

修士論文

KamLAND2 プロトタイプ検出器における シミュレーションの構築と極低放射能分析感度の評価

Simulation construction and sensitivity evaluation of
ultra-low radioactivity measurement for KamLAND2 prototype detector

東北大学大学院理学研究科
物理学専攻

吉田雄貴

令和3年

概要

素粒子標準理論においてニュートリノの質量は厳密に0とされていたが、ニュートリノ振動の観測によりニュートリノには極めて軽い質量を持つことが明らかとなった。この極めて軽いニュートリノ質量を自然に説明できるシーソー機構にはニュートリノのマヨラナ性が不可欠であり、ニュートリノのマヨラナ性を証明する唯一の実験手段としてニュートリノレス二重ベータ ($0\nu\beta\beta$) 崩壊探索実験が挙げられる。

KamLAND-Zen 実験は低バックグラウンド環境を実現している KamLAND 検出器を用いた $0\nu\beta\beta$ 探索実験である。検出器中心に設置されたナイロン性のミニバルーン内に二重ベータ崩壊核である ^{136}Xe を溶解させた液体シンチレータを封入し、シンチレーション光を光電子増倍感 (PMT) により検出する。現在までに $0\nu\beta\beta$ 崩壊信号は検出されていない。そこで実験感度向上を目指した KamLAND2-Zen 実験が計画されており、主な改良案として ^{136}Xe の増量 (1000kg)、高量子効率 PMT の導入 (集光量 1.9 倍)、PMT に集光ミラーを装着 (集光量 2 倍)、新型液体シンチレータ (LAB-LS) の導入 (集光量 1.4 倍) による集光量の増加が挙げられる。

前述した改良案はそれぞれ独立して研究開発が行われており、それらを組み合わせた最終的な集光量の評価は行われていない。そこで KamLAND 検出器の高性能化を事前に確認することを目的とした KamLAND2 プロトタイプ検出器の製作が計画されている。プロトタイプ検出器は LAB-LS の極低放射能分析や NaI を用いた暗黒物質探索への応用も検討されている。本研究ではプロトタイプ検出器のシミュレーションツールを構築し、シミュレーションを用いてプロトタイプ検出器における集光量の予測、極低放射能分析の感度評価、暗黒物質探索への応用可能性の評価を行なった。

まずプロトタイプ検出器のシミュレーション構築ではジオメトリを構築し、LAB-LS、集光ミラー、高量子効率 PMT、タイベックシートの光学特性を導入した。このシミュレーションツールを使用することでプロトタイプ検出器のエネルギー分解能が $3.4\%/\sqrt{E[\text{MeV}]}$ と見積もることができ、集光ミラーによる集光率が 2.0 倍であることがわかった。

またプロトタイプ検出器の各物質で放射性元素を崩壊させるバックグラウンドシミュレーションを行うことでプロトタイプ検出器の LAB-LS 中の ^{232}Th 量感度が $2.3\times 10^{-15}\text{g/g}$ であると見積もられ、現行計画の 5 倍程度まで LAB-LS の体積を増加させなければ液体シンチレータに要求される ^{232}Th 濃度まで感度が達しないことを示した。

目次

第 1 章	ニュートリノ物理学	1
1.1	ニュートリノ	1
1.1.1	素粒子としてのニュートリノ	1
1.1.2	ニュートリノの発見	2
1.2	ニュートリノ振動	2
1.2.1	太陽ニュートリノ問題	2
1.2.2	大気ニュートリノ異常	3
1.2.3	ニュートリノ振動	3
1.3	ニュートリノ質量と質量階層構造	5
1.4	マヨラナ性	6
1.4.1	マヨラナ粒子	6
1.4.2	シーソー機構	8
1.5	ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊	8
1.6	$0\nu\beta\beta$ 探索の意義	9
1.7	$0\nu\beta\beta$ 事象探索実験の現状	10
第 2 章	KamLAND-Zen 実験	12
2.1	KamLAND 実験	12
2.1.1	外部検出器	13
2.1.2	内部検出器	13
2.2	ニュートリノ検出原理	15
2.2.1	ニュートリノ検出	16
2.2.2	反ニュートリノ検出	16
2.3	KamLAND-Zen 実験	17
2.3.1	Xe-LS	17
2.3.2	KamLAND-Zen のバックグラウンド	17
2.3.3	KamLAND-Zen 実験の成果と現状	19
2.4	KamLAND2-Zen 実験	21

2.5	KamLAND2 プロトタイプ検出器	22
第 3 章	20 インチ高量子効率 PMT の水中での長期安定性評価	27
3.1	長期安定性評価のセットアップ	27
3.2	ダークレートの安定性評価	28
3.2.1	測定方法	28
3.2.2	測定結果	30
3.3	ゲインの安定性評価	32
3.3.1	測定方法	32
3.3.2	測定結果	33
3.4	純水の透過率安定性評価	33
3.4.1	9 cm 透過率の測定方法	34
3.4.2	測定結果	35
3.5	ステンレスタンク内の汚れ	35
3.5.1	プロトタイプ検出器での純水の腐敗対策	37
第 4 章	プロトタイプ検出器の光量評価	39
4.1	プロトタイプ検出器のシミュレーション構築	39
4.1.1	Geant4	39
4.1.2	KLG4	40
4.1.3	ジオメトリ	40
4.2	プロトタイプ検出器の光量評価	50
4.2.1	集光ミラーによる集光率評価	50
4.2.2	集光量の不定性評価	52
4.3	KamLAND2 の光量評価	56
4.3.1	シミュレーション条件	56
4.3.2	シミュレーション結果	56
第 5 章	極低放射能分析感度の評価	58
5.1	シンチレーション測定におけるバックグラウンド評価	58
5.1.1	主なバックグラウンド	58
5.1.2	バックグラウンドシミュレーションの概要	58
5.1.3	バックグラウンドシミュレーションの結果	61
5.1.4	^{14}C 濃度の感度評価	61
5.1.5	^{232}Th 濃度の感度評価	61
5.2	暗黒物質探索への応用可能性	65
5.2.1	暗黒物質	65
5.2.2	DAMA 実験	65

目次	iv
5.2.3 シミュレーションの概要	66
5.2.4 シミュレーションの結果	67
まとめ	68
第 6 章 まとめと今後の展望	69
付録 A U、Th 系列	71
参考文献	73

表目次

2.1	バッファオイルの組成	14
2.2	KamLAND-LS の組成	15
2.3	Xe-LS の組成	18
2.4	LAB-LS の組成	21
2.5	R12860-03LXA 性能表	24
3.1	LED driver(SP5601) の性能	29
3.2	Waveform digitizer(V1751) の性能	30
3.3	純水の 9cm 透過率 (@420nm) と LED 光のフォトン数	36
3.4	PFR-100SL-1T0 の性能表	37
3.5	JF-10、5mm バイトンチューブ付きの性能表	38
4.1	シミュレーションに登録した物質の組成、密度、体積	41
4.2	LAB-LS の発光時定数とその割合	42
4.3	エネルギー分解能評価のシミュレーション条件	51
4.4	集光量のフィット結果	52
4.5	0ns~25ns に含まれる光量	54
4.6	集光ミラーの反射率ごとの集光量と不定性	54
4.7	集光ミラーの設置位置ごとの集光量と不定性	55
4.8	集光量の不定性	56
5.1	KamLAND-LS の放射性不純物によるイベントレート [Bq/m ³][28]	59
5.2	空気中での ²²² Rn 崩壊イベントレート [Bq/m ³]、KamLAND エリア内ラドンモニタ測定	59
5.3	その他物質における放射性不純物濃度 [g/g][29]	59
5.4	50keV~150keV における ¹⁴ C と外部バックグラウンドのイベントレート	61
5.5	NaI に含まれる放射性不純物濃度 [33]	67
5.6	バックグラウンドのイベントレート (2~6 keV)	68

目次

1.1	標準理論における素粒子の分類	1
1.2	KamLAND 実験で検出された原子炉 $\bar{\nu}_e$ の 2 周期にわたる振動 [5].	5
1.3	二重ベータ崩壊のファインマンダイアグラム	9
2.1	KamLAND サイト	12
2.2	KamLAND 検出器	13
2.3	ニュートリノと電子の弾性散乱	16
2.4	逆ベータ崩壊	17
2.5	^{10}C 崩壊イベント	19
2.6	^{214}Bi を含む ^{238}U 系列の崩壊過程	19
2.7	2nd phase で得られたエネルギースペクトル [12]	20
2.8	マヨラナ有効質量への制限 [12]	20
2.9	プロトタイプ検出器の概要図	23
2.10	ステンレスタンク	24
2.11	ステンレスタンク壁面に設置されたタイベックシート	25
2.12	R12860-03LXA の外観	25
2.13	ステンレスタンク床面に設置された PMT の台座	26
2.14	アクリルボックス設計図	26
3.1	長期安定性評価のセットアップ	28
3.2	PMT 固定具とステンレスタンクの図面	28
3.3	SP5601 の LED 発光波長分布	29
3.4	ダークレート安定性評価のセットアップ	29
3.5	ADC 値の求め方	30
3.6	1p.e. 分布	31
3.7	ダークレートの時間変化	31
3.8	1p.e. 相当の電荷量の時間変化	32
3.9	ゲイン安定性評価のセットアップ	32
3.10	ADC 値の求め方	33

3.11	LED 光の電荷量分布	34
3.12	LED 光のフォトン数の時間変化	34
3.13	9 cm 透過率測定の概要図	35
3.14	純水の 9 cm 透過率	36
3.15	400 nm における純水の 9 cm 透過率の時間変化	36
3.16	20 インチ高量子効率 PMT に付着した汚れ	37
4.1	プロトタイプ検出器のジオメトリ	40
4.2	発光波長分布測定の設定アップと測定方法	41
4.3	LAB-LS の発光波長分布	42
4.4	LAB-LS の各組成の吸収長	43
4.5	LAB-LS の再発光確率	43
4.6	LAB-LS の 9cm 透過率・減衰長	44
4.7	20 インチ高量子効率 PMT と 17 インチ PMT の量子効率	45
4.8	高量子効率 PMT の計数率入射位置・角度依存性 [19]	45
4.9	KamLAND の PMT 配置	46
4.10	集光ミラーの形状	47
4.11	ミラー素材のイメージ図	47
4.12	反射率測定の設定アップ	48
4.13	集光ミラーの反射率の角度依存性	49
4.14	Tyvek1082D の空気中での反射率	50
4.15	PMT ごとの集光率	51
4.16	1MeV の電子のシンチレーション光に対する集光量	52
4.17	PMT に到達した光子の到達時間分布	53
4.18	Tyvek の反射特性を変更した際の光子到達時間分布	53
4.19	集光ミラーと x,y,z 軸の関係	55
4.20	集光ミラー有無による KamLAND 中心での 1.0MeV 電子による集光量	57
5.1	^{214}Bi の崩壊図 [30]	60
5.2	^{208}Tl の崩壊図 [30]	60
5.3	^{40}K の崩壊図 [30]	60
5.4	^{85}Kr の崩壊図 [30]	60
5.5	^{210}Bi の崩壊図 [30]	60
5.6	^{210}Po の崩壊図 [30]	60
5.7	^{14}C の崩壊図 [30]	60
5.8	岩	62
5.9	ガラス	62

5.10	アクリル	62
5.11	純水	62
5.12	ステンレス	62
5.13	空気	62
5.14	LAB-LS	62
5.15	バックグラウンドによるエネルギースペクトル	63
5.16	^{14}C と外部バックグラウンドのエネルギースペクトル	63
5.17	^{212}Bi の崩壊系列	64
5.18	^{212}Bi のエネルギースペクトル	64
5.19	^{212}Po のエネルギースペクトル	64
5.20	DAMA 実験で得られた暗黒物質信号の季節変動 [34]	66
5.21	LAB-LS 中に NaI を挿入したジオメトリの概略図	66
5.22	岩からのバックグラウンド	67
5.23	ガラスからのバックグラウンド	67
5.24	暗黒物質信号の予測 [34]	67
A.1	^{238}U 崩壊系列	71
A.2	^{232}Th 崩壊系列	72

第 1 章

ニュートリノ物理学

1.1 ニュートリノ

1.1.1 素粒子としてのニュートリノ

現在我々が存在する宇宙は素粒子と呼ばれる、物質を構成する最小単位の粒子から構成されていると考えられている。これらの素粒子間には4つの基本的相互作用が働いていることがわかっている。基本的相互作用のうち重力相互作用を除く、電磁相互作用・強い相互作用・弱い相互作用の3種類に基づいて、素粒子の性質や反応を記述した理論が「標準理論」である。標準理論によれば、宇宙には図 1.1 のように 17 種類の素粒子が存在し、これらは大きくボゾンとフェルミオンの2つに分けることができる。ボゾンは整数スピンを持つ力を媒介する素粒子であり、フェルミオンは反整数スピンを持つ物質を構成する素粒子である。フェルミオンは相互作用の種類に応じてさらに分けることができ、強い相互作用が働く粒子をクォーク、働かない粒子をレプトンと呼ぶ。レプト

	フェルミオン			ボゾン	
クォーク	u	c	t	γ	
	d	s	b	g	
レプトン	e	μ	τ	W	
	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z	H

図 1.1: 標準理論における素粒子の分類

ンのうち電氣的に中性な素粒子をニュートリノと呼び若い世代から電子ニュートリノ ν_e 、ミューニュートリノ ν_μ 、タウニュートリノ ν_τ と呼ばれている。

1.1.2 ニュートリノの発見

1914年にチャドウィックによってベータ崩壊の連続スペクトルが発見された。当時ベータ崩壊は式(1.1)のような2体崩壊であると考えられていた。



しかしこのような反応の場合、エネルギー保存則から放出される電子のエネルギーはただ一つの値しかもたない。そのためチャドウィックの観測結果はエネルギー保存則を破っていることになり非常に大きな問題となった。この問題の解決案として1930年、パウリはベータ崩壊によって電子と同時に別のスピン1/2を持つ電氣的に中性な粒子が放出されているという仮説を提唱した。この粒子がニュートリノである。ニュートリノは弱い相互作用しか受けないため観測は非常に困難であった。初めてニュートリノの観測に成功したのは1956年のライネスとコーワンによる実験である。この実験では塩化カドミウム CdCl_2 を溶かした水と液体シンチレータ、原子炉からの大強度反電子ニュートリノを用い、水分子中の原子核による逆ベータ崩壊を中性子と陽子の遅延同時計測を行うことでニュートリノの観測に成功した。その後の測定から、弱い相互作用ではパリティが最大に破れていることや、ニュートリノ・反ニュートリノのヘリシティは全て、それぞれ左巻き・右巻きであることがわかった。特に、後者の結果を受けて、標準理論ではニュートリノの質量を厳密に0であると仮定し、光速で運動するとしている。

1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノが発見されて以降も、その性質を調べるための測定が行われた。その過程においてニュートリノが質量を持たないと説明できない観測結果が見られた。これらは太陽ニュートリノ問題と大気ニュートリノ異常と呼ばれるものである。

1.2.1 太陽ニュートリノ問題

太陽内部では pp チェーンと呼ばれる核融合の連鎖が起きている。この反応は4つの陽子が核融合することで ${}^4\text{He}$ と電子ニュートリノを作り出す連鎖反応で、式(1.2)で表される。



また pp チェーンでは核融合が進むと ${}^7\text{Be}$ や ${}^8\text{B}$ なども合成され、これらが反応する際にも電子ニュートリノが生成される。このように太陽内部での核融合によって生成されるニュートリノのことを太陽ニュートリノと呼ぶ。

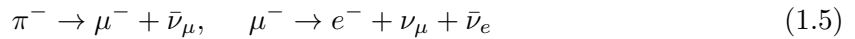
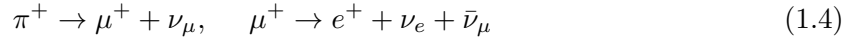
Homestake 実験ではテトラクロロエチレン C_2Cl_4 を用いて



の反応を見ることで、太陽ニュートリノの測定を行った [1]。しかし、観測された太陽ニュートリノのフラックスは、太陽標準模型によって予測されていた値の 1/3 程度であった。その後、検出機の不具合や太陽模型の再検討などが行われたが、観測値と予測値の違いを説明することはできなかった。このことは太陽ニュートリノ問題と呼ばれ、約 30 年間解決されなかった。

1.2.2 大気ニュートリノ異常

大気ニュートリノとは宇宙線が空気中の原子核と衝突した際に放出されるニュートリノのことである。主な生成過程は式 (1.4)、(1.5) で表されるパイオンからの連続崩壊である。



この反応式から、 ν_μ と ν_e のフラックスの比はおよそ 2 になることが期待される。しかし、大型水チェレンコフ光検出器である Kamiokande 実験で観測された ν_μ と ν_e の事象数の比はシミュレーションから期待される値と異なっておりその比 R は以下の通りであった [2]。

$$R \equiv \frac{[\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu / \nu_e + \bar{\nu}_e]_{\text{observed}}}{[\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu / \nu_e + \bar{\nu}_e]_{\text{expected}}} = 0.60^{+0.07}_{-0.06}(\text{stat.}) \pm 0.05(\text{syst.}) \quad (1.6)$$

これは、 ν_μ が減少している、もしくは ν_e が増加していることを示している。同様の結果が他実験でも確認され、このことは大気ニュートリノ異常と呼ばれるようになった。

1.2.3 ニュートリノ振動

太陽ニュートリノ問題および大気ニュートリノ異常を説明できる現象がニュートリノ振動である。ニュートリノ振動とはニュートリノのフレーバーが確率で周期的に変化する現象で、ニュートリノに質量がある場合のみ生じる。以下にニュートリノ振動の概要を述べる。

ニュートリノが質量を持つ場合、フレーバーの固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ と質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ は以下の関係で結び付けられる。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad |\nu_i\rangle = \sum_\alpha (U^\dagger)_{i\alpha} |\nu_\alpha\rangle = \sum_\alpha U_{\alpha i}^* |\nu_\alpha\rangle \quad (1.7)$$

ここで、 U はポンテコルボ・牧・中川・坂田行列と呼ばれるユニタリー行列である。シュレーディンガー方程式より、質量固有状態の時間発展は、エネルギー固有値 E_i を用いて

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-iE_i t} |\nu_i(0)\rangle \quad (1.8)$$

と表されるため、フレーバー α のニュートリノの時間発展は

$$\begin{aligned}
|\nu_\alpha(t)\rangle &= \sum_i U_{\alpha i} e^{-iE_i t} |\nu_i\rangle \\
&= \sum_i \sum_\beta U_{\alpha i} U_{\beta i}^* e^{-iE_i t} |\nu_\beta\rangle
\end{aligned} \tag{1.9}$$

となる。従って、 U の CP 複素位相を無視すると、フレーバー α から γ に遷移する確率 $P(\alpha \rightarrow \gamma)$ は

$$\begin{aligned}
P(\alpha \rightarrow \gamma) &= |\langle \nu_\gamma | \nu(t) \rangle|^2 \\
&= \sum_i \sum_j U_{\alpha i} U_{\gamma i}^* U_{\gamma j} U_{\alpha j}^* e^{-iE_i t} e^{iE_j t} \\
&= \sum_i |U_{\alpha i}|^2 |U_{\gamma i}|^2 + 2\text{Re} \sum_{j>i} U_{\alpha i} U_{\gamma i}^* U_{\gamma j} U_{\alpha j}^* e^{-i(E_i - E_j)t}.
\end{aligned} \tag{1.10}$$

いま、ニュートリノの質量が小さいことから相対論的近似

$$E_i = \sqrt{m_i^2 + p_i^2} \simeq p_i + \frac{m_i^2}{2p_i} \simeq E + \frac{m_i^2}{2E} \tag{1.11}$$

を行い、ニュートリノが光速で移動するとすれば式 (1.10) は以下のように書ける。

$$P(\alpha \rightarrow \gamma) = \sum_i |U_{\alpha i} U_{\gamma i}^*|^2 + 2\text{Re} \sum_{j>i} U_{\alpha i} U_{\gamma i}^* U_{\gamma j} U_{\alpha j}^* \exp\left(-i \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}\right) \tag{1.12}$$

ここで、 Δm_{ij}^2 は質量二乗差で $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ 、 L は時間 t の間にニュートリノが移動する距離で $L = ct$ である (式中では自然単位系を用いている)。簡単のために、 e, μ の 2 成分のみを考えることにすると、

$$U_{e1} = \cos \theta, U_{e2} = \sin \theta, U_{\mu 1} = -\sin \theta, U_{\mu 2} = \cos \theta \tag{1.13}$$

とおけるから、例えば $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ と変化する確率は

$$\begin{aligned}
P(e \rightarrow \mu) &= 2 \cos^2 \theta \sin^2 \theta + 2\text{Re} \cos^2 \theta \sin^2 \theta \cdot \exp\left(-i \frac{\Delta m_{12}^2 L}{2E}\right) \\
&= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{12}^2 L}{4E}\right) \\
&= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m_{12}^2 [\text{eV}^2]}{E [\text{GeV}]} L [\text{km}]\right)
\end{aligned} \tag{1.14}$$

となる。

1998 年に Super-Kamiokande 実験が大気ニュートリノ中のミューニュートリの損失を [3]、2002 年に SNO 実験が太陽ニュートリノの総量とその中の電子ニュートリノ成分の総量を確認しニュートリノのフレーバー変化が証明された [4]。また、KamLAND 実験では原子炉由来のニュートリノを観測することで初めて完全なフレーバー振動を示した (図 1.2)。

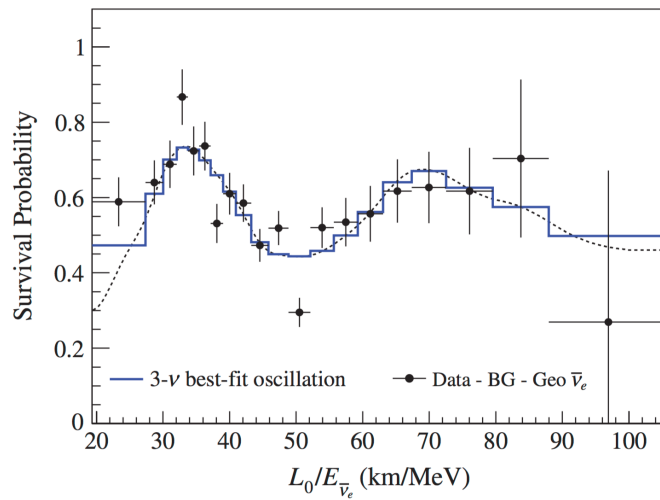


図 1.2: KamLAND 実験で検出された原子炉 $\bar{\nu}_e$ の 2 周期にわたる振動 [5]。

1.3 ニュートリノ質量と質量階層構造

ニュートリノ振動の観測からニュートリノは有限の質量を持つことが明らかとなった。式 (1.12) からわかるように、ニュートリノ振動の測定からわかるのはニュートリノの質量二乗差であり、質量の絶対値ではない。しかしニュートリノ振動の測定は質量固有状態の大きさの順である質量階層構造に制限をかけることができる。その測定結果から許される質量階層構造は以下の 3 種類である。

- 順階層構造 : $m_1 < m_2 \ll m_3$
- 逆階層構造 : $m_3 \ll m_1 < m_2$
- 縮退構造 : $m_1 \simeq m_2 \simeq m_3$

ここで、 m_1 と m_2 の大小関係が決まっているのは、電子ニュートリノが物質中を通過する際に、周囲の大量の電子の存在によりポテンシャルを感じるという MSW 効果による。ニュートリノ質量階層構造を決定することは、現代のニュートリノの物理において重要な課題の一つであるが未だ決定には至っていない。

一方でニュートリノの質量そのものに制限をかける試みもいくつか行われている。そのうちのひとつがベータ崩壊のエネルギースペクトルの精密測定である。ニュートリノが有限の質量を持つ場合ベータ崩壊の際に放出される電子の最大運動エネルギーが変化する。そのためベータ崩壊のエネル

ギースベクトルのエンドポイントを調べることで、電子ニュートリノの質量

$$m_{\nu_e} = \sqrt{\sum_i |U_{ei}|^2 m^2(\nu_i)} \quad (1.15)$$

を測定することができる。現在 KATRIN 実験によるトリチウムのベータ崩壊の測定から電子ニュートリノの質量には

$$m_{\nu_e} < 1.1\text{eV} \quad (90\% \text{C.L.}) \quad (1.16)$$

という制限が与えられている [6]。ニュートリノの質量に制限をかける別の方法として宇宙背景放射 (Cosmic Microwave Background; CMB) などの宇宙構造を精密に解析するという方法が挙げられる。宇宙初期には大量のニュートリノが生成されたため、ニュートリノが質量を持てばその重力が宇宙構造に影響を与えたと考えられる。現在のところ、有限質量を測定可能な感度には達していないが、Planck 衛星の測定結果からニュートリノの質量和に対して

$$\sum m_\nu \leq 0.26\text{eV} \quad (1.17)$$

という制限が与えられている [7]。

1.4 マヨラナ性

ニュートリノ振動の観測結果からニュートリノは質量を持つことがわかった。しかしニュートリノの質量は非常に小さく、フェルミオンの中で最も軽い電子の質量の 100 万分の 1 以下である。この極めて小さな質量の自然な説明としてニュートリノがマヨラナ粒子であるとするものがある。マヨラナ粒子とは粒子と反粒子が等価な中性フェルミオンのことである。以下にマヨラナ粒子の定式化を行い、ニュートリノの軽い質量との関連性を述べる。

1.4.1 マヨラナ粒子

スピン 1/2 のフェルミオンはディラック方程式

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m_D)\psi = 0 \quad (1.18)$$

に従う。このときラグランジアン \mathcal{L} と質量項 \mathcal{L}_D は以下のようにかける。

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m_D)\psi \quad (1.19)$$

$$\mathcal{L}_D = m_D \bar{\psi}\psi \quad (1.20)$$

ラグランジアンがローレンツ不変かつエルミートであるため、質量項もローレンツ不変かつエルミートである必要がある。したがって ψ によって作られる質量項は上記の形のみに限られる。しかし ψ の荷電共役 ψ^C を用いると上記以外にもローレンツ不変量として $\bar{\psi}\psi^C, \bar{\psi}^C\psi, \bar{\psi}^C\psi^C$ といっ

たものを作ることができるため、式 (1.20) 以外の質量項を考えることができる。そこでマヨラナ質量項 \mathcal{L}_M を

$$\mathcal{L}_M = m_M \bar{\psi} \psi^C + m'_M \bar{\psi}^C \psi = m_M \bar{\psi} \psi^C + h.c. \quad (1.21)$$

で定義する。ただし $\bar{\psi}^C \psi^C$ はディラック質量項の荷電共役であるので無視した。ここで射影演算子 P_L 、 P_R を導入する。これらは式 (1.22) で定義される。

$$P_L = \frac{1 - \gamma_5}{2} \quad P_R = \frac{1 + \gamma_5}{2} \quad (1.22)$$

射影演算子には以下の性質がある。

$$P_L + P_R = 1 \quad P_L P_R = P_R P_L = 0 \quad P_L^2 = P_R^2 = 1 \quad (1.23)$$

式 (1.23) の性質を用いるとディラック質量項およびマヨラナ質量項は

$$\mathcal{L}_D = m_D (\bar{\psi}_L \psi_R + \bar{\psi}_R \psi_L) \quad (1.24)$$

$$\mathcal{L}_M = m_M (\bar{\psi}_L \psi_R^C + \bar{\psi}_R^C \psi_L) + m'_M (\bar{\psi}_L^C \psi_R + \bar{\psi}_R \psi_L^C) \quad (1.25)$$

と書くことができる。ここでスピノルの荷電共役は

$$\psi_R^C = (\psi_L)^C \quad (1.26)$$

$$\psi_L^C = (\psi_R)^C \quad (1.27)$$

であるから式 (1.25) は左巻きのカイラリティのみを持つ項と右巻きのカイラリティのみを持つ項に分けることができる。

$$\mathcal{L}_M = \mathcal{L}_R + \mathcal{L}_L \quad (1.28)$$

$$\mathcal{L}_R = m_R (\bar{\psi}_R \psi_L^C + \bar{\psi}_L^C \psi_R) \quad (1.29)$$

$$\mathcal{L}_L = m_L (\bar{\psi}_L \psi_R^C + \bar{\psi}_R^C \psi_L) \quad (1.30)$$

マヨラナ質量項は位相変換に対してレプトン数を保存しないため、荷電粒子の場合は電荷の保存を破ってしまう。従ってマヨラナ質量項を獲得できる粒子はニュートリノのような中性粒子に限られる。さらにマヨラナ条件

$$\psi_{L,R} = (\psi_{R,L})^C \quad (1.31)$$

を課すと、ラグランジアン of 質量項 \mathcal{L}_{mass} は

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{mass} &= \mathcal{L}_D + \mathcal{L}_L + \mathcal{L}_R \\ &= m_D (\bar{\psi}_L \psi_R + h.c.) + m_L (\bar{\psi}_L \psi_L + h.c.) + m_R (\bar{\psi}_R \psi_R + h.c.) \end{aligned} \quad (1.32)$$

と書くことができる。式 (1.32) の第2項、第3項は左巻きの粒子と右巻きの粒子とで互いに独立な質量を持たせることができることを表している。

1.4.2 シーソー機構

式 (1.32) は以下のように変形することができる。

$$\mathcal{L}_{mass} = (\bar{\psi}_L \bar{\psi}_L) \begin{pmatrix} m_L & m_D \\ m_D & m_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_L \\ \psi_R \end{pmatrix} + h.c. \quad (1.33)$$

上式に現れる行列を対角化する。対角化された行列を M_{diag} とすると

$$\begin{aligned} M_{diag} &\equiv \begin{pmatrix} -m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(m_R + m_L) - \frac{1}{2}\sqrt{(m_R + m_L)^2 + 4m_D^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}(m_R + m_L) + \frac{1}{2}\sqrt{(m_R + m_L)^2 + 4m_D^2} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (1.34)$$

今ディラック質量 m_D に比べて左巻きニュートリノの質量 m_L を非常に小さく、右巻きニュートリノの質量 m_R を非常に大きいと仮定するマヨラナ質量は

$$m_1 \approx -\frac{1}{2}m_R + \frac{1}{2}m_R \sqrt{1 + \frac{4m_D^2}{m_R^2}} \approx \frac{m_D^2}{m_R} \ll m_D \quad (1.35)$$

$$m_2 \approx \frac{1}{2}m_R + \frac{1}{2}m_R \sqrt{1 + \frac{4m_D^2}{m_R^2}} \approx m_R \gg m_D \quad (1.36)$$

と書くことができ、これは m_R を大きくすればするほど m_2 が大きくなり、 m_1 が小さくなることを表しており、シーソー機構と呼ばれている [8]。この機構はニュートリノが他のフェルミオンに比べて極端に軽いこと、右巻きニュートリノがいまだに発見されていない原因は右巻きニュートリノが非常に重いからということをも自然に説明できる。シーソー機構が成立するためにはニュートリノがマヨラナ粒子である必要があるため、ニュートリノがマヨラナ粒子であるか否かという問題は物理学的に非常に重要である。

1.5 ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊

ニュートリノのマヨラナ性を検証できる現実的な唯一の手段がニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) の探索である。

ある特定の偶偶核ではベータ崩壊がほぼ同時に2回生じる。この反応は二重ベータ崩壊と呼ばれ以下のように表される。



上記の反応は反電子ニュートリノを2つ放出するため $2\nu\beta\beta$ と表されることもある。 $2\nu\beta\beta$ はエネルギー的にベータ崩壊が禁止されていたり、ベータ崩壊の終状態のスピンの始状態と大きく異なるものの、 Z が2つ変化すれば安定化するという場合にしか起こり得ないため、崩壊核は36種類に限られる。これまでのところ、そのうちの10種類の原子核で直接 $2\nu\beta\beta$ が測定されている。

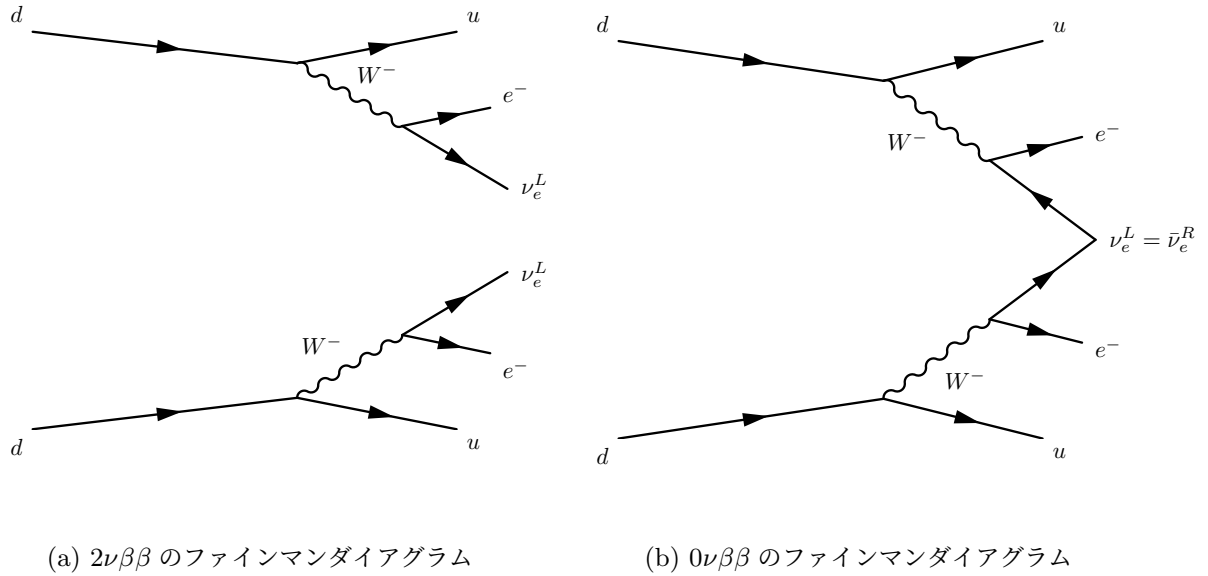


図 1.3: 二重ベータ崩壊のファインマンダイアグラム

一方で理論的に予想されているが未だに発見されていない反応がニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) である。

$$2n \rightarrow 2p + 2e^- \quad (1.38)$$

この反応はレプトン数を保存しないため標準理論を超えた反応であり、図 1.3(b) で表すようにニュートリノと反ニュートリノが互いに打ち消し合うことで生じると理解されている。ニュートリノが反ニュートリノと打ち消し合うためにはニュートリノがマヨラナ性を持つ必要がある。よって $0\nu\beta\beta$ を見つけることができればニュートリノのマヨラナ性を証明したことになる。

1.6 $0\nu\beta\beta$ 探索の意義

$0\nu\beta\beta$ 事象探索には複数の意義がある。まず $0\nu\beta\beta$ 事象はレプトン数を破る標準理論を超えた物理現象であるから、その反応の発見自体に意義がある。また前述したシーソー機構によりニュートリノの小さな質量についても説明することができる。加えてニュートリノのマヨラナ質量の情報を得ることができる。マヨラナ有効質量は、質量固有状態の混合として、

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum_i^3 m_i U_{ei}^2 \right| \quad (1.39)$$

と表される。マヨラナ有効質量は $0\nu\beta\beta$ の半減期 $T_{1/2}^{0\nu}$ と

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G_{0\nu}(Q_{\beta\beta}, Z) |M_{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2 \quad (1.40)$$

という関係にあるから、 $0\nu\beta\beta$ が発見され半減期を測定できればニュートリノのマヨラナ有効質量がわかり、さらには質量階層構造を決めることができる可能性がある。ただし、ここで $G_{0\nu}$, $M_{0\nu}$ はそれぞれ位相因子、原子核行列要素と呼ばれ、数値計算によって求める必要のある量である。位相因子については計算手法が確立しているものの、原子核行列要素は、様々な中間状態を考慮する必要があるため計算が複雑で、計算手法によって値が異なるというのが現状である。よって、原子核行列要素の精密な計算も重要な研究対象となっている。

1.7 $0\nu\beta\beta$ 事象探索実験の現状

前述した通り $0\nu\beta\beta$ 事象探索は物理的に重要であると考えられているため、世界各国で多くの実験が行われている。以下では次章で詳細を述べる KamLAND-Zen 実験以外の代表的な $0\nu\beta\beta$ 探索実験について述べる。

- CUORE

The Cryogenic Underground Laboratory for Rare Events(CUORE) はイタリアのグランサッソ国立研究所で行われている $0\nu\beta\beta$ 事象探索実験である。 $0\nu\beta\beta$ 事象を発生させる核種の候補である ^{130}Te を含んだ 998 個の酸化テルル TeO_2 の結晶を極低温ボロメータとして使用している。崩壊の際に生じるエネルギーによる温度変化を測定することで FWHM でおよそ 7keV という非常に高いエネルギー分解能を持つ。 $0\nu\beta\beta$ の半減期に

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 3.2 \times 10^{25} \text{ year} \quad (90\% \text{C.L.}) \quad (1.41)$$

という制限を与えている [9]。

- GERDA

GERmanium Detector Array(GERDA) はイタリアのグランサッソ国立研究所で行われている $0\nu\beta\beta$ 事象探索実験である。崩壊核種として ^{76}Ge を採用しており、 ^{76}Ge が約 87% 濃縮された High Purity Ge(HPGe) 検出器を使用している。一般に半導体検出器はエネルギー分解能が高いという特徴があるため、GERDA 実験ではエネルギー分解能が高い測定が可能である。 $0\nu\beta\beta$ の半減期に

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 1.8 \times 10^{26} \text{ year} \quad (90\% \text{C.L.}) \quad (1.42)$$

の制限を与えている [10]。

- EXO-200

Enriched Xenon Observatory(EXO) はアメリカの Waste Isolation Pilot Plant(WIPP) で行われている $0\nu\beta\beta$ 事象探索実験である。崩壊核種として、KamLAND-Zen 実験と同様に ^{136}Xe を使用している。しかし KamLAND-Zen と異なり液体キセノンを用いている。検出器として Time Projection Chamber(TPC) を用いることで飛跡検出が可能になり、液

体キセノン自身のシンチレーション光と組み合わせることでエネルギー分解能を向上させている。 $0\nu\beta\beta$ の半減期に

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 3.5 \times 10^{25} \text{ year} \quad (90\% \text{C.L.}) \quad (1.43)$$

の制限を与えている [11]。

第 2 章

KamLAND-Zen 実験

2.1 KamLAND 実験

KamLAND(Kamioka Liquid-scintillator Anti-Neutrino Detector) は、Kamiokande 検出器跡地に建設された反ニュートリノ検出器である。この検出器は宇宙線由来のバックグラウンドを低減するために岐阜県神岡鉱山地下 1000m に設置されており、宇宙線フラックスは地上の 10^{-5} 程度まで抑制されている。

KamLAND 検出器の概要を図 2.2 に示す。KamLAND 検出器は直径 20m、高さ 20m の円筒形水槽の内側に、直径約 18m の球形ステンレスタンクが設置されている。検出器は大きく分けて 2 つの部分からなり円筒形水槽とステンレスタンクの間を外部検出器、ステンレスタンク内を内部検出器と呼ぶ。

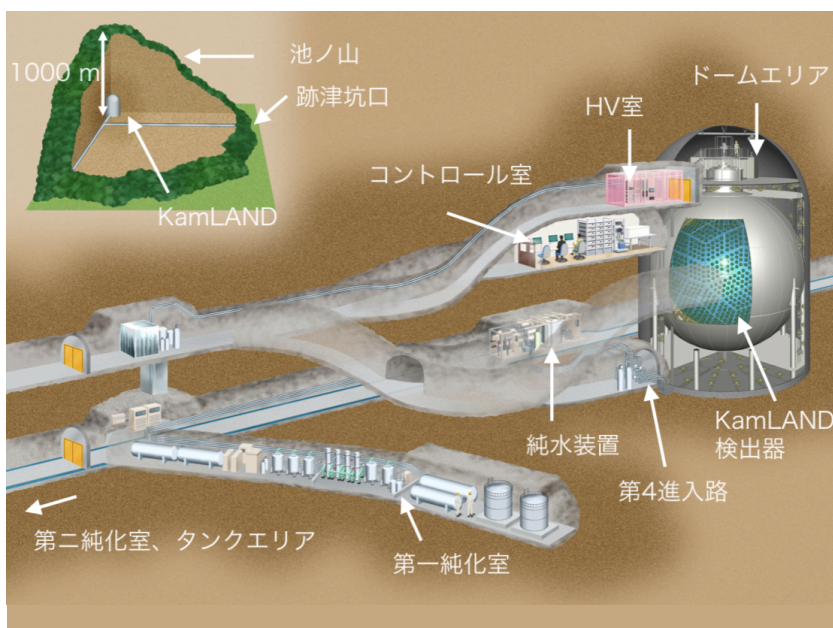


図 2.1: KamLAND サイト

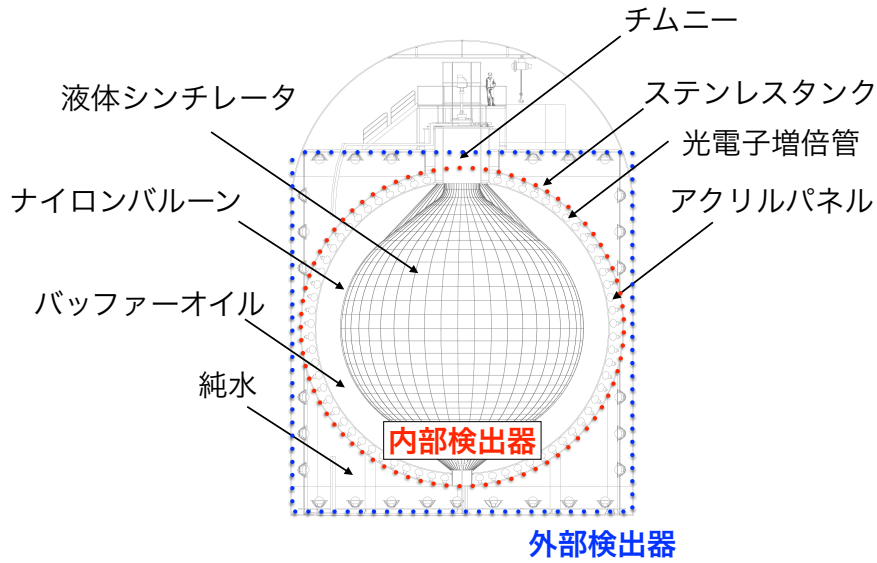


図 2.2: KamLAND 検出器

2.1.1 外部検出器

KamLAND 検出器の円筒形水槽と球形ステンレスタンクの間部分を外部検出器 (Outer Detector; OD) と呼ぶ。外部検出器は約 3.2kton の純水で満たされており外部ガンマ線や岩盤で生成される中性子を遮蔽している。また外部検出器に設置された光電子増倍管は、宇宙線ミューオンが外部検出器内の純水を通過した際に生じるチェレンコフ光を検出する役割を持つ。水槽内の内壁は水槽内の反射率を高くし、光量を高めるためにタイベックで覆われている。これにより宇宙線由来の物理事象と他の物理事象を区別することが可能となる。

2.1.2 内部検出器

球形ステンレスタンクの内側を内部検出器 (Inner Detector; ID) と呼ぶ。ステンレスタンク内部は外側から計 1879 本の光電子増倍管、アクリルパネル、バッファオイル、ナイロンバルーン、液体シンチレータという構造になっている。内部検出器は物理事象による液体シンチレータからのシンチレーション光を光電子増倍管で検出している。外部検出器と異なり内部検出器の内壁は反射の少ないブラックシートで覆われており、PMT で検出される直接光の割合を増やす目的がある。

光電子増倍管

光電子増倍管 (photomultiplier tube; PMT) は 1 光子から検出することができる、高時間分解能光センサーの一種である。PMT の光電面に光子が入射すると一定確率で光電面から光電子 (photo-electron : p.e.) が放出され、その光電子を高電圧がかけられたダイノードで増幅すること

で電気信号として出力される。

KamLAND 検出器には入射光面の口径が 17 インチの PMT(Box and Line 型、浜松ホトニクス製 R7250) と、Kamiokande 実験で実際に使用された口径 20 インチの PMT(Venetian Blind 型、浜松ホトニクス製 R3250) が用いられている。Box and Line 型は T.T.S.(Time Transition Spread) などの時間分解能や線形性に優れており、Venetian Blind 型は光電子の電場による収集が容易な構造になっており、大口徑の PMT によく用いられている。

内部検出器には 17 インチ PMT が 1325 本、20 インチ PMT が 554 本設置されており、PMT の被覆率は 34% となっている。外部検出器には、Kamiokande 実験で使用されていた 20 インチ PMT が 225 本設置されていたが、2016 年に行われた外部検出器改修工事の際に 140 本の 20 インチ PMT に取り替えられている。その内訳は高量子効率 PMT が 47 本、Super-Kamiokande 実験で水中での長期使用実績のある R3600-06MOD が 93 本となっている。また 20 インチ PMT の他に内部検出器上部を通過するミューオンなどを検出する目的で、8 インチ PMT を 16 本、5 インチの PMT を 6 本設置している。

バッファオイル

KamLAND におけるバッファオイルはドデカンとイソパラフィンを混合したものである。その組成比を表 2.1 に示す。バッファオイルの主な役割はバルーンを安定させることや、球形タンクや PMT に含まれる放射性不純物由来の放射線による発光を防ぐことなどがある。そのためバッファオイルに求められる条件としてバルーン内の KamLAND-LS と同程度の密度であること、放射線により発光しないことなどが挙げられる。

表 2.1: バッファオイルの組成

成分	化学式	密度 [g/cm ³]	構成比 (体積比)
ドデカン (N12)	C ₁₂ H ₂₆	0.749	53%
イソパラフィン	C _n H _{2n}	0.795	47%
バッファオイル		0.777	

バルーン

バルーンは内部検出器をバッファオイル層と液体シンチレータ層とに二分する役割を持ち、透過率や強度保持のためにナイロンの 3 層と EVOH の 2 層、計 5 層のフィルムから構成されている。

液体シンチレータ

液体シンチレータ (Liquid Scintillator;LS) は放射線によって発光する液体で発光原理は以下の通りである。

1. 放射線のエネルギーを吸収し、溶媒分子が励起する。
2. 溶媒分子が脱励起し、1 次シンチレーション光が放出される。
3. 溶質分子が 1 次シンチレーション光を吸収し、溶質分子が励起される。
4. 溶質分子が脱励起し、2 次シンチレーション光が放出される。
5. 溶質が複数種類ある場合はその数だけ 3、4 を繰り返す。

KamLAND 検出器に用いられている液体シンチレータは KamLAND-LS と呼ばれる。その組成を表 2.3 に示す。KamLAND-LS はドデカン ($C_{12}H_{26}$) 80% とプソイドクメン (C_9H_{12}) 20%(どちらも体積比) を溶媒とし、溶質として 2,5-ジフェニルオキサゾール (PPO, $C_{15}H_{11}NO$) が濃度にして 1.36 g/L 溶解している。KamLAND-LS での発光過程は PC から 1 次シンチレーション光が放出され、PPO から 2 次シンチレーション光が放出されている。ドデカンは密度と光透過率の調整の目的で使用されており、シンチレーション光には寄与していない。シンチレーション光の波長は PMT の感度波長である 400 nm に合わせて、およそ 380 nm に設定されている。また液体シンチレータは水に不溶であり、数百度で気化するため液液抽出や蒸留などを用いた不純物除去が可能である。

表 2.2: KamLAND-LS の組成

成分	化学式	密度 [g/cm ³]	構成比 (体積比)
ドデカン (N12)	$C_{12}H_{26}$	0.749	80%
プソイドクメン	C_9H_{12}	0.857	20%
PPO	$C_{15}H_{11}NO$	-	1.36 g/L
KamLAND-LS		0.778	

2.2 ニュートリノ検出原理

ニュートリノは電荷を持たない中性粒子であるが、液体シンチレータ中の電子との相互作用により液体シンチレータを発光させることができる。KamLAND 検出器ではニュートリノと反ニュートリノを異なる反応によるシンチレーション光で検出している。

2.2.1 ニュートリノ検出

ニュートリノは液体シンチレータ中の電子との弾性散乱によって検出され、その反応は式 (2.1) で表される。

$$\nu_l + e^- \rightarrow \nu_l + e^- \quad (l = e, \mu, \tau) \quad (2.1)$$

この反応には図 2.3 で示したように中性カレント反応と荷電カレント反応の2種類が存在する。中性カレント反応はニュートリノの全フレーバーに対して発生しうるが、荷電カレント反応は電子ニュートリノのみ発生しうる。したがって反応断面積は電子ニュートリノが最大である。

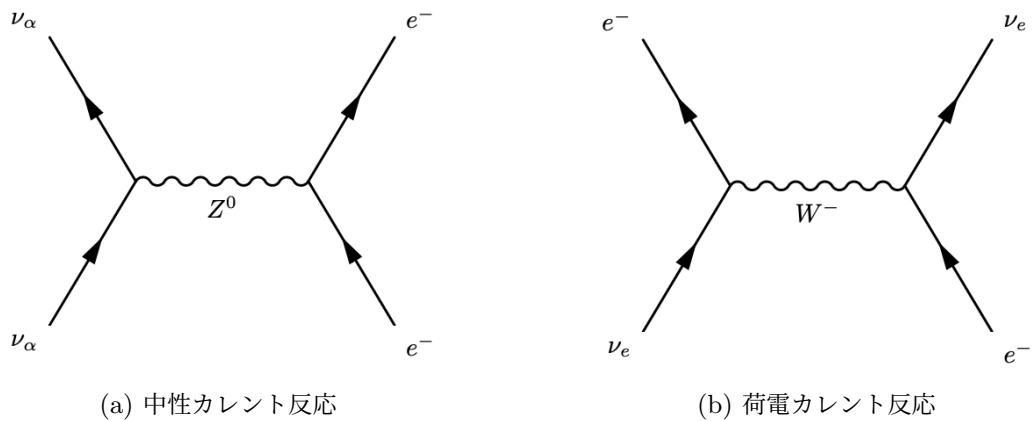


図 2.3: ニュートリノと電子の弾性散乱

2.2.2 反ニュートリノ検出

反電子ニュートリノは液体シンチレータ中の陽子と反応し逆ベータ崩壊を生じさせる。その際に発生する陽電子と中性子を遅延同時計測することにより反電子ニュートリノを検出することが可能になる。逆ベータ崩壊の反応は式 (2.2) で表される。

$$p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+ \quad (2.2)$$

逆ベータ崩壊によって放出された陽電子は液体シンチレータ中の電子と数 ns オーダーで対消滅を起こし 511keV のガンマ線を2本放出する。中性子は液体シンチレータ中で弾性散乱を繰り返し最終的に原子核に捕獲される。その際 2.2MeV のガンマ線を放出する。KamLAND では陽電子と電子の対消滅による2本のガンマ線を先発信号、中性子捕獲によるガンマ線を後発信号とした遅延同時計測を行うことで反電子ニュートリノを検出している。

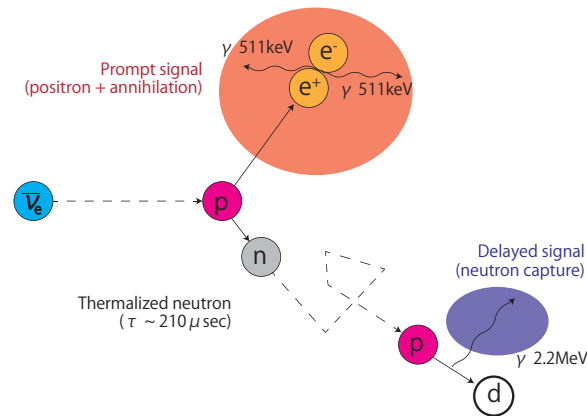


図 2.4: 逆ベータ崩壊

2.3 KamLAND-Zen 実験

KamLAND-Zen 実験は KamLAND 検出器を用いた $0\nu\beta\beta$ 探索実験である。二重ベータ崩壊核である ^{136}Xe を液体シンチレータに溶かし、そのシンチレータをナイロン製のミニバルーンに封入している。ミニバルーンはロープで内部検出器中心に固定されている。

2.3.1 Xe-LS

KamLAND-Zen 実験で ^{136}Xe を二重ベータ崩壊核として用いる利点は液体シンチレータに溶解しても色がつかないこと、Xe-LS に使用する液体シンチレータに約 3wt.% と溶解しやすいこと、遠心分離法による ^{136}Xe の濃縮技術が確立されていること、安定な希ガスのため溶解後の再利用・純化が行えることなどが挙げられる。

Xe-LS の組成を表 2.3 に示す。Xe-LS は ^{136}Xe による消光作用によって発光量が減少するため KamLAND-LS より PPO の濃度を高くしている。また KamLAND-LS に ^{136}Xe を溶かすとミニバルーン内外の液体シンチレータに密度差が生じてしまい、ミニバルーンに負荷がかかってしまう。そのため Xe-LS ではドデカンより密度の小さいデカンを用いることで KamLAND-LS との密度差を調節している。

2.3.2 KamLAND-Zen のバックグラウンド

^{136}Xe の Q 値である 2.458 MeV 付近の代表的なバックグラウンドを以下に記す。

表 2.3: Xe-LS の組成

成分	化学式	密度 [g/cm ³]	構成比 (体積比)
デカン	C ₁₀ H ₂₂	0.735	82.3%
プソイドクメン	C ₉ H ₁₂	0.857	17.7%
PPO	C ₁₅ H ₁₁ NO	-	2.7 g/L
Xe	-	-	3.2 wt%
Xe-LS		0.777	

¹³⁶Xe の 2νββ

二重ベータ崩壊で放出される電子のエネルギースペクトルは 0νββ では Q 値である 2.458 MeV の線スペクトルとなり、2νββ の場合 Q 値を最大エネルギーとする連続スペクトルとなる。理想的な検出器の場合 2つの信号を分離することが可能であるが、KamLAND のような実際の検出器はエネルギー分解能が有限である。このエネルギー分解能により 0νββ のスペクトルは幅を持ち 2νββ のスペクトルのエネルギー領域に重なってしまう。このため 2νββ は 0νββ のバックグラウンドとなってしまう。このバックグラウンドは原理的に検出器のエネルギー分解能を改善することでしか低減できない。

原子核破碎で生じる ¹⁰C

検出器に高エネルギーの宇宙線が飛来すると、液体シンチレータ中の ¹²C は原子核破碎を起こし、¹⁰C が生成される。KamLAND 検出器では ¹⁰C が 21.1 ± 1.8 events/day/kton のレートで生成されている。¹⁰C は 27.8 s で Q 値 3.65 MeV の β⁺ 崩壊を起こすため 0νββ のバックグラウンドとなる。図 2.5 に ¹⁰C の崩壊イベントを示す。¹⁰C の崩壊時に 90% の確率で中性子が生成されるため、KamLAND 検出器では飛来したミューオンによる発光、陽子の中性子捕獲による発光、¹⁰C 崩壊の発光を遅延同時計測することで ¹⁰C 事象を識別しバックグラウンドを低減している。

²¹⁴Bi の崩壊事象

²¹⁴Bi は ²³⁸U 系列の崩壊娘核であり、主に Xe-LS やミニバルーン中に付着・混入している。²¹⁴Bi は半減期 19.9 min で Q 値 3.27 MeV の β⁻ 崩壊を起こすため 0νββ のバックグラウンドとなる。図 2.6 に ²³⁸U 系列の崩壊過程を示す。²¹⁴Bi は β⁻ 崩壊後 ²¹⁴Po となり、²¹⁴Po は半減期 164 μs で α 崩壊を起こす。そのため KamLAND-Zen 実験では ²¹⁴Bi-²¹⁴Po の遅延同時計測を行うことで ²¹⁴Bi 事象を識別している。しかし、ミニバルーン付近の ²¹⁴Bi 崩壊事象では α 線がミニバルーンに吸収されてしまうため検出が難しくなる。これにより、KamLAND-Zen では解析の際有効体積からミニバルーン付近を除外している。

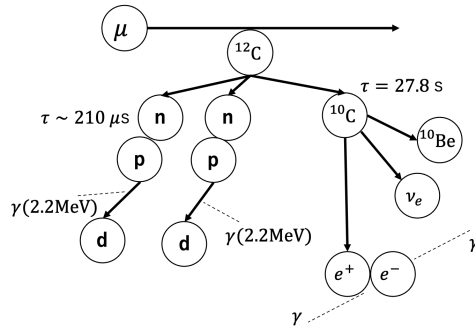


図 2.5: ^{10}C 崩壊イベント

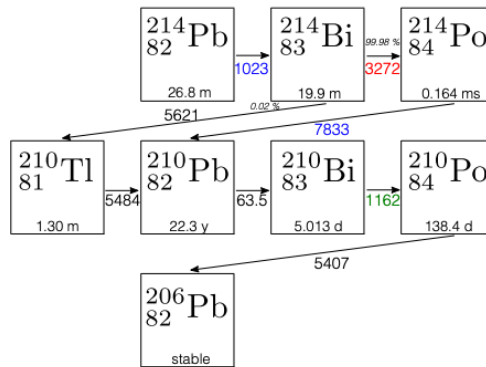


図 2.6: ^{214}Bi を含む ^{238}U 系列の崩壊過程

2.3.3 KamLAND-Zen 実験の成果と現状

KamLAND-Zen 400 実験

KamLAND-Zen 400 実験は大きく二つの期間に分かれており、2011 年 10 月から 2012 年 6 月までの期間を 1st phase、2013 年 11 月から 2015 年 10 月までの期間を 2nd phase と呼ばれている。1st phase では予期されていなかった $^{110\text{m}}\text{Ag}$ の混入があり、その β^- 崩壊が $0\nu\beta\beta$ の大きなバックグラウンドとなった。そのため 2012 年 6 月から 2013 年 11 月まで Xe-LS の蒸留純化作業が行われ、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ によるバックグラウンドを低減させたのち、2nd phase を開始した。1st phase と 2nd phase での観測結果を統合することで得られたエネルギースペクトルを図 2.7 にニュートリノのマヨラナ有効質量への制限を図 2.8 に示す。また、 $0\nu\beta\beta$ の半減期とニュートリノのマヨラナ有効質量に対して以下の制限を与えた [12]。

$$T_{1/2}^{0\nu} > 1.07 \times 10^{26} \text{ year} \quad (90\% \text{C.L.}) \quad (2.3)$$

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 61 - 165 \text{ meV} \quad (2.4)$$

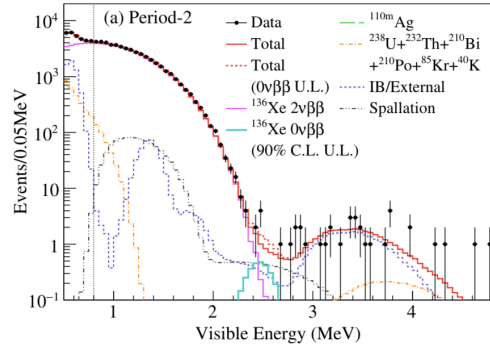


図 2.7: 2nd phase で得られたエネルギースペクトル [12]

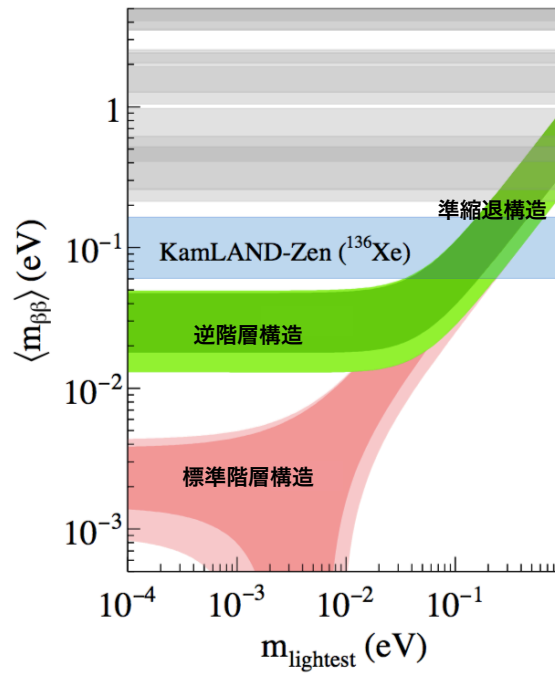


図 2.8: マヨラナ有効質量への制限 [12]

KamLAND-Zen 800 実験

KamLAND-Zen 800 実験は濃縮キセノンを増量することで KamLAND-Zen 400 実験に比べて感度が向上している。5 年間の測定で $0\nu\beta\beta$ の半減期に対して、 $T_{1/2}^{0\nu} > 5.0 \times 10^{26}$ year (90% C.L.) の制限を与えることを目標に現在測定が行われている。

2.4 KamLAND2-Zen 実験

前述した KamLAND 実験は世界最高峰の感度を達成しているが未だ $0\nu\beta\beta$ の観測やニュートリノ質量階層構造の決定には至っていない。そこで KamLAND-Zen 実験より高感度な KamLAND2-Zen 実験が計画されておりさまざまな改良案が検討されている。以下に KamLAND2-Zen 実験の改良案を示す。

^{136}Xe の増量

^{136}Xe の溶解量を約 1000 kg まで増量することで検出感度を高める。Xe-LS 量が増えるため、ミニバルーン直径を約 4 m に大きくすることが予定されている。

大光量液体シンチレータ

単位エネルギーあたりの発光量を増加させることを目的に、現在使用されている KamLAND-LS を新たな大光量液体シンチレータに変更することが計画されている。現在有力な候補としては溶媒としてリニアアルキルベンゼン (LAB) とプソイドクメン (PC) を組み合わせたものに第 1 溶質としてジオフェニルオキサゾール (PPO)、第 2 溶質として 1,4-ビス (2 メスルスチル) ベンゼン (Bis-MSB) を溶解させた LAB-LS が検討されている。LAB-LS の組成を表 2.4 に記す。溶媒として LAB を使用する理由は透過率が良いためである。PC は光量増加の役割と KamLAND-LS からの再利用という目的がある。第 2 溶質は波長変換の役割を持ち、後述するシンチレーションバルーンによる吸収を避けるために使用される。第 2 溶質の種類と量は光量、時間分解能を考慮して最適化された [13]。LAB-LS により集光量が 1.4 倍程度向上することが期待されている。

表 2.4: LAB-LS の組成

成分	化学式	密度 [g/cm ³]	構成比 (体積比)
LAB	C ₂₁ H ₃₆	0.87	80%
プソイドクメン	C ₉ H ₁₂	0.857	20%
PPO	C ₁₅ H ₁₁ NO	-	2.0 g/L
Bis-MSB	C ₂₄ H ₂₂	-	5 mg/L
LAB-LS		0.873	

20 インチ高量子効率 PMT

PMT の光電面に光子が入射した際、ある一定の確率で光電子が放出される。この確率のことを量子効率と呼び、量子効率が高いほど同じ入射光量に対する信号の大きさや検出効率が高くなる。

KamLAND 検出器に使用されている、17 インチ PMT の最大量子効率がおおよそ 20% であるのに対し、KamLAND2-Zen に使用予定の 20 インチ高量子効率 PMT の最大量子効率はおおよそ 30% となっているため、1.9 倍ほどの集光量が見込まれる。

集光ミラー

KamLAND-Zen 実験における PMT の被覆率は約 34% である。そこで PMT に多角形型の集光ミラーを取り付けることにより被覆率を改善し、集光量を向上させる計画がある。集光ミラーの導入で、集光量が 2 倍程度向上することが期待されている。

シンチレーションバルーン

KamLAND-Zen 実験ではミニバルーンによって ^{214}Po の α 線が吸収されてしまい ^{214}Bi - ^{214}Po の識別効率が低下してしまう。そこでミニバルーンそのものをシンチレーション発光する素材で作成することにより ^{214}Po からの α 線を検出し ^{214}Bi の識別効率を向上させることが計画されている。シンチレーションバルーンの素材候補としてポリエチレンナフタレート (Polyethylene Naphtalate ; PET) が考えられている。シンチレーションバルーンによって ^{214}Bi によるバックグラウンドは 99.7% 除去できると見込まれている [14]。

これらの改良を施すことで $0\nu\beta\beta$ 崩壊への感度は、約 5 年の稼働でマヨラナ有効質量の質量階層構造をほとんど網羅する 20meV を目標としている。

2.5 KamLAND2 プロトタイプ検出器

前述した KamLAND2-Zen の改良案はそれぞれ独立して研究開発が行われており、それらを組み合わせた最終的な集光量の評価は行われていない。そこで KamLAND 検出器の高性能化を事前に実測で確認することを目的としたプロトタイプ検出器の製作が計画されている。またプロトタイプ検出器は液体シンチレータの体積を増加させ、液体シンチレータの極低放射能分析や、NaI を用いた暗黒物質探索への応用も検討されている。図 2.9 にプロトタイプ検出器の概要図を示す。

ステンレスタンク

ステンレスタンクは KamLAND と同様に神岡鉱山地下 1000m に設置される。大きさは半径 2m、高さ 4m に円筒形となっており厚さは 2mm となっている。図 2.10 のようにコンクリート基礎の上に設置されている。

タイベックシート

タイベックは、デュポン社により開発された高密度ポリエチレン不織布であり、建築用資材、防護服、農業用資材など様々な用途に使用されている。第 4 章に詳細を記すが反射率は入射波長 350nm~600nm まで 90% 以上である。またタイベックの反射は拡散反射だけでなく鏡面反射の成

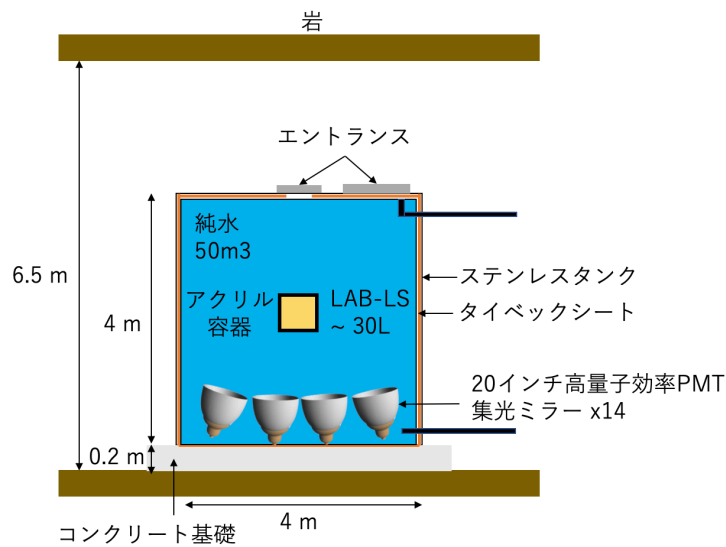


図 2.9: プロトタイプ検出器の概要図

分もあることが知られている [15]。

プロトタイプ検出器のタンク内壁には液体シンチレータからのシンチレーション光をなるべく損なわないようにするためタイベックシートが図 2.11 のように設置されている。タイベックシートは反射率を高くするため二枚重ねになっている。使用したタイベックシートは KamLAND 外水槽を刷新した際に耐水性および水中での反射性能の高さが確認されていた 1082D と呼ばれるものを使用した [17]。

20 インチ高量子効率 PMT

プロトタイプ検出器の PMT には KamLAND-2Zen で使用予定の R12860-03LXA と呼ばれる 20 インチ高量子効率 PMT を使用している。この PMT の浜松ホトニクスで測定された性能を表 2.5 に挙げる。PMT は図 2.13 に示すような傾斜のついた台座の上に設置され、14 本の PMT を設置予定である。この台座は KamLAND 検出器底面の PMT の配置と角度を再現しており、これらの台座上に PMT を設置することで KamLAND 検出器の PMT 配置の一部を再現している。

集光ミラー

集光ミラーの詳細は第 4 章に記す。集光ミラーは床面に設置された 14 本の PMT 全てに取り付けられる。

亚克力ボックス

亚克力ボックスは図 2.14 に示す形をしており、液体シンチレータを入れる部分の体積はおよそ 30L である。プロトタイプ検出器が稼働する際はベクトルケーブルを用いて天井から吊り下



図 2.10: ステンレスタンク

表 2.5: R12860-03LXA 性能表

ダイノード	Box & Line
量子効率 [% @400nm]	31.9
P/V 比	3
上昇時間 (代表値)[ns]	6
Time Transit Spread(代表値)[ns]	2.4
ダークパルスレート (平均値)[kHz]	8

げられ、LAB-LS を入れた状態で検出器の中心に固定される。

LAB-LS

プロトタイプでは KamLAND2-Zen で使用予定の LAB-LS を液体シンチレータとして使用する。その組成は表 2.4 の通りである。



図 2.11: ステンレスタンク壁面に設置されたタイバックシート

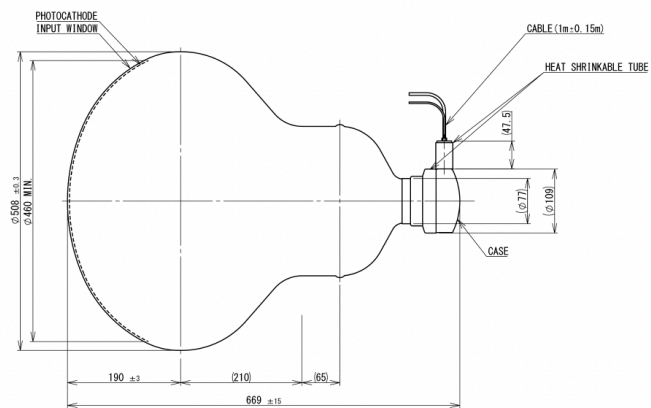


図 2.12: R12860-03LXA の外観

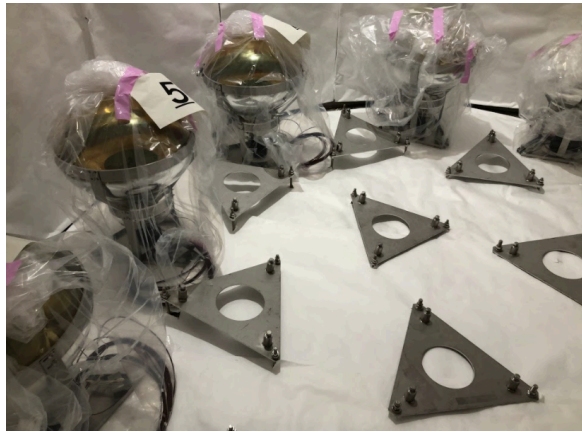


図 2.13: ステンレスタンク床面に設置された PMT の台座

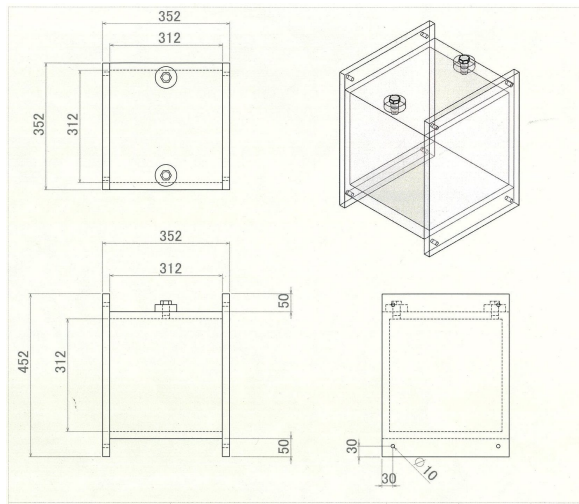


図 2.14: アクリルボックス設計図

第3章

20 インチ高量子効率 PMT の水中での長期安定性評価

プロトタイプ検出機では KamLAND2-Zen 実験で使用予定の 20 インチ光量子効率 PMT(R12860-03LXA) を使用する。KamLAND2-Zen 実験時この PMT はミネラルオイル中に設置される。そのため耐油仕様にする必要があり、各部材単位では長期安定性が確認されている。しかし PMT 全体としての耐油仕様の評価は行われていないため確認する必要がある。またプロトタイプ検出器で使用する際は水中に設置されるため、本研究ではまず水中での長期安定性の評価を行い、PMT の回路への水漏れによる故障やゲイン低下が発生しないか確かめた。

3.1 長期安定性評価のセットアップ

PMT の水中での長期安定性を評価するためには、ダークレートの安定性、ゲインの安定性、PMT から純水への物質の溶解の 3 点を評価すれば良いと考えた。これらの測定を行えるよう図 3.2 に示すようなセットアップを組んだ。

ステンレスタンクや PMT といった純水に接触するものは純水の透過率に影響を及ぼすため、十分に洗浄を行なった。ステンレスタンクはマジックリンを用いて洗浄した後、純水で十分にすすいだ。PMT に関してはエタノールで表面を拭くことのみ行なった。PMT は浮力により浮かないようにするためタンク内で固定した。ステンレスタンク内には純水をおよそ 520 L 投入した。純水が腐敗してしまうと透過率が悪化してしまい透過率の評価に影響を及ぼしてしまうため純水の腐敗対策を行なった。1 つ目が窒素パージであり 1 週間に 1 度 100L の窒素を投入した。2 つ目が紫外線ランプによる純水の殺菌である。使用した紫外線ランプは UV 強度が $30000\mu\text{W}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$ でありこちらも 1 週間に 1 回、4L/min の流速で 4 時間純水を循環させた。

またタンク内部の天井には等方的な光を出すシンチレータ球がとりつけられており、光ファイバーを通して LED driver に接続してある。シンチレータ球はアクリルに POPOP と酸化マグネシウムを溶かしこんでいる。POPOP はシンチレーション光を得る目的で、酸化マグネシウムはシンチレーション光を拡散させ等方的な光を得る目的で使用されている。使用した LED driver は

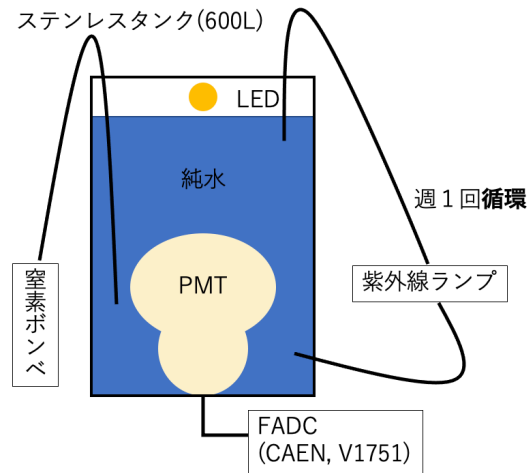


図 3.1: 長期安定性評価のセットアップ

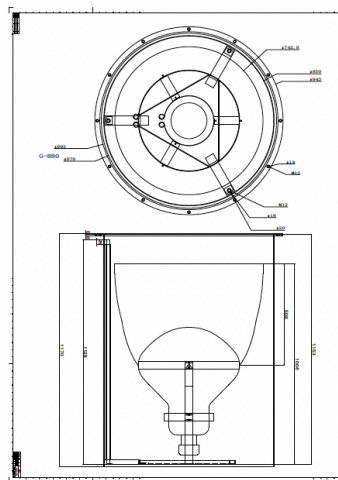


図 3.2: PMT 固定具とステンレスタンクの図面

CAEN 製の SP5601 と呼ばれるものである。CAEN が測定した LED driver の発光波長分布を図 3.3 に性能をまとめたものを表 3.1 示す。この光源から一定の光量を出し PMT で信号を得ることでゲインの変化を測定することができる。

3.2 ダークレートの安定性評価

3.2.1 測定方法

PMT は高電圧をかけると光が入射していない状態でも主に 1 光電子 (p.e.) 信号を検出することがある。この信号をダークノイズと呼びダークノイズのレートをダークレートと呼ぶ。温度が

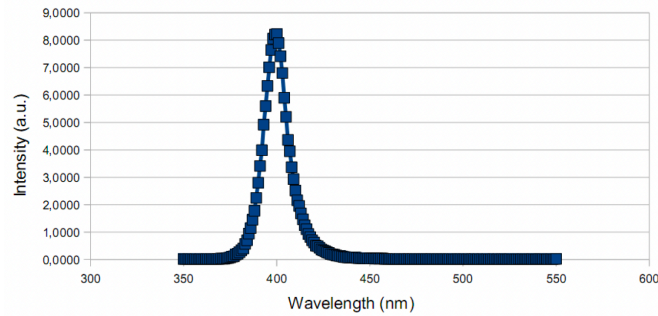


図 3.3: SP5601 の LED 発光波長分布。CAEN 測定 [18]

表 3.1: LED driver(SP5601) の性能

電源	140mA@+12V
信号幅 (代表値)	8ns
発光波長 (代表値)	405nm
出力周波数	500Hz~5MHz

一定であればダークレートは大きく変化しないことからダークレートを測定することで PMT の動作安定性を評価することができる。測定のセットアップを図 3.4 に示す。PMT の印加電圧は

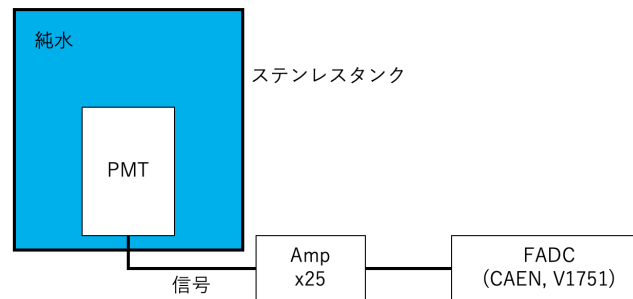


図 3.4: ダークレート安定性評価のセットアップ

-1700 V とした。この電圧は PMT のゲインがプロトタイプ検出器で実際に使用する際のゲインである 1×10^7 になる電圧である [19]。アンプは 5 倍アンプを 2 つ用いて 25 倍アンプとした。

本研究では波形取得に Waveform digitizer V1751(CAEN 製) を用いた。Waveform digitizer はアナログメモリで波形のサンプルを行い、Flash ADC によってデータのデジタル化が行われる。主な性能を表 3.2 にまとめる。波形取得のトリガーの内部閾値は 20ch とし、アナログ入力 は 8 チャンネル、サンプリングレートは 1Gs/s とした。

Waveform digitizer により LED 光源を発光させない状態で 30s 間波形を取得し、取得波形を積

表 3.2: Waveform digitizer(V1751) の性能

アナログ入力	4/8 チャンネル シングルエンド インピーダンス : 50Ω 入力範囲 : $1V_{pp}$ 帯域幅 : 500 MHz
デジタル変換	解像度 : 10 ビット サンプリングレート : 250MS/s~1GS/s
トリガー	セルフトリガー : 内部閾値によるセルフトリガー

分することで ADC 値 [ch] を求めた。この測定を 30 分おきに 5 回測定し、さらに 1 週間ごとにこの測定を行った。

3.2.2 測定結果

測定により得られた波形と ADC 値の求め方を図 3.5 に示す。ADC 値 [ch] を電荷量 [pC] に直し得られた 1p.e. 分布のヒストグラムの例を図 3.6 に示す。このうち電荷量が 0.30pC 以上のイベント

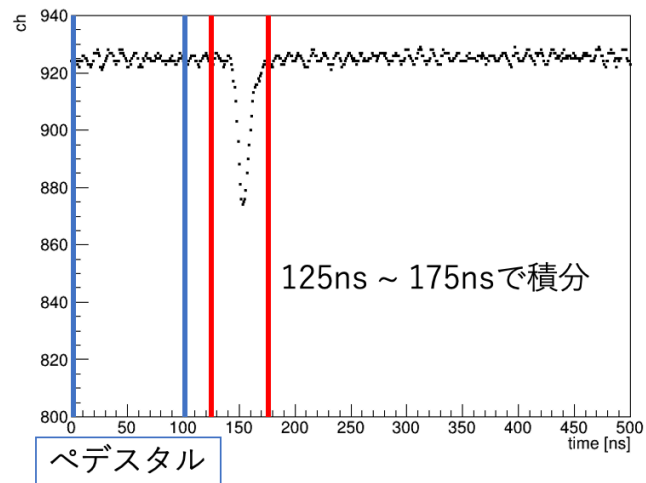


図 3.5: ADC 値の求め方。取得した波形を 125ns~175ns の区間で積分し積分値を得る。0ns~100ns の ADC 値の平均値をペDESTAL としペDESTAL から積分値を引くことで ADC 値を求めた。

トをカウントすることでダークレートとした。ダークレートの時間変化のグラフを図 3.7 に示す。この結果からダークレートが安定しているとは言えないという結果になった。この原因として後述

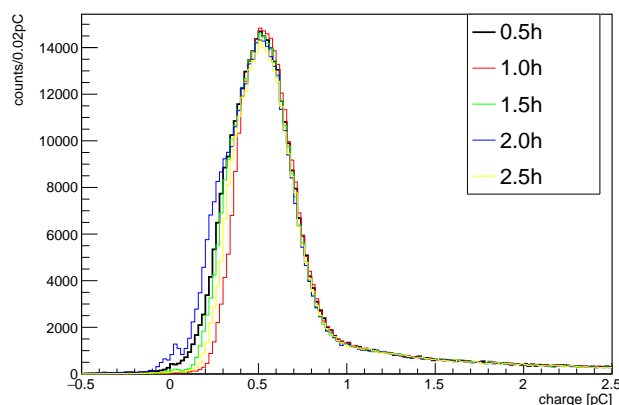


図 3.6: 1p.e. 分布

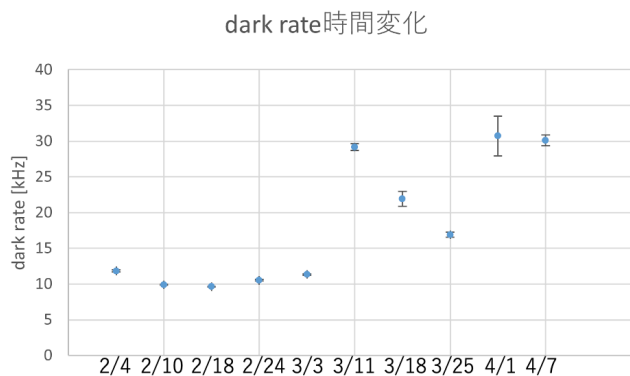


図 3.7: ダークレートの時間変化。測定期間は 2021 年 2 月 4 日～2021 年 4 月 7 日である。誤差は 5 回の測定で得られたダークレートの標準偏差。

する PMT に付着していた汚れの影響が考えられる。この汚れはバクテリアによるものと考えられるが、このバクテリアが発光していた可能性がある。しかしながら明確な原因は判明していない。

また、波形を積分したヒストグラムをガウス分布でフィッティングすることにより 1p.e. に相当する電荷量を求めた。1p.e. 相当の電荷量の時間変化のグラフを図 3.8 に示す。

2 月 4 日の電荷量が他の日付の電荷量に比べて大きくなってしまったが 2 月 10 日～4 月 7 日までの電荷量は誤差の範囲で一致しているため 1p.e. 相当の電荷量は安定していると判断した。

全測定を通して得られた 1p.e. 相当の電荷量の平均値は 0.50pC であった。この電荷量は 1×10^7 ゲインで得られる電荷量の 3 分の 1 程度である。PMT ごとに 1×10^7 ゲインを得る電圧値は異なる。そのため本実験で得られた 1p.e. 相当の電荷量が期待より小さい原因として、設定した電圧値が 1×10^7 ゲインを得る電圧値より低かった可能性が考えられる。

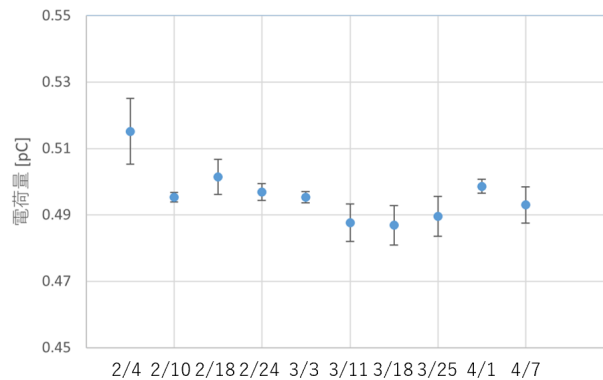


図 3.8: 1p.e. 相当の電荷量の時間変化。測定期間は 2021 年 2 月 4 日～2021 年 4 月 7 日である。誤差は 5 回の測定で得られた電荷量の標準偏差

3.3 ゲインの安定性評価

3.3.1 測定方法

一定光量の光に対して一定電圧を印加した PMT で信号を取得すればほぼ一定の大きさの信号を取得することができる。逆に信号の大きさが変化した場合 PMT のゲインが安定していないことになる。そのことを利用して LED 光源を一定光量で発光させ、20 インチ高量子効率 PMT で信号を取得する測定を行った。測定のセットアップを図 3.9 に示す。本測定ではアンプを用いなくても十

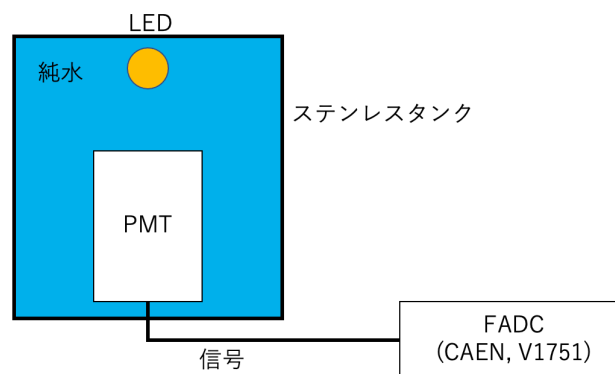


図 3.9: ゲイン安定性評価のセットアップ

分な大きさの波形を得ることができたため、アンプは使用していない。LED driver は本体に取り付けられたつまみを回すことで光量を調整することができ、本実験ではつまみを 8.0 に合わせた。また PMT にかけた電圧は -1700 V であり、LED 光源を安定させるため、LED driver の電源を

入れてあと 1 時間待ってから測定を開始した。

測定方法は LED 光源を発光させた状態で 100 s 間波形を取得し、この測定を 30 分おきに 5 回測定した。さらに 1 週間ごとにこの測定を行った。

3.3.2 測定結果

測定により得られた波形と ADC 値の求め方を図 3.10 に示す。LED 光の電荷量分布のヒストグラムの例を図 3.11 に示す。得られたヒストグラムに対してガウス分布でフィッティングをし得られた mean 値を前節で得られた 1p.e. に相当する電荷量で割ることで LED 光のフォトン数を得た。LED 光のフォトン数の時間変化を表したグラフを図 3.12 に示す。グラフを見ると時間と共にフォトン数が減少していることがわかる。この原因は後述する PMT に付着した汚れによる純水の透過率の悪化であると考えられる。

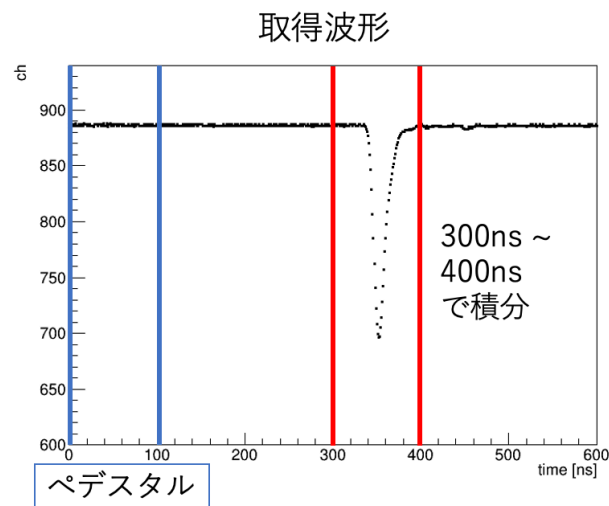


図 3.10: ADC 値の求め方。取得した波形を 300ns~400ns の区間で積分し積分値を得る。0ns~100ns の ADC 値の平均値をペDESTアルとしペDESTアルから積分値を引くことで ADC 値を求めた。

3.4 純水の透過率安定性評価

ステンレスタンク内に入れられた純水を週一回サンプルしその 9 cm 透過率を測定することによって 20 インチ高量子効率 PMT から純水に物質が溶け出さないか調べた。

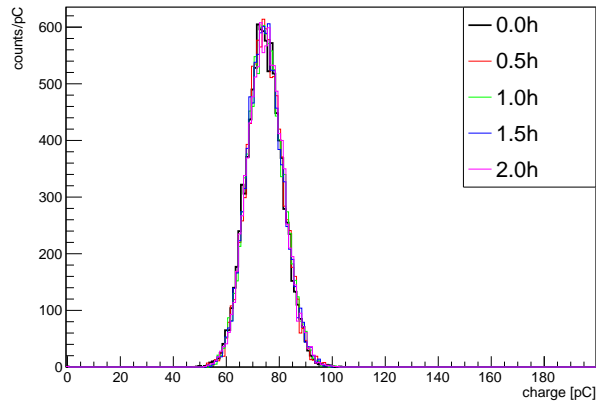


図 3.11: LED 光の電荷量分布

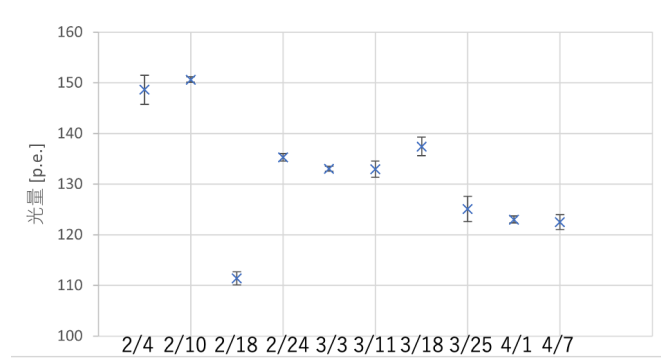


図 3.12: LED 光の光子数の時間変化

3.4.1 9 cm 透過率の測定方法

9 cm 透過率の測定には分光光度計（日立ハイテック製 U-3900）を用いており図 3.13 のように紫外領域から可視領域の光をサンプルの入っている 1cm セルと 10cm セルに入射し、透過光を PMT で検出することができる。1cm セルと 10cm セルの透過光強度をそれぞれ $I_{1\text{cm}}$ と $I_{10\text{cm}}$ とすると 9 cm における透過率の相対値 $T_{9\text{ cm, 相}}$ は

$$T_{9\text{ cm, 相}} = \frac{I_{10\text{cm}}}{I_{1\text{cm}}} \quad (3.1)$$

と求めることができる。また透過光強度の基準値として短距離での透過率がほぼ 100% であるシクロヘキサンの測定値と比を取ることで、透過率の絶対値 $T_{9\text{cm}}$ が以下のように求められる。

$$\begin{aligned} T_{9\text{cm}} &= \frac{T_{9\text{cm}, \text{相}}(\text{サンプル})}{T_{9\text{cm}, \text{相}}(\text{基準値})} \\ &= \frac{I_{10\text{cm}}(\text{サンプル})/I_{1\text{cm}}(\text{サンプル})}{I_{10\text{cm}}(\text{基準値})/I_{1\text{cm}}(\text{基準値})} \end{aligned}$$

透過率測定の実誤差は先行研究より $\pm 0.3\%$ とした [20]。

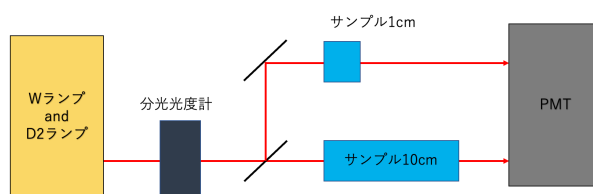


図 3.13: 9 cm 透過率測定の実験装置の概要図

3.4.2 測定結果

図 3.14 に純水の透過率の測定結果を示す。この結果から時間経過と共に純水の透過率が減少していることがわかる。そこでプロトタイプ検出器で用いる LAB-LS の主要発光波長である 400 nm における透過率の時間経過のグラフを図 3.15 に示す。この結果からも透過率が時間と共に減少していることがわかるが 3 月 11 日～4 月 7 日にかけては誤差の範囲内で透過率が一致しているためこれ以上透過率は悪化しないと判断した。また透過率の悪化の原因は次節で説明する PMT に付着した汚れであると考えられる。

3.5 ステンレスタンク内の汚れ

全測定終了後タンク内の純水を排水しタンク内の様子を確認した。その際 20 インチ量子効率 PMT の表面が図 3.16(a) のように曇っていた。PMT をタンクから取り出した後表面を拭き取ると図 3.16(b) のような汚れが付着していた。これは紫外線ランプによる殺菌が十分ではなく、純水中で細菌が繁殖してしまったことが原因であると考えられる [21]。この汚れにより純水の透過率が悪化したと考えられる。

LED フォトン数の減少が純水の透過率の悪化により説明することができるか考える。LED 光のフォトン数が一番大きい 2 月 10 日と一番小さい 4 月 7 日における入射光 420nm での 9cm 透過率と LED 光量を表 3.3 にまとめる。なお透過率の入射光として 420nm を選んだ理由は LED 光を発するシンチレータ球に溶解している POPOP の発光波長のピークがおおよそ 420nm であるからであ

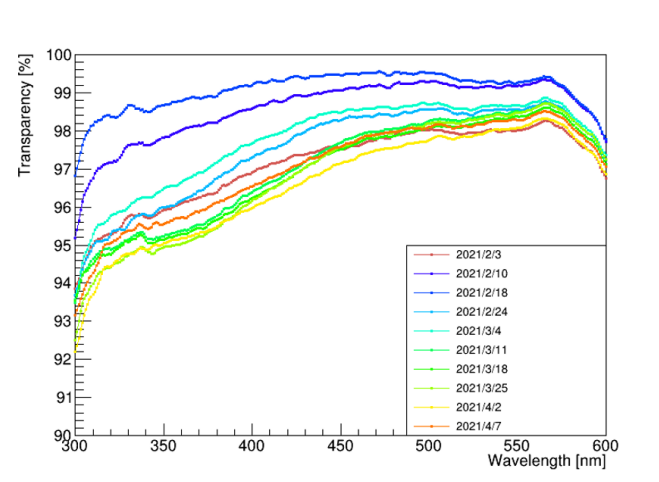


図 3.14: 純水の 9 cm 透過率

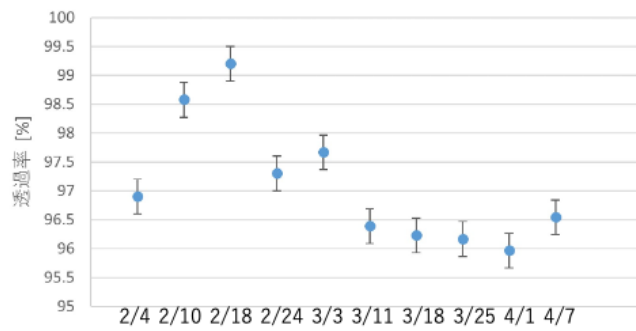


図 3.15: 400 nm における純水の 9 cm 透過率の時間変化

る。ステンレスタンク水面から 20 インチ高量子効率 PMT の光電面表面までの距離はおよそ 9cm である。表 3.3 より 9cm 透過率の悪化の割合に対して LED 光の光子数の減少が明らかに大きい。そのため LED 光の光子数の減少は純水の透過率の悪化以外にも原因があると考えられるが原因は判明していない。

表 3.3: 純水の 9cm 透過率 (@420nm) と LED 光の光子数

	9cm 透過率 [%]	LED 光の光子数 [p.e.]
2 月 10 日	98.8	151
4 月 7 日	96.8	122
変化割合	0.98	0.81



(a) 20インチ高量子効率PMTの表面

(b) 20インチ高量子効率PMT表面を拭き取った様子

図 3.16: 20インチ高量子効率PMTに付着した汚れ

3.5.1 プロトタイプ検出器での純水の腐敗対策

本実験では純水中のバクテリア対策が不十分であったため純水の透過率が悪化してしまった。このことからプロトタイプ検出器を運用する際純水の腐敗対策を行う必要がある。考えられる対策として以下のようなことが考えられる [21]。

- 窒素パージの量を増加
- 紫外線ランプの照射時間を増加
- 純水の循環ラインにフィルターを設置しバクテリア等の汚れを除去
- 純水の透過率をモニターし悪化の兆候が見られた場合は純水を入れ替える

プロトタイプ検出器で使用予定のフィルター (PFR-100SL-1T0) の性能を表 3.4 に紫外線ランプ (JF-10、5mm バイトンチューブ付き) の性能を表 3.5 にまとめる。また、純水の流量は $1\text{m}^3/\text{hour}$ を予定している。

表 3.4: PFR-100SL-1T0 の性能表

孔径 [μm]	10
全長 [mm]	750
材質	ろ材：ポリプロピレン コア：ポリプロピレン エンドキャップ：発砲ポリエチレン
耐圧性能 [MPa]	0.49

表 3.5: JF-10、5mm バイトンチューブ付きの性能表

入力電力 [W]	33(入力電流 : 0.5 A)
処理能力 [L/min]	17
重量 [kg]	約 13

第 4 章

プロトタイプ検出器の光量評価

前述した通りプロトタイプ検出器は KamLAND2-Zen 実験での大光量を実証する目的がある。プロトタイプ検出器が完成した際は検出器内部に設置した液体シンチレータを線源で発光させることや、等方的に発光するシンチレータ球を発光させることで集光ミラー、LAB-LS および 20 インチ高量子効率 PMT による光量増加の効果を確認する。

本研究ではプロトタイプ検出器のシミュレーションツールを構築し、プロトタイプ検出器の光量を予測した。また光量を予測する上でいくつかのパラメータに不定性があると考えられる。不定性の例として、集光ミラーの反射率や制作、設置精度、タイバックシートの拡散反射と鏡面反射の割合、LAB-LS の光量、各 PMT の量子効率などが挙げられる。これらの不定性による集光量の不定性をシミュレーションにより見積もる必要がある。

プロトタイプ検出器には検出器内部の反射率を向上させるために、検出器壁面に反射材としてタイバックシートを設置している。しかし KamLAND2 では、検出器壁面にタイバックシートは設置しない。そのため KamLAND2 での集光量増加をプロトタイプ検出器での測定結果から予測する際、プロトタイプ検出器の集光量増加の見積もりから、タイバックシートによる集光量増加の寄与は差し引く必要がある。従ってシミュレーションにより、タイバックシートによる集光量増加の寄与を事前に予測する必要がある。

4.1 プロトタイプ検出器のシミュレーション構築

4.1.1 Geant4

今回使用したシミュレーションソフトウェアは Geant4[22] である。Geant4 は C++ を使用言語としているため、ジオメトリ設計・物質定義・物理プロセス定義などを設定する上で有用なクラスが多数用意されている。そのため目的に応じてクラスを変更することで設定を容易に変更できる。これらの理由から素粒子・原子核物理学や宇宙物理学の分野で広く使用されている。

4.1.2 KLG4

本研究で構築したプロトタイプ検出器のシミュレーションは、KamLAND 検出器を再現した大規模シミュレーション”KLG4”をもとにしている。KLG4はKamLAND 検出器のジオメトリを再現しているだけでなく、KamLAND 検出器に用いられている物質の組成や光学特性などが登録されている。

4.1.3 ジオメトリ

図 4.1 に本シミュレーションで構築したジオメトリの概略図を示す。ジオメトリは外側から岩盤、空気層となっており、コンクリートの基礎の上にステンレスタンクを設置している。ステンレスタンクの内壁には反射材として Tyvek シートを設置し、タンク内は純水で満たされている。タンク中心には液体シンチレータの入ったアクリルボックスを置き、ステンレスタンク底面には集光ミラーを取り付けた 20 インチ PMT を 14 本設置した。

またシミュレーションに登録した主な物質の組成、密度、体積をまとめたものを表 4.1 に示す。

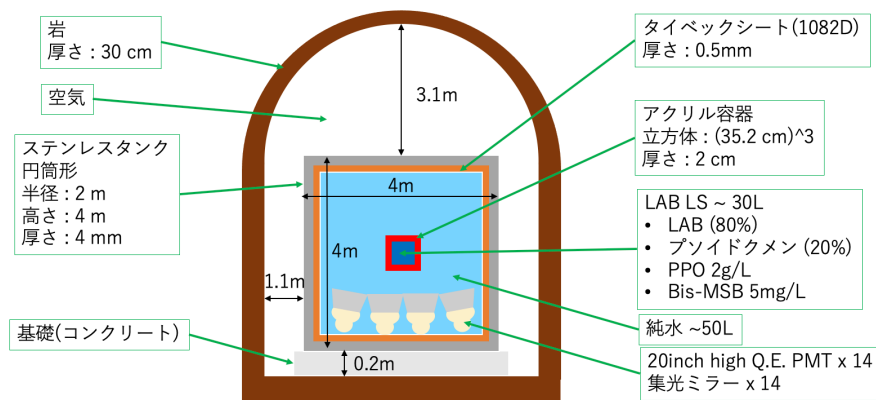


図 4.1: プロトタイプ検出器のジオメトリ

LAB-LS の組成

前述した通り KamLAND2-Zen ではリニアアルキルベンゼン (LAB) を用いた新しい液体シンチレータを (LAB-LS) を導入することが検討されており、現在開発・研究が行われている。シミュレーションには表 2.4 に示した LAB-LS の組成を登録した。

表 4.1: シミュレーションに登録した物質の組成、密度、体積

物質	組成	密度 [g/cm ³]	体積 [m ³]
岩	SiO ₂	2.7	61.4
空気	O ₂ (30%), N ₂ (70%)	1.29×10 ⁻³	141.4
ステンレス	Fe(71%), Cr(19%), Ni(10%)	7.87	0.30
コンクリート	SiO ₂ (30%), CaO(70%)	2.3	3.7
水	H ₂ O	1.0	49.4
アクリル	C ₄ O ₂ H ₆	1.14	0.013
タイベック (1082D)	CH ₂	0.96	-

LAB-LS の発光波長分布

一般に液体シンチレータのシンチレーション光は単一の波長ではなく広がりのある波長分布を持つ。そのためシミュレーションには先行研究で測定された LAB-LS の発光波長分布を設定した [13]。測定のセットアップと測定方法を図 4.2 に示す。発光波長測定には、分光蛍光光度計 F-2700(日立ハイテクサイエンス製) を用いている。シミュレーションに設定した発光波長分布のグラフを図 4.3 に示す。なおこの発光波長分布を測定した際の励起波長は 300nm である。

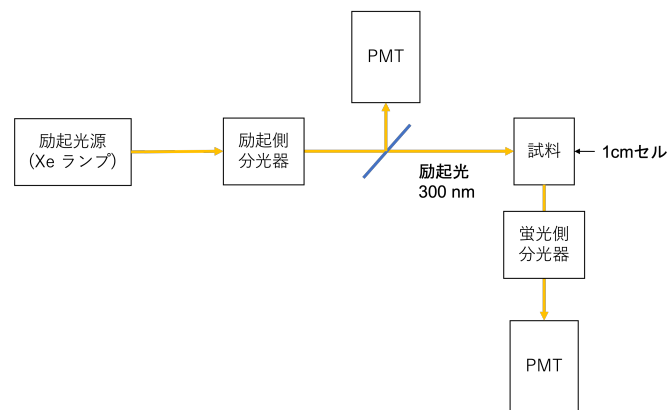


図 4.2: 発光波長分布測定のためのセットアップと測定方法。Xe ランプから励起光を LAB-LS の入った 1cm セルに照射し LAB-LS の発光を PMT で検出することにより発光波長分布を得る。

LAB-LS の発光時間分布

液体シンチレータの発光は時間応答に広がりを持つ。LAB-LS の発光時間分布は式 (4.1) のように指数関数の足しあわせで表される [23]。

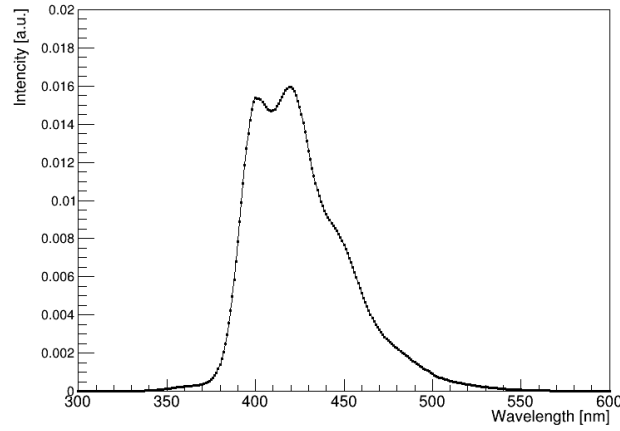


図 4.3: LAB-LS の発光波長分布

$$T(t) = \sum_{i=1}^3 \frac{A_i}{\tau_i} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (4.1)$$

ただし A_i はそれぞれの割合、 τ_i は発光時定数である。シミュレーションに登録した各パラメータの値を表 4.2 に示す。なお A_3 が非常に小さかったため本シミュレーションでは時定数は 2 成分のみとした。

表 4.2: LAB-LS の発光時定数とその割合

i	A_i [%]	τ_i [ns]
1	91.5	7.37
2	8.5	44.7

LAB-LS の再発光確率

正確な光学シミュレーションを行うためには液体シンチレータの各波長における再発光確率を求める必要がある。再発光確率 P_{re} は式 (4.2) のように表される [24]。

$$P_{re} = \frac{L_{tot}}{L_{PPO}} \times Q_{PPO} + \frac{L_{tot}}{L_{Bis}} \times Q_{Bis} \quad (4.2)$$

$$\frac{1}{L_{tot}} = \frac{1}{L_{LAB}} + \frac{1}{L_{PC}} + \frac{1}{L_{PPO}} + \frac{1}{L_{Bis}} \quad (4.3)$$

ここで L_i は各組成の吸収長を表し、 Q_i は各溶質の蛍光量子効率を表している。各組成の吸収長をまとめたものを図 4.4 に示す。再発光確率の計算の際 L_{LAB} 、 L_{PPO} 、 L_{Bis} の値は [24] から、 L_{PC}

の値は [25] から引用し、蛍光量子効率 $Q_{PPO} = 0.898$ 、 $Q_{Bis} = 0.95$ [24] とした。再発光確率の計算結果を図 4.5 に示す。

また LAB-LS の散乱確率は測定されていないため不定性が大きいですが、プロトタイプ検出器の LAB-LS のサイズは小規模であると考えられる。そのため散乱確率のシミュレーション結果への寄与は少ないと考え、KLG4 に登録されていた KamLAND-LS の散乱確率を LAB-LS の散乱確率として登録した。

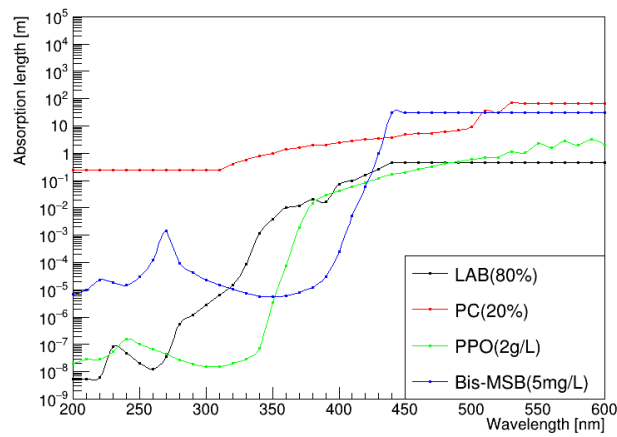


図 4.4: LAB-LS の各組成の吸収長

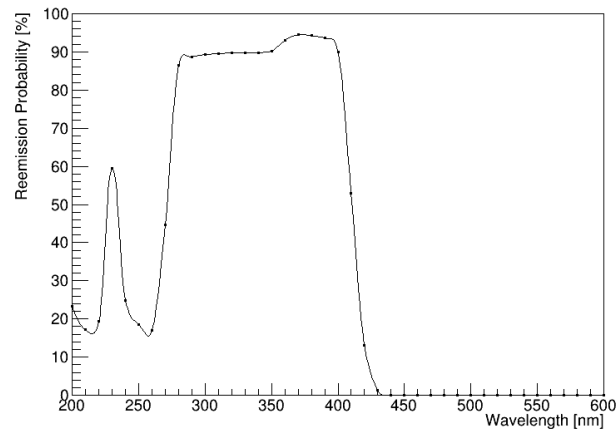


図 4.5: LAB-LS の再発光確率。PPO と Bis-MSB の寄与。

LAB-LS の減衰長

Geant4 では物質の透過率を減衰長から計算しているため、LAB-LS の減衰長をシミュレーションに登録する必要がある。そのため LAB-LS の 9cm 透過率測定の結果から減衰長を式 (4.4) に従って計算しシミュレーションに登録した。図 4.6(a) に LAB-LS の 9cm 透過率のグラフを、図 4.6(b) に LAB-LS の減衰長のグラフを示す。

$$T_x = \exp\left(-\frac{x}{L}\right) \quad (4.4)$$

ここで T_x は透過率、 x は透過距離、 L は減衰長を表す。

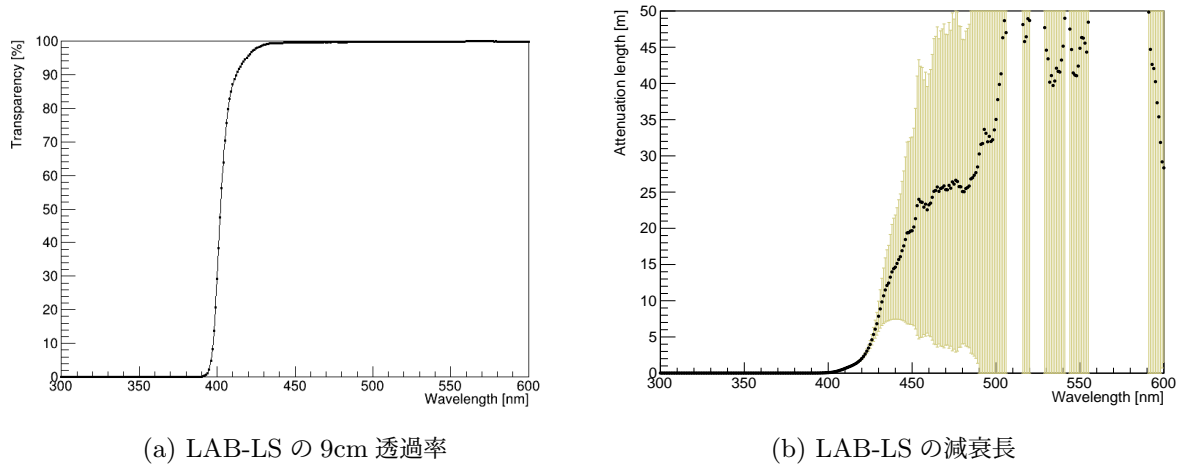


図 4.6: LAB-LS の 9cm 透過率・減衰長

LAB-LS の発光量

LAB-LS の発光量は先行研究 [13] により測定されており、KamLAND-LS の 1.365 ± 0.031 倍である。KLG4 に登録されている KamLAND-LS の発光量が 9030.5 photon/MeV であったため LAB-LS の発光量は 12326.6 photon/MeV とした。

PMT

PMT として KamLAND2-Zen 実験で使用する予定の 20 インチの高量子効率 PMT を採用した。PMT の量子効率は KLG4 に登録されていた 20 インチ高量子効率 PMT の量子効率を登録した。これにより量子効率の波長依存性をシミュレーションに反映した。図 4.7 に 20 インチ高量子効率 PMT の量子効率と KamLAND で使用されている 17 インチ PMT の量子効率を示す。17 インチ PMT の量子効率は KLG4 に登録されている値である。17 インチ PMT から 20 インチ高量

子効率 PMT に変更することで、量子効率だけでなく被覆率も改善による集光量向上も見込むことができる。

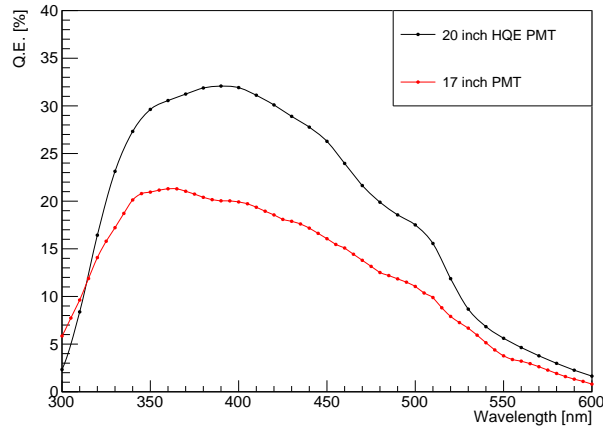


図 4.7: 20 インチ高量子効率 PMT と 17 インチ PMT の量子効率

また、PMT の出力値は光電面を覆っているガラス表面への光の入射位置と入射角度に依存していることがわかっており、実測データを用いてそれらについての計数率もシミュレーションに与えている。先行研究で測定された PMT の計数率の位置依存性と角度依存性を表したグラフを図 4.8 に示す。この測定は PMT のガラス表面の 5 つの位置において 0、30、60 度の 3 つの角度で計数率を求めている。3 つの角度以外の計数率については測定データを線形補完することで求め、その値がシミュレーションに登録されている。

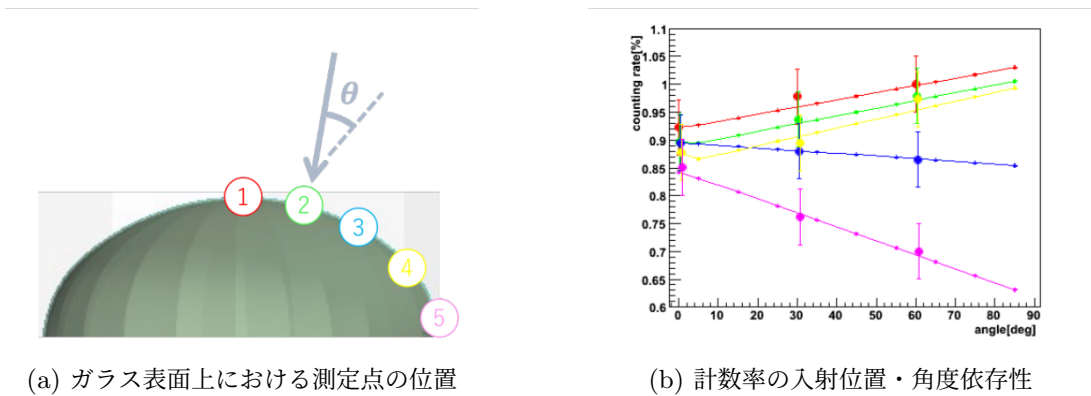


図 4.8: 高量子効率 PMT の計数率入射位置・角度依存性 [19]

集光ミラーの形状

集光ミラーの形状は先行研究によって決定された多角形ミラーの形状をシミュレーションに反映した [26]。KamLAND は図 4.9 に示すように菱形三十面体を用いて球面に PMT を配置している。集光ミラーの形状は集光ミラー同士が干渉しないよう、隣り合う 2 つの PMT 中心の垂直二等分線を多角形の 1 辺として菱形の内部を埋め尽くすようにしている。プロトタイプ検出器の場合はこの菱形をさらに 4 分割し、鋭角の頂点の 2 つの PMT を除いた 14 個の PMT に集光ミラーを配置している。菱形の内部に隙間を作らないようにするためには、集光ミラーの形状は 4 種類必要であるが、プロトタイプ検出器ではコストの点から集光ミラーは 3 種類のみ使用する。KamLAND2-Zen 実験時は 4 種類の集光ミラーを使用する予定である。集光ミラーの形状とシミュレーション内での配置を図 4.10 に示す。

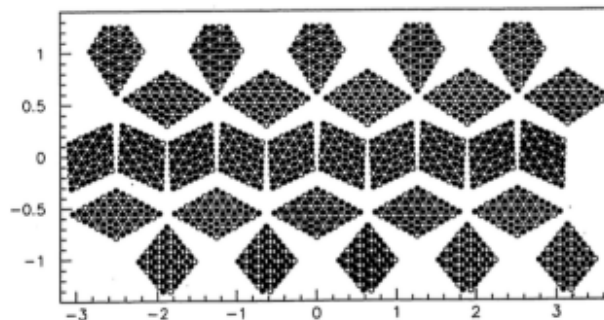


図 4.9: KamLAND の PMT 配置

多角形ミラーのジオメトリ作成は以下の通りである [26]。多角形ミラーの入口を 1 辺につき 10 点程度に分け、各点における口径に対応して以下のように「基準曲線」をスケールする。

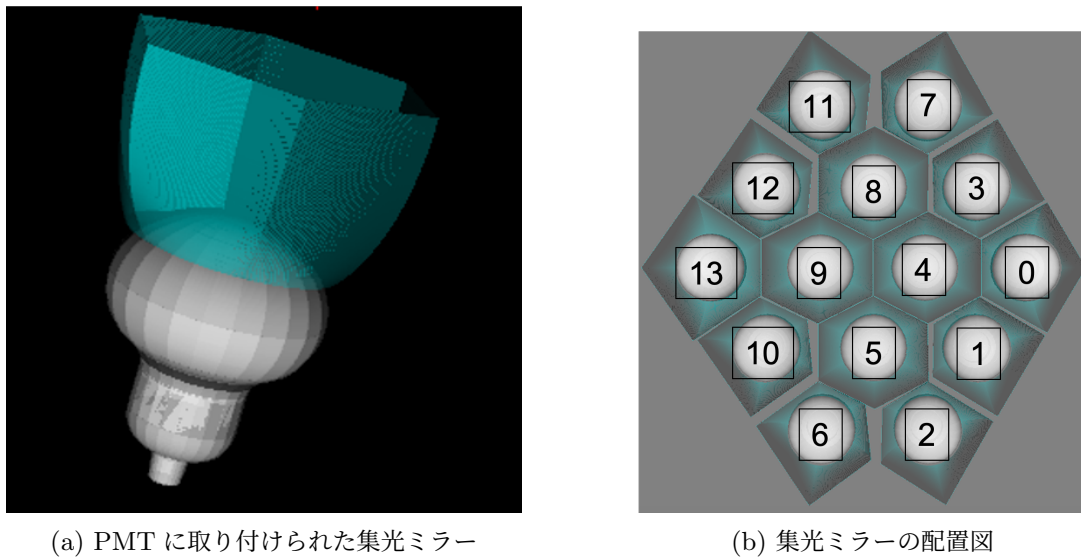
$$\text{描く曲線の各点と中心軸の距離} = \frac{\text{描く曲線の口径}}{\text{基準曲線の口径}} \times \text{基準曲線の各点と中心軸との距離} \quad (4.5)$$

スケールした曲線を曲面 1 周分集め、隙間を補完することで多角形ミラーを形成している。

また先行研究では集光ミラー材質はアルミニウムが登録されていた。しかし実際の集光ミラーはアルミニウムの表面にアクリルシリコン樹脂系塗料が塗られている。そのため本シミュレーションでは集光ミラーのジオメトリを 2 層構造にし、内側をアクリルシリコン樹脂系塗料、外側をアルミニウムとすることでより実際の集光ミラーの素材に近づけた。

集光ミラー素材の反射率測定方法

集光ミラーの反射率をシミュレーションに設定するため、集光ミラー素材を用いて反射率測定を行なった。ミラー素材は 8cm×2cm の板状の形をしており、アクリルにアルミニウムが蒸着されて



(a) PMTに取り付けられた集光ミラー

(b) 集光ミラーの配置図

図 4.10: 集光ミラーの形状

いる。アルミニウムの表面は耐水性を確保するために、トップコートと呼ばれるアクリルシリコン樹脂系塗料が塗られている。ミラー素材のイメージ図を図 4.11 に示す。

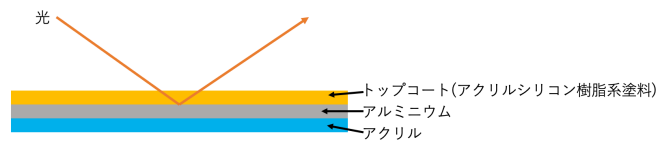


図 4.11: ミラー素材のイメージ図

反射率測定の設定アップを図 4.12 に示す。キセノンランプからの光は回折格子 (島津製作所 SPG-120UV) によって波長を調整され、ロータリーステージ上に置かれたミラー素材に反射された上で積分球に入射する。積分球は PMT に接続されており、積分球に光が入射すると光の強度に対応した電圧値が出力されるようになっている。

反射率はミラー素材の反射率測定の前各 5 回積分球に直接入射させた時の出力値を測定し、その平均値をリファレンスとして以下のように定義する。

$$\text{反射率 [\%]} = \frac{\text{サンプルミラーでの測定値}}{\text{リファレンスの値}} \quad (4.6)$$

ロータリーステージは角度を 15 度 ~ 75 度まで 15 度ずつ回転させることができ、反射率の角度依存性を測定することもできる。また反射率の誤差は先行研究より $\pm 3.5\%$ とした [20]。

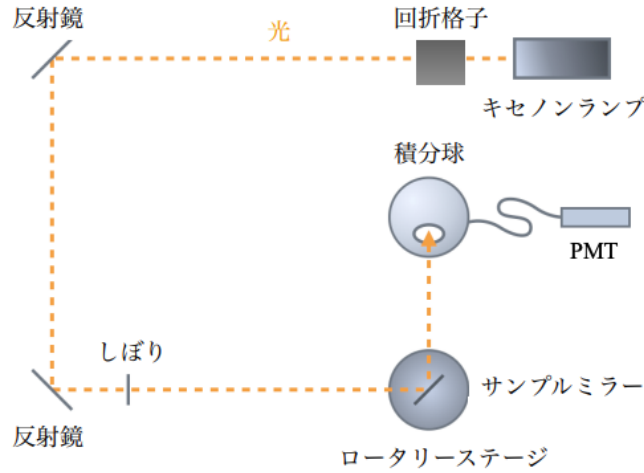


図 4.12: 反射率測定の設定アップ

集光ミラー素材の反射率と集光ミラーの反射率の設定

角度依存性を反映した理想的な反射率 R は反射素材の複素屈折率 \tilde{n} 、反射素材に接している媒質の屈折率 n_0 、入斜光の入射角 θ を用いて以下のように書くことができる。

$$a^2 = \frac{1}{2} \left[\left\{ \gamma^2 + 4 \left(\frac{nk}{n_0^2} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} + \gamma \right] \quad (4.7)$$

$$b^2 = \frac{1}{2} \left[\left\{ \gamma^2 + 4 \left(\frac{nk}{n_0^2} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} - \gamma \right] \quad (4.8)$$

$$\gamma = \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 - \left(\frac{k}{n_0} \right)^2 - \sin^2 \theta \quad (4.9)$$

$$\tilde{n} = n - ki \quad (4.10)$$

$$R_s = \frac{(a - \cos \theta)^2 + b^2}{(a + \cos \theta)^2 + b^2} \quad (4.11)$$

$$R_p = \frac{(a - \sin \theta \tan \theta)^2 + b^2}{(a + \sin \theta \tan \theta)^2 + b^2} \times R_s \quad (4.12)$$

$$R = \frac{R_s + R_p}{2} \quad (4.13)$$

ここで R_s は s 偏光の反射率、 R_p は p 偏光の反射率を表す。先行研究では乱反射はないとして上式をシミュレーションに反映し集光ミラーの反射率を計算しているが、実際の反射率は理想値より低いことがわかっている。集光ミラーの反射率を現実に近い値にするため反射率の式を定数倍すること

で、実測値を用いて反射率の式をスケールすることにした。つまり

$$\text{シミュレーションに導入する関数} = p_0 \times (\text{反射率の角度依存の式}) \quad (4.14)$$

としたときの p_0 を実測値に対してフィッティングすることで求めた。本研究では反射率の値として LAB-LS の主要波長の一つである 400nm の値を用い、アルミニウムの複素屈折率は 400nm の場合の値、 $\tilde{n} = 0.49 - 4.86i$ を用いた。また、集光ミラーの場合アルミニウムに接している媒質はアクリルシリコン樹脂である。しかしその屈折率は不明であるため、今回はアクリルの 400nm の屈折率の値 $n_0 = 1.51$ で代用した。ミラー素材の反射率の実測値、理論式、理論式を実測値に対してフィットしたものを図 4.13 に示す。この結果 $p_0 = 0.923$ となったため、アルミニウムの反射率は理論値の 92.3% とした。

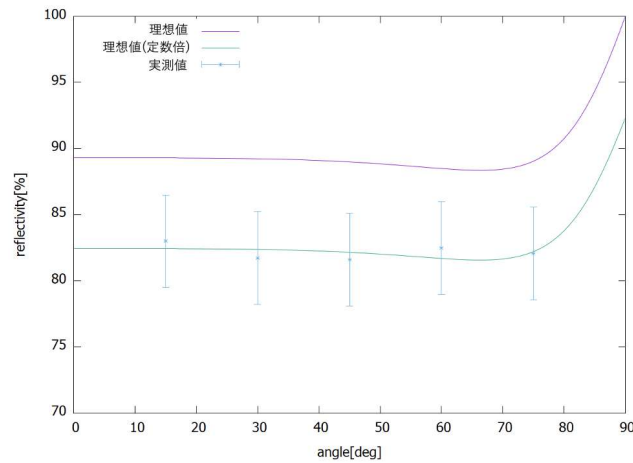


図 4.13: 集光ミラーの反射率の角度依存性

Tyvek シート

シミュレーションに反映した Tyvek の反射率のグラフを図 4.14 に示す。ただし実際の Tyvek は水中に設置されるためシミュレーションでは Tyvek の反射率が高く見積もられる可能性がある。またシミュレーション内で反射の方法は拡散反射のみを設定した。実際には拡散反射以外に鏡面反射の成分があることが知られている。大きさ 2.8m×1.2m×1.3m の水槽壁面に Tyvek1082D を設置し、水槽内を純水で満たした状態で Tyvek の反射率を測定したところ、拡散反射が 15%、鏡面反射が 85% という結果が得られている [15]。

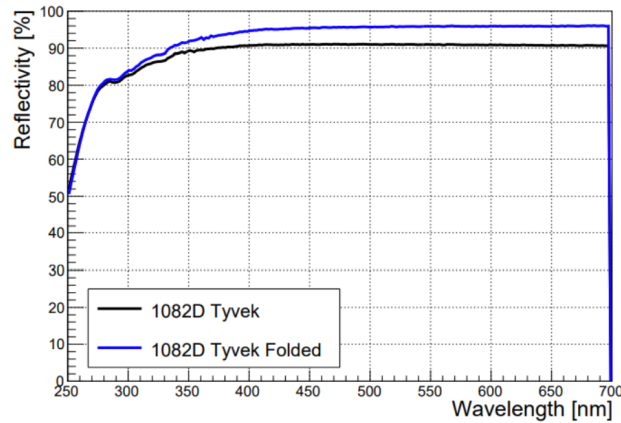


図 4.14: Tyvek1082D の空気中での反射率

4.2 プロトタイプ検出器の光量評価

4.2.1 集光ミラーによる集光率評価

液体シンチレータ中のある点にエネルギー 1MeV の電子によるシンチレーション光を発生させ、そのときの PMT で得られる光電子数を集光量と定義する。以下では集光ミラーの性能を表すパラメータとして、集光ミラーを装着していない時の集光量に対して集光ミラーを装着したときの集光量の比率を集光率と呼ぶ。

$$\text{集光率} = \frac{\text{集光ミラー装着時の集光量}}{\text{集光ミラー未装着時の集光量}} \quad (4.15)$$

前節で説明したプロトタイプ検出器のシミュレーションツールを用いて、プロトタイプ検出器の集光ミラーによる集光率を見積もった。

シミュレーション条件

シミュレーションの条件は表 4.3 の通りである。ジオメトリを以下の 3 つの場合にわけ、シミュレーションを行なった。

1. 集光ミラーあり、タイバックシートあり
2. 集光ミラーあり、タイバックシートなし
3. 集光ミラーなし、タイバックシートなし

表 4.3: エネルギー分解能評価のシミュレーション条件

発生粒子	電子
エネルギー	1.0 MeV
発生位置	液体シンチレータ中一様
発生イベント数	1000

集光ミラー集光率

シミュレーションにより得られた集光量の結果を図 4.16 に示す。集光量のヒストグラムに対してガウシアンでフィッティングを行った。フィット結果を表 4.4 にまとめた。集光ミラーなし、タイバックシートなしの集光量と、集光ミラーあり、タイバックシートなしの集光量の結果から、プロトタイプ検出器における集光ミラーの集光率は 2.0 倍であると見積もられた。PMT ごとの集光率をまとめたものを図 4.15 に示す。ここで PMT 番号は図 4.10(b) に示したものと対応している。PMT 番号 4,5,8,9 といった中心に設置された集光ミラーの集光率が 3 枚程度あるのに対し、それ以外の集光ミラーの集光率は 2 倍以下という結果になった。

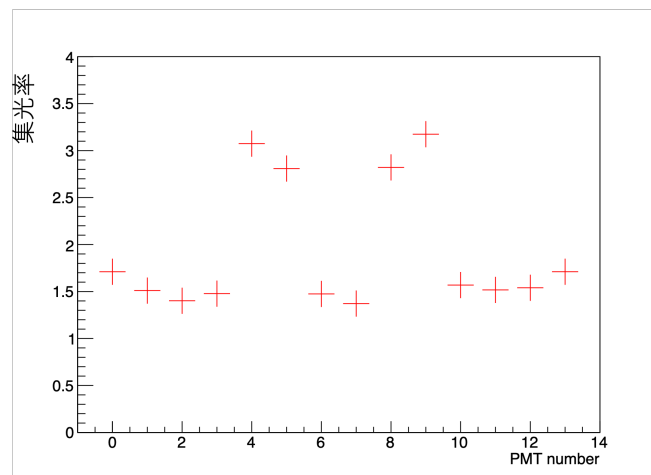


図 4.15: PMT ごとの集光率

また集光ミラーあり、タイバックシートありの集光量のフィット結果から、プロトタイプ検出器エネルギー分解能は

$$\text{エネルギー分解能} = \frac{3.4\%}{\sqrt{E[\text{MeV}]}} \quad (4.16)$$

程度であると見積もられた。

また PMT に到達した光子の到達時間分布を図 4.17 に示す。集光ミラーあり、タイバックシー

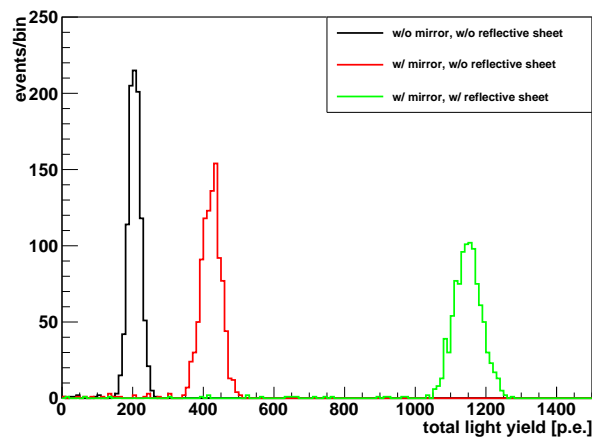


図 4.16: 1MeV の電子のシンチレーション光に対する集光量

表 4.4: 集光量のフィット結果

	Mean [p.e.]	sigma [p.e.]
集光ミラーなし、タイバックシートなし	206	17.3
集光ミラーあり、タイバックシートなし	422	27.1
集光ミラーあり、タイバックシートあり	1149	38.8

トありの光子到達時間分布より、PMT への到達時間が 25ns 以上の光子はタイバックシートから反射してきた光子であることがわかる。

4.2.2 集光量の不定性評価

シミュレーションに登録したパラメータにはそれぞれ不定性がある。そのためシミュレーションにより求められたプロトタイプ検出器の集光量も不定性を持つことになる。ここでは不定性を持つパラメータをそれぞれ変化させた際に、集光量にどの程度不定性が生じるかシミュレーションにより見積もった。シミュレーションで発生させたイベントは前節の表 4.3 と同様である。

タイバックシートの反射特性の不定性

プロトタイプ検出器に設置されているタイバックシートは KamLAND2 検出器には設置されないため、プロトタイプ検出器の光量測定結果から KamLAND2 での光量を評価する際タイバックによる光量増加の効果を取り除く必要がある。プロトタイプ検出器のシミュレーションではタイバックの反射は拡散反射のみと設定したが、実際には鏡面反射の成分もある。そのためタイバック反射特性を拡散反射のみから鏡面反射のみに切り替えた場合、集光量にどの程度不定性があるかシ

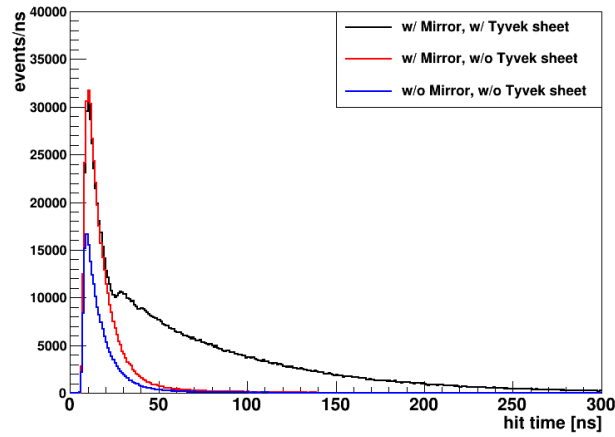


図 4.17: PMT に到達した光子の到達時間分布

ミュレーションを用いて見積もった。

タイベックの反射を全て拡散反射とした場合、全て鏡面反射とした場合、タイベックなしの場合の 3 つの状態での光子到達時間分布を図 4.18 に示す。

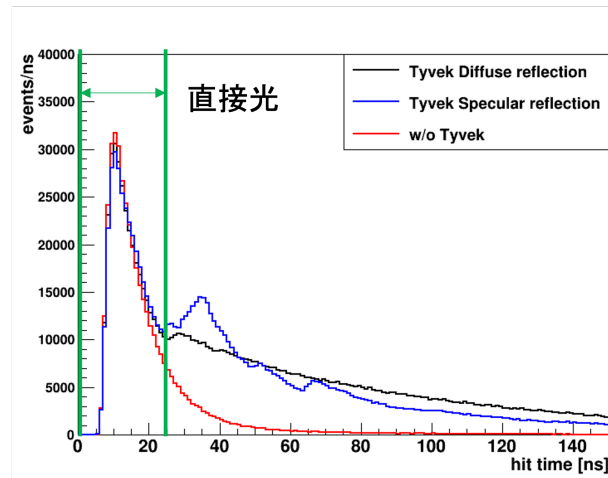


図 4.18: Tyvek の反射特性を変更した際の光子到達時間分布

直接光を以下のように定義する。

$$(\text{直接光}) = (0\text{ns} \sim 25\text{ns} \text{ に含まれる全光量}) - (0\text{ns} \sim 25\text{ns} \text{ にタイベックからの反射光}) \quad (4.17)$$

到達時間が 0ns~25ns の全光量、拡散反射による反射光量、鏡面反射による反射光量を表 4.5 にまとめた。この結果からタイベックの反射特性を拡散反射のみから鏡面反射のみに切り替えた場合の

表 4.5: 0ns~25ns に含まれる光量

	光量 [p.e.]
全光量	339224
拡散反射	7011
鏡面反射	8260

集光量の不定性は

$$\begin{aligned}
 (\text{集光量の不定性}) &= \frac{\text{拡散反射のみの直接光} - \text{鏡面反射のみの直接光}}{\text{拡散反射のみの直接光}} \\
 &= \frac{(339224 - 7011) - (339224 - 7011)}{339224 - 8260} \\
 &= 0.4\% \tag{4.18}
 \end{aligned}$$

となった。

集光ミラーの反射率の不定性

集光ミラーサンプルの反射率測定には 3.5% の誤差がある。この誤差による集光量の不定性を見積もるため、集光ミラーの反射率を登録した値から $\pm 3.5\%$ 変更して、シミュレーションを行なった。集光ミラーによる集光量の値を表 4.6 にまとめた。この結果から集光ミラー反射率の不定性による集光量の不定性は最大値の 3.1% とした。

表 4.6: 集光ミラーの反射率ごとの集光量と不定性

集光ミラー反射率の変化	集光量 [p.e.]	不定性 [%]
+3.5%	435	3.1
0	422	0
-3.5%	410	2.9

LAB-LS の発光量の不定性

LAB-LS の発光量の測定値には誤差があり、その誤差はおよそ 2.3% であった。集光量は LAB-LS の発光量に比例するとし、集光量の不定性も 2.3% とした。

集光ミラー設置時の位置不定性

実際にプロトタイプ検出器に設置される集光ミラーの座標は、シミュレーションに登録した集光ミラーの座標からずれることが予想される。ここでは実際に集光ミラーが設置される座標は、シミュレーションに登録されている理想的な集光ミラーの座標から x,y,z 方向にそれぞれ 10mm 程度

ずれると仮定した。x,y,z 軸と集光ミラーの座標の関係を図 4.19 に示す。シミュレーションで集光

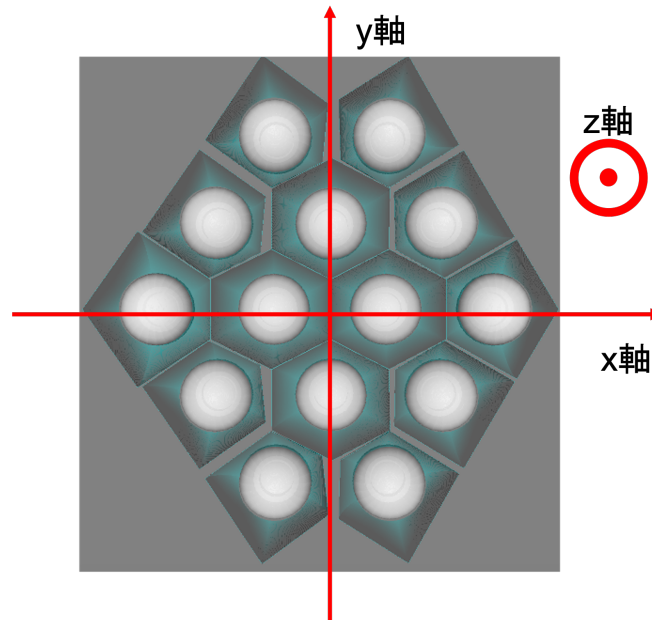


図 4.19: 集光ミラーと x,y,z 軸の関係

ミラー全体を

1. z 軸方向に +10mm
2. z 軸方向に +10mm、x 軸方向に +10mm
3. z 軸方向に +10mm、y 軸方向に +10mm

と動かした際に、集光量がどの程度変化するか見積もった。集光ミラーの位置を変化させた際の集光量を表 4.7 に示す。この結果から集光ミラー設置時の位置不定性による集光量の不定性は最大値の 2.6% とした。

表 4.7: 集光ミラーの設置位置ごとの集光量と不定性

集光ミラーの設置位置の変化	集光量 [p.e.]	不定性 [%]
x=0mm, y=0mm, z=0mm	422	0
x=0mm, y=0mm, z=+10mm	413	2.1
x=+10mm, y=0mm, z=+10mm	411	2.6
x=0mm, y=+10mm, z=+10mm	412	2.4

高量子効率 PMT の量子効率の不定性

プロトタイプ検出器で使用する予定の高量子効率 PMT は量子効率に 10% 程度の不定性がある [16]。そのため量子効率の不定性による、集光量の不定性は 10% とした。

集光量の全不定性

これまで列挙した集光量の不定性とそれら全てを合わせた集光量の不定性を表 4.8 にまとめる。これよりプロトタイプ検出器における集光量の不定性は 11.0% であることがわかった。

またプロトタイプ検出器における集光量の不定性からタイベックによる不定性の効果を差し引くことによって、KamLAND2 における集光量の不定性は 11.0% と見積もられる。ただし KamLAND2 検出器の場合ここで考えた不定性以外に、LAB-LS の吸収、再発光、散乱の不定性や、集光ミラー反射率の角度依存性の不定性なども考慮に入れる必要がある。

表 4.8: 集光量の不定性

	不定性 [%]
タイベックの反射特性	0.4
集光ミラー反射率	3.1
LAB-LS の発光量	2.3
集光ミラーの設置位置	2.6
高量子効率 PMT の量子効率	10
全不定性	11.0

4.3 KamLAND2 の光量評価

KamLAND2 での集光ミラーの集光量を求めるためにシミュレーションを行なった。

4.3.1 シミュレーション条件

KamLAND 検出器中心で 1.0MeV の電子を発生させ、液体シンチレータを LAB-LS、PMT をすべて 20 インチ高量子効率 PMT に変更し、PMT 全てに集光ミラーを取り付けた場合と取り付けた場合の集光量をシミュレーションで求めた。

4.3.2 シミュレーション結果

集光ミラーを取り付けた場合と取り付けた場合の集光量のヒストグラムを図 4.20 に示す。この結果から集光ミラーによる集光率は 2.0 倍ということがわかった。また集光ミラーを取り付け

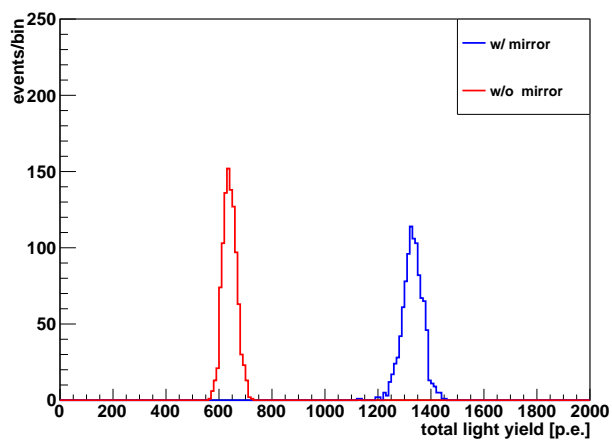


図 4.20: 集光ミラー有無による KamLAND 中心での 1.0MeV 電子による集光量

た場合の、KamLAND 2 における集光量は 1331p.e./MeV となることがわかった。この集光量には前節で求めた 11.0% の不定性がつく。

第 5 章

極低放射能分析感度の評価

プロトタイプ検出器は KamLAND と同様に神岡鉱山の地下 1000m に設置されるため低バックグラウンド環境が期待される。その低バックグラウンドの中でも、主に岩盤からの環境ガンマ線由来のバックグラウンドが問題となることが予想される。高感度な $0\nu\beta\beta$ 探索を実現するためには ^{212}Bi - ^{212}Po による pile-up バックグラウンドに対する対策が必要だが、LAB-LS に含まれる ^{232}Th 量の評価は行われていない。プロトタイプ検出器は十分な量の LAB-LS を使用すれば、 ^{232}Th 量を測定できる可能性がある。そこで 30L という少量の LAB-LS でどの程度 ^{232}Th に対して感度があるかシミュレーションにより確認した。また、LAB-LS の総量を増加させることで ^{232}Th への感度の増加や暗黒物質探索への応用が期待される。

5.1 シンチレーション測定におけるバックグラウンド評価

5.1.1 主なバックグラウンド

プロトタイプ検出器において考えられるバックグラウンドは大きく分けて以下の 3 つである。

- 環境由来の外部放射線： ^{238}U (^{214}Bi)、 ^{232}Th (^{208}Tl)、 ^{40}K
- 内部放射線： ^{238}U (^{214}Bi)、 ^{232}Th (^{208}Tl)、 ^{40}K 、 ^{85}Kr 、 ^{210}Bi 、 ^{210}Po 、 ^{14}C
- 宇宙線ミューオン

このうち宇宙線ミューオンは十分小さいと考えられるため本シミュレーションではバックグラウンド源として扱わなかった。

5.1.2 バックグラウンドシミュレーションの概要

まず、geant4 で構築した岩、空気、ステンレスタンク、PMT のガラス、純水、アクリル容器、液体シンチレータの 7 種類のジオメトリそれぞれに対してそのジオメトリの座標内でランダムに放射性崩壊イベントを発生させた。そしてその放射線崩壊由来のベータ線やガンマ線によるエネルギースペクトルを描いた。

各ジオメトリで発生させた放射性崩壊イベントの種類と放射性不純物濃度またはイベントレートを表 5.1～表 5.3 に記す。液体シンチレータ中では、 ^{238}U 由来の ^{214}Bi , ^{232}Th 由来の ^{208}Tl , ^{40}K , ^{85}Kr , ^{210}Bi , ^{210}Po , ^{14}C を崩壊させた。空気中では ^{222}Rn のみがあるとして ^{214}Bi のみを、それ以外のジオメトリでは、 ^{214}Bi , ^{208}Tl , ^{40}K の 3 種類のみ崩壊させた。図 5.1～図 5.7 に各放射性元素の崩壊図を示す。なおプロトタイプ検出器で用いる LAB-LS の放射性不純物濃度はまだ測定されていないため、本シミュレーションでは KamLAND-LS の放射性不純物によるイベントレートをシミュレーションに用いた。また ^{210}Po の崩壊イベントはクエンチングの効果を加味して、5.3MeV のアルファ線の代わりに 0.464MeV のベータ線を発生させた [27]。

表 5.1: KamLAND-LS の放射性不純物によるイベントレート [Bq/m^3][28]

^{238}U	^{232}Th	^{40}K	^{85}Kr	^{210}Bi	^{210}Po	^{14}C
9.3×10^{-8}	5.9×10^{-8}	1.6×10^{-6}	7.7×10^{-6}	2.2×10^{-4}	2.0×10^{-3}	2.8

表 5.2: 空気中での ^{222}Rn 崩壊イベントレート [Bq/m^3]、KamLAND エリア内ラドンモニター測定

^{222}Rn
3000

表 5.3: その他物質における放射性不純物濃度 [g/g][29]

物質	^{238}U	^{232}Th	^{40}K
アクリル	8×10^{-12}	5×10^{-11}	8.2×10^{-12}
純水	4×10^{-13}	1×10^{-12}	9.6×10^{-12}
ガラス	1.5×10^{-7}	2.4×10^{-7}	1.0×10^{-8}
ステンレス	9×10^{-10}	9×10^{-10}	6×10^{-11}
岩	1.6×10^{-6}	3.8×10^{-6}	1.5×10^{-6}

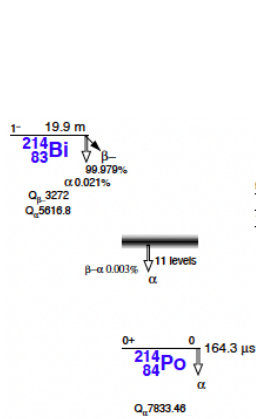


図 5.1: ^{214}Bi の崩壊図 [30]

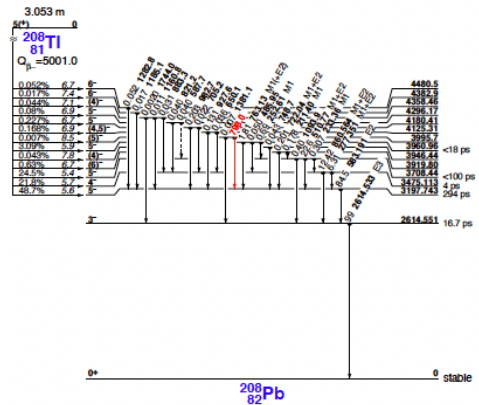


図 5.2: ^{208}Tl の崩壊図 [30]

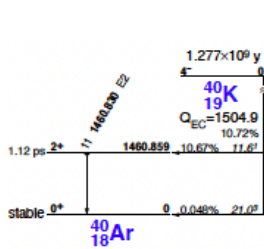


図 5.3: ^{40}K の崩壊図 [30]

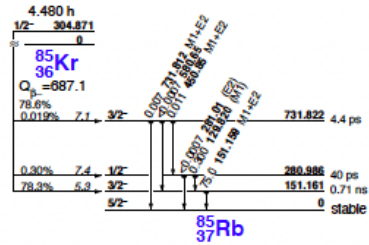


図 5.4: ^{85}Kr の崩壊図 [30]

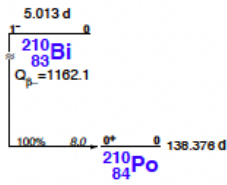


図 5.5: ^{210}Bi の崩壊図 [30]

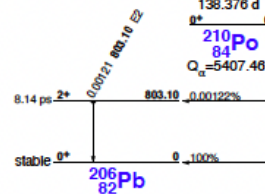


図 5.6: ^{210}Po の崩壊図 [30]

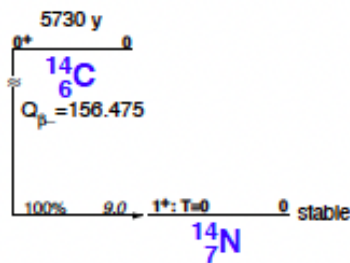


図 5.7: ^{14}C の崩壊図 [30]

5.1.3 バックグラウンドシミュレーションの結果

バックグラウンドシミュレーションにより得られた各ジオメトリにおけるエネルギースペクトルを図 5.8～図 5.14 に、LAB-LS のエネルギースペクトルと LAB-LS 以外のエネルギースペクトルの和を重ねたものを図 5.15 に示す。

これらの結果から主要なバックグラウンド事象は岩からのバックグラウンドであることがわかる。よって以降の感度評価の計算ではバックグラウンド事象は岩からのバックグラウンドのみを扱う。

5.1.4 ^{14}C 濃度の感度評価

^{14}C の pile-up イベントは $0\nu\beta\beta$ のバックグラウンドとなりえるが KamLAND-Zen 実験では問題となっていない。そのため KamLAND2-Zen で使用予定の LAB-LS 中の ^{14}C 濃度は KamLAND-LS の ^{14}C 濃度と同程度かそれ以下が望まれるため、LAB-LS 中の ^{14}C 濃度を確認する必要がある。LAB-LS の ^{14}C 濃度に対してどの程度感度があるかバックグラウンドシミュレーションの結果から見積もる。図 5.16 に ^{14}C のエネルギースペクトル、外部バックグラウンドのエネルギースペクトルおよび ^{14}C と外部バックグラウンドを足し合わせたものを示す。チェレンコフ光の影響を避けるため、Energy window は 50keV～150keV に設定する。この Energy window における外部バックグラウンドのみのイベントレートと外部バックグラウンドと ^{14}C のイベントを足し合わせたイベントレートを表 5.4 に示す。

表 5.4: 50keV～150keV における ^{14}C と外部バックグラウンドのイベントレート

外部バックグラウンド [/day/kg/keV]	4.8
外部バックグラウンド + ^{14}C [/day/kg/keV]	5.7

これらの値から LAB-LS の ^{12}C に対する ^{14}C の割合、 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ は

$$^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = (2.1 \pm 0.1) \times 10^{-17} \quad (5.1)$$

となった。

5.1.5 ^{232}Th 濃度の感度評価

バックグラウンドシミュレーションの結果から LAB-LS の ^{232}Th 濃度の感度評価を行う。 ^{232}Th 濃度の感度評価には図 5.17 に示す Th 系列の $^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{212}\text{Po} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$ の連続崩壊事象を用いる。シミュレーションによって求めたプロトタイプ検出器における ^{212}Bi のエネルギースペクトルを図 5.18、 ^{212}Po のエネルギースペクトルを図 5.19 に示す。なお ^{212}Po を崩壊させるシミュレーションではクエンチングの影響を考え、8.95MeV のアルファ線を発生させる代わりに 1.07MeV の電子を発生させた [27]。

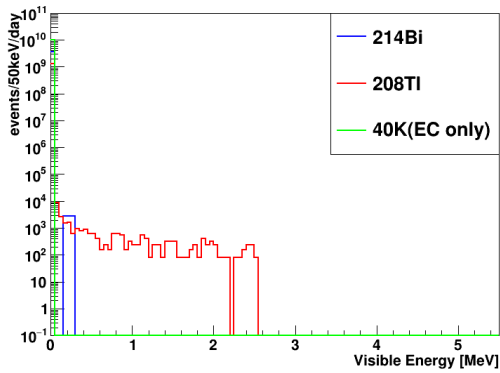


図 5.8: 岩

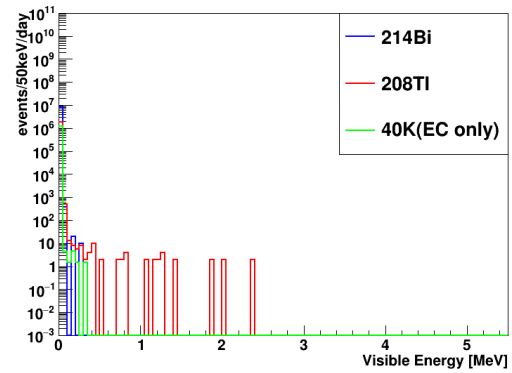


図 5.9: ガラス

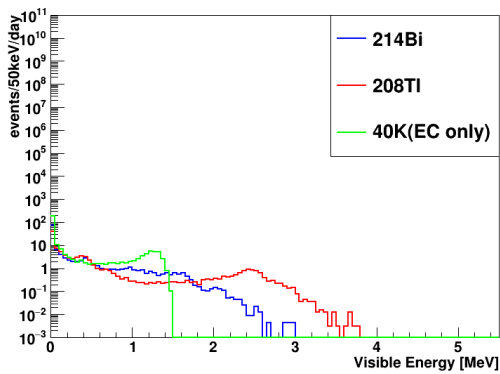


図 5.10: アクリル

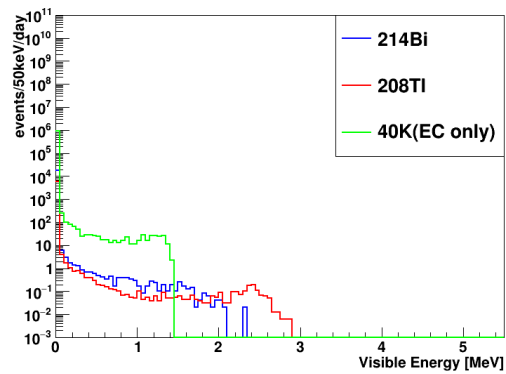


図 5.11: 純水

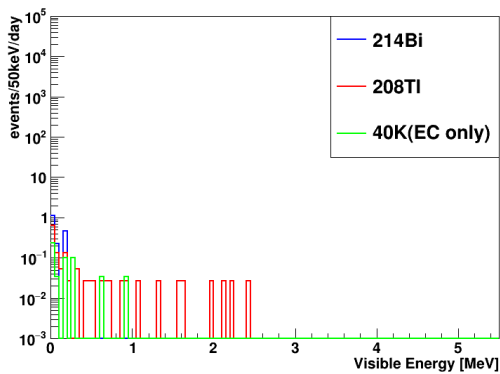


図 5.12: ステンレス

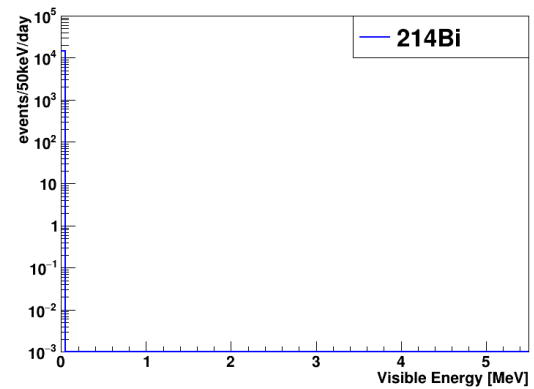


図 5.13: 空気

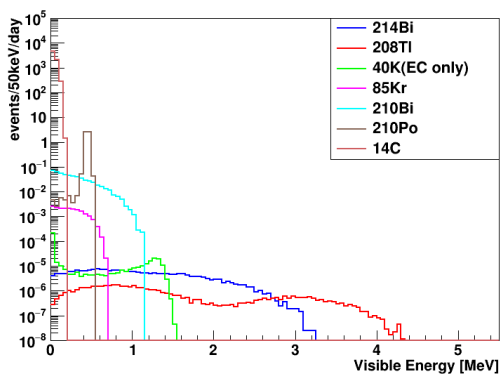


図 5.14: LAB-LS

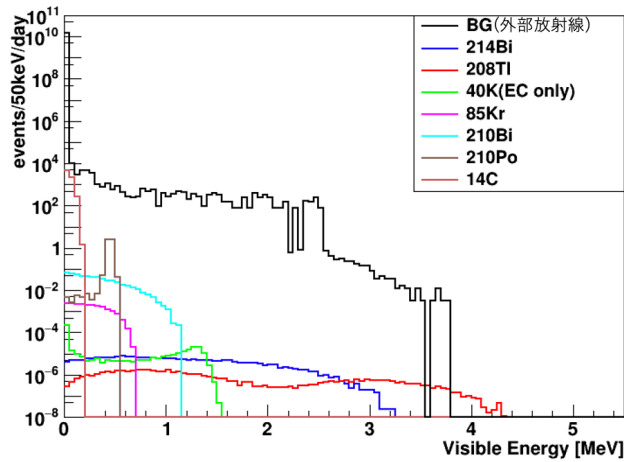


図 5.15: バックグラウンドによるエネルギースペクトル

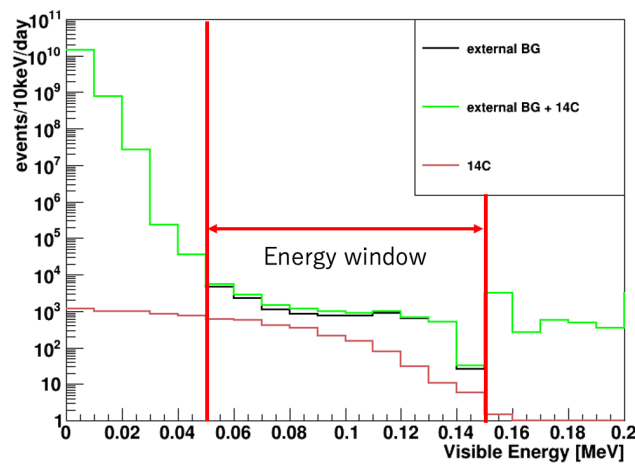


図 5.16: ^{14}C と外部バックグラウンドのエネルギースペクトル

先発信号を $0.5\text{MeV}\sim 2.5\text{MeV}$ とするとこのエネルギー領域のバックグラウンド R_1 は 0.114 Bq である。後発信号を $1.0\text{ MeV}\sim 1.2\text{ MeV}$ とするとこの間のバックグラウンド R_2 は 0.00174 Bq となる。ただし後発信号は粒子識別 (PSD) によりバックグラウンドを $1/10$ に低減できると仮定した。また先発信号の検出効率は 69% 、後発信号の検出効率は 95% となっている。測定の Time window、 Δt を $1\ \mu\text{s}$ とするとアクシデンタルバックグラウンドは以下のように計算することがで

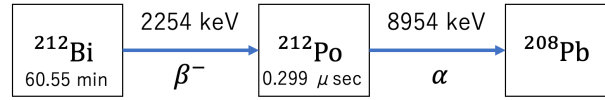


図 5.17: ^{212}Bi の崩壊系列

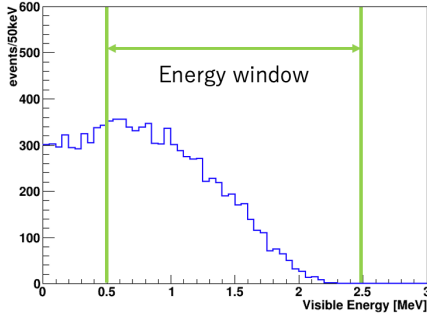


図 5.18: ^{212}Bi のエネルギースペクトル

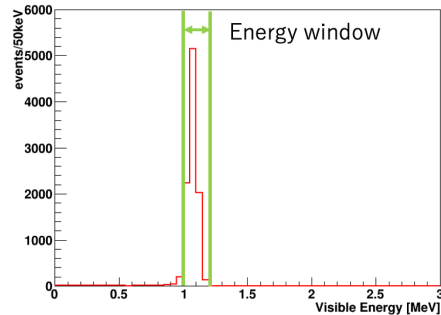


図 5.19: ^{212}Po のエネルギースペクトル

きる。

$$\begin{aligned}
 (\text{アクシデンタルバックグラウンド}) &= R_1 \times R_2 \times \Delta t \\
 &= 0.114 \times 0.00174 \times 1 \times 10^{-6} \\
 &= 1.99 \times 10^{-10} [\text{Bq}] \\
 &= 3.10 \times 10^{-3} [\text{events}/6\text{months}]
 \end{aligned}$$

よって ^{212}Bi 崩壊イベントレート R の上限値は

$$R < 2.44[\text{events}/6\text{months}](90\% \text{C.L.}) \tag{5.2}$$

となる。プロトタイプ検出器で用いる LAB-LS の重量 m_{LS} は 26.2kg であり、単位質量あたりの ^{232}Th の崩壊レート A_{Th} は 4100Bq/g である。 $^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{212}\text{Po}$ の branching ratio、 r は 0.64 である。 ^{212}Bi と ^{232}Th は放射平衡であると仮定すると、プロトタイプ検出器での ^{232}Th 濃度の感度は

$$\begin{aligned}
 ({}^{232}\text{Th} \text{ 濃度の感度}) &= \frac{R}{A_{Th} \times m_{LS} \times r} \\
 &= \frac{2.44 \times \frac{1}{86400 \times 30 \times 6} [\text{Bq}]}{4100 [\text{Bq}/\text{g}] \times 26.2 \times 10^3 [\text{g}] \times 0.64} \\
 &= 2.28 \times 10^{-15} [\text{g}/\text{g}]
 \end{aligned}$$

となる。液体シンチレータに求められる ^{232}Th 濃度は太陽ニュートリノバックグラウンドと同程度の $5.0 \times 10^{-16} [\text{g}/\text{g}]$ [31] であることから、プロトタイプ検出器での ^{232}Th 濃度の感度は 1 桁少な

いことがわかる。この感度を改善するためには LAB-LS の体積を増加させ統計量を増やす必要がある。

LAB-LS の体積を増加させた際、バックグラウンドは体積に比例すると仮定する。LAB-LS の体積を現計画の 5 倍とすると、アクシデンタルバックグラウンドは先ほどの計算と同様に、

$$\begin{aligned} (\text{アクシデンタルバックグラウンド}) &= (R_1 \times 5)(R_2 \times 5)\Delta t \\ &= (0.114 \times 5) \times (0.00174 \times 5) \times 1 \times 10^{-6} \\ &= 7.75 \times 10^{-2} [\text{events}/6\text{months}] \end{aligned}$$

となるため、 ^{212}Bi 崩壊イベントレート R の上限値は式 (5.2) とほとんど変わらない。以上よりプロトタイプ検出器での ^{232}Th 濃度の感度は

$$\begin{aligned} (^{232}\text{Th} \text{ 濃度の感度}) &= \frac{2.44}{86400 \times 30 \times 6 \times 4100 \times 26.2 \times 5 \times 10^3 \times 0.64} \\ &= 4.42 \times 10^{-16} [\text{g}/\text{g}] \end{aligned}$$

となる。よって液体シンチレータの ^{232}Th 濃度要求値の感度を達成するためにはプロトタイプ検出器の液体シンチレータの体積を現行計画の 5 倍程度にする必要がある。

5.2 暗黒物質探索への応用可能性

プロトタイプ検出器の利用法の一つに低バックグラウンド環境を利用した暗黒物質探索への応用が考えられている。具体的には LAB-LS の中に NaI シンチレータを挿入し、NaI シンチレータによる暗黒物質の直接探索を行う。本研究ではシミュレーションによりプロトタイプ検出器が暗黒物質探索実験への感度があるか評価した。

5.2.1 暗黒物質

暗黒物質は質量を持つが電磁波で観測できない未知の粒子であり、スイスの天文学者フリッツ・ツビッキーにより提唱された。暗黒物質の有力な候補として WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) が挙げられる。WIMP は標準理論のエネルギースケールを超えた理論から作られる粒子であり、質量が小さく相互作用が小さいという特性を持つ。WIMP になり得る粒子としてはニュートラリーノ、カルツァクライン粒子などが挙げられる。

5.2.2 DAMA 実験

DAMA 実験は NaI を用いた暗黒物質の直接探索実験であり、暗黒物質信号の季節変動を観測したと主張している。暗黒物質信号に季節変動が起こる仕組みは以下の通りである [32]。地球は太陽の周りを公転しており、太陽系もまた回転している。そのため地球の公転している時期によって暗黒物質に対する相対速度が異なり、相対速度は 6 月に最大となり、12 月に最小となる。暗黒物質に対する相対速度が異なるということは、暗黒物質が検出器中の原子核と衝突する速度が変わり、

原子核の反跳エネルギーが変化するため、暗黒物質信号に季節変動が起こる。DAMA 実験によって得られた暗黒物質信号の季節変動を示したものを図 5.20 に示す。

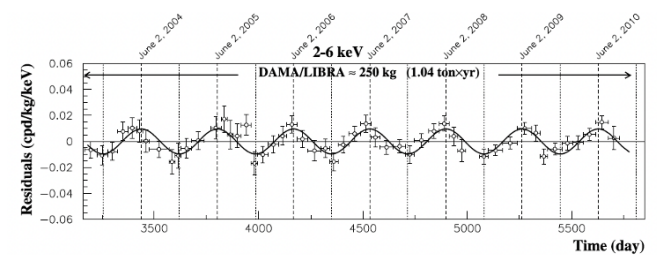


図 5.20: DAMA 実験で得られた暗黒物質信号の季節変動 [34]

5.2.3 シミュレーションの概要

シミュレーションを行うにあたってプロトタイプ検出器の亚克力容器のジオメトリを一辺 35.2cm の立方体から半径 90cm、高さ 180cm の円柱形に変更し LAB-LS の体積を増加させた。さらに液体シンチレータの中心に半径 20cm、高さ 40cm の円筒形の NaI を配置した。このジオメトリの概略図を図 5.21 に示す。これにより暗黒物質探索の感度を上昇させた。この状態で大きな

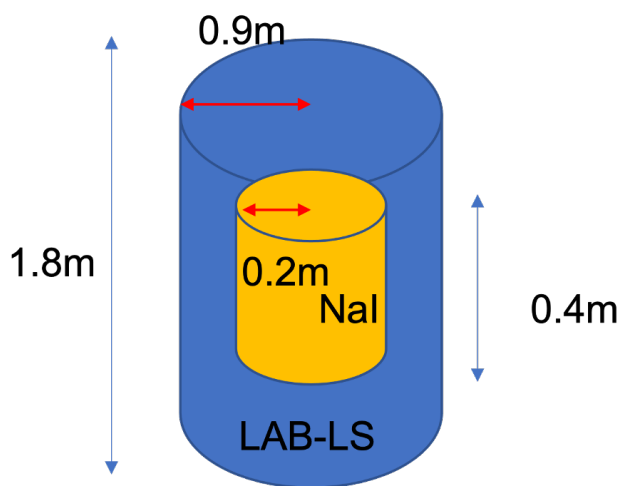


図 5.21: LAB-LS 中に NaI を挿入したジオメトリの概略図

バックグラウンド源と予想される岩と PMT のガラスの 2 つのジオメトリ上で ^{214}Bi , ^{208}Tl , ^{40}K の 3 種類の放射性元素を崩壊させた。その際の LAB-LS および NaI での Energy deposit の値をシミュレーションにより求め、NaI シンチレータでのバックグラウンドの見積もりを行った。この際 NaI で Energy deposit したイベントの中で LAB-LS での Energy deposit が 50 keV 以上のものは active veto が可能であるとしてバックグラウンド事象から取り除いた。なお前節までのシミュ

レーションと異なりシンチレータ等から光子は発生させていない。

5.2.4 シミュレーションの結果

NaI で検出される岩からのバックグラウンドのエネルギースペクトルを図 5.22 にガラスからのバックグラウンドのエネルギースペクトルを図 5.23 に示す。またプロトタイプ検出器による暗黒物質探索で使用予定の NaI の放射性不純物濃度の実測値を表 5.5 に示す [33]。暗黒物質信号数の季節変動を図 5.24 に記す。

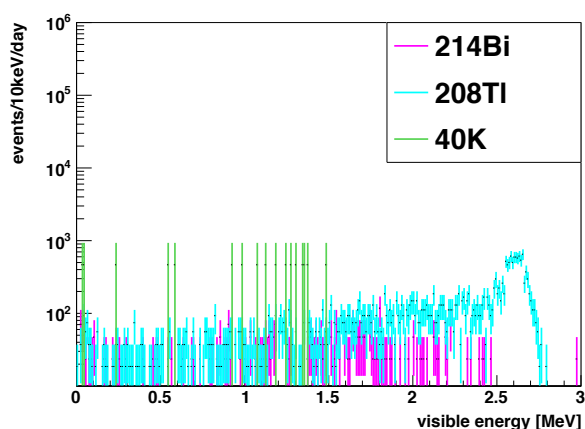


図 5.22: 岩からのバックグラウンド

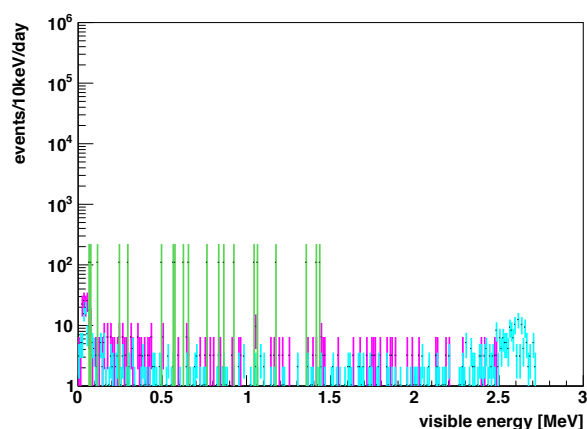


図 5.23: ガラスからのバックグラウンド

表 5.5: NaI に含まれる放射性不純物濃度 [33]

^{40}K [ppb]	< 20
^{232}Th [$\mu\text{Bq}/\text{kg}$]	0.3 ± 0.5
^{226}Ra [$\mu\text{Bq}/\text{kg}$]	1.0 ± 0.4

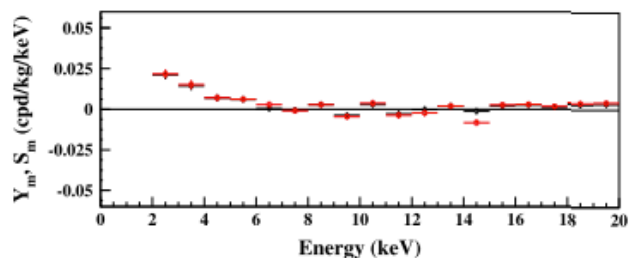


図 5.24: 暗黒物質信号の予測 [34]

2~6 keV におけるバックグラウンドのイベントレートを表 5.6 にまとめた。ただし岩およびガラスからのバックグラウンドは 2keV~6keV における統計が少なかったため、バックグラウンドがフラットであると仮定して 0~100keV のイベントを用いた。

表 5.6: バックグラウンドのイベントレート (2~6 keV)

バックグラウンド [events/keV/kg/day]	2.22
------------------------------	------

2-6keV におけるバックグラウンドのイベントレートを R 、観測時間を t 、NaI の質量を m_{NaI} 、Energy window を ΔE とすると観測されるバックグラウンド数 N は以下の式で表される。

$$N = Rtm_{\text{NaI}}\Delta E \quad (5.3)$$

暗黒物質信号の季節変動に対する感度を評価する。測定期間を 1 年間とし期待信号数の多い期間 A と少ない期間 B の 2 つ (各 6 ヶ月間) にわける。期間 A、B のバックグラウンドイベント数とその誤差をそれぞれ N_A , N_B , ΔN_A , ΔN_B とするとそれぞれの値は式 (5.3) より

$$N_A \pm \Delta N_A = N_A \pm \sqrt{N_A} = 291890 \pm 546 \quad (5.4)$$

$$N_B \pm \Delta N_B = N_B \pm \sqrt{N_B} = 291890 \pm 546 \quad (5.5)$$

となる。ただし $R = 2.22/\text{day}/\text{kg}/\text{keV}$ 、 $t = 182.5\text{day}$ 、 $m_{\text{NaI}} = 184\text{kg}$ 、 $\Delta E = 4\text{keV}$ とし、誤差はバックグラウンドの統計誤差のみであると仮定した。暗黒物質信号の季節変動による信号のイベントレートの変化は図 5.24 より $2.0 \times 10^{-2} [\text{day}/\text{kg}/\text{keV}]$ であり、事象数の変化は 2676 となりバックグラウンドイベント数の誤差 546 よりも十分に大きい。このため、暗黒物質信号の季節変動を検証できるバックグラウンド量に抑えることができたと言える。

まとめ

NaI を設置し、液体シンチレータを増量したプロトタイプ検出器を応用することによって、DAMA 実験の検証に必要な感度が得られることがわかった。

第 6 章

まとめと今後の展望

20 インチ高量子効率 PMT の水中での長期安定性評価

本研究では KamLAND2-Zen およびプロトタイプ検出器で使用予定の 20 インチ高量子効率 PMT の水中での長期安定性評価を行なった。

ダークレートの約 2 ヶ月間の測定により 1p.e. 相当の電荷量が誤差の範囲内で安定していることを確認した。

しかし純水中でバクテリアが繁殖してしまい、純水の透過率、ダークレートの安定性を確認することができなかった。またプロトタイプ検出器に純水を入れ測定を開始する際は窒素バージ、紫外線ランプ照射、循環ラインにフィルターを設置、透過率をモニターし、悪化の兆候が見られれば純水を入れ替えるといった対策が必要なことを示した。

シミュレーションによる光量評価

本研究ではプロトタイプ検出器のシミュレーションツールを構築し、プロトタイプ検出器の光量評価や集光ミラー、LAB-LS、20 インチ高量子効率 PMT の集光率の評価を行なった。先行研究では集光ミラーのジオメトリがアルミニウム単体だったが、アクリルシリコン樹脂系塗料とアルミニウムの 2 層構造のジオメトリに変更した。反射率は理論式が登録されていたが、ミラーサンプルの反射率を実測し、実測値を用いて理論式をスケール倍したものを反射率として登録することでより現実に近い集光ミラーの反射を再現した。

シミュレーションの結果 KamLAND 中心の発光に対して集光ミラーの集光率は 2.0 倍となることがわかった。LAB-LS による集光率は 1.4 倍、20 インチ高量子効率 PMT による集光率は 1.9 倍としてこのときのエネルギー分解能 $\Delta E/\sqrt{E[\text{MeV}]}$ は、KamLAND-Zen 400 実験におけるエネルギー分解能 $6.4\%/\sqrt{E[\text{MeV}]}$ を用いて

$$\frac{6.4\%}{\sqrt{E[\text{MeV}]}} \times \frac{1}{\sqrt{5.32}} = \frac{2.9\%}{\sqrt{E[\text{MeV}]}} \quad (6.1)$$

と求められる。

$0\nu\beta\beta$ のバックグラウンドの一つである $2\nu\beta\beta$ 信号のイベント数 $N_{2\nu}$ は ΔE と以下の関係にある [35]。

$$N_{2\nu} \propto (\Delta E)^{5.8} \quad (6.2)$$

さらに $2\nu\beta\beta$ 以外のバックグラウンドによる信号 N_{others} は $0\nu\beta\beta$ エネルギー領域内でフラットな形であると仮定すると

$$N_{others} \propto \Delta E \quad (6.3)$$

のように減少すると考えられる。式 (6.2)、(6.3) より $0\nu\beta\beta$ 信号が得られなかった場合の達成感度は

$$T_{1/2}^{0\nu} \propto \frac{1}{\sqrt{N_{2\nu} + N_{others}}} \quad (6.4)$$

の関係から KamLAND-Zen 実験の 1.5 倍と見積もることができる。

シミュレーションによりプロトタイプ検出器のエネルギー分解能が $3.4\% \sqrt{E[\text{MeV}]}$ であることがわかった。

極低放射能分析感度の評価

バックグラウンドシミュレーションを行い、プロトタイプ検出器の LAB-LS に対する ^{232}Th 量の感度が $2.3 \times 10^{-15} \text{g/g}$ と見積もられ、LAB-LS に要求される ^{232}Th 濃度 $5.0 \times 10^{-16} \text{g/g}$ まで感度を向上させるためには LAB-LS の体積を現行計画の 5 倍程度にする必要がある。

付録 A

U、Th 系列

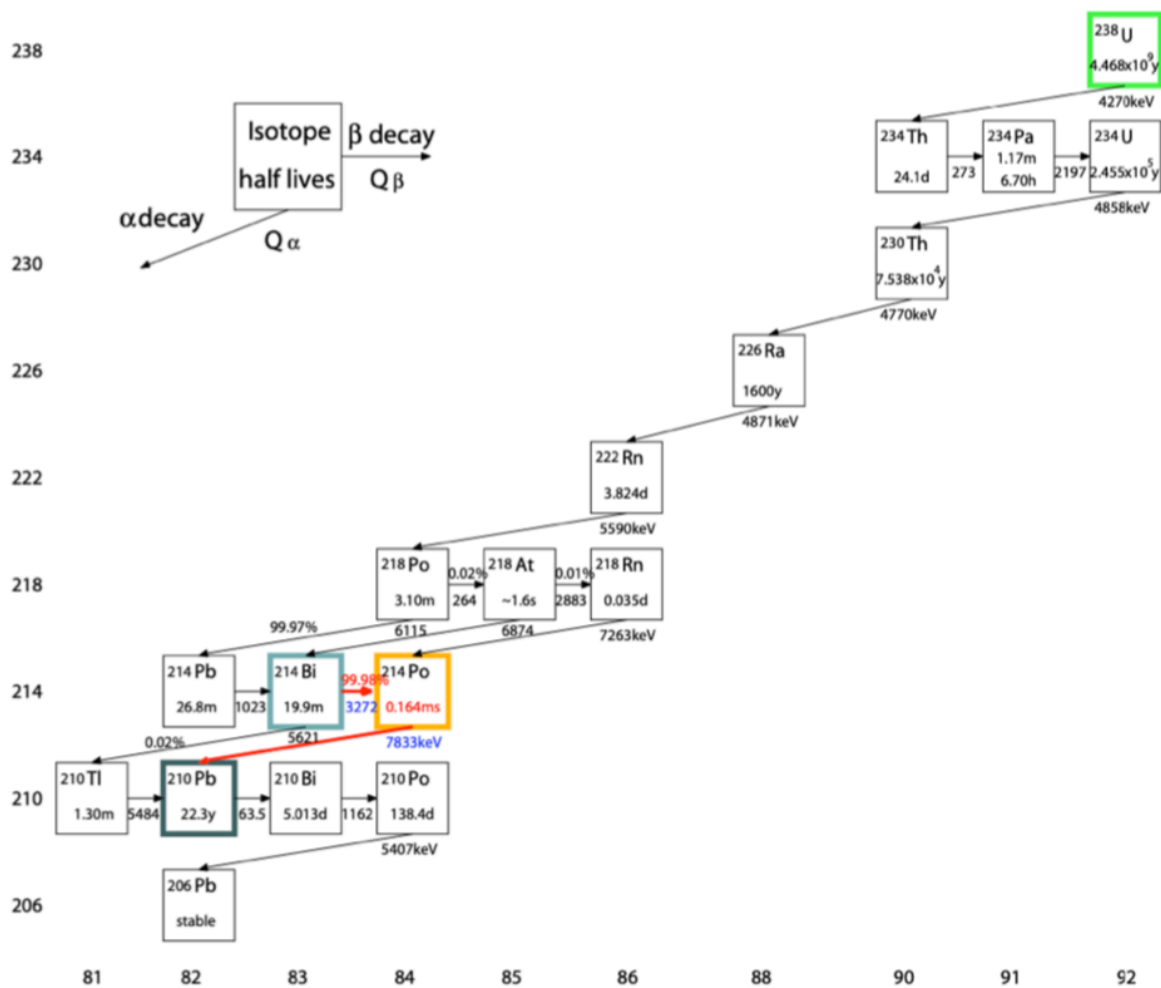


図 A.1: ^{238}U 崩壊系列

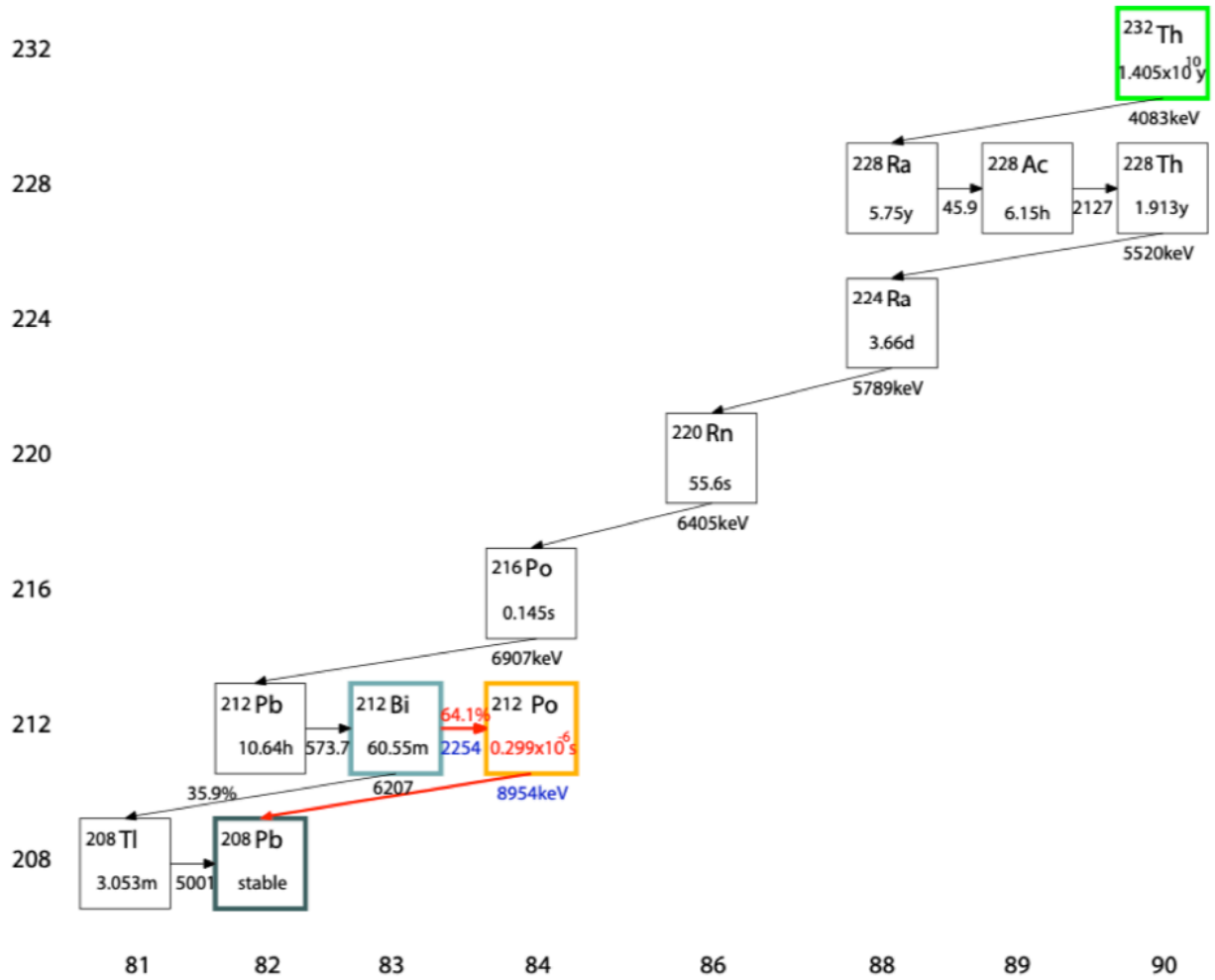


図 A.2: ^{232}Th 崩壊系列

参考文献

- [1] Bruce T. Cleveland *et al.*, “Measurement of the Solar Electron Neutrino Flux with the Homestake Chlorine Detector”, *Astrophys. J.*, Vol. 496, p.505 (1998)
- [2] K.S. Hirata *et al.* , “Observation of a small atmospheric ν_μ/ν_e ratio in Kamiokande”, *Phys.Lett.B*, Vol. 280, p.146 (1992)
- [3] Y.Fukuda *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration) , “Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos”, *Phys.Rev.Lett.* **81**, 1562 (1998)
- [4] S.N.Ahmed *et al.* (SNO collaboration), “Measurement of the Total Active ^8B Solar Neutrino Flux at the Sudbury Neutrino Observatory with Enhanced Neutral Current Sensitivity”, *Phys.Rev.Lett.* **92**, 181301 (2004)
- [5] A. Gando *et al.*, “Reactor on-off antineutrino measurement with KamLAND”, *Phys.Rev.D* **88**, 033001(2013)
- [6] M. Aker *et al.* (KATRIN Collaboration), “An improved upper limit on the neutrino mass from a direct kinematic method by KATRIN”, arXiv:1909.06048 (2019)
- [7] P. A. R. Ade *et al.* (Planck Collaboration), “Planck intermediate results XVI. Profile likelihoods for cosmological parameters”, *Astron. Astrophys* **A54**, 566 (2014)
- [8] T. Yanagida, “Horizontal Symmetry and Masses of Neutrinos”, *Prog. Thor. Phys.* **28**, 870 (1980)
- [9] D. Q. Adams *et al.* (CUORE Collaboration), “Improved Limit on Neutrinoless Double-Beta Decay in ^{130}Te with CUORE”, *Phys.Rev.Lett.* **124**, 122501 (2020)
- [10] M. Agostini *et al.* (GERDA Collaboration), “Final Results of GERDA on the Search for Neutrinoless Double- β Decay”, *Phys.Rev.Lett.* **125**, 252502 (2020)
- [11] G. Anton *et al.* (EXO-200 Collaboration), “Search for Neutrinoless Double- β Decay with the Complete EXO-200 Dataset”, *Phys.Rev.Lett.* **123**, 161802 (2019)
- [12] A. Gando,*et al.*, “Search for Majorana Neutrinos Near the Inverted Mass Hierarchy Region with KamLAND-Zen”, *Phys.Rev.Lett.* **117**, 082503 (2016)
- [13] 後藤 杏奈, “KamLAND2-Zen：大光量液体シンチレータ開発”, 日本物理学会 2021 年秋季大会
- [14] 小原 修平, “KamLAND-Zen における ^{214}Bi バックグラウンド除去のための発光性バルーン

- フィルムの開発研究”, 修士論文, 東北大学, (2015)
- [15] Wang Ling-Yu, *et al.*, “Study of Tyvek reflectivity in water”, DOI : 10.1088/1674-1137/36/7/011 (2012)
- [16] K. Abe, *et al.*, “Hyper-Kamiokande Design Report”, arXiv:1805.04163 (2018)
- [17] 尾崎 秀義, “カムランド外水槽チェレンコフ検出器の刷新と性能向上”, 修士論文, 東北大学, (2016)
- [18] “DS2477 SP5601 Led Driver - Data Sheet”, (2014)
- [19] 朝倉 康太, “KamLAND-Zen 次期計画へ向けた新型 PMT の性能研究”, 修士論文, 東北大学, (2015)
- [20] 立花 創, “KamLAND2-Zen のための集光ミラーの研究開発”, 修士論文, 東北大学, (2015)
- [21] S. Fukuda, *et al.*, “The Super-Kamiokande detector”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Vol. 501, p.418 (2003)
- [22] S. Agostinelli, *et al.*, “Geant4—a simulation toolkit”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Vol. 506, p. 250 (2003)
- [23] 蜂谷 尊彦, “KamLAND2-Zen における液体シンチレータの時間応答性の影響評価”, 日本物理学会第 71 回年次大会
- [24] Y. Zhang *et al.*, “A complete optical model for liquid-scintillator detectors”, arXiv:2003.12212 (2020)
- [25] G. Testera, “Performances of underground detectors based on organic liquid scintillators”, *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, Vol. 78, p.120 (1999)
- [26] 三本杉 洸斗, “KamLAND2-Zen 実験のための集光ミラーの形状最適化”, 修士論文, 東北大学, (2021)
- [27] B. von Krosigk *et al.*, “Measurement of α -particle quenching in LAB based scintillator in independent small-scale experiments”, , arXiv:1510.00458 (2015)
- [28] A. Gando *et al.* (KamLAND Collaboration), “ ^7Be solar neutrino measurement with KamLAND”, *Phys. Rev. C* **92**, 055808 (2015)
- [29] “Collection of Radio Activity Measurements for KamLAND”, (2011 年 7 月 26 日)
- [30] R. Firestone *et al.*, “Table of Isotopes Eighth Edition”
- [31] Y. Gando, “First results of KamLAND-Zen 800”, TAUP2019
- [32] 帝釋 稜介, “方向に感度のある暗黒物質探索実験におけるバックグラウンドの研究”, 修士論文, 神戸大学, (2017)
- [33] K. Kotera, “BG measurement results of high purity NaI(Tl) crystals”, KamLAND collaboration meeting (2021)
- [34] R. Bernabei *et al.*, “Final model independent result of DAMA/LIBRA-phase1”, *Eur. Phys. J. C* **73**, 2648 (2013)
- [35] A. Piepke, “Double Beta Decay Experiments”, *Nucl. Phys. A. C* 752 (2005)

謝辞

本論文の執筆にあたり多くの方々にお世話になりました。この場をお借りして深く感謝を申し上げます。

まずセンター長の井上邦雄先生には、大変恵まれた環境で研究できる機会を与えて頂きました。修士論文の発表練習の際には、自分では気づけないような様々なご指摘やご質問をいただきました。ご指摘によって修士論文をより良いものにすることができました。ありがとうございました。

指導教官である清水格先生には本論文の執筆にあたり大変お世話になりました。物理学や実験手法の知識に乏しい私に対し、様々な助言や的確な指示をくださり本研究をより良いものにすることができました。また私の都合で清水先生の休日中に修士論文の添削をお願いしてしまい、大変申し訳ありませんでした。最後までご指導いただき誠にありがとうございました。

岸本康宏先生には毎週行っていた液シンミーティングでお世話になりました。ミーティングでの岸本先生の助言やご指摘は、スーパーカミオカンデの経験から来るものも多くとても参考になりました。ありがとうございました。

市村晃一先生にはおもにプログラミング関係でお世話になりました。私自身本研究で使用したシミュレーションツールである Geant4 の知識に乏しく、研究を開始した当初はわからないことがたくさんありましたが市村先生はそんな私の初歩的な質問にも快く答えてくださりました。とくに集光ミラーのジオメトリは市村先生の助けがなければ完成できませんでした。ありがとうございました。

先輩の皆様にも多くのことを教えていただきました。特に実験器具の操作方法や測定方法などを教えていただく際には付きっきりで指導していただき、とても助かりました。同期の皆様も大変優秀で、日々のたわいない会話が研究をする上で支えとなりました。ありがとうございました。後輩の皆様はコロナウイルスの影響であまり多くの交流の機会がありませんでしたが、研究の息抜きに付き合ってくれた方などいて、皆様のおかげで研究生活がより楽しいものとなりました。

最後になりますが、ニュートリノ科学研究センターの皆様など多くの方々には大変お世話になりました。改めて感謝の意を表します。