設置することで、異なったニュートリノのエネルギー分布でのニュートリノ反応断面積の精密測定を目標としている (図 1.9)。図 1.17 のように、2つの WAGASCI(Water Grid And SCIntillator)、プロトンモジュールが左右 2つの Wall MRD(Muon Range Detector) と下流の Baby MIND(Magnetized Iron Neutrino Detector) の 3つの検出器によって囲われた構成になっている。

以下それぞれの検出器について簡単に紹介する。

WAGASCI

図 1.18 のように、格子状に組まれたシンチレータの間に水を入れた構造をしている。水とプラスチックの質量比はおおよそ 4:1 である。

プロトンモジュール

FGD 検出器のようにプラスチックシンチレータバーを XY 交互に積層した構造を持ち、陽子の飛跡を検出することができるため、この名称が付けられている。

Wall MRD

大角度に散乱したミュー粒子の運動量を測定する検出器であり鉄板とプラスチックシンチレータが交互に積層された構造を持つ。

Baby MIND

鉄板とコイルからなる磁石モジュールとプラスチックシンチレータが交互に積層されている。磁石モジュールにより 1.5 T の磁場がかけられ、 μ^+/μ^- の識別が可能になっている。

水を含む検出器である WAGASCI は、その構造上大角度方向へ散乱する荷電粒子へも感度を持ちながら、水とニュートリノ反応断面積の測定も可能である。。しかしながら、WAGASCI も FGD2 と同様にニュートリノ標的としての水により検出器としてのデッドスペースが生まれ、飛跡が数 cm 程度の短い荷電粒子の飛跡を検出することは困難である。

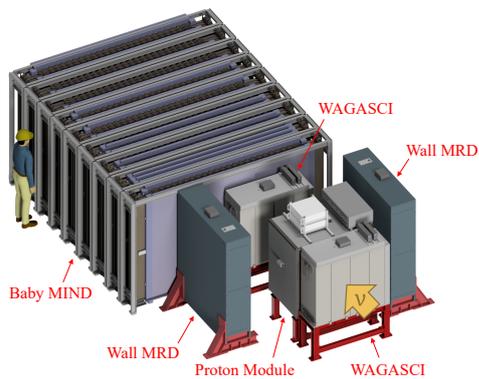


図 1.17: WAGASCI-BabyMIND

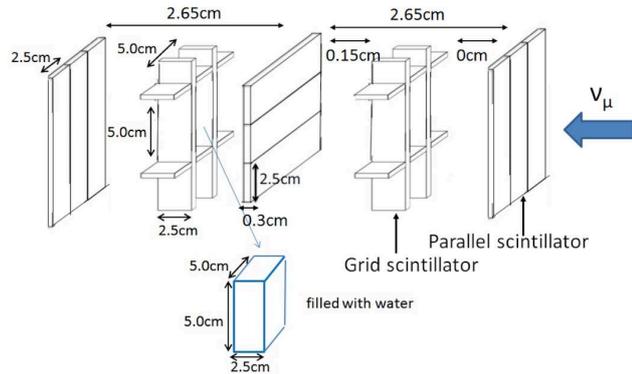


図 1.18: WAGASCI モジュールの内部構造 [21]

1.2.4 後置検出器 スーパーカミオカンデ検出器

スーパーカミオカンデ (SK) 検出器は、陽子ビームの標的から約 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡町池の山の地下 1000 m に位置している*3。T2K 実験において SK 検出器は、振動後のニュートリノを観測する役割を持っている*4。現在世界最大の純水チェレンコフ検出器であり、直径 39.3 m、高さ 41.4 m の円柱状のタンクに 50 kt の超純水が入られている (図 1.19)。タンクは外部から侵入する粒子を識別し、ベトをとる外水槽と検出器として用いられる内水槽からおり、内水槽の壁面には、直径 50 cm の 11000 本の光電子増倍管 (PMT) が設置されている。内水槽の壁面付近は事象再構成の精度が悪くなり、背景事象も多くなるため解析には使用されておらず、ニュートリノ標的としての有効質量は 22.5 kt となっている。

SK 検出器におけるニュートリノの検出原理について説明する。まずニュートリノは水中を通過した際に水の原子核と反応することで、ニュートリノのフレーバーに対応した荷電レプトンを発生させる。相対論的な荷電粒子が通過した際に発生するチェレンコフ光を、PMT によって検出することで、間接的にニュートリノを測定することが可能である。

エネルギーが十分大きい電子は水中を飛行中に電磁シャワーを起こすため、ミュー粒子の場合と比較してチェレンコフ光のリングの輪郭がぼやける。SK ではこの性質を利用することで、図 1.20 のように、99% 以上の高い精度で電子ニュートリノかミューニュートリノであるかを見分けることができる。ただし、SK 検出器には磁場がかけられていないため、荷電レプトンの電荷の正負、つまりニュートリノであるか反ニュートリノかを判別することは困難である。

現在は純水の中に 0.033% のガドリニウムを溶かす SK-Gd フェーズが進行しており、ガドリニウムによる中性子捕獲後の γ 線を捉えることで、中性子検出効率が大幅に向上する予定である。T2K 実験においては、反ニュートリノの衝突の際に主に発生する中性子を検出することでニュートリノと反ニュートリノの識別能力の向上が期待される。

また、T2K 実験ではビームの飛来するタイミングと SK 検出器でチェレンコフ光を検出するタイミングを GPS を用いて同期することで、大気ニュートリノ等の背景事象を削減し、ニュートリノビーム由来の信号を選択して取得している。

*3 地下 1000 m に位置することで宇宙線の強度を約 10 万分の 1 に減らすことができる。

*4 SK は T2K 実験の後置検出器としての役割の他にも、核子崩壊の探索や宇宙ニュートリノの検出等の物理目標がある。

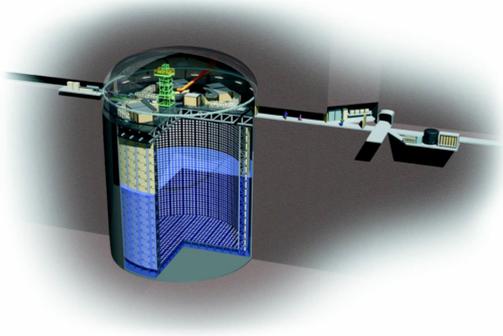


図 1.19: スーパーカミオカンデの外観

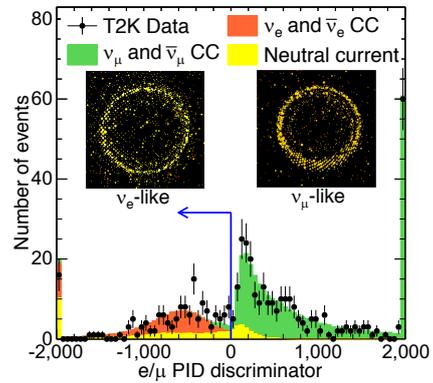


図 1.20: スーパーカミオカンデにおける電子ニュートリノとミューニュートリノの識別 [22]

1.2.5 T2K 実験のニュートリノ振動パラメータ測定の結果

T2K 実験のニュートリノ振動パラメータ測定の結果として 2023 年 9 月次のものを示す [23]。この結果では、2020 年までに取得したデータである、ニュートリノモードが 19.7×10^{20} POT、反ニュートリノモードは 16.3×10^{20} POT のデータを用いて解析している (図 1.21)。ここで、POT(Protons On Target) とは標的に当たった陽子の数であり、これは、電磁ホーンによる収束率等により変化するがおよそニュートリノの数に比例していて、長基線ニュートリノ振動実験において統計量の目安となる。

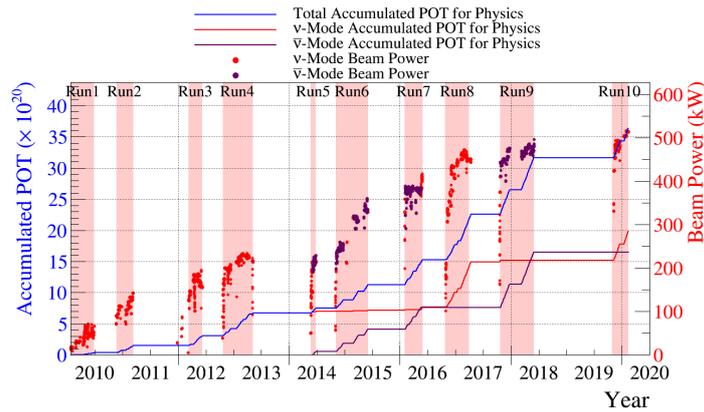


図 1.21: T2K 実験における 2020 年度までの各 run におけるビーム強度と累積 POT [23]

T2K 実験では現在、ニュートリノ混合における CP 対称性の破れを示す $\sin \delta_{CP} \neq 0$ つまり $\delta_{CP} \neq (0 \text{ or } \pi)$

を、ニュートリノ質量階層性が逆階層の場合 3σ 、順階層の場合 90% の信頼度で示唆している (図 1.22)。また、ニュートリノ質量二乗差 Δm_{32}^2 と混合角 θ_{23} について世界最高精度での測定に成功している (図 1.23)。

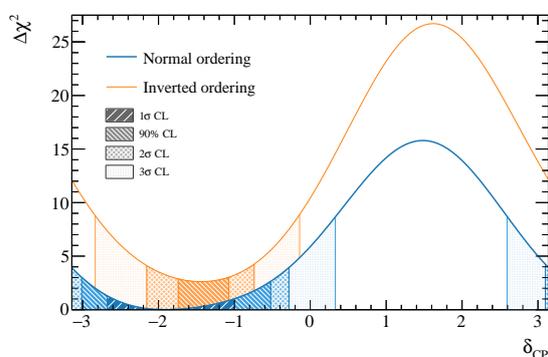


図 1.22: δ_{CP} に対する尤度 $\Delta\chi^2$ [23]

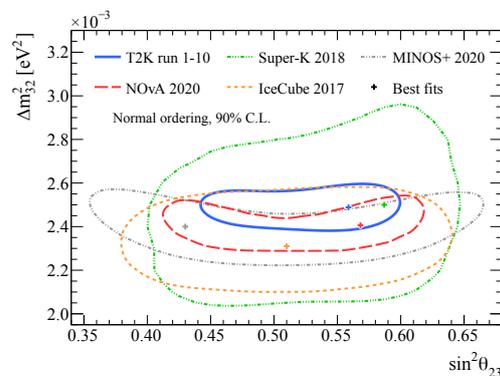


図 1.23: $\Delta m_{32}^2, \sin^2\theta_{23}$ に対する 2 次元の 90% 信頼領域と他の実験との比較 [23]

1.2.6 T2K 実験の今後の計画

T2K 実験において、CP 対称性の破れを表す δ_{CP} の測定については、現在統計誤差が系統誤差と比較して支配的であり、まずはより多くのデータを取得する必要がある。そのため T2K 実験では、図 1.24 のように、ニュートリノビームの増強を続けながらデータ取得を続ける予定である。また、アップグレードした ND280 や WAGASCI-BabyMIND 等の前置検出器を用いて系統誤差を削減し、2027 年までに 3σ での CP 対称性の破れの示唆を目指している。その後は、T2K 実験・SK 実験の後継となるハイパーカミオカンデ実験で引き続きニュートリノ振動実験を行い、 5σ での CP 対称性の破れの発見を目標としている。

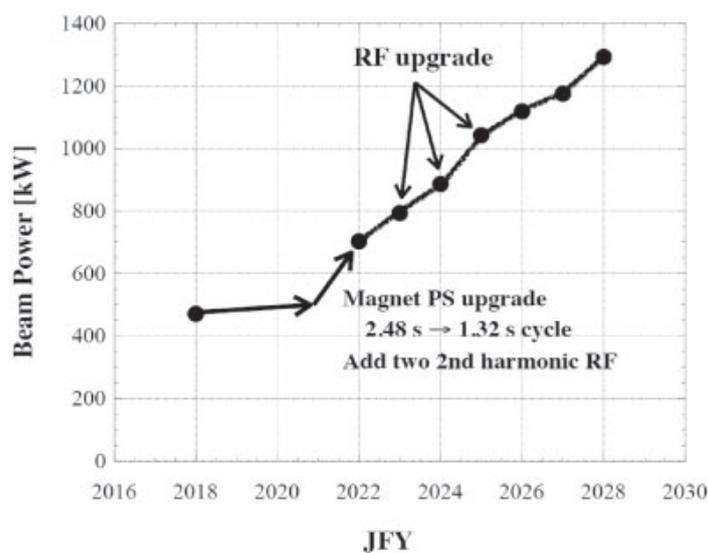


図 1.24: J-PARC MR 加速器のアップグレード計画 [24]

1.3 ハイパーカミオカンデ実験

ハイパーカミオカンデ (HK) 検出器は、SK 検出器の後継検出器であり、次世代の大型水チェレンコフ検出器である。岐阜県飛騨市神岡町の二十五山の地下 650 m に建造予定であり、2027 年からの稼働を目指し現在穴の掘削作業や PMT の量産が進められている。水タンクの大きさは直径 68 m、高さ 71 m であり、約 260 kt の水が入る予定である。実際に解析の際にニュートリノ反応標的となる有効質量は約 190 kt であり、SK 検出器の約 8 倍になっている。壁面には SK 検出器の PMT と比較して感度が約 2 倍となった直径 50 cm の新型 PMT が 2 万本、小型の 3 インチ PMT を 19 本束ねた multi-PMT が数千本設置される予定である。SK 検出器と同様に、ニュートリノと水の原子核との反応で発生した荷電粒子によって放出されるチェレンコフ光を検出することでニュートリノを検出することができる。

HK 実験では、T2K 実験を引き継いだ長基線ニュートリノ振動実験の他、SK 実験を引き継いだ大気ニュートリノ振動測定によるニュートリノ質量階層性問題の解決、核子崩壊の探索、超新星背景ニュートリノの測定など多彩な物理目標を持っている。ここでは、長基線ニュートリノ振動実験に焦点を当てて紹介する。

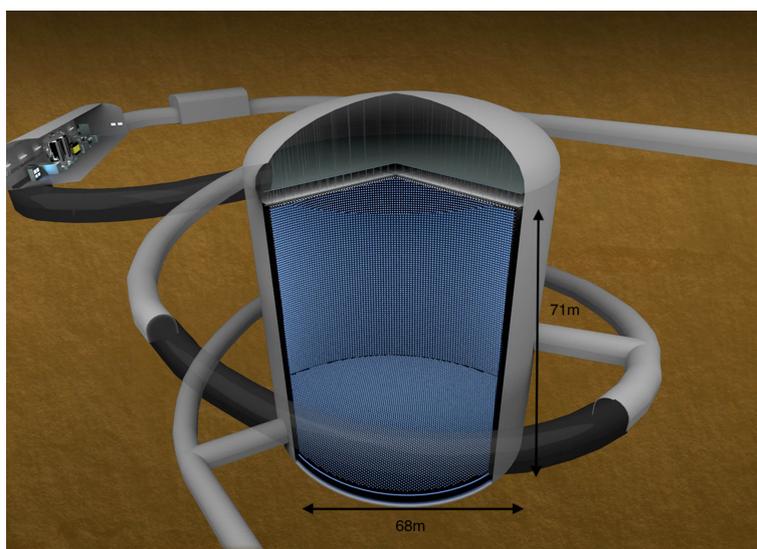


図 1.25: ハイパーカミオカンデのイメージ図 [25]

1.3.1 HK 実験におけるニュートリノ振動測定

HK 実験では T2K 実験を引き継ぎ、J-PARC からのニュートリノビームを用いた長基線ニュートリノ振動実験を行う。HK 実験では、長基線ニュートリノ振動実験における主要な要素については以下になる予定である。

ニュートリノビーム

現在おこなっているビームパワーの増強を続け最終的に 1.3 MW での運転を予定している (図 1.24)。

現在のビームパワー 710 kW と比較すると約 1.8 倍の増強となる。

前置検出器

アップグレード後の ND280, INGRID などの現行の検出器で引き続きニュートリノ振動前の分布を測定する予定である。HK 実験が稼働後のアップグレードとして、第 2 章で述べるように水標的の新検出器を導入する案も検討されている。

後置検出器

SK 検出器の後継の HK 検出器を用いて振動後のニュートリノのエネルギー分布を測定する。SK 検出器と比較して約 8 倍の有効質量の増加となる。また、HK 検出器の Off-Axis 角は SK 検出器と同じ 2.5° である。

このように HK 実験では、現在の T2K 実験と比較して 10 倍以上の統計量の増加が見込まれている。また、統計量の増加に伴い相対的に大きくなる系統誤差を削減するために新たな中間チェレンコフ検出器 IWCD を設置する予定である。

IWCD

IWCD(Intermediate Water Cherenkov Detector) は、陽子ビーム標的からおおよそ 1 km 離れた位置に置かれる小型の水チェレンコフ検出器である。水タンクの直径は 8 m、高さは 6 m であり、約 300 t の水で満たされる。また、水タンクは HK に使用されるものと同様の multi-PMT500 本程度によって覆われている。

IWCD の特徴として、まず後置検出器と同じニュートリノ標的、検出原理であることが挙げられる。今までの前置検出器では、ニュートリノ反応によって発生する荷電粒子を検出するために、水はシンチレータとのサンドイッチ構造になっていたため、シンチレータとニュートリノが反応することによる背景事象が混入していた。しかし、IWCD は純粋な水標的検出であるので、ニュートリノと水の反応のみを測定することができる。また、後置検出器と同じチェレンコフ光によりニュートリノ反応を検出することから、ほぼ同じの位相空間で荷電粒子を検出することができる。今まではこの標的や位相空間の違いが大きな系統誤差の要因になっていたが、IWCD では多くの系統誤差がキャンセルし、より小さな系統誤差でニュートリノ振動解析が行えることになる。

2 つ目の特徴として、さまざまなエネルギーでのニュートリノ反応断面積が可能なことである。IWCD は、図 1.26 のように水タンクを水に浮かせ、高さをコントロールすることが可能になっている。これにより、さまざまな Off-Axis 角 ($1^\circ - 4^\circ$) を同一の検出器で測定できる。Off-Axis 角が変わるということはニュートリノのエネルギー分布が変わることを意味し、各エネルギー分布の測定結果を足し引きすることで、各エネルギーでのニュートリノ反応を精密に測定できる。

3 つ目の特徴として、電子ニュートリノと反ニュートリノの断面積の違いの精密測定が可能なことである。CP 対称性の破れは電子ニュートリノと反ニュートリノの出現事象から求めるため、これらの違いを精密に知ることが重要である。従来の前置検出器では、 γ 線による背景事象により電子ニュートリノの断面積を精密に測定することが困難であったが、IWCD は、分厚い外水槽によりこの背景事象を削減した上で測定することが可能である。

1.3.2 期待される感度と課題

HK 実験において期待される物理感度について、2023 年の NUFAC 国際会議の発表^[26] を参考に述べる。以下のデータは、HK 実験において 1 年当たり合計 2.7×10^{21} POT ($\nu : \bar{\nu} = 1 : 3$) の統計量において解析を行なったものである。また、ニュートリノ質量階層性は既に判明し、順階層であった場合を仮定している。

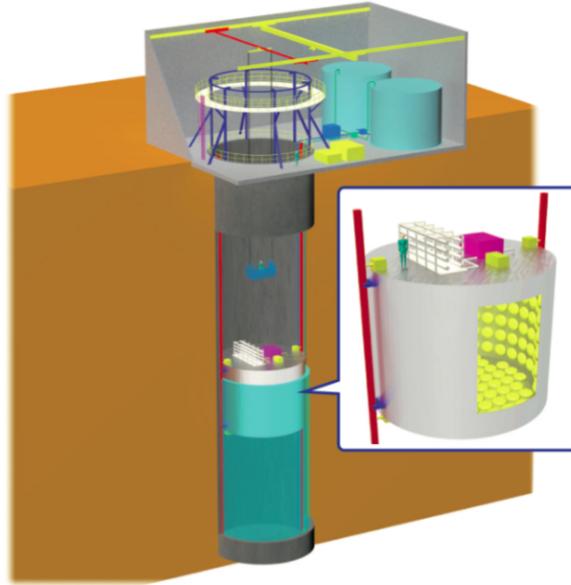


図 1.26: IWC の概念図

10 年間のデータ取得後の CP 対称性の破れに関する δ_{CP} についての感度予想を図 1.27 に示す。黒・赤・青線は δ_{CP} の値が横軸の値であったときの $\sin\delta_{CP} = 0$ という仮説に対する尤度を示している。黒、赤、青線はそれぞれ、統計誤差のみ、 ν_e と $\bar{\nu}_e$ の断面積割合の誤差を 2.7% まで減らした場合、2018 年の T2K 実験における統計誤差の場合を示している。赤線で考えると、HK 実験では 10 年の運転で δ_{CP} の 60% の領域において CP 対称性の破れを発見することができる。また、図 1.28 は、HK の運転期間に対し δ_{CP} のパラメータ空間内のどのくらいの領域に対して CP 対称性の破れを発見することができるかを示している。この図では線種の違いが各系統誤差の場合を示している。系統誤差を 2018 年の T2K 実験の誤差から改善することで最終的には 10% 多くの領域で $\sin\delta_{CP} = 0$ を棄却できる。この領域の中に δ_{CP} の真の値がある場合には、数年早く CP 対称性の破れを発見できることになり、HK 実験において系統誤差の削減が重要であることが分かる。

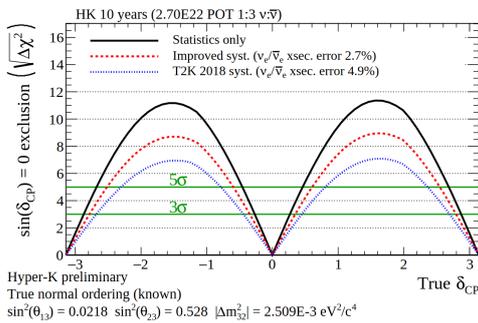


図 1.27: HK 実験 10 年の運転による CP 対称性の破れに対する感度 [26]。

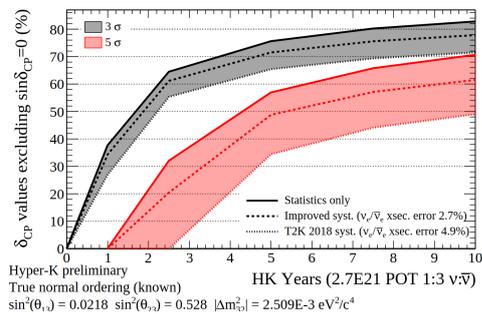


図 1.28: HK の運転期間と δ_{CP} のパラメータ空間中の $\delta_{CP} \neq 0$ である領域の割合 [26]。

また、HK 実験 10 年のデータ取得による θ_{23} のオクタントに関する感度は、図 1.29 のようになる。(a) は $\sin^2\theta_{23} = 0.5$ であった場合の尤度分布であり、(b) は、真の値が x 軸であったときに逆のオクタントを棄却

する尤度である。どちらの尤度においても、統計誤差のみの場合と比較して系統誤差の影響は大きく、 θ_{13} の測定についても系統誤差を削減することが重要であることが分かる。

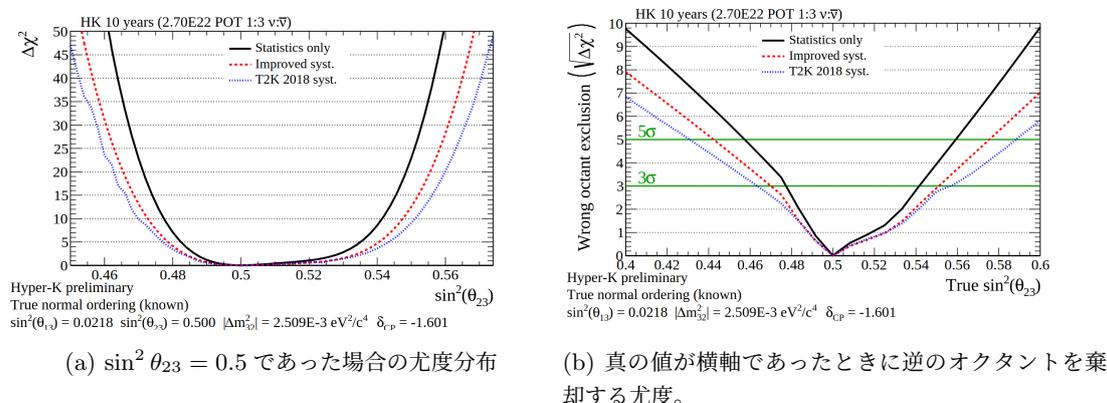


図 1.29: HK 実験 10 年間の運転による θ_{23} のオクタントへの感度 [26]。

HK 実験で目標とされる感度を達成するためには、現行の T2K 実験においても課題の 1 つとなっている系統誤差の削減が必要である。T2K 実験において、ニュートリノ反応由来の系統誤差の削減を目標として、新たに前置検出器に炭化水素をニュートリノ標的とする SuperFGD が導入された。SuperFGD は、水チェレンコフ検出器と同様の位相空間において、低運動量の粒子を捉えることで炭化水素とニュートリノ反応を精密に測定することができる。しかしながら、後置検出器である HK は水標的のニュートリノ検出器であるため、後置検出器での統計誤差を目標の 1-2%^[27] に到達するためには、ニュートリノと水の原子核の反応の理解が必要不可欠である。水をニュートリノ標的とする現行の前置検出器として、FGD2 や WAGASCI 検出器があった。しかし、前節で述べたように、SuperFGD のように短い荷電粒子の飛跡を検出することが困難である。さらに、HK 実験において新たに導入される IWCD は水チェレンコフ検出器であり、この検出器も低運動量の短い荷電粒子の飛跡を検出することができない。そのため、HK 実験では水標的でありながら、低運動量の短い飛跡も検出することが可能な、新しい前置検出器の導入が検討されている。本研究で開発する水ベース液体シンチレータ検出器は、このような前置検出器の候補の 1 つであり、次章でその特徴について詳しく述べる。

第 2 章

水ベース液体シンチレータを用いた前置検出器

この章では、まず水ベース液体シンチレータを用いた前置検出器の概要について述べ、その後検出器の主要な各要素について詳しく述べていく。最後に、今までの開発における課題について述べる。

2.1 検出器の概要

2.1.1 水を標的とする前置検出器の必要性

HK 実験では、前章で説明したように、現在の SK 検出器と比較して約 8 倍の有効質量をもつ HK 検出器による検出ニュートリノ数の増加と J-PARC 加速器のアップグレード等によりニュートリノビームが增強されることで、ニュートリノイベントレートが増大する。統計数の増加に伴い、系統誤差の影響が相対的に大きくなるため、CP 対称性の破れの発見等の HK 実験のニュートリノ振動実験における目標を達成するためには系統誤差の削減が必要であり、T2K 実験の目標値である 3–4% からさらに削減し 1–2% が目標とされている [27]。T2K 実験では、新検出器 SuperFGD を用いて低運動量の粒子を検出し、ニュートリノ反応への理解を深めることで系統誤差の削減を計画している。しかし、SuperFGD は炭化水素をニュートリノ標的とする検出器であり、水を標的とする HK 検出器とはニュートリノが反応する原子核が異なるため、原子核の違いが系統誤差となる。HK 実験の目標する感度を達成するためには、水とニュートリノ反応の精密測定が必要であり、新たな水標的の前置検出器の導入が検討されている。

2.1.2 水ベース液体シンチレータを用いた前置検出器のデザイン

HK 実験において新たに導入が検討されている前置検出器として、図 2.1 に示す水ベース液体シンチレータ (Water-based Liquid Scintillator, 以降 WbLS と略す) を用いた飛跡検出器がある。

反射材によって光学的に仕切られた $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ のセル内は、WbLS によって満たされ、それぞれのセルは波長変換ファイバによって 3 次元方向に貫かれている。WbLS 検出器は、ニュートリノビーム方向に対し、縦 56 cm、横 192 cm、深さ 184 cm 程度である SuperFGD と同じ大きさが想定されている。次に、検出器の信号検出原理を説明する。まず初めに、荷電粒子が落としたエネルギーの一部を WbLS がシンチレーション光として発光し、それぞれの波長変換ファイバによって光として読み出される。波長変換ファイバの終端には光検出器 MPPC が設置されており、ファイバから出てきた光子数を電気信号に変換し、その後、読み

だし後段の回路によってデジタル化されることで信号を記録する。

以下では、検出器の構成要素である WbLS、光反射材、波長変換ファイバ、MPPC についてそれぞれ説明する。

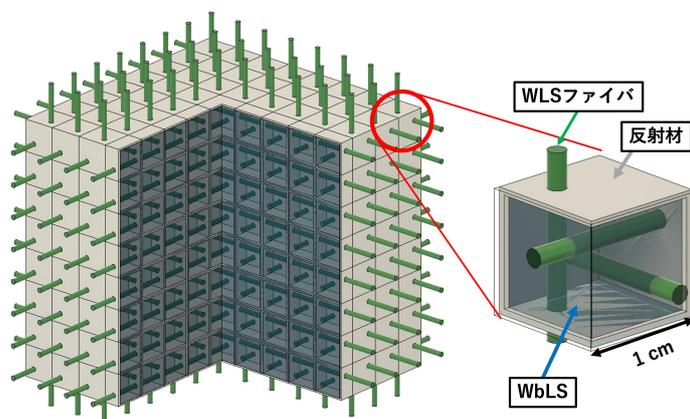


図 2.1: WbLS を用いた前置検出器のコンセプトデザイン

2.2 水ベース液体シンチレータ (WbLS)

水ベース液体シンチレータ (WbLS) は、界面活性剤を用いて、液体シンチレータを水に溶かした液体である。

界面活性剤は一分子中に親水基と疎水基の両方を持っており、親水基が水に溶け、疎水基が液体シンチレータのような有機溶媒に溶けることで、図 2.2 のようなミセルを形成する。このミセルの大きさや形状はミセル溶液を構成する物質の種類や割合によって球状や層状などに変化する。水の割合が比較的大きい場合にはミセルは球状であり、液体シンチレータの割合が大きくなるにつれてミセルのサイズも大きくなる。ミセルは、典型的には数 nm から数十 nm の大きさであり、可視光の波長よりも十分に小さい。そのため、ミセル溶液は通常透明に見える。またミセル溶液は、有機溶媒が熱力学的に安定な状態として水に可溶化している状態であり、時間経過等で分離することはないとされている。

同じ水・有機溶媒・界面活性剤の系としてミキサー等で細かく溶液を混合することで形成するエマルジョン溶液が存在する。エマルジョン溶液は、典型的にはエマルジョン粒子のサイズが数十 nm から数百 nm であり乳白色をしていることが多い。^{*1}。また、こちらは熱力学的非平衡状態であり、時間経過によって分離する。

エマルジョン溶液は、ミセル溶液と比較してより多くの溶媒を分散することのできる利点も存在するが、基本的には不透明であることから光の透過率が悪く、シンチレーション光を観測する検出器には不向きである。また、ニュートリノの反応断面積が小さいことから、ニュートリノ検出器は長期間の安定的な運転が必要であり、長期間の安定性が熱力学的に保証されているミセル溶液を用いることが重要である。

^{*1} ただし、エマルジョンの粒を $\text{\O}(10 \text{ nm})$ まで細かくしたものはナノエマルジョンと呼ばれ半透明で比較的安定となるため、ニュートリノ検出器として使える可能性もある。

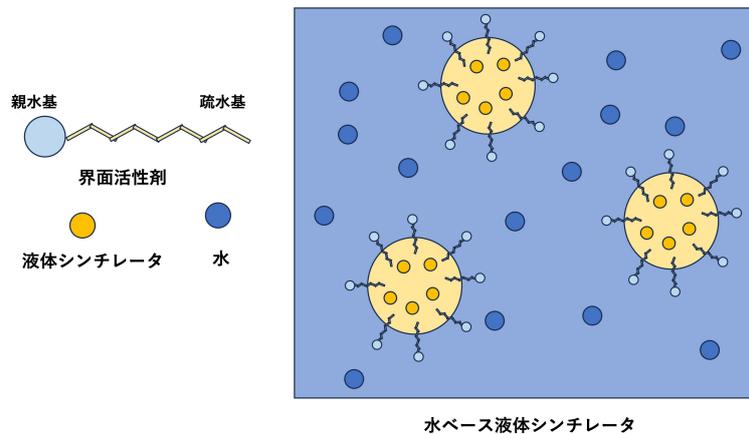


図 2.2: WbLS 中の物質の模式図

WbLS の特徴として、水に液体シンチレータを混ぜることにより、光の減衰長を長く保ったままシンチレーション光を発光・測定できることが挙げられる。特に光の波長が短い領域で減衰長を長く保つことで、チェレンコフ光とシンチレーション光の同時計測が可能である。また、液体シンチレータは有機溶媒を用いるため引火性の高いことが多いが、WbLS は水を含無ことで引火点が下がり安全性が高い。さらに、水を多く含むため、液体シンチレータのみで構成する場合と比較して安価に検出器を大型化することもできる。以上のような利点から、チェレンコフ光とシンチレーション光を同時に観測することのできる、大型の次世代ニュートリノ検出器の候補として注目されている [29], [30]。

WbLS を HK 実験の前置検出器として使用することを考えると、シンチレーション光を検出することで、水をニュートリノの標的としながら不感領域がほぼ存在しない検出器を構成することができるという利点がある。ただし、少なくない量 (数 % 数十 %) の水以外の物質を含み、背景事象である他の物質とニュートリノの散乱事象が発生する。これは検出器の構造上、イベントの発生点等の特徴により区別することが不可能なため、他の検出器と組み合わせて背景事象を差し引くことが必要である。また、上記のような大型のニュートリノ検出器は、PMT を用いて大型のタンク内部の WbLS 発光を測定する。そのため、WbLS には発光量の大きさよりも減衰長が重要である。一方で、WbLS 検出器は、 1 cm^3 のセルに区切られた WbLS の発光を波長変換ファイバによって読み出す検出原理を持つ。そのため、WbLS には減衰長よりも大きな発光量が要求される。

図 2.3 に、実際に作製したサンプルにブラックライトを照射した様子を示す。WbLS は、ブラックライト (紫外線) を吸収し青色の光を発光していることが分かる。一方で水は紫外線によって発光しないため透明に見える。

2.2.1 液体シンチレータ

液体シンチレータは大きくわけて溶媒、蛍光物質、波長変換剤という 3 つの役割をもつ物質から構成されている。ただし、波長変換剤は発光スペクトルが光検出器の感度波長に合わせたものが加えられ、検出器の感度波長によっては加えられないこともある。本研究では、液体シンチレータの溶媒としてプソイドクメン (PC)、蛍光物質として 2,5-ジフェニルオキサゾール (PPO)、波長変換剤として 1,4-ビス (2-メチルスチリル) ベンゼン (Bis-MSB) を用いている。



図 2.3: WbLS(左) と水(右) にブラックライトを照射した様子

液体シンチレータの発光原理について説明する。まず、液体シンチレータの大部分を占める溶媒分子が、荷電粒子の落とすエネルギーの一部を吸収し励起する。次に溶媒分子から蛍光物質に励起エネルギーが移動し蛍光物質が脱励起する際にシンチレーション光を発光する。その後、波長変換剤が一次シンチレーション光を吸収して励起し、脱励起の際により波長の長いシンチレーション光を放出する。溶媒分子から蛍光物質に励起エネルギーが移動し、発光する過程は、FRET(Förster Resonance Energy Transfer)、もしくはデクスター機構と呼ばれる過程によって説明される^{[31]–[33]}。FRETの場合は、溶媒分子の放出スペクトルと蛍光物質の吸収スペクトル間の共鳴によって起こり、デクスター機構の場合は、直接衝突により励起電子を交換することにより、エネルギー移譲が発生する。どちらの場合にも共通して、溶媒分子と蛍光物質間の距離が重要であり、距離が短いほどこれらの過程の発生確率が大きくなる。そのため、蛍光物質をより多く液体シンチレータに混合すると、溶媒分子との平均距離が短くなるため発光量は増加する。しかし、過剰な量の蛍光物質を混合すると、蛍光物質の発光効率が100%でないために、蛍光物質が放出した光を自己吸収し、光を再発光しないことによる損失が発生し、発光量が少なくなってしまう。波長変換剤も同様に、多く加えることで自己吸収が発生するため、適度な量を混合する必要がある。典型的な液体シンチレータでは、蛍光物質は溶媒に対して0.1%程度加えられ、波長変換剤は1 ppm程度加えられる。

2.2.2 界面活性剤

界面活性剤はWbLSにとっては、水に液体シンチレータを可溶化させる非常に重要な物質である。界面活性剤は親水基と疎水基を一つの分子に含む物質であるが、主にその性質によって、アニオン界面活性剤、カチオン界面活性剤、ノニオン界面活性剤、両面活性剤に分けることができる。アニオン界面活性剤は、溶媒に溶かした際に陰イオンとして振る舞うものであり、同様にカチオン界面活性剤は陽イオンとして振る舞う物質である。また両性界面活性剤は、アルカリ性溶液ではアニオン界面活性剤、酸性溶液ではカチオン界面活性剤の性質を示すものである。これらの3つをまとめてイオン性界面活性剤と呼ぶが、これらの界面活性剤の特徴として、その界面活性剤としての振る舞いが水中の水素イオン濃度に依存する。ノニオン界面活性剤はイオンにならない界面活性剤であり、水素イオン濃度の影響を受けない。界面活性剤の性能を表す重要な指標の一つに、ミセルの最低形成濃度を示す臨海ミセル濃度(c.m.c.)があるが、非イオン界面活性剤は、他の種類の界面活性剤と比較すると、c.m.c.が小さい傾向にある。つまり、低濃度における界面活性能力に優れており、

WbLS を作製する際に使いやすい界面活性剤である。ただし、詳細は 5.1 節で説明するが、温度に対する性質の依存性が強く、実際に WbLS 検出器を運用する際には温度の安定性が重要となる。

2.2.3 WbLS の作製手法

WbLS の作製手法は以下のとおりである。また、本研究では、水として JIS 規格 A2-A3 に相当する規格の純水を用いている。

1. まず、WbLS に混合する液体シンチレータの作製を行う。溶媒・蛍光物質・波長変換剤をビーカーに加え混合する。蛍光物質や波長変換剤は固体のまま入れ、ビーカーを超音波洗浄機に浸けて細かく粉砕して溶かす。
2. 次に、水・液体シンチレータ・界面活性剤をホットスターラーを用いて混合する。スターラーとは、液の中に入れた磁石でできた回転子を磁力によって回し攪拌する装置である。この回転子はセラミックで覆われており、WbLS 中に溶け出すことはない。ホットスターラーはさらに攪拌する際の温度を設定できる。ただし、混ぜる物質の種類や割合にも依存するが、基本的には常温での攪拌で十分である。
3. 溶けていない界面活性剤の細かい塊が残っている場合があり、その場合は再度超音波洗浄機を用いて細かい残存物質を砕く。
4. 溶けるまで手順 2 と 3 を繰り返す。

2.3 反射材

反射材はシンチレーション光を反射し検出光量を増やす役割が求められる。そのため、可能な限り反射率の高い素材で作ることが好ましい。また、検出器中の有感領域を大きくするために、小型セルの形を維持することのできる強度を保ちながら十分薄い必要がある。さらに、WbLS に直接接触するため WbLS を構成する薬品に対して溶けないことが求められる。

WbLS 検出器のセルは、1つのセルが $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ という小ささでありながら、内側は 1 mm 程度の厚さの空洞の構造を持ち、さらに WLS ファイバを通すための穴が空いているという複雑な形状になる。そのため、反射材の造形方法としては細かな造形を得意とする 3D プリンタによる製作を検討している。3D プリンタであれば、セルを 1 つずつ造形するのではなく、一度に数十個のセルが連結した構造を造形することも可能であると考えており、検出器構築の際の手間の削減が可能であることを期待している。3D プリンタの造形方法にはさまざまなものがあるが、ここでは現在利用を検討している、材料押出方式、光造形方式、粉末焼結積層造形について述べる。

材料押出方式

熱によって溶かした材料をノズルから射出し層状に重ねていくことで造形を行う。浮いた構造を作製するにはサポート材が必要であり、造形姿勢を工夫することでセルの中空構造を造形することは可能であるが、安定して造形することが比較的困難である。ただし、機種によってはサポート材を水に溶ける材料で造形することも可能で、中空構造を安定して造形することができるようになる可能性もある。

光造形方式

紫外線によって固まる材料に 1 層ずつ紫外線を照射し、層状に重ねていくことで造形を行う。材料押出方式と同様に、安定した造形のためにはサポート材が必要である。光造形方式の利点としては、光を用

いていることで積層ピッチを他のものより細かくすることができ、熱による収縮もないことから比較的造形精度が良いことが挙げられる。ただし、素材によっては造形後に紫外線を表面に照射する2次硬化が必要であり、この場合複数セルの連結造形は困難になる。

粉末焼結積層造形方式

粉末の材料に赤外線のレーザーによって焼結し、その上に粉末を敷き詰めることを繰り返し、層状に重ねていくことで造形を行う。この方式の利点として、焼結していない粉末によって構造が支えられることで、サポート材なしに造形することが可能な点である。そのため、造形後に焼結していない粉末を取り除くことが可能であれば、中空構造を安定して造形することができる。ただし、素材・構造によってはレーザーによって高温に熱し焼結することから大きな熱収縮が発生し、造形精度が悪くなることがある。また、他の方式に比べて一般的ではなく、造形コストも掛かってしまう。

2.4 波長変換ファイバ

波長変換ファイバ (Wave Length Shifting、以降 WLS ファイバと略す) は、ファイバに入ってきた特定波長の光をより長い波長に変換し、光信号として伝搬させる光ファイバの一種である。通常の光ファイバと異なり、側面から入力される光に対しても吸収・再発光することで捕集することができる (図 2.4)。日本では主にクラレ株式会社によって開発・製造されている^[34]。ここでは、SuperFGD でも使用されているクラレ社製のマルチクラッドタイプの Y-11(200)(以下 Y11 と略す) を念頭に紹介する。マルチクラッドとは、ポリスチレンのコアが PMMA とフッ素樹脂の二層のクラッドによって覆われていることを示している。それぞれの部材の屈折率は、図 2.1 に示すように、内側に行くほど大きくなり、これによりシングルクラッドよりも多くの二次光子を捕集することが可能である。また、Y11 は図 2.5 のような発光・吸収スペクトルを持っており、発光スペクトルは MPPC の感度波長 (図 2.8) のピーク波長、吸収スペクトルは典型的な有機シンチレータの発光波長とよく合致している。

WbLS 検出器で使用する際には、WLS ファイバは直接 WbLS 中に漬けられるため、その素材は WbLS に溶けないことが必要不可欠である。Y11 の外側のクラッドであるフッ素樹脂は薬品耐性の比較的高い物質であり、これまでの使用の際に溶解等の様子は見られない。しかし、内側のクラッドである PMMA やポリスチレンは、WbLS によって亀裂が発生する、もしくは溶解することが分かっており、Y11 ファイバを使用する際には外側のクラッドに傷が付かないよう注意が必要である。

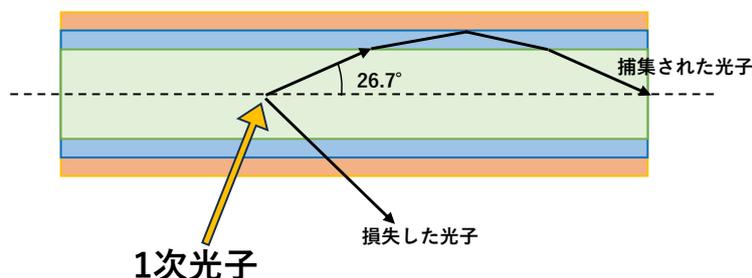


図 2.4: WLS ファイバの光子捕集の様子 (クラレ社カタログ^[34] を参考に作成)

表 2.1: WLS ファイバ Y11(マルチクラッド) の基本特性 (クラレ社カタログ [34] より作成)

コアの屈折率	1.59
内側クラッドの屈折率	1.49
外側クラッドの屈折率	1.42
減衰長	> 3.5 m
捕集率	5.4%
吸収ピーク波長	430 nm
発光ピーク波長	476 nm

Y-7, Y-8, Y-11

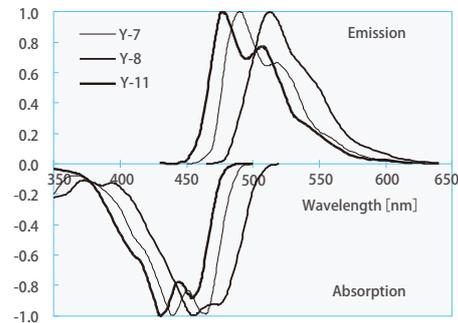


図 2.5: 波長変換ファイバ Y シリーズの吸収スペクトルと発光スペクトル。(クラレ社カタログ [34] より引用) 濃い線が Y11 のものを表す。

2.5 MPPC

MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) は、その名前の通り複数のピクセルによって光子の数を計測することができる半導体検出器で、SiPM(Silicon Photo Multipliers) と呼ばれる検出器である。MPPC の 1 ピクセルは、SPAD(Single Photon Avalanche Diode) と呼ばれる、APD(Avalanche Photo Diode) とクエンチング抵抗直列につなげた素子によって構成されている。MPPC は浜松ホトニクス [35] 社によって開発・製造が行われている。この光検出器の特徴には、比較的低電圧 (< 100 V) で動作し、高増幅率 ($O(10^6)$)、高検出効率 (数十%)、高速応答 ($O(\text{ns})$)、磁場中でも動作可能といったものがある。

2.5.1 MPPC の動作原理

まず、PD(Photo Diode) が光子を検出する原理から説明する。図 2.6 のように、PD ピクセルに逆電圧を印加することで、ダイオードの PN 接合の間には空乏層が現れる。この空乏層に光子が入射する事で空乏層の電子が励起され、電子・正孔対が生成される。この電子、正孔は逆電圧により、それぞれの電極に移動し電流が流れる。この電流を測定することで PD が光子を検出したことが分かる。PD では、空乏層に出来た電子・正孔対の数、つまり検出した光子に比例した電流を得ることが可能である一方、電子は増幅されず微弱な光を検出することは困難である。

APD は、PD に電流の増幅機能を持たせたものである。APD では、PD よりも大きな逆電圧をかけることで、電子が電極までドリフトする間にアバランシェ増幅を起こす。これにより比較的大きな電流を得ることができる。ガイガーモードの APD では更に、APD にブレークダウン電圧*2より高い逆バイアス電圧を印加する。これにより、APD は一時的に、ブレークダウン電圧以上の電圧が掛かっているが、電流がほとんど流れない準安定状態となる (図 2.7①の状態)。入射した光子によって電子・ホール対が生成されると、この準安定状態が崩れ、電流が流れる状態となる (図 2.7①→②)。SPAD では、APD にクエンチング抵抗を直列につな

*2 通常ダイオードに逆方向に電圧をかけても微小な漏れ電流しか流れないが、ある電圧を超えると急激に大きな電流が流れるようになる。この現象をブレークダウンと呼び、ブレークダウン電圧は、ブレークダウンが起こる電圧である。

げており、この抵抗に電流が流れることで、APD にかかる電圧は一時的に下がる (図 2.7②→③)。そして再び電流が流れていない状態になるので、電圧が上がり準安定状態へと戻る (図 2.7③→①)。SPAD ではこのサイクルの間に流れる電流を検出することで光子が検出したことが分かる。つまり、検出される信号は逆電圧と APD, クエンチング抵抗の特性にのみ依存し、入射した光子数には依存しない。MPPC は、この微小な SPAD を複数個並列に並べることで、検出面に入射した複数の光子数の計測を可能にしている。

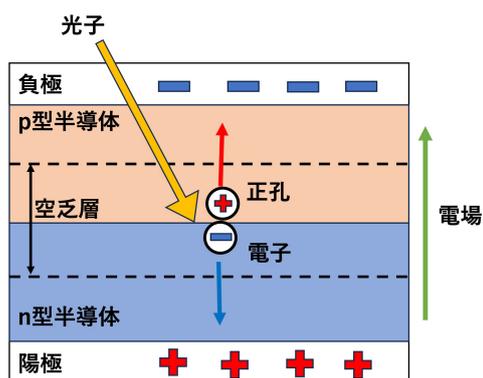


図 2.6: Photo Diode の光子検出原理。

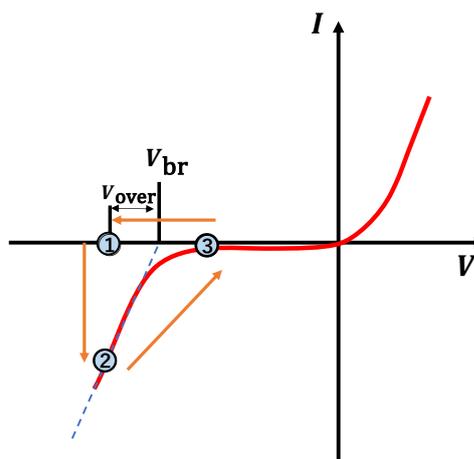


図 2.7: SPAD の電圧・電流特性。

2.5.2 MPPC の特性

MPPC の特性としては、以下のようなものが挙げられる。また、表 2.2 に以下の特性の SuperFGD において使用されている MPPC(S13360-25PE) での値を示す。

光子検出効率 (PDE)

MPPC の表面に入射した光子が検出される確率である。MPPC 表面のうち光子を検出可能な面の割合を示す開口率、光子が吸収され電子・正孔対が生成される量子効率、電子がアバランシェ増幅を起こす確率の積で記述することができる。一般的に MPPC のピクセルサイズが大きいほど検出素子以外の割合を下げるため、開口率は大きくなる。ただし、同一面積を占めるピクセル数が減るため、検出光子数のダイナミックレンジは減少する。また、量子効率が主に半導体の性質に依存するため、PDE は図 2.8(a) のように検出する光子の波長に依存する。SuperFGD に使われている MPPC(S13360-1325PE) は紫外～可視光に感度領域をもち、そのピーク波長は 450 nm (青色) 程度である。さらに、アバランシェ増幅を起こす確率は逆電圧が大きいほど大きくなることから、検出効率はオーバー電圧にも依存する (図 2.8b)。

増倍率

増倍率は、素電荷に対して信号が何倍に増幅しているかを表す。MPPC の増倍率はおおよそ $\mathcal{O}(10^6)$ 程度である。図 2.8(b) の実線のように、増倍率はブレークダウン電圧 (V_{br}) と印加電圧 V の差を表すオーバー電圧 ($V_{over} = V - V_{br}$) に比例する。逆に増倍率の逆電圧依存性をプロットし、増倍率が 0 になる点を外挿することで MPPC のブレークダウン電圧を推定することができる。

ブレークダウン電圧

先述のようにブレークダウンが起こる電圧のことである。MPPC のブレークダウン電圧は、温度が上昇すると大きくなるため、印加電圧を一定にしたままオーバー電圧を保つためには MPPC の温度を保つことが重要である。

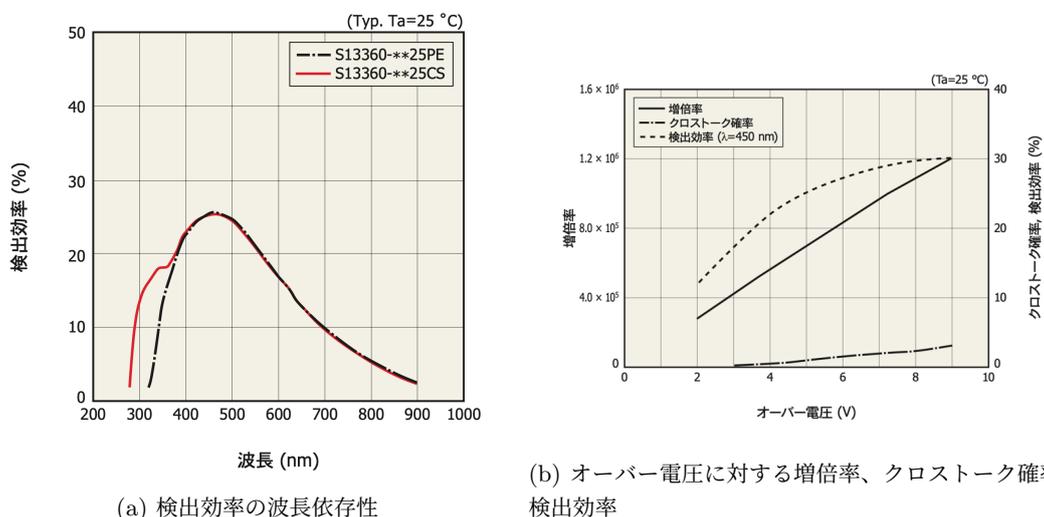


図 2.8: MPPC S13360 シリーズの基本特性 (浜松ホトニクス S13360 シリーズ データシートより [36])。左図黒の点線が SuperFGD において用いられている MPPC の特性を表している。また、ピクセルサイズが 25 μm のものを示している。

クロストーク MPPC の 1 ピクセルに光子を入射した際に生成した電子が、アバランシェ増幅を起こす途中で 2 次光子を発生させることがある。この 2 次光子が、他のピクセルにおいて検出されると、1 次光子を吸収したのと同様の信号が出力される。この現象はクロストークと呼ばれ、1 次光子の検出とほぼ同時刻に起こるため、実際に入射した光子よりも大きい信号が検出されることになる。クロストークを起こす確率は、典型的には数 % であり、オーバー電圧への依存性をもつ (図 2.8(b))。

アフターパルス MPPC のピクセルで電子がアバランシェ増幅を起こす過程で、結晶欠陥に電子や正孔が閉じ込められることがある。閉じ込めから解放された電子や正孔は再びアバランシェ増幅を起こす。この閉じ込めの寿命は 1 次光子によるパルスよりも遅いため、1 次パルスの後にアフターパルスとして観測される。

ダークカウント MPPC では、入射光子によって生成された電子・正孔対だけではなく熱的に励起した電子・正孔対についても同様にアバランシェ増幅が発生し、パルスが発生する。また、このパルスは、入射光子に関わらずランダムなタイミングで発生し、通常のパルスと見分けがつかないため信号が歪んだり、偽の信号を検出してしまう原因となる。また、ダークカウントは熱的励起によって発生するため MPPC の動作温度が大きいほど頻度が多くなる。

2.6 これまでの検出器開発における課題点

まず、実際の WbLS 検出器を作製した場合に、1 セル、1WLS ファイバ当たりに、どの程度の検出光量が期待されるかが分かっていない点が挙げられる。これまでの WbLS の開発は、すべて宇宙線を用いて発

表 2.2: MPPC(S13360-1325PE) の推奨動作電圧、25°C での各特性の値。(浜松ホトニクス S13360 シリーズ データシートより作成 [36])

光子検出効率 [%]	25
増倍率 [%]	7.0×10^5
ブレイクダウン電圧 [V]	53 ± 5
クロストーク確率 [%]	1
アフターパルス確率 [%]	記載なし
ダークカウントレート [/s]	70×10^3

光量を測定していた。宇宙線のイベントレートの低さから、 $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ の実際の大きさのセルではなく、 $1 \times 1 \times 5 \text{ cm}^3$ の大きさのセルにファイバを 1 本通したものと等、実際の WbLS 検出器とは異なるものであった。そのため、実際のセルの大きさで検出光量を測定し、現状の WbLS 検出器の構成要素で十分であることを確かめることが課題となっている。また、WbLS の開発段階において、一部のサンプルで当初は透明な 1 液相であったが、数ヶ月後に水と液体に分離してしまうものが確認されている [37]。ミセル溶液は原理的には熱力学的に安定しているはずであるが、WbLS が実際にミセル溶液になっていて、ミセルが WbLS 中に均等に分散しているのか確かめる方法が無いため、課題となっている。さらに、現状反射材についての研究を行っていないことも挙げられる。反射材は WbLS 検出器の検出光量に大きく関わってくると考えられるため、これまでの反射材で検出光量が十分でなかった場合は、反射材の改良も行うべきである。反射材としては、3D プリント可能な素材の中で WbLS に対して侵されず、可能な限り反射率の高いものであるべきであり、そういった反射材の探索も課題となっている。

第3章

WbLS 検出器の試作機を用いたビームテスト

3.1 ビームテストの概要

2022年10月27日から29日にかけて、東北大学電子光物理学研究センター (research center for EElectron PHoton science, ELPH)^[38] において、陽電子ビームを用いて WbLS 検出器の小型試作機のテストを行った。

3.1.1 目的

実験室では主に宇宙線を用いて検出光量の測定を行っているが、実際の WbLS 検出器のセルのサイズである $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ ではイベントレートが限られるため、大きなサイズの WbLS セルを用いて WbLS の検出光量を評価していた。陽電子ビームを用いることで、 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ の大きさのセルでも十分な統計を得ることができる。まずビームテストにおける第一の目標は、WbLS 検出器のセルサイズで荷電粒子による発光を観測することである。発光を観測し、飛跡を実際に見ることで、WbLS 検出器が飛跡検出器として使用可能なことを確かめる。次に、複数の WbLS サンプルで検出光量を測定し、どのサンプルが最も適しているか比較を行う。最後に、WbLS の開発段階において一部の WbLS で水と油の層に分離してしまうものが確認されている。分離していない WbLS においてもミセルが WbLS 中で偏って分布していた場合は、セル毎に検出光量が大きく異なってしまったり、セルの中の位置によって発光量が異なってしまいう可能性がある。陽電子が通過した位置による検出光量の依存性を測定し、WbLS 中の発光する場所が偏っているか確認することも目的の1つである。

3.1.2 テストビームライン

ELPH の研究施設を図 3.1 に示す。今回のビームテストで用いた加速器はこのうち、入射用線形加速器、BST リングである。入射用線形加速器で最大 100 MeV まで加速された電子は BST リングに入射し、最大 1.3 GeV まで加速される。加速された電子に磁場をかけること制動放射 γ 線が生成され、陽電子と電子が γ 線の対生成によって生成される。対生成で生成された電子・陽電子のうち、荷電粒子除去用の磁石 (図中 RTAGX) を用いて電子を取り除くことで、GeV ガンマ照射室において陽電子のビームとして利用することが可能である。

また、今回使用したビームの特性としては、陽電子のエネルギーは 500 MeV 、ビームの幅は 7.5 mm 、イベン

トレートは 500 Hz 程度であった。

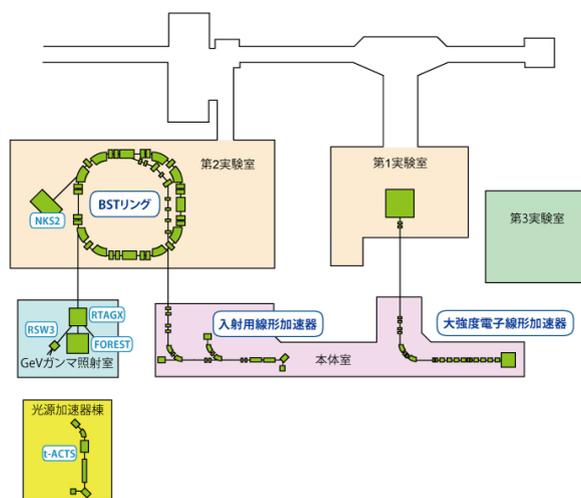


図 3.1: ELPH の研究施設の概要 [38]

3.1.3 検出器のセットアップ

ビームテストに用いた検出器のセットアップの概要を図 3.2 に示す。陽電子ビームの上流から、上流ホドスコープ、WbLS 検出器の小型試作機、下流ホドスコープの順に並べられている。上流下流のホドスコープによって陽電子が通過した位置を測定することで、WbLS 検出器の小型試作機などの位置を通過した火を測定している。また、検出器からの光信号は全て MPPC によって検出し、後述の EASIROC モジュールによって処理・記録している。

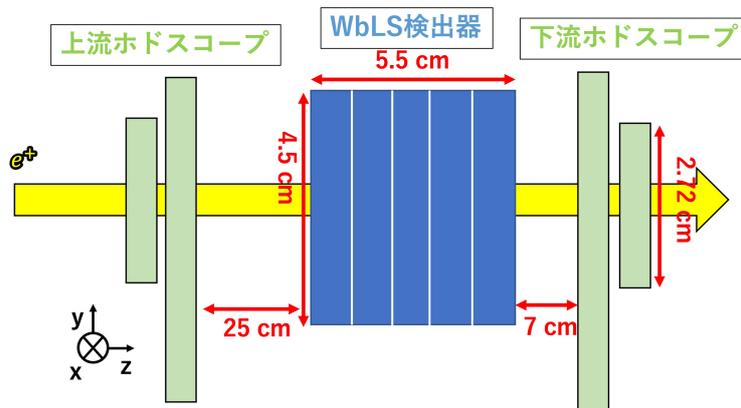
WbLS 検出器の小型試作機

WbLS 検出器の小型試作機 (以下、WbLS 試作機とする) は、図 3.3(a) に示すように、小型容器をビーム方向に 5 層積層した構造をしており、それぞれの容器に別の WbLS サンプルを入れることができるようになっている。また、層の間には光を通さないようにブラックシートが挟まっている。別々の WbLS を入れた容器を並べた小型試作機を 2 種類用意し (WbLS 試作機 1、WbLS 試作機 2 と呼ぶ)、ビームテストを行った。

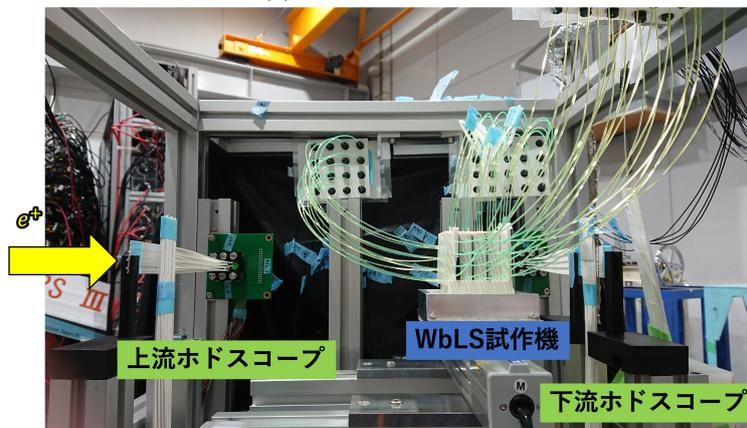
小型容器の素材は白色の PMMA 樹脂であり、ジータック社 [39] に依頼し、光造形方式の 3D プリンタで作製した。各容器の内部には、9 mm×9 mm×9 mm の空洞が、ビームと垂直方向に縦横方向にそれぞれ 4 個ずつ、計 16 個存在し、それぞれの空洞は厚さ 1 mm の反射材によって区切られている。これは反射材が 5 mm の場合の WbLS 検出器と同じセル構造になっている。

図 3.3(b)、(c) に示すように、容器は WLS ファイバを 3 方向から通すように穴を開けられた 24ch 読み出し容器と、2 方向から通すように穴を開けられた 8ch 読み出し容器の 2 種類存在している。WbLS 試作機のビーム上流から 1 層目には 24ch 読み出し容器、2 層目から 5 層目には 8ch 読み出し容器が置かれている。m 容器の穴は WLS ファイバを通した後にオプティカルセメントによって埋められている。

WLS ファイバはクラレ社製の直径 1 mm のマルチクラッドタイプ Y11 ファイバを使用している。容器から約 40 cm 伸びる WLS ファイバは、図 3.2 のように曲げられて上方に伸ばされ、専用の光学コネクタ [40] を



(a) セットアップ概要図



(b) セットアップの実際の様子

図 3.2: ビームテストにおける検出器のセットアップ概要

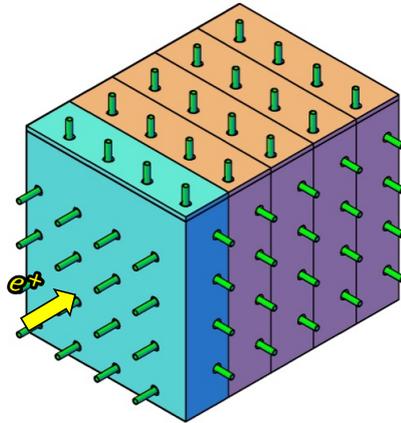
用いて MPPC に接続されている。また、MPPC は、浜松ホトニクス社製の S10362-13-050C を用いており、逆電圧として 70 V 程度を印加している。

使用した WbLS サンプル

WbLS 試作機のビームテストにおいて使用した WbLS サンプルの組成を表 3.1 と 3.2 に示す*1。それぞれは、WbLS 試作機 1、WbLS 試作機 2 に封入した WbLS サンプルである。また、ドデシル硫酸ナトリウム (SDS) はアニオン界面活性剤であり、安定性を高めるために主な界面活性剤の他に少量添加されている。

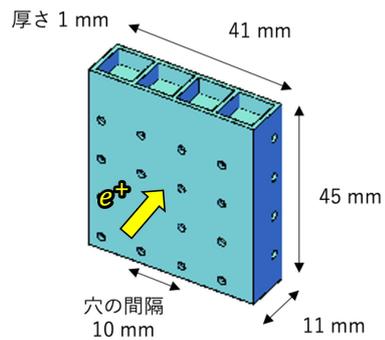
WbLS 試作機 1 では、先頭にこれまでの開発 [37] において高発光量であったサンプル WbLS1 を封入し、2 層目以降は界面活性剤が発光量に与える効果を測定するために、界面活性剤の種類を変更した WbLS サンプルを封入している。ただし、WbLS 試作機 1 の 5 層目は WbLS が入った小型容器ではなく、SuperFGD のプラスチックシンチレータキューブ 16 個で出来た層が置かれている。これは、もし WbLS 試作機で発光が確認できなかった場合に、ビームデータを正しく取得できていることを確認するために設置した。

*1 質量によって WbLS に含まれる割合を計算しているため、より正確には wt % と書くべきであるが、本論文では特に断りのない場合 % を質量パーセント濃度の意味として用いている。



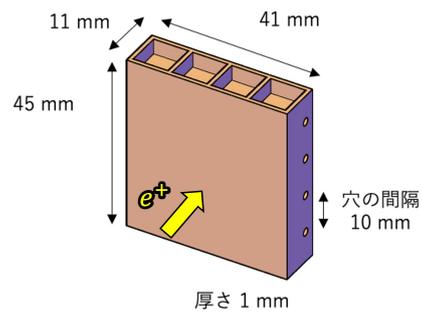
(a) WbLS 試作機

24ch読み出し容器



(b) 24ch 読み出し容器

8ch読み出し容器



(c) 8ch 読み出し容器

図 3.3: WbLS 試作機のデザイン [37]

WbLS 試作機 2 では、界面活性剤の割合が検出光量に与える効果を測定するために、界面活性剤の割合を少しずつ変えたサンプルを 4 層目まで封入している。また、5 層目には WbLS1 と同じく以前の開発において検出光量の大きかったサンプルである WbLS2 が封入されている。

表 3.1: WbLS 試作機 1 に封入されたサンプル。5 層目には SuperFGD のプラスチックキューブが置かれている。また、層順は陽電子ビームの上流から数えたものである。SDS は界面活性剤である。

呼称	層順	水 [%]	SDS [%]	界面活性剤 2	[%]	PC [%]	PPO [%]	Bis-MSB[%]
WbLS1	1	68.1	2.7	Triton X-100	20.4	7.6	1.2	0.01
Triton	2	70.0	5.0	Triton X-100	16.0	8.5	0.6	0.01
TERGITOL	3	70.0	5.0	TERGITOL NP-10	16.0	8.4	0.6	0.01
LAS	4	70.0	5.0	直鎖アルカリベンゼン スルホン酸ナトリウム	16.1	8.3	0.6	0.01

表 3.2: WbLS 試作機 2 に封入されたサンプル。層順は陽電子ビームの上流から数えたものである。また、SDS、Triton X-100 は界面活性剤である。

呼称	層順	水 [%]	SDS [%]	Triton X-100 [%]	PC [%]	PPO [%]	Bis-MSB[%]
Triton22	1	67.0	2.0	22.0	8.3	0.6	< 0.01
Triton20	2	69.2	2.0	19.8	8.4	0.6	< 0.01
Triton18	3	70.9	2.0	18.2	8.4	0.6	< 0.01
Triton16	4	70.0	5.0	16.0	8.5	0.6	< 0.01
WbLS2	5	67.0	0.8	20.0	11.0	1.2	< 0.01

ホドスコープ

ホドスコープは WbLS 試作機の上流と下流に設置されており、データ取得のトリガーと陽電子が通過する位置を記録する役割を持っている。それぞれのホドスコープは断面が 1.7 mm×1.7 mm で長さが 20 cm のプラスチックシンチレーションファイバを 16 個並べたもの (以下、シンチレーションファイバ層と呼ぶ) をビーム軸と垂直な方向に縦横に 1 つずつ並べた構造をしている (図 3.4 手前の検出器)。これにより、2 つのシンチレーションファイバが重なった 16×16 の有効領域ができ、この領域において 1.7 mm×1.7 mm の精度で 2 次元のヒット位置を知ることができる。この有効領域は 26 mm×26 mm での大きさであり WbLS 試作機の 2 セルを覆うのに十分な大きさとなっている。また、セルの大きさ 10 mm を考えると、 $10/1.7 \approx 6$ であり、1 セルは 6×6 の領域に分けられる。ホドスコープからの光信号は、 $4 \times 4 = 16$ ch が並べられた MPPC アレイを 4 つ使用して読み出している。

EASIROC モジュール

今回のビームテストでは、WbLS 試作機とホドスコープを共に MPPC を用いて光信号を電気信号に変換しており、MPPC は EASIROC モジュールによって電圧の印加、信号の読み出しを行なった。EASIROC モジュールは、複数の MPPC の電圧の印加・信号読み出しをパソコン等から制御することのできるモジュールである [41]。1 台に 2 つの EASIROC チップが搭載されており、1 チップごとに 32ch の MPPC を読み出せることから、1 台で 64ch の MPPC の電圧の印加、信号の読み出しが可能である。本ビームテストでは、WbLS 試作機が $24 + 8 \times 4 = 56$ ch、ホドスコープが $16 \times 4 = 64$ ch であり、EASIROC モジュール 2 台を用いた。

EASIROC モジュールの特徴について述べる。MPPC の信号はその波高値が 12 bit の ADC 値で記録され



図 3.4: ビーム上流から見たセットアップ。

る。通常の ADC の他に増倍率の低いローゲイン ADC 値も記録しており、幅広いダイナミックレンジの実現が可能である。また、波形が閾値を超えた時刻と閾値を下回った時刻も TDC によって記録されている。さらに、それぞれのチャンネルの EASIROC 内のディスクリミネータの出力に対し、論理処理された信号をトリガー出力から出すこともできる。本ビームテストでは、この機能を用いてトリガーの発行を行った。

次に、EASIROC モジュールのデータの取得方法について述べる。EASIROC モジュールでデータを取得する際には HOLD, TSTOP, ACCEPT と呼ばれている 3 種類の信号を順に入力する必要がある。まず HOLD 信号は、MPPC の波高値をホールドし、記録するタイミングを知らせるためのものであり、この信号がずれてしまうと MPPC からの信号を正しく取得することができない。次に、TSTOP 信号は TDC の原点を決めるためのものであり、この時刻までの時間差が各種 TDC 値として記録される。最後の ACCEPT 信号は、次の ADC サイクルの開始を知らせるためのものであり、この信号が来るまで HOLD 信号でデータ取得を行わないようになっている。

3.1.4 トリガー・データ取得

ビームテストにおける信号の回路図を図 3.5 に示す。データ取得のトリガーは、ホドスコープにおいて 2 ch 以上に 3.5 p.e.(photon equivalent, 1 光子相当の信号) 以上の閾値を超えるヒットがあった場合に発行されるように設定した。またトリガーは、Busy 信号とのベトをとることで、2 つの EASIROC モジュールがデータをとっていない場合のみ有効になるようにしている。トリガーはそれぞれ 3 つのディレイによって遅らせられ、HOLD、TSTOP、ACCEPT の順に EASIROC モジュールに入力される。HOLD 信号は、MPPC からの信号の波高を取得するために重要な信号であり、データ取得の事前準備として、ホドスコープのトリガー信号を遅らせることで調整し、WbLS 試作機の EASIROC モジュールに HOLD 信号が適切なタイミングで来ていることをプラスチックシンチレータを用いて確認した。

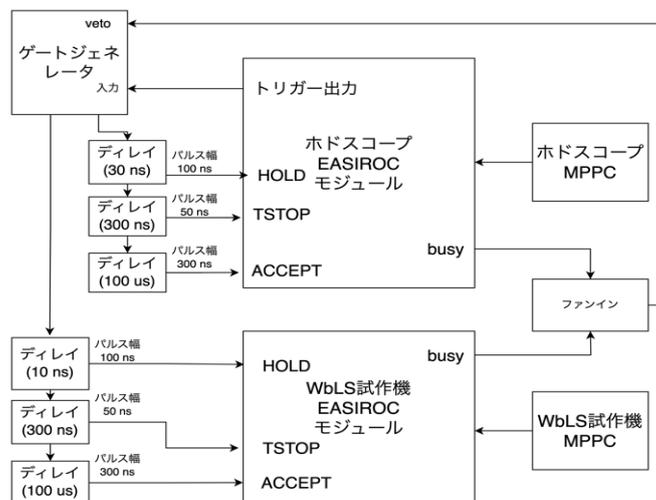


図 3.5: ビームテストにおける回路

3.2 WbLS 試作機のデータの解析手法

3.2.1 MPPC のキャリブレーション

第 2.5 節で説明したように、MPPC は検出された光子数に比例した信号を出力する。そのため、MPPC の信号を ADC 値として記録すると各光子数に対応したピークが現れる。本測定においては、図 3.6 のように、各光子ピークを複数のガウス分布によってフィッティングし*2、1 光子間隔に対応する ADC 値 ($g_{1 \text{ p.e.}}$) をガウス分布の平均値間隔として求めた。また、0 光子 (0 p.e.) に対応する ADC 値 ($ADC_{0 \text{ p.e.}}$) を、図 3.7 のように、ガウス分布に従う中心領域と下方に伸びる尾をもつクリスタルボール関数でフィッティングを行い、ガウス分布の平均値として求めた。こうして求めた値から、検出光量値 L_{WbLS} を

$$L_{\text{WbLS}}[\text{p.e.}] = \frac{ADC_{\text{WbLS}} - ADC_{0 \text{ p.e.}}}{g_{1 \text{ p.e.}}}$$

として計算した。

3.2.2 ホドスコープによるイベント選択

ホドスコープのデータを用いてイベント選択を行うことで、得られたデータのうち特定のセルまたはセル内の特定の位置を陽電子が通過したイベントを取り出す。ホドスコープによるイベント選択の概念図を図 3.8 に示す。まず各イベントについて、各シンチレーションファイバ層で、1 つのファイバのみが閾値を超えたイベント (ヒット) のみであることを要請する。この条件を課すことで、陽電子が同時に 2 個通過したイベントやノイズによる影響を取り除き、陽電子 1 つのみが WbLS 試作機を貫通する、純粋なイベントのみを取り出すことができる。次に、それぞれのシンチレーションファイバ層のヒット情報を合わせることで、上流と下流の

*2 本研究において関数を用いてフィッティングする場合は全て、欧州原子核研究機構 CERN が開発する解析フレームワーク ROOT^[42] を用いて行っている

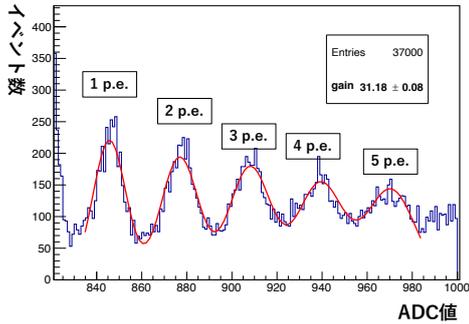


図 3.6: ADC 分布における光子ピークのフィッティングの様子

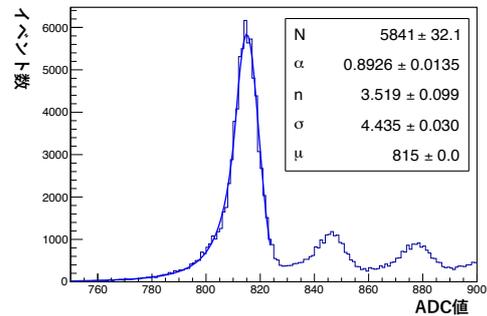


図 3.7: 0 光子ピークのフィッティングの様子

ホドスコープにおいて陽電子が通過した位置を決定する。500 MeV の陽電子は、5 cm 程度の WbLS 試作機をほとんど散乱されずに貫通するため、上流と下流のホドスコープの同じ XY 座標 (座標の定義は図 3.8) を通過したイベントを選択することで、陽電子が WbLS 検出器の特定の位置を通過したイベントを選択することができる。

典型的なホドスコープの光量分布を図 3.9 に示す。イベント取得のトリガー条件として、3.5 p.e. を課していたため、4 p.e. 以上からノイズではない意味のあるデータが存在する。本解析では、ノイズによると思われる 3 p.e. のデータが十分に小さいことから、閾値はトリガーと同程度の 3.5 p.e. を設定した。

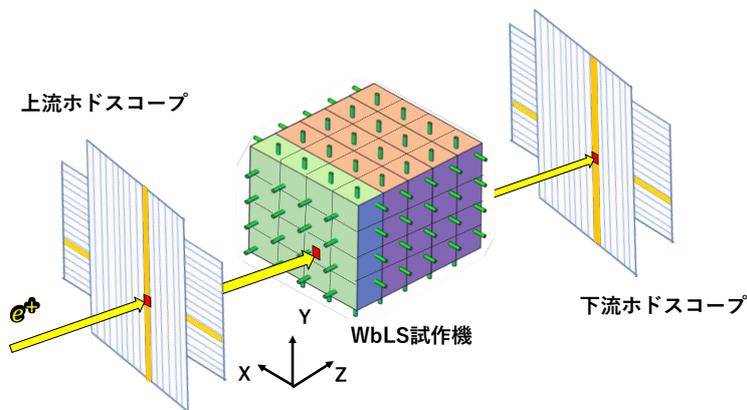


図 3.8: ホドスコープによる陽電子の通過位置によるイベント選択の概念図。

3.2.3 各データセットの検出光量の計算

ホドスコープで適当なイベント選択を行った後は、WbLS 試作機の光量値分布に対してフィッティングを行い、検出光量を計算する。宇宙線など相対論的な粒子が、止まらずに突き抜ける場合に物質中に落とすエネルギーは、ランダウ分布にしたがうことが知られている。WbLS 試作機は検出光量が小さく、エネルギー分解能が限られてしまうため、ランダウ分布をエネルギー分解能によって広げた分布になる。そこで、図 3.10 のように、WbLS 試作機の光量分布をランダウ分布をガウス分布で畳み込み積分した関数 (以下ランダウ・ガウ

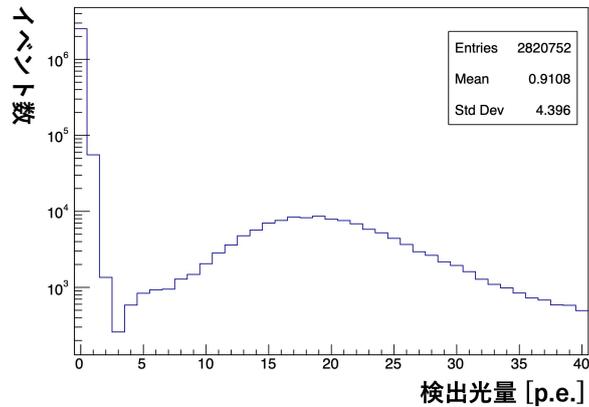


図 3.9: 典型的なホドスコープの光量分布。

ス分布と呼ぶ) によってフィッティングし、その最確値 (Most Probable Value, MPV) を検出光量とした。

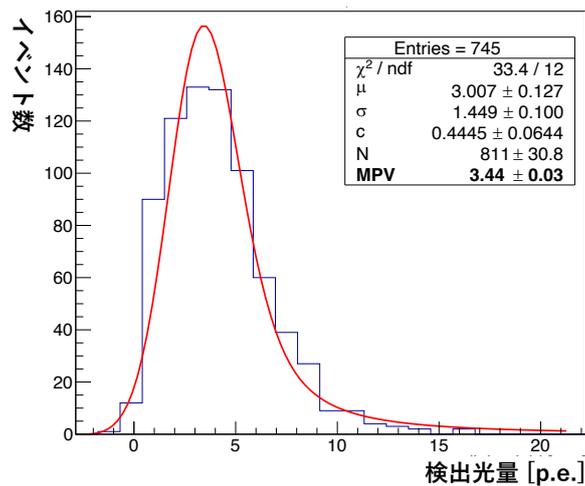


図 3.10: WbLS 検出器の光量分布をランダウ・ガウス分布でフィッティングしている様子

3.3 ビームテストの結果

3.3.1 WbLS 試作機での飛跡

本ビームテストにおいて WbLS 試作機を用いて確認することのできた荷電粒子の 2 次元飛跡を図 3.11 に示す。WbLS 検出器では、この図のように粒子の飛跡が 2 次元の展開図として見える。上流と下流のホドスコープにおいてヒット位置がある直線上の、全ての WbLS 検出器のセルにおいて 0 でない光量を確認することができた。つまり荷電粒子が通過したことが分かり、WbLS を用いた飛跡検出器として初めて飛跡を観測することに成功した。

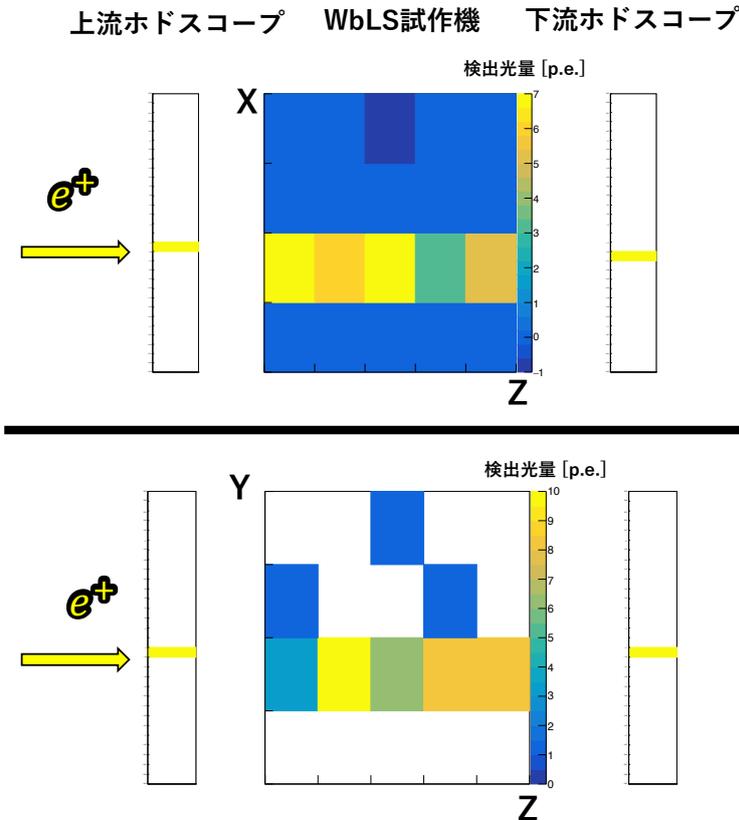


図 3.11: WbLS で観測された 2 次元飛跡

3.3.2 WbLS 試作機の検出光量

WbLS 試作機が陽電子によって発光していることが確かめられたので、次に検出光量を計算した。本解析は、WbLS 検出器の 1 層の 4×4 個のセルのうち、中心の 2×2 の 4 セルのデータを用いて行なっている。また、各セル内にホドスコープによってできる 6×6 マスの中の中央 2×2 の領域について、ホドスコープのデータを用いたイベント選択を行なった。各ファイバにおける検出光量の結果を図 3.12 に示す。図中の全てのファイバの和は、各ファイバからの検出光量値の和の分布に対してフィッティングしたものを表している。各セル毎の検出光量は、いくつかの例外を除いて誤差の範囲内に収まっている。例えば、図 (b) の Y 方向ファイバの 2 層目について、WbLS 試作機 1、2 のどちらにも、4 つのデータ点が分かれているが、それぞれ読み出しているファイバ・MPPC が同一である。これは WbLS 中のミセル濃度がセルによって分布が異なっているのではなく、光を読み出すファイバや MPPC 側に違いがあったものと考えられる。このように他のセルよりも検出光量が高い点は、ファイバや MPPC の違いによって説明が可能であり、セル間での検出光量は誤差の平均をとり検出光量で割った値である 10%-15% 程度の一様性を示しているといえる。

次に、解析を行なった 4 つのセルについて、平均を取った結果を図 3.13 に示す。ただし、誤差は、誤差伝搬した誤差に加えて、4 つのセルの値の分散を加えている。各 WbLS 試作機 1、2 について、1 層目のみ 3 方向に WLS ファイバを用いて読み出していることから、全てのファイバの和を取った検出光量値が他のサンプル

表 3.3: ファイバあたりの検出光量。層順は、表 3.1、3.2 の WbLS サンプルに対応する。

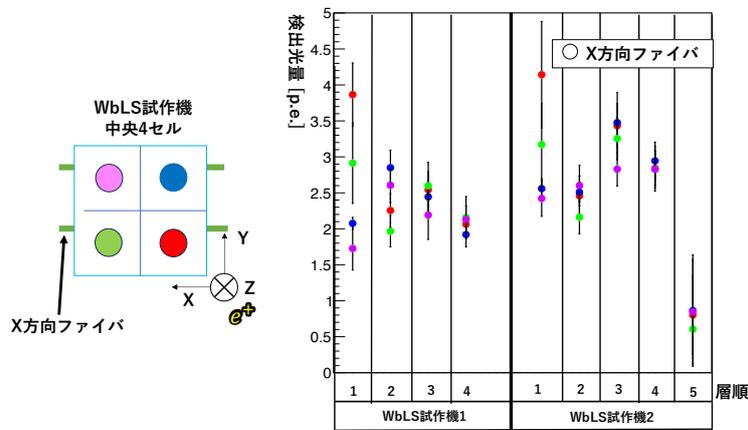
(a) WbLS 試作機 1

層順	1	2	3	4
ファイバあたりの検出光量 [p.e.]	3.0 ± 0.5	3.4 ± 0.5	3.0 ± 0.4	2.5 ± 0.1

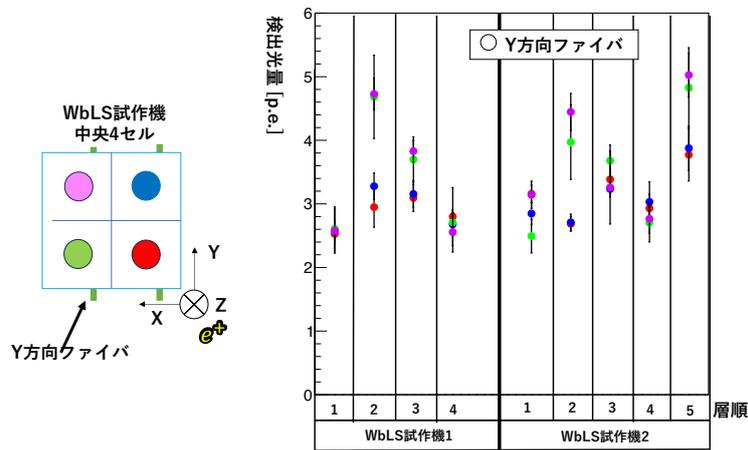
(b) WbLS 試作機 2

層順	1	2	3	4	5
ファイバあたりの検出光量 [p.e.]	3.5 ± 0.3	3.1 ± 0.5	3.5 ± 0.2	3.0 ± 0.2	2.5 ± 0.5

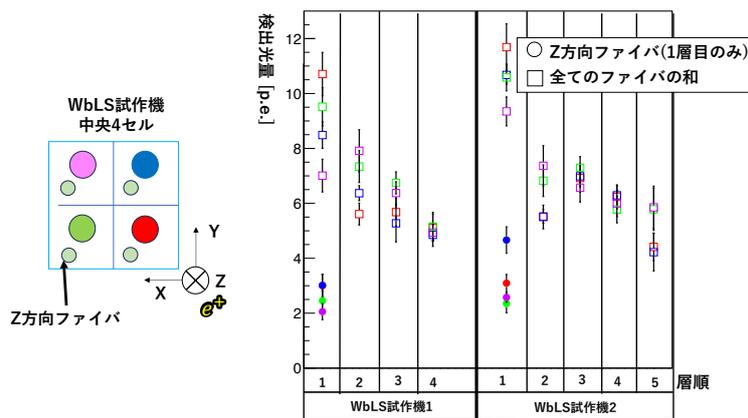
に比べて大きくサンプル WbLS1 では 9 ± 1.5 p.e.、サンプル Triton22 では 10.5 ± 0.9 p.e. になっている。その他のサンプルについては、2 方向に WLS ファイバを用いて読み出しているが概ね和の検出光量は 5-7 p.e. であった。また、表 3.3 に、全てのファイバの和の値をファイバの数で割った 1 ファイバあたりの検出光量を示す。表に示すように、1 ファイバあたりの検出光量に変換することで、3 方向ファイバと 2 方向ファイバでほぼ同程度の検出光量であることが分かる。WbLS セル検出器が 1 ファイバあたり 2.5 p.e.-3.5 p.e. 程度の検出器である。WbLS 試作機は層毎に違うサンプルを封入していたため、本来はサンプル毎に検出光量を比較し、どのサンプルが最も適しているかを確認するはずであったが、検出光量が低いこととファイバや MPPC の個体差による差が大きいことから、サンプル同士で検出光量を比較することはできなかった。



(a) X 方向ファイバ



(b) Y 方向ファイバ



(c) Z 方向ファイバと 3 本/2 本の合計

図 3.12: WbLS 試作機での各セルでの検出光量。各プロットは、読み出しているファイバの方向ごとに分かれています。また層順は、表 3.1、3.2 の WbLS サンプルに対応する。

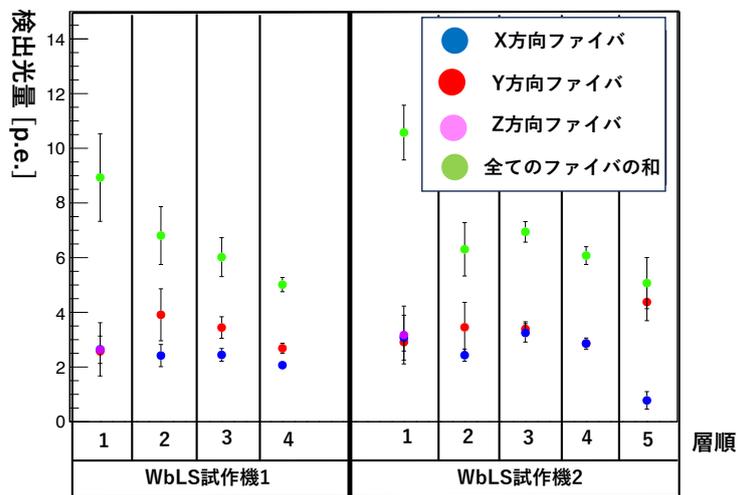


図 3.13: WbLS 試作機での検出光量。層順は、表 3.1、3.2 の WbLS サンプルに対応する。

3.3.3 セル内での検出光量の一様性

セル内での検出光量の一様性は次のようにして評価した。まず、1セル内は前述の通り、ホドスコープによりおよそ6×6の領域に分けられる。ホドスコープでイベント選択をすることで、各領域のデータを取り出し、ランダウ・ガウス分布によるフィッティングで検出光量を計算する。その後、図3.14に示すように、中心4×4の16の領域について平均値と標準偏差を計算する。この領域よりもさらに外側では、セルの壁に陽電子が当たる場合も含まれる。特に今回のWbLS試作機のような低検出光量の検出器では、壁にあたったイベントとWbLS内を貫通したイベントを区別することができないため、この領域を決めた。変動係数は、標準偏差/平均で定義され、この値はセル内の粒子通過位置における検出光量のばらつきを表している。

各層のWbLSサンプルにおいて、セル内での変動係数を計算した値を表3.4に示す。Z方向はビームと並行方向であるから、図3.15に示すように、ファイバ周りを通った場合に検出光量が大きくなることで、変動係数が大きくなる。X方向とY方向はビーム軸に垂直な方向であり、検出光量の位置依存性は本来対称的になり変動係数も同程度になるはずである。しかしながら、Y方向ファイバの変動係数がX方向ファイバよりも倍程度大きいサンプルが存在する。図3.16(a)に、Y方向ファイバの変動係数がX方向よりも 1.9 ± 0.1 倍大きい、WbLS1のY方向ファイバの検出光量の位置依存性を示す。また、図3.16(b)には変動係数が、X($15.1 \pm 0.6\%$)とY($23.5 \pm 0.7\%$)で同程度であったTriton16のものを示す。これらを比較すると、特にWbLS1のセル上方における検出光量が少なくなっていることが分かる。これらのWbLSサンプルでは、ミセルの分布がセル下方に偏る、もしくは不安定になり二層に分離するなどの現象が起きていることが考えられる。

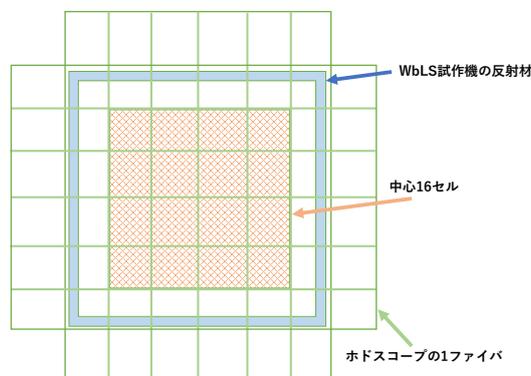


図 3.14: 変動係数の計算に用いた中心 16 セルの概念図

表 3.4: ファイバあたりの検出光量。層順は、表 3.1、3.2 の WbLS サンプルに対応する。また、WbLS2 の X 方向のデータは検出光量が低く、変動係数を計算することが出来なかった。

(a) WbLS 試作機 1

名称		WbLS1	Triton	TERGITOL	LAS
層順		1	2	3	4
変動係数 [%]	X 方向ファイバ	24.2 ± 0.9	25.1 ± 0.6	30.6 ± 0.84	26.7 ± 0.4
	Y 方向ファイバ	45.2 ± 0.8	23.5 ± 0.7	36.5 ± 0.9	22.2 ± 0.3
	Z 方向ファイバ	71.2 ± 1.3	-		

(b) WbLS 試作機 2

名称		Triton22	Triton20	Triton18	Triton16	WbLS2
層順		1	2	3	4	5
変動係数 [%]	X 方向ファイバ	21.2 ± 0.6	20.7 ± 0.4	14.0 ± 0.2	26.4 ± 0.2	-
	Y 方向ファイバ	49.8 ± 0.7	44.9 ± 1.3	40.7 ± 0.6	25.2 ± 0.3	35.5 ± 0.8
	Z 方向ファイバ	69.1 ± 1.7	-			

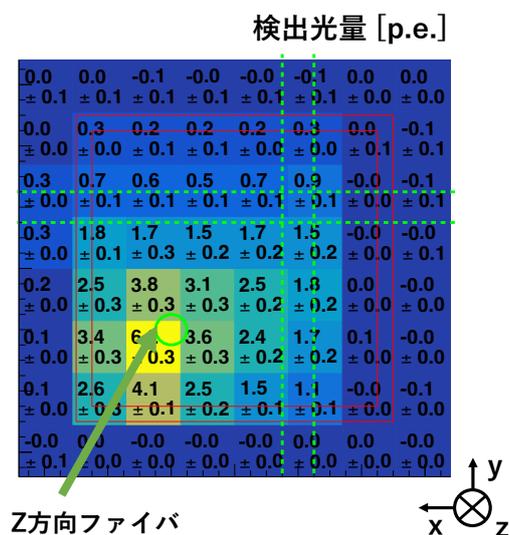
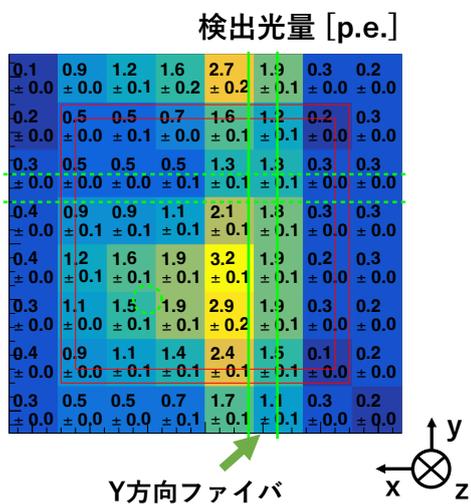
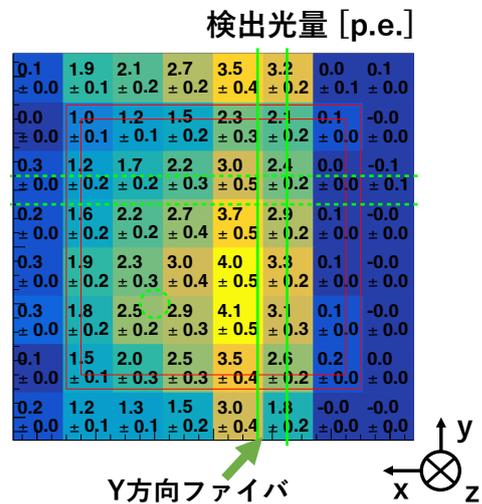


図 3.15: Z 方向ファイバの検出光量の粒子通過位置による依存性。図は Triton22 のものを示している。



(a) WbLS1



(b) Triton

図 3.16: Y 方向ファイバの検出光量の粒子通過位置による依存性。

3.4 WbLS 検出器の前置検出器としての使用可能性の評価

この節では、WbLS 試作機でのビームテストの結果を受け、WbLS 検出器が前置検出器として使用可能であるか検討を行う。WbLS 検出器は飛跡検出器であるため、まず荷電粒子に対する十分な検出効率があることが求められる。また、WbLS 検出器の目標の 1 つが低運動量の粒子を検出・識別することで水-ニュートリノ反応の精密測定を行うことにあるため、低運動量粒子の検出・識別能力が十分に備わっていることも求められる。ただし、低運動量粒子は停止前のいくつかのセルにおいて、ブラッグピークと呼ばれる大きなエネルギー損失をもつため、荷電粒子の飛跡の検出に比べ要求検出光量は低くなると推測される。そのため、ここでは荷電粒子の飛跡の検出の観点からのみ評価を行う。また、WbLS 検出器の低運動量粒子の検出・識別能力については第 7 章において確認する。

荷電粒子の飛跡の検出について

荷電粒子の飛跡の中でも最も検出器中に落とすエネルギーの少ない最小電離粒子 (Minimum Ionizing Particle, MIP) の飛跡の検出について検討する。本ビームテストにおけるエネルギー 500 MeV の陽電子が検出器中に落とすエネルギーは MIP 程度であるので、今回の検出光量の測定値を MIP 粒子に対するファイバあたりの平均検出光量として設定する。ただし、今回のビームテストでは約 40 cm のファイバを伝搬した光子を検出していたため、ファイバの減衰長 3.5 m^{2.1} による補正を考える。ビームテストで測定したファイバあたりの検出光量 (表 3.3) のうち最大の 3.5 p.e. に対してこの補正を考えると $3.5 / \exp(-40/350) \simeq 3.9$ p.e. となる。

MIP 粒子がセルを貫通したことによるファイバでの検出光量がこの 3.9 p.e. を平均値にもつポアソン分布に従うとする。また、MPPC のダークカウントとクロストークやエレクトロニクス等によるノイズの影響を避けるために、2.5 p.e. をヒットの閾値とする。この場合 MIP 粒子がセルを貫通した場合の 1 本のファイバでの検出効率は 65% でとなる。次に WbLS 検出器では、ファイバでの 2 次元のヒット情報から WbLS セルの 3 次元でのヒット情報へ再構成するために、2 方向以上のファイバでの検出が必要となる。3 本のファイバのうち 2 本以上で MIP 粒子が検出される確率は、 ${}_3C_2 \times (0.65)^2 \times (1 - 0.65) + (0.65)^3 = 72\%$ となる。実際の飛跡では、MIP 粒子が 1 本のファイバ粒子の方向へ飛ぶことで、このファイバ方向の検出光量が意味をなさない場合がある。この際にも粒子の 3 次元でのヒットを再構成することを考えると、2 本とも MIP 粒子を検出する必要があるためその確率は、 $(0.65)^2 = 0.42\%$ である。つまり、MIP 粒子が通過したセルのうち 42% 程度しか再構成できないことになる。実際にはさらにセルの位置によってファイバでの減衰も加わるため、今回のビームテストにおける検出光量では、飛跡検出器として十分な性能を有しているとは言えない。仮に 2 本のファイバによる MIP 粒子の検出効率が 99% であったとすると一本あたりの検出効率は 99.5% が必要であり、2.5 p.e. の閾値で達成するためにはファイバでの検出光量が MIP 粒子に対して 9.3 p.e. であることが必要である。減衰長 350 m での 200 cm 先のセルにおいても同様の検出効率を求める場合は、さらに $9.3 / \exp(-200/350) \simeq 16.5$ の検出光量が必要になる。この場合ビームテストによる検出光量と比較して、 $16.5/3.9 \simeq 4.2$ 倍程度の検出光量の向上が必要になる。

3.5 章のまとめ

陽電子ビームを用いて WbLS 検出器の試作機のテストを行った。上流と下流のホドスコープにヒットがあった直線上に WbLS 試作機においても飛跡を確認できた。そのため、WbLS 検出器は飛跡検出器として使用可能であることが分かった。また、WbLS 検出器を飛跡検出器として使用し、飛跡を確認することができたのはこれが初めてである。

次に、WbLS 試作機の陽電子貫通による検出光量をフィッティングにより求めたところ、1 ファイバあたり 2.5 p.e.-3.5 p.e. 程度であった。WbLS 試作機 1,2 とともに 1 層目は 24 ch 読み出し容器であり、3 方向から WLS ファイバによって読み出され、2 層目以降は 2 方向から WLS ファイバによって読み出されている。しかし、1 ファイバあたりの検出光量に換算した場合、3 方向と 2 方向において検出光量が変わらない結果となった。もし反射材の反射率が十分高い場合は、セル内で発生したシンチレーション光は、ほとんど反射されて最終的に WLS ファイバに吸収されるため、2 方向ファイバと 3 方向ファイバの合計光量は変わらないはずである。そのため、今回の結果は反射材の反射率が小さいことを示している可能性がある。この点においては次章でシミュレーションを行い評価した。

次に検出光量の位置依存性を確認した。各層の 4×4 個のセルからなる容器の、中心の 2×2 のセルの検出光量を比較したところ、ファイバや MPPC による差と思われるデータを除いて 10%-15% の誤差の範囲で一致していたため、この範囲内でセル同士では検出光量は一様である。また、セル内での検出光量の位置依存性を確認したところ、Y 方向ファイバのみに 50% という大きな非一様性を持つ WbLS サンプルが存在した。これらの WbLS サンプルのデータのうち Y 方向ファイバにおいて、特にセルの上方を陽電子が通った際に検出光量が小さくなっていたことから、ミセルのセル内での偏りや層の分離等が起きてしまったと考えられる。この点については、詳細は第 5.1 節において詳細を扱うが、WbLS サンプルの相状態が温度への依存性を持つことから、WbLS サンプルの作製時とデータ取得時に温度が変わってしまったことで、一部のサンプルにおいて層分離が起きてしまった可能性がある。原因がミセルのセル内での偏りであった場合は、WbLS は検出器としての使用に適していないと考えられたため、相状態の安定性を確認した上で再びビームテストを行いどちらが原因であるか詳しく調べる必要がある。

最後にビームテストで得られた WbLS 試作機の検出光量が前置検出器として使用可能かどうか判断するために、荷電粒子の飛跡の検出効率の観点から評価した。その結果、ビームテストでの検出光量では、MIP 粒子に対してファイバでの減衰を考えない場合でも 42% であり、飛跡検出器として検出光量の改善が必要であることが判明した。

第 4 章

WbLS 検出器の検出光量向上可能性の評価

前章のビームテストの結果より、WbLS 検出器が飛跡検出器として、MIP の荷電粒子に対しても十分な飛跡検出効率をもつためには検出光量の 2.6 倍以上の大幅な改善が必要であることが分かった。そのため、この章では検出光量の向上に向けて、WbLS 検出器の光量増加の可能性についての検討を行う。

現在検討している WbLS 検出器において最終的に MPPC において検出される光量 L_{det} は以下のように、検出器を構成する要素それぞれに分けて考えることができる。

$$L_{det} = \epsilon_{det} \times \epsilon_{fiber} \times \epsilon_{cell} \times L_{WbLS}$$

ここで、 $L_{det}, \epsilon_{cell}, \epsilon_{fiber}, \epsilon_{MPPC}$ はそれぞれ、WbLS の発光量、セル内の光収率 (WbLS から放出されたシンチレーション光が、反射等を起こし WLS ファイバまで到達する確率)、WLS ファイバの光収率 (WLS ファイバに吸収された光が MPPC 側のファイバ端から放出される確率)、MPPC での光検出確率を表している。以下、それぞれの項目に対して Geant4 を用いたシミュレーション等を行うことで検出光量に与える影響を評価し、検出光量向上の可能性について考える。

Geant4 とは

Geant4(Geometry and Tracking 4) は欧州原子核研究機構 CERN によって開発された粒子のトラッキングと検出器シミュレーションのためのオープンソースのシミュレーションツールキットである [43]-[45]。Geant4 では電子や γ 線等の粒子を発生させ、それらが検出器内でどのような飛跡をたどり 2 次粒子を発生させるか等シミュレーションすることができる。その他、可視光や紫外領域程度の低エネルギーの光子 (optical photon) も粒子として用意されており、この光子を用いること境界面での光の屈折や反射等光学シミュレーションを行うことができる。また、本論文では、Geant4 バージョン 11.0.4 を用いてシミュレーションを行っている。

4.1 WbLS の発光量

WbLS のシンチレーション光の発光量は、その発光原理が液中に溶けている液体シンチレータによるものであることから液体シンチレータの割合 (w_{LS}) に比例する。実際に、液体シンチレータの濃度が 10% 以下では、おおよそ液体シンチレータの割合に比例することが実験的に確かめられている [46]。つまり、純粋な液体シンチレータの発光量を典型的な値である $\mathcal{O}(10^4)$ photon/MeV とすると [33]、WbLS の発光量は $\mathcal{O}(10^4) \times w_{LS}$ photons/MeV 程度であると考えられる。ビームテストで使用した WbLS(表 3.1,3.2) の液体

シンチレータの割合は9%-12%程度であった。そのため、液体シンチレータの割合を20%にすると約2倍、30%にすると約3倍というように検出光量を大幅に増加することができる。また、液体シンチレータに溶かす物質の種類や割合の最適化、液中の不純物を減らすことでも検出光量の増加が見込める。

以下では、各項目について検出光量の増加に対する影響を見積もる。

液体シンチレータの割合の増加について

前述のように、液体シンチレータの割合を20%に増加させることで、10%のものと比較して検出光量を約2倍にすることができる。しかしながら、WbLSは界面活性剤の作用によって液体シンチレータを水の中に溶かしているため、界面活性剤の割合によってWbLS中に溶かすことのできる液体シンチレータの量は限界量が存在する。より多くの液体シンチレータをWbLS中に可溶化させるためには、より多くの界面活性剤が必要であり、WbLS中の水の割合は光量の増加以上に小さくなってしまう。主に炭素や水素によって構成される液体シンチレータ、界面活性剤の割合が大きくなることは、炭化水素とニュートリノの反応事象数が大きくなることを意味する。本研究におけるWbLS検出器の主目標は、水-ニュートリノ反応の精密測定を行うことである。つまり、液体シンチレータの割合を増加させることは、背景事象の増加と水の割合の減少による信号事象の減少が同時に起こることになる。そのため、液体シンチレータの割合の増加は検出光量の増加に対して大きな効果を持っているが、必要最低限度の増加に抑えることが重要である。

液体シンチレータに溶かす物質の最適化について

第2.2.1項で述べたように、液体シンチレータ自体の発光量は、溶媒に加える蛍光物質と波長変換剤の量に依存する。重要な点として、添加量が多すぎる場合にも自己吸収による発光量の低下が発生することである。これまでの開発では、蛍光物質と波長変換剤の量の最適化は行っておらず、典型的な値を参考にしながら少し多めに蛍光物質と波長変換剤を加えていたため、自己吸収が起こっていた場合検出される光量が減少する。ただし、半径35.4 mの大型の液体シンチレータ検出器を用いたJUNO実験のシミュレーション^[47]によると、蛍光物質であるPPOを2.5 gから4.0 gに増量した場合に2%の検出光量の減少と予想されており、一辺1 cmのWbLSセル中での検出光量にはほとんど影響しないと考えられる。また、吸収長が検出光量に与える影響は4.2章にて検討している。自己吸収がほとんど起こらないと考えると、蛍光物質や波長変換剤は検出光量が飽和する量に達していない可能性もある。その場合、実際に溶媒に添加する量を変化させて検出光量を測定し、どの程度検出光量の増加が見込めるか確認する必要がある。

WbLS中の不純物等による影響について

現在は第2.2.3項のようにWbLSを作製しており、材料となる水や有機溶媒等に対して純化の手順を踏んでいない。液体シンチレータを純化することにより不純物によるシンチレーション光の吸収が少なくなり、検出光量が増加すると考えられる。吸収長が検出光量に与える影響は4.2章にて検討している。また、液体シンチレータ中の溶存酸素により消光が起こることが知られている。実際に、LABベースの液体シンチレータを用いた測定^[48]では、20°において、酸素を窒素に置き換えて取り除いた場合11%の光量の増加が確認されている。実験によって検証する必要があるが、WbLSにおいても同様の消光が起こっていることは十分に考えられる。その場合、溶存酸素を取り除くことで10%程度WbLSの光量を増加させることができる。

界面活性剤の発光について

界面活性剤の中にも溶媒と同様に構造中にベンゼン環を持つものが存在していて、現在はベンゼン環を持つ界面活性剤を中心に研究をおこなっている。そのため、荷電粒子による界面活性剤が持つベンゼン環の励起をシンチレーション光として発光することが出来れば、液体シンチレータによる発光に加えて光を検出することができる。ただし、溶媒である PC の分子量 120 と比較すると、界面活性剤の典型的な分子量 600 は大きく、同質量の中に含まれる分子数が小さいため、シンチレーションの効率は液体シンチレータと比較してかなり小さい可能性がある。また、実際の光量測定においてこれらの発光を区別する手段はないため、すでに WbLS の検出光量の一部として含んでいる可能性もある。界面活性剤の割合を変えながら光量測定を行うことで検証ができるため、実際の測定により光量増加の影響を見積もる必要がある。

チェレンコフ光の収集

チェレンコフ光は荷電粒子が物質中を物質中の光の速度 c_m より早い速度で通過する際に荷電粒子の進行方向に対し一定の角度 θ_c で放出される光である。HK 検出器はこの光を捉えることでニュートリノ反応から放出される粒子を検出している。

チェレンコフ角 θ_c は、荷電粒子の速度 $\beta = v/c$ として

$$\cos \theta_c = \frac{1}{\beta n_m}$$

と表される。なお、物質中の光の速度は物質の屈折率 n_m を用いて、 $c_m = c/n_m$ と表せる。水の屈折率は 1.33、プソイドクメンの屈折率 1.50、界面活性剤の屈折率はおよそ 1.51 であり、以下では WbLS の屈折率 $n_{\text{WbLS}} = 1.4$ として計算を行う。チェレンコフ放射により放出される光子数は、

$$\frac{d^2 N}{d\lambda dx} = \frac{2\pi z^2 \alpha}{\lambda^2} \sin^2 \theta_c$$

である。ここで z は荷電粒子の電子の電荷に対する電荷量である。よって相対論的な μ 粒子 ($\beta \simeq 1$) が 1 cm を飛行する間に放出されるチェレンコフ光子の数は、波長を 200-400 nm の間で積分を行い、

$$\frac{dN}{dx} \simeq 561 \text{ photons/cm}$$

ここで、積分に使用した波長について説明すると、純水による吸収長は電子遷移の吸収長が 167nm 付近にあることから 200 nm 以下では急激に大きくなる。200 nm 以下の波長の光は水に迅速に吸収され検出することが困難であると考え下限を 200 nm とした。また波長変換ファイバの吸収ピークが 430 nm であることから上限を 400 nm とした。このチェレンコフ光を収集することでエネルギー損失が最も小さい MIP 粒子に対する検出効率を向上させることができる。WbLS 内に追加の波長変換剤を導入し、チェレンコフ光を波長変換ファイバで収集可能な波長に変更できたとすると、仮にセル内の光収率 50%、ファイバの光収率 7%、MPPC の光検出効率 40% として、セル内の WbLS の厚さ 0.9 cm を垂直に粒子が貫くとすると、最終的なファイバあたりの検出光量は、 $561 \times 0.9 \times 0.50 \times 0.07 \times 0.4/3 \approx 2.4$ photons となる。ビームテストで得られた最大のファイバあたりの検出光量 3.5 p.e. と比較すると、67% の検出光量の増量が見込まれる。しかしながら、界面活性剤による発光と同様に、すでに実際の光量測定の検出光量の中に含まれていることは予想され、チェレンコフ光を効率よく波長変換可能であるかを含めて、実験による検証が必要である。

4.2 セル内の光収率

この節では、WbLS から放出されたシンチレーション光が WLS ファイバに到達するまでの光収率 (ϵ_{cell}) について検討する。この過程において光収率を低下させる要因としては、光がセルの壁で反射されずに透過・吸収されることによる損失、WbLS そのものや不純物によって光が吸収されてしまうことによる損失が考えられる。

また、WbLS を構成するミセル粒子による散乱の効果についても考慮する必要がある。第 2.2 章で説明したように液体シンチレータは、界面活性剤によって半径数 nm から数十 nm の球内に閉じ込められ分散していると考えられる。シンチレーション光の波長はおおよそ 400 nm なので、十分小さい粒子による光の散乱であるレイリー散乱について考える。レイリー散乱の散乱断面積 $\sigma_{Rayleigh}$ は、粒子の半径 a 、波長 λ として、

$$\sigma_{Rayleigh} \propto \frac{a^6}{\lambda^4} \quad (4.1)$$

と表すことができる。散乱断面積は波長の 4 乗に反比例するため波長が短い光ほどよく散乱される。例えば可視光の場合、青色や緑色が強く散乱され黄色や赤色は散乱されにくい。夕焼けはこのメカニズムにより発生し、レイリー散乱の代表的な例として有名である。また、散乱断面積は粒子の半径の 6 乗に比例するためミセルの粒子径が大きいほど強く散乱される事になる。界面活性剤に対する液体シンチレータの割合が大きくなるほどミセルは大きくなるので、液体シンチレータの割合が大きいのほどレイリー散乱の散乱断面積が大きくなると予想される。

実際に、同じ界面活性剤の割合で作製された図 4.1(a),(b) を比較すると、液体シンチレータの割合が大きい (b) のサンプルの方が、白色光の中の青色成分を強く散乱し、透過光が黄色く見えている。レイリー散乱によってシンチレーション光が散乱されてしまうことで、ファイバに検出される光量が荷電粒子が通過した位置によって大きく変わってしまい、セル内の検出光量の一様性が悪くなってしまう可能性がある。

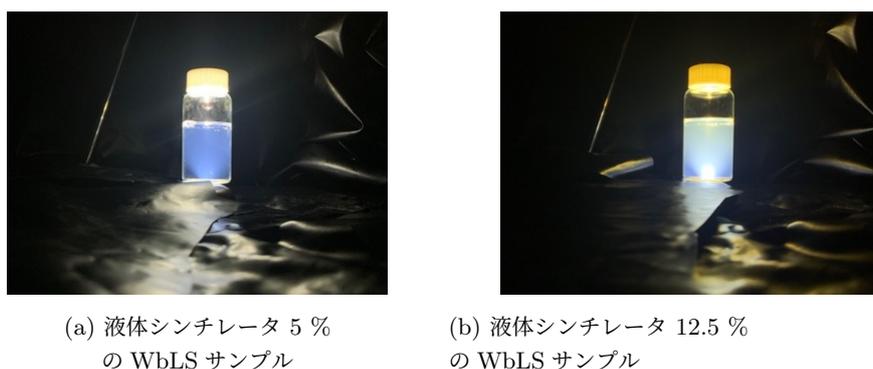


図 4.1: WbLS が入ったサンプル瓶に下から白色光を当てた様子。(a) のサンプルよりも液体シンチレータ濃度の大きい (b) のサンプルの方が光が強く散乱され WbLS を通り抜けた光が黄色になっている。

最後に、現在は SuperFGD のシンチレータキューブを参考に WLS ファイバの位置を決定しているが、ファイバの位置によって、光量や光量の一様性に影響を与える可能性があるため、セル内の構造についてもいくつか検討しシミュレーションを行った。

Geant4 を用いたセル内での光子伝搬シミュレーション

Geant4 を用いてシンチレーション光子のセル内での伝搬過程をシミュレートすることで、セル容器の反射率や WbLS の吸収長・レイリー散乱長といったパラメータがセル内の光収率 (ϵ_{cell}) へ与える影響を見積もった。また、第 3.3.3 節と同様の方法で変動係数を算出することで、これらのパラメータが光量の位置依存性に与える影響を見積もった。

シミュレーションの内容について述べる。図 4.2(a) のように一辺 10 mm、厚み 0.5 mm の PMMA 樹脂で作られた立方体のセルと直径 1 mm の 3 方向の読み出しファイバを実装した。また、ファイバの挿入位置は図 4.2(b) のように、SuperFGD のプラスチックシンチレータキューブの穴の位置を参考に中心から縦横 2 mm の位置とした。WbLS の組成は、水を 70 %、界面活性剤を 20 %、PC を 10 % の割合とし、密度は、論文^[49]を参考に 1 g/cm^3 とした。

シミュレーションでは、セルを垂直に貫くように運動エネルギー 500 MeV の μ^+ 粒子を $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ のエリアに一様に発生させた。

本シミュレーションにおける、光収率・変動係数の計算方法を説明する。WbLS 内で発生したシンチレーション光子と 3 つのファイバに吸収されるシンチレーション光子の数をそれぞれ計測し、光収率=ファイバに吸収された光子数/発生したシンチレーション光子数とした。また、 μ^+ を発生させる位置を $1.66 \text{ mm} \times 1.66 \text{ mm}$ のブロックに分け、端のブロックを除いた中心 16 ブロックの各ブロックでのセル内の光収率 ϵ_{cell} をファイバ毎に比較し、標準偏差/平均で表される変動係数を算出した。この計算方法はビームテストにおける変動係数の計算方法 (図 3.14) とほぼ同じである。

なお、今回は WLS ファイバに入射した光子が全て吸収されるものと仮定してシミュレーションを行なっている。次節で述べるように、実際にはいくつかの入射光子は波長変換される前に WLS ファイバを通り抜けている可能性がある。その場合には、セルの内の光収率 ϵ_{cell} については、以下の値よりも反射材の反射率が高いところでより急激に上昇し、吸収長やレイリー散乱長に対する要求はより長くなると考えられる。また、ファイバ付近で発生したシンチレーション光が、ファイバを通り抜けて他のファイバに入ることが可能になるため、変動係数は小さくなると考えられる。

4.2.1 反射材の反射率の影響

WbLS の吸収長を水の吸収長 (O)(10 m) に固定し、反射材の反射率を変えた時の光収率を見積もった。反射の方法として鏡面反射と乱反射が考えられるが、鏡面反射は主に金属表面等で起こる散乱であり、白色の反射材の場合は乱反射に近くなることから、今回のシミュレーションでは乱反射を仮定している。また、レイリー散乱の影響は考慮していない。

セル内の光収率 ϵ_{cell} のシミュレーション結果を 4.3 に示す。光収率は反射率が 1 に近づくにつれて増加し、1 付近で急激に大きくなるため、より反射率の大きいセルの素材に変更することで大きな検出光量を得ることができる。

次に、セル内の光収率の位置依存性を表す変動係数のシミュレーション結果を図 4.4 に示す。また、例として反射材の反射率が 0.9 の場合について、セル内の光収率の位置依存性を図 4.5 に示す。 z 方向に向けて μ^+ 粒子を射出しているため、 x と y 方向のファイバについては対称的な結果になる。 z 方向については、ファイバ付近を粒子が通過する場合に光収率が大きくなるため、他のファイバと比較して変動係数は大きくなる。

さらに、ビームテストでの 8ch 読み出し容器の結果と比較するために、ビーム方向に対し垂直な方向の 2 方

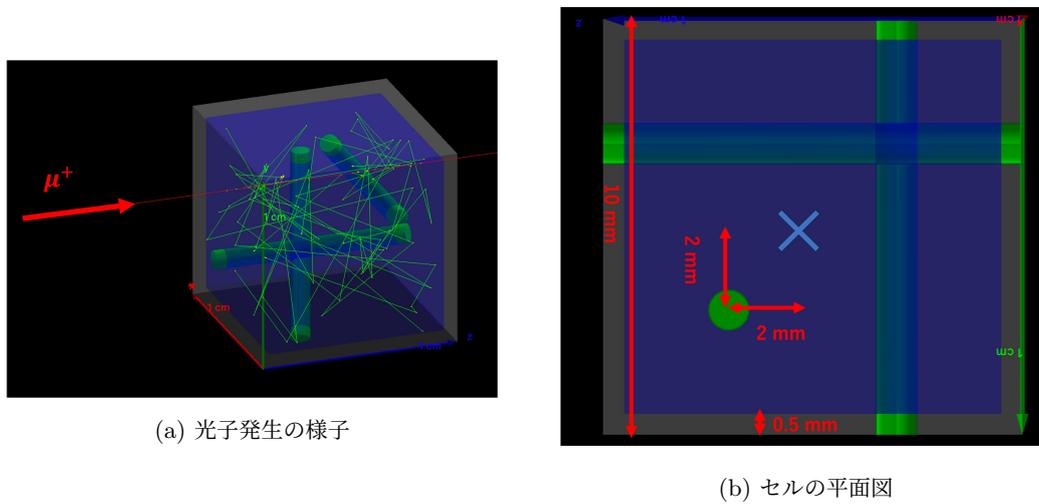


図 4.2: Geant4 シミュレーション内に実装したジオメトリ。(a) セル左方からセルを貫通している赤色の飛跡が μ^+ をセル容器中で反射している緑色の飛跡がシンチレーション光子を表す。なお本図作成の際は視認性のためにシンチレーション光子の発生率を小さくとしている。(b) WLS ファイバは、SuperFGD を参考にセルの中心から縦横 2 mm ずつ離れた位置に置かれている。

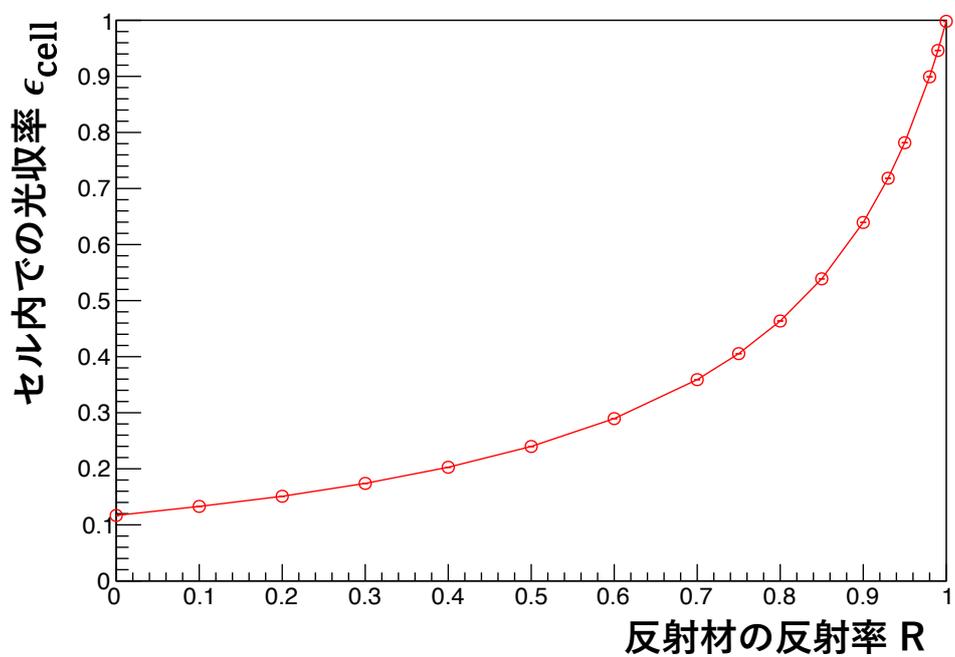


図 4.3: 反射材の反射率 R_{cell} が WbLS 検出器セル内での光収率 ϵ_{cell} に与える影響

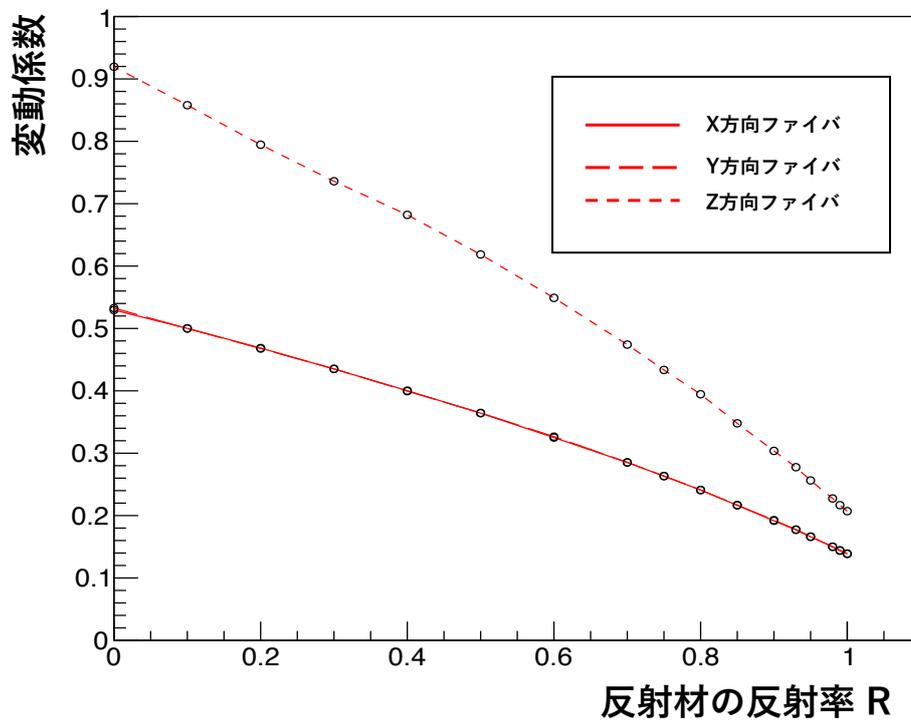


図 4.4: 反射材の反射率 R_{cell} が変動係数に与える影響

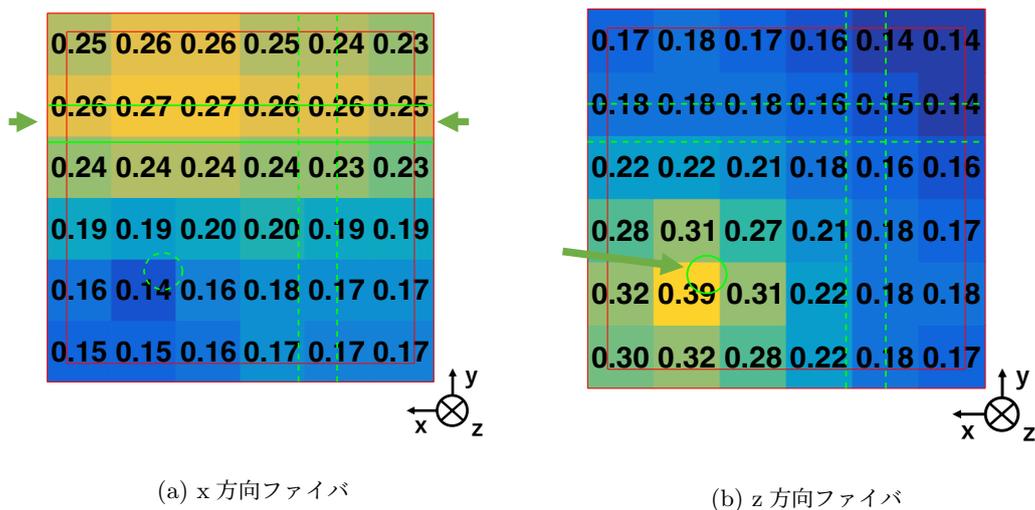


図 4.5: 反射材の反射率 0.9 の場合のセル内の光収率の入射位置による依存性。緑色の線がファイバを示し、緑色の実線は光を検出しているファイバを、赤色の線は反射材の位置を示している。また、各格子の内の数字がセル内の光収率を表している。

向のファイバのみ存在する場合のシミュレーションを行なった。結果を図 4.6 に示す。青線は通常の 3 方向にファイバが存在する場合を示している。容器の反射率が低い時は、ファイバの本数の比である 2/3 程度の光収率となっているが、反射率が大きくなると WbLS の発光のうち、ほとんどの光が反射を繰り返しファイバに吸収されるため、2 本と 3 本の差が小さくなる。また、ファイバが 2 本しかない場合には、z 方向のファイバに吸収されていた光が分散されることで、光量の非一様性が緩和され変動係数は小さくなっていることがわかる。

第 3.3.3 項で計算したビームテストの際の変動係数が全てこの反射率から来ると仮定し、X と Y のファイバが比較的対照的であった、Triton の変動係数 23.5 という数字を用いると、4.6(a) より、反射材の反射率は 67% に対応する。次に図 4.4 に従って、反射率 67% が反射率 90% に増加した場合を計算すると、 $\epsilon_{cell}(90)/\epsilon_{cell}(70) \simeq 0.639/0.340 \simeq 1.88$ となり、約 1.9 倍検出光量が大きくなることになる。また、WbLS の組成が同じではなかったために単純な比較はできないが、24ch 読み出し容器と 8ch 読み出し容器においてファイバあたりの検出光量が 2.5-3.5 p.e. の間で同程度であったことから、WbLS 試作機の作製に使用した反射材の反射率は大きくないと考えられる。そのため、検出光量の増大のためには、可能な限り反射率の高い反射材を探索していくことが重要になる。

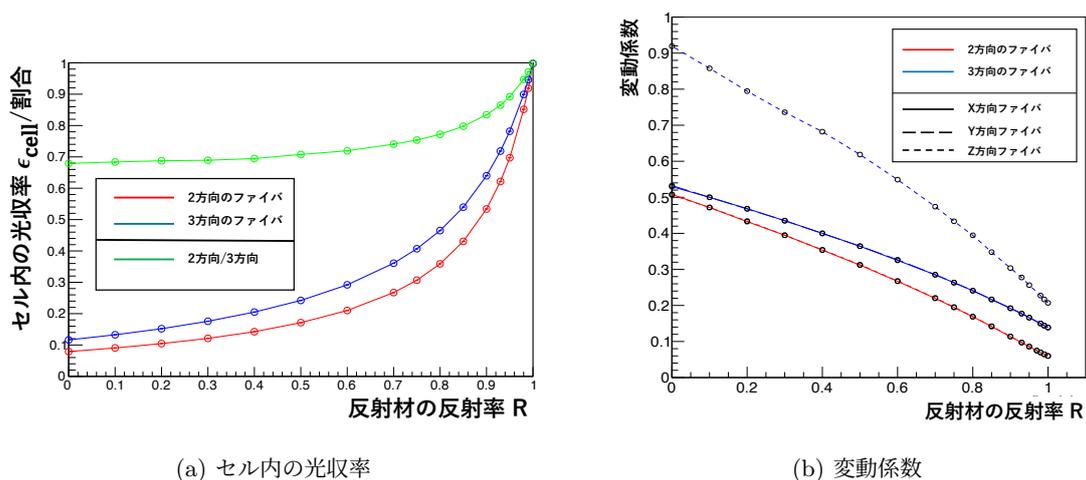


図 4.6: ビームに垂直な 2 方向のファイバのみが存在する場合のシミュレーション結果。青線は図 4.4 の結果を示している。また、(a) の緑線は赤線と青線の比を示している。

4.2.2 吸収長の影響

反射材の反射率について (0.60, 0.80, 0.90, 0.95) の 4 パターンで変化させ、それぞれについて WbLS の吸収長を変化させてシミュレーションを行った。なお、レイリー散乱の影響は考慮していない。セル内の光収率 ϵ_{cell} についてシミュレーションを行った結果を図 4.7 に示す。反射材の反射率が大きいほど、吸収長のセル内の光収率に与える影響も大きくなるが、吸収長が 100 cm あれば反射率が 0.95 の場合にも影響は $1 - \epsilon_{cell}(100 \text{ cm})/\epsilon_{cell}(1000 \text{ cm}) \simeq 0.022$ と十分小さくなる。

また、変動係数の結果を図 4.8 に示す。変動係数については吸収長が短くなるほど大きくなるが、吸収長が 10 cm 以上あればその影響は小さくなり、100 cm では無視することができる。

以上の結果より、吸収長が 100 cm 以上あればセル内でシンチレーション光が吸収されることによる影響は

無視することができる。吸収は主に液中の蛍光物質・波長変換剤による自己吸収や不純物の影響で生じるが、NOvA 実験における PC を溶媒とした液体シンチレータは 200 cm の減衰長を達成している^[50]。このことから、WbLS においても 100 cm 以上という吸収長は十分に達成可能で、吸収による影響は無視できると考えられる。

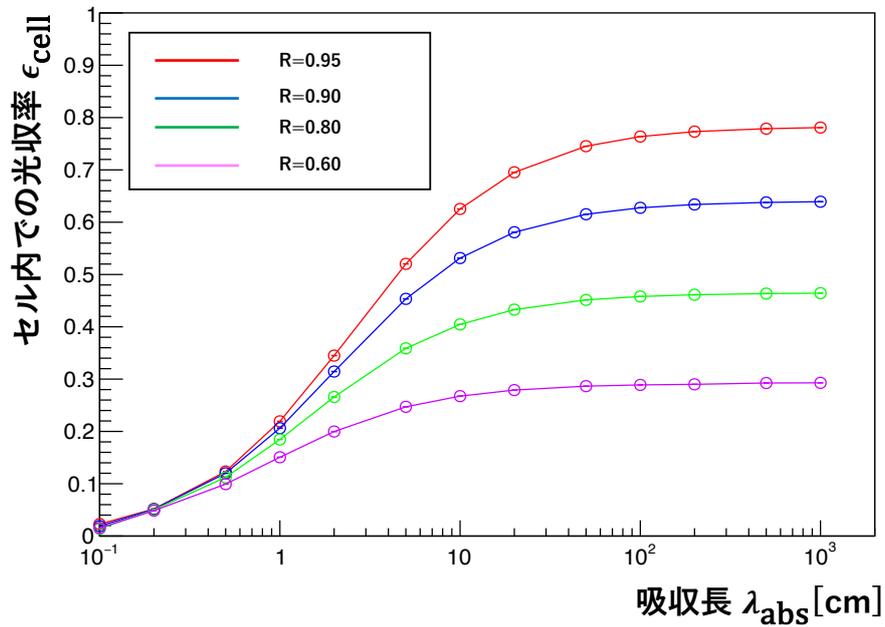


図 4.7: WbLS の吸収長が光収率 ϵ_{cell} に与える影響。R は反射材の反射率を表している。

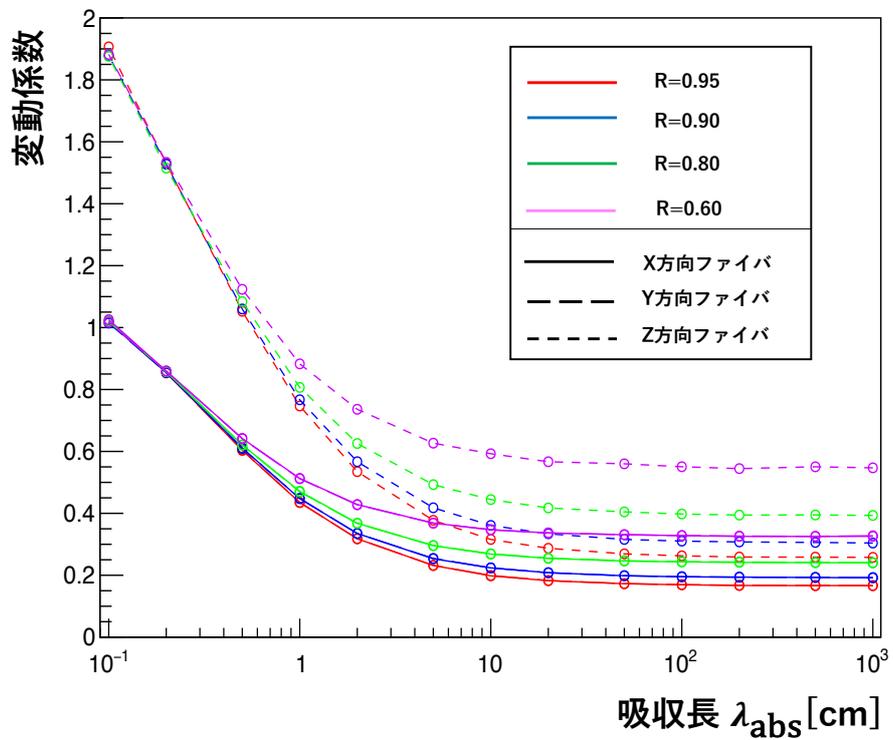


図 4.8: WbLS の吸収長が変動係数に与える影響。R は反射材の反射率を表している。

4.2.3 レイリー散乱長の影響

反射材の反射率について (0.60, 0.80, 0.90) の 3 パターンで変化させ、それぞれについて WbLS のレイリー散乱長を変化させてシミュレーションを行った。吸収長は水の減衰長 ($O(10\text{ m})$) とした。セル内の光収率 ϵ_{cell} についてシミュレーションを行った結果を図 4.9 に示す。光収率は反射率がいずれの場合にも、レイリー散乱長が 5 mm 程度までは変化が見られず、レイリー散乱長が 5 mm 以下になると減少に転じる。

次に、変動係数についての結果を図 4.10 示す。変動係数は、レイリー散乱長が 1 cm を下回る付近から増加していくことが分かる。

以上の結果より、レイリー散乱長は 1 cm 程度あればセルの光収率や検出光量の位置依存性に与える影響を無視することができる。図 4.1 のように、一部の WbLS サンプルにおいて 4 cm 程度の厚さでレイリー散乱と思われる現象が確認できている。そのためレイリー散乱長は $O(\text{cm})$ である可能性があり、WbLS 作製の際には注意が必要である。

4.2.4 セル内のファイバの位置による影響

上記のシミュレーションでは、ファイバの位置を図 4.2 のように、セルの中心から縦横 2 cm の位置においてシミュレーションを行っていた。これは SuperFGD のシンチレータキューブでの WLS ファイバの位置を参考に決めていたが、キューブでは穴を開けるといふ都合上、ファイバ同士を極端に近づけることや、壁ぎりぎりにするといったことは出来ない。

しかしながら、3D プリントを用いて造形する WLS セルであれば、ファイバの位置は比較的自由に決めることができる。そこでファイバの位置を変更し、どの程度セル内の光収率・一様性に影響があるかをシミュレーションによって見積もった。図 4.11 のように、ファイバの位置について、(a) 中心から縦横同じ大きさにずらした場合と、(b) 中心から縦横一方向へずらした場合の 2 パターンについてシミュレーションを行った。また、WbLS の吸収長は水の吸収長 ($O(10\text{ m})$) に固定し、レイリー散乱は考慮せず、反射材の反射率を変えた時の光収率を見積もった。

セル内の光収率 ϵ_{cell} のシミュレーション結果を 4.12 に示す。(a)、(b) どちらの場合でも $D = 4\text{ mm}$ の場合、つまりファイバが壁に近づいていくと僅かに光収率が小さくなる。また、(a)、(b) 間での差は、ファイバが中心付近に配置されている場合は見られない。

次に、変動係数についての結果を図 4.14 に示す。ただし、より詳細に非一様性を検討するため、ここでの変動係数は図 4.13 のように、セルを 20×20 のブロックに分割し、中心の 18×18 セルについて変動係数を計算している。(a) について、 $D_a = 2\text{ mm}$ の青線が従来のシミュレーションに対応し、 $D_a = 1\text{ mm}$ 、つまりより中心近くに WLS ファイバを配置している赤線の方が全ての反射材の反射率において従来の $D_a = 2\text{ mm}$ のシミュレーションよりも変動係数が小さく光収率の一様性が良い。また、(b) について、 $D_b = 4\text{ mm}$ の黄色線次に $D_b = 1\text{ mm}$ の赤線が変動係数の平均値が小さくなっている。 $D_b = 4\text{ mm}$ は、反射材にファイバが接地しており、 $D_b = 1\text{ mm}$ はファイバは中心付近にある。(a) と (b) を比較すると、 $D_a = 1\text{ mm}$ の場合と比較して $D_b = 1\text{ mm}$ の方が変動係数が小さくなっているが、今回のシミュレーションでは荷電粒子がセルを垂直に通る場合のみを考えていたため、荷電粒子を全方位から通過させるなど、より詳しいシミュレーションを行い最終的なファイバの位置を決定する必要がある。

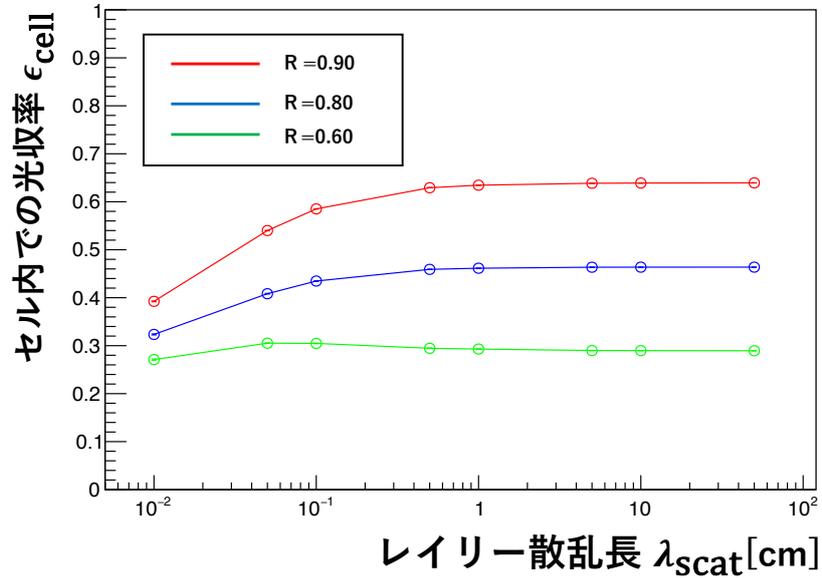


図 4.9: WbLS のレイリー散乱長が光吸収率 ϵ_{cell} に与える影響。R は反射材の反射率を表している。

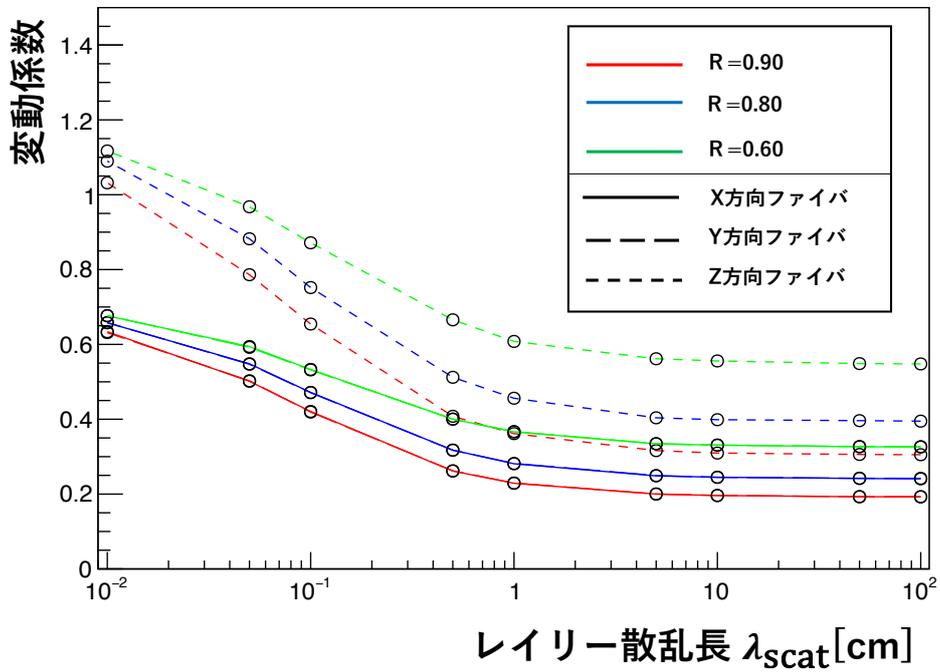
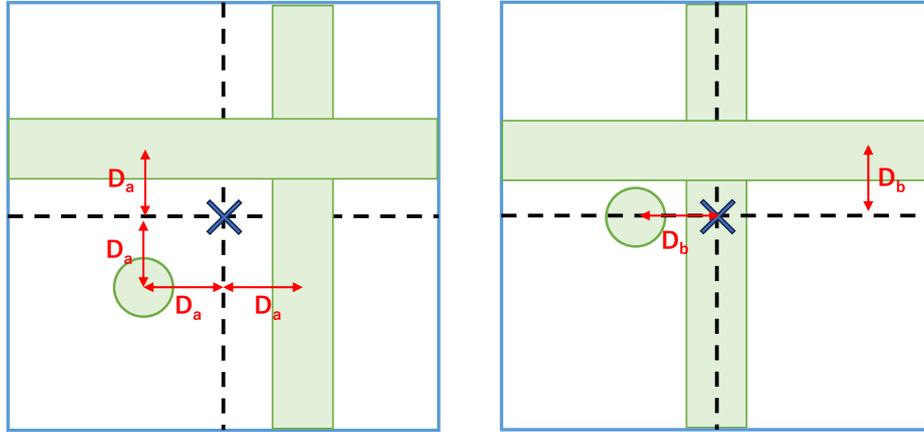
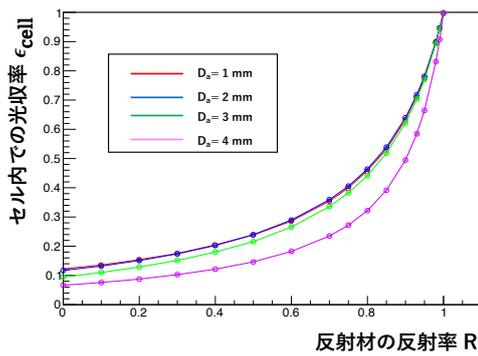


図 4.10: WbLS のレイリー散乱長が変動係数に与える影響。R は反射材の反射率を表している。

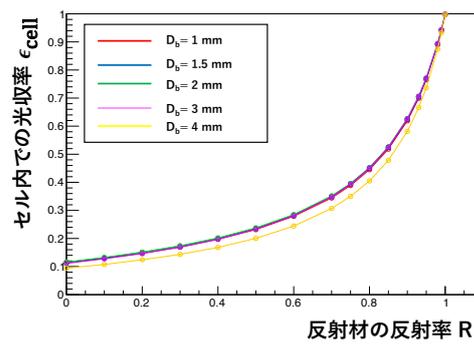


(a) ファイバを中心から縦横に同じ大きさずらし (b) ファイバを中心から縦横一方にずらした場合。 D_a はずらした距離を表す。 D_b はずらした距離を表す。

図 4.11: 2 パターンのセル内のファイバの配置。青い枠がセルの壁を緑色の図形がファイバを表している。 D_a と D_b はそれぞれずらす大きさを表している。

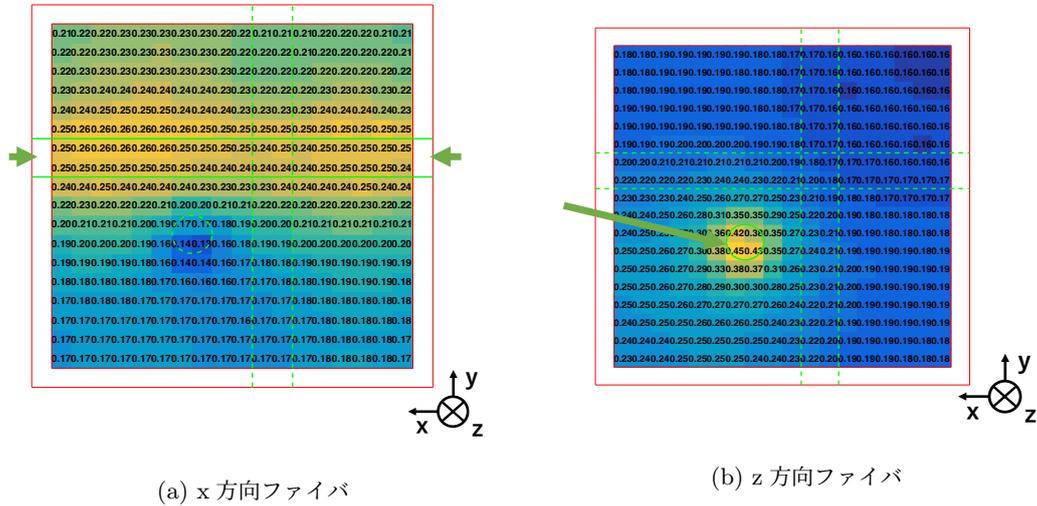


(a) 中心から縦横に同じ大きさずらした場合



(b) 中心から縦横一方にずらした場合

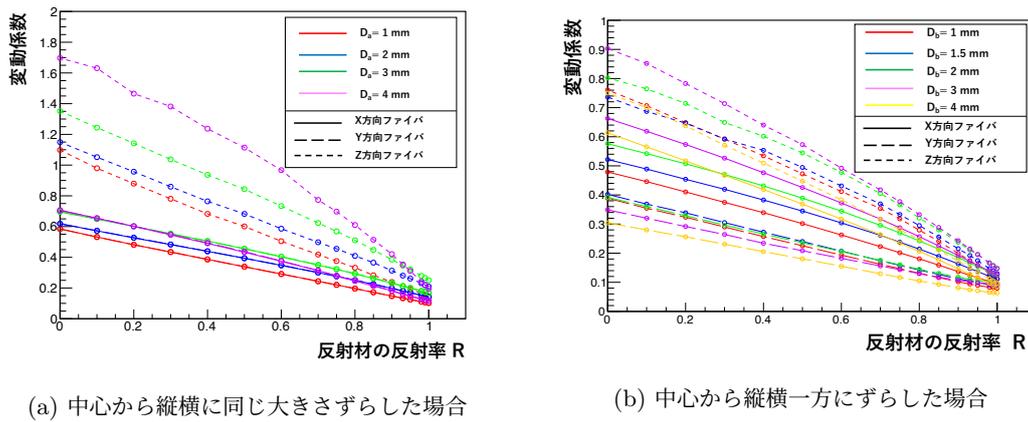
図 4.12: ファイバの配置によるセルの光吸収率の変化



(a) x 方向ファイバ

(b) z 方向ファイバ

図 4.13: $D_a=1$ mm、反射材の反射率 0.9 の場合のセル内の光収率の入射位置による依存性。緑色の線がファイバを示し、緑色の実線は着目しているファイバを、赤色の線は反射材の位置を示している。また、各格子の内の数字がセル内の光収率を表している。



(a) 中心から縦横に同じ大きさずらした場合

(b) 中心から縦横一方にずらした場合

図 4.14: ファイバの配置による変動係数の変化

4.3 WLS ファイバの光収率

この節では、WLS ファイバに吸収された光が伝播し、MPPCがある方のファイバ端から出るまでの過程での光収率について検討する。WLS ファイバの光収率は、各伝搬過程に分けて考えると、WLS ファイバに到達したシンチレーション光が波長変換される確率 (波長変換効率) と波長変換され等方的に放出される光がコアとクラッドにおいて全反射して閉じ込められる確率 (捕獲率)、伝播する光がファイバ内で損失せずに伝わる確率 (生存確率)、ファイバ端で光がファイバから出る確率 (脱出率) の積で表すことができる。詳細は A.1 章に記載するが、Geant4 を用いたシミュレーション等により以下のように見積もった。

波長変換効率 WLS ファイバの吸収ピーク付近の波長領域であればほぼ 100% 近い効率で吸収・変換される。

典型的な液体シンチレータの発光ピーク波長 (400-450 nm) が WLS ファイバの吸収ピーク (表 2.1) とよく合っていることから、波長変換効率はほぼ 1 に近いと考えられる。

捕獲率 捕獲率は、コアとクラッドの間で光が反射せず WLS ファイバ内から出てしまうことによって小さくなってしまふ。WbLS から入射する光子がどの程度の吸収長で WLS ファイバ中で吸収・波長変換されるかに大きく依存し、シミュレーションよりおよそ 9-18% であった。WbLS のシンチレーション光の波長を変化させることで変更可能であると考えられるが、WLS ファイバに依存する特性であり、大きく増加させることは難しいと考えられる。

生存確率 生存確率は、WLS ファイバ中で波長変換後の 2 次光子が再吸収される場合や内部で散乱して WLS ファイバ外に出てしまうことによって小さくなる。そのため、生存確率は MPPC のあるファイバ端から離れた距離にある位置で吸収された 1 光子ほど小さくなり、 $1/e$ になる特徴距離が減衰長として表される。典型的な値は、表 2.1 に示したように 350 cm である。WLS ファイバ中での 2 次光子が発生する分布に依存するが、WbLS 検出器の想定サイズである 200 cm 離れたセルで発生した光は、0 cm のファイバ端において 53%、45% となる。生存確率もファイバの特性に依存するため、ファイバの開発を行うことが向上させることが可能であるが、簡単に実現させることは困難であると考えられる。

脱出率 脱出率は、ファイバの物質とファイバの端に置かれている物質の屈折率が異なることで、全ての光が脱出せずに反射を起こすことによって発生する。そのため、これらの屈折率の差を小さくすることによって大きくすることができる。WLS ファイバと MPPC の間を波長変換ファイバのコアの屈折率 1.43 と MPPC の検出器表面のエポキシ窓 1.55 の間の屈折率の物質で満たすことにより、1.25-1.74 倍程度 WLS ファイバから脱出する光を増やすことができることが分かった。この範囲の違いは、シンチレーション光がファイバ内で吸収され波長変換する位置の分布によって決まるため、実際に測定することが重要である。ただし、WbLS 検出器の想定である SuperFGD は 5.6 万本の WLS ファイバと MPPC があり、均一に接着する必要があることも考慮すると簡単に実現することは困難である。有効性や実現性、コスト等の観点からよく検討する必要がある。

4.4 MPPC での光検出確率

この節ではファイバ端から出てきた光が光検出器 MPPC に検出される確率について検討する。MPPC での光検出確率は、ファイバから出た光が MPPC まで辿り着く確率 (到達率) と MPPC の光子検出効率の積で表すことができる。詳細は A.2 章に記載するが、到着率は前節と同様の Geant4 シミュレーション等を用いて

以下のように見積もった。

到達率 到着率は、WLS ファイバの端から放出された光子が MPPC の範囲外に出てしまったり、MPPC の窓材との間の反射によって小さくなる。そのため、前節と同様に WLS ファイバと MPPC の間を屈折率の変化が少ない物質で満たすことで 10% 程度増加することができる。またファイバと MPPC の距離が重要であり、例えば直径 1 mm の WLS ファイバと検出面の 1 辺 1.3 mm の MPPC では、0.1 mm 以内の距離に密着させることが重要であることが分かった。

MPPC の光子検出効率 表 4.1 に現在浜松ホトニクス社の商品紹介ページに上げられている MPPC のうち、WbLS 検出器での使用候補となりそうなものの特性を示す。表のように MPPC の検出効率はピクセルピッチによって異なる値をもつ。ピクセルピッチが大きいほど開口率を大きくすることができ、結果として検出効率の増加につながる。例えば、ピクセルピッチが 25 μm から 50 μm に変更することで検出光量は 1.6 倍になる。ただし、ビームテスト時はピクセルピッチ 50 μm の MPPC を使用しており、MPPC を変更することによる検出光量の増加は見込めない。また、ピクセルピッチが大きくなると検出効率が増加する一方で、ピクセル数は減少し、MPPC で測定可能な最大光子数 (ダイナミックレンジ) は小さくなる。SuperFGD においてはピクセル数が 2668 個の S13360-1325 を採用しており、宇宙線の MIP 光量が 50 p.e. 程度に対して、20 倍の 1000 p.e. 程度まで測定する予定である。測定したい最大光子数によっては、検出面のサイズが 1.3 mm \times 1.3 mm で検出効率の大きいピクセルピッチが 50 μm の MPPC では、ピクセル数が足りない可能性がある。そのため MPPC を検討する際には、WbLS 検出器が必要とするダイナミックレンジを含めて検討する必要がある。

表 4.1: 各 MPPC の仕様 (浜松ホトニクス社 技術資料より作成^[35])

型番	検出面のサイズ (mm \times mm)	ピクセルピッチ (μm)	ピクセル数	PDE@Max 感度波長 (%)
S13360-1325	1.3 \times 1.3	25	2668	25
S13360-1350	1.3 \times 1.3	50	667	40
S13360-3050	3.0 \times 3.0	50	3600	40
S14160-1315	1.3 \times 1.3	15	7284	32

4.5 章のまとめ

この章では、WbLS 検出器の検出光量の増大に向けて、シンチレーション光が発生し、MPPC によって検出されるまでの各過程において検出光量に影響を与える各要素を検討し、検出光量の増加の可能性について評価した。

WbLS 検出器の検出光量の向上に一番大きく影響を与えるのは WbLS 中の液体シンチレータの割合である。ビームテスト時の WbLS において液体シンチレータの割合は 9-12% であったから 20% に増量することで 2.2-1.7 倍の検出光量の増加が見込まれる。しかしながら、液体シンチレータの割合を大きくすることは、水の割合が少なくなってしまうことを意味する。つまり、水-ニュートリノ反応の事象数が減少し、炭化水素-ニュートリノ反応の背景事象数が増加する。WbLS 検出器の主目標は、水とニュートリノの反応の精密測定を行うことにあるので、WbLS に占める液体シンチレータの割合の増加を行う場合は、必要最低限の増加に抑える必要がある。

その次に影響を与えるのは反射材の反射率の影響であり、ビームテスト時の PMMA 容器の反射率が分かっていないため正確な見積もりはできないが、仮に 70% から 90% まで反射率を増加させたとすると 1.8 倍の検出光量の増加を見込むことができる。

また、WbLS の特性が検出光量や検出光量の非一様性に与える影響について評価を行った。その結果、吸収長は 100 cm、レイリー散乱長については 1 cm 以上あれば、WbLS 内の吸収や散乱による効果は無視できることが分かった。さらに、セル内の WLS ファイバの配置が検出光量の非一様性に与える影響についても評価を行った。SuperFGD を参考にした中心から縦横 2 cm 離れた位置にファイバを通すよりもより中心にファイバが近い方に通した方が、荷電粒子の通過位置による検出光量の非一様性が小さく、検出器として良い性質を持つてることが分かった。

その他にも、WbLS 検出器の光子の伝搬過程を最適化することによる検出光量増大の効果を見積もった。ファイバ端と MPPC の間に屈折率 1.5 程度の物質を挟むなどの検出光量の増加につながる可能性のある要素が判明したが、いずれの手法も、実験による検証は必要であり、簡単に実現可能なものではない。

そこで本研究では、検出光量の増大の効果が大きいと見込まれる、液体シンチレータの割合を増加させることによる WbLS 自体の発光量の増加と反射材の反射率の増加によるセル内の光収率の増加について取り組む。

第 5 章

WbLS の発光量増大に関する測定

この章では、WbLS の発光量を増加させることを目的として行った研究について述べる。第 4 章において述べたように、WbLS の発光量の増大は WbLS 検出器の検出光量を最も増加させることのできる要素であり、その中でも液体シンチレータ割合の増加が要因である。ただし、液体シンチレータ割合の増加は WbLS 中の炭化水素の割合の増加を意味し、検出器の目標である水とニュートリノの反応断面積の精密測定において、炭化水素とニュートリノ反応の背景事象増加を招いてしまう。そこで、5.1 節ではまず水と液体シンチレータ以外に WbLS に混合されている界面活性剤に着目し、界面活性剤を最適化することで水の割合を保ちつつ液体シンチレータ割合の増加することを狙った。次に、実際に液体シンチレータ割合を増加させた WbLS サンプルを用いて光量の測定を行った。5.2 節では、PMT を用いてガラス瓶中の WbLS の発光の測定を行い、作製した WbLS が発光していることを確認した。その後 5.3 節では、WbLS 検出器に近いセットアップを用いて光量を測定した。

5.1 液体シンチレータを効率的に溶かす界面活性剤の選定

5.1.1 目的

第 2.2 節で述べたように、界面活性剤は WbLS において、本来水中に溶けることのない液体シンチレータをミセルとして溶かすという重要な役割を担っている。ある界面活性剤の割合において溶かすことのできる液体シンチレータの割合の最大の可溶化量が存在する。つまり、液体シンチレータの割合を増やすことは界面活性剤割合を増やすことにもつながるため、少ない界面活性剤の量でより多くの液体シンチレータを溶かすことが、WbLS 検出器での水-ニュートリノ反応の測定における、炭化水素とニュートリノの反応という背景事象を削減するために重要になる。実際に、ビームテストで用いた WbLS サンプル (表 3.1、3.2) は、液体シンチレータ約 10 % に対し界面活性剤を約 20 % 含んでおり、単純に界面活性剤と液体シンチレータ割合を保ったまま液体シンチレータを倍増させると、水の割合は 40% となってしまふ。このことから、より効率的な界面活性剤の探索が液体シンチレータの割合の増加には必要である。この節では、液体シンチレータの割合を増加させながら炭化水素の割合をなるべく少なく保つことのできる、効率的な界面活性剤の選定を目標に界面活性剤の温度特性に関する測定を行った。

5.1.2 非イオン界面活性剤の可溶化量の温度特性

液体シンチレータを効率的に溶かすことのできる界面活性剤の探索における指針については、国枝・篠田らによる論文^[51]を参考にした。彼等の論文^[51]には、液体シンチレータの可溶化量を増大させるためには、界面活性剤のHLB(Hydrophile Lipophile Balance)値が適度であること、非イオン界面活性剤に関しては曇点付近の適度な温度であること等が挙げられている。ここでHLB値とは、界面活性剤(主に非イオン界面活性剤)の水と油への親和性を表す値であり、0(親油性)-20(親水性)の間の数値をとる。曇点は、非イオン界面活性剤のみに存在する重要な特徴温度であり、非イオン界面活性剤を用いた系の温度がこの温度を超えると急激に界面活性能力が落ちてしまう。界面活性剤の割合を固定し、水と油の混合比を変化させた場合の系の相状態の温度依存性の例を図5.1に示す。図の緑色で塗りつぶされた領域では、界面活性剤はミセルを形成し油(WbLSにおいては液体シンチレータ)のを全量水の中に溶かし安定な1相状態となる。図赤線は曇点曲線とよばれ、上述の通りこの温度を超えると1相状態を保てずに相は分離してしまう。また、図青線は可溶化曲線と呼ばれ、ある温度、ある界面活性剤割合における油最大可溶化量を示している。

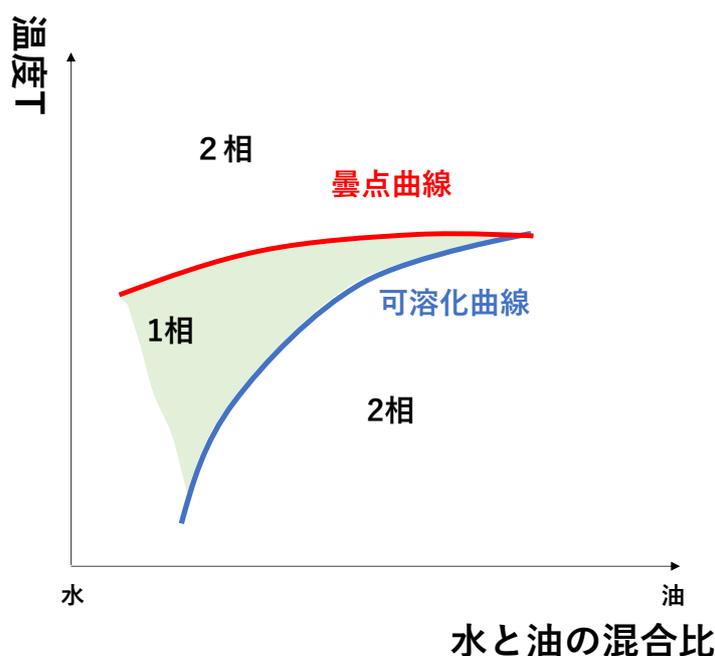


図 5.1: 界面活性剤割合を固定した場合の水-油-非イオン界面活性剤系の相状態の温度依存性の概念図

つまり、非イオン界面活性剤を用いた WbLS において、効率よく液体シンチレータの可溶化量を多くすることができるのは曇点付近であるが、曇点を超えてしまうとミセルを維持することができずに分離してしまう。そのため、非イオン界面活性剤を用いた WbLS の温度特性を知ることが、液体シンチレータの可溶化量を増加させる界面活性剤の選定が可能であることに加えて、WbLS の安定性の面からも重要である。

5.1.3 温度特性の測定の概要

測定のセットアップ

測定に使用した主なセットアップを図 5.2 に示す。作製した WbLS サンプルは容量 2 ml の小型サンプル瓶に入れられている。また、サンプルは 4 つごとに自作ジグにセットし、水槽内に沈めて測定を行った。この自作ジグにはサンプル瓶程度の高さに穴が空いており、温度計でサンプル瓶周りの水温を測定することができるようになっている。この温度を計測することで、WbLS サンプルの温度を間接的に測れるようになっている。このセットアップ全体を恒温槽の中に入れることで温度を調節する。

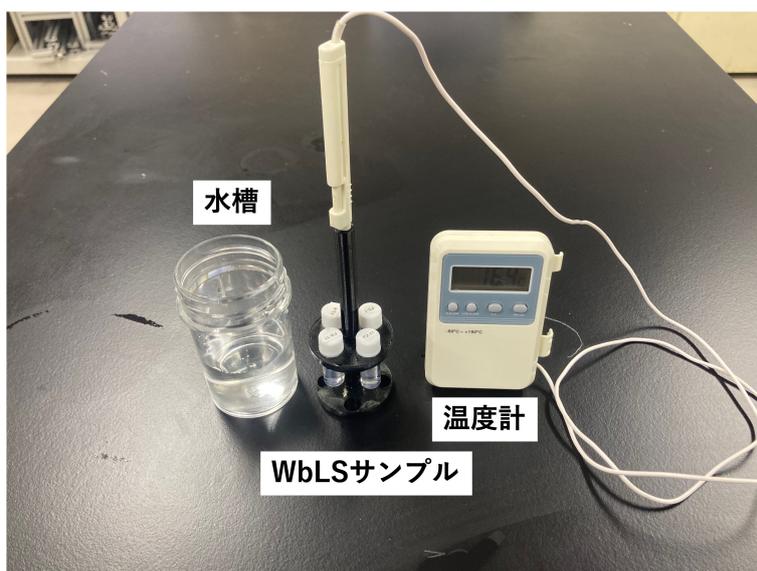


図 5.2: 測定の主なセットアップ

測定した界面活性剤と WbLS

WbLS の作製にあたっては、表 5.1 の Triton X-114 を除く 3 種類の界面活性剤について、WbLS 中に溶かす割合を固定し作製した。非イオン界面活性剤であること、ベンゼン環を持っていることを理由にこれらの 3 つの界面活性剤を選んだ。Triton X-114 については、当初作製予定であったが曇点が低く室温付近でジェル状になってしまい有効な WbLS サンプルを作製できなかった。界面活性剤の割合としては、ビームテストの際の界面活性剤の割合約 20% より界面活性剤の割合を下げることを目標に WbLS 全体の 10% とした。

表 5.1: 選定に用いた界面活性剤について (界面活性剤の特性値は商品ページ [52]–[55] より引用)

名称	HLB 値	曇点	c.m.c
Triton X-100	13.5	65 °C	0.2 - 0.9 mM (20 – 25 °C)
Triton X-114	12.4	23 °C	0.2 mM (20 – 25 °C)
IGEPAL CO-630	13	52 °C	- (記述なし)
TERGITOL NP-10	13.2	63 °C	55 ppm

また、水と液体シンチレータは、残りの 90% において液体シンチレータの割合が 5%,10%,13%,16%,20% となるように WbLS サンプルを作製した。測定に用いた液体シンチレータの混合割合は、表 5.2 に示す。

表 5.2: 界面活性剤の選定のための測定に用いた液体シンチレータの組成

PC [%]	PPO [%]	Bis-MSB [%]
97	3	< 0.025

測定手順

測定は、以下のように行った。

1. 恒温槽で温度を調節する。
2. 6 時間以上放置し、WbLS サンプルと水槽の温度が安定するまで待つ
3. サンプルを軽くふり混ぜ、2 相状態であるか 1 相状態であるか目視で判定する。また、水槽の温度を温度計で計測し記録する。
4. 以上をさまざまな温度で繰り返す。

手順 3 の判定基準については、図 5.3 のように、軽く振った後に透明の 1 相の状態である場合を 1 相状態、白色の濁った液体もしくは 2 相に分離した場合を 2 相状態と判定した。

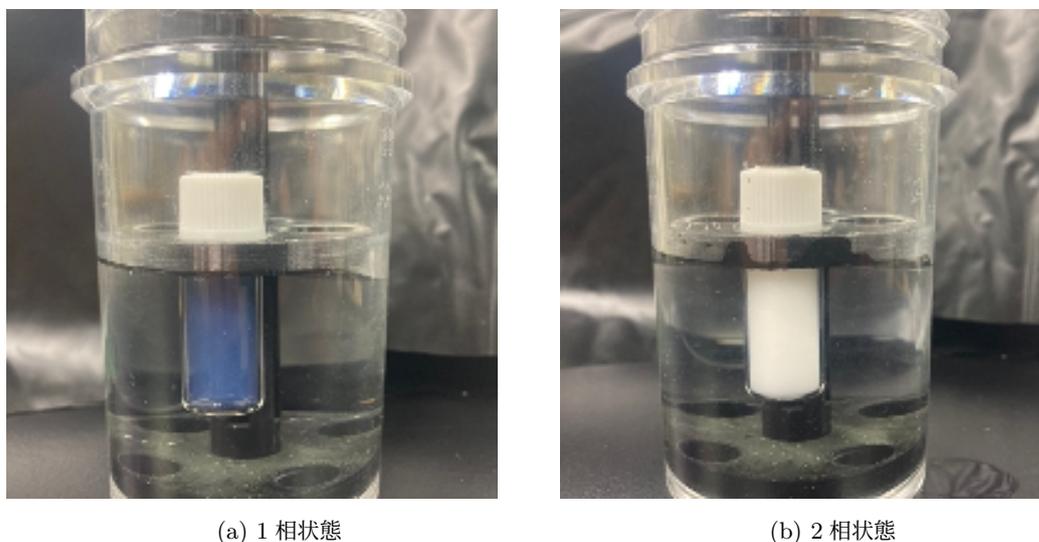


図 5.3: 軽く振ったサンプルの判定基準。軽くサンプルを振った後の状態を目視し、相状態の判定を行う。

5.1.4 測定結果と考察

各界面活性剤についての相状態の温度測定結果を図 5.4 に示す。赤線と青線の間の領域では液体シンチレータが可溶化され 1 相の透明な液体となっている。ただし、各プロットの液体シンチレータ割合が 4.5% の青いデータ点は可溶化曲線の境界を示す点ではなく測定した最低温度を示しており、境界点はこの点よりも下に存

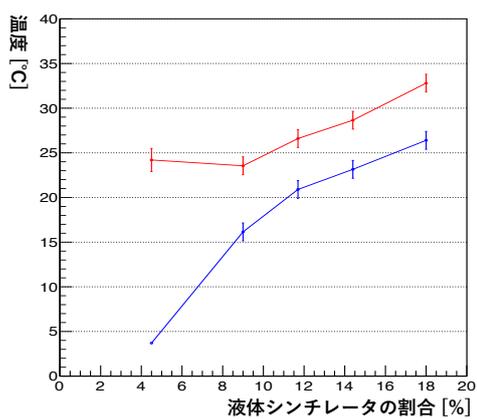
在すると考えられる。また、各点の誤差棒は最も近い測定温度との距離を表している。それぞれの界面活性剤の結果を比較すると、IGEPAL CO-630, TERGITOL NP-10, Triton X-100 の順に、同一液体シンチレータ割合での 1 相状態の領域が温度の高い方へ移動していく。3 つの界面活性剤のみしか測定していないためサンプル数としては少ないが、これは、表 5.1 の HLB 値や曇点の順番と無矛盾であり、HLB 値や曇点の適度なものが効率良く油を溶かせるとしている国枝・篠田らによる論文^[51]の主張とも一致する。

これら 3 つの界面活性剤のうち最も効率良く液体シンチレータを溶かすことのできるものは、界面活性剤の割合が 10% の系においては、少なくとも可溶化曲線 (図青線) が最も低い温度にある IGEPAL CO-630 である。例として、20 °C の場合の最大可溶化量を表 5.3 に示す。界面活性剤として IGEPAL CO-630 を用いることで、ビームテスト時の界面活性剤量約 20% と比較して、半分の 10% で約 1.5 倍の 16% の液体シンチレータ割合のに WbLS を作製できる。また、現在は WbLS 検出器の運転温度として 20°C を想定しているが、可溶化曲線の特性から運転温度を上昇させることでさらに効率よく液体シンチレータを溶かすことができる。

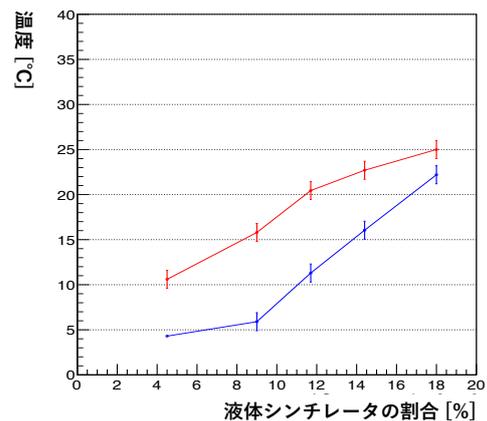
ただし、同じ界面活性剤割合において液体シンチレータ割合が増加すると、ミセルのサイズが大きくなることでレイリー散乱長が短くなり、図 4.1 のように波長の短い光を散乱してしまうことには注意が必要である。。第 4.2 節でのシミュレーション結果から、レイリー散乱長が 1 cm 以上あれば WbLS 検出器における影響を無視できることが分かっている。図 5.5 のように青色 LED(波長 460 nm 程度) の光を 6 cm の厚さの WbLS サンプル (界面活性剤 15%、液体シンチレータ 20%) に通した際に、水道水と比較して明らかな光量の減少が無いことから、レイリー散乱長は 0(cm) はあると考えているが、この点については今後の実測による検証が必要とされる。

表 5.3: 界面活性剤 10% の系において 20 °C の場合の最大の可溶化量

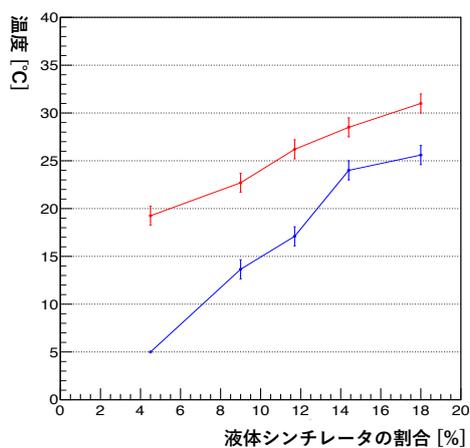
	Triton X-100	IGEPAL CO-630	TERGITOL NP-10
可溶化量 [%]	11.1 ± 0.47	16.7 ± 0.43	12.83 ± 0.28



(a) Triton X-100

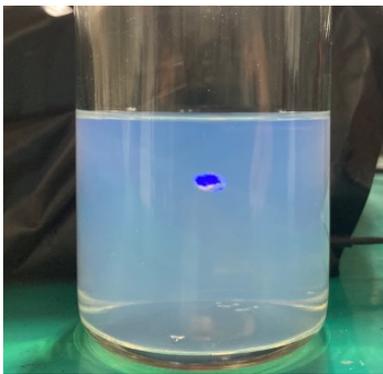


(b) IGEPAL CO-630

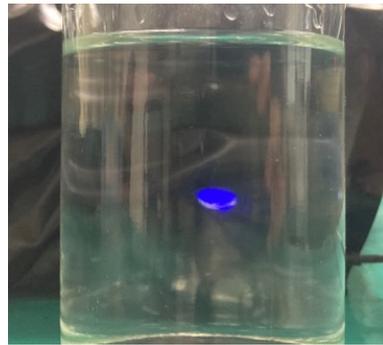


(c) TERGITOL NP-10

図 5.4: 界面活性剤の割合を 10% を保った場合の WbLS の温度による相状態の変化。赤い色は曇天曲線であり、この温度を超えると二層に分離する。青色の線は可溶化曲線であり、ある温度、ある界面活性剤割合における液体シンチレータの最大可溶化量を表す。この 2 つの線で挟まれた領域が可溶化領域であり、安定なミセル溶液が形成されている。



(a) 界面活性剤 15%, 液体シンチレータ 20% の WbLS



(b) 水道水

図 5.5: 直径 6 cm のガラス瓶に入れ後ろから青色 LED で照らした様子

5.2 PMT を用いた WbLS の光量測定

5.2.1 測定目的

前節において、界面活性剤 3 種類について液体シンチレータの可溶化量の温度特性を調べ、その結果 IGEPAL CO-630 が最も効率よく液体シンチレータを溶かすことができることが分かった。この節は、まず界面活性剤 IGEPAL CO-630 を WbLS 中の 10% 用いて、20°C で液体シンチレータの割合が 10% よりも大きい WbLS サンプルを作製できることを再確認する。その後光量測定を行い、液体シンチレータの割合が高いサンプルが実際に高発光量であることを確かめる。

5.2.2 測定手法

PMT を用いてガラス瓶中の WbLS の宇宙線による発光量を測定した。1 測定あたり 24 時間程度データ取得を行った。

セットアップ

PMT を用いた光量測定のセットアップを図 5.6 に示す。WbLS サンプルは直径 30 mm、容量 30 ml のガラス瓶に 20 g 程度封入されている。トリガー用のプラスチックシンチレータは 5 cm×5 cm×1 cm の大きさをしており、上下のシンチレータ間の間隔は 25 cm である。さらにシンチレータには WbLS ファイバが通しており、WLS ファイバで伝搬させた光を MPPC によって電気信号に変換している。

このセットアップ全体を恒温槽の中に入れて、温度は 20°C に保った。PMT と WbLS が入ったガラス瓶は、シリコングリス (屈折率 1.40) によって隙間なく接着され、上下 2 枚のトリガー用のプラスチックシンチレータによって挟まれた構造をしている。PMT は浜松ホトニクス社の直径 28 mm の PMT(R1398) を使用し、-1200V の電圧を印加した。

測定に用いた WbLS サンプル

今回の測定に用いた WbLS サンプルの組成を表 5.4、サンプル作製に用いた液体シンチレータの組成を表 5.5 に示す。サンプル A は、水による発光を測定するために水のみが入っている。サンプル B、C、D は、界面活性剤の割合を 10% に固定し、液体シンチレータの割合を 5% ずつあげるように作製した。これは、第 4.1 節で述べたように、WbLS の発光量のうち大部分が、液体シンチレータの割合 × 液体シンチレータの発光量で表されるため、液体シンチレータの割合増加による検出光量の増加量が比例しているを確かめるためである。サンプル E、F は、より液体シンチレータ割合の大きいサンプルを安定して作製するために、界面活性剤の多いサンプルになっている。また、ビームテストにおける WbLS サンプルと検出光量を比較するために、表 5.6 に示すサンプル (以下、比較用サンプル G と呼ぶ) を作製した。このサンプルは表 3.1 の WbLS1 と同じ配合になるように作製した。さらに、検出光量のリファレンスとして、表 5.5 の純粋な液体シンチレータを封入したサンプルと、何も封入しないガラス瓶サンプルも作製した。サンプル作製の際には、全てのサンプルにおいて Bis-MSB の割合が PC に対して均一になるように、初めに PC と Bis-MSB をよく混合し、この混合液を用いて WbLS を作製した。ここで、表 5.4 の WbLS 作製には、ナフタレンスルホン酸ナトリウムというアニオン界面活性剤を 2 種類目の界面活性剤として加えて作製している。IGEPAL CO-630 を用いて作製した WbLS は、前節で測定したように、液体シンチレータ割合が低くなると、20°C において曇点曲線を超

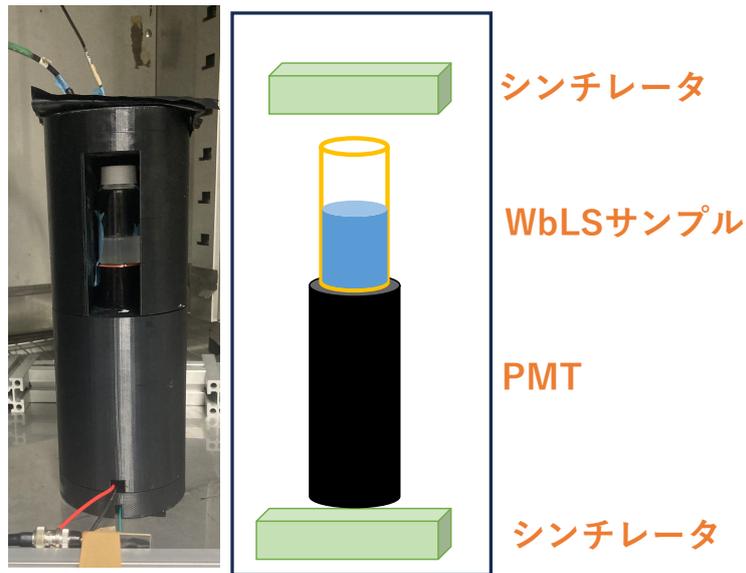


図 5.6: PMT による光量測定の設定アップ

え、2相に分離してしまう。そのため、測定温度の 20 °C において 1 相の溶液となるような調整を目的に別の界面活性剤を加えて作製している。アニオン界面活性剤としては、ビームテストの WbLS でも使用している SDS が一般的であるが、ナフタレンスルホン酸ナトリウムはベンゼン環を持っていることからシンチレーション光量の増加を期待し、こちらを加えている。

表 5.4: PMT 測定に使用した WbLS サンプルの組成。液体シンチレータの組成は表 5.5。

サンプル呼称	水 [%]	IGEPAL CO-630 [%]	ナフタレンスルホン酸 ナトリウム [%]	液体シンチレータ [%]
A	100	0	0	0
B	85.0	9.0	1.0	5.0
C	80.0	9.7	0.3	10.0
D	75.0	10.0	0	15.0
E	70.0	14.5	0.5	15.0
F	67.5	14.5	0.5	17.5

表 5.5: PMT 測定に用いた液体シンチレータの組成

PC [%]	PPO [%]	Bis-MSB [%]
94	6	< 0.01

表 5.6: ビームテストとの比較用の WbLS サンプルの組成

サンプル呼称	水 [%]	Triton X-100 [%]	SDS [%]	PC [%]	PPO [%]	Bis-MSB [%]
G	67.9	20.6	2.7	7.6	1.2	< 0.001

トリガー・データ取得

本測定における光検出器以降の回路図を図 5.7 に示す。PMT によって発光量が変換された電気信号はディバイダにより半分に減衰した後*1CAEN 社製のデジタイザ (DT5725S)^[56] によって波形として記録される。MPPC によって電気信号に変換されたトリガー用プラスチックシンチレータの信号は、アンプによって 10 倍にされ、ディスクリミネータによって閾値以上の信号のみ矩形波に変換される。その後上下のトリガー用信号のコインシデンスを取り、これをデジタイザのデータ取得のトリガーとして用いている。今回の測定ではディスクリミネータの閾値は、5.5 p. e. 程度に設定し、測定を行った。

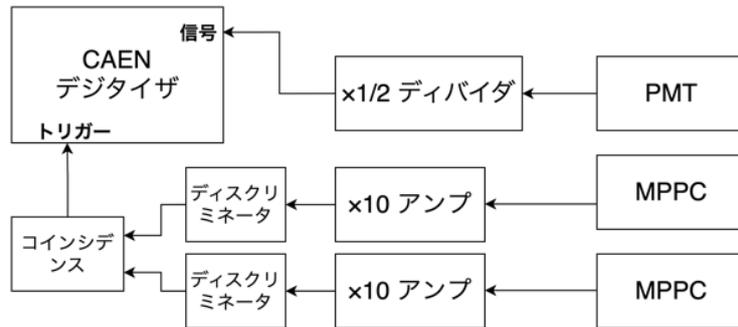


図 5.7: PMT による光量測定の回路図

5.2.3 解析手法

取得波形の解析

今回使用したデジタイザは、サンプリングレートが 250 MS/s であり 4 ns ごとに電圧を測定し記録する。そのため、PMT から送られ記録される典型的な波形は図 5.8 のようになる。まず初めに、こうして得られた波形の中から最小値を記録した点から前に 5 点後ろに 10 点の領域 (図中の赤線の領域) について値を積分した。積分した値からこの領域外において求めたベースラインの値を差し引くことで PMT から得られた信号値 (ADC 積分値) とし、この値をサンプルの検出光量値とした。

サンプルの検出光量の計算

上記の方法で得られた検出光量値 (ADC 積分値) 分布は、図 5.9 のようになる。宇宙線が物質中で落とすエネルギー損失はランダウ分布に従うことから、高 ADC 積分値側に長いテールを持つ分布になっており、青線はランダウ分布によるフィッティング結果を示す。ただし、ランダウ分布のフィッティングでは最確値 MPV

*1 本来ならば、ディバイダで信号を半減させる必要はないが、誤ってディバイダを通してしまった。

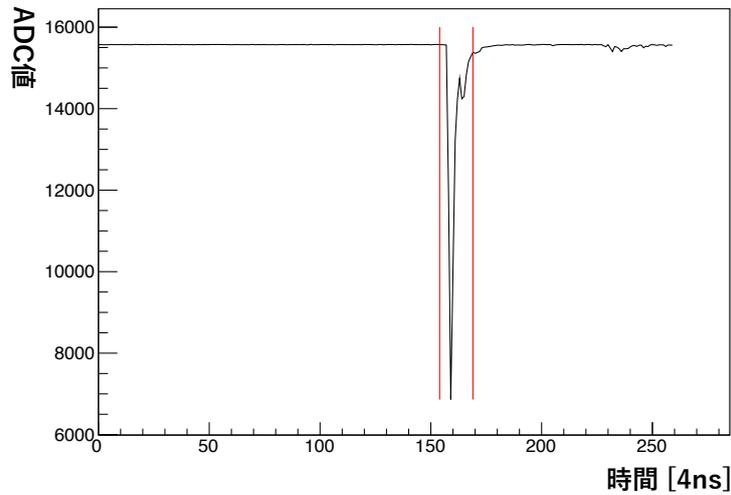


図 5.8: デジタイザに記録される典型的な波形。図中赤線の範囲で積分し、赤線外で求めたベースラインを差し引いた値を PMT からの信号値とした。

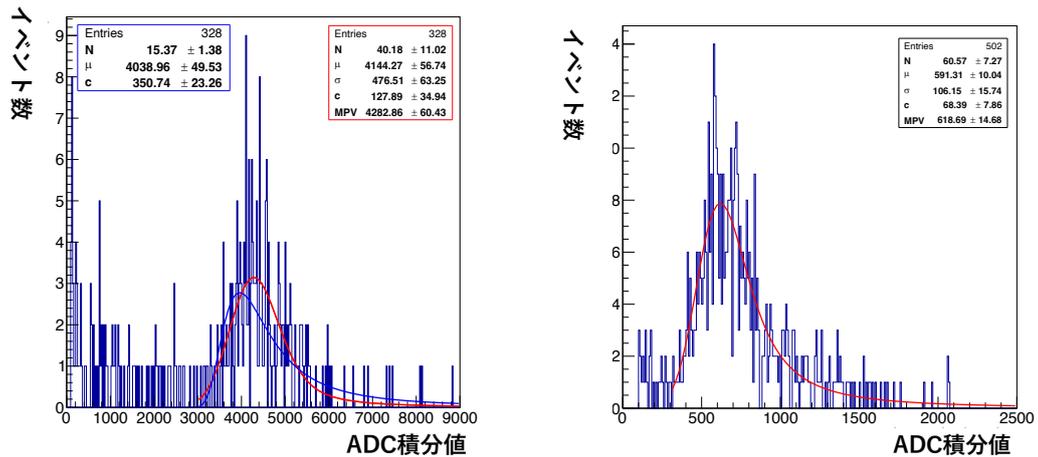


図 5.9: PMT 測定による検出光量分布のフィッティングの様子。青線はランダウ分布によるフィッティング、赤線はランダウ分布をガウス分布で畳み込みした関数によるフィッティング結果を示している。

とピークの位置が有意にずれてしまう。そこで赤線のようにランダウ・ガウス分布によってフィッティングし求めた MPV 値を各サンプルの検出光量とした。

サンプルの相対検出光量の計算

次に、求めた WbLS サンプルの検出光量を、純粋な液体シンチレータの検出光量を用いて相対検出光量に変換した。ただし、ガラス瓶のみのサンプルについて測定したところ、図 5.10 のように 600 ADC 積分値あた

りにピークをもち、WbLS サンプルにおける検出光量 2000-5000 ADC 積分値に対して無視することができない*2。そこで、求めた検出光量値 L_{WbLS} 、レファレンスとして測定した液体シンチレータのみで作製したサンプルの検出光量 L_{LS} 、ガラス瓶のみのサンプルで測定した検出光量 L_{bottle} を用いて相対検出光量 RL_{WbLS} を

$$RL_{WbLS} = \frac{L_{WbLS} - L_{bottle}}{L_{LS} - L_{bottle}}$$

と計算した。

5.2.4 測定結果

各 WbLS サンプル (表 5.4) について相対検出光量を求めた結果を図 5.11 に示す。また、検出光量と液体シンチレータ割合についてプロットしたものを図 5.12 に示す。比較用サンプル G と比較すると、最大の相対検出光量をもつサンプル E は 1.28 ± 0.03 倍の検出光量を持っている。赤線は、比較用サンプル G を除いた WbLS サンプルについてフィットしたものであり、液体シンチレータの割合が増加するに従って、検出光量が増えていく傾向があることが分かる。しかし、この直線の傾きは、 0.85 ± 0.02 [相対検出光量/液体シンチレータ割合] であり、液体シンチレータの割合の増加量ほど検出光量が増えていないという結果になった。青線は液体シンチレータ割合が 0 % のサンプル A の検出光量から傾き 1 で伸ばした直線であり、(B、C、E) の 3 つのサンプルはほぼこの直線上に乗っていることが分かる。また、サンプル D とサンプル C、サンプル E とサンプル F はそれぞれ同じ界面活性剤の割合で液体シンチレータの量が多いにも関わらず、相対検出光量がほとんど増加しない、もしくは減少している。この点については、次の項で測定の有効性を確認した後に考察において検討する。

5.2.5 測定の有効性の確認

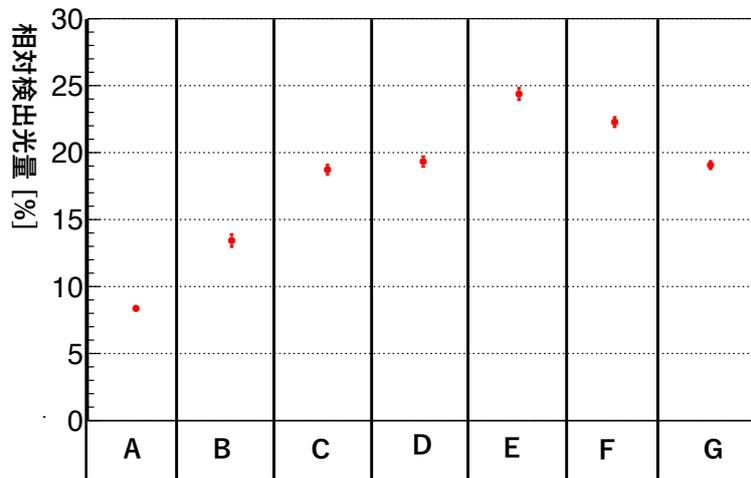
WbLS サンプルの作製方法や、測定毎に変化する要素であるガラス瓶と PMT とのグリスによる接着具合といった要素に依存せず、WbLS サンプル毎の検出光量の差を正しく測定が行えているかを確認するための測定を行った。具体的には、表 5.5 で示した液体シンチレータを用いて表 5.7 に示す組成の WbLS を、別々に 5 つ作製した。ただし、量り取る際の誤差により 0.1% 程度組成が異なるものもある。また、使用されている直鎖アルカリベンゼンスルホン酸ナトリウムは、アニオン界面活性剤の一種であり、 20°C での安定性を目的にしている。この 5 つのサンプルにより同様の測定を行い、検出光量を計算した。測定結果を表 5.13 に示す。

表 5.7: PMT 測定の有効性の確認に使用した WbLS サンプル。液体シンチレータの組成は表 5.5 のものである。

水 [%]	IGEPAL CO-630 [%]	直鎖アルカリベンゼン スルホン酸ナトリウム [%]	液体シンチレータ [%]
80	9.0	1.0	10.0

赤線は平均値を示しており P 値を計算すると 0.12 程度となった。平均から推定した標準偏差は 58.8 ADC 積分値であり、各サンプルの誤差の平均値 42.2 ADC 積分値よりも少し大きかったため、この差が測定によ

*2 PMT のみを置いた場合にはほとんど発光がなかったことから、ガラス瓶やシリコングリスをからのチェレンコフ光によるものである可能性が高いと考えている。



	A	B	C	D	E	F	G
相対検出光量 [%]	8.4±0.2	13.4±0.5	18.7±0.4	19.3±0.4	24.4±0.4	22.3±0.4	19.1±0.3
WbLS の組成							
水 [%]	100	85.0	80.0	75.0	70.0	67.5	67.9
界面活性剤 [%]	0	10.0	10.0	10.0	15.0	15.0	23.3
液体シンチレータ [%]	0	5.0	10.0	15.0	15.0	17.5	8.8

図 5.11: PMT による検出光量の測定結果。各 WbLS サンプルの詳細な組成については表 5.4、表 5.6。

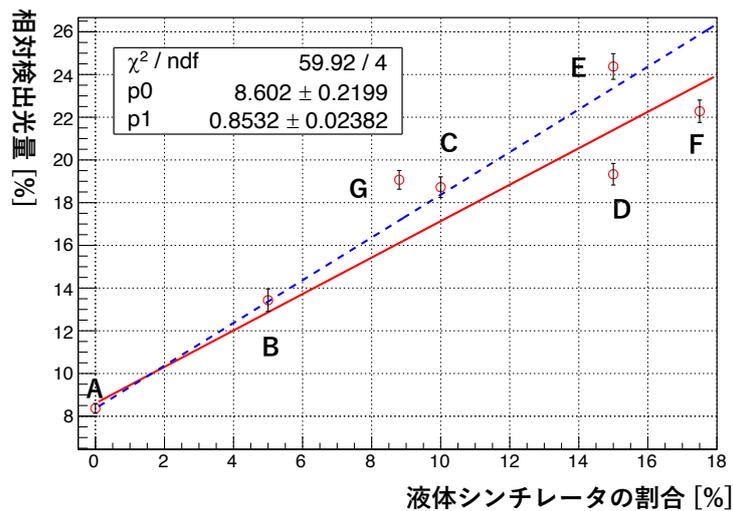


図 5.12: PMT 測定における相対検出光量と液体シンチレータ割合の関係。ただし、一次関数のフィッティングはサンプル A、B、C、E のみでおこなっている。

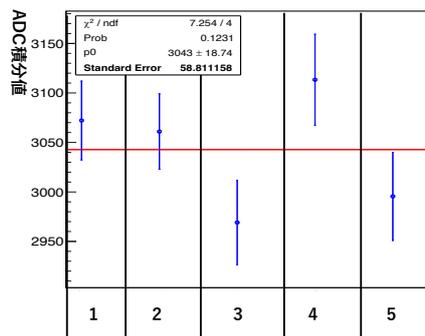
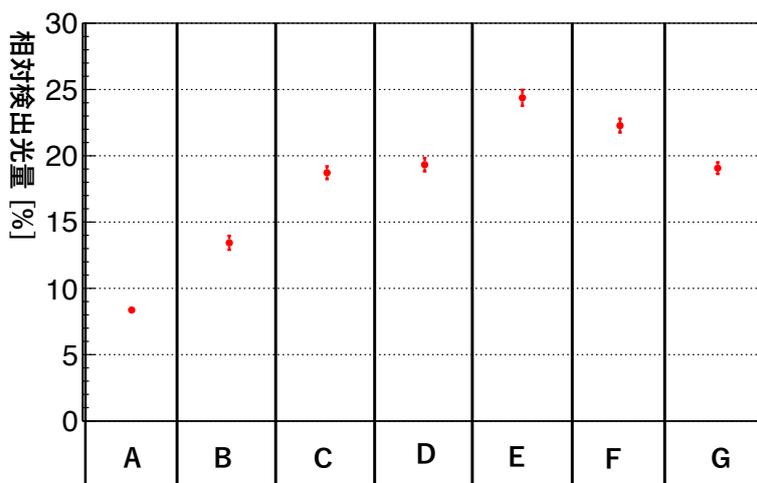


図 5.13: 同一組成の WbLS サンプルの検出光量の測定結果 (プロット上の赤線は 5 つのサンプルの平均値を示す。)

る誤差からきていると仮定し、相対誤差 1.5% を系統誤差として測定結果に加える。この場合 PMT による WbLS サンプルの測定結果は、図 5.14 のようになる。図 5.11 と比較すると、少し誤差棒が大きくなっているが、結果に影響を与えるほど大きくないことが分かる。この誤差を踏まえてサンプル E と比較用サンプル G の検出光量比を計算すると 1.28 ± 0.04 であった。



	A	B	C	D	E	F	G
相対検出光量 [%]	8.4 ± 0.2	13.4 ± 0.5	18.7 ± 0.5	19.3 ± 0.5	24.4 ± 0.6	22.3 ± 0.5	19.1 ± 0.4
WbLS の組成							
水 [%]	100	85.0	80.0	75.0	70.0	67.5	67.9
界面活性剤 [%]	0	10.0	10.0	10.0	15.0	15.0	23.3
液体シンチレータ [%]	0	5.0	10.0	15.0	15.0	17.5	8.8

図 5.14: 4% の系統誤差を加えた場合の PMT による検出光量の測定結果。各 WbLS サンプルの詳しい組成については表 5.4、表 5.6。

5.2.6 節のまとめと考察

この節では、前節の結果得られた最も効率よく液体シンチレータを溶かすことのできる界面活性剤 IGEPALCO-630 を用いて液体シンチレータの割合が今までの WbLS で最大である、17.5% の WbLS サンプルの作製に成功し、その後検出光量を測定した。PMT を用いてこれらの WbLS の検出光量を測定した結果、

1. ビームテストとの比較用の WbLS サンプルと比較して、最大で 1.28 ± 0.04 倍という有意に大きい検出光量を達成した。その上、このサンプルは比較用のサンプルよりも水の割合が大きく、水の割合を効率的に保ったまま検出光量の増大に成功したことになる。ただし、この検出率の増加率は期待していた液体シンチレータの割合の増加率 (1.7 倍) より優位に小さい値になっている。
2. 検出光量の増加率は液体シンチレータ割合の増加率に対して、 0.85 ± 0.02 程度と期待されていたよりも小さかった。ただし、3つのサンプルについては、液体シンチレータ割合が0のサンプル A から引いた傾き 1 の直線上によくあっていた。
3. 液体シンチレータ割合が大きい 2つのサンプル (D、F) について、同じ界面活性剤割合で液体シンチレータの割合が小さいサンプルと比較して、検出光量に増加が見られないものがあった。

であった。

この測定では水のみサンプル A の検出光量が 0 ではなく液体シンチレータの検出光量の 8% もの値を持っている。ガラス瓶による発光量は解析の段階で差し引いて相対検出光量を計算しており、この発光は水中での発光によるものであると考えられる。このセットアップにおいて宇宙線の運動量方向に PMT の検出面を置いていることから、この発光はチェレンコフ光によるものであると考えられる。PPO チェレンコフ光は WbLS 中にも含まれていると考えられ、WbLS サンプルの検出光量からサンプル A の値を差し引いて考えることができたと仮定する。その場合上記の 1 の点について、比較用サンプル G と比較してサンプル E の検出光量は 1.50 ± 0.09 倍となり、依然として液体シンチレータの増加分である 1.70 倍よりも小さいが、1.5 倍という大きい検出光量が達成されたことになる。また、比較用サンプル G とは液体シンチレータ中の PPO の割合が異なるため、液体シンチレータの発光量が異なる可能性もある。

次に 2、3 の点についても、チェレンコフ光により説明できる可能性がある。まず、2 の点について、傾き 1 の直線上より小さかったサンプルは、3 の点のサンプルと同一であるから、この 2つのサンプルの検出光量が低くなってしまった原因について考える。液体シンチレータ割合を増加させたにも関わらず検出光量の増加が見られなかった 2つのサンプルについては、他のサンプルと比較すると、界面活性剤に比べて液体シンチレータが大きな割合を持っている。図 5.15 に示すように、液体シンチレータ割合の大きいサンプル D の方がサンプル C よりも WbLS サンプルを透過した白色光はより黄色く見えている。これは、ミセルのサイズが大きくなったことでレイリー散乱長が短くなったためであると考えられる。レイリー散乱の断面積は 4.1 の通りミセルサイズの 6 乗、波長の 2 乗に反比例するため、ある界面活性剤と液体シンチレータ比で急激に、波長の短いチェレンコフ光が散乱される割合大きくなり大部分が届かなくなることが予想される。レイリー散乱は、運動方向に対して前後に対称的な散乱であるため、レイリー散乱が起こった場合およそ半分程度の光が PMT に届かないと考えられる。実際に、水のサンプル A の検出光量から傾き 1 で伸ばした直線 (5.12 青線) が期待される検出光量であったとすると、そこからの差はサンプル D が $4.1 \pm 0.5\%$ 、サンプル F が $3.6 \pm 0.5\%$ であり、水であるサンプル A の検出光量 8.4% のうちおよそ半分が検出されなかったと考えて矛盾がない。

本測定においては今までの WbLS サンプルよりも液体シンチレータ割合の大きく、検出光量の大きい

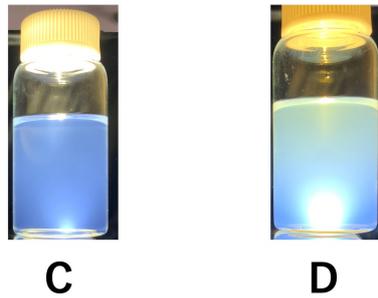


図 5.15: サンプル C と D に下から白色光を当てた様子

WbLS サンプルを、水の割合を保ちながら作製することに成功した。しかしながら、チェレンコフ光と考えられる発光量が液体シンチレータの発光量の約 8.4% と大きく無視できないことが分かった。チェレンコフ光は指向性のある発光であり、WbLS のレイリー散乱長が検出光量に影響を与えている可能性がある。また、本測定は、WbLS 検出器とは容器や光検出器などさまざまな点が異なっている。そのため、実際の検出器においても、液体シンチレータの割合の増加に対して、同様の検出光量の増加が認められるかどうか確認する必要がある。

5.3 WbLS セルでの光量測定

5.3.1 測定の目的

前節において、界面活性剤 IGEPAL CO-630 を用いて、水の割合を保ったまま液体シンチレータの割合を効率よく増加させたサンプルの作製し、検出光量の増大にも成功した。しかし前節の光量測定の課題として、測定する検出器が WbLS 検出器と違うため感度波長が異なっていることや、水のサンプルでも無視できない発光があり、液体の透明度の影響を受けてしまっているであろうことなどが挙げられた。したがって、WbLS 検出器においても、前節の結果と同様の検出光量の増加が期待されるかどうかについては不確実性が残る。そこで本測定では、より実際の検出器に近いセットアップを構築し、液体シンチレータ割合を増加させた WbLS の発光量を評価することを目的とする。

5.3.2 測定手法

2.5 cm×2.5 cm×2.5 cm の WbLS セルを用いて WbLS の宇宙線による発光量を測定した。P1 測定あたり 24 時間程度データ取得を行った。また、WbLS セルは同じ形状のものを 2 つ (A1,A2 と呼ぶ) 作製し、同組成の WbLS を用いてそれぞれ測定を行うことで測定の再現性を確かめる。

セットアップ

WbLS セルでの光量測定のセットアップを図 5.16 に示す。WbLS セルは本来であれば実際の検出器と同じ 1 cm 立方のサイズが検出光量の比較の観点からは好ましいが、宇宙線による光量測定ではイベント数が限られてしまい測定に時間を要してしまうため、大きめのサイズで作製している。このセットアップ全体は恒温槽の中に入れられ、温度は 20 °C に保たれている。

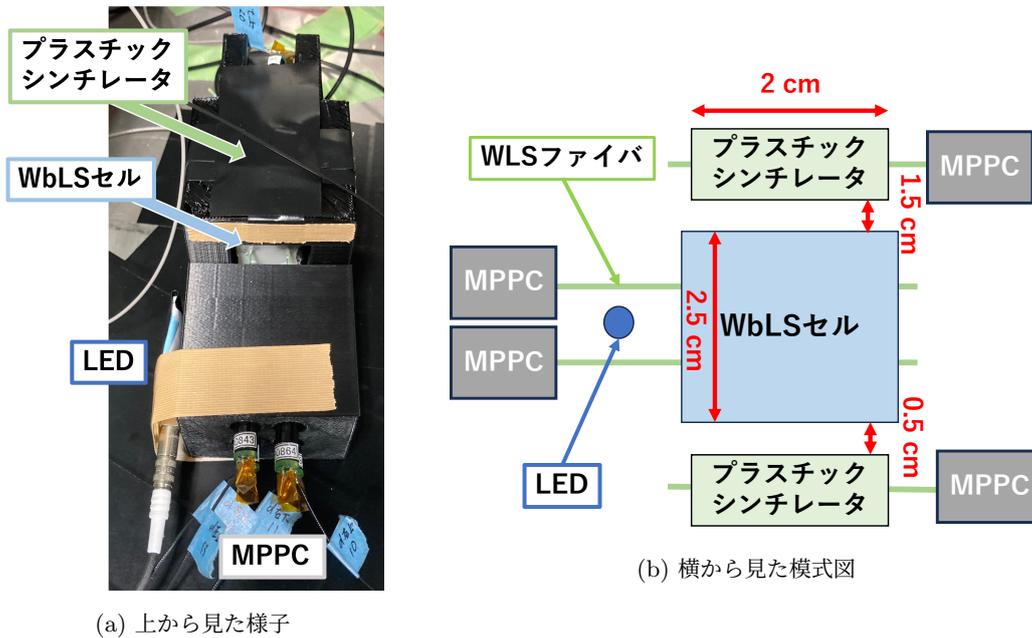


図 5.16: WbLS セルによる光量測定セットアップ

以下セットアップの各要素について説明していく。

WbLS セル

WbLS セルの詳しい構造を図 5.17 に示す。この WbLS セルは、京都大学大学院理学研究科技術部^[57]に依頼して光造形方式の 3D プリンタによって作製している。素材は FormLabs 社のスタンダードレジジン (ホワイト)^[58] を使用した。セル内部は一辺 23 mm の立方体になっており、この中を WbLS で満たす。また、セル側面には直径 2 mm の穴が 8 つ開けられており、ここに 4 本の WLS ファイバを通せるようになっている。WLS ファイバを通した後に隙間から液体が漏れないように接着剤で固め、封をした。さらに、セル上方には直径 8 mm の穴が開けられておりここから WbLS を注入する。この穴は測定時には同じ素材の蓋で塞がれるようになっている。

WLS ファイバと MPPC

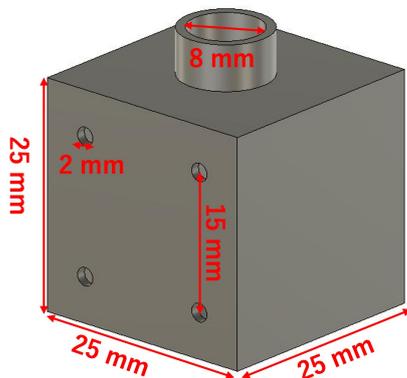
その他の器具として WLS ファイバはクラレ社製の直径 1 mm のマルチクラッドタイプの Y11^[34] を使用し、ファイバ端はダイヤモンドカッターによって研磨した。MPPC は、ビームテストで使用したのと同じ浜松ホトニクス社製の S10362-13-050C を使用しており、逆電圧は 70V を印加した。また、ファイバと MPPC は専用のコネクタ^[40] によって接続している。

トリガーシンチレータ

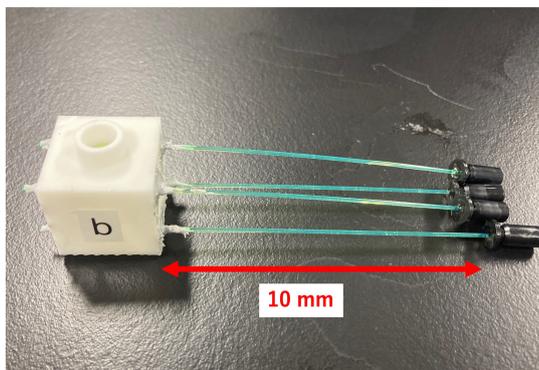
20 mm×20 mm で厚さ 10 mm サイズのプラスチックシンチレータを WbLS の上下に配置し宇宙線事象を選択するトリガーとした。

LED

WLS ファイバ 4 本のそばに青色 LED をつけ、これを光らせることで後に示す MPPC のキャリブレーションを行った。



(a) WbLS セルの構造



(b) WbLS セル

図 5.17: WbLS セル

トリガー・データ取得

本測定における光検出器以降の回路図を図 5.18 に示す。WbLS とプラスチックシンチレータの信号はまとめて EASIROC モジュールに送られ処理される*3。EASIROC モジュールでは、検出光量が閾値以上である場合にトリガー信号を出す。このトリガー信号はコインシデンスを通った後、再び EASIROC モジュールに送られ、データ取得を行う*4。宇宙線のデータを取得する場合は、トリガー用の MPPC からの信号が共に閾値 4.5 p.e. である場合にトリガー信号を出しコインシデンスは素通りしている。LED による MPPC のキャリブレーションを行う場合は、信号用の MPPC のいずれかに対する閾値を 0.5 p.e. に設定し LED を光らせる信号と同期させてデータ取得を行っている。

測定に用いた WbLS サンプル

本測定に用いた WbLS サンプルの組成を表 5.8、サンプル作製に用いた液体シンチレータの組成を表 5.9 に示す。サンプル H は、水だけのサンプルであり水での検出光量を確認する。また、サンプル I、J、K、L は、液体シンチレータの割合を 5% ずつ大きくしていったものである。ただし、サンプル L については他のものと同じ界面活性剤の割合で作製することができなかつたため、界面活性剤を全体の 15.0% 入れている。サンプル M は、純粋な液体シンチレータの検出光量を確認するために作製した。また、液体シンチレータは、PMT 測定で用いたもの (表 5.5) と比較して PPO の割合がおよそ 1/10 になっている。これは、液体シンチレータを用いた実験において、PPO が全体の 0. 数 % 加えられていることから、十分検出光量は飽和していると考え PPO の量を減らした*5本測定においてもビームテストにおける WbLS サンプルと検出光量を比較するために、表 5.10 に示すサンプル (以下、比較用サンプル N と呼ぶ) を作製した。このサンプルは、表 3.1 の WbLS1、PMT を用いた光量測定の表 5.6 と同じ配合で作製している。さらに、何も封入しない空の場合についても測定を行っている。

*3 EASIROC モジュールについては 3.1.3

*4 この測定では EASIROC モジュールの TSTOP 信号と ACCEPT 信号を自動的に生成する機能を用いたため、HOLD にのみトリガー信号を入力している。

*5 例えば NOvA 実験の液体シンチレータでは 0.11% の PPO が加えられている [50]。

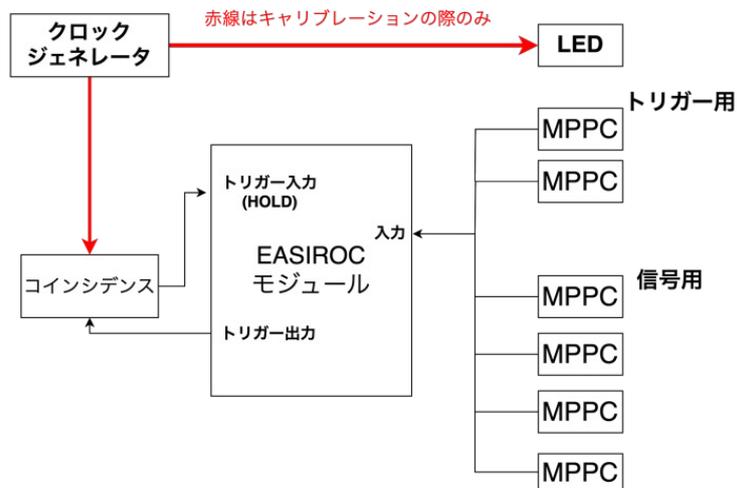


図 5.18: WbLS セルによる光量測定の回路図。ただし、赤線は測定前後に行われる MPPC のゲインキャリブレーションの際のみ有効化されている。

表 5.8: WbLS セルによる光量測定に使用した WbLS サンプルの組成。液体シンチレータの組成は表 5.9。

サンプル呼称	水 [%]	IGEPAL CO-630 [%]	ナフタレンスルホン酸 ナトリウム [%]	液体シンチレータ [%]
H	100	0	0	0
I	85.0	8.8	1.2	5.0
J	79.9	9.6	0.4	10.0
K	75.0	10.0	0	15.0
L	65.0	15.0	< 0.1	20.0
M	0	0	0	100

表 5.9: PMT 測定に用いた液体シンチレータの組成

PC [%]	PPO [%]	Bis-MSB [%]
99.6	0.4	< 0.01

表 5.10: ビームテストとの比較用 WbLS サンプルの組成

サンプル呼称	水 [%]	Triton X-100 [%]	SDS [%]	PC [%]	PPO [%]	Bis-MSB [%]
N	68.0	20.4	2.7	7.6	1.2	< 0.001

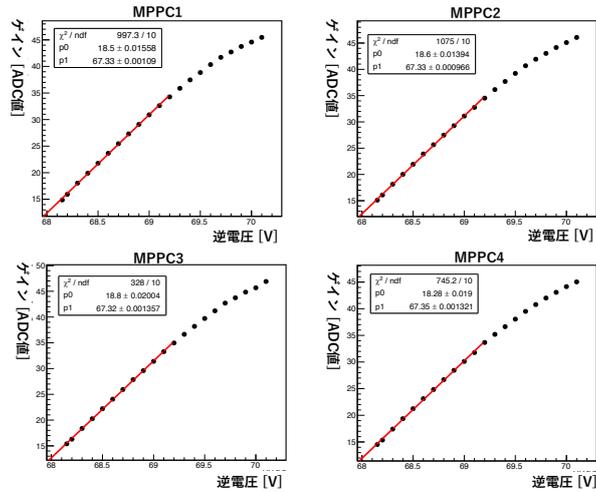


図 5.19: MPPC の印加逆電圧と 1 光子ゲインの関係。逆電圧とゲインが比例関係にある点を一次関数 $p_0 \times (x - p_1)$ でフィッティングすることでゲインが 0 となるブレイクダウン電圧 (p_1) を求めた。

MPPC のオーバー電圧

MPPC に印加する逆電圧を決定するために使用する MPPC のブレイクダウン電圧を測定した。図 5.19 のように MPPC の印加逆電圧とゲインの関係を求め、比例関係にある点を一次関数でフィッティングすることによりブレイクダウン電圧 (ゲインが 0 になる点) を測定した。ただし、今回のゲインの求め方は 5.3.3 節でのべる。測定の結果、ブレイクダウン電圧が 67.3V 付近であった図に示している 4 つの MPPC を WbLS セルの検出光量測定用の MPPC とした。印加逆電圧は 70 V であり、オーバー電圧は約 2.7 V である。

5.3.3 解析手法

LED を用いた MPPC のキャリブレーション

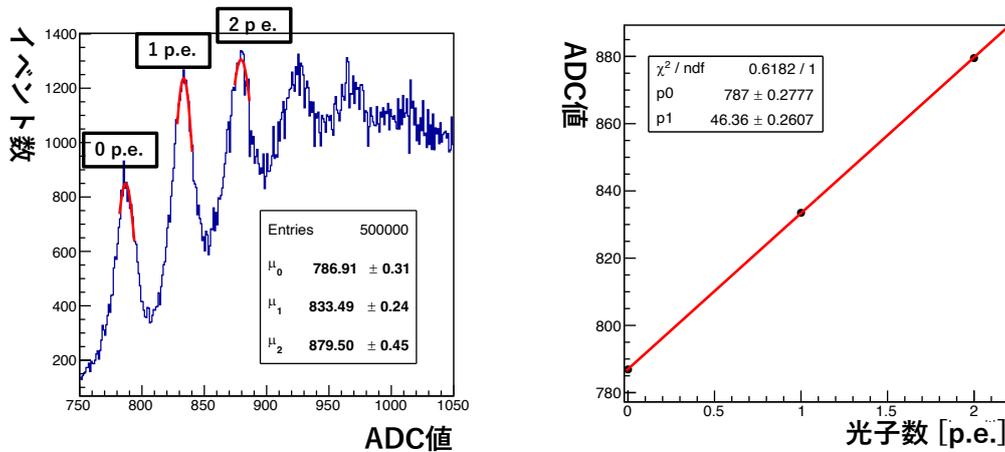
EASIROC は、第 3.1.3 で説明した通り、MPPC からの信号の波高を ADC 値として記録している。ここでは本測定において ADC 値から MPPC での検出光量 [p.e.] に変換するキャリブレーションについて説明をする。

測定を行う前と後に 1 回ずつ LED を用いて MPPC のキャリブレーションを行った。それぞれのキャリブレーション用のデータの ADC 分布は図 5.20(a) のようになる。このデータからピークの位置を 3 点以上ガウス分布でフィッティングし平均値を求める。次にその平均値を図 5.20(b) のように直線でフィッティングし、その傾きを 1 光子ゲイン ($g_{1 \text{ p.e.}}$)、切片を 0 光子 ($ADC_{0 \text{ p.e.}}$) の位置とした。

測定データの ADC 値 (ADC_{WbLS}) は、前後のキャリブレーションで求めた値の平均値を取った値 $\overline{g_{1 \text{ p.e.}}}$ 、 $\overline{ADC_{0 \text{ p.e.}}}$ を用いて変換され、検出光量値 L_{WbLS} を

$$L_{\text{WbLS}}[\text{p.e.}] = \frac{ADC_{\text{WbLS}} - \overline{ADC_{0 \text{ p.e.}}}}{\overline{g_{1 \text{ p.e.}}}}$$

として求めた。



(a) キャリブレーション用データの ADC 値分布 (b) 光子ピーク位置の一次関数によるフィッティング

図 5.20: キャリブレーション用データでの MPPC キャリブレーション。まず、(a) のように 0 p. e. から順にピークの位置をガウス分布によってフィッティングする。その結果得られた位置を (b) のように一次関数 $p_0 + p_1 \times x$ によってフィッティングし、傾き p_1 を 1 光子ゲイン、切片 p_0 を 0 p.e. に対応する ADC 値として求めた。

液体シンチレータサンプルの検出光量値の計算

サンプル M は液体シンチレータのみのサンプルであり、WbLS よりも検出光量が高く EASIROC の通常の ADC で取得可能なダイナミックレンジを超えてしまった。そのため、EASIROC によって記録されているデータのうち低い増倍率の ADC であるローゲイン ADC 値 ADC_{low} の値から計算した。具体的には、図 5.21 のように、ADC 値 ADC と ADC_{low} をプロットしたグラフのうち比例関係にある部分を $ADC = p_1 \times (ADC_{low} - p_0) + ADC_{0p.e.}$ によってフィッティングした。その後求めた値 p_1, p_0 を用いて ADC_{low} から ADC を計算し、5.3.3 と同様に検出光量値の計算を行った。

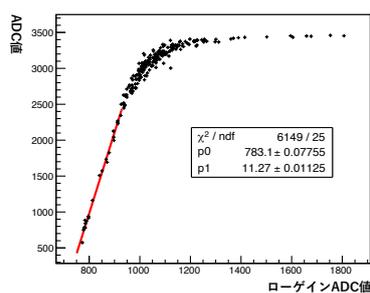


図 5.21: ローゲイン ADC 値と ADC 値との関係。通常の ADC は 3500 ADC 値付近でサチュレーションしてしまうため比例関係にある領域を用いてローゲイン ADC 値から ADC 値を推定した。

サンプルの検出光量の計算

まず、上下のトリガー用のプラスチックシンチレータのデータにおおよそ 20 p.e. 程度の閾値を設定し、さらにデータを選別した。次に、サンプルの検出光量の計算は、こうして得られた 4 つの MPPC の検出光量値

を足した分布に対して図 5.22 のようにランダウ・ガウス分布によってフィッティングし、MPV の値をサンプルの検出光量とした。また、前節のようにレファレンス用の液体シンチレータと何も入れていない WbLS セルの検出光量を用いて相対検出光量を計算するが、図 5.23 のように、この測定において何も入れていない WbLS セルの検出光量は 0 と見なせたため無視した。そのため、液体シンチレータと WbLS の検出光量比を計算する際はこれらの比を計算した。

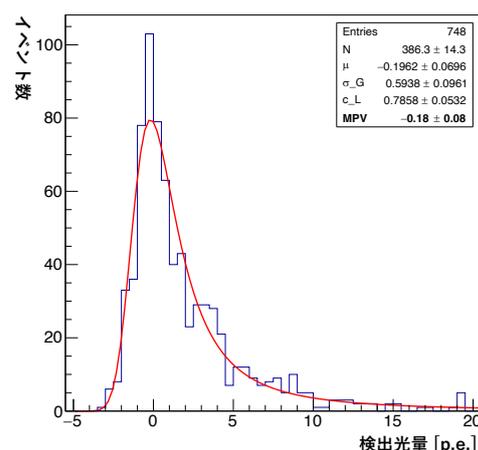
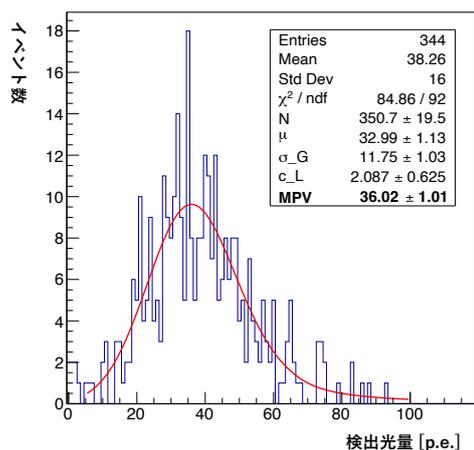


図 5.22: 4つの光量値を足してフィッティングし 図 5.23: WbLS に何も入れなかった場合の検出光量分布

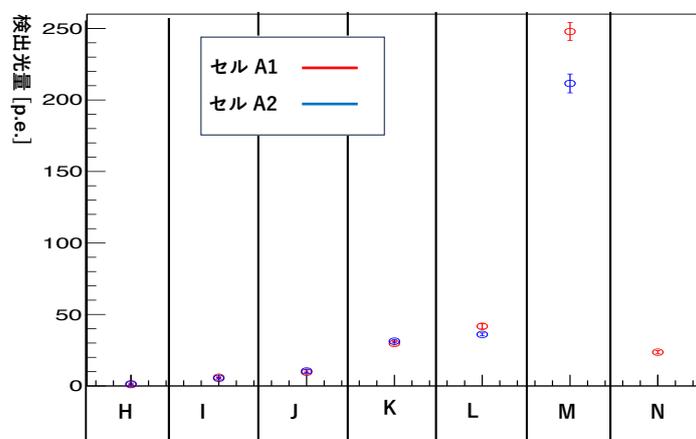
2つの容器の平均相対検出光量の計算

本測定では WbLS セルを 2つ製作し、それぞれについて同じ組成の WbLS を用いて測定を行った。そこで各 WbLS セル毎の相対検出光量を算出した後に 2つの値の平均を計算した。平均値の誤差としては、それぞれの相対検出光量の誤差を誤差伝搬させたものに加え、平均からのずれを加えて計算した。

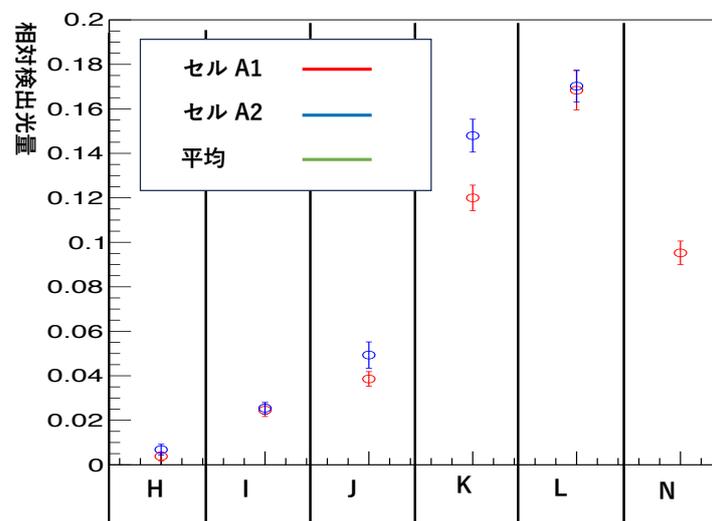
5.3.4 測定結果

WbLS セルによる検出光量測定の結果を図 5.24 に示す。最大検出光量であったサンプル M は、比較用サンプル N と比べ 1.78 ± 0.22 倍であったなお、サンプル N の 2 回目測定 (A2) は、上下のトリガー用プラスチックシンチレータと WbLS セルの配置がずれていることに気づかないまま測定してしまい、5.25 に示す光量分布が得られた。宇宙線が通過していない時のダークカウントによる分布が、信号の分布と重なることで上手くフィッティングができず、結果を空欄としている。したがって、サンプル N は平均相対検出光量を解析手法にしたがって計算することができないため、サンプル N の平均値はセル A の値とした。また、誤差としては、平均からのずれが最も大きかったサンプル K の値を加えて計算をしている。

相対検出光量を液体シンチレータ割合にしたがってプロットしたものを図 5.26 に示す。比較用サンプル N 以外はそのサンプルにおいても液体シンチレータ割合よりも相対検出光量が小さくなっていることがわかる。また、サンプル J から K に液体シンチレータ割合が 5% 増加する箇所のみ、液体シンチレータ割合の増加率の 2 倍程度検出光量が大きくなっているのがわかる。



(a) 検出光量



(b) 検出光量比

	H	I	J	K	L	M	N
検出光量							
セル A1 [p.e.]	0.9 ± 0.5	6.1 ± 0.7	9.6 ± 0.8	29.7 ± 1.2	41.7 ± 1.9	247.9 ± 6.3	23.66 ± 1.2
セル A2 [p.e.]	1.4 ± 0.5	5.4 ± 0.35	10.4 ± 1.2	31.3 ± 1.2	36.0 ± 1.0	211.6 ± 6.6	-
相対検出光量							
セル A1 [%]	0.4 ± 0.2	2.5 ± 0.3	3.9 ± 0.3	12.0 ± 0.6	16.8 ± 0.9	-	9.5 ± 0.5
セル A2 [%]	0.7 ± 0.2	2.5 ± 0.3	4.9 ± 0.6	14.8 ± 0.7	17.0 ± 0.7	-	-
平均 [%]	0.5 ± 0.2	2.5 ± 0.2	4.4 ± 0.6	13.3 ± 1.5	16.9 ± 0.6	-	9.5 ± 1.1
WbLS の組成							
水 [%]	100	85.0	80.0	75.0	65.0	0	68.0
界面活性剤 [%]	0	10.0	10.0	10.0	15.0	0	23.1
液体シンチレータ [%]	0	5.0	10.0	15.0	20.0	100	8.8

図 5.24: WbLS セルによる検出光量の測定結果。各 WbLS サンプルの詳細な組成については表 5.8、表 5.10。

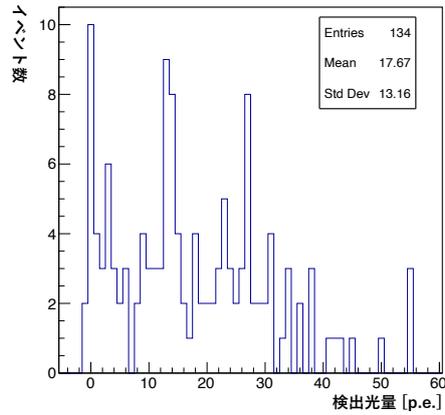


図 5.25: プラスチックシンチレータと WbLS セルの配置ずれによりフィッティングをすることができなかった光量分布

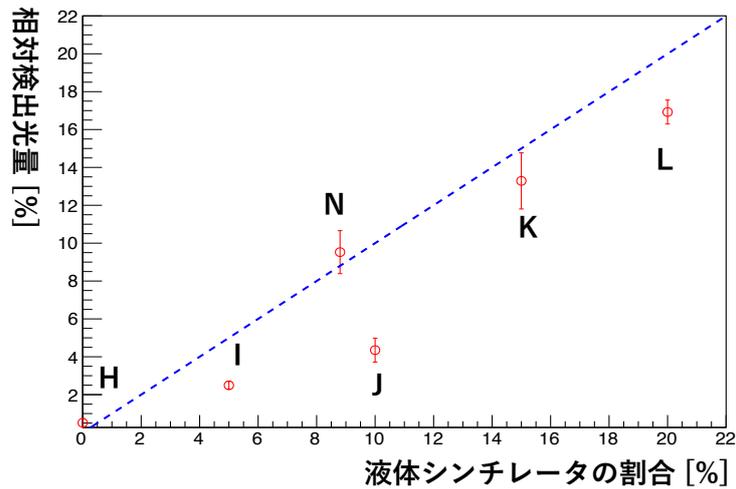


図 5.26: WLS セルでの光量測定における相対検出光量と液体シンチレータ割合の関係。青線は相対検出光量＝液体シンチレータ割合の線である。

5.3.5 節のまとめと考察

本測定では、WbLS 検出器に近いセットアップを用いて WbLS の光量を測定した。その結果、

1. 実際の WbLS 検出器に近い WbLS セルを用いて、ビームテストとの比較用の WbLS サンプル N と比較して、最大で 1.78 ± 0.22 倍という有意に大きい検出光量を達成した。ただし、この検出量の増加率の割合は期待していた液体シンチレータの割合の増加率 (2.27 倍) より 2σ 程度小さかった。
2. 作製した WbLS サンプルは、ビームテストとの比較用の WbLS サンプル N を除いて液体シンチレータ割合から期待される検出光量よりも小さい傾向にある。
3. 液体シンチレータ割合の増加率よりも 2 倍程度検出光量の増加率が大きくなるサンプルがあった。

であった。

1 点目について、今回の WbLS サンプル作製に用いた液体シンチレータ (表 5.9) には、蛍光剤である PPO の量が液体シンチレータに対して 0.4% 加えられている。これは比較用サンプル N(表 5.10) が WbLS 全体に対して 1.2% 加えられていることと比較すると、1/30 程度と極端に小さくなっている。PPO は、典型的な液体シンチレータにおいて溶媒の 0. 数 % 程度加えられることから、この割合で発光量は飽和するものと考え本測定ではこの量を加えていた。しかし、液体シンチレータ割合が 10% 程度しかない WbLS においてはこの PPO の量では飽和量には達しておらず検出光量比が小さくなった可能性がある。そのため、今後 PPO の量を変更し、検出光量への影響を評価する必要がある。また、比較用のサンプルは界面活性剤をより多く含んでいることから、界面活性剤による発光により検出光量が大きくなっている可能性もある。

2 点目について、液体シンチレータの発光原理は第 2.2 節で述べたように、溶媒のエネルギーを近距離の蛍光体が受け取り発光することにある。そのため、同じ液体シンチレータを使用しているこれらのサンプルにおいては、液体シンチレータと PPO の体積比は等しいはずであり、発光量比が蛍光体である PPO の量に依存するとは考えづらい。次に考えられるのは、波長変換剤 Bis-MSB の量である。波長変換剤 Bis-MSB の量は溶媒である PC に対する割合が全サンプルで同じになるように WbLS を製作している。Bis-MSB の量は液体シンチレータに対して極微小に加えられるため加えた量を評価することが難しいが、仮に割合が小さかったとする。波長変換剤は蛍光体が放出する光を吸収し再発光するため、液体全体にどの程度存在するかが重要である。そのため、液体シンチレータの割合が小さいサンプルでは波長変換剤の割合も小さくなり吸収長が長くなってしまふ。吸収長が長くなることは蛍光体から放出される光が波長変換され WLS ファイバに到達するまでの距離が長くなることを意味し、反射材で反射されず吸収される確率が大きくなり、結果的に検出光量が小さくなってしまふ。

3 点目について、これらのサンプル間で大きく異なることは 2 種類目の界面活性剤の有無であるが、この点が検出光量の大幅な増加に結びつくとは考えづらい。

いずれの点においてもはっきりとした原因は分かっていないが、検出光量の増加の重要なポイントとなり得るため今後の検証が必要である。

また、本測定における課題点として、異なる容器を用いた測定間の差からくる誤差最大で検出光量の 10% と大きくなってしまったことが挙げられる。セル毎に測定し平均をとっているためこれは WbLS セルの作製の差によるものではなく、測定時の WbLS の注入の仕方や WLS ファイバと MPPC の接続等に原因があると考えられる。本測定においては、比較的検出光量の違いのあるサンプル同士を比較したため、あまり誤差が問題にならなかったが、今後違いの少ないサンプル同士の検出光量を比較する場合には、測定の手順を見直し、誤差を小さくすることが必要がある。

5.4 章のまとめ

本章では、WbLS の発光量を増加させることを目的に 3 つの測定を行った。まず初めに、界面活性剤が溶かすことのできる液体シンチレータの量の温度依存性について 3 種類の界面活性剤について測定した。その結果、20 °C の温度において、今まで使用していた WbLS サンプルの界面活性剤と液体シンチレータ割合と比較して、1/2 の界面活性剤割合で 1.5 倍程度の液体シンチレータを溶かすことのできる界面活性剤 IGEPAL CO-630 を発見した。その後この界面活性剤 IGEPAL CO-630 を用いて液体シンチレータ濃度が大きいサンプルを作製し、光量の測定を行った。PMT による光量測定では、液体シンチレータ割合 15% のサンプルにおいてビームテストとの比較用サンプルよりも 1.28±0.04 倍、WbLS セルによる光量測定では、液体シンチ

レータ割合 20% のサンプルにおいて 1.78 ± 0.22 倍の検出光量増加が確認された。ただし、いずれの測定においても不確定要素が存在し、今後のさらなる実験による検証が必要である。

第6章

WbLS 検出器の反射材の探索

本章では、WbLS 検出器の検出光量増加を目標に反射率の高い反射材の探索、評価を行う。まず、6.1 節では 3D プリント可能な白色素材を用いて WbLS セルを作製し、検出光量の測定を行う。その後、6.2 節では Geant4 シミュレーションを用いて各素材について反射率の評価、6.3 節において WbLS 検出器のセルサイズに変更した場合の検出光量を評価する。最後に 6.4 節で、反射材の変更による検出光量増加量を評価する。

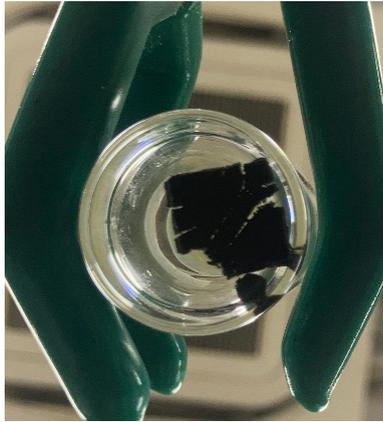
6.1 反射材の素材を変えた WbLS セルでの光量測定

6.1.1 測定の目的

第 4.2 節で述べたように、WbLS 検出器において反射材の反射率は検出光量の増大に大きく寄与する。また、検出光量の荷電粒子の通過位置依存性にも寄与する。そのため、反射材の反射率は可能な限り高い方が望ましい。ただし、セルは WbLS を封入するために空洞上になっており、反射剤の塗布や反射シートを貼り付けるといった後工程で作製することが困難であり、セル自体を反射率の大きい素材で作製することが求められる。本測定は、さまざまな素材を用いて WbLS セルを作製し、検出光量を測定することで素材による検出光量の変化を確認し、WbLS 検出器の反射材として最適な素材を決定することを目的とする。

6.1.2 測定準備: 各素材の薬品耐性の試験

測定の準備として PLA、ABS、PA、PMMA の 4 種類の 3D プリント材料を用いて 1 cm 四方程度の試験片を作製し、液体シンチレータの溶媒である PC と、界面活性剤 IGEPAL CO-630 に浸け、変化を観察した。ここで、PLA、ABS、PMMA は材料押出方式の 3D プリンターを用いて作製し、PA はアスペクト社^[59]に依頼し、粉末焼結積層造形方式によって作製されたテストプレートを提供していただいた。結果として、全材料において、IGEPAL CO-630 による溶解は確認されなかった。しかし、図 6.1 に示すように、PMMA、ABS は PC に浸すことで劣化し造形物に亀裂が入ってしまうことが分かった。そのためこれらの樹脂は WbLS 検出器のセル素材として用いることはできないと考えられる。ただし、PMMA は PC に浸けてから 1 週間程度の間、形を保っていたため、PC の濃度の小さい WbLS では一日程度の測定には十分耐えうるであろうことと、ビームテストで使用した WbLS セル素材が PMMA ベースのものであったことから本測定における WbLS セルの素材として用いた。また、第 5.3 節で用いた Formlabs 社のスタンダードレジンは、以前の測定時に試験を行っており使用に問題がないことを確認している。



(a) ABS 樹脂



(b) PMMA 樹脂

図 6.1: PC に浸したところ造形物に亀裂が入っている様子。写真は浸けてから 2 ヶ月程度たった後に撮影した。

6.1.3 測定手法

基本的な測定の流れは第 5.3 節と同じである。3 種類の異なる白色素材とレファレンス用に 2 種類の素材を用いた WbLS セルを作製し、WbLS の宇宙線による発光量を測定した。本測定においても 1 測定あたり 24 時間程度データ取得を行った。また、WbLS セルはそれぞれの素材で 2 つずつ作製し、それぞれ測定を行い最後に平均をとった。

測定に用いたセットアップは第 5.3 節から次に示す WbLS セルを除いて変更点はない。また、トリガーやデータ取得についても変更点はない。

WbLS セル

本測定において使用した WbLS セルと、素材を表 6.1 に示す。3 種類の白色系の 3D プリント素材 (EP, PM, EP) と黒色素材 (PL)、反射素材シート (RS) を用いたレファレンス用の WbLS セルをそれぞれ 2 つずつ作製した。PL と PM については材料押出方式で作製したため造形上の都合により反射材の厚さは 2 mm とし、図 6.2 のように 2 つのパーツを接着することで作製した。また、EP に使用しているスタンダードレジンは第 5.3 に使用したものと同一である。さらに PA については、アスペクト社^[59] に依頼し粉末焼結積層造形方式によって製作した。以上の 4 点について写真を図 6.3 に示す。最後に RS については、図 6.4 に示すように、PLA と PA で作製しパーツの中に Thorlabs 社製の厚さ 1 mm の PTFE シート^[60] を隙間なく貼り、2 つのパーツを接着することで作製した。この PTFE シートは波長 250 nm から 400 nm において 93% 以上の高い反射率を持っている。なお、セルの作製にあたっては WbLS セルの内部体積が等しくなるように設計している。

表 6.1: 各 WbLS セルの素材

呼称	素材	反射材の厚さ	特筆事項
PL	PLA	2 mm	2つのパーツを接着し作製。黒色
PM	PMMA	2 mm	2つのパーツを接着し作製
EP	スタンダードレジン (ホワイト) ^[58]	1 mm	
PA	PA2Neo ^[59]	1 mm	
RS	PLA(黒),PA2Neo + PTFE シート ^[60]	1 mm(PTFE シート)	PTFE シートを貼り付けて作製

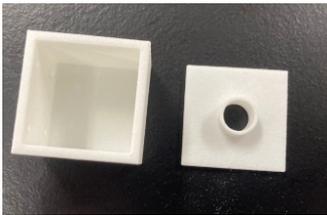


図 6.2: 2つのパーツ

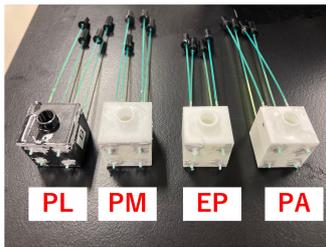


図 6.3: 各 WbLS セルの様子。各素材は表 6.1



図 6.4: 反射シートを用いた WbLS セル (RS)

測定に用いた WbLS サンプル

本測定に用いた WbLS サンプルの組成を表 6.2 に示す。本測定では、第 5.3 節において最も検出光量の大きかった WbLS サンプルを参考に作製した。

表 6.2: WbLS セルの素材を変えた光量測定に用いた WbLS サンプルの組成

水 [%]	IGEPAL CO-630 [%]	PC [%]	PPO [%]	Bis-MSB [%]
65.0	15.0	19.9	0.08	< 0.01

6.1.4 解析手法

本測定における解析手法は第 5.3 節とほぼ同じである。まず、測定の前後の LED によるデータを用いて MPPC のキャリブレーションを行い、ADC 値を検出光量値 [p.e.] に変換する。ただし、検出光量値が大きく一部の ADC 値がサチュレーションしてしまっていた PA と RS のものについては、5.3 節の手順に従い、ローゲイン ADC 値から ADC 値に変換しその後検出光量値を計算した。次にトリガー用のデータに 20 p.e. 程度の閾値をかけてさらにデータを選別し、検出光量をフィッティングする。ただし、フィッティングについては以下のように変更を加えた。

各 WbLS セルのファイバあたりの検出光量の計算

図 6.5 のように、PA の片方の容器の測定において、1 つの MPPC の検出光量分布が他の MPPC よりも明らかに小さくなっているものがあつた。原因は不明であるが他のセルの測定では発生していないため、WLS ファイバや MPPC と WLS ファイバの接触不良等が原因であると考えられる。そのため、この測定では他の 3 つの MPPC の検出光量値を足した分布に対してランダム・ガウス分布によってフィッティングした。他のセルを用いた測定では 4 つの MPPC を用いて算出しているため、本測定では使用した MPPC の数で MPV 値を割り、ファイバあたりの検出光量値を計算した。その後、2 つの容器で計算した検出光量の平均を計算し、誤差はフィッティングした誤差の伝搬に加えて平均からのずれとしている。

6.1.5 測定結果

光量測定の結果を図 6.6 に示す。別々に測定した 2 つの検出光量がそれぞれ誤差の範囲で一致しており、系統誤差の少ない測定を行うことができたといえる。測定した 3 種類の白色素材の中で最も検出光量が高かった材質は PA 樹脂であり、平均してファイバあたり 20.2 ± 0.6 p.e. の検出光量であつた。セル内部の高さが 23 mm の本測定におけるセル内の光収率と、大きさ 10 mm、反射材の厚さ 0.5 mm の WbLS 検出器の光収率が同じであつたと仮定すると、ファイバあたり $20.2 \times 9/23 \simeq 7.9$ [p.e.] の検出光量があることになる。この検出光量は、測定した粒子が異なるため単純には比較できないが、ビームテストにおける検出光量 2.5-3.5 p.e. の 2-3 倍程度である。WbLS 検出器をこれらの素材で作製した場合の検出光量の見積りは、6.3 節で行う。

反射材を反射率 93% 以上の反射シートで覆った場合は PA の検出光量よりも 1.5 倍程度高く、反射材について未だ改良の余地があるといえる。次の節では、この測定結果をシミュレーションと比較することで反射率の見積もりを行う。

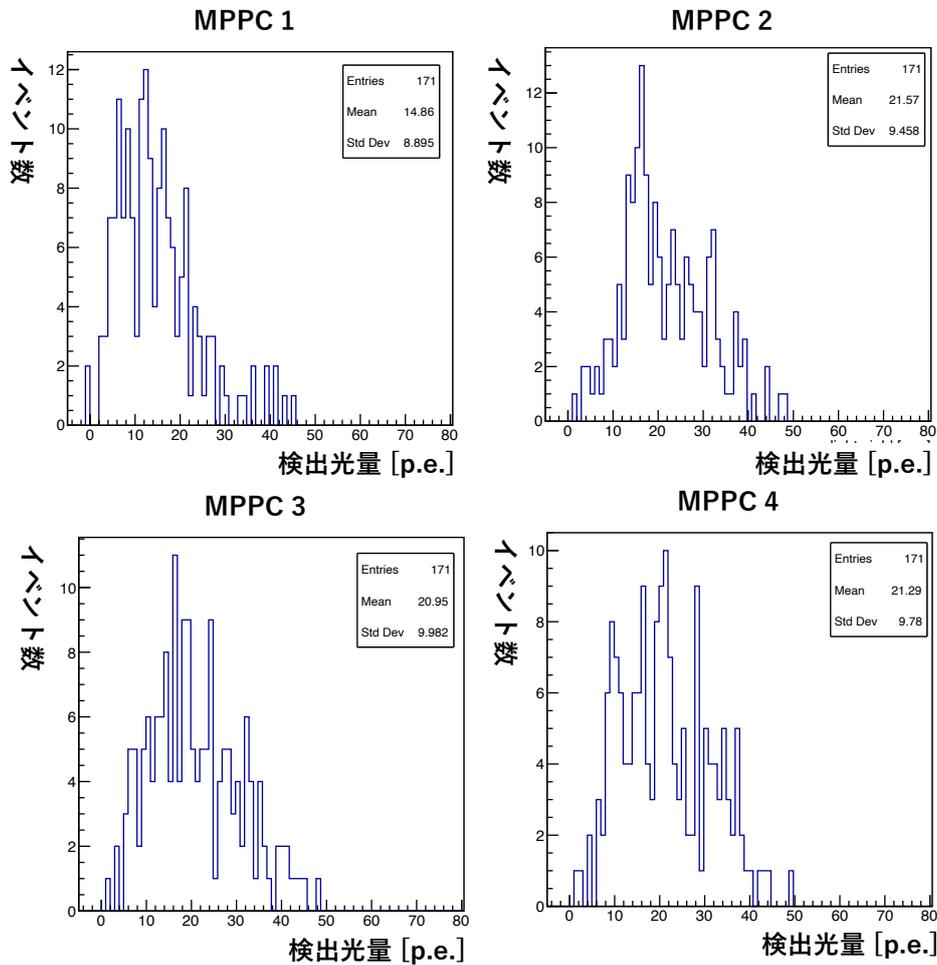
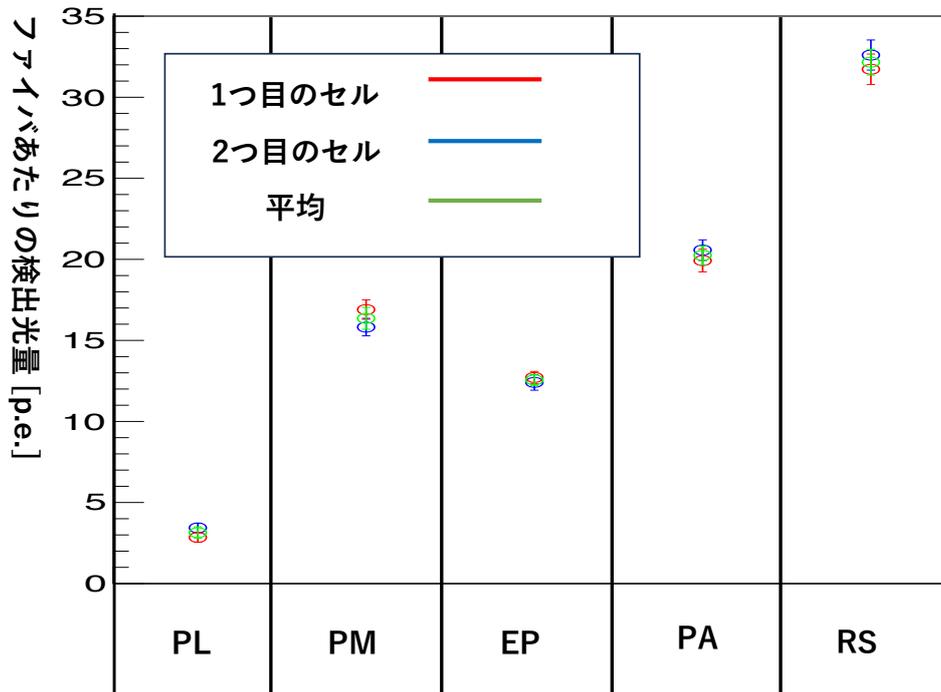


図 6.5: PA の WbLS セルにおける各 MPPC の検出光量分布。左上の MPPC1 の検出光量分布だけ有意に小さくなっていることが分かる。

6.2 Geant4 シミュレーションによる反射材の反射率の評価

6.2.1 目的

前節では、第 4 章で作製した最も検出光量の大きい WbLS を用いて、3 つの反射材の候補について光量測定を行なった。更に測定の際には、2 つのレファレンス用の素材 (黒色の PLA 樹脂、反射率既知の反射シート) を用いてセルを作製している。レファレンス用の素材の結果をシミュレーションと比較し、各素材の有効的な反射率を求めることを目的にシミュレーションを行った。



	PL	PM	EP	PA	RS
ファイバあたりの検出光量					
1つ目のセル [p.e.]	3.4 ± 0.3	15.8 ± 0.5	12.4 ± 0.5	20.6 ± 0.6	32.6 ± 0.9
2つ目のセル [p.e.]	2.8 ± 0.3	16.9 ± 0.6	12.7 ± 0.4	19.9 ± 0.7	31.7 ± 0.9
平均 [p.e.]	3.1 ± 0.4	16.4 ± 0.7	12.5 ± 0.3	20.2 ± 0.6	32.2 ± 0.8

図 6.6: 素材を変えた WbLS セルでの光量測定の結果

6.2.2 Geant4 を用いたシミュレーション

シミュレーションのセットアップ

本シミュレーションでは、図 6.7 のように作製した WbLS を再現するように検出器を実装した。なお、WbLS は一辺 23 mm のセル内部を丁度満たしていると仮定し、注ぎ穴には空気を満たしている。また、WbLS の組成は界面活性剤 20%、PC10%、水 70%、密度は 1.00 g/cm^3 ^[49] に設定している。

シミュレーションでは上側トリガープラスチックシンチレータの上方のランダムな位置から宇宙線を想定したエネルギー 1 GeV の μ^+ 粒子を発生させる。宇宙線の入射角度分布はおおよそ $\cos^2 \theta$ に比例することから発生時の運動量方向はこの分布に従い発生させている。

セル内の光収率の計算は第 4.2 節と同様の手順で行い、WbLS セル内で発生したシンチレーション光と、4 つのファイバに吸収される光子数を計測し、それらの商の平均値として光収率を計算した。反射材の反射率を変えてシミュレーションを行い光収率の反射率依存性を見積もった。

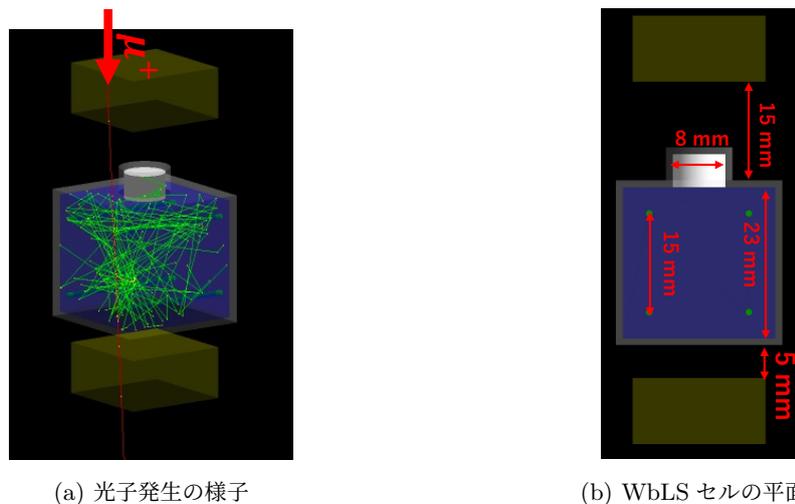


図 6.7: Geant4 シミュレーション内に実装した WbLS セル。(a) セル左方からセルを貫通している赤色の飛跡が μ^+ 、セル容器中で反射している緑色の飛跡がシンチレーション光子を表す。(b)WLS ファイバやセル上方の WbLS セルの注ぎ穴は、作製した WbLS セルをそのまま再現するように実装した。注ぎ穴の白い部分には空気が実装してある。

シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 6.8 に示す。図 4.3 と同様に、反射率が大きい部分において急激にセル内の光収率が大きくなるのが分かる。 1cm^3 のセルと比較して、セルの断面積が 4 倍以上になっているにも関わらず、ファイバの数は $4/3$ 倍になっているので同じ反射率で比較すると宇宙線測定に使用したセルの方が光収率は小さくなっている。

6.2.3 各素材の反射率の評価

評価手法

前節の光量測定では、白色系の反射素材の他に反射率が 0 に近いであろう黒色 PLA 樹脂を用いた WbLS セル (PL) と、カタログ値の反射率が 93% 以上である反射シートを用いた WbLS セル (RS) を作製し測定を行っていた。そこで、これら 2 つの検出光量値を用いて前項のシミュレーション結果をスケールすることで、各セル容器の素材の反射率を見積る。2 つの素材について別々にスケールを行い、平均を取ることで各 WbLS セル素材の反射率を求めた。ただし、黒色の PLA 樹脂の反射率は黒色樹脂であることから 5%、反射シートの反射率はカタログ値である 93% を仮定した。

反射率の評価結果

結果を図 6.9 に示す。ただし、図??のデータ点にない反射率の値は前後の値から直線によって内挿 (端の点では外挿) して求めている。また、2 つの結果について平均をとり、誤差として平均からのずれを加えたものを計算した。最も検出光量が高かった PA 樹脂の反射率は $84.9 \pm 1.3\%$ ということの結果であった。

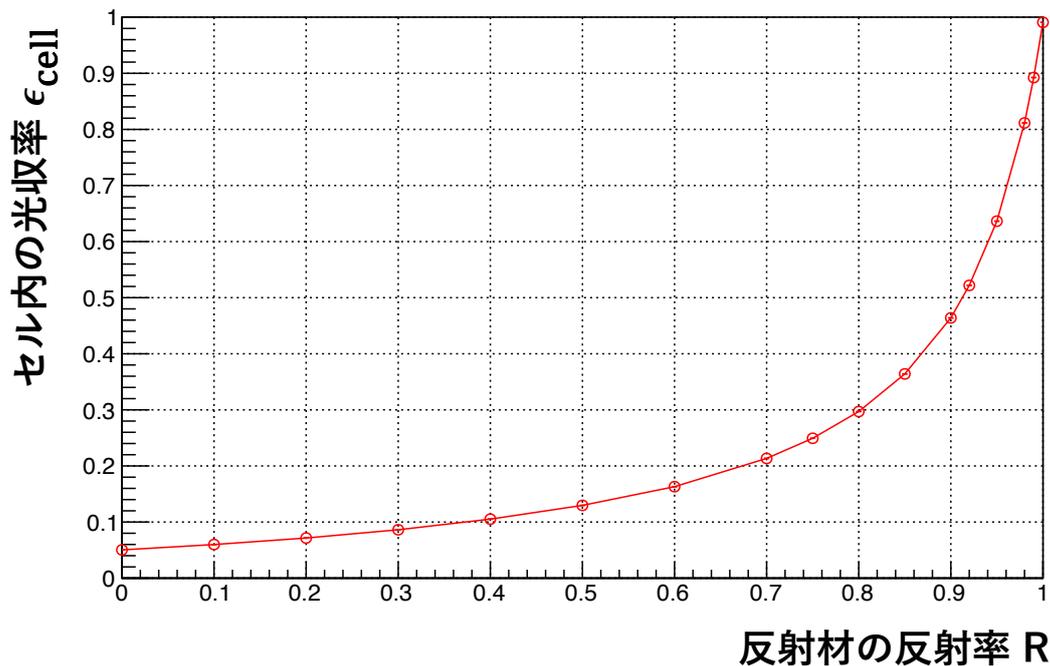


図 6.8: 宇宙線測定に用いた WbLS セル構造でのセル内の光収率のシミュレーション結果。

6.3 シミュレーションを用いた WbLS 検出器における検出光量の評価

6.3.1 目的

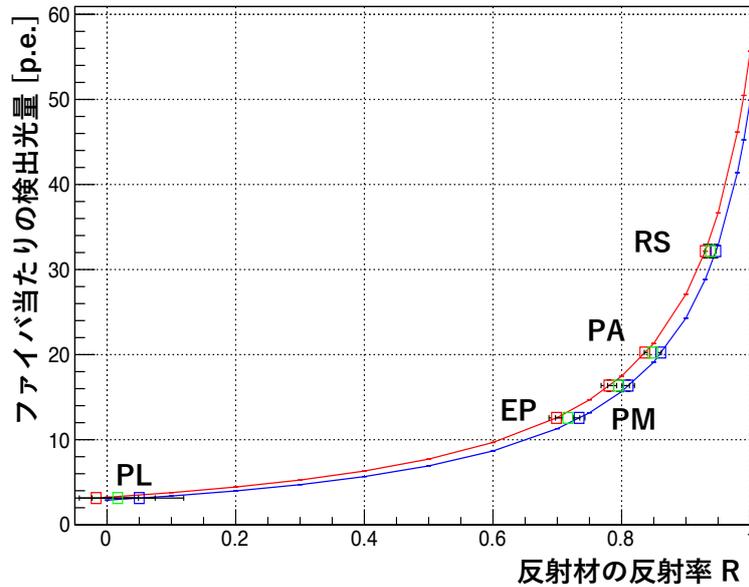
6.1 節では、第 4 章で作製した最も検出光量の大きい WbLS を用いて、いくつかのセル素材候補について WbLS 光量を測定した。しかし、作製した WbLS セルは内部の大きさが 2.3 cm であり、実際の WbLS 検出器でのセルの大きさ 1 cm よりも大きい。また、ファイバの本数やその配置も異なっており、セル内で発生した光子がファイバに吸収されるまでの間に反射材によって反射される回数も異なる。そのため、検出器の大きさのみを用いて今回測定した検出光量から WbLS 検出器セルにおけるの光量を見積もることは適切でない。この節では、前節において反射率を求めるために作製したシミュレーションを使用し、WbLS 検出器における検出光量を評価し、第??章の結果との比較を行う。

6.3.2 解析手法

6.1 節において測定したファイバあたりの検出光量 (L_{measured}) から、WbLS 検出器におけるエネルギー・ファイバあたりの検出光量 (L_{WbLS}) への変換は以下の式のように考えることができる。

$$L_{\text{WbLS}} = \frac{4}{3} \frac{\epsilon_{\text{cell}}^{1 \text{ cm}}(R)}{\epsilon_{\text{cell}}^{2.5 \text{ cm}}(R)} \times C_{\text{fiber}} \times \frac{L_{\text{measured}}}{E_{\text{cell}}} \quad (6.1)$$

ただし、 $4/3$ は各セルでのファイバの数の違い、 $\epsilon_{\text{cell}}^{1 \text{ cm}}$ は WbLS 検出器のセルの大きさでのセル内での光収率、 $\epsilon_{\text{cell}}^{2.5 \text{ cm}}$ は 6.1 節において測定したセル内での光収率、 C_{fiber} はファイバの長さによる補正係数、 E_{cell} は



	PL	PM	EP	PA	RS
反射率					
反射シートより求めた値 [%]	-1.7 ± 6.6	78.0 ± 1.2	69.9 ± 1.0	83.6 ± 0.7	-
黒色 PLA 樹脂より求めた値 [%]	-	81.0 ± 1.0	73.4 ± 0.9	86.1 ± 0.6	94.6 ± 0.4
平均 [%]	-	79.5 ± 1.7	71.6 ± 1.9	84.9 ± 1.3	-

図 6.9: 各素材の反射率を計算した結果。2 種類の反射材素材をレファレンスとし、反射シートの反射率 93%、黒色 PA の反射率 5% と仮定している。

セル中に宇宙線が落としたエネルギーを表している。

それぞれシミュレーションにより以下のように見積り、式 6.1 に従って WbLS 検出器におけるエネルギーファイバあたりの検出光量を計算した。

セル内での光収率

$\epsilon_{cell}^{1\text{ cm}}$ は、第 4.2 章においてシミュレーションしたものであり、図 4.3 そのものである。また、 $\epsilon_{cell}^{2.5\text{ cm}}$ は、前節において求めた図 6.8 である。この 2 つのシミュレーション結果の比を取ることで、 $\epsilon_{cell}^{1\text{ cm}}/\epsilon_{cell}^{2.5\text{ cm}}$ は図??のようになる。WbLS 検出器のセルの方がセルの体積に占めるファイバの割合が大きく、セル内の光収率が大きいことが分かる。

各反射材素材の反射率は前節で求めた値を使用し、補正のための係数を計算した。

ファイバの長さによる補正係数

この係数は WLS ファイバによる減衰の効果を取り入れている。宇宙線による光量測定において使用した WLS ファイバ Y11 は、表 2.1 より 350 cm 以上の減衰長を持っているため減衰長 350 cm を仮定した。本測定では WLS ファイバの長さは 10 cm であったので、0 cm での検出光量として $1/\exp(-10/350) \simeq 1.03$ を

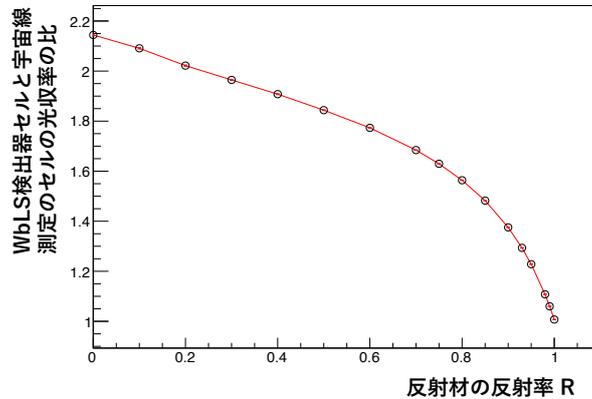


図 6.10: WbLS 検出器と宇宙線測定に用いたセルとのセル内の光収率の比。WbLS 検出器でのセル内の光収率は図 4.3、宇宙線測定に用いた WbLS セル構造でのセル内の光収率は図 6.8 である。

補正係数とした。

セル中に宇宙線が落としたエネルギー

前節のシミュレーションを用いて、WbLS セル内で宇宙線が落としたエネルギー分布をシミュレートし、分布をランダウ分布によりフィッティングした結果を図 6.11 に示す。フィッティング結果より、宇宙線が測定に用いた WbLS セル内で落とすエネルギー損失の MPV 値は 3.92 MeV であった。

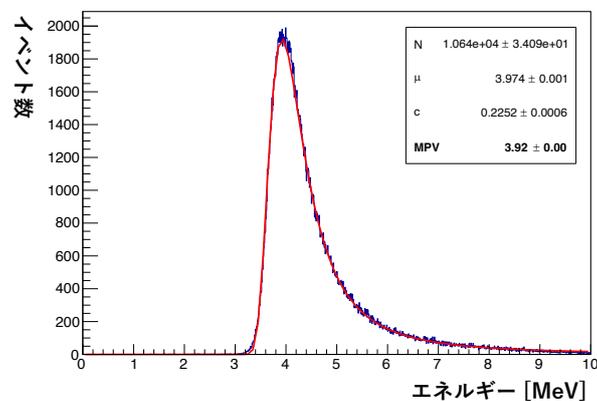


図 6.11: 宇宙線が宇宙線測定に用いた WbLS セル内で落としたエネルギーのシミュレーション結果。赤線はランダウ分布によるフィッティング結果

6.3.3 WbLS 検出器のセルでの検出光量

WbLS セルの宇宙線による光量測定によって得られた結果を、シミュレーションを用いて、実際の WbLS 検出器での検出光量に換算した結果を、図 6.3 に示す。最も検出光量の大きかった PA 樹脂を用いた WbLS セルでは、1 ファイバ当たり 10.5 ± 0.2 [p.e./MeV] の検出光量が得られることになる。また、反射シートの

反射率である 93% まで反射材の反射率を上げることにより、さらに約 1.4 倍大きい検出光量が得られることが分かった。

表 6.3: 1 ファイバ当たりでの WbLS 検出器における予想検出光量。ただし、後述のように MPPC のクロストークが大きいことが判明し、検出光量はこの表から半分程度になることが予想される

	PL	PM	EP	PA	RS
検出光量 [p.e./MeV]	2.3 ± 0.2	9.0 ± 0.2	7.3 ± 0.1	10.5 ± 0.2	14.6 ± 0.2

6.3.4 ビームテストの結果との比較

本結果とビームテストの結果を比較するために、ビームテストの試作機の結果に対しても同様の計算を行う。ただし、ビームテストでは WbLS 検出器と同様セルサイズ・ファイバを用いているため、式 6.1 のうちセル内での光収率とファイバ数による補正を考慮する必要がない。

まず第 4.2 節のシミュレーションを用いて、エネルギー 500 MeV の陽電子ビームが WbLS 中にどの程度のエネルギーを落とすのか見積もった。陽電子が WbLS セル中に落とすエネルギー分布は、図??のようになり、ランダウ分布によるフィッティングの結果、エネルギー損失は 1.45 MeV であることが分かった。

また、ビームテストにおける検出光量値 (表 3.3) の代表として、最も検出光量が大きかった 3.5 p.e. を選ぶと、

次に、WLS ファイバによる減衰の効果を考える。ビームテストでは、長さ 40 cm の波長変換ファイバを用いて読み出していたことから、0 cm での値に変換するとエネルギー・ファイバあたりの検出光量は、 $2.4 / \exp(-40/350) \simeq 2.7$ p.e./MeV となる。

前節において推定した結果と比較して、 $10.05/2.69 \simeq 3.7$ 倍検出光量を増加させることができたことになる。前章の結果より、WbLS の発光量の増加が 1.78 ± 0.22 であるとする、反射材の変更により 2.10 ± 0.26 倍検出光量が増加することになる。PA の反射率を 85% として図 4.3 より計算すると、ビームテスト時の白色 PMMA 樹脂の反射率は $53 \pm 7\%$ 程度となる。本測定において最低の反射率であった PA 樹脂でも 70% の反射率があり、白色系の樹脂において $53 \pm 7\%$ という低反射率であることは少し考えづらい。そのため、WbLS の発光量の増加と反射材による光収率の増加以上の増加があった可能性がある。

そこで次節においてビームテストと同じ素材を用いて測定を行い、反射材の改善による増加率を評価する。

6.4 反射材の改善による WbLS 検出器の検出光量の向上量の評価

6.4.1 目的

本節では、第 3 章のビームテストにおいて試作機を作製した素材と同様の素材を用いて WbLS セルを作製し、6.1 節で最も検出光量の大きかった PA 樹脂と比較することでビームテストと比較した検出光量の増加量を評価することを目的とする。

6.4.2 測定手法・解析

基本的な測定手法や解析手法は、6.1 節と同様である。また、WbLS サンプルも表 6.2 と同じものを使用している。以下変更点である WbLS セルについて簡単にまとめる。

WbLS セル

2 種類の反射材について 5.3 節と同様のセルを 2 つ作製した。

1 種類目は 5.3 節の測定において反射シートを貼り付けて作製した WbLS セル (RS) を除いて最も検出光量の大きかった PA 樹脂を用いて作製した WbLS セルを使用する。ここで、PA 樹脂を用いて作製した WbLS は、5.3 節で測定したものを再利用している。

2 種類目は、ビームテストで試作機を作製したものと同一の PMMA 樹脂を用いて作製しており、以下 PM2 と表記する。ジーテック社^[39]に依頼し、光造形方式の 3D プリンタで作製した。外観は図 6.12 に示すように、概ね白色であるが白色光を通した場合黄色く見えることが分かる。これは、光造形方式が紫外線を用いて作製するため、より紫外領域に違い波長の短い光が大きく吸収されている可能性があることを示していると考えられる。

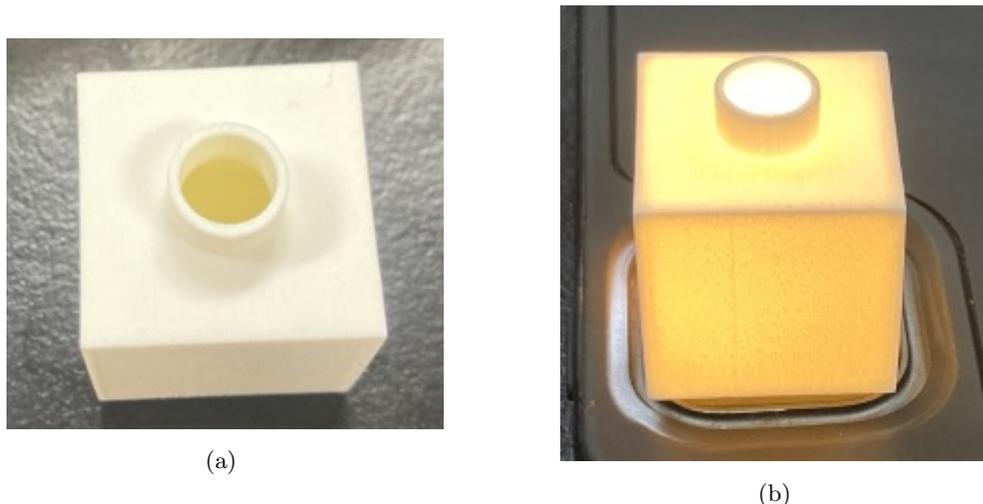


図 6.12: ビームテストで使用した試作機と同じ PMMA 樹脂で作製した WbLS セル (左) と白色光を下から当てた様子 (右)

6.4.3 測定結果

測定結果を表 6.4 に示す。検出光量の平均値は、PA で 20.1 ± 0.9 であった。PA 樹脂は同一条件で測定したため、6.1 節と同様の値になるべきであるが、図 6.6 より、誤差の範囲で一致しており測定の再現性は良好であることが分かる。また、PM2 では検出光量の平均値は 19.0 ± 0.4 であり、PA と PM2 の検出光量の比を計算すると 1.06 ± 0.5 という結果であり、PA 樹脂とビームテストで使用した反射材素材はほぼ同等の反射率を持っていることが分かった。そのため、前節で算出した検出光量の増加量に反射材の改良による効果は含まれず、他の要素が大きく関係していることが示唆される結果となった。

表 6.4: WbLS セルでの光量測定の結果

	PA	PM2
ファイバあたりの検出光量		
1 つ目のセル [p.e.]	19.4 ± 0.5	19.0 ± 0.6
2 つ目のセル [p.e.]	20.9 ± 0.6	18.9 ± 0.4
平均 [p.e.]	20.1 ± 0.9	19.0 ± 0.4

6.5 検出光量の増加量に対する考察

6.3 章では、実際の WbLS 検出器のセルサイズでどの程度の検出光量が得られるかを見積もった。その結果ビームテスト時の WbLS 試作機と比較し約 3.7 倍の検出光量が見込まれると計算された。この増加量は WbLS の発光量の増加を除いておよそ 2 倍の検出光量増加である。しかしながら、WbLS 試作機と同様の PMMA 樹脂でセルを用いた光量測定では、PA 樹脂の 1.06 ± 0.05 倍の検出光量であり、2 倍の検出光量の増加量には全く及ばず、他の原因があったことを示している。

その他の原因として考えられることは、

1. クロストークが影響を与えている可能性。本測定において使用した MPPC は S10362-13-050C であり、オーバー電圧として 2.7 V を与えていた。この MPPC は現在 SuperFGD において使用されている S13360 シリーズよりも旧型であり、クロストークが大きく数十 % 存在することが判明した。第 2.5 章で述べたように、クロストークが発生した場合入射光子よりも出力光子数が大きくなってしまいうため見かけ上の検出光量が大きくなってしまふ。
2. シミュレーションの誤りの可能性。本シミュレーションでは第 4.2 節でも説明したように、WLS ファイバに入射した光子は全て貫通せずに吸収されると考えている。もし、WLS ファイバによるシンチレーションの吸収長がファイバを貫通するほど十分長い場合、セルの光収率はより反射率の大きい場合に急激に増加するようになり、反射率の増加による検出光量の増加の効果が大きくなることになる。
3. ビームテスト時の検出光量が低く見積もられている可能性。ビームテストでの結果の懸念点の 1 つに、ビームテスト場所におけるブレークダウン電圧を測定していなかったことが挙げられる。第 2.5 節で説明したように、ブレークダウン電圧は温度によって変化してしまうため、実験室とは異なっていた可能性がある。仮に温度が高くなり、オーバー電圧が小さくなっていると検出効率の低下によって検出光量を低く見積もってしまう要因となる。
4. ファイバによる減衰の評価を誤っている可能性。第 4.3 節で、ファイバによる減衰をシミュレーションしたようにファイバの減衰は 1 つの減衰長ではなく 2 つの減衰長をもつ指数関数の和でよくフィッティングされる。今回のシミュレーションでは、350 m ある長い減衰長の成分が大きく無視して計算したが 30-40 cm 程度の減衰長の指数関数が多い場合、40 cm の WLS ファイバを伝搬していたビームテストの結果を過小評価してしまう原因となる。

6.5.1 クロストークが検出光量に与える影響

これらの原因のうちクロストークによる影響が大きいことが判明し、以下のように見積もった。

クロストークによる見かけ上の検出光量の増加

クロストークが検出光量に与える影響について考える。クロストークがほぼ1次光子と同時のタイミングで発生し、2次光子もクロストークを発生させると仮定する。入射光子数 λ_{in} に対し検出する光子数 λ_{det} は、1つの光子に対してクロストークが発生する確率 p_c として、

$$\begin{aligned}\lambda_{det} &= \lambda_{in} + \lambda_{in} \times p_c + \lambda_{in} \times p_c^2 + \dots \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\lambda_{in}(1 - p_c^n)}{1 - p_c} = \frac{\lambda_{in}}{1 - p_c}\end{aligned}$$

となる。仮にクロストーク確率が50%とすると見かけ上の検出光量は2倍になってしまうことが分かる。

光量測定におけるクロストーク確率

本測定におけるクロストーク確率を見積もる。WbLSセルによる光量測定と同一のセットアップ(図5.18)において、LEDが発光した場合に必ずデータを取得した。得られた光量分布は、MPPCのクロストーク、ダークカウントやノイズを除いてポアソン分布に従うはずである。今回は、このうちクロストークによる影響が大きいと考えて光量分布を以下の関数でフィッティングを行なった。

$$P(k) = \begin{cases} \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} & k = 0 \\ \sum_{j=1}^k \frac{e^{-\lambda} \lambda^j}{j!} {}_k C_{k-j} p_c^{k-j} (1 - p_c)^j & k > 0 \end{cases}$$

光量分布のうち0 p.e.の分布は原理的にクロストークが発生しないため通常のポアソン分布、 $k > 0$ では実際には $j < k$ の入射光子だがクロストークにより大きくなる場合を考えてこの関数を設定している。フィッティング結果を図6.13に示す。図中の赤線が式6.5.1によるフィッティング結果である。図中青線で示した通常のポアソン分布によるフィッティングよりもよく光量分布にフィットしていることが分かる。この方法によって求めたクロストーク確率 p_c は、4つのMPPCにおいて49-54%であり、本章において算出したWbLS検出器の検出光量のおよそ半分がクロストークによる影響であったことが分かった。

6.6 章のまとめ

この章では、まず初めに3Dプリント可能な白色素材と反射シートを用いてWbLSセルを作製し、前章で作製した最大の発光量をもつWbLSサンプルを封入した上で宇宙線によって光量の測定を行った。その結果、3Dプリント可能な素材の中では、PA樹脂を用いたものが検出光量が最大であり、1ファイバあたりの検出光量は 20.2 ± 0.6 p.e. であった。

次にシミュレーションを用いて、各素材の反射率を見積もった。その結果検出光量が最大であったPA樹脂の反射率は85%であることが分かった。参考として作製した反射シートの反射率は93%であり反射材に

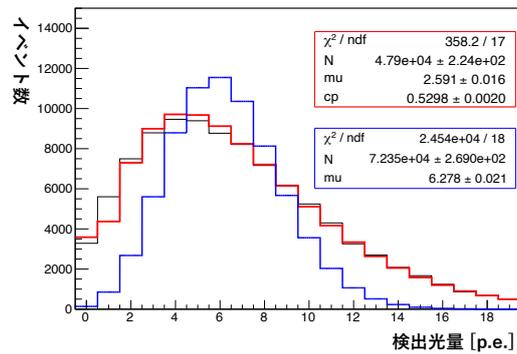


図 6.13: LED による光量分布をクロストークを考慮した関数 (式 6.5.1) でフィッティングしている様子。黒色の線は光量分布、青色はポアソン分布によるフィッティング、赤色がクロストークを考慮した関数によるフィッティングを示している。

は改善する余地がある。また、ビームテストで使用した PMMA 樹脂と同じ素材で WbLS セルを作製し宇宙線による光量を測定したところ、PA 樹脂の検出光量は $1.06pm0.05$ 倍であり、検出光量の増加には繋がらなかったことが判明した。

さらに、最後に本 WbLS セルを用いた測定において MPPC のクロストークが与える影響を見積もったところ、検出光量のうち 1/2 がクロストークによるものであった。本セットアップを用いて実際の WbLS 検出器の検出光量を見積ることは好ましくなく、別の MPPC を使用することやオーバー電圧を下げるなど、セットアップを改善する必要があることが分かった。

第 7 章

WbLS 検出器の前置検出器としての使用可能性の検討

この章では、本研究において開発し検出光量を増大させた WbLS 検出器の、HK 実験の前置検出器として使用可能性を検討する。??章では、前章において発見した WbLS セルを用いた測定の課題点を修正し、本研究において開発した WbLS 検出器の検出光量を測定・評価を行う。次に、WbLS 検出器の目標である運動量の陽子と π 粒子の粒子識別に検出光量が与える影響をシミュレーションを用いて評価する。その後、飛跡検出器としての性能を飛跡に対する検出効率の計算を行い評価する。

7.1 WbLS 検出器のエネルギー・ファイバあたりの検出光量

7.1.1 改良したセットアップを用いた WbLS セルでの光量測定

測定の目的

前章で示したように、第 5.3 節で使用したセットアップで測定した検出光量には、おおよそ半分程度 MPPC のクロストークによる影響が含まれていることが判明した。そこで MPPC を変更し、よりクロストークの影響が少ないセットアップで光量を測定することを目的に行なった。

測定手順・解析手法

基本的な測定手法や解析手法は、第 6.1 と同様である。WbLS サンプルも表 6.2 と同じものを使用している。また、反射材は今までの測定において最も検出光量の大きかった PA 樹脂と、測定の再現性を確かめるために反射シートを用いたセルについて測定した。

以下主な変更点である MPPC について述べる。

MPPC 本測定では、MPPC として S13360 シリーズのピクセルサイズ 50 μm 、検出面のサイズ 1.3 mm のものを使用した。印加したオーバー電圧は、3 V であり、浜松ホトニクス社のデータシート^[36]によると、光子検出効率 40%、クロストーク確率 3% でありクロストークの影響が十分小さいと考えられる。

測定結果

光量の測定結果を表 7.1 に示す。クロストークによる検出光量の影響が取り除かれたために、図 6.6 と比較して検出光量がおよそ半分になっていることが分かる。また、PA 樹脂と反射シートによる検出光量の比を計算すると 1.52 ± 0.05 である。図??から計算した値は、 1.59 ± 0.06 であり、ベストフィット値は誤差の範囲外であるが十分近く、検出光量の比は大きく変化せず測定の再現性は十分にある。

表 7.1: MPPC を変更したセットアップにおける WbLS セルでの光量測定の結果

	PA	RS
ファイバあたりの検出光量		
1 つ目のセル [p.e.]	9.2 ± 0.2	13.9 ± 0.4
2 つ目のセル [p.e.]	8.8 ± 0.3	13.5 ± 0.4
平均 [p.e.]	9.0 ± 0.2	13.7 ± 0.3

7.1.2 WbLS 検出器における検出光量の算出

1 辺 2.5 cm の測定用 WbLS セルから実際の WbLS 検出の検出光量への変換は、第 6.3 節に従って行う。PA 樹脂を用いて作製した WbLS 検出器のエネルギー・ファイバあたりの検出光量は、 4.7 ± 0.1 p.e./MeV と計算された。これは、第 6.3 節で算出したビームテストにおける最大検出光量 2.7 p.e./MeV の 1.74 倍であり、第 5 章で達成した WbLS の改良による検出光量の増加率 1.78 ± 0.22 倍と無矛盾である。

7.2 低運動量粒子の粒子識別

7.2.1 目的

WbLS 検出器は、短い飛跡をもつ低運動量の粒子を検出することで、終状態の粒子の種類・数を詳細に分析し水とニュートリノ反応の精密測定を行うことを目標の 1 つとしている。HK 実験のニュートリノのエネルギーにおける低運動量の荷電粒子は、主に陽子と荷電 π 粒子であり、これらの粒子の検出と識別が重要になる。本節は、WbLS 検出器の検出光量が低運動量粒子の検出・識別において与える影響を評価することが目的である。

陽子と荷電 π 粒子の識別

WbLS 検出器において低運動量の陽子と荷電 π 粒子の識別は、これらの粒子の飛跡長あたりのエネルギー損失の違いを利用する。図 7.1 に各粒子ごとの単位長さあたりのエネルギー損失を示す。荷電粒子のエネルギー損失は相対論的な領域では電荷の大きさの違いを除いてほぼ等しくなる。しかし、運動エネルギーが小さくなると、質量の違いによって単位長さあたりのエネルギー損失が異なる。陽子と荷電 π 粒子では、低運動エネルギー領域において 2 倍程度単位長さあたりのエネルギー損失が異なり、この差を利用することで陽子と荷電 π 粒子の識別を行うことが可能である。

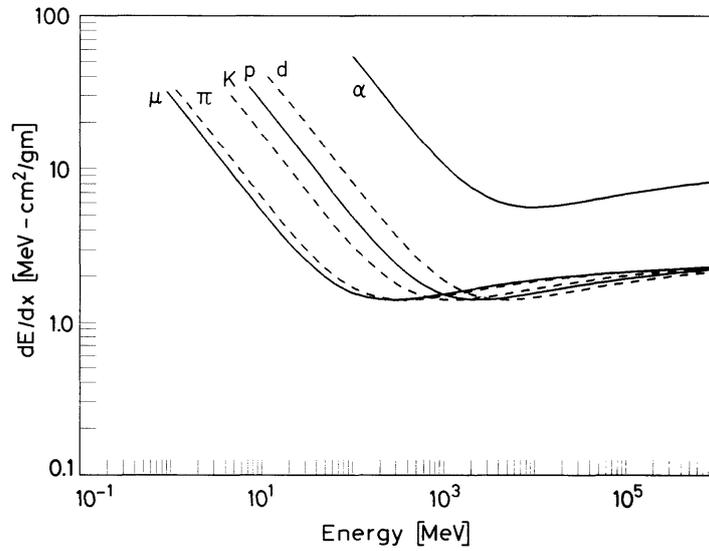


図 7.1: 物質中での粒子によるエネルギー損失の違い [61]

7.2.2 シミュレーションのセットアップ

図 7.2 のように、Geant4 シミュレーション内に 1 cm×1 cm×1 cm の WbLS セルを 15×15×15 個実装した。それぞれのセルの内部構造については、第 4.2 節において実装したものと同一である。

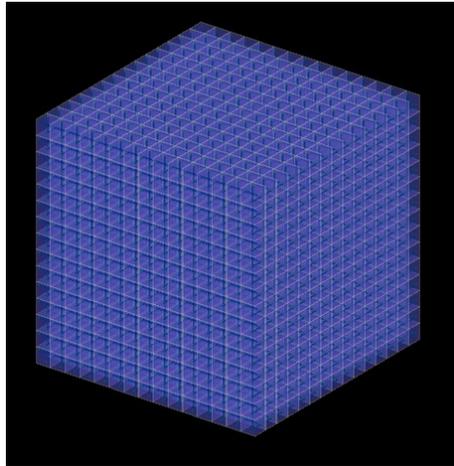


図 7.2: Geant4 内に実装した 15×15×15 個のセルからなる WbLS 検出器。

シミュレーションでは陽子と π^+ 粒子を生成し、各セルでの 1 次粒子 (陽子、 π^+) と 2 次粒子のエネルギー損失をそれぞれ記録した。粒子の発生位置は、WbLS 検出器の中心にあるセル内の一様分布、運動方向は球面の一様乱数とした。また、各粒子に与える初期運動エネルギーは、以下のように決定した。図 7.3 に WbLS 検出器中での陽子、 π^+ の初期運動エネルギーと平均の飛跡長の関係を示す。後述のように、本シミュレーションでは 3 つのキューブを通過し停止するようなイベントを選択することから、最低でも 10 mm、最長で十分

4つ以上のセルを貫通するであろう 60 mm 以下の飛跡長を基準に選ぶ。ここから、初期エネルギーを陽子は 25-90 MeV、 π^+ 粒子は 10-40 MeV の間の一様分布に従うように発生させた。

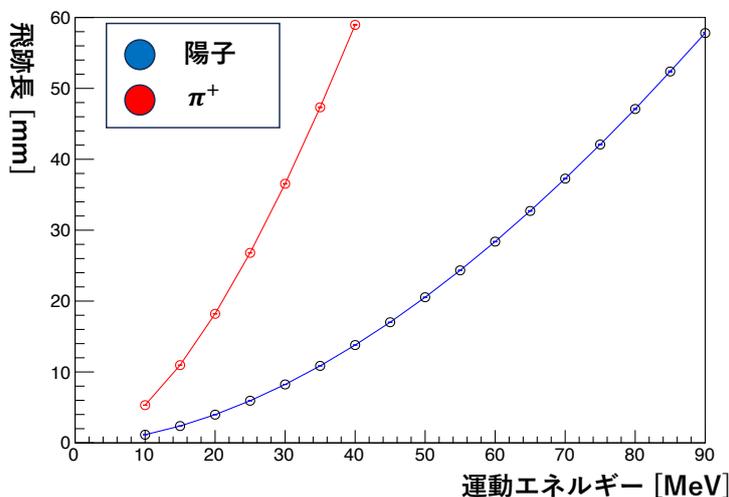


図 7.3: 粒子の初期運動エネルギーと飛跡長の関係

7.2.3 解析手順

各ファイバの検出光量の計算

セル内に粒子が落としたエネルギーに、エネルギー・ファイバあたりの検出光量をかけて検出光量の期待値を求める。ここでセル内に落としたエネルギーは、1次粒子と2次粒子を合わせたものを使用している。次に、この期待値を平均にもつポアソン分布に従う乱数を発生させファイバあたりの検出光量とした。本シミュレーションでは、WbLSセルと同じ大きさのプラスチックシンチレータで構成された SuperFGD の宇宙線 MIP による検出光量 $\simeq 58$ p.e.^[62] を参考に、MIP によるエネルギー損失が約 2 MeV/cm であることを考慮し、エネルギー・ファイバあたりの検出光量の最大値を 30 p.e./MeV と設定した。また、エネルギー・ファイバあたりの検出光量の最低値は、ビームテストでの WbLS 試作機の検出光量が 2.7 p.e./MeV であり減衰の効果も考量して十分小さな 0.8 p.e./MeV に設定している。

イベントの選択

本解析では、荷電粒子が直線上に連なった3つのセルを通過して停止するイベントに限定して解析を行った。停止する直前のセルの検出光量を陽子と π^+ 粒子で比較し、飛跡長あたりのエネルギー損失の差を用いて粒子識別を行う。荷電粒子のエネルギー損失は、図 7.1 のように運動エネルギーが小さくなるにつれ急激に大きくなるため、停止する直前のセルにおいて特に陽子と π^+ 粒子のエネルギー損失の差が大きくなる。実際のニュートリノ反応では、特に π^+ 粒子などは比較的大きな初期エネルギーを持ち、3 cm 程度で止まるようなものは少ないが、3つのセルを通過し止まったイベントを選択することで陽子・ π^+ 粒子が止まる直前のイベントを再現している。ここで、最後に停止したセルでは検出光量はブラッグピークにより大きくなるため、検出光量の小さい検出器では有効になると考えられるが、どの程度セル中を進んでから停止したのか分からず、飛跡長が 0-1 cm 程度の幅を持つことで、光量分布が幅を持つため粒子識別能力はあまり高くない。

らない。そのため今回は停止直前の1セルを選択した。これは、最低1 cmの飛跡がありながら停止直前であることから十分なエネルギー損失が見込めるからである。また、停止直前の1セルは長い飛跡や3 cm程度の短い飛跡においても必ず存在することから、このデータにおいて十分な粒子識別能力があれば、3 cm以上のどんな飛跡に対しても最低限の粒子識別能力を保証することができるため、このようなセルを選び解析を行った。図7.4に選択した3つのセルを貫通して止まったイベントと解析に使用したファイバの概念図を示す。停止直前のセルを貫く3つのファイバのうち粒子の運動方向ではない2つのファイバの検出光量を足すことで停止直前のセルでの発光量を計算する。粒子の運動方向のファイバは他のセルにおける発光量が存在し、簡単に分離することができないため使用しなかった。

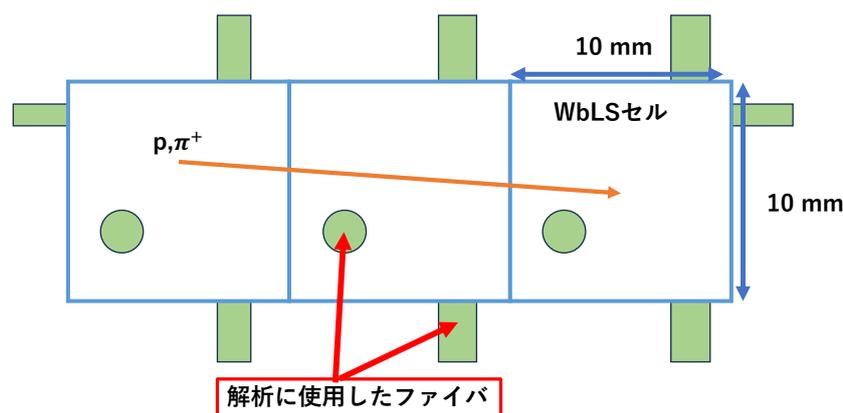


図 7.4: 解析に使用したイベントとファイバの概念図

検出の閾値

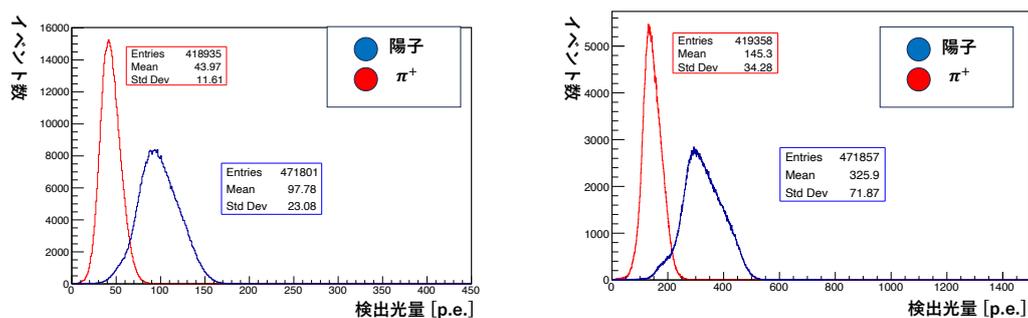
1 p.e. 程度の小さい信号を含めて各ファイバからのデータを記録すると、チャンネル数の多い WbLS 検出器では、MPPC のダークカウントによる擬似信号やノイズ等を大量に記録してしまうため、MPPC からの信号に閾値を設ける。本解析では、解析に使用した2つのファイバについて閾値以上のヒットがあることを要求した。閾値については、例えば WbLS 検出器と同程度のチャンネル数となる SuperFGD では、宇宙線 MIP による光量が1ファイバあたり ≈ 58 p.e. に対し、閾値として 3.5 p.e. を設定している。検出光量の小さい WbLS 検出器においては、閾値は非常に重要であり、検出閾値を 1.5-4.5 p.e. の間で動かしてシミュレーションを行った。

7.2.4 粒子識別能力の評価

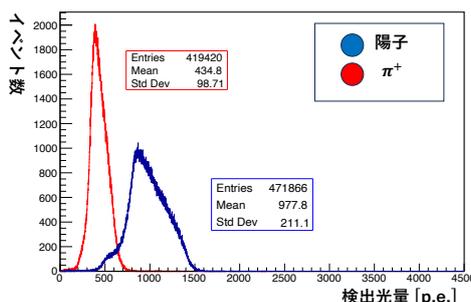
粒子識別の評価手法

次に粒子識別能力を評価する方法について説明する。図 7.5 に、検出閾値を 2.5 p.e.、エネルギー・ファイバあたりの検出光量をそれぞれ 3 p.e./MeV、10 p.e./MeV、30 p.e./MeV と変えた時の粒子が停止する直前のセルで検出された光量分布を示す。陽子と π^+ で平均光量は期待通り約 2 倍異なっているが、特に陽子のイベントについて低エネルギー側に幅が広がり、完全に分けることはできない。また、検出光量が 30 p.e./MeV から 3 p.e./MeV に 1/10 倍になったことが陽子と π^+ 粒子のピークが太くなる様子が標準偏差/平均の値を計算することで分かる。この光量分布において陽子と π^+ 粒子を分ける閾値を設定し、 π^+ 粒子の

排除率=(1-閾値以上の π^+ 粒子の数/全 π^+ 粒子の数) と陽子の検出率=閾値以上の陽子の数/全陽子の数を計算する。閾値を変化させながら図示すると図 7.6 のような曲線となる。この曲線は ROC(Receiver Operating Characteristic) 曲線と呼ばれ、ROC 曲線の内側の面積が機械学習モデルの能力を評価する指標によく利用される。この ROC 曲線の中で、直線 $y=1-x$ との距離が最大となる点を閾値の最適値とし、その閾値での陽子の検出率と π^+ 粒子の排除率を粒子識別能力とする。



(a) エネルギー・ファイバあたりの検出光量が 3 p.e./MeV の場合 (b) エネルギー・ファイバあたりの検出光量が 10 p.e./MeV の場合



(c) エネルギー・ファイバあたりの検出光量が 30 p.e./MeV の場合

図 7.5: 停止直前のセルにおける検出光量分布

結果

検出閾値について 1.5-4.5 p.e. の間で変更してシミュレーションを行ったが、粒子識別の結果には検出閾値の違いが大きく現れなかったため、以下では検出閾値を 2.5 p.e. とした場合のみ結果を示す。

ROC 曲線を図 7.7 に示す。エネルギー・ファイバあたりの検出光量が 1 p.e./MeV 付近の小さい場合には、粒子識別能力が低くなっていることが分かる。

次に、エネルギー・ファイバあたりの検出光量を変化させた場合の、閾値の最適値での陽子の検出率と π^+ 粒子の排除率を図 7.8 に示す。前節で算出した WbLS 検出器の検出光量 4.7 p.e./MeV の場合は、陽子検出率 97.2%、 π^+ 排除率 93.5% であった。また、陽子の検出率はエネルギーファイバあたり 30 p.e. の場合に 98.3% であり、3 p.e. 付近で急激に落ち 1 p.e. では 89.2% となっている。 π^+ 粒子の排除率については最大 94.5% であり、1 p.e. 付近では急激に落ち 90% を下回っている。粒子識別能力を 30 p.e./MeV と比較して 1% の減少に抑えるための検出光量は、陽子検出率では 5.3 p.e./MeV、 π^+ 排除率では 3.5 p.e./MeV が必要である。この基準と比較すると本研究で開発した WbLS 検出器の検出光量 4.7 ± 0.1 p.e./MeV は十分な値ではない。

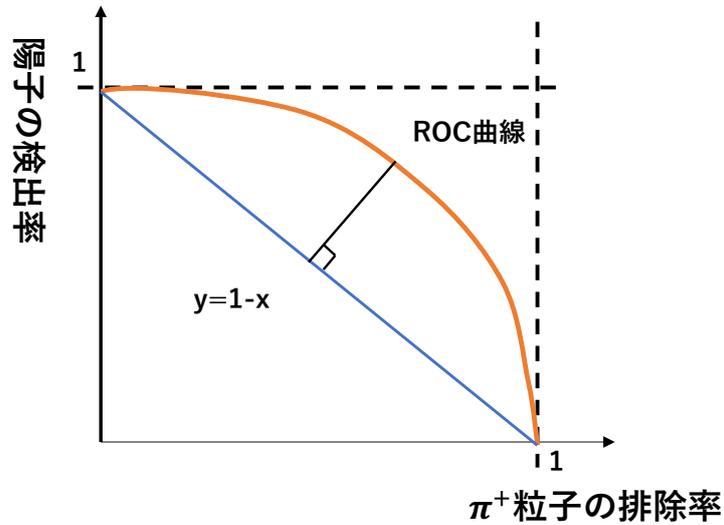


図 7.6: ROC 曲線と閾値の最適値の決定方法

さらに減衰長 350 cm のファイバ 200 cm による減衰を考慮すると $4.7 \times \exp(-200/350) \simeq 2.7$ p.e./MeV である。この時、陽子検出率 96.0%、 π^+ 排除率 92.5% でありどちらも 90% を上回っているものの、検出光量 30 p.e./MeV の場合と比較すると大きく減少しており、本手法で粒子識別を行うためには検出光量が十分でないことが分かる。ファイバ 200 cm による減衰を考慮した場合でも粒子識別能力を 30 p.e./MeV と比較して 1% の減少に抑えるためには、検出光量は $5.3 / \exp(-200/350) \simeq 9.39$ p.e./MeV 必要であり、さらに 2 倍の検出光量の向上が必要である。

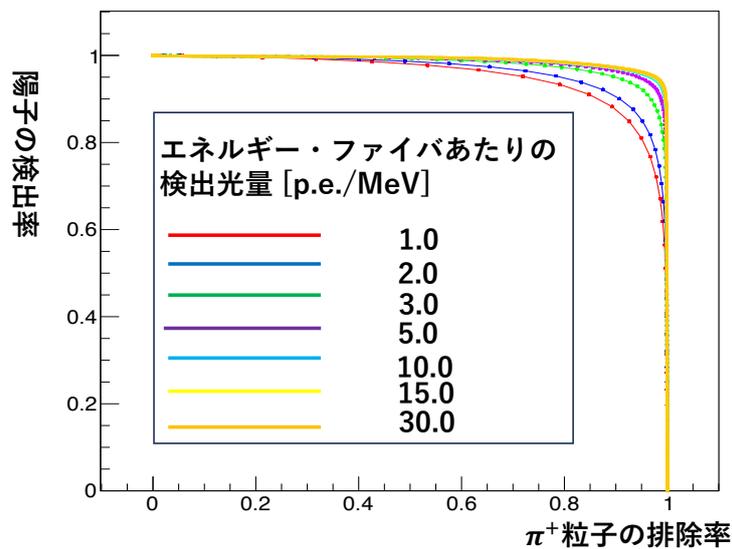


図 7.7: ROC 曲線

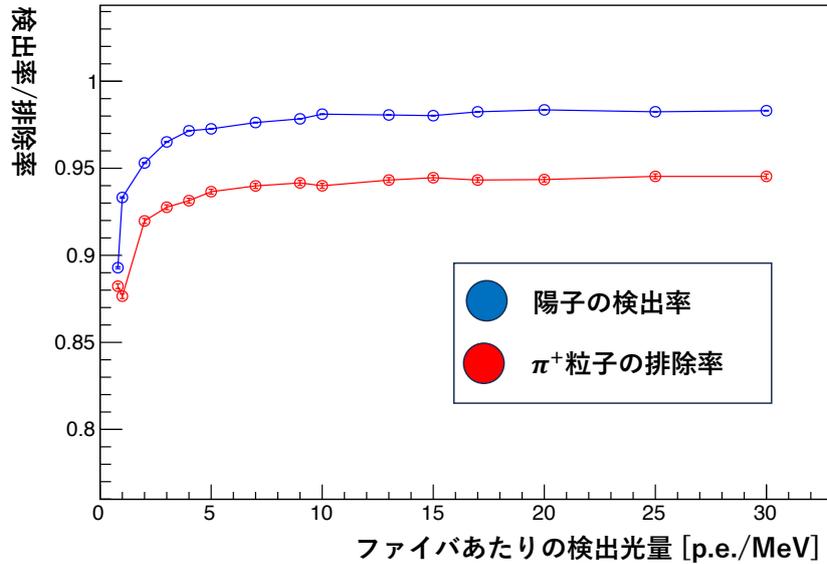


図 7.8: エネルギー・ファイバあたりの検出光量と粒子識別能力

7.3 最小電離粒子に対する飛跡検出効率の評価

7.3.1 目的

WbLS 検出器は飛跡検出器であり、飛跡に対する検出効率が十分にあることが求められる。荷電粒子のうち最も電離エネルギーの小さい、つまりシンチレーション光を放出しないエネルギーの粒子を最小電離粒子と呼ぶ。本節では、この最小電離粒子に対する検出効率を評価することを目的とする。

7.3.2 ファイバ 1 本での検出効率

最小電離粒子が WbLS 内を通過することによるファイバ毎の検出光量が平均 λ のポアソン分布に従うとする。各検出器の検出光量閾値に対し、検出光量と検出効率の関係を図示したものを図 7.9 に示す。また、各閾値において最小電離粒子の検出効率が 99% となる検出光量を表 7.2 に示す。本研究において達成した WbLS 検出器のエネルギー・ファイバあたりの検出光量は、4.7 p.e./MeV であった。この検出光量を持つとき、MIP が WbLS セルを通過するときに落とすエネルギーは、前章におけるエネルギー 500 MeV の陽電子が WbLS 中に落とすエネルギー (図 7.1) を参考にすると 1.45 MeV 程度であり、このときファイバ 1 本あたり $4.7 \times 1.45 \simeq 6.8$ p.e. の平均光量が得られることになる。つまり、最小電離粒子が通過するときの 1 本のファイバでの検出効率は、検出閾値が 1.5 p.e. 以下であれば 99% 以上となり十分な検出光量を持っていると言える。しかし、3.5 m の減衰長をもつファイバによる減衰を最大限 200 cm 考慮した場合、検出光量は $6.9 \times \exp(-200/350) \simeq 3.8$ であり、検出効率は 99% に満たず 89% である。

以上の結果より、最小電離粒子に対する飛跡検出効率の観点からも WbLS 検出器の検出光量が十分でないことが分かった。検出閾値を 1.5 p.e. とした場合、すべてのセルにおいてファイバ 1 本の検出効率が 99% を達成するためには、エネルギー・ファイバあたりの検出光量 $6.6 / \exp(-200/350) / 1.45 \simeq 8.06$ が必要であり、

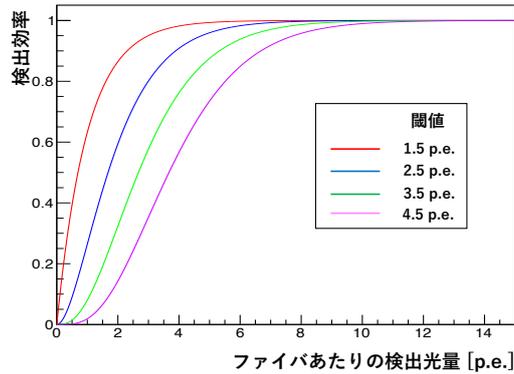


図 7.9: 各閾値でのファイバあたりの検出光量と検出効率

表 7.2: 検出効率 99% に必要な検出光量

検出閾値 [p.e.]	0.5	1.5	2.5	3.5
検出効率 99% に必要な検出光量 [p.e.]	4.6	6.6	8.4	10.0

本研究で達成した検出光量の 1.7 倍に相当する。

ただし、以上の検出効率は、最小電離粒子に対するファイバあたりの検出効率であり、実際の飛跡はいくつものセルを貫通することや短い飛跡を残す低運動量粒子は最小電離粒子の数倍のエネルギーを落とすことから、解析方法を工夫することにより以上の条件を緩和することが可能であると考えられる。

7.4 章のまとめ

この章では、まず初めに本研究によって開発した WbLS 検出器の検出光量の評価を行なった。その結果 WbLS 検出器のエネルギー・ファイバあたりの検出光量は、 4.7 ± 0.1 p.e./MeV と計算された。これは、ビームテストにおける最大の検出光量の 1.74 倍であった。

次に、WbLS 検出器が前置検出器としての使用可能であるかについて、検出光量をもとに検討を行った。まず、WbLS 検出器の要求性能の 1 つである、低運動量の陽子・ π 粒子の粒子識別について、Geant4 シミュレーションを用いて評価した。低運動量の粒子が停止する直前のセルにおける検出光量を用いることで、検出光量 4.7 p.e./MeV では、陽子の検出率 97.2%、 π^+ の排除率 93.5% の精度で粒子識別が可能であることが分かった。これは SuperFGD と同程度の検出光量を仮定した WbLS 検出器と比較して 1% 以内の減少に収まっている。しかしながら、ファイバによる光量の減衰を考慮すると検出器全体で高い識別能力を有しているとはいえず、さらに、2 倍の検出光量向上が必要であることが分かった。また、WbLS 検出器の飛跡検出効率の評価を行った。検出光量が 4.7 p.e./MeV の場合ファイバ 1 本での検出閾値を 1.5 p.e. とすると 99% 以上である。ただし、ファイバによる光量の減衰を考慮すると検出器全体で高い識別能力を有しているとはいえない。閾値 1.5 p.e. の場合に検出器全体で検出効率を 99% にするためにはさらに 1.7 倍の検出光量が必要となる。

以上の結果より、本研究において開発した WbLS 検出器では、粒子識別能力・飛跡検出効率の観点から検出器全体で十分な能力を持っているとはいえず、さらに 2 倍程度の検出光量の向上が必要である。ただし、本章における要求性能は、計算を簡略化するために 1 セルや 1 ファイバといった最小要素で計算していた。実際

の粒子識別や飛跡検出では、多数のセルの情報から判断することになるため、解析方法を工夫することで要求検出光量を小さくすることが期待される。

第 8 章

今後の展望

本章では、水ベース液体シンチレータ (WbLS) 飛跡検出器開発における今後の展望について述べる。

前章で算出した WbLS 検出器の検出光量は、2.5 cm×2.5 cm×2.5 cm の大きさの WbLS セルを用いた測定結果からそのため、実際の 1.0 cm×1.0 cm×1.0 cm サイズのセルで同程度の検出光量が得られるかどうか実測する必要がある。1.0 cm×1.0 cm では 2.5 cm×2.5 cm のものと比べて、表面積が約 6.25 倍異なり、宇宙線が貫通する頻度も約 1/6 となる。現在 1 日測定をおこなっているため 1 週間程度の測定期間が見込まれるが、WbLS の蒸発やファイバの接着部分からの漏洩の可能性を考えると、可能ならば短期間の測定が好ましい。また、ビームテストで確認された Y 軸方向の検出光量の大きな非一様性は、温度変化による層状態の変化により起こった可能性が高いと考えられるが、検証はすることができていないことも考えると、宇宙線による測定ではなくビームを用いて測定するべきであると考えている。

次に、WbLS 検出器の検出光量の更なる向上について述べる。前章において、本研究によって増加した検出光量であっても、検出器全体で粒子識別能力や飛跡検出効率からの要求を満たしていないと結論づけられた。そのため、さらに 2 倍程度検出光量を増加させることが必要である。更なる検出光量の向上について、第 5 章の内容も踏まえながら以下にまとめる。

WbLS の改良 まず、液体シンチレータの割合の更なる増加が挙げられる。現在最大の WbLS では液体シンチレータの割合は 20% であるが、30% にまで上げることは可能であると考えている。30% に増加させることで 1.5 倍の検出光量増加が見込まれる。しかし、水の割合が減少してしまうため、本研究で発見した界面活性剤 IGEPAL CO-630 よりも更に効率よく溶かすことのできる界面活性剤を見つける、もしくは WbLS 検出器の動作温度を 20°C から上げることが考えられる。界面活性剤の温度特性からより高い温度では、同量で多くの液体シンチレータを溶かすことが可能である。

次に、液体シンチレータを構成する蛍光体・波長変換剤量の最適化が挙げられる。第 5.3 節で考察したように、 \varnothing (cm) の小型のセル中では蛍光体や波長変換剤の飽和量は他の大型の液体シンチレータ実験よりも大きい可能性があり、量を多くすることで検出光量を向上させる可能性がある。

反射材の改良 本研究では、第 6 章のように反射材の改良を試みたが、達成することができなかった。しかしながら、シミュレーションとの比較により最大の反射率が 85% 程度であることが判明し、今後の反射材の改良による検出光量の増加量が判明した。反射率を 93% に向上させることで 1.4 倍程度検出光量を増加させることが可能であり、今後はこの反射率を目標に改良を行っていくこととなる。

また、課題として、WbLS 検出器に必要な水の割合を見積もる必要がある。本研究では可能な限り水の割合を大きくするという方針のもと、効率よく液体シンチレータを溶かすことのできる界面活性剤を探索し WbLS

の改良を行なった。しかしながら、水-ニュートリノ反応の精密測定のためにどの程度水の割合が必要とされるかは見積もられていない。必要な水の割合によって液体シンチレータの割合も決定し、WbLS の最大発光量も決まってしまう。そのため、WbLS 検出器に必要とされる水の割合を計算することが検出光量の向上のためにも喫緊の課題である。

最後に、WbLS 検出器が十分な検出光量を達成することが確認できた場合、前置検出器での使用に向けて WbLS の長期間の安定性を評価する必要がある。温度変化による安定性は第 5.1 節において界面活性剤を評価した手法を用いることで確認することが可能である。しかしながら、長期間の運転中には蒸発の影響で WbLS 中の組成が変化してしまうことが考えられる。WbLS を循環させる手法の研究など、WbLS 検出器の前置検出器の運用に向けた開発が重要になると考えている。

第9章

結論

ハイパーカミオカンデ実験では、レプトンにおける CP 対称性の破れの発見を物理目標の一つとしており、感度を最大限に高めるために系統誤差の削減が重要となる。特に、水チェレンコフ検出器であるハイパーカミオカンデ検出器と同じ、水を標的としたニュートリノ反応の精密測定によるニュートリノ反応の不定性の削減が必要とされており、水を標的とする新たな前置検出器の導入が検討されている。水を含みながら $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ の微細な構造により、低運動量の粒子や大角度方向に散乱した粒子へも高い感度を持つ水ベース液体シンチレータ (WbLS) 検出器はその候補の一つであり開発を進めている。

本研究ではまず初めに、WbLS 検出器の 80 セルからなる小型試作機を作製し、陽電子ビームを用いた試験を行なった。その結果、WbLS を用いた検出器として荷電粒子の飛跡を初めて捉え、飛跡検出器として使用可能であることを示した。ただし、検出光量は最大でもファイバあたり 3.5 p.e. であり、飛跡の検出効率が前置検出器として実用化するには十分ではないことが判明した。

そこで、WbLS 検出器の各要素について検出光量が向上する可能性があるか検討を行った。WbLS 中の液体シンチレータの割合を大きくすることによる WbLS の発光量の増加と反射材の反射率上昇によるセル内の光収率の増加が検出光量の向上に大きく寄与することを試算し、WbLS 検出器開発における指針とした。

WbLS 中の液体シンチレータの割合を増加させるために、まずは効率よく液体シンチレータを溶かすことのできる界面活性剤の選定から行った。その結果、 20°C において IGEPAL CO-630 が測定した中で最も効率の良い界面活性剤であることを突き止めた。次に、IGEPAL CO-630 を用いて液体シンチレータ割合の大きい WbLS を作製し、宇宙線を用いてその光量を測定した。結果として、水の割合の低下を 3% に抑えた上で、ビームテスト時の WbLS と比較して約 1.78 倍の検出光量を達成した。

反射材の反射率を上昇させるために、3 種類の白色系樹脂を用いて 3D プリンタによって小型の容器を作製し検出光量を測定した。検出光量が最大であった PA 樹脂の検出光量は、ビームテストと同じ PMMA 樹脂で作製したセルの検出光量と同程度であり、本研究では反射材の改良を行うことができなかったと結論づけた。ただし、シミュレーションとの比較の結果 PA 樹脂の反射率は 85% であり、93% まで改善することにより検出光量に約 1.4 倍の向上の余地があることを示した。

最後に WbLS 検出器が前置検出器としての使用可能性を評価した。本研究によって開発した WbLS 検出器の検出光量は、エネルギー・ファイバあたり 4.7 ± 0.1 p.e./MeV であった。この検出光量の場合、低運動量の陽子と π^+ 粒子に対する粒子識別能力は、陽子の検出率 96% 以上、その時の π^+ 粒子の排除率 92.5% 以上となった。また、最小電離粒子に対する飛跡検出効率は 89% 以上であり、飛跡検出器として十分な検出効率を持っているとはいえない。これらの結果から WbLS 検出器をハイパーカミオカンデ実験の前置検出器として使用するためには、2 倍程度の更なる検出光量向上が必要であることが分かった。

今後は、反射材の改良を行いながら WbLS の組成を最適化することにより検出光量を向上させ、ニュートリノ振動測定における-ニュートリノ反応の不定性を WbLS 飛跡検出器を用いて大幅に削減することを目指す。

謝辞

本論文を作成するにあたりご助力いただいた皆様にこの場を借りて感謝いたします。

指導教員の中家剛教授には、普段の研究生活から本論文、審査書類に至るまで多くの助言をいただきました。私が修論について色々余計なことを考えている時に助言をいただいたおかげで、なんとか修論がまとまったと思います。

副指導教員の木河達也助教には、研究の全般にわたって大変お世話になりました。発表資料の添削の際にも数多くの助言をいただき、大変参考になりました。

2022年のビームテストの際には、中家教授、木河助教、東北大学電子光物理学研究センター助教の時安敦史助教、研究室の先輩浅野さん、東北大の同期の若林君など数多くの方にお世話になりました。無事にデータを取得できて本論文に載せることができたのは皆様のおかげです、ありがとうございました。

京都 T2K グループの先輩である、安留さん、栗林さん、小田川さん、川上さん、吉村さん、有元さん、浅野さんには、研究から大学生活まで様々な面でお世話になりました。安留さんには研究室で良く私を気にかけてくださり研究の話などを聞いていただきました。栗林さん、小田川さん、川上さんには夕食に行った際などに国際会議等のイベントのことなどで分からないことがあったときに教えていただきました。吉村さんには、東海村で車で送迎していただき大変助かりました。有元さんには、色々質問した時に優しく答えていただきました。浅野さんには、ビームテストや WbLS のこと等大変お世話になりました。

T2K 実験の先輩の江口さん、有原さん、児玉さん、西森さん、同期の沖永君、白石君、小林君、古井君には、T2K コラボレーション等での食事など色々東海村でお世話になりました。

高エネ同期の竹内君、疋田君、對馬君、松下君、武藤君、には同期として授業の課題や学会発表練習など色々な場面でお世話になりました。また、同期飲みをしましょう。

最後に、私がここまで研究を続けてこれたのも支えていただいた家族のおかげです、ありがとうございました。

参考文献

- [1] W. Pauli, "Dear radioactive ladies and gentlemen.", Phys. Today, **31N9**, 27 (1978).
- [2] C.L. Cowan, Jr. *et al.*, "Detection of the Free Neutrino: a Confirmation", Science, **124**, 3212 (1956).
- [3] G. Danby *et al.*, "Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos", Phys. Rev. D, **9**, 36 (1962).
- [4] K. Kodama *et al.*(DONUT Collaboration), "Observation of tau neutrino interactions", Phys. Lett. B, **504(3)**, 218-224 (2001).
- [5] Y. Fukuda *et al.*, "Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos", Phys. Rev. Lett., **81**, 1562 (1998).
- [6] B. Pontecorvo, "Mesonium and anti-mesonium", Sov. Phys. JETP, **6**, 429 (1957). (Russian original Zh. Eksp. Teor. Fiz. **33**, 549, (1957).)
- [7] Z. Maki, M. Nakagawa and S. Sakata, "Remarks on the Unified Model of Elementary Particles", Prog. Theor. Phys., **28(5)**, 870-880 (1962).
- [8] L. Wolfenstein, "Neutrino oscillations in matter", Phys. Rev. D, **17**, 2369 (1978).
- [9] S.P. Mikheyev and A. Yu. Smirnov, "Resonance Amplification of Oscillations in Matter and Spectroscopy of Solar Neutrinos", Sov. J. Nucl. Phys., **42**, 913-917 (1985).
- [10] R.L. Workman. *et al.*(Particle Data Group), "Prog. Theor. Exp. Phys.", The Review of Particle Physics, **2022(8)**, 083c01 (2022). and 2023 update PDG. <https://pdg.lbl.gov/>
- [11] F. P. An *et al.*(), "Observation of Electron-Antineutrino Disappearance at Daya Bay", Phys. Rev. Lett., **108**, 171803 (2012).
- [12] A.D. Sakharov., "Violation of CP Invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe.", Pisma XZh. Eksp. Teor. Fiz., **5**, 32-35 (1967).
- [13] M. Fukugita and T. Yanagida, "Baryogenesis Without Grand Unification", Phys. Lett. B, **174**, 45 (1986).
- [14] Y. Hamada, R. Kitano and W. Yen, "Leptogenesis via neutrino oscillation magic", J. High Energ. Phys., **2018**, 178 (2018).
- [15] Z. Z. Xing and Z. H. Zhao, "A review of $\mu - \tau$ symmetry in neutrino physics", Rep. Prog. Phys., **79**, 076201 (2016).
- [16] J.A. Formaggio and G.P. Zeller, "From eV to EeV: Neutrino Cross Section Across Energy Scales", Rev. Mod. Phys., **84**, 1307 (2012).
- [17] K. Abe *et al.*(T2K Collaboration), "The T2K experiment", Nucl. Instrum. Meth. A, **659**, 1 (2011).
- [18] J-PARC. <http://j-parc.jp/Acc/ja/index.html>

- [19] K. Abe *et al.*(T2K Collaboration), "Evidence of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam", Phys. Rev. D, **88**, 032002 (2013).
- [20] K. Abe *et al.*(T2K Collaboration), "Measurements of the T2K neutrino beam properties using the INGRID on-axis near detector", Nucl. Instrum. Meth. A, **694**, 211-223 (2012).
- [21] 安留 健嗣, "新検出器 Baby MIND を導入した T2K-WAGASCI 実験の最適化と解析アルゴリズムの構築", 京都大学 修士論文 (2019).
- [22] K. Abe *et al.*(T2K Collaboration), "Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations", Nature, **580**, 339-344 (2020).
- [23] K. Abe *et al.*(T2K Collaboration), "Measurements of neutrino oscillation parameters from the T2K experiment using 3.6×10^{21} protons on target", Eur. Phys. U. C, **83**, 782 (2023).
- [24] S. Igarashi *et al.*, "Accelerator design for 1.3-MW beam power operation of the J-PARC Main Ring", Prog. Theor. Exp. Phys., **2021(3)**, 033G01 (2021).
- [25] ハイパーカミオカンデ概要ページ. <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/hk/about/outline/>
- [26] C. Naseby, "Neutrino oscillation sensitivity of the Hyper-Kamiokande experiment", NUFACT, Seoul National University, Korea (2023).
- [27] K.Abe *et al.*(Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration).
Hyper-Kamiokande Design Report. arXiv:1805.04163 (2018)
- [28] Y. Kudenko. *Hyper-Kamiokande*. arXiv:JINST (15) C070292020
- [29] M. Yeh *et al.*. *A new water-based liquid scintillator and potential applications*. arXiv:Nucl. Instrum. Meth. A (660(1)) 51-562011
- [30] M. Askins *et al.*, "THEIA: an advanced optical nutino detector", Eur. Phys. J. C, **80**, 416 (2020).
- [31] T. Förster, "Intermolecular Evergy Migration and Fluorescence", Ann. Phys., **437**, 55 (1948).
- [32] D.L. Dexter, "A Theory oof Sensitized Luminescence in Solids", J. Chem. Phys., **21**, 836-850 (1953).
- [33] S. Schoppmann, "Review of Novel Approaches to Organic Liquid Scintillators in Neutrino Physics", Symmetry, **15(1)**, 11 (2023).
- [34] 株式会社クラレ PSF 製品情報. <https://www.kuraray.co.jp/products/psf>
- [35] 浜松ホトニクス. <https://www.hamamatsu.com/index.html>
- [36] 浜松ホトニクス MPPC S13360 シリーズデータシート
. https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s13360_series_kapd1052j.pdf
- [37] 浅野 有香, "ニュートリノと水の反応の精密測定に向けた水ベース液体シンチレータの開発", 京都大学 修士論文 (2022 年度).
- [38] 東北大学 電子光物理学研究センター ホームページ. <https://www.lns.tohoku.ac.jp/>
- [39] ジーテック社 ホームページ. <http://www.ggg-tech.co.jp/>
- [40] 五味 慎一, "半導体光検出器 MPPC の性能評価システムの構築", 京都大学 修士論文 (2007 年度).
- [41] OpenIt 汎用 MPPC 読み出しモジュール. \ <https://openit.kek.jp/project/MPPC-Readout-Module/public>
- [42] R. Brun and F. Rademakers, "ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework", Proceedings AIHENP'96 Workshop, Lausanne, Switzerland (1996). , Nucl. Instrum. Meth. A, **389**, 81-86 (1997)
- [43] J.Allison *et al.*, "Recent Developments in Geant4", Nucl. Instrum. Meth. A, **835**, 186-225 (2016).

- [44] J. Allison *et al.*, "Geant4 Developments and Applications", IEEE Trans. Nucl. Sci., **53**, 270-278 (2006).
- [45] S. Agostinelli *et al.*, "Geant4 - A Simulation Toolkit", Nucl. Instrum. Meth. A, **506**, 250-303 (2003).
- [46] J. Caravaca *et al.*, "Characterization of water-based liquid scintillator for Cherenkov and scintillation separation", Eur. Phys. J. C, **80**, 867 (2020).
- [47] A. Abusleme *et al.*, "Optimization of the JUNO liquid scintillator composition using a Daya Bay antineutrino detector", Nucl. Instrum. Meth. A, **988**, 164823 (2021).
- [48] X. Hua-Lin. *et al.*, "Oxygen quenching in a LAB liquid scintillator and the nitrogen bubbling model", Chinese Physics C, **34(5)**, 571-575 (2010).
- [49] S. H. So *et al.*, "Development of a Liquid Scintillator Using Water for a Next Generation Neutrino Experiment", Adv. High Energy Phys., **2014**, 327184 (2014).
- [50] S. Nufson *et al.*, "Liquid scintillator production for the NOvA experiment", Nucl. Instrum. Meth. A, **799**, 1-9 (2015).
- [51] 国枝 博信, 篠田 耕三, "水-油系相互可溶化量を増大させる諸因子", 日本化学会誌, **11**, 2001-2006 (1972).
- [52] Sigma-Aldrich 社 Triton X-100 商品ページ. <https://www.sigmaaldrich.com/JP/ja/product/sial/x100>
- [53] Sigma-Aldrich 社 Triton X-114 商品ページ. <https://www.sigmaaldrich.com/JP/ja/product/sial/x114>
- [54] Sigma-Aldrich 社 IGEPAL CO-630 商品ページ. <https://www.sigmaaldrich.com/JP/ja/product/aldrich/542334>
- [55] Sigma-Aldrich 社 TERGITOL NP-10 商品ページ. <https://www.sigmaaldrich.com/JP/ja/product/sigma/np10>
- [56] CAEN 社 ホームページ. <https://www.caen.it/>
- [57] 京都大学大学院理学研究科 技術部 3D プリントサービス. <http://sci-tech.bgrl.kyoto-u.ac.jp/service/3dpr.html>
- [58] Formlabs 社 光造形材料ライブラリ. <https://www.form2.shop/formlabs-materials>
- [59] アスペクト社 粉末樹脂材料一覧. <https://aspect.jpn.com/product/>
- [60] Thorlabs 社 PTFE シート 商品ページ. https://www.thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=13871
- [61] W. R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Springer-Verlag. (1994)
- [62] A. Blondel *et al.*, "The SuperFGD Prototype charged particle beam tests", JINST, **15**, P12003 (2022).
- [63] 栗林 宗一郎, "T2K 実験における新型ニュートリノ検出器 Super FGD のための研究開発", 京都大学 修士論文 (2019 年度).
- [64] 有元 隼太, "ハイパーカミオカンデ実験の前置検出器に向けたシンチレータの劣化評価及び新開発 MPPC 読み出し ASIC の性能評価", 京都大学 修士論文 (2022 年度).
- [65] 川上 将暉, "T2K 実験新型ニュートリノ検出器のための波長変換ファイバー品質管理システムの開発", 京都大学 修士論文 (2021 年度).

付録 A

Geant4 を用いた WbLS 検出器における WLS ファイバと MPPC のシミュレーション

A.1 WLS ファイバのシミュレーション

この章では、第 4.3 章において詳細を省いた、WbLS 検出器における WLS ファイバでの光子伝搬過程の見積もりとシミュレーションについて述べる。前述の通り、WLS ファイバの光収率は各伝搬過程に分けて考えると、WLS ファイバに到達したシンチレーション光が波長変換される確率 (波長変換効率) と波長変換され等方的に放出される光がコアとクラッドにおいて全反射して閉じ込められる確率 (捕獲率)、伝播する光がファイバ内で損失せずに伝わる確率 (生存確率)、ファイバ端で光がファイバから出る確率 (脱出率) の積で表すことができる。ただし、波長変換効率は、WLS ファイバの吸収ピーク付近の波長領域であればほぼ 100% 近い効率で吸収・変換されると考えられる。典型的な液体シンチレータの発光ピーク波長が WLS ファイバの吸収ピークとよく合っていることから、波長変換効率は 1 として検討は行わない。その他の確率については以下のように Geant4 を用いたシミュレーションによって見積もった。

Geant4 を用いた WLS ファイバ内での光子伝搬と MPPC による光子検出シミュレーション

本シミュレーションでは、図 A.1 のように WLS ファイバと MPPC を実装した。WLS ファイバは、クラレ社カタログ^[34]を参考に、Y11 マルチクラッドを念頭に実装した。屈折率は表 2.1 のように実装し、それぞれのクラッドの厚さはファイバ直径の 2% とした。また、図 2.4 のように光子が伝搬することを再現するために、内側と外側のクラッドの境界で反射しなかった光子はそのままファイバを出ていくように実装した。さらにファイバの検出器の無い方の端では光子は反射せず出ていくものと仮定している。

MPPC の表面には MPPC S13360-1325PE を念頭に、浜松ホトニクス社カタログ^[36]を参考に厚さ 0.3 mm、屈折率 1.55 のエポキシ樹脂を実装している。

光子をファイバのある点から発生させその光子が伝搬する過程を追跡することでシミュレーションを行った。

A.1.1 捕獲率について

クラレ社カタログ^[34]によると、マルチクラッドファイバではコアの中心で発生したと仮定すると 5.4% の光子が捕獲される。しかし、波長変換された光がファイバ内に捕獲される確率は、各発生位置から全反射される立体角が異なるため、コアでの光子の発生位置の分布に依存する。

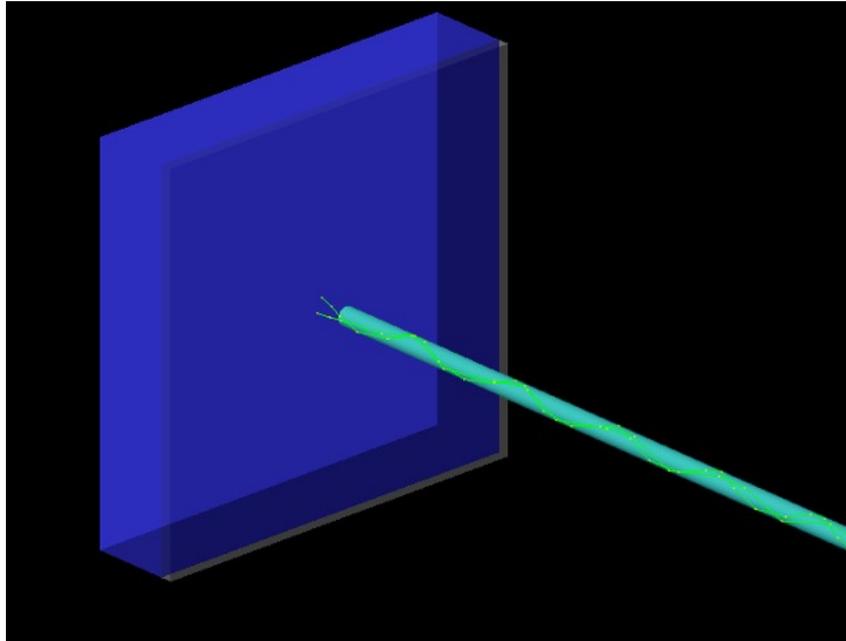


図 A.1: Geant4 シミュレーション内に実装した WLS ファイバと MPPC。水色の棒が WLS ファイバ、青色の直方体が MPPC の検出面である。WLS ファイバ中を緑色の光子が伝搬している。また、MPPC の表面にある白い直方体はエポキシ樹脂を表している。

そこで、図 A.2 のように、光子の発生位置が (a) コア内の一様分布、(b) コアの outer 10% の一様分布、(c) コアの中心、の 3 パターンについてシミュレーションを用いて行った。なお、光子はファイバ端から 100 cm の位置で発生させ、捕獲率=片方のファイバ端に辿り着いた光子数/発生させた光子数とした。また、光子の伝搬中の減衰の効果は考えていない。シミュレーション結果を表 A.1 に示す。(c) コアの中心で発生させた場合には誤差の範囲内でカタログ上の値 5.4% と一致した。(a) と (b) のどちらにおいても (c) よりも大きく特に (b) では約 18% と (c) のおおよそ 3 倍にもなることから、コアの外側で波長変換された光がより捕獲されやすいことがわかる。実際のファイバではシンチレーション光に対する WLS ファイバの減衰長がコアの半径と同程度以上であれば (a)、十分に半径より短いならば (b) に近い分布になることが予想される。実際のシンチレーション光においてどの分布が最も近い分布であるかは測定し検証する必要があるが、一様分布よりも中心付近に偏ることは考えづらいため、WLS ファイバでの捕獲効率としては、概ね 9% から 18% 程度になる。

表 A.1: 各光子の発生位置分布ごとの捕獲率。誤差は統計誤差を表している。

	(a) コア内の一様分布	(b) コア outer 10% の一様分布	(c) コアの中心
捕獲率	9.13 ± 0.03 %	18.08 ± 0.04 %	5.39 ± 0.02 %

A.1.2 生存率について

光子が WLS ファイバを伝搬中に損失せずにファイバ端までたどり着く確率は減衰長によって特徴づけられ、伝搬する距離が長いほど損失は大きくなる。光子は伝搬中のほとんどの過程において、ファイバの大部分

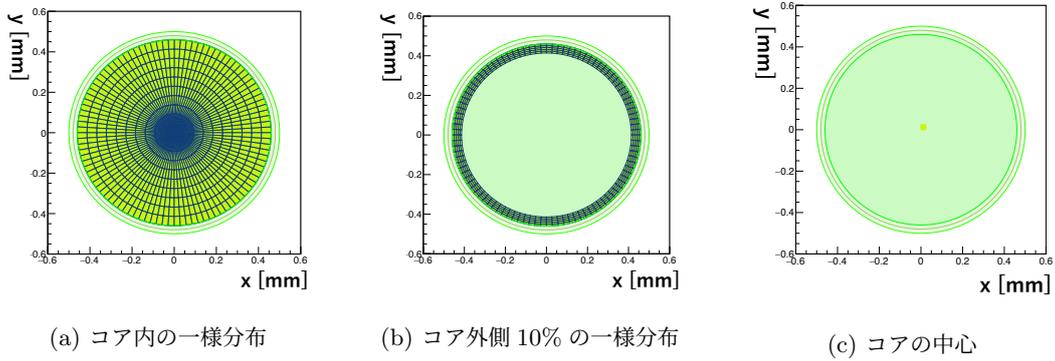


図 A.2: WLS ファイバの断面図と光子の発生位置分布。3つの円はそれぞれ、コア・内側クラッド・外側クラッドの境界を表している。

を占めるコアを通過し、外側クラッドの減衰長はコアの減衰長と比較して十分に長いことから、以下ではコアの減衰長のみについて考える。クラレ社カタログ^[34]より、直径 1 mm の Y11 ファイバの減衰長の実測値は 3.5 m 以上となっている。ただし、この値は通常の Y11 ファイバの値であり、SuperFGD で使われている、応力に耐性のある S タイプのファイバを用いる場合には 10% 程度短くなるとされている。また、このファイバの減衰長は、3 m の WLS ファイバを用いて光を入射する位置を動かして光量の大きさを測定したデータのうち、100 cm から 300 cm の間のデータを指数関数でフィッティングして得られた値である。実際の光子はファイバの中を全反射しながら斜めに伝搬していくため、ファイバ端から光子を入射させる位置までの距離よりも光子が伝搬する距離の方が長い。そのためまず実測のファイバの減衰長が 3.5 m であると仮定し、シミュレーションによってファイバコアの減衰長を求めた。

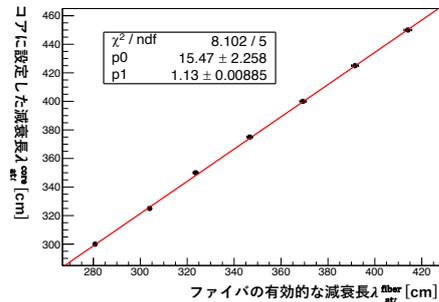
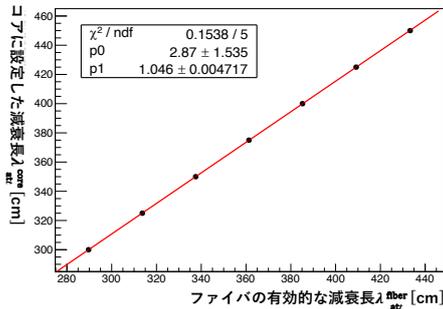
コアの減衰長を 300 cm から 450 cm まで変化させ、実測によるファイバの減衰長を求めた結果を図 A.5 に示す。ただし、各コアの減衰長でのファイバの減衰長は図 A.4 のように、WLS ファイバの中で光子を発生させる位置をファイバ端から 100 cm から 300 cm の間で変化させ、その時ファイバ端から出てくる光量を指数関数でフィッティングすることで求めた。図 A.3 では、結果が一次関数 $y = p_0 + p_1 \times x$ と良く合っていたため、フィッティング結果を示している。一次関数でよくフィッティングされていることから、この一次関数の傾き p_1 は、ファイバ中の平均的な光路長と実際に光子がファイバ方向に進んだ距離の比率を表すと考えることができる。(a) と (b) の光子発生位置分布を比較すると (b) の方が傾きが大きく、平均的な光路長が長いことが伺える。以上の結果から、ファイバの減衰長の実測値が 350 cm の時、光子発生分布を (a) コア内の一様分布と仮定するとコアの実際の減衰長は 369 ± 2 cm 以上であり、(b) コア外側 10% の一様分布と仮定するとコアの実際の減衰長は 411 ± 3.8 と計算した。

以降は光子発生位置分布が (a) の場合はコアの減衰長を 370 cm、(b) の場合は 410 cm と設定する。

次に、光子の発生位置をファイバ端から 5 cm から 220 cm まで位置を変えてシミュレーションを行い、光子の生存率を見積もった。ここで 220 cm は、SuperFGD は一辺が最長で 200 cm であることを加味し同程度の大きさを想定して決定している。結果を図 A.5 に示す。ファイバによる減衰は比較的ファイバ端に数 cm 程度のデータを含める場合、1つの指数関数ではなく、2つの指数関数の和でよく表されることが知られており、今回も、

$$I = I_0 \left(A \exp\left(-\frac{x}{\lambda_0}\right) + (1 - A) \exp\left(-\frac{x}{\lambda_1}\right) \right)$$

を用いてフィッティングした。フィッティング結果を用いて計算するとファイバ端から 200 cm 離れた位置で



(a) 光子をコア内の一様分布で発生させた場合 (b) 光子をコア外側 10% の一様分布で発生させた場合

図 A.3: ファイバでの有効的な減衰長とコアに設定した減衰長。

直線で赤線は一次関数でのフィッティング結果である。

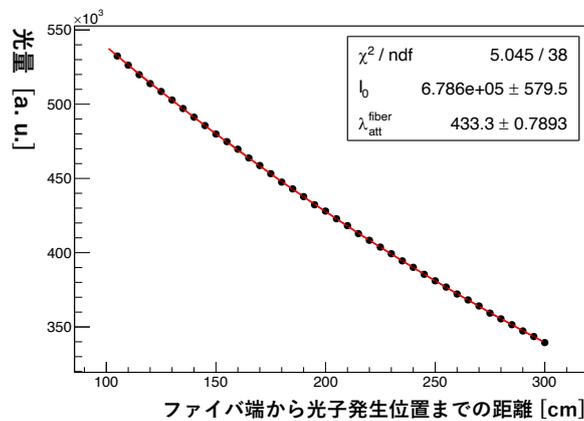


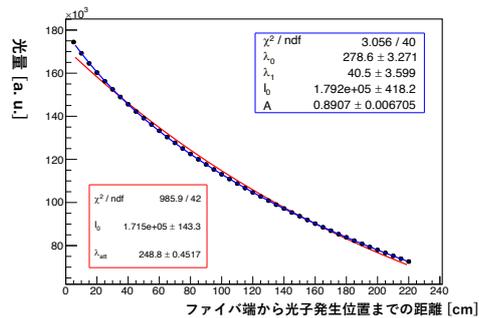
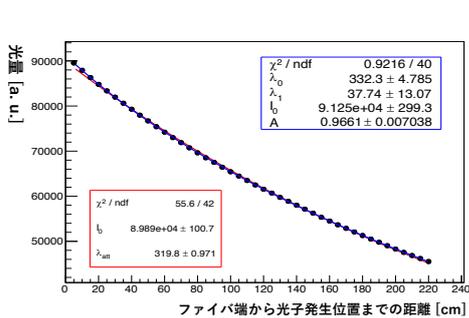
図 A.4: 減衰長を 450 cm、光子を分布 (a) に従って発生させたときの光子数分布とフィッティングによる減衰長の推定

発生した光子、つまり WbLS 検出器の端のセルからファイバに入射した光子が MPPC を設置してあるファイバ端まで生存する確率は、光子発生位置分布が (a) の場合 53 %、(b) の場合 45 % となった。

A.1.3 脱出率について

WLS ファイバの端が空気など屈折率がファイバと異なる物質と接している時、ファイバ中を伝搬してきた光は一部が反射されて戻る。このシミュレーションでは、ファイバ端面はよくダイヤモンドカッターなどで研磨されていると仮定し、フレネルの公式に従う反射による閉じ込めのみを考えた。

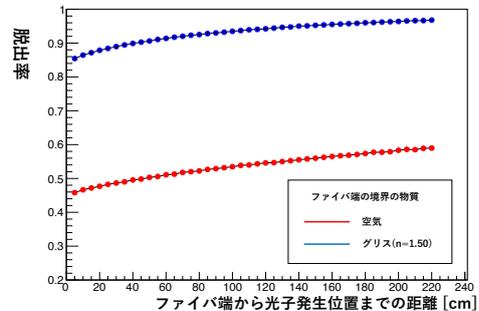
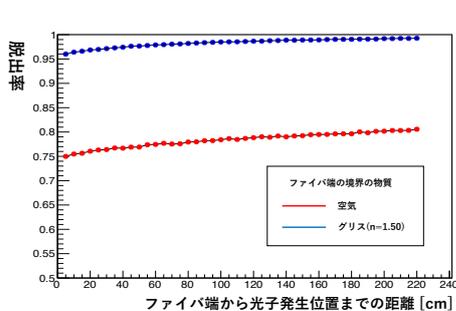
光子発生位置をファイバ端から 5 cm から 220 cm の位置まで変化させてシミュレーションを行い、伝搬された光の脱出率を見積もった結果を図 A.6 に示す。なお、赤線が空気で満たした場合を示している。ファイバ端で反射される光は大角度で伝搬されるものが多く、他の光よりも相対的に光路長が長く減衰しやすいため、ファイバ端から離れた位置の光になるほどファイバ端において反射されにくくなる。また、光子発生位置分布が (a) よりも (b) の方がより大角度に散乱されてきた光子が多いことから脱出率は小さくなる。



(a) 光子をコア内の一様分布で発生させた場合 (b) 光子をコア外側 10% の一様分布で発生させた場合

図 A.5: ファイバ中を伝搬する光子のファイバ端からの距離による生存率。青線と赤線はそれぞれ、2つの指数関数の和と1つの指数関数を用いたときのフィッティング結果を示している。

反射は屈折率の差が大きいほど起こりやすくなるため、ファイバ端と MPPC の間を空気ではなく、コアの屈折率 1.43 と MPPC のエポキシ窓の屈折率 1.55 に近い屈折率の物質で満たすことができれば、脱出率を上げることができる。そのため空気ではなく屈折率 1.50 のグリッドで満たした場合もシミュレーションを行い、図 A.6 青線に示す。増倍率を計算すると (a) の場合平均して 1.25 倍、(b) の場合平均して 1.74 倍することができる。ただし、ファイバと MPPC の間をグリッドに埋めることによる検出光量の増大は、このシミュレーションのように WLS ファイバで吸収されて波長変換された光子の位置分布に大きく依存するため、実際の WLS ファイバにおいてどの程度増加があるか見積もることは困難であり、実際に測定して確かめる必要がある。また、実 WbLS 検出器の作製の際に約 5.6 万本あるファイバと MPPC の間を均一に接合することは簡単に実現可能ではなく、コストや有効性、実現性等を考えて検討していく必要がある。



(a) 光子をコア内の一様分布で発生させた場合 (b) 光子をコア外側 10% の一様分布で発生させた場合

図 A.6: ファイバからの光子の脱出率。赤線と青線はそれぞれ、ファイバ端の境界に空気とグリッド (屈折率 1.50) を置いた場合を示している

A.1.4 WLS ファイバのシミュレーションのまとめ

WLS ファイバと MPPC の間を波長変換ファイバのコアの屈折率 1.43 と MPPC の検出器表面のエポキシ窓 1.55 の間の屈折率の物質で満たすことにより、1.25-1.74 倍程度 WLS ファイバから脱出する光を増やすことができることが分かった。この範囲の違いは、シンチレーション光がファイバ内で吸収され波長変換す

る位置の分布によって決まるため、実際に測定することが重要である。ただし、WbLS 検出器の想定である SuperFGD は 5.6 万本の WLS ファイバと MPPC があり、均一に接着する必要があることも考慮すると、有効性や実現性、コスト等の観点からよく検討する必要がある。

A.2 MPPC のシミュレーション

の章では、第 4.4 章において詳細を省いた、WbLS 検出器における MPPC での光子検出過程の見積もりとシミュレーションについて述べる。MPPC での光検出確率は、ファイバから出た光が MPPC まで辿り着く到達率と MPPC の光子検出効率の積で表すことができる。

A.2.1 MPPC の光検出効率 (PDE) とダイナミックレンジについて

MPPC の光検出効率は入射光子によって電子・正孔対が生成される量子効率と、検出面全体のうちの検出素子の割合 (開口率)、生成された電子によってアバランシェ増幅が起こる確率の積で表される。

第 2.5 節で述べたように、検出面の素材の特性により量子効率が光子波長に依存していることから、MPPC の検出効率も光子波長に依存している。そのため WLS ファイバで変換後の光子の波長が MPPC の感度が最大になる波長と大きくずれていた場合検出される光量が少なくなってしまう。しかし図 2.8 のように MPPC の感度波長は、WLS ファイバの放出スペクトルに比べて十分広く、感度波長もよく放出ピークと合致しているためここでは波長依存性は考慮せず最大検出効率のみ考える。

アバランシェ増幅確率がオーバー電圧に依存するので、図 2.8b と図のように、MPPC の検出効率はオーバー電圧が大きいほど大きくなる。ただし、オーバー電圧が大きくなるとクロストーク確率も大きくなるため、適切なオーバー電圧を見積もって印加する必要がある。

表 4.1 に現在浜松ホトニクス社の商品紹介ページに上げられている MPPC のうち、WbLS 検出器での使用候補となりそうなものの特性を示す。表のように MPPC の検出効率はピクセルピッチによって異なる値をもつ。ピクセルピッチが大きいほど開口率を大きくすることができ、結果として検出効率の増加につながる。例えば、ピクセルピッチが 25 μm から 50 μm に変更することで検出光量は 1.6 倍になる。ただし、ビームテスト時はピクセルピッチ 50 μm の MPPC を使用しており、MPPC を変更することによる検出光量の増加は見込めない。また、ピクセルピッチが大きくなると検出効率が増加する一方で、ピクセル数は減少し、MPPC で測定可能な最大光子数 (ダイナミックレンジ) は小さくなる。SuperFGD においてはピクセル数が 2668 個の S13360-1325 を採用しており、宇宙線の MIP 光量が 50 p.e. 程度に対して、20 倍の 1000 p.e. 程度まで測定する予定である。測定したい最大光子数によっては、検出面のサイズが 1.3 mm \times 1.3 mm で検出効率の大きいピクセルピッチが 50 μm の MPPC では、ピクセル数が足りない可能性がある。ピクセルピッチが 50 μm の MPPC が使用できない場合、検出光量はビームテストのデータと比較して 0.8 倍 (S14160-1315), 0.625 倍 (S13360-1325) と減少してしまうため、MPPC を検討する際には WbLS 検出器がどの程度ダイナミックレンジ持つ必要があるかを含めて検討する必要がある。

A.2.2 到達率について

前節と同じ Geant4 シミュレーションを用いて、ファイバから放出された光が MPPC に到達する確率についてシミュレーションを行なった。ただし、光子はファイバ端から 100 cm の位置で発生したとしている。また、今回のシミュレーションでは光子発生位置分布はコア内の一様分布としている。到達率は、ファイバから

放出される光子の位置や方向が揃っていないことからファイバ端から検出器までの隙間に依存する。今回のシミュレーションでは、ファイバと検出器の間には空気層と屈折率 1.55、厚さ 0.3 mm のエポキシ樹脂が挟まれており、空気層を厚くすることで MPPC とファイバの隙間の距離を調節した。

到達率のファイバ端からの距離についての依存性のシミュレーション結果を図 A.7 に示す。また、例として距離が 0.5 mm の際の検出面でのヒット位置分布を図 A.8 に示す。検出面のサイズが 1.3 mm×1.3 mm の場合は、ファイバ端からの距離が大きくなるにつれ急激に到達率が下がっていくが、検出面のサイズ 3.0 mm×3.0 mm の場合は 0.5 mm 程度まで 90% 以上と高い到達率を得ることができる。これは、ファイバの直径 1.0 mm に対して十分サイズが大きいからである。また、ファイバ端と MPPC の間を屈折率 1.5 程度の物質で埋めることで、検出面のサイズが 1.3 mm×1.3 mm の場合では到達率を 3% 程度増加させることができる。ただし、検出面のサイズが 3.0 mm×3.0 mm の場合、到達率自体は高いが大部分が検出面の中心付近にあっていると予想される。そのため有効的なピクセル数は小さく、大きい MPPC を用いてもダイナミックレンジが小さくなってしまふ恐れがある。この効果については次のシミュレーションで考える。

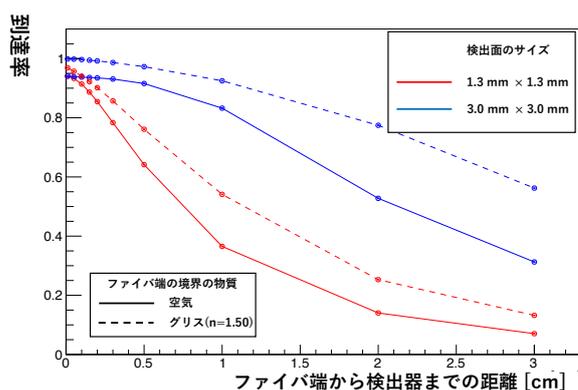


図 A.7: MPPC への到達率にファイバ端からの距離が与える影響

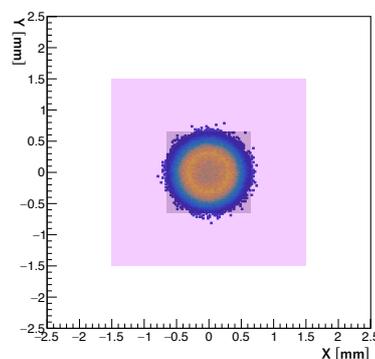


図 A.8: MPPC にヒットした光子の分布。濃い紫色の正方形が検出面サイズ 1.3 mm×1.3 mm、薄い紫色が検出面サイズ 3.0 mm×3.0 mm の領域を表す。ただし図はファイバと MPPC の隙間が 0.01 mm、隙間は屈折率 1 の場合である。

A.2.3 ファイバ端との距離とダイナミックレンジについて

入射光子数に対する MPPC の応答を次のようにシミュレーションした。ただし、今回はファイバと MPPC の間は空気の場合のみシミュレーションを行った。また、MPPC の検出面はピクセルピッチの大きさと区切られていると仮定した。実際には検出面の中にはピクセル以外の部分も含まれているため厳密に表 4.1 のピクセル数とは一致しない。前項のシミュレーションによって得られた MPPC 上のヒット位置の中心からの距離分布 (図 A.9) を入射光子の分布とし、この分布に従う乱数を発生させ、その位置に光子を入射させる。次に、各ピクセル入射した光子数に表 4.1 の検出効率をかけた光子数を平均にもつポアソン分布に従う乱数を発生させ、1 以上の場合にそのピクセルで光子が検出されたとした。

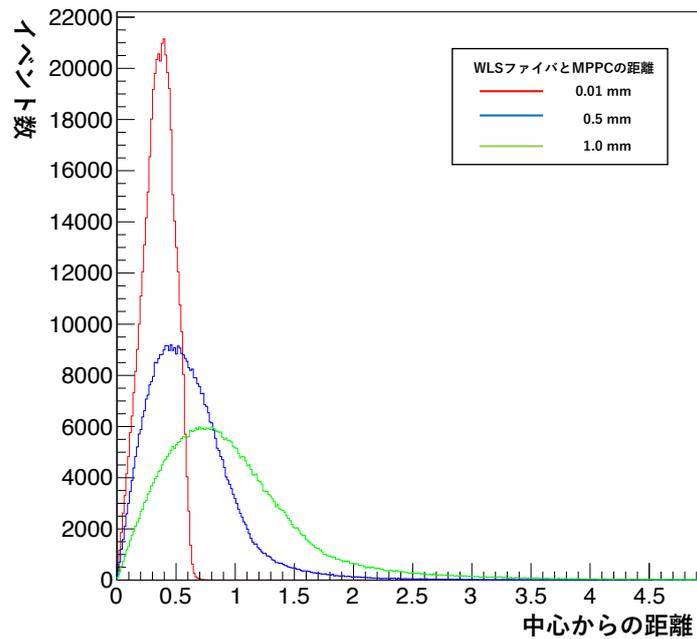


図 A.9: MPPC にヒットした光子の中心からの距離分布

MPPC での検出光量の期待値と検出光子数の関係についての結果を図 A.10 に示す。検出面サイズが $3.0\text{ mm} \times 3.0\text{ mm}$ 、ピクセルピッチが $50\text{ }\mu\text{m}$ の MPPC(青線) は、ファイバと MPPC の距離が近い場合有効ピクセル数が小さくなってしまい、ピクセル数 (3600) よりも大幅に小さな 500 以下で検出された光子数が飽和していることが分かる。

最後に、図 A.11 にファイバから放出された光子数と検出光子数の関係を示す。これは、ファイバからの到達率と MPPC の検出効率の関係を含めたものである。この図より検出光子数が 150 光子数程度であれば、ピクセルピッチが $50\text{ }\mu\text{m}$ の MPPC をファイバ端の極近傍に置く場合 (図青色、緑色の実線) が一番検出光量を大きくすることができる。それ以上の光子数が必要であるならば、検出面のサイズが $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ で、ピクセルピッチが $50\text{ }\mu\text{m}$ の MPPC をファイバ端より 0.5 mm から 1 mm 程度離して置くのが良いことがこの図から分かる。ただし、以上の議論には MPPC の検出効率以外の特性であるダークカレントやアフターパルスなどは考慮しておらず、これらの特性がどのように解析に悪影響を与えるのかを含めて検討する必要がある。

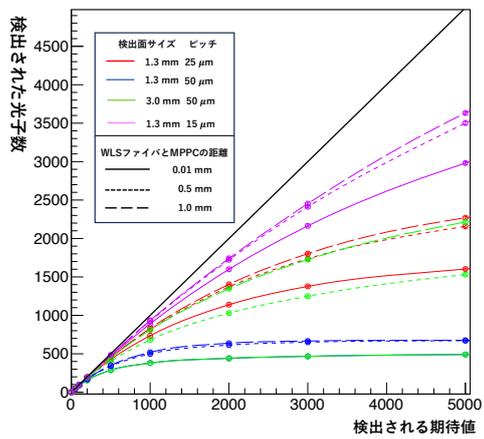


図 A.10: MPPC での検出光量の期待値と検出光子数。黒線は期待値=検出光子数を表す。

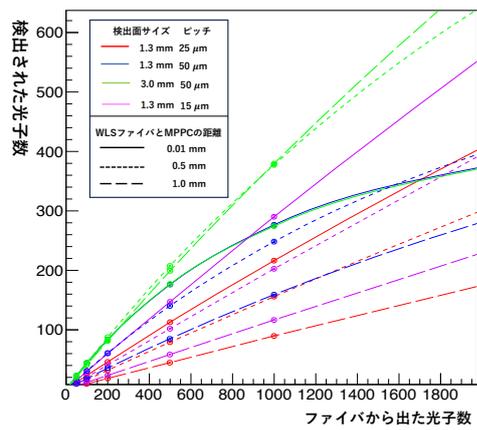


図 A.11: ファイバから出た光子数と検出光子数。