

β 崩壊から見るニュートリノ質量測定

京都大学 理学部 理学科 2023 年度課題研究 P2

鴛原泰輝 林洸樹 三木幸大

2024 年 6 月 3 日

概要

1998年、梶田隆章氏の大気ニュートリノ振動測定によりニュートリノがわずかに質量を持つことが確認されて以来、多くの実験がその質量測定に取り組んできた。最新の研究によりその質量二乗差と質量上限は明らかにされたものの未だ質量自体の値は明らかではない。本研究は β^- 崩壊に伴って生じる電子のエネルギーがニュートリノの質量によって影響を受けることを利用し、 ^{147}Pm 線源から生じる電子のエネルギー分布を精密に測定することで反電子ニュートリノの有効質量測定を試みるものである。

^{147}Pm の β 崩壊で生じる電子のエネルギーはプラスチックシンチレータによって測定された。ここで用いるプラスチックシンチレータはコンプトン散乱を用いた方法によって較正された。ニュートリノ質量はシミュレーションによって作成されたモデル分布と観測分布を比較することによって測定された。

最終的に計算されたモデル分布と観測分布は十分に一致せず、ニュートリノに質量制限をかけることはできなかった。ただし本研究の課題改善に向けた新たな方向性は明確であり将来的にはニュートリノに質量制限をかけるという目標を達成する見込みである。

目次

1	序論	3
1.1	電子エネルギーの確率分布	3
1.2	PMNS 行列	4
1.3	ニュートリノの質量獲得機構	5
2	装置・手法	6
2.1	実験の概要・実験方法	6
2.2	観測装置と線源の選択	7
2.3	ニュートリノ質量依存性シミュレーション	9
2.4	観測装置性能評価実験	10
2.5	[実験 A] β 線エネルギー測定実験	12
2.6	[実験 B] プラスチックシンチレータ較正実験	13
2.7	[実験 C] NaI シンチレータ較正実験	15
2.8	Geant4 によるシミュレーション	16
2.9	分布の適合度検定 (Kolmogorov-Smirnov 検定)	16
2.10	ニュートリノ質量検定	17
3	結果	17
3.1	[実験 A] β 線エネルギー測定実験の結果	17
3.2	[実験 B] プラスチックシンチレータ較正実験の結果	17
3.3	[実験 C] NaI シンチレータ較正実験の結果	19
3.4	ノイズ計測実験の測定結果	21
4	解析	21
4.1	NaI シンチレータ PMT の応答モデル化	21
4.2	プラスチックシンチレータ較正実験のデータ解釈と分布モデル化	24
4.3	プラスチックシンチレータ較正解析の理論	29
4.4	プラスチックシンチレータの応答モデル化	31
4.5	ノイズデータの取り扱い	33
4.6	シミュレーションモデルデータの取り扱い	33
4.7	再現モデルと観測モデルの比較	34
5	考察	35
5.1	課題と改善	35
5.2	展望	36
6	結論	36
	謝辞	37

1 序論

1998年、梶田隆章氏の大気ニュートリノ振動測定によりニュートリノがわずかに質量を持つことが確認された。これは既存の理論の主張を覆す発見であり、我々の物理に対する理解がより深まるきっかけとなる出来事であった。以降多くの実験がニュートリノの質量測定に取り組んできた。最新の研究によりその質量二乗差と質量上限は明らかになったが、未だ質量自体の測定には成功していない。ニュートリノ質量は現代の素粒子物理学が直面する最新の物理テーマの一つなのである。

ニュートリノに関わる身近な物理現象として β 崩壊が挙げられる。 β -崩壊に伴って生じる電子のエネルギーは反電子ニュートリノの質量によって影響を受けるのだ。この現象はニュートリノの質量測定に応用することが可能であり、これが本研究の動機である。同様の原理を用いた過去のニュートリノ質量測定実験としてKATRIN実験が知られている、その中で反電子ニュートリノの質量は $m_\nu^2 = 0.26 \pm 0.34$ eVと測定された。¹

本研究が過去の類似実験を上回る成果を出さなかった場合であっても学生実験の範囲でどこまでニュートリノに質量制限を課することができるのかという問いには興味がある。ニュートリノを除き現在知られている素粒子の中で最も軽いものは電子の511 keVである。ニュートリノの質量が5 keVを下回る場合、それはレプトンの質量階層性を表し理論モデルに一定の示唆を与える。本研究は5 keV単位でのニュートリノ質量測定を目標として設定した。この目標達成のため、¹⁴⁷Pm線源から生じる電子のエネルギー分布を精密に測定することで反電子ニュートリノの有効質量測定を試みる。

1.1 電子エネルギーの確率分布

β 崩壊から生じる電子のエネルギーの確率分布は次式で与えられる。²

$$N(E_e) = p_e W_e (Q - E_e) [(Q - E_e)^2 - m_\nu^2]^{1/2} F(Z, W_e) C(E_e) \quad (1.1)$$

m_e : 電子質量

m_ν : 反電子ニュートリノの質量

p_e : 電子の運動量

W_e : 規格化された電子のエネルギー ($= (E_e + m_e c^2) / m_e c^2$)

Q : 崩壊の Q 値

E_e : 電子の運動エネルギー

$F(Z, W_e)$: Fermi補正関数, 原子核内のクーロン相互作用の効果を補正する

Z : 生成核種の原子番号

$C(E_e)$: スペクトル補正因子, ¹⁴⁷Pmの場合定数

なおFermi補正関数は次式で与えられる。

$$F(Z, W_e) = 2(1 + \gamma)(2p_e R)^{2\gamma-2} e^{\pi y} \frac{|\Gamma(\gamma + iy)|^2}{(\Gamma(2\gamma + 1))^2} \quad (1.2)$$

$$\gamma = [1 - (\alpha Z)^2]^{1/2}$$

$$y = \alpha Z W_e / p_e$$

$$\alpha = 1/137.04 : \text{微細構造定数}$$

$R = 1.43 \times 10^{-13} A^{1/3}$: 娘核半径

ガンマ関数の漸近展開より,

$$\begin{aligned}\ln\Gamma(z) &= \ln \left[\sqrt{\frac{2\pi}{z}} z^z e^{-z} \left(1 + \frac{1}{12z} + o(z^{-2}) \right) \right] \\ &= \left(z - \frac{1}{2} \right) \ln z - z + \frac{1}{2} \ln 2\pi + \frac{1}{12z} + o(z^{-2})\end{aligned}\quad (1.3)$$

$z = x + iy$ と置き換えれば,

$$\ln|\Gamma(x + iy)|^2 = \left(x - \frac{1}{2} \right) \ln(x^2 + y^2) - 2y \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) - 2x + \ln 2\pi + \frac{x}{6(x^2 + y^2)} + o(z^{-2}) \quad (1.4)$$

こうしてウィルキンソンの近似式を得る.³ これを用いることで確率分布を数値的に計算することができる.

$m_\nu = 0$ のときの分布関数 (式 1.1) を $N_0(E_e)$ と書く. $m_\nu \ll Q - E_e$ の条件で,

$$\begin{aligned}N(E_e) - N_0(E_e) &= p_e W_e (Q - E_e) \left[(Q - E_e)^2 - m_\nu^2 \right]^{1/2} F(Z, W_e) - N_0(E_e) \\ &= p_e W_e F(Z, W_e) \left[(Q - E_e)^2 - \frac{m_\nu^2}{2} + o(m_\nu^4) \right] - p_e W_e (Q - E_e)^2 F(Z, W_e) \\ &= -\frac{m_\nu^2}{2} p_e W_e F(Z, W_e) + o(m_\nu^4)\end{aligned}\quad (1.5)$$

本実験はこの差の測定を目指す.

1.2 PMNS 行列

ニュートリノのフレーバー固有状態を $|\nu_f\rangle$ ($f = e, \mu, \tau$), 質量固有状態を $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$) とする. PMNS 行列は次のように定義される,

$$|\nu_f\rangle = U_{\text{PMNS}} |\nu_i\rangle \quad (1.6)$$

$$\begin{aligned}U_{\text{PMNS}} &= (U_{fi}) \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{13}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}\end{aligned}\quad (1.7)$$

ここで $c_{ij} \equiv \cos\theta_{ij}$, $s_{ij} \equiv \sin\theta_{ij}$ である.

反ニュートリノについても同様にユニタリ行列 U_{ij} を用いて, $\bar{\nu}_e = U_{11}\bar{\nu}_1 + U_{12}\bar{\nu}_2 + U_{13}\bar{\nu}_3$ と書ける. 質量固

有状態 1, 2, 3 の質量固有値を m_1, m_2, m_3 で表し, $N_1(E_e), N_2(E_e), N_3(E_e)$ を各ニュートリノ質量から計算される規格化された β 崩壊電子エネルギーの確率密度関数とする. このとき観測される電子エネルギー分布 $N(E_e)$ は以下のように書ける,⁴

$$N(E_e) = U_{11}^* U_{11} N_1(E_e) + U_{12}^* U_{12} N_2(E_e) + U_{13}^* U_{13} N_3(E_e) \quad (1.8)$$

よって電子のエネルギー分布からユニタリ行列成分の絶対値と質量固有値について6つの物理量を知ることができる. ただし本実験では結果をこれらのパラメータで再現しない. $\bar{\nu}_e$ をある質量固有値 $m_{\text{effective}}$ を持つ質量固有状態として扱う. このとき $m_{\text{effective}}$ を有効質量とよびユニタリ行列が対角に近い場合にはある質量固有値とほとんど一致することが期待される.

1.3 ニュートリノの質量獲得機構

ニュートリノの質量絶対値は未だ測られておらずその質量獲得機構も明らかではない. ここではニュートリノの質量獲得について有力な候補として知られる理論を紹介する.

1.3.1 湯川相互作用項

右巻きのニュートリノが存在する場合, ニュートリノはヒッグスとの結合によって理論の $SU(2)_L$ 対称性を保ちながら Dirac 質量を持つことができる.

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = Y_\nu \begin{pmatrix} \bar{\nu}_L \\ \bar{e}_L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{pmatrix} \nu_R + h.c. \quad (1.9)$$

これは荷電レプトンやクォークと同じ質量機構である. $SO(10)$ 大統一理論や Pati-Salam 模型で導入される対称性を考慮する場合この質量項はアップ系列クォークと同じオーダーを持つことが期待される.⁵ ただし右巻きニュートリノの検出は極めて困難であり現在その存在は明らかではない.

1.3.2 マヨラナ質量項

粒子と反粒子が同じ性質を持つ中性粒子をマヨラナ粒子という. ニュートリノがマヨラナ粒子である場合ニュートリノはマヨラナ質量項によって質量を獲得することが可能である.

$$\mathcal{L}_{\text{majorana}} = m \bar{\nu}_L^C \nu_L + h.c. \quad (1.10)$$

C は荷電共役を表す. マヨラナ粒子は $U(1)$ 位相変換が制限されるためこの場合ニュートリノはあらゆる保存数を失う. またマヨラナニュートリノは磁気モーメントを持たないことが知られている,⁴ ニュートリノの磁気モーメントは非常に小さく未だ発見されていない.⁶

1.3.3 シーソー機構

ニュートリノが自然に軽い質量を獲得する機構が存在する。

$$\mathcal{L}_{\text{seesaw}} = (\bar{\nu}_L \quad \bar{N}_R) \begin{pmatrix} 0 & m_D \\ m_D & M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_L \\ N_R \end{pmatrix} + h.c. \quad (1.11)$$

ただし N_R は新たな右巻きのニュートリノであり, $m_D \simeq m_e, m_D \ll M$ が成り立つものとする. このとき現れる質量固有値 m は,

$$\begin{aligned} m &= \frac{M \pm \sqrt{M^2 + 4m_D^2}}{2} \\ &\simeq \frac{M}{2} \pm M \left(1 + \frac{2m_D^2}{M^2} \right) \\ &= M(1 + O(\theta^2)), - \left(\frac{m_D}{M} \right)^2 (1 + O(\theta^2)) \end{aligned} \quad (1.12)$$

ここで $\theta = m_D/M$ である. こうして重い質量固有状態と軽い質量固有状態*1が生じる. 特に前者はステライルニュートリノと呼ばれダークマターの候補の一つである.

2 装置・手法

2.1 実験の概要・実験方法

本実験はシンチレータを用いた β 線エネルギー測定を基本原理とする. この測定を中心として, 本実験は主に次の3つの測定で構成される.

[実験 A] β 線エネルギー測定実験

[実験 B] プラスチックシンチレータ較正実験

[実験 C] NaI シンチレータ較正実験

実験 A は β 線のエネルギー分布計測実験である. 実験 B は実験 A で用いるプラスチックシンチレータの較正実験である. 実験 C は実験 B で使用する NaI シンチレータの較正実験である. 実験 A の解析には実験 B のデータが必要であり, 実験 B の解析には実験 C のデータが必要であるという階層構造になっている. そのため各測定器の時間変動効果の補正が重要であり, 実験 A から C を表 1 の順序で組み合わせて実施する. また実験の前後でノイズ計測を行い解析に活用した.

*1 負の符号は固有状態の位相で吸収できる.⁵

表 1: 実験順序と実施時間

測定	実施時間
ノイズ測定	5h16min
NaI シンチレータ較正実験 (1)	25min
プラスチックシンチレータ較正実験 (1)	4h54min
NaI シンチレータ較正実験 (2)	26min
プラスチックシンチレータ較正実験 (2)	1h2min
NaI シンチレータ較正実験 (3)	23min
β 線エネルギー測定実験	33min
プラスチックシンチレータ較正実験 (3)	5h7min
NaI シンチレータ較正実験 (4)	25min
プラスチックシンチレータ較正実験 (4)	4h38min
NaI シンチレータ較正実験 (5)	27min
ノイズ測定	5h10min

実験を行うにあたり事前にプラスチックシンチレータ, NaI シンチレータおよび光電子増倍管 (以下 PMT と表記) の応答の時間変動効果を確認する測定を行なった. またニュートリノの質量効果によって観測される β 線エネルギー分布がどのように変化するかをシミュレーションによって確認した.

2.2 観測装置と線源の選択

2.2.1 Pm 線源

β 線源として ^{147}Pm (日本アイソトープ協会; 211 タイプ, 100MBq) を使用した. これは以下の点で優れている.

- ^{147}Pm の β 崩壊 Q 値は 224.1 keV であり, ニュートリノ質量による効果が容易に見れる.
- 99.99% の確率で β^- 崩壊を起こし ^{147}Sm 基底状態に遷移するため, 観測上のノイズが少ない.

^{147}Sm は ^{143}Nd へ α 崩壊するが, この半減期はおおよそ 1.06×10^{11} 年と長く α 線の影響は無視した. 崩壊モードを以下に示す*2,

*2 National Nuclear Data Center より引用.

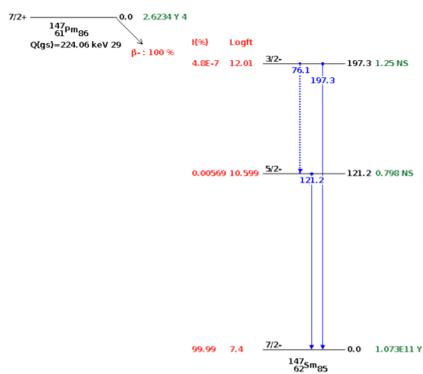


図 1: ^{147}Pm から ^{147}Sm への崩壊分岐

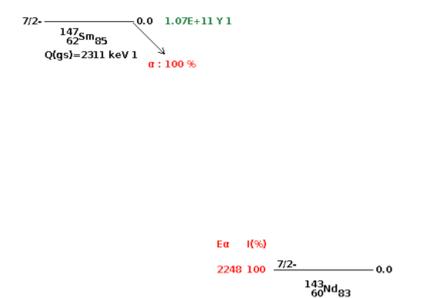


図 2: ^{147}Sm から ^{143}Nd への崩壊分岐

2.2.2 β 線検出装置

β 線の検出装置として、プラスチックシンチレータ (G-tech 社製 EJ-200; 直径 30 mm, 厚さ 5 mm の円柱形に加工したもの) を採用した。これは以下の点で優れている。

- ・ 空気中での取り扱いが容易である。
- ・ 信号の応答が早い。

プラスチックシンチレータは表面に反射剤 (アルミマイラーシート; 厚さ 12 μm) を貼付した上で PMT (浜松ホトニクス社製 H8643EGPMOD) に接着し使用した。反射剤の貼付にはオプティカルセメント、プラスチックシンチレータと PMT の接着にはオプティカルグリス (シリコンオイル) を使用した。



図 3: プラスチックシンチレータ



図 4: H8643EGPMOD

2.2.3 γ 線検出装置

γ 線検出装置として NaI シンチレータ PMT (BIRCON 社製 2X2H6/1.5L-X) を採用した。これは以下の点で優れている。

- NaI シンチレータは γ 線と光電効果の反応性が高い。
- エネルギーの光転換効率が高い。

2.2.4 Digitizer

PMT からのアナログ電気信号をデジタル化するため、CAEN 社製 DT5740 を使用した。これは 32 チャンネル 62.5 MS/s のデスクトップ波形 Digitizer である。使用する ^{147}Pm 線源に対して十分な信号処理速度があり、記録電圧範囲は観測電圧範囲を十分含む。データ記録時間間隔も適当である。



図 5: CAEN Digitizer DT5740

2.3 ニュートリノ質量依存性シミュレーション

ニュートリノ質量が β 線エネルギー分布にどのように影響するかを見積もった。 β 崩壊の理論に基づき作成した数値計算プログラムにより、ニュートリノの質量が様々な場合について β 線エネルギーの確率分布を再現した。

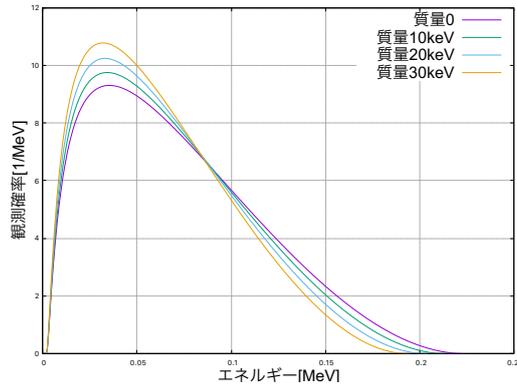


図 6: ニュートリノ質量による β 線エネルギー分布変化

図 6 は、ニュートリノ質量が 0, 10 keV, 20 keV, 30 keV の場合のシミュレーション結果を同時に表示している。この計算から、電子のエネルギーが Q 値に近い領域ではニュートリノ質量によるスペクトルの変化は質量エネルギー分の並行移動で近似できることがわかった。

2.4 観測装置性能評価実験

2.4.1 NaI シンチレータ PMT 性能評価実験

本実験では NaI シンチレータ PMT を 3 つ使用する。同型の NaI シンチレータ PMT として使用可能なものは 6 つあり、その性能評価測定を行った。NaI シンチレータ PMT に線源 ^{137}Cs を用いて γ 線を照射し、特性スペクトルの信号分布を見た。信号分布はガウス関数でフィッティングし、そのパラメータから (平均値)/(標準偏差) の値を計算し性能評価指数として使用した。この数値が高いほど高性能と判断できる。以下性能評価を行なった各 NaI シンチレータ PMT を (1,2,3,4,5,6) とラベル付けして表記する。結果は表 2 のようになった。

表 2: NaI シンチレータ PMT の性能比較

番号	平均値	標準偏差	平均値/標準偏差
1	335.411	16.4127	20.4
2	660.893	27.9673	23.6
3	601.200	28.4450	21.2
4	831.231	29.4671	28.2
5	1059.73	39.2236	27.0
6	1347.44	81.0354	16.6

この結果から 2,4,5 番の NaI シンチレータ PMT が優れていると結論付ける。

2.4.2 NaI シンチレータ PMT 応答時間依存性評価測定

NaI シンチレータ PMT 応答の時間変動を評価する。線源 ^{137}Cs を用いて γ 線を照射しその信号を各 1 時間、24 回の計 24 時間連続記録する。各測定の見測信号分布について、特性 γ 線光電効果ピークをガウス関数でフィッティングし、その平均値をグラフ化した (図 7)。

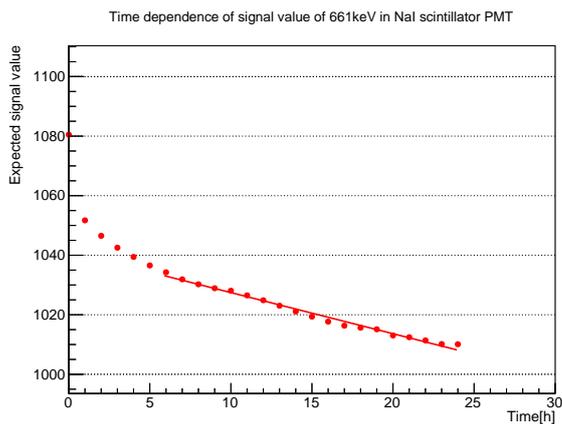


図 7: NaI シンチレータ発光量の時間変動

起動直後は急激な信号値の低下が見られ、また起動 6 時間後からは信号値が線形に約 $-1.38[\text{h}^{-1}]$ の割合で低下していることが分かる。

この結果より、実験は事前に 6 時間以上のウォーミングアップ期間を設けた上で 5 時間ごとに NaI シンチレータ PMT の較正を行い、その中間区間では前後の較正結果を用いて NaI シンチレータ PMT 性能を評価する。

2.4.3 プラスチックシンチレータの安定性の確認測定

プラスチックシンチレータ PMT 応答の時間変動を評価する。線源 ^{147}Pm から β 線を照射しその信号を各 1 時間、50 回の計 50 時間連続記録する。

各測定の見測信号分布について、その平均値および標準偏差をグラフ化した (図 8, 図 9)。

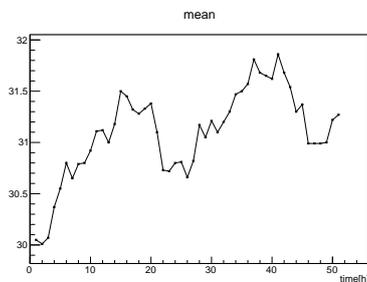


図 8: 平均値の時間変動

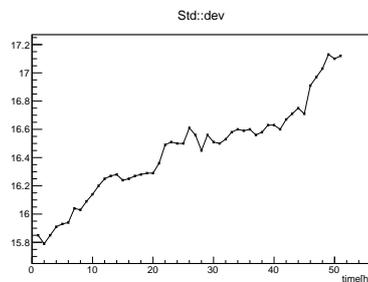


図 9: 標準偏差の時間変動

平均値のグラフを (一次関数)+(正弦関数) でフィッティングすると正弦関数の周期は 23.17 時間となり、これはプラスチックシンチレータの応答が周期 1 日の周期項、および線形項によって変動していることを示唆している。

2.5 [実験 A] β 線エネルギー測定実験

^{147}Pm から放出される β 線をプラスチックシンチレータ PMT で観測し信号分布を記録した。計測は 33 分間行われた。

2.5.1 セットアップ

プラスチックシンチレータ PMT と ^{147}Pm 線源の周囲を放射線遮蔽材 (鉄, 鉛) と暗幕で囲った。



図 10: 実験のセットアップ

2.5.2 データ取得

PMT からの信号は Digitizer へ送られ、トリガーの前後 120ns の範囲で約 0.5mV 単位でデジタル化され、30 行の数値で連続的に記録される。

放射線のエネルギーは以下の手順で観測データから数値化される。

- 1 信号が存在しない領域の平均値からベースを計算
- 2 計算されたベース値が前回のイベントから大きく変動するイベントを除外
- 3 ベースからの変動の合計としてイベントの信号値を計算
- 4 ベースから負の電圧変化*3が計測されたイベントを除外
- 5 異常な位置にトリガー級信号が存在するイベントを除外
- 6 複数の信号が存在するイベントを除外
- 7 正常なイベントの信号値を記録

*3 信号検出時の電圧変化方向を正とする。

2.6 [実験 B] プラスチックシンチレータ較正実験

コンプトン散乱の原理を利用してプラスチックシンチレータを較正する。反跳電子のエネルギーをプラスチックシンチレータで、散乱後の γ 線のエネルギーを NaI シンチレータ PMT で観測する。 γ 線源として ^{137}Cs を用いた。

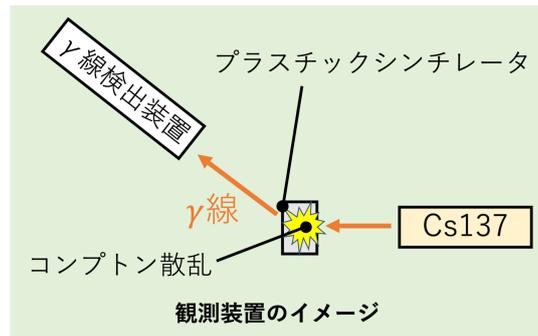


図 11: セットアップの模式図

散乱後のガンマ線が NaI シンチレータ PMT で光電効果を起こす場合 (以下 NaI 光電イベントと表記する), プラスチックシンチレータ PMT で観測される反跳電子のエネルギー E_{pla} は理想的には $E_{\text{pla}} = E_{\text{Cs}} - E_{\text{NaI}}$ となる。ただし E_{Cs} は ^{137}Cs の特性 γ 線エネルギー (≈ 661.657 keV) であり, E_{NaI} は NaI シンチレータ PMT での観測エネルギーである。

2.6.1 セットアップ

セットアップは図 12 の通りで、計測時はノイズ低減のために上部に銅板を被せさらに全体を暗幕で覆った。 ^{137}Cs で発生する β 線がプラスチックシンチレータへ入るのを阻止するために、線源の前に厚さ 1 cm ほどのプラスチックを取り付け β 線を遮蔽した。



図 12: 実験装置の配置

プラスチックシンチレータは 150 keV から 250 keV の範囲での応答に興味がある。
 角度 θ とプラスチックシンチレータでの観測エネルギーの関係はコンプトン散乱の公式 (式 2.1) を用いて計算される。ここで E_{NaI} は NaI シンチレータ PMT での観測エネルギー、 E_{Cs} は ^{137}Cs から入射する γ 線エネルギー (≈ 661.657 keV)、 m_e は電子質量である。

$$E_{\text{NaI}} = \frac{E_{\text{Cs}} * m_e c^2}{m_e c^2 + E_{\text{Cs}}(1 - \cos \theta)} \quad (2.1)$$

プラスチックシンチレータ較正実験では、NaI シンチレータ PMT はそれぞれ $\theta = 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ になるように設置されている。それぞれが対応するプラスチックシンチレータの較正エネルギーは以下の通りである。

表 3: 散乱角 θ とプラスチックシンチレータ観測エネルギー

角度 θ	プラスチックシンチレータ観測エネルギー [keV]
30°	98
50°	209
70°	304

プラスチックシンチレータは 150 keV から 250 keV の範囲での応答に興味があり、このセットアップは適切である。

また、線源とプラスチックシンチレータの距離、プラスチックシンチレータと NaI シンチレータの距離は NaI 光電イベントが他のイベントと区別できるような条件のもとで設定された。この条件は独自のプログラムで計算され、Geant4 によるシミュレーションで確認された。

2.6.2 データ取得

PMT からの信号は Digitizer へ送られ、トリガーの前後 2016 ns の範囲で約 0.5 mV 単位で信号がデジタル化され、126 行の数列で連続的に記録される。

放射線のエネルギーは以下の手順で観測データから数値化される。

- 1 NaI シンチレータ観測データとプラスチックシンチレータ観測データについて、信号が存在しない領域の平均値からベースを計算
- 2 両データについて、計算されたベース値が前回のイベントから大きく変動するイベントを除外
- 3 ベースから負の電圧変化 *3 が計測されたイベントを除外
- 4 両データの信号到達時刻の関係が不適切なイベントを除外
- 5 異常な位置にトリガー級信号が存在するイベントを除外
- 6 プラスチックシンチレータ観測データについて、複数の信号が存在するイベントを除外
- 7 ベースからの変動の合計としてイベントの信号値を計算する
- 8 NaI シンチレータ PMT でガンマ線がコンプトン散乱を起こしたイベントを除外

9 正常なイベントの信号値を記録

2.7 [実験 C] NaI シンチレータ較正実験

3種類の γ 線源 (^{137}Cs , ^{22}Na , ^{60}Co) を用いて NaI シンチレータ PMT の較正を行った. 較正に用いる γ 線エネルギーは表4の通りである.

表4: 線源と γ 線エネルギー

線源	γ 線エネルギー [keV]
^{22}Na γ 線	510.988
^{137}Cs γ 線	661.657
^{60}Co γ 線	1173.237
^{22}Na γ 線	1274.537
^{60}Co γ 線	1332.501

線源を NaI シンチレータ PMT に厚さ 1 cm のプラスチックを挟んだ状態で密着させ, それぞれ 2 分ずつ計測した.

2.7.1 データ取得

PMT からの信号は Digitizer へ送られ, トリガーの前後 704[ns] の範囲で約 0.5[mV] 単位でデジタル化され, 126 行の数値で連続的に記録される.

γ 線のエネルギーは以下の手順で観測データから数値化される.

- 1 信号が存在しない領域の平均値からベースを計算
- 2 計算されたベース値が前回のイベントから大きく変動するイベントを除外
- 3 ベースからの変動の合計としてイベントの信号値を計算
- 4 ベースから負の電圧変化 *³ が計測されたイベントを除外
- 5 異常な位置にトリガー級信号が存在するイベントを除外
- 6 複数の信号が存在するイベントを除外
- 7 正常なイベントの信号値を記録

2.7.2 データのフィッティング

信号値の分布はヒストグラムとして取り扱う, 特性 γ 線の光電効果に対応する部分を (ガウス関数)+(n 次関数) でフィットする. ただしフィッティング関数の n は分布を適切に表現できる最小の正整数値である, この判断はフィッティングの χ^2/NDf の値を参考にして行われる.

2.8 Geant4 によるシミュレーション

シミュレーションソフト Geant4 を用いて、ニュートリノが質量を持たない条件のもとで ^{147}Pm の崩壊から生じた β 線がプラスチックシンチレータと同形状のポリスチレンで失うエネルギーを記録する。シミュレーションでは線源の構造、プラスチックシンチレータ表面の反射剤、空気によるエネルギー損失の効果が再現される。

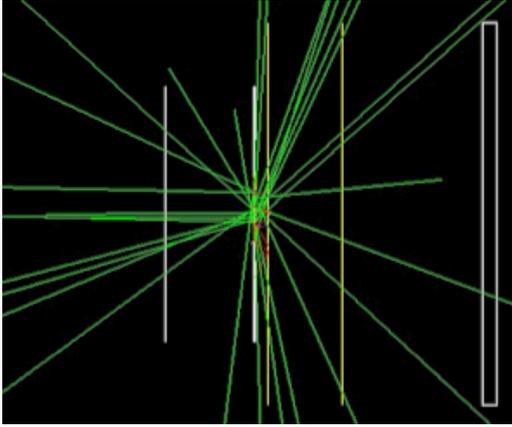


図 13: シミュレーションの様子

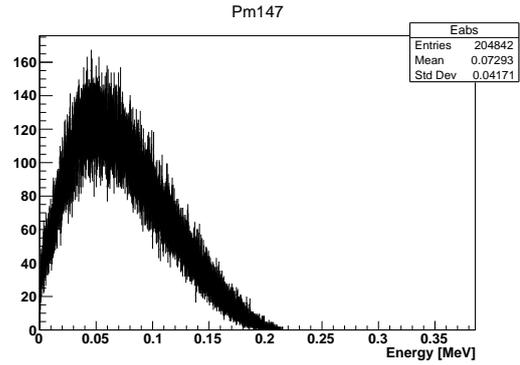


図 14: シミュレーション結果

図 13 中の赤線は β 線の飛跡, 緑線はニュートリノの飛跡, 黄色枠はポリスチレンを表している。

2.9 分布の適合度検定 (Kolmogorov-Smirnov 検定)

本実験では互いに規格化されていない 2 つのヒストグラムの適合度を検定する, このような場合には Kolmogorov-Smirnov 検定 (以下 K-S 検定と表記) が有効である。以下にその概要を述べる,⁷

x_i, y_i を観測データおよびモデル分布の各データの信号値, N_1, N_2 を各データのサンプル数, $S_1(x), S_2(x)$ を各データの累積確率分布, x_{\min}, x_{\max} を検定する範囲の下限值, 上限値とする。このとき,

$$S_1(x) = \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} \theta(x - x_i), S_2(x) = \frac{1}{N_2} \sum_{i=1}^{N_2} \theta(x - y_i) \quad (2.2)$$

であり, これを用いて K-S 統計量 D を次のように定義する,

$$D := \max_{x_{\min} < x < x_{\max}} |S_1(x) - S_2(x)| \quad (2.3)$$

このとき, D の有意確率は, $N_1 N_2 / (N_1 + N_2) > 20$ の条件のもとで以下のように近似できる,

$$Prob\left(D\sqrt{\frac{N_1 N_2}{N_1 + N_2}} > z\right) \simeq 2 \sum_{j=1}^{\infty} (-1)^{j-1} \exp(-2j^2 z^2) \quad (2.4)$$

この数値が小さいほど両分布は適合していると結論づけることができる。

2.10 ニュートリノ質量検定

質量検定を行う Root マクロの挙動について概要を述べる.

- 1 観測データからノイズ期待値を差し引き信号値 1 を階級幅とする観測ヒストグラムを作成する
- 2 検定する質量毎に, 再現モデルを検定質量分並行移動させ信号値 1 を階級幅とする検定ヒストグラムを作成する
- 3 KolmogorovTest メソッドを用いて観測ヒストグラムと検定ヒストグラムについて K-S 検定を行う
- 4 検定ヒストグラムの両端のビンで値が 0 となる場合を除外する
- 5 各ヒストグラムのサンプル数 N_1, N_2 について $N_1 N_2 / (N_1 + N_2) < 20$ となる場合を除外する
- 6 計算された最終統計量が最小となる場合, その検定ヒストグラムを与えたニュートリノ質量を記録する
- 7 検定ヒストグラムをリセットし同様の検定を繰り返す
- 8 最も適合した検定ヒストグラムを与えるニュートリノ質量を出力する

作成するヒストグラムの各階級度数は少数第一の四捨五入によって決定される.

3 結果

3.1 [実験 A] β 線エネルギー測定実験の結果

観測された信号分布は以下のようになった. この測定は 6:31 から 7:04 の時間帯で行われた.

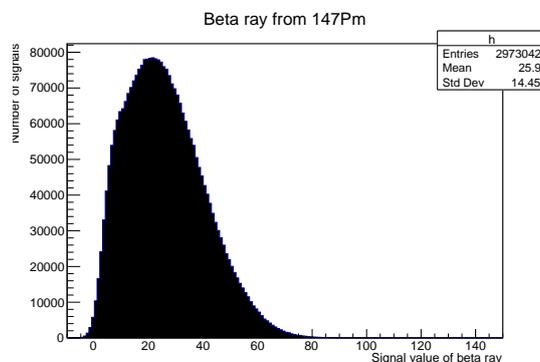


図 15: ^{147}Pm からの β 線信号値分布

3.2 [実験 B] プラスチックシンチレータ較正実験の結果

プラスチックシンチレータ較正実験は 4 回行われた. 3 つの NaI シンチレータ PMT それぞれが異なるエネルギー帯のイベント情報を取得した.

各較正実験について, それぞれの NaI シンチレータ PMT が測定したイベントのデータ分布を示す.

プラスチックシンチレータ較正実験 1 は 19:06 から翌 0:00 の時間帯で行われ結果は以下のようになった,

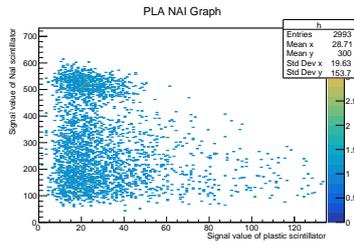


図 16: NaI シンチレータ PMT-30°

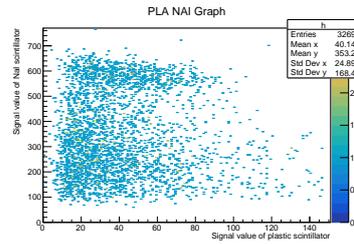


図 17: NaI シンチレータ PMT-50°

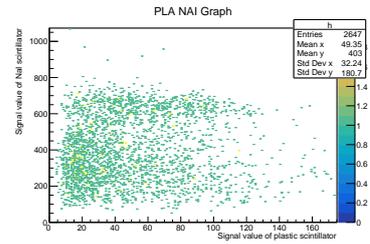


図 18: NaI シンチレータ PMT-70°

プラスチックシンチレータ較正実験 2 は 0:45 から 1:47 の時間帯で行われ結果は以下ようになった,

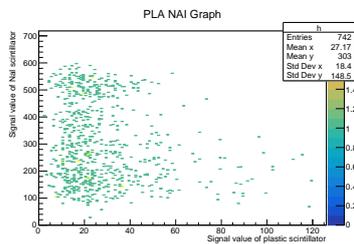


図 19: NaI シンチレータ PMT-30°

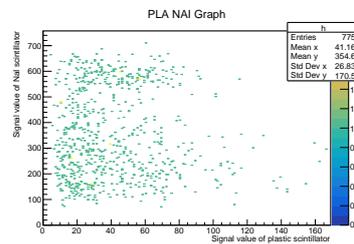


図 20: NaI シンチレータ PMT-50°

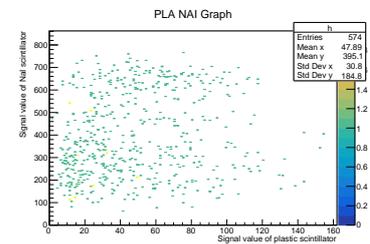


図 21: NaI シンチレータ PMT-70°

プラスチックシンチレータ較正実験 3 は計測の中断により取得データが前半 (2 時間 39 分) と後半 (2 時間 28 分) に別れた. 前半のデータ測定は 7:15 から 9:54 の時間帯で行われ結果は以下ようになった,

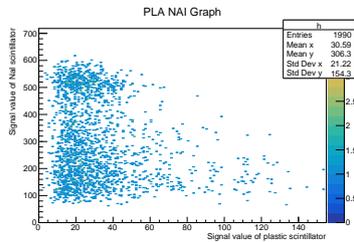


図 22: NaI シンチレータ PMT-30°

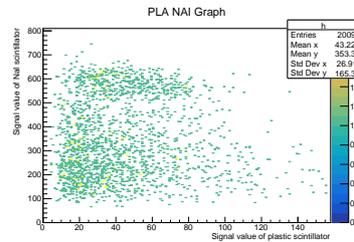


図 23: NaI シンチレータ PMT-50°

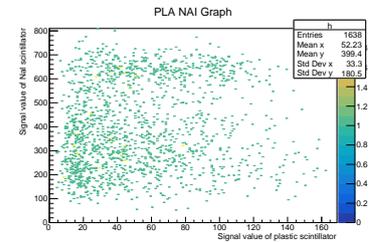


図 24: NaI シンチレータ PMT-70°

後半のデータ測定は 10:25 から 12:53 の時間帯で行われ結果は以下ようになった,

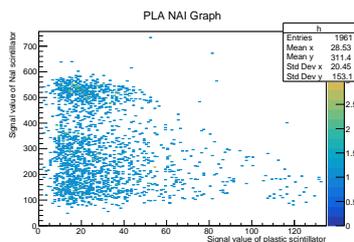


図 25: NaI シンチレータ PMT-30°

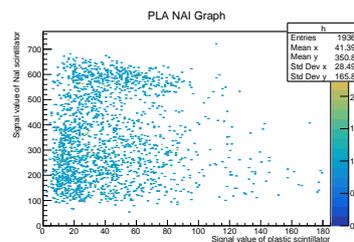


図 26: NaI シンチレータ PMT-50°

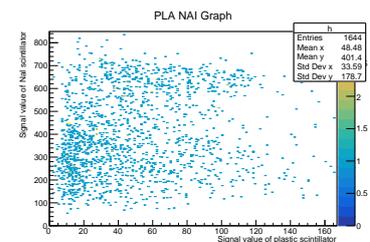


図 27: NaI シンチレータ PMT-70°

プラスチックシンチレータ較正 4 は 13:30 から 18:08 の時間帯で行われ結果は以下のようになった,

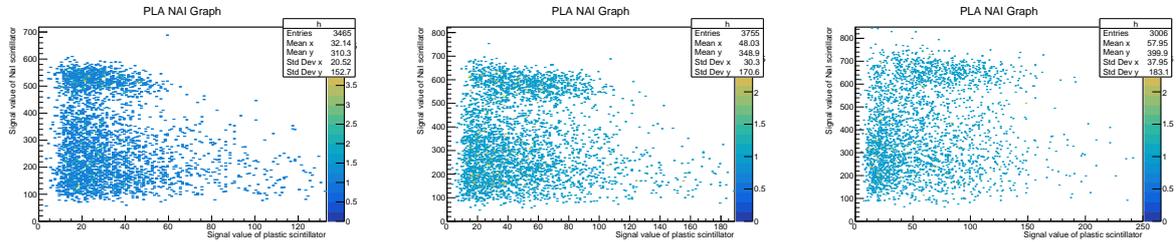


図 28: NaI シンチレータ PMT-30° 図 29: NaI シンチレータ PMT-50° 図 30: NaI シンチレータ PMT-70°

3.3 [実験 C]NaI シンチレータ較正実験の結果

NaI シンチレータ PMT 較正実験は 5 回行われた。その各々について 3 つの NaI シンチレータ PMT がそれぞれ 3 種類の線源で較正された。ここでは各線源のうち低エネルギーの特性 γ 線を第 1 γ 線, 高エネルギーのものを第 2 γ 線と表現する。各 γ 線に対応するピークに対するフィッティングで定まるパラメータのうち, 平均値と標準偏差に対応するものを表で示す。

NaI シンチレータ PMT 較正実験 (1) は 18:27 から 18:54 の時間帯で行われた。結果は以下の通り,

表 5: 較正線源と信号フィット平均値パラメータ

平均値	22Na 第1 γ 線	1 σ 誤差	137Cs γ 線	1 σ 誤差	60Co 第1 γ 線	1 σ 誤差	22Na 第2 γ 線	1 σ 誤差	60Co 第2 γ 線	1 σ 誤差
NaIPMT-30°	471.206	0.0606244	608.3835	0.0602723	1039.6	0.35422	1126.54	0.300214	1174.76	0.484168
NaIPMT-50°	637.644	0.0640403	824.357	0.0737665	1397.89	0.357978	1521.3	0.620349	1581.83	0.360141
NaIPMT-70°	848.444	0.105579	1092.99	0.0902364	1863.44	0.389594	2030.11	0.533944	2110.64	0.466691

表 6: 較正線源と信号フィット標準偏差パラメータ

標準偏差	22Na 第1 γ 線	1 σ 誤差	137Cs γ 線	1 σ 誤差	60Co 第1 γ 線	1 σ 誤差	22Na 第2 γ 線	1 σ 誤差	60Co 第2 γ 線	1 σ 誤差
NaIPMT-30°	21.8159	0.0626003	25.1715	25.1715	29.6942	0.481665	32.6105	0.384884	33.1445	0.676517
NaIPMT-50°	25.6127	0.0631086	29.4905	0.0652566	36.9765	0.477485	41.2444	0.80213	38.8181	0.452347
NaIPMT-70°	33.0512	0.111559	37.8378	0.0974011	47.648	0.491801	53.4238	0.66806	53.0231	0.561952

NaI シンチレータ PMT 較正実験 (2) は 0:08 から 0:34 の時間帯で行われた。結果は以下の通り,

表 7: 較正線源と信号フィット平均値パラメータ

平均値	22Na 第1 γ 線	1 σ 誤差	137Cs γ 線	1 σ 誤差	60Co 第1 γ 線	1 σ 誤差	22Na 第2 γ 線	1 σ 誤差	60Co 第2 γ 線	1 σ 誤差
NaIPMT-30°	471.984	0.0689821	602.897	0.050447	1039.22	0.361346	1127	0.338309	1176.21	0.302756
NaIPMT-50°	635.645	0.0691931	811.727	0.0659927	1391.21	0.292289	1518.04	0.382778	1574.12	0.806315
NaIPMT-70°	848.653	0.0917341	1084.6	0.103333	1865.06	0.441763	2032.41	0.733966	2113.49	0.541637

表 8: 較正線源と信号フィット標準偏差パラメータ

標準偏差	22Na 第1 γ 線	1 σ 誤差	137Cs γ 線	1 σ 誤差	60Co 第1 γ 線	1 σ 誤差	22Na 第2 γ 線	1 σ 誤差	60Co 第2 γ 線	1 σ 誤差
NaIPMT-30°	22.0438	0.081198	24.6702	0.0443775	30.167	0.485179	33.2124	0.424911	31.1042	0.360531
NaIPMT-50°	25.5339	0.0719669	28.393	0.120333	35.0746	0.348331	40.7541	0.539789	42.4044	1.32238
NaIPMT-70°	33.1756	0.102901	37.8587	0.107322	48.6291	0.607805	54.3242	1.03701	53.0964	1.50688

NaI シンチレータ PMT 較正実験 (3) は 5:56 から 6:21 の時間帯で行われた。結果は以下の通り、

表 9: 較正線源と信号フィット平均値パラメータ

平均値	22Na 第1 γ 線	1 σ 誤差	137Cs γ 線	1 σ 誤差	60Co 第1 γ 線	1 σ 誤差	22Na 第2 γ 線	1 σ 誤差	60Co 第2 γ 線	1 σ 誤差
NaIPMT-30°	476.674	0.0636047	606.771	0.0651321	1041.99	0.3852	1132.64	0.311145	1178.46	0.402013
NaIPMT-50°	638.392	0.0678206	824.632	0.0780852	1396.74	0.321346	1524.13	0.54274	1581.15	0.344854
NaIPMT-70°	846.958	0.0895712	1093.78	0.115648	1864.22	0.602931	2033.64	0.576142	2110.48	0.918477

表 10: 較正線源と信号フィット標準偏差パラメータ

標準偏差	22Na 第1 γ 線	1 σ 誤差	137Cs γ 線	1 σ 誤差	60Co 第1 γ 線	1 σ 誤差	22Na 第2 γ 線	1 σ 誤差	60Co 第2 γ 線	1 σ 誤差
NaIPMT-30°	22.1509	0.0684793	24.8338	0.0644929	30.1562	0.543222	33.3451	0.396461	32.6489	0.635313
NaIPMT-50°	25.8079	0.0675515	29.0134	0.086849	35.7983	0.440086	39.763	0.432328	39.2852	0.817512
NaIPMT-70°	33.1262	0.0922636	38.5265	0.132297	48.5388	0.988393	53.1698	0.744424	54.7351	1.85712

NaI シンチレータ PMT 較正実験 (4) は 12:59 から 13:24 の時間帯で行われた。結果は以下の通り、

表 11: 較正線源と信号フィット平均値パラメータ

平均値	22Na 第1 γ 線	1 σ 誤差	137Cs γ 線	1 σ 誤差	60Co 第1 γ 線	1 σ 誤差	22Na 第2 γ 線	1 σ 誤差	60Co 第2 γ 線	1 σ 誤差
NaIPMT-30°	473.417	0.0709821	605.805	0.0847068	1039.45	0.359876	1127.85	0.311996	1175.32	0.379014
NaIPMT-50°	638.44	0.0635577	818.839	0.0707311	1392.15	0.721678	1522.87	0.329207	1573.87	0.461747
NaIPMT-70°	846.497	0.106843	1084.96	0.222432	1860.38	0.422255	2030.67	0.590441	2106.36	0.75377

表 12: 較正線源と信号フィット標準偏差パラメータ

標準偏差	22Na 第1 γ 線	1 σ 誤差	137Cs γ 線	1 σ 誤差	60Co 第1 γ 線	1 σ 誤差	22Na 第2 γ 線	1 σ 誤差	60Co 第2 γ 線	1 σ 誤差
NaIPMT-30°	21.9232	0.088042	24.4863	0.101237	29.5489	0.566388	32.7695	0.38444	32.2316	0.472546
NaIPMT-50°	25.4833	0.0611092	28.5265	0.0866044	38.1974	0.984695	40.9135	0.402548	38.2255	0.752705
NaIPMT-70°	33.0551	0.129733	37.3764	0.396829	48.8356	0.540679	54.3111	0.876975	53.2596	1.28562

NaI シンチレータ PMT 較正実験 (5) は 18:16 から 18:43 の時間帯で行われた。結果は以下の通り、

表 13: 較正線源と信号フィット平均値パラメータ

平均値	22Na 第1 γ 線	1 σ 誤差	137Cs γ 線	1 σ 誤差	60Co 第1 γ 線	1 σ 誤差	22Na 第2 γ 線	1 σ 誤差	60Co 第2 γ 線	1 σ 誤差
NaIPMT-30°	471.659	0.228414	608.023	0.100465	1035.01	0.405017	1121.56	0.37031	1170.48	0.327801
NaIPMT-50°	633.847	0.0756502	810.826	0.0903576	1383.32	0.329942	1510.15	1.00304	1565.47	0.363222
NaIPMT-70°	844.701	0.0949249	1088.1	0.118021	1855.46	0.407258	2024.06	0.756649	2100.28	0.739536

表 14: 較正線源と信号フィット標準偏差パラメータ

標準偏差	22Na 第1 γ 線	1 σ 誤差	137Cs γ 線	1 σ 誤差	60Co 第1 γ 線	1 σ 誤差	22Na 第2 γ 線	1 σ 誤差	60Co 第2 γ 線	1 σ 誤差
NaIPMT-30°	21.369	0.440487	24.6586	0.152719	29.5627	0.530874	32.3352	0.556843	31.0421	0.416983
NaIPMT-50°	25.7035	0.0886879	27.921	0.106089	35.8909	0.478756	42.3911	1.48693	39.3984	0.495752
NaIPMT-70°	32.7696	0.103379	38.4092	0.165168	47.4634	0.547914	53.2458	1.16184	53.7231	1.15402

3.4 ノイズ計測実験の測定結果

ノイズ計測は2回行われ観測された信号分布は以下のようになった。ノイズ計測1は13:05から18:21の時間帯で行われノイズ計測2は18:54から翌0:04の間で行われた。

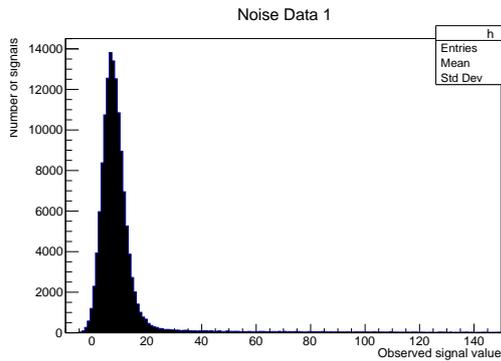


図 31: ノイズ計測1回目の分布データ

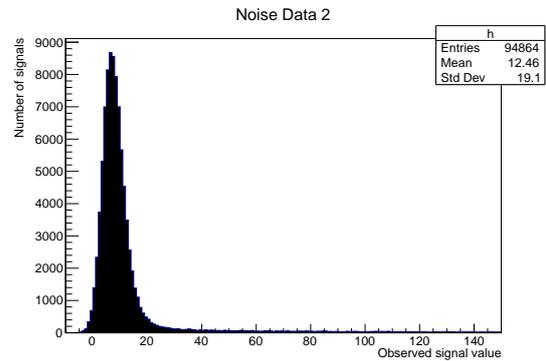


図 32: ノイズ計測2回目の分布データ

4 解析

4.1 NaI シンチレータ PMT の応答モデル化

4.1.1 NaI シンチレータ PMT 較正実験における信号期待値エネルギー依存性モデル化

NaI シンチレータ PMT での観測信号期待値と観測放射線エネルギーはほとんど線形の関係があった。そのため NaI シンチレータ PMT の応答は一次関数でモデル化する、ここでフィッティング関数の傾きに対応するパラメータをパラメータ1、切片に対応するパラメータをパラメータ2と表記する。

$$\text{観測信号値} = \text{パラメータ1} \times \text{観測放射線エネルギー [keV]} + \text{パラメータ2} \quad (4.1)$$

フィッティングは解析ソフト Root の TGraphErrors クラスを用いて行われた。

表 15: NaI シンチレータ PMT-30° 各較正実験における観測信号期待値エネルギー依存性

信号光量	パラメータ1	1 σ 誤差	パラメータ2	1 σ 誤差
較正実験(1)	0.865837	0.000276838	31.7762	0.175029
較正実験(2)	0.858411	0.000261655	34.2914	0.171558
較正実験(3)	0.857241	0.000277714	39.038	0.176644
較正実験(4)	0.857173	0.000278436	36.5758	0.180529
較正実験(5)	0.843063	0.000351187	48.3794	0.272956

表 16: NaI シンチレータ PMT-50° 各較正実験における観測信号期待値エネルギー依存性

信号光量	パラメータ1	1 σ 誤差	パラメータ2	1 σ 誤差
較正実験(1)	1.14421	0.00010512	58.4122	0.0972647
較正実験(2)	1.15018	0.00031365	49.1957	0.199217
較正実験(3)	1.15812	0.000294521	51.0118	0.186953
較正実験(4)	1.1583	0.00031521	48.883	0.195443
較正実験(5)	1.13797	0.000327049	54.3298	0.207641

表 17: NaI シンチレータ PMT-70° 各較正実験における観測信号期待値エネルギー依存性

信号光量	パラメータ1	1 σ 誤差	パラメータ2	1 σ 誤差
較正実験(1)	1.54281	0.000376993	66.3785	0.250232
較正実験(2)	1.54329	0.000421113	61.3577	0.264837
較正実験(3)	1.56298	0.000490116	51.9462	0.297559
較正実験(4)	1.53963	0.000453456	60.7405	0.286811
較正実験(5)	1.54166	0.000451394	60.6772	0.281452

4.1.2 NaI シンチレータ PMT 較正実験における観測信号広がり分布標準偏差のエネルギー依存性モデル化

NaI シンチレータ PMT での観測信号期待値と観測信号広がり分布標準偏差 (以下信号分解能と表記) についてもほとんど線形の関係があったため同様にモデル化して取り扱う。

$$\text{信号分解能} = \text{パラメータ 1} \times \text{観測放射線エネルギー [keV]} + \text{パラメータ 2} \quad (4.2)$$

表 18: NaI シンチレータ PMT-30° 各較正実験における信号分解能エネルギー依存性

信号分解能	パラメータ1	1 σ 誤差	パラメータ2	1 σ 誤差
較正実験(1)	0.0160229	0.000335469	14.105	0.208949
較正実験(2)	0.0134381	0.00033605	15.6162	0.219002
較正実験(3)	0.0146657	0.00035588	14.8804	0.221228
較正実験(4)	0.0134875	0.000357441	15.2304	0.229855
較正実験(5)	0.0108806	0.000495982	17.2469	0.405376

表 19: NaI シンチレータ PMT-50° 各較正実験における信号分解能エネルギー依存性

信号分解能	パラメータ1	1 σ 誤差	パラメータ2	1 σ 誤差
較正実験(1)	0.0187293	0.00036151	16.4968	0.220979
較正実験(2)	0.0169792	0.000399683	16.9166	0.239573
較正実験(3)	0.0173656	0.000366227	17.1239	0.222534
較正実験(4)	0.0193502	0.00039226	15.6331	0.231531
較正実験(5)	0.0161783	0.000439898	17.3554	0.272134

表 20: NaI シンチレータ PMT-70° 各較正実験における信号分解能エネルギー依存性

信号分解能	パラメータ1	1 σ 誤差	パラメータ2	1 σ 誤差
較正実験(1)	0.0249511	0.000449153	20.8218	0.29118
較正実験(2)	0.0261392	0.000556868	20.1316	0.342824
較正実験(3)	0.0289054	0.000655841	18.6463	0.38278
較正実験(4)	0.0252115	0.000632649	20.2073	0.38984
較正実験(5)	0.0261603	0.000615032	19.7978	0.365142

プラスチックシンチレータ PMT 較正実験を行うにあたり前後で行われた2つの NaI シンチレータ PMT 較正実験の結果を統合して用いる必要がある。これは前後の NaI シンチレータ PMT 較正実験の情報を同時に用いて、同様に解析ソフト Root の TGraphErrors クラスを用いた線形フィッティングを行うことによって実現された。ただし NaI シンチレータ PMT-50° 較正 (2) と較正 (3), NaI シンチレータ PMT-70° 較正 (1) と較正 (2), 較正 (4) と較正 (5) を除いて、連続した較正実験について計算されたフィッティングパラメータが誤差の範囲を超える変化を示したためパラメータの時間変化効果を加えて誤差評価を行った。最終的な NaI シンチレータ PMT の応答モデルは各プラスチックシンチレータ較正実験について以下の通りである。

4.1.3 プラスチックシンチレータ PMT 較正実験において用いる信号期待値エネルギー依存性モデル

表 21: 統合後の NaI シンチレータ PMT-30° 観測信号期待値エネルギー依存性

信号期待値	パラメータ1	1 σ 誤差	パラメータ2	1 σ 誤差
ブラシンPMT較正実験(1)	0.861915	0.003717866	33.059	1.263553982
ブラシンPMT較正実験(2)	0.857861	0.000615218	36.5954	2.376488769
ブラシンPMT較正実験(3)	0.857207	0.000199546	37.8337	1.237557288
ブラシンPMT較正実験(4)	0.851727	0.007058373	40.1678	5.903720528

表 22: 統合後の NaI シンチレータ PMT-50° 観測信号期待値エネルギー依存性

信号期待値	パラメータ1	1 σ 誤差	パラメータ2	1 σ 誤差
ブラシンPMT較正実験(1)	1.14481	0.002986664	56.6381	4.609078807
ブラシンPMT較正実験(2)	1.15415	0.00397619	50.1614	0.918226175
ブラシンPMT較正実験(3)	1.15821	0.000239859	49.9946	1.072939215
ブラシンPMT較正実験(4)	1.14851	0.010167533	51.4417	2.72711595

表 23: 統合後の NaI シンチレータ PMT-70° 観測信号期待値エネルギー依存性

信号期待値	パラメータ1	1 σ 誤差	パラメータ2	1 σ 誤差
ブラシンPMT校正実験(1)	1.54302	0.000369452	64.0104	2.516980396
ブラシンPMT校正実験(2)	1.55165	0.00985018	57.1977	4.709906515
ブラシンPMT校正実験(3)	1.5504	0.011679744	56.505	4.401996227
ブラシンPMT校正実験(4)	1.54065	0.001064222	60.7083	0.20336299

4.1.4 プラスチックシンチレータ PMT 校正実験において用いる信号分解能エネルギー依存性モデル

表 24: 統合後の NaI シンチレータ PMT-30° 信号分解能エネルギー依存性

信号分解能	パラメータ1	1 σ 誤差	パラメータ2	1 σ 誤差
ブラシンPMT校正実験(1)	0.0147327	0.001314026	14.8251	0.770575206
ブラシンPMT校正実験(2)	0.0140172	0.000660608	15.252	0.39946703
ブラシンPMT校正実験(3)	0.0140797	0.000640772	15.0487	0.236709626
ブラシンPMT校正実験(4)	0.0125964	0.001335317	15.721	1.027885045

表 25: 統合後の NaI シンチレータ PMT-50° 信号分解能エネルギー依存性

信号分解能	パラメータ1	1 σ 誤差	パラメータ2	1 σ 誤差
ブラシンPMT校正実験(1)	0.0179418	0.000915202	16.6898	0.265409428
ブラシンPMT校正実験(2)	0.0171892	0.000270016	17.0279	0.163047
ブラシンPMT校正実験(3)	0.0182899	0.001027773	16.408	0.762471505
ブラシンPMT校正実験(4)	0.0179452	0.001612746	16.3563	0.879020009

表 26: 統合後の NaI シンチレータ PMT-70° 信号分解能エネルギー依存性

信号分解能	パラメータ1	1 σ 誤差	パラメータ2	1 σ 誤差
ブラシンPMT校正実験(1)	0.0254194	0.000349606	20.5326	0.221932
ブラシンPMT校正実験(2)	0.027298	0.001446775	19.4705	0.785331403
ブラシンPMT校正実験(3)	0.026992	0.001902248	19.4125	0.826909399
ブラシンPMT校正実験(4)	0.0256993	0.00044099	19.9892	0.266498

4.2 プラスチックシンチレータ校正実験のデータ解釈と分布モデル化

プラスチックシンチレータ校正では NaI シンチレータ PMT でガンマ線が光電効果を起こすようなイベントを選択することが重要である。この時選択されたイベントにおける NaI シンチレータ PMT, プラスチックシンチレータ PMT での観測信号分布はガウス分布でモデル化された。以下にそれを示す。

プラスチックシンチレータ PMT 較正実験 (1)

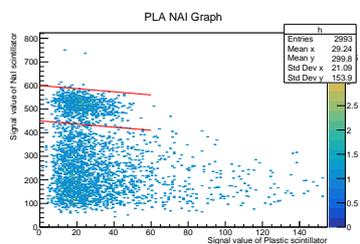


図 33: NaI シンチレータ PMT-30° の光電効果データ領域選択

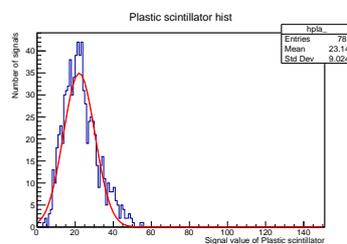


図 34: 左選択領域でのプラスチックシンチレータ PMT データ分布

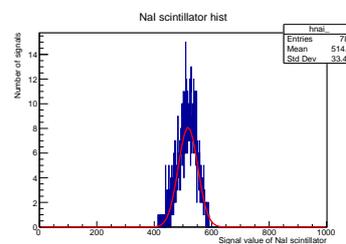


図 35: 左選択領域での NaI シンチレータ PMT データ分布

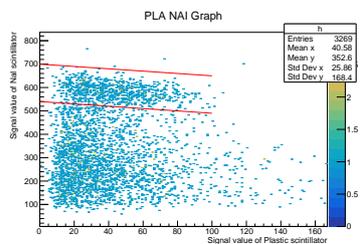


図 36: NaI シンチレータ PMT-50° の光電効果データ領域選択

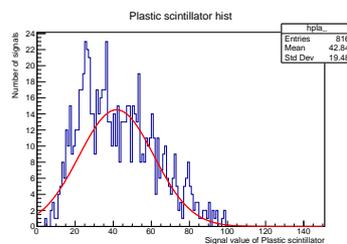


図 37: 左選択領域でのプラスチックシンチレータ PMT データ分布

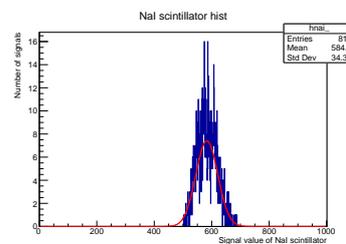


図 38: 左選択領域での NaI シンチレータ PMT データ分布

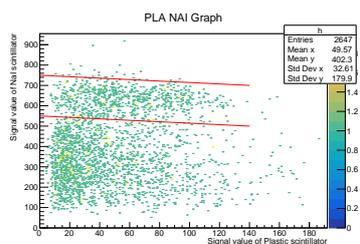


図 39: NaI シンチレータ PMT-70° の光電効果データ領域選択

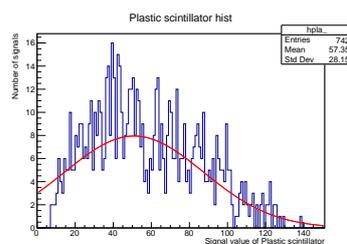


図 40: 左選択領域でのプラスチックシンチレータ PMT データ分布

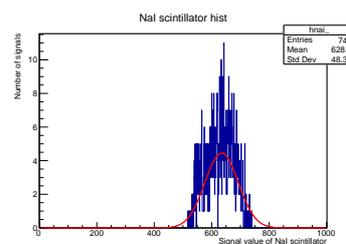


図 41: 左選択領域での NaI シンチレータ PMT データ分布

プラスチックシンチレータ PMT 較正実験 (2)

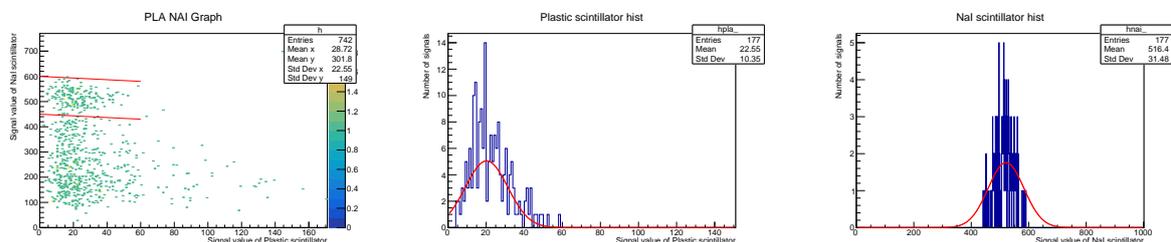


図 42: NaI シンチレータ PMT-30° の光電効果データ領域選択
 図 43: 左選択領域でのプラスチックシンチレータ PMT データ分布
 図 44: 左選択領域での NaI シンチレータ PMT データ分布

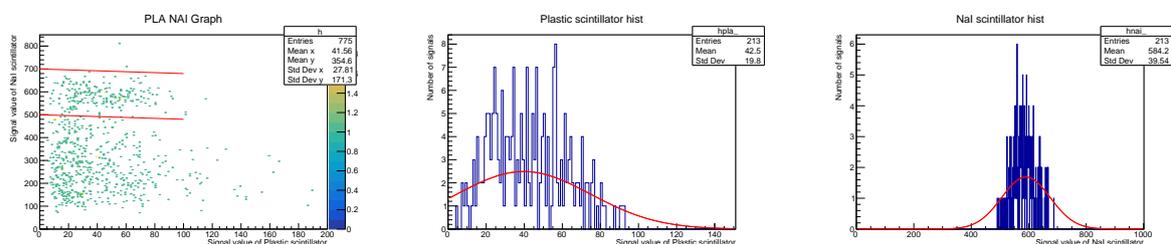


図 45: NaI シンチレータ PMT-50° の光電効果データ領域選択
 図 46: 左選択領域でのプラスチックシンチレータ PMT データ分布
 図 47: 左選択領域での NaI シンチレータ PMT データ分布

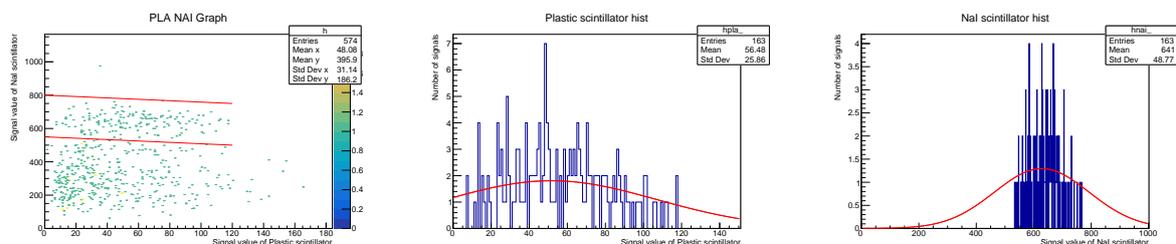


図 48: NaI シンチレータ PMT-70° の光電効果データ領域選択
 図 49: 左選択領域でのプラスチックシンチレータ PMT データ分布
 図 50: 左選択領域での NaI シンチレータ PMT データ分布

プラスチックシンチレータ PMT 較正実験 (3) 前半

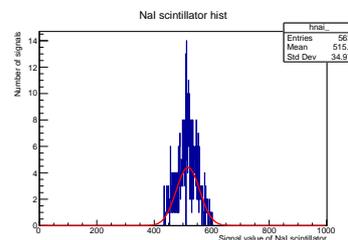
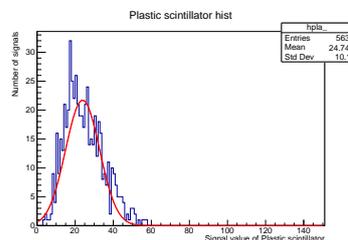
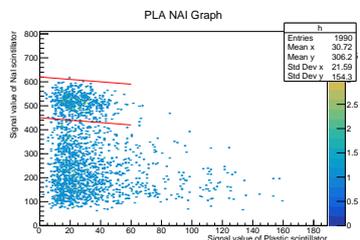


図 51: NaI シンチレータ PMT-30° の光電効果データ領域選択

図 52: 左選択領域でのプラスチックシンチレータ PMT データ分布

図 53: 左選択領域での NaI シンチレータ PMT データ分布

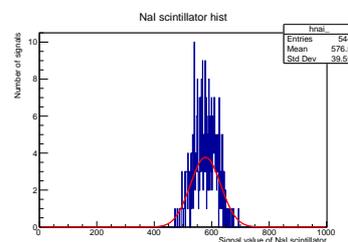
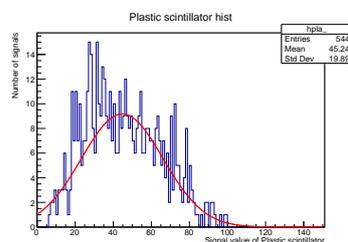
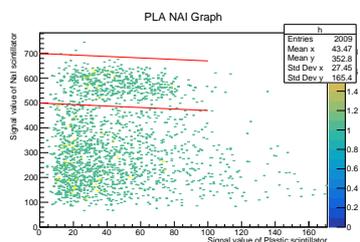


図 54: NaI シンチレータ PMT-50° の光電効果データ領域選択

図 55: 左選択領域でのプラスチックシンチレータ PMT データ分布

図 56: 左選択領域での NaI シンチレータ PMT データ分布

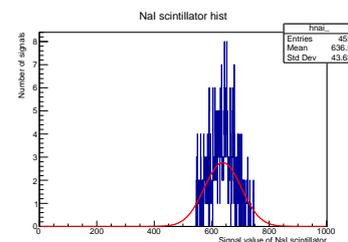
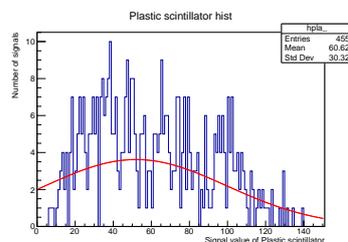
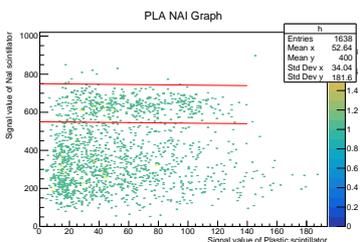


図 57: NaI シンチレータ PMT-70° の光電効果データ領域選択

図 58: 左選択領域でのプラスチックシンチレータ PMT データ分布

図 59: 左選択領域での NaI シンチレータ PMT データ分布

プラスチックシンチレータ PMT 較正実験 (3) 後半

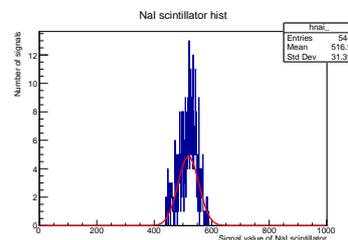
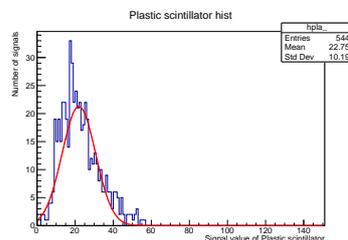
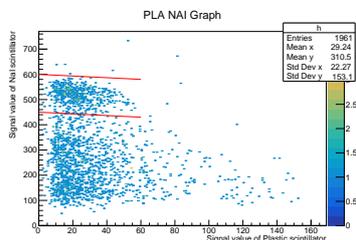


図 60: NaI シンチレータ PMT-30° の光電効果データ領域選択

図 61: 左選択領域でのプラスチックシンチレータ PMT データ分布

図 62: 左選択領域での NaI シンチレータ PMT データ分布

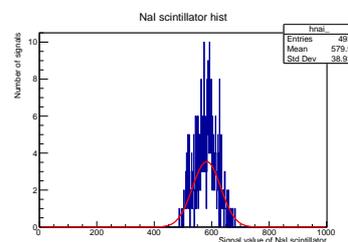
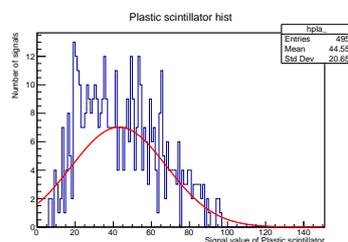
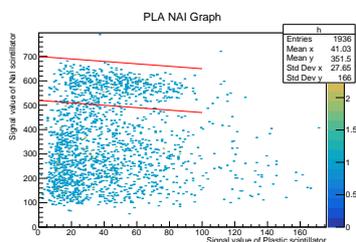


図 63: NaI シンチレータ PMT-50° の光電効果データ領域選択

図 64: 左選択領域でのプラスチックシンチレータ PMT データ分布

図 65: 左選択領域での NaI シンチレータ PMT データ分布

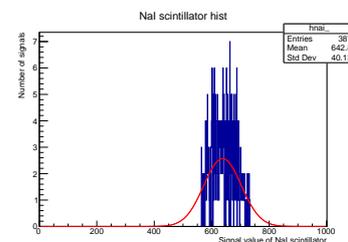
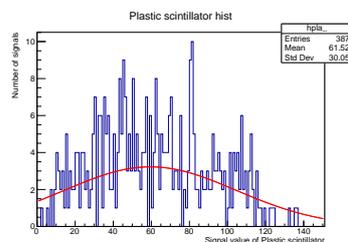
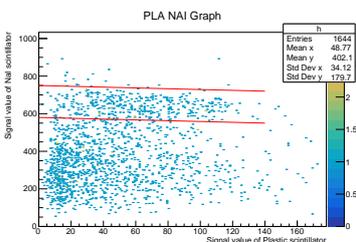


図 66: NaI シンチレータ PMT-70° の光電効果データ領域選択

図 67: 左選択領域でのプラスチックシンチレータ PMT データ分布

図 68: 左選択領域での NaI シンチレータ PMT データ分布

プラスチックシンチレータ PMT 較正実験 (4)

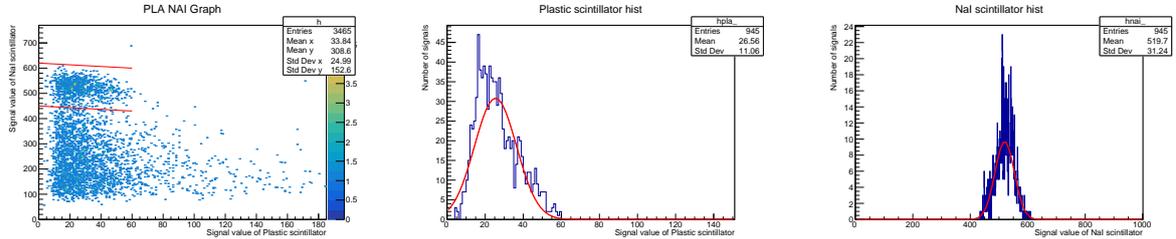


図 69: NaI シンチレータ PMT-30° の光電効果データ領域選択
 図 70: 左選択領域でのプラスチックシンチレータ PMT データ分布
 図 71: 左選択領域での NaI シンチレータ PMT データ分布

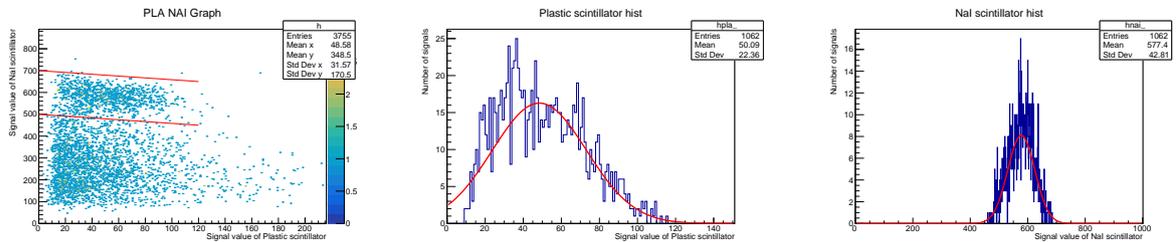


図 72: NaI シンチレータ PMT-50° の光電効果データ領域選択
 図 73: 左選択領域でのプラスチックシンチレータ PMT データ分布
 図 74: 左選択領域での NaI シンチレータ PMT データ分布

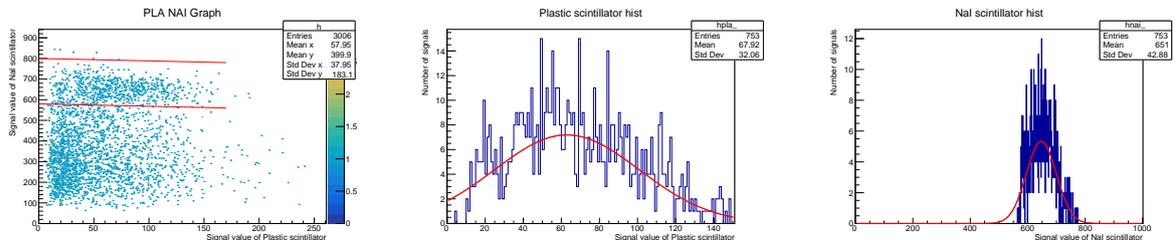


図 75: NaI シンチレータ PMT-70° の光電効果データ領域選択
 図 76: 左選択領域でのプラスチックシンチレータ PMT データ分布
 図 77: 左選択領域での NaI シンチレータ PMT データ分布

4.3 プラスチックシンチレータ較正解析の理論

4.3.1 エネルギーと信号期待値対応関係のモデル化

プラスチックシンチレータ較正実験について、NaI シンチレータ PMT で観測される信号値の分布を S_{NaI} 、プラスチックシンチレータ PMT で観測される信号分布の平均値を S_{Pla} 、その時間帯での NaI シンチレータ PMT の較正は関係式: 信号 = $P1 \times$ 放射線エネルギー [keV] + $P2$ で行われているとする。この時プラスチックシンチレータ PMT での観測エネルギー平均値は $(S_{\text{NaI}} - P2)/P1$ になるものと考えて、このエネルギーと S_{Pla} の値の対応関係を見る。このようにしてエネルギーと信号期待値の関係はモデル化される。

4.3.2 エネルギーと信号分散対応関係のモデル化

あるエネルギー $E_{\gamma, \text{event}}$ のガンマ線信号を観測したイベントについて、NaI シンチレータでの観測信号を $S_{\text{NaI, event}}$ 、観測装置での観測信号値期待値に対する信号値の割合を D_{event} 、NaI シンチレータ PMT の較正を表すパラメータを同様に $P1, P2$ と表す。すると以下の関係が成り立つ、

$$S_{\text{NaI, event}} = (E_{\gamma, \text{event}} P1 + P2) D_{\text{event}} \quad (4.3)$$

次に E_{γ} , S_{NaI} , $D(E)$ はプラスチックシンチレータ較正実験中に観測されたイベントの確率分布に従う変数とする、ただし確率分布はガウス分布であり、 D が表すガウス分布は引数のエネルギーに依存して変化するものとする。プラスチックシンチレータ較正実験中に観測されたイベントについて、 E_{γ} の平均値を E_{meanNaI} 、各変数の分布の標準偏差を $\sigma_E, \sigma_{S_{\text{NaI}}}, \sigma_D$ と書く。ただし、 $P1, P2$ は計測中は定数であり、また測定する範囲のエネルギー E について $P1 \times E + P2 \simeq P1 \times E_{\text{meanNaI}} + P2$, $D(E) \simeq D(E_{\text{meanNaI}})$ が成り立つものとする。誤差伝播式より、

$$\sigma_{S_{\text{NaI}}} = \sqrt{(P1\sigma_E)^2 + (E_{\text{meanNaI}}P1 + P2)^2\sigma_D^2} \quad (4.4)$$

が成り立つ。ただし NaI シンチレータの較正結果より観測する放射線のエネルギー E について既知の2つのパラメータ $P1', P2'$ を用いて、

$$P1' \times E + P2' = (E \times P1 + P2) \times \sigma_D(E) \quad (4.5)$$

と書くことができるから、測定範囲のエネルギー E について $P1' \times E_{\text{meanNaI}} + P2' \simeq (E \times P1 + P2) \times \sigma_D(E)$ が成り立つと仮定すると、

$$\frac{\sqrt{\sigma_{S_{\text{NaI}}}^2 - (P1'E_{\text{meanNaI}} + P2')^2}}{P1} = \sigma_E \quad (4.6)$$

こうして観測イベントのエネルギー分布の標準偏差 σ_E が計算できる。

全く同様の議論の帰結として、

$$\sigma_{S_{\text{P1a}}} = \sqrt{(P1_{\text{P1a}}\sigma_E)^2 + (E_{\text{meanP1a}}P1_{\text{P1a}} + P2_{\text{P1a}})^2\sigma_{D_{\text{P1a}}}^2} \quad (4.7)$$

ただし、 S_{P1a} はプラスチックシンチレータ PMT で観測する信号の標準偏差であり、 $P1_{\text{P1a}}, P2_{\text{P1a}}$ はプラスチックシンチレータ PMT 信号値と観測放射線エネルギーの線形対応モデルを表すパラメータ (傾き, 切片)、 $\sigma_{D_{\text{P1a}}}$ はプラスチックシンチレータ PMT での検出装置の応答ばらつきを表す変数である。 σ_E が両検出装置で一致し、 $E_{\text{meanNaI}} + E_{\text{meanP1a}} = 661.657[\text{keV}]$ となる。これを用いると、

$$\frac{\sqrt{\sigma_{S_{\text{P1a}}}^2 - (P1_{\text{P1a}}\sigma_E)^2}}{(E_{\text{meanP1a}}P1_{\text{P1a}} + P2_{\text{P1a}})} = \sigma_{D_{\text{P1a}}} \quad (4.8)$$

こうして興味のある $\sigma_{D_{\text{P1a}}}$ の値を得る、最終的にこの値の E_{meanP1a} 依存性をモデル化する。

4.4 プラスチックシンチレータの応答モデル化

各プラスチックシンチレータ較正実験について、信号期待値および信号分解能のエネルギー依存性を線形でモデル化した。これは解析ソフト Root の TGraphErrors クラスを用いた線形フィッティングによって行われた。ここでモデル化のパラメータ 1, パラメータ 2 は次の関係を満たす定数である。

$$\text{信号期待値, 信号分解能} = \text{パラメータ 1} \times \text{エネルギー [keV]} + \text{パラメータ 2} \quad (4.9)$$

4.4.1 プラスチックシンチレータの信号期待値エネルギー依存性モデル化

表は各プラスチックシンチレータ較正実験のデータを用いたモデル化と、全区間のデータを用いたモデル化の結果を表している、

表 27: プラスチックシンチレータ PMT 較正実験における信号期待値エネルギー依存性

信号期待値	パラメータ 1	1 σ 誤差	パラメータ 2	1 σ 誤差
較正実験(1)	0.16745	0.00864132	5.77171	1.31325
較正実験(2)	0.185676	0.04712	2.41914	6.02646
較正実験(3)-前半	0.190675	0.0126342	4.58595	1.79013
較正実験(3)-後半	0.205182	0.0149872	1.37195	1.99094
較正実験(4)	0.208389	0.0143445	5.40143	2.92655
全データ統合	0.198344	0.00563135	2.9773	0.870195

各測定で行ったモデル化のパラメータ概ね近い数値を示す。よって全データを統合して解析に利用するのが適切であると判断する。ただし統合モデルと較正実験 (1) で作成したモデルのパラメータには誤差範囲を超えた差が見られるため、全体での各測定結果の変動をパラメータの誤差として追加し計算する。全データに対するフィッティングの結果をグラフで表す、

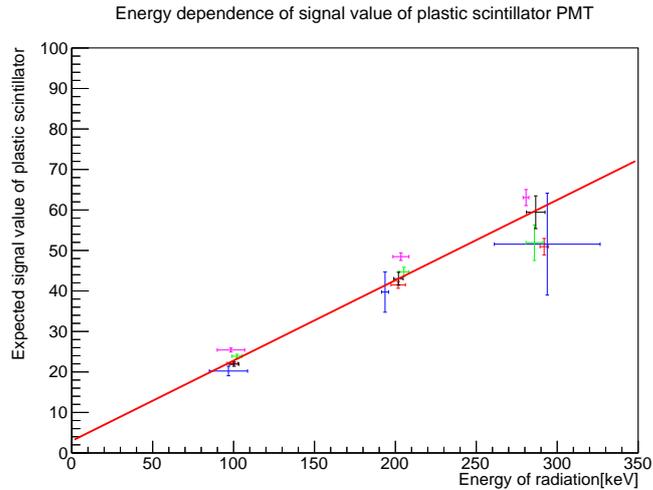


図 78: プラスチックシンチレータ PMT の信号期待値エネルギー依存性と統合線形モデル

ここで、直線はデータ統合によって計算される応答の線形モデルである。グラフ中で示される赤のデータは較正実験 (1)、青のデータは較正実験 (2)、緑のデータは較正実験 (3) 前半、黒のデータは較正実験 (3) 後半、マゼンタのデータは較正実験 (4)、で取得したデータに対応する。表 27 で考察した通り、較正実験 (1) のデータに傾向から外れたものがあることが確認できる。

以上の結果よりプラスチックシンチレータについての信号期待値のエネルギー依存性はほとんど線形で表現できるものとする。最終的なモデル化は以下の通りである。

$$\text{信号期待値} = \text{パラメータ 1} \times \text{エネルギー [keV]} + \text{パラメータ 2} \quad (4.10)$$

ただし、パラメータ 1 = 0.198344 ± 0.01720437 , パラメータ 2 = 2.9773 ± 2.142324729

4.4.2 プラスチックシンチレータの信号分解能エネルギー依存性モデル化

表は各プラスチックシンチレータ較正実験のデータを用いたモデル化と、全区間のデータを用いたモデル化の結果を表している。*4

表 28: プラスチックシンチレータ PMT 較正実験における信号分解能エネルギー依存性

信号分解能	パラメータ 1	1 σ 誤差	パラメータ 2	1 σ 誤差
較正実験(1)	0.13885	0.00980055	-7.42186	1.51231
較正実験(2)	0.191592	0.261699	-4.4212	53.5796
較正実験(3)-前半	0.167712	0.0193557	-13.1918	3.42509
較正実験(3)-後半	0.190836	0.0214068	-13.6851	3.23498
較正実験(4)	0.154267	0.0144676	-6.68912	2.75182
全データ統合	0.157974	0.00710223	-9.58998	1.19663

各測定で行ったモデル化のパラメータ概ね近い値を示す。この結果から全データを統合して解析に利用する

*4 較正実験 (2) の NaI シンチレータ PMT-30° データについては分散が負になったため解析対象から除外した。

のが適切であるとした。

次に全データに対するフィッティングの結果をグラフで表す、

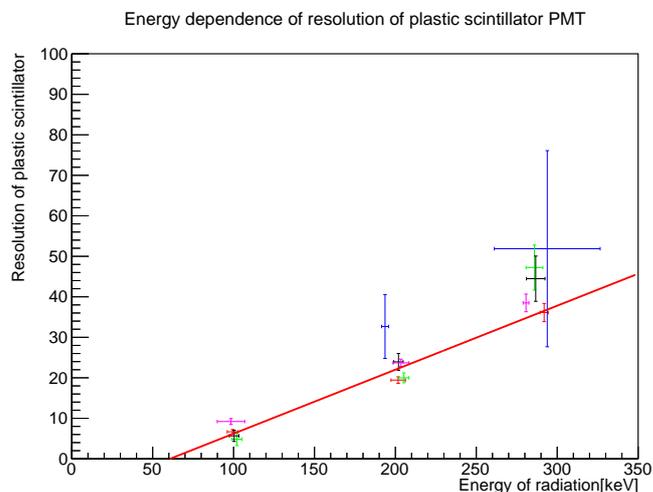


図 79: プラスチックシンチレータ PMT の信号分解能エネルギー依存性と統合線形モデル

ここで、直線はデータ統合によって計算される応答の線形モデルである。グラフ中で示される赤のデータは較正実験 (1)、青のデータは較正実験 (2)^{*4}、緑のデータは較正実験 (3) 前半、黒のデータは較正実験 (3) 後半、マゼンタのデータは較正実験 (4)、で取得したデータに対応する。

以上の結果よりプラスチックシンチレータについての信号分解能のエネルギー依存性はほとんど線形で表現できるものとする。最終的なモデル化は以下の通り、

$$\text{信号期待値} = \text{パラメータ 1} \times \text{エネルギー} [\text{keV}] + \text{パラメータ 2} \quad (4.11)$$

ただし、パラメータ 1 = 0.157974 ± 0.00710223 , パラメータ 2 = -9.58998 ± 1.19663

4.5 ノイズデータの取り扱い

ノイズデータはデータ取得期間および計測期待値が ^{147}Pm β 線測定実験 と一致するように規格化され、信号 1 単位の各区間への計測期待値が小数点以下 6 桁までで記録された。このデータは最終的なニュートリノ質量検定で活用される。

4.6 シミュレーションモデルデータの取り扱い

Geant4 で作成されたシミュレーションデータは階級幅 $0.0050417 [\text{keV}]$ の分布ヒストグラムに変換された。この階級幅はプラスチックシンチレータ較正の信号期待値のモデル化で求めたパラメータ 1 についてパラメータ $1^{-1} \times 10^{-3}$ の値であり、以後の解析中に不均等に分布が分配される現象を防ぐために重要である。

この分布はエネルギー光量変換プログラムによってデータ軸の単位が信号値、階級幅が 0.001 の分布データに変換された。

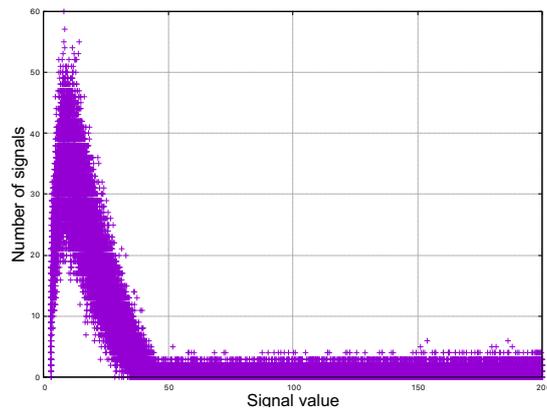


図 80: Geant4 シミュレーション光量分布変換後データ

次に観測装置での信号検出に由来するばらつきの補正が加えられた。こうして作成された分布モデルを以下再現モデルと呼ぶ。これも同様の階級幅を持つ分布である。

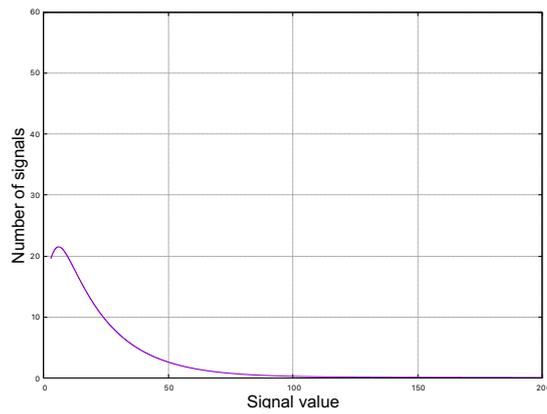


図 81: Geant4 シミュレーション観測装置効果補正後データ

4.7 再現モデルと観測モデルの比較

再現モデルは観測分布と一致せず、ニュートリノ質量の検定は行わなかった。

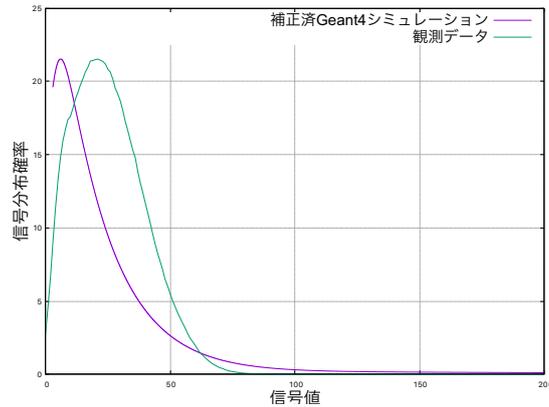


図 82: 再現モデル分布と観測分布の比較

5 考察

5.1 課題と改善

本実験には次の課題がある。

1. プラスチックシンチレータ較正に時間を要している
2. プラスチックシンチレータの分解能が低い
3. 検出装置応答のモデル化について妥当性に疑問の余地がある
4. 検出装置の時間経過に伴う応答変化傾向の定量的理解が不十分である
5. 実験環境の気温変動の理解が不十分である
6. 検出装置の動作が不安定である
7. ニュートリノが質量を持つ場合、再現モデル分布の近似精度に疑問の余地がある
8. ノイズ計測において計数率が極端に変化する原因が不明である

(1) について本実験はプラスチックシンチレータの較正実験に 1 回あたり 5 時間程度要している、この間に装置の応答や環境は変化しこれは実験および解析における重大な不確定性要素となっている。この課題の要因としてプラスチックシンチレータでコンプトン散乱を起こしたガンマ線が NaI シンチレータに入射する確率が制限されることが挙げられる。これはガンマ線検出装置の数を増設し検出確率を増やすことで対処可能である。2 つ目の要因として、ガンマ線がプラスチックシンチレータでコンプトン散乱を起こす確率が小さいことが挙げられる。この課題には ^{137}Cs 線源の強度を増加させることで対処できる。(2) についてプラスチックシンチレータ PMT の信号検出分解能が低いために解析の不定性が増大している。この問題はより高性能な PMT やプラスチックシンチレータを使用することで解決できる可能性がある。(3) について検出装置応答のモデル化の信頼度に疑問がある。NaI シンチレータ PMT の較正では外挿した値を用いており、450 keV 以下のエネルギー領域を較正できる線源、手法が求められる。プラスチックシンチレータ PMT の較正では光電効果イベント選択後の分布について、ガウス分布でのフィッティングが適切であるかという点で疑問の余地がある。プラスチックシンチレータについて線形応答を仮定したモデル化についても考察の余地がある。(4) について時間変化に伴う検出装置の応答変化があることは定性的に既知であり、その対処は本実験の設計で考慮さ

れた。しかし定量的な理解は不十分であり本実験の解析で考慮しなかった。この部分の理解が本実験における不定性の低減、および解析法の信頼度向上に大きくつながると考えられる。(5)について本実験では気温維持のため空調設備を用いたが、実際に安定していたかは明らかでない。温度計を用いて気温を記録しそのデータを解析に反映させることで解析の精度向上が期待できる。(6)についてデジタイザー DT5740 と計測コンピュータの接続部分で接触不良があり計測が中断されることが度々あった。この現象によって統計データが減少したため解析の誤差が増大している。安定して高統計量の実験を行うためにはこの課題を解決することが必要である。(7)について本実験ではニュートリノが質量を持つ場合その電子エネルギー分布は質量分だけ低エネルギーへ移動したものになるという近似を用いた。しかし今回のようにプラスチックシンチレータの分解能が低くまた 10 keV 程度の精度でニュートリノ質量を評価する場合この近似の信頼性に疑問がある。この精度を定量的に評価するか新たなスペクトル近似法を考案することが必要である。(8)について本実験では前後でノイズの測定実験を行ったがその計数率は約 1.46 倍異なるものであった。これはまだ把握されていない環境変化要素が存在することを示唆している。

5.2 展望

本実験の展望を述べる。

現在本実験は不詳の要因によって観測データと再現モデルが一致しない状況にあるが、その要因を探るための研究の方向性は明確であり以下にその指針を挙げる。

1. 新規 ^{137}Cs 線源入手によるプラスチックシンチレータ較正の高速化
2. プラスチックシンチレータの新規購入および性能評価
3. 検出装置応答の温度および動作時間依存性の精密測定
4. 温度計を活用した実験設備および解析法の確立
5. デジタイザーとコンピュータ接続の安定化

上記の内容に取り組むことで、本研究はニュートリノ質量に対して制限を与えるという段階に到達するだろう。

6 結論

本研究は未だ測定されていない反電子ニュートリノの有効質量測定を目標に行われた。 β 崩壊から生じる電子のエネルギーがニュートリノ質量に影響を受けることを利用して、 ^{147}Pm 線源から生じる電子のエネルギー分布を観測しニュートリノ質量測定を試みた。最終的に得られた分布データは想定のものとは異なっており、ニュートリノ質量に制限をかけることはできなかった。本研究の課題改善に向けた新たな方向性は明確であり、将来的にはニュートリノ質量に制限をかけるという目標を達成する見込みである。

謝辞

毎週のミーティングを通して P2 実験指導教官の中家剛教授, 木河達也助教より研究の方向性から技術的な側面まで多くのアドバイスをいただきました. 様々な疑問に答えてくださり, また問題への対処法を考えてくださり心強い存在でありました. 課題研究 P2 TA の有本さん, 星野さんから多くの助言, お手伝いをしていただきました. 学部生が何も分からないところからなんとか実験を進めてこられたのは多くの手助けがあったおかげです. 理論的な側面について, P2 理論指導教官の杉本茂樹教授をはじめ素粒子論教員の方々から助言をいただきました. お忙しい中気さくに質問に答えてくださり大変助かりました. また, 京都大学 理学研究科 高エネルギー物理学研究室のご厚意によって実験室をはじめ数多くの機材を提供していただきました. 本研究を行うことができたのは, ここで紹介したの方々をはじめとして多くのご厚意, ご協力があったおかげです. ありがとうございました.

参考文献

- [1] 榎本三四郎『KATRIN 実験におけるニュートリノ質量の直接測定』(2021)
- [2] 深野重男. 表計算ソフトを用いたベータ線スペクトルの計算. *Radioisotopes*, Vol. 51, pp. 392-399. (2002-10)
- [3] D.H.WILKINSON. EVALUATION OF THE FERMI FUNCTION. *Nucl.Instr.Meth.*, Vol. 82, pp. 122-124. (1970)
- [4] F.E. WIETFELDT et al. The 17 keV neutrino. *PhysicsReports*. 273:149-197. (1996)
- [5] 露木孝尚『右巻きニュートリノへの理論的制限』. 新潟大学学術リポジトリ. (2016)
- [6] Particle Data Group. PDG Live.
<https://pdglive.lbl.gov/Particle.action?node=S066&home=>, (参照 2024-06-02)
- [7] 木村元『検定(4): 適合度の検定 K-S 検定』. 海事統計学 講義資料. <http://sysplan.nams.kyushu-u.ac.jp/gen/edu/MarineStatistics/2018/kougi14/kougi14.pdf>, (参照 2024-05-31)