

ニュートリノ反応断面積測定

京都大学理学部 2020 年度課題研究 P2
伊東利将, 田舎和也, 河本地弘, 武市宗一郎

2021 年 4 月

目次

1	実験の目的	6
2	理論	6
2.1	荷電カレント反応の種類	7
2.2	反応断面積	7
2.3	実験原理	8
3	実験方法	9
3.1	ビームの生成	10
3.2	測定装置	11
3.3	ミューオンの検出	16
4	結果と解析	23
4.1	データ取得	23
4.2	解析手法	23
4.3	解析結果	27
5	考察	28
5.1	イベント数の較正	28
5.2	Simulation との比較	31
6	実験のまとめ	34
7	反省と改善点	34
8	謝辞	35

目次

2.1	荷電カレント反応のダイアグラム.(a) が CCQE,(b) が CC1 π ,(c) が CC coherent π (c),(d) が DIS に対応している.	8
2.2	ニュートリノエネルギーと断面積の関係.1GeV 付近では,CCQE が支配的で次に CC1 π が見られる.	8
2.3	親核子のパイオンとニュートリノのエネルギーの関係. 角度 θ が小さくないとき, $E_\pi \gtrsim 3 \sim 5$ GeV で E_ν は一定.	9
2.4	$E_\pi = 5$ GeV としたときの θ と E_ν の関係. 角度 θ が小さくないとき E_ν がほぼ一定になっている.	9
3.1	J-PARC 航空写真	10
3.2	ニュートリノビーム生成	10
3.3	実験装置配置場所 (ビーム中心から★は $\theta = 1.1^\circ$, ▲は $\theta = 2.0^\circ$ である) 黄色の矢印はビーム中心の位置を NM-B2 棟に投影しており, 青い四角はイングリッドという検出器である	11
3.4	装置概略図	12
3.5	装置 (ビーム下より撮影したもの)	13
3.6	sand muon イベントの例	14
3.7	ニュートリノイベントの模式図	14
3.8	鉛ガラス図面	15
3.9	鉛ガラス内観	15
3.10	鉛ガラス外観	16
3.11	鉛ガラス後部に取り付けた PMT の写真	16
3.12	veto 用板概略	17
3.13	前面寸法	17
3.14	後面寸法	17
3.15	上下面寸法	18
3.16	左右面寸法	18
3.17	光電子増倍管原理	19
3.18	CAEN の wave form degitize の写真	19
3.19	ビーム信号のタイミング (上はビーム信号, 下は gate generator で遅延させた信号)	20
3.20	配線図 1 台目	21
3.21	配線図 2 台目変更前	21
3.22	配線図 2 台目変更後	22
4.1	鉛ガラスの波形の例.	23
4.2	シンチレータの生波形の例.	23
4.3	鉛ガラスの threshold 決定.	24
4.4	鉛ガラスの threshold の例. 緑線が baseline、青線が threshold を表す.	24
4.5	Off-axis 角 1.1° においた装置の鉛ガラス (Ch0) の信号の範囲のフィッティング.	24

4.6	Off-axis 角 2.0 度においた装置の鉛ガラス ch0 の波が最大値をとる時間の分布.	25
4.7	Off-axis 角 2.0 度においた装置の鉛ガラス ch1 の波が最大値をとる時間の分布.	25
4.8	上下面の波形が最大値をとる時間の分布.	25
4.9	側面の波形が最大値をとる時間の分布.	25
4.10	上下面の波が最大値をとる時間の時間差分布.	26
4.11	側面の波が最大値をとる時間の時間差分布.	26
4.12	鉛ガラスの信号例 (Ch0).	27
4.13	シンチレータの信号例 (上下面).	27
4.14	シンチレータの信号例 (前面).	27
4.15	シンチレータの信号例 (後面).	27
5.1	粒子の入射方向と検出の様子. 実線がミュオン, 破線がニュートリノを表す. ×印がミュオンが通過して検出器で検出されたイベント, ○印がミュオンが通過したにもかかわらず検出器の inefficiency によって検出されなかったイベントを表す.	30
5.2	Geant4 での simulation 例 (10 イベント).	32
5.3	最もエネルギーを落とした面への energy deposit.	32
5.4	二番目にエネルギーを落とした面への energy deposit.	32
5.5	最もエネルギーを落とした面と二番目にエネルギーを落とした面への energy deposit の分布.	33

表目次

2.1	力とゲージ粒子	6
2.2	6
4.1	Off-axis 角 1.1° での反応数.	27
4.2	Off-axis 角 2.0° での反応数.	28
5.1	Off-axis 角 1.1° での較正後の反応数.	30
5.2	Off-axis 角 2.0° での較正後の反応数.	31
5.3	1.0×10^{19} POT あたりのニュートリノ及びミュオンイベント数の比較.	31
5.4	鉛ガラスの組成.	31
5.5	NEUT から見積もられるイベント数.	32
5.6	Geant4 により計算される検出効率.	33
5.7	Simulation と実験のイベント数の比較.	34
6.1	1.0×10^{19} POT あたりのニュートリノイベント数.	34

1 実験の目的

20 世紀, β 崩壊ではエネルギー保存則が破れているように観測され, Fermi や Pauli 等は, 未知の, 質量が非常に小さいか 0 の中性粒子の存在を仮定し, 後にその実在が確かめられ, 現在ではニュートリノと呼ばれている [1]. この粒子は重力相互作用以外には弱い相互作用しかしないと考えられている. このためニュートリノの実験は困難を伴う, 近年ではニュートリノ振動が観測され, ニュートリノに質量があることが確認された [2][3].

我々はニュートリノの存在を確かめ, 弱い相互作用の理論の検証をすることを目的として J-PARC の大強度ニュートリノビームラインでニュートリノの反応断面積の測定を行った.

2 理論

素粒子標準模型では自然界の 4 つの力のうち重力を除いた 3 つが記述される. それぞれをゲージ粒子が仲介していると考えられている (表 2.1).

表 2.1 力とゲージ粒子

力	ゲージ粒子
強い力	グルーオン
電磁気力	フォトン
弱い力	ウィークボソン
(重力)	(グラビトン)

グラビトンは未発見である (2021 年). 弱い力を仲介するウィークボソンは大きく 2 種類に分類される. 1 つは W^\pm 粒子で, これらが仲介する反応を荷電カレント反応 (CC 反応) という. もう 1 つは Z^0 粒子が仲介する中性カレント反応 (NC 反応) である (表 2.2).

表 2.2 弱い相互作用

反応	ゲージ粒子
荷電カレント反応	W^\pm
中性カレント反応	Z^0

このうち我々の検出器が検出できるニュートリノ反応由来の荷電粒子を生成するのは荷電カレント反応である. 荷電カレント反応ではニュートリノは同じ世代の荷電レプトンに変化する. 荷電レプトンは今回用いた検出器の中で Cerenkov 光を発するので我々はこれを検出可能である. 一方, 中性カレント反応ではニュートリノは別の荷電粒子に変化することはない. この場合は反応の前後で移行したエネルギーの大きさを検出することになるが今回用いた検出器ではこれを測定することは不可能である. そのため, 以下では荷電カレント反応のみ

を考慮することとする。その例として以下のものが挙げられる。

2.1 荷電カレント反応の種類

2.1.1 CCQE(a)

CCQE(Charged Current Quasi-Elastic scattering) は以下の反応のことである。ここで l^- は荷電レプトンで、ニュートリノは対応する世代の荷電レプトンに変化する：

$$\nu_l + n \rightarrow l^- + p.$$

2.1.2 CC1 π (b)

CC1 π (Charged Current pion creation) は以下の反応である：

$$\nu_l + N \rightarrow l^- + N' + \pi.$$

ここで、 N と N' は核子である。これは中間状態として短時間で崩壊する Δ 粒子の生成を伴う。これを詳しく見ると以下のようにになっている。

$$\nu_l + p \rightarrow l^- + \Delta^{++} \rightarrow l^- + p + \pi^+,$$

$$\nu_l + n \rightarrow l^- + \Delta^+ \rightarrow l^- + n + \pi^+,$$

$$\nu_l + n \rightarrow l^- + \Delta^+ \rightarrow l^- + p + \pi^0.$$

2.1.3 CC coherent π (c)

CC coherent π (Charged Current coherent pion production) は以下の反応である：

$$\nu_l + A \rightarrow l^- + A + \pi^+.$$

これは、ニュートリノが輸送したエネルギーが原子核を励起し、原子核が規定状態に落ちるときにパイオンを生成する反応である。ここで A は原子核である。

2.1.4 DIS(d)

DIS(Deep Inelastic Scattering) は以下の反応である：

$$\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + N' + X.$$

ここで、 N と N' は核子、 X は複数のハドロンを表す。

2.2 反応断面積

2.1 節で挙げた反応のダイアグラムは図 2.1 の通りである [4].

これらの反応の起こりやすさ (断面積) は図 2.2 で示すようにニュートリノのエネルギーに応じて変わる [4]. 我々が用いたニュートリノビームはエネルギーのピークが 1GeV 付近なので、反応としては CCQE が支配的で、その次に CC1 π が起きやすいということが分かる。それ以外の反応はここでは考慮しない。

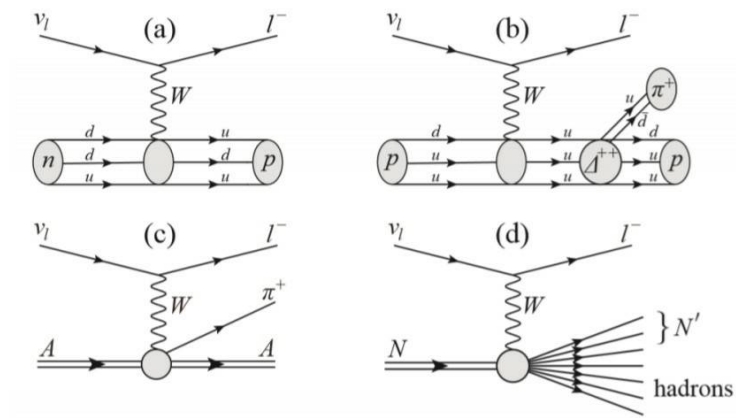


図 2.1 荷電カレント反応のダイアグラム.(a) が CCQE,(b) が CC1 π ,(c) が CC coherent π (c),(d) が DIS に対応している.

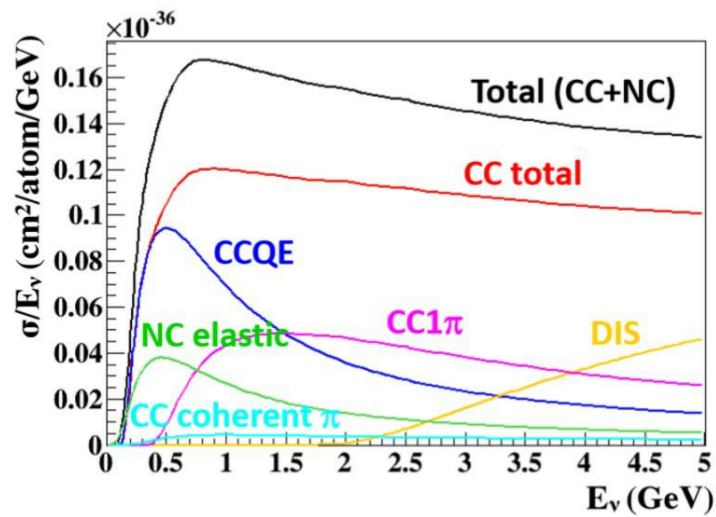


図 2.2 ニュートリノエネルギーと断面積の関係.1GeV 付近では,CCQE が支配的で次に CC1 π が見られる.

2.3 実験原理

今回用いたニュートリノビームはパイオンの崩壊

$$\pi^+ \rightarrow \nu_\mu + \mu^+$$

によって生成され, 相対論的エネルギー運動量保存から

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2 \left(E_\pi - \sqrt{E_\pi^2 - m_\pi^2} \cos \theta \right)} \quad (2.1)$$

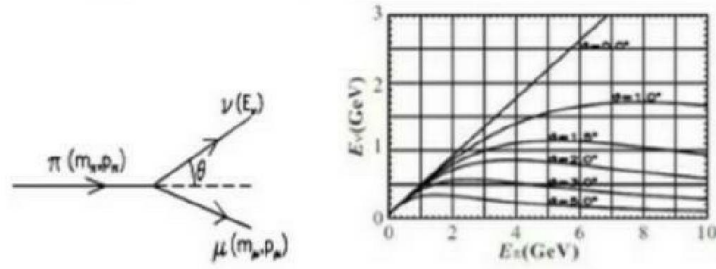


図 2.3 親核子のパイオンとニュートリノのエネルギーの関係. 角度 θ が小さくないとき, $E_\pi \gtrsim 3 \sim 5$ GeV で E_ν は一定.

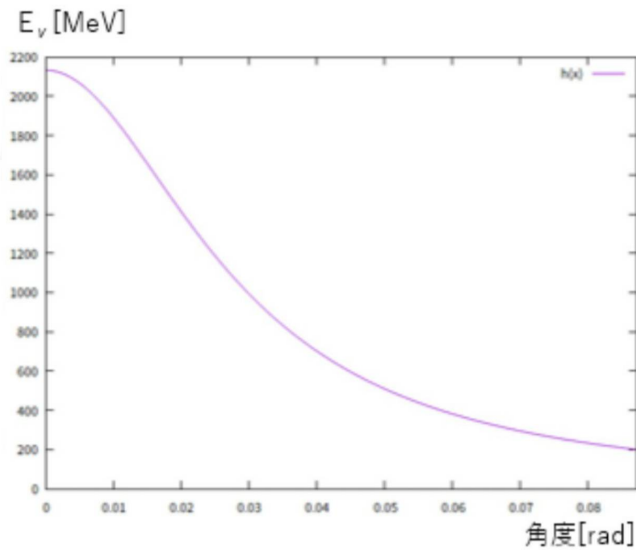


図 2.4 $E_\pi = 5$ GeV としたときの θ と E_ν の関係. 角度 θ が小さくないとき E_ν がほぼ一定になっている.

と, このビーム中心から角度がより大きい地点にはより小さなエネルギーのニュートリノが集まることが分かる. ここで E_ν と E_π はそれぞれニュートリノとパイオンのエネルギー, m_π と m_μ はパイオンとミューオンの質量, θ はパイオンの三次元運動量ベクトルとニュートリノのそれとがなす角である. 図 2.3 の左図はその模式図で, 右図が式 (2.1) のグラフである [4].

このグラフを見ると, $\theta = 0$ 以外ではパイオンのエネルギーが十分大きければニュートリノのエネルギーはパイオンのエネルギーに無関係にほぼ一定であることが分かる. つまり, パイオンビーム中心から十分な角度がある場所で実験を行えば元のパイオンのエネルギーを知ることなしにニュートリノビームのエネルギーピーク値を知ることができるのである. 更に θ と E_ν との関係を表したのが図 2.4 である.

3 実験方法

本実験は茨城県東海村にある J-PARC のニュートリノモニター棟地下二階 (以下 NM-B2) で行われた. J-PARC では線形加速器により陽子を 400 MeV 程度に加速し, シンクロトロンで 3 GeV 迄加速させる. メイリングで最終的に陽子のエネルギーは 30 GeV に到達する. この際, 測定中にどれだけの量の陽子が標的に

衝突したかを示す数として POT (Proton On Target) を用いる.

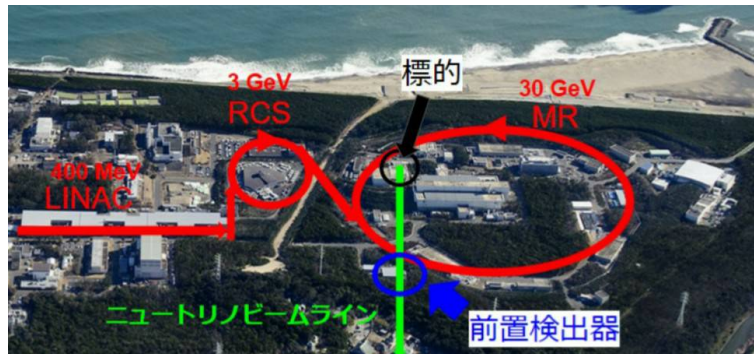


図 3.1 J-PARC 航空写真

3.1 ビームの生成

ニュートリノビームは以下の過程により生成される.

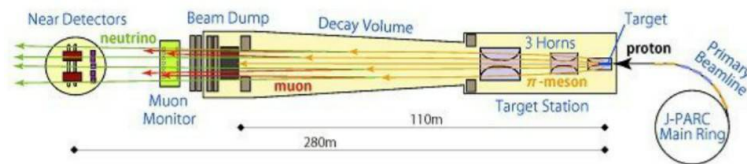


図 3.2 ニュートリノビームの生成.

図 3.2 ニュートリノビーム生成

1. 加速された陽子ビームがグラファイトのターゲットに当たる
2. パイオンが生成され、ミューオンとニュートリノに崩壊する
3. ブームダンプで反応しなかった陽子や崩壊しなかったパイオン等のミューオンとニュートリノ以外の粒子が吸収される
4. ミューオンモニターでミューオンの空間分布を測定することにより間接的にニュートリノの空間分布を知る
5. ニュートリノビームが実験場所に届く

今回の実験はこのようにして生成されたビームを NM-B2 で捉えることによって行われた. 実験装置の配置場所は図 6 の★と▲の二ヶ所である.

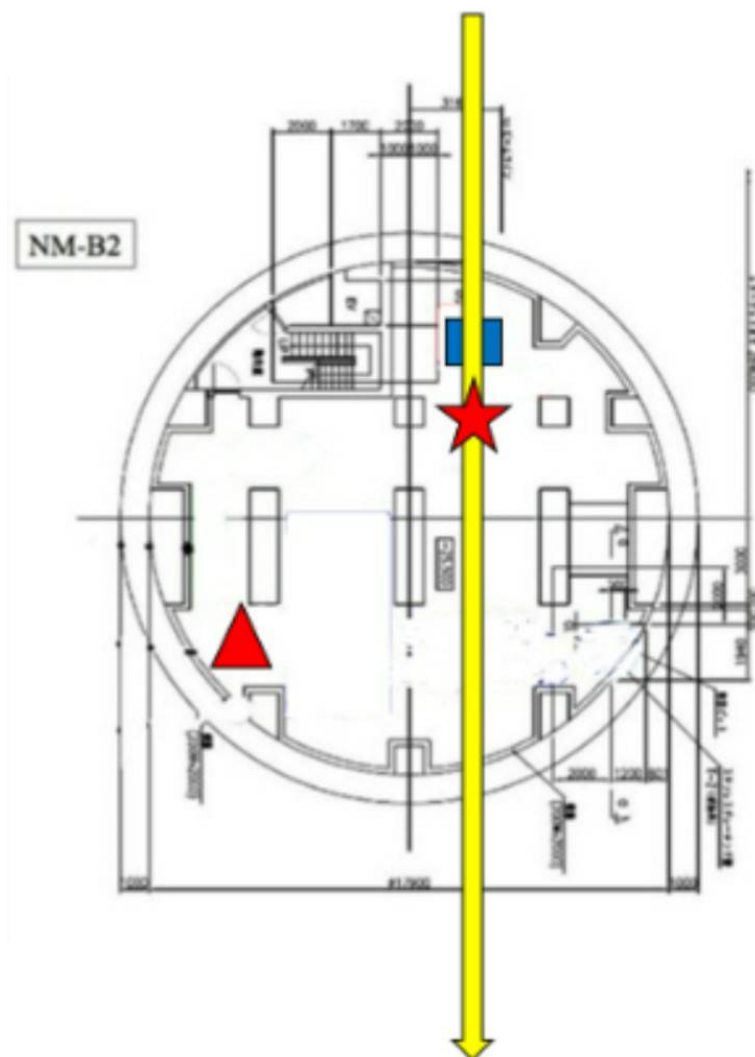


図 3.3 実験装置配置場所 (ビーム中心から★は $\theta = 1.1^\circ$, ▲は $\theta = 2.0^\circ$ である)
 黄色の矢印はビーム中心の位置を NM-B2 棟に投影しており、青い四角はイングリッドという検出器である

この配置場所は周囲にある別の実験装置等の兼ね合いから選んだ。また、NM-B2 棟はビーム中心より下に位置しているため、既に角度がついている。

3.2 測定装置

この節では、ニュートリノの全断面積を測るために我々が設計、製作した測定装置について説明をしていく。

3.2.1 基本設計

ニュートリノ反応を捉えるための、基本設計を以下で説明する。図 3.4 に示すのが装置の概略図である。装置中心部にはターゲット兼、検出も兼ねた鉛ガラスを配置して、全立体角を覆うように veto 用シンチレータを 6 面に配置する。前方にある図 7 水色部分はトリガー用シンチレータで鉛ガラスの検出効率測定に用いる。鉛ガラスを支えるためにレコフレームの枠を作り、レコフレームの外側に veto 用のシンチレータを 6 面に貼り付けた。

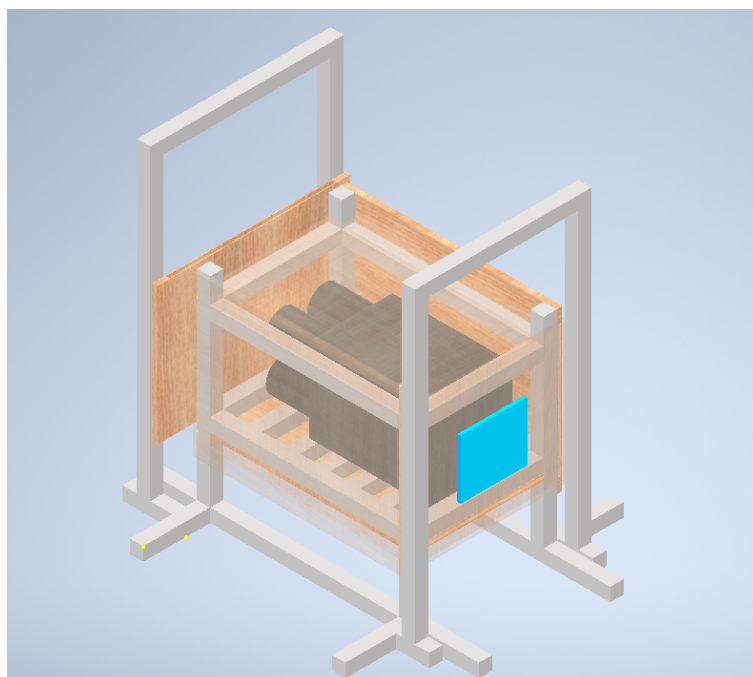


図 3.4 装置概略図



図 3.5 装置 (ビーム下より撮影したもの)

ニュートリノが装置外の地面や構造物で反応することで生成されたミュオンを sand muon と呼び、バックグラウンドとなる。図 3.6 の模式図で示すように sand muon イベントが起こる場合、幾何学的に必ず二枚以上のシンチレーターが反応する。一方ニュートリノイベントの時は鉛ガラス中でニュートリノが反応し、ミュオンが生成され、一枚だけシンチレーターが反応する。よって、鉛ガラスが反応した時にシンチレーターが 0, 1 枚反応すればニュートリノイベント, 2 枚以上反応すればそれは sand muon event として扱う 0 枚の場合も不感率を考慮してニュートリノイベントとして扱う

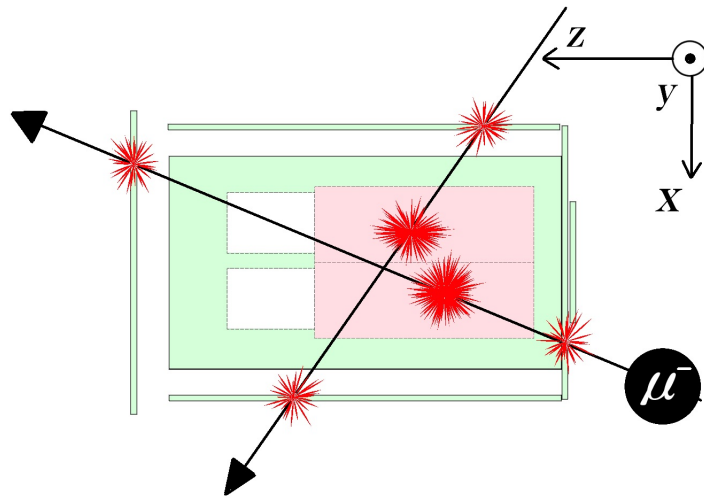


図 3.6 sand muon イベントの例

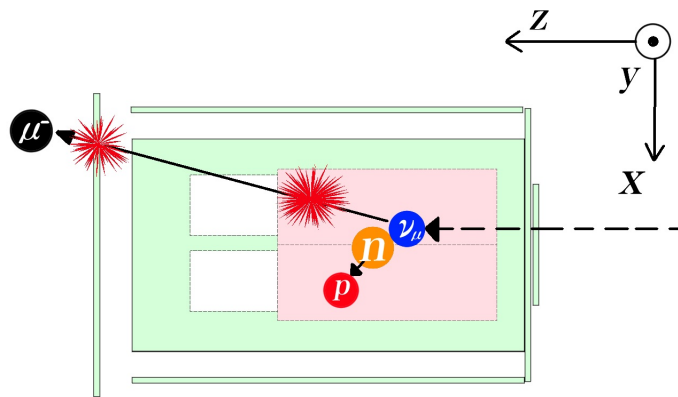


図 3.7 ニュートリノイベントの模式図

3.2.2 ターゲット

本実験ではターゲットとして鉛ガラスを用いた。高エネルギー運動量の荷電粒子が物質中の光速を超えるとチェレンコフ光を発生し、それを鉛ガラス後部に取り付けた PMT（光電子増倍管）で検出し信号とする。鉛ガラスの化学組成性は、PbO が 55 %、K₂O が 4 %、SiO₂ が 39 %、Na₂O が 2 %で、密度は 4.08g/cm³ である。形は台形を底面とする。四角柱で、大きさは図 3.8 に記した（単位は mm）。また、鉛ガラス内部や外見、PMT と接合した物の写真は 3.83.93.10

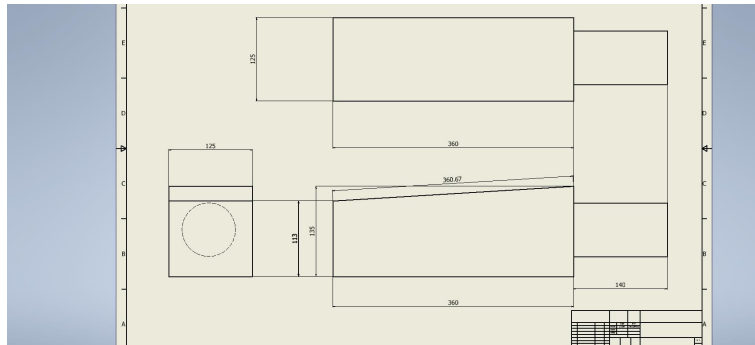


図 3.8 鉛ガラス図面

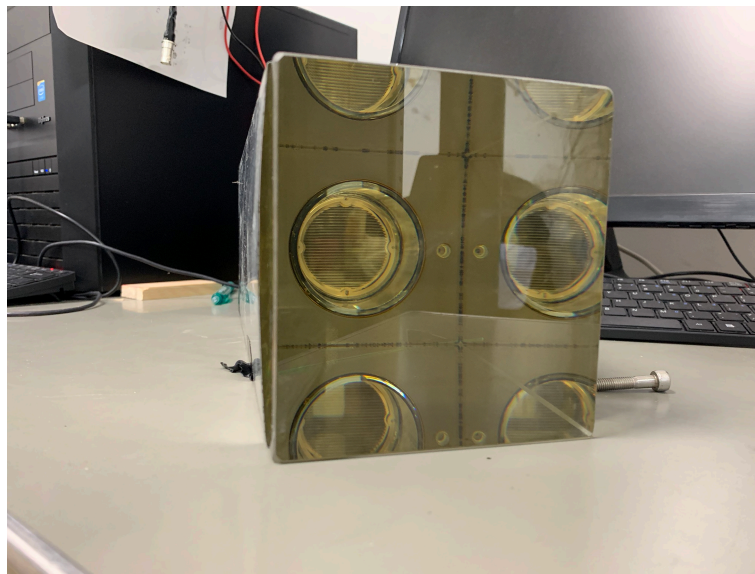


図 3.9 鉛ガラス内観



図 3.10 鉛ガラス外観



図 3.11 鉛ガラス後部に取り付けた PMT の写真

3.3 ミューオンの検出

ミューオンがプラスチックシンチレーターを通過する際のシンチレーション光を波長変換ファイバーを通して、PMT で検出する。ADC を用いて digital 信号へと変換し、PC で波形を解析する。以下で一つ一つの装置についての概略を述べる。

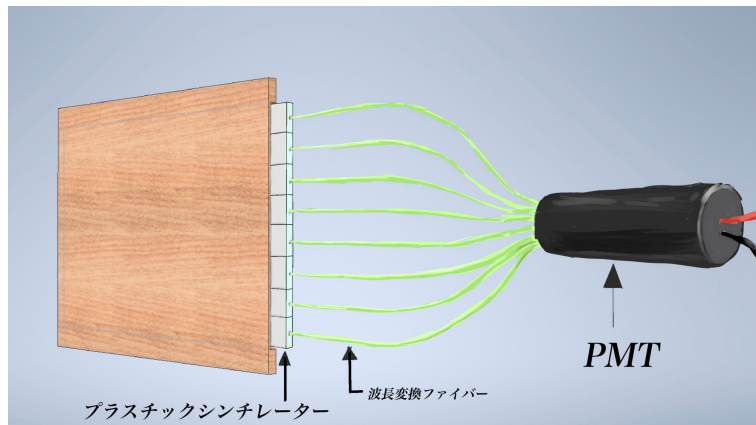


図 3.12 veto 用板概略

3.3.1 プラスチックシンチレーター

荷電粒子がプラスチックシンチレーター内を通過すると、その際に落としたエネルギー分のシンチレーション光が放出される。プラスチックシンチレーターは幅 5 cm、厚さ 1 cm の物を用い、長さは板のサイズに合わせてカットした。図 3.133.143.153.16 参照。

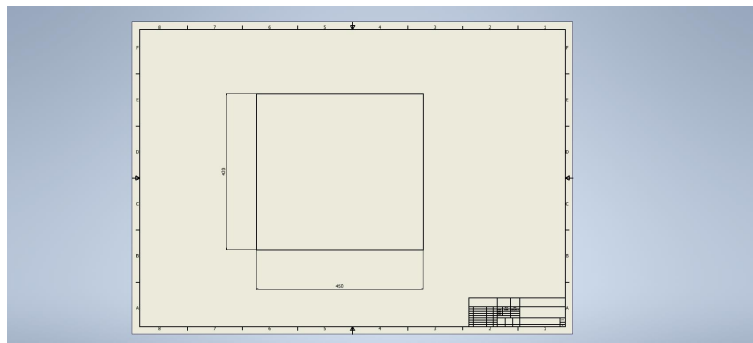


図 3.13 前面寸法

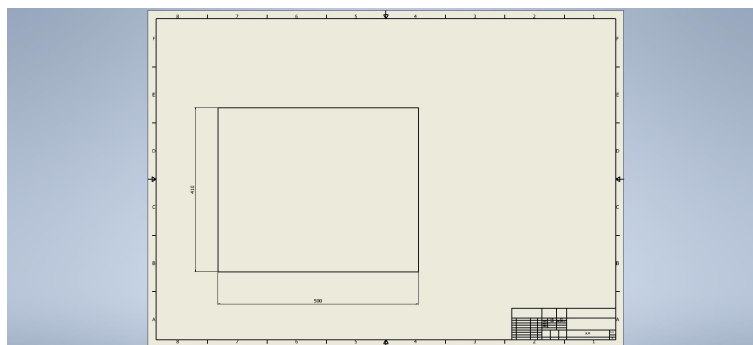


図 3.14 後面寸法

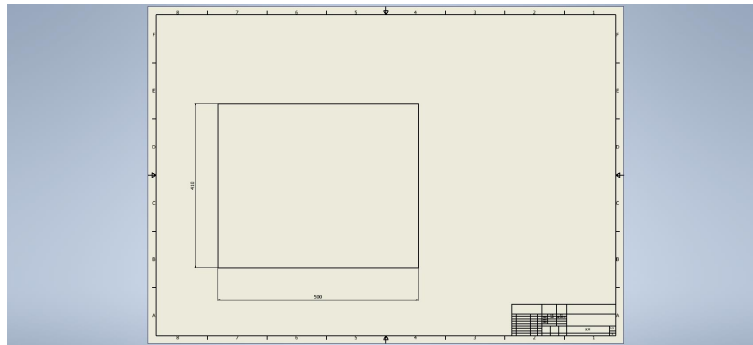


図 3.15 上下面寸法

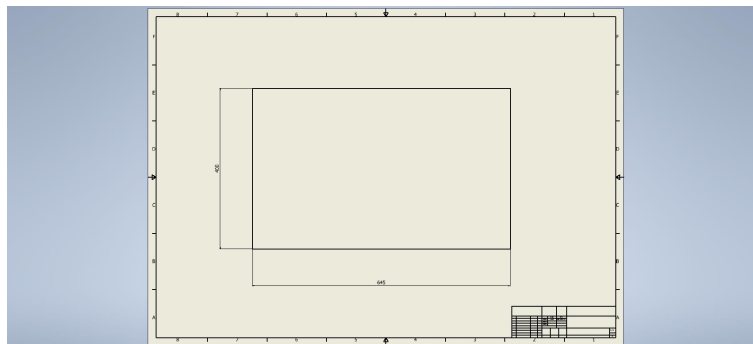


図 3.16 左右面寸法

subsection 波長変換ファイバー波長変換ファイバーとは、ファイバーを通して光を取り込む。このファイバーは内部を通る光は全反射を起こし外に逃げない。ファイバーの先に PMT を取り付けた。

3.3.2 光電子増倍管

PMT（光電子増倍管）とは光電効果によって放出された光電子をダイノードに衝突させ、2次電子の放出を繰り返すことにより電子を増倍させる装置のことである。これによりシンチレーション光、（あるいは鉛ガラスのチェレンコフ光）を電気信号として取り出す。本実験で用いたのはプラスチックシンチレーター、H7415MOD と H8643EGPMOD の2種類をに取り付けた。原理は図 3.17。入射窓を通して入射した光を光電子に変換。電極に与えられた電圧で加速された光電子はダイノードに衝突し二次電子を発生させる。二次電子は最終ダイノードに到達してこれが信号となる。[5]

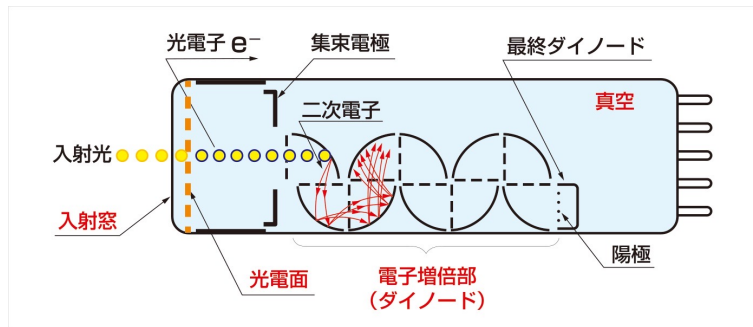


図 3.17 光電子増倍管原理

3.3.3 ADC

光電子増倍管からのアナログ信号を ADC を用いてデジタル信号へと変換する。そしてそのデジタル信号を USB ケーブルで PC へと送り波形として記録する。今回用いたものは図 3.3.3 に示す 2 種類の ADC である。どちらも CAEN 製 ADC でサンプリング数は 250 MHz で入力は 8 ch である。



図 3.18 CAEN の wave form degitize の写真

3.3.4 Beam timing 信号と gate generator

以下の図に示すように beam timing 信号と実際にニュートリノ beam が来るタイミングには 30 μ sec の時間差がある。gate generator を用いて 30 μ sec 遅延させたタイミングを基準として、前 1.37 μ sec, 後 6.97 μ sec を波形として記録する。

3.3.5 trg counter

trg counter は、ニュートリノイベントを観測するには関係ないが、鉛ガラスの検出効率を測るために取り付けた。trgcounter と後面シンチレーターの coincidence を取ったときの鉛ガラスの反応回数を調べることで、鉛ガラスの検出効率を測る。

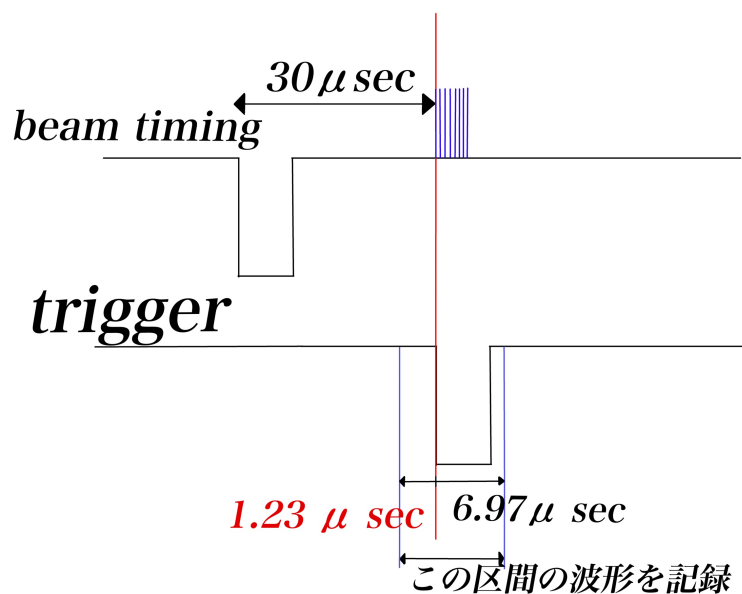


図 3.19 ビーム信号のタイミング (上はビーム信号. 下は gate generator で遅延させた信号)

3.3.6 配線図

配線図の概略を以下に示す。鉛ガラス4つと6枚の veto 板, trg counter, 全てを読み出すには 8 ch しかない ADC ではチャンネルが足りない。そこで2つの信号の内片側を LEMO ケーブルで遅延させた後, analog sum を用いて信号を束ねることで 8ch に収めた。analog sum とは二つのアナログ信号を合わせたもの。遅延時間は回路図の導線部分に記した。配線図二台目に変更前後があるのは機材トラブルのため。

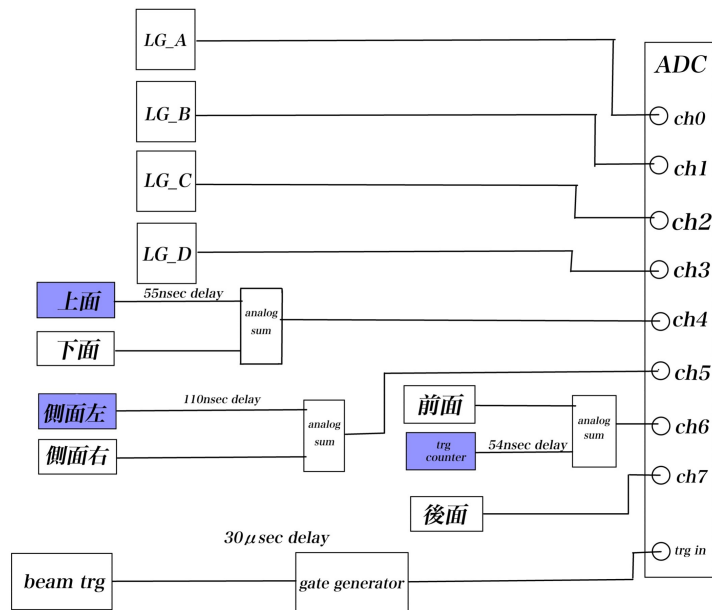


図 3.20 配線図 1 台目

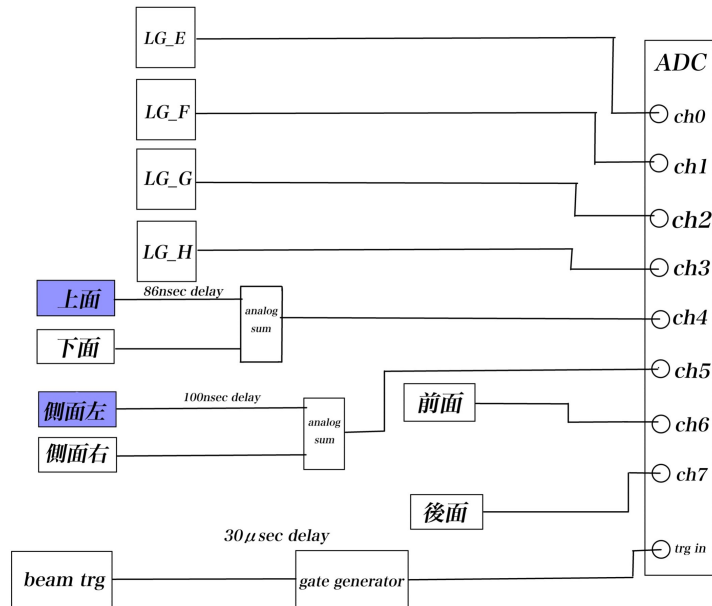


図 3.21 配線図 2 台目変更前

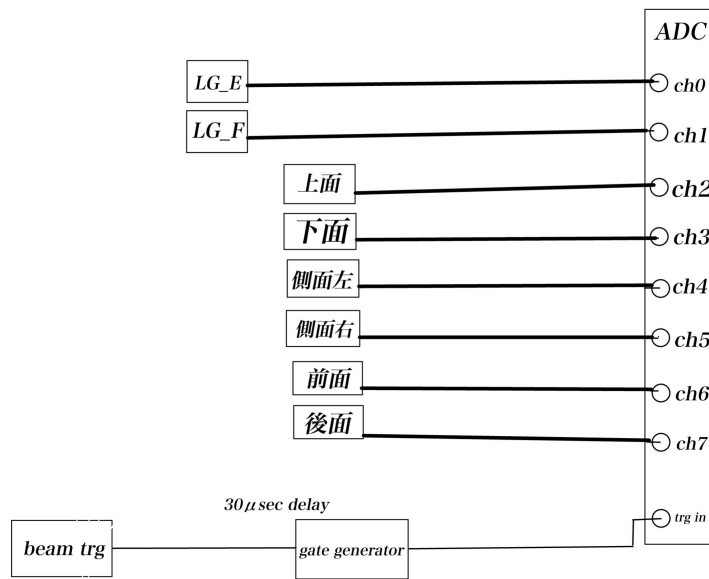


图 3.22 配线图 2 台目変更後

4 結果と解析

4.1 データ取得

Off-axis 角 1.1° に設置した検出器システムでは、2021 年 3 月 13 日午前 11 時から 2021 年 3 月 15 日午前 10 時までデータ取得を行った。データが長い間取れていないという事態を防ぐため 4 回にわけてデータを取得した際の切り替えの時間のほか、ビームが停止した時間を除いて、41.5 時間 (60327 ± 544 spills, 482613 ± 4354 bunches) 分のデータを取得した。データの量は POT では以下の量に相当する。

$$\frac{460 \text{ kW} \times 2.48 \text{ sec/spill} \times 60327 \text{ spills}}{30 \text{ GeV/POT}} \approx 1.43 \times 10^{19} \text{ POT} \quad (4.1)$$

一方 Off-axis 角 2.0° に設置した検出器システムでは、2021 年 3 月 14 日午後 9 時から 2021 年 3 月 15 日午前 11 時までデータ取得を行った。ビームが停止した時間を除いて、10.5 時間 (15169 spills, 121354 bunches) 分データを取得した。データの量は POT では以下の量に相当する。

$$\frac{460 \text{ kW} \times 2.48 \text{ sec/spill} \times 15169 \text{ spills}}{30 \text{ GeV/POT}} \approx 3.60 \times 10^{18} \text{ POT} \quad (4.2)$$

それぞれ取得した ADC のデジタル波形を以下の方法で解析を行い、ニュートリノ事象数を算出した。

4.2 解析手法

4.2.1 信号の判別

■offset と threshold の決定 ADC から取得した各信号の波形の例を図 4.1 に示す。

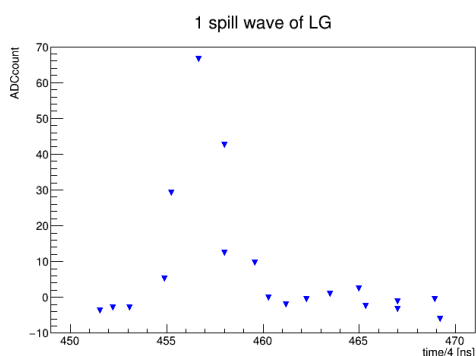


図 4.1 鉛ガラスの波形の例.

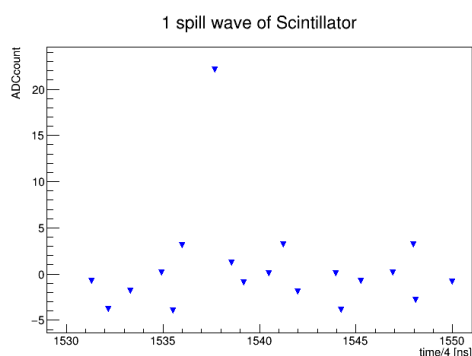


図 4.2 シンチレータの生波形の例.

信号が来るべきタイミングより前のデータ取得中にミュオン等の反応が検出される確率は十分小さいと考えられることから trigger 以前の信号はノイズであるとみなす。まずはこの trigger 以前の信号の全てを平均して offset し pedestal とする。また trigger 以前の信号の offset からの 波高の最大値を分布させて片側を Gaussian fitting する。ここで鉛ガラスは多少のノイズを拾ってもシグナルを取りこぼさぬよう 2σ 、シンチレータは波高の低い信号が少なく、noise による誤った VETO を防ぐため 4σ だけ pedestal から高い位置をもって threshold とする。

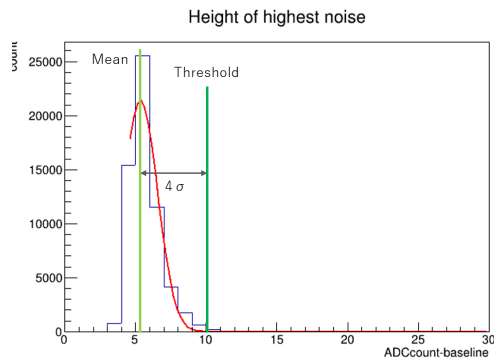


図 4.3 鉛ガラスの threshold 決定.

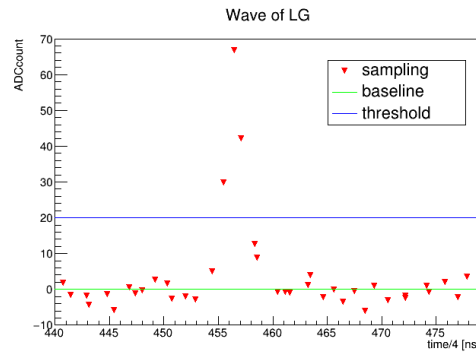


図 4.4 鉛ガラスの threshold の例。緑線が baseline、青線が threshold を表す。

■bunch ごとの反応時間の決定 threshold を超えた信号については、どの bunch に対応しているかの判別が不可欠である。そこで、bunch ごとに信号とする反応のタイミングの範囲を定めた。Off-axis 角 1.1° に設置した装置は、threshold を超えた信号についてその信号の波高が最大値をとる時間を分布させ、これを 8 箇所で Gaussian fitting し、それらの 8 bunch について 2σ の範囲を信号として判定した。

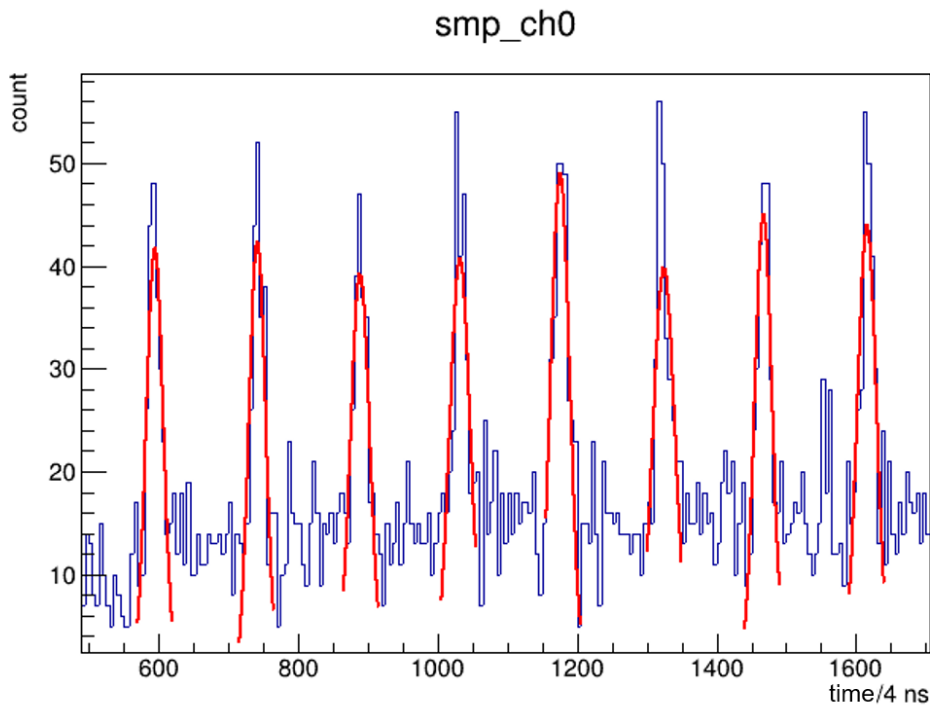


図 4.5 Off-axis 角 1.1° においた装置の鉛ガラス (Ch0) の信号の範囲のフィッティング.

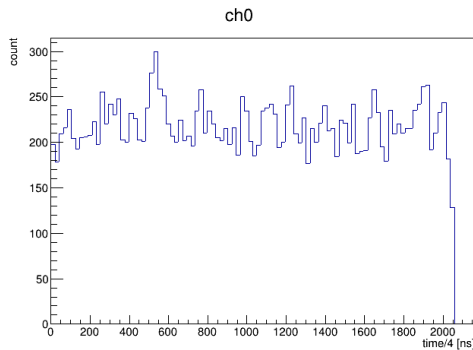


図 4.6 Off-axis 角 2.0 度においた装置の鉛ガラス ch0 の波が最大値をとる時間の分布.

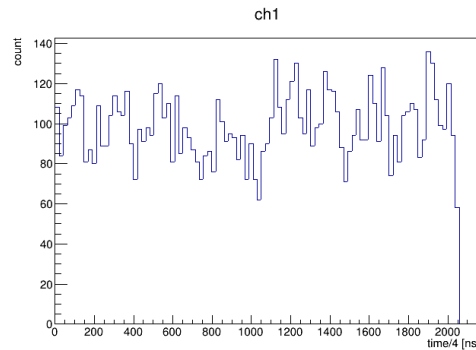


図 4.7 Off-axis 角 2.0 度においた装置の鉛ガラス ch1 の波が最大値をとる時間の分布.

Off-axis 角 2.0° に設置した装置のノイズの多い鉛ガラスについては、ただ threshold を超えた信号の位置を用いるだけでは、図 4.6, 4.7 からわかるように bunch の位置を明確に区別できず、bunch を判定するのが困難である。そこで、一般的にノイズの幅は狭く ADC にして 1 sampling の幅 (4 ns) に収まりやすく、一方信号は 20 ns 程度の幅を持つことから、threshold を超えている部分の幅が 2 sampling 以上であることを条件として時間情報を取得し、目視で bunch の位置を判定してその中心から前後 50 sampling (200 ns) をその bunch の信号の範囲とした。

4.2.2 Linear FAN-IN/OUT でまとめた信号～Off-axis 角 1.1° の装置について

Off-axis 角 1.1° の装置のシンチレータについては Ch4 に上下面、Ch5 に側面のそれぞれ 2 面をまとめている。それぞれ片方に 55 ns, 110 ns の遅延をかけているが、threshold を超えて波高の最大値をとる時間 (2 つの山があれば 2 点をヒストする) を分布させても、図 4.8, 4.9 のように 2 つの分布を明確に判別することはできない。

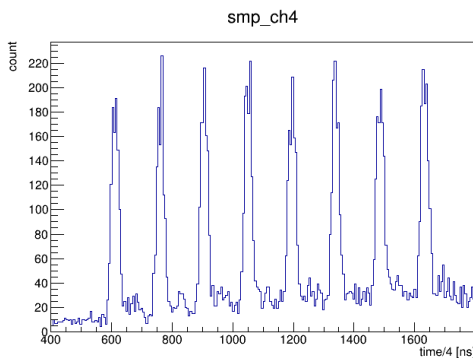


図 4.8 上下面の波形が最大値をとる時間の分布.

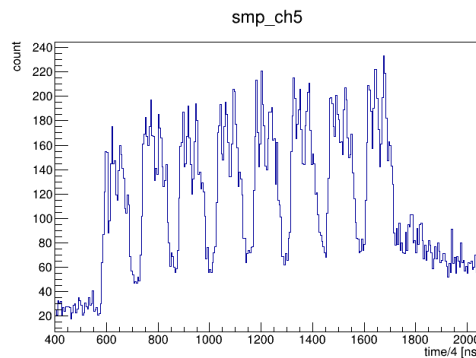


図 4.9 側面の波形が最大値をとる時間の分布.

そこで、threshold を超える信号が bunch 内に複数あるものについて、その信号同士の時間差をまとめた。図 4.10 のように上下面についてはコインシデンスをとったイベントで片方が遅延 (グラフ上で 14 のあたりに期待される) している兆候は見えなかった。一方、図 4.11 を見ると明らかに 30 の位置にピークが見える。したがって、側面については他の threshold と範囲の条件に加え、2 つの山が 29~31 のサンプリング幅 (114~126 [ns] 程度) の間隔を持つ場合はこれを側面の 2 つのチャンネル両方から信号が来ていると判断することと

した。

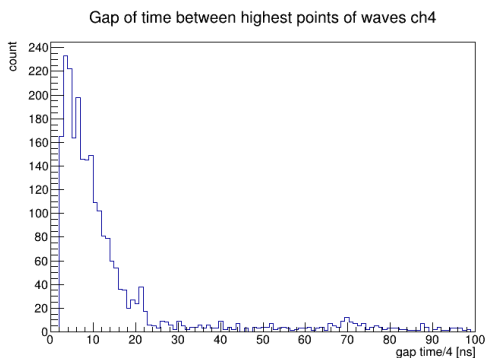


図 4.10 上下面の波が最大値をとる時間の時間差分布.

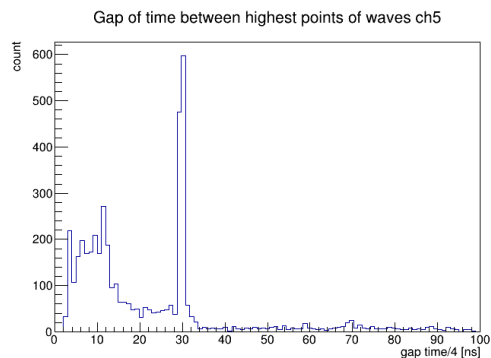


図 4.11 側面の波が最大値をとる時間の時間差分布.

4.2.3 ニュートリノのイベントの判別

鉛ガラスが反応していることを信号の第一条件として、ニュートリノイベントを判別する。鉛ガラスとともに前面以外のシンチレータが1面だけ反応したものをニュートリノイベントと定義する。従ってその他の以下に示す組み合わせは全て VETO する。

- シンチレータ反応数0：鉛ガラスの noise とみなす
- 前面シンチレータのみ，またはシンチレータ反応数2以上：外から来たミュオンが通過したと捉え sand muon と定義

シンチレータ反応数が0のものは鉛ガラスがノイズを拾ったと考えられる。また，前面が反応したイベントは，ビーム上流方向に散乱されるミュオンがほとんどなく，装置より手前で反応して生じた sand muon が来たイベントととらえる。また前面以外でも2面以上反応したイベントはミュオンが通過したとして排除する。

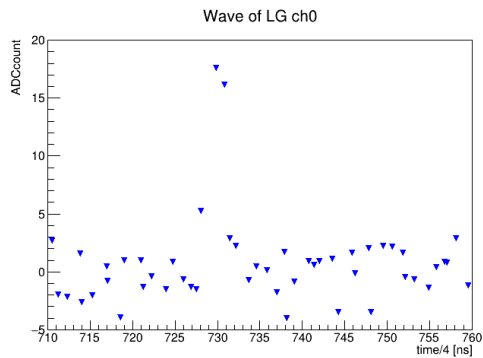


図 4.12 鉛ガラスの信号例 (Ch0).

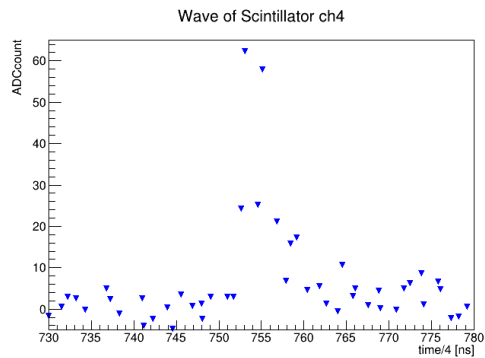


図 4.13 シンチレータの信号例 (上下面).

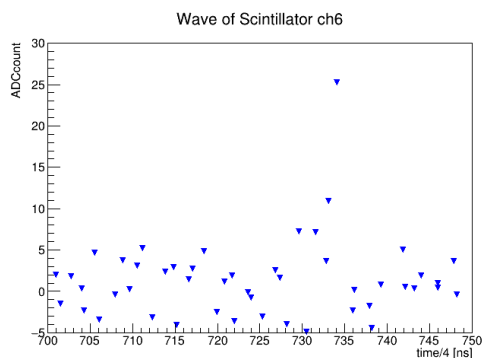


図 4.14 シンチレータの信号例 (前面).

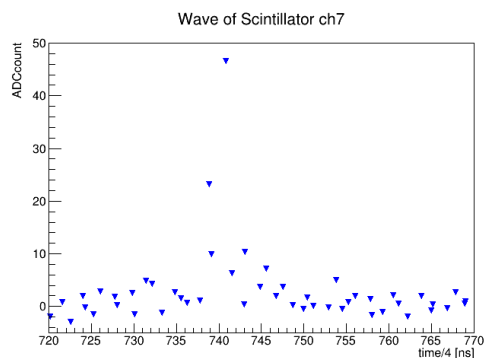


図 4.15 シンチレータの信号例 (後面).

図 4.12～4.15 に Off-axis 角 1.1° の装置が検知したミュオンイベントの例を示す．鉛ガラス及び側面と前面、上下面の 1 面のシンチレータが反応しており，sand muon イベントと判別される．また上下面と後面については次の bunch にも信号が来ている（鉛ガラスを通らずミュオンが通過している）．

4.3 解析結果

Off-axis 角 1.1° の装置で検知した反応数は表 4.1 の通り．

表 4.1 Off-axis 角 1.1° での反応数.

POT	1.43×10^{19} [POT]
鉛ガラス反応数	6765
シンチレータ反応数 0	2488
前面以外のシンチレータが 1 面だけ反応	641
前面シンチレータのみ反応	208
前面及び他の 1 面以上のシンチレータが反応	1486
前面以外の 2 面以上のシンチレータが反応	1942
ニュートリノイベント数	641 ± 25
ミュオン VETO イベント数	3636 ± 60

Off-axis 角 2.0° の装置で検知した反応数は表 4.2 の通り.

表 4.2 Off-axis 角 2.0° での反応数.

POT	3.60×10^{18} [POT]
鉛ガラス反応数	141
シンチレータ反応数 0	45
前面以外のシンチレータが 1 面だけ反応	28
前面シンチレータのみ反応	6
前面及び他の 1 面以上のシンチレータが反応	31
前面以外の 2 面以上のシンチレータが反応	31
ニュートリノイベント数	28 ± 5.3
ミューオン VETO イベント数	68 ± 8.2

5 考察

5.1 イベント数の較正

実験で得られるイベント数は、検出効率に依存する。今回の実験では、当初の予定ではシンチレータの効率を予備実験で測定するとともに本実験中の前面トリガーカウンターを用いることで鉛ガラスの検出効率を測定する予定であった。しかしながら、トリガーシンチレータの効率は測定結果がかなり低く出てしまい較正に使えないこと、また Off-axis 角 2.0° の装置では Linear FAN-IN/OUT の故障で前面トリガーカウンターを組み込めなかったことにより、各々の効率を測定するということはできなかった。

しかし、先ほどの反応数からある程度の較正が可能である。ミューオンの進行方向がほぼビーム下流方向であると考えれば、構造上他のどれかの面に当たるはずである。つまり、前面のシンチレータのみが反応したイベントは本来前面及び他の 1 面以上のシンチレータが反応するミューオンイベントが、前面以外の面の inefficiency によって検知できなかったイベントと考えられる。即ち、

$$p = \frac{m_2}{m_1 + m_2}, \quad (5.1)$$

p : 前面以外のシンチレータの検出効率,
 m_1 : 前面及び他の 1 面以上のシンチレータ反応数,
 m_2 : 前面シンチレータのみ反応数.

この時、それぞれの検出効率は、

- Off-axis 角 1.1°

$$\begin{aligned}
 p &= \frac{1486}{1486 + 208} \\
 &= 87.7\%,
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

- Off-axis 角 2.0°

$$\begin{aligned}
 p &= \frac{31}{31 + 6} \\
 &= 83.8\%,
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

である。較正に当たっては、この検出効率は Geometry 上の、あるいは実際の設置によって大きく下がっている、前面単体の検出効率は不明であるが十分高いとして 100% を仮定し以下の計算を行った。鉛ガラスの検出効率も不明であるが、100% を仮定する。

$$n_1 = n_{1x} + n_{1y} + n_{1\nu}, \tag{5.4}$$

$$n_{1x} = 0, \tag{5.5}$$

$$n_{1y} = n_2 \times \frac{2(1-p)}{p}, \tag{5.6}$$

$$N_\nu = n_{1\nu} \times \frac{1}{p}. \tag{5.7}$$

p : 前面以外の面の検出効率

n_1 : 前面以外でシンチレータ反応数が 1 のイベント総数

n_{1x} : *sandmuon* が前面を通過したが前面シンチレータで検出されず、前面以外の面で反応数が 1 のイベント数

n_{1y} : *sandmuon* が前面以外の面を 2 枚通過したが、うち 1 面は検出されず反応数が 1 のイベント数

n_2 : 前面以外でシンチレータ反応数が 2 のイベント数

N_ν : 面の検出効率を較正したニュートリノイベント数

それぞれのイベント数が検出される場合の模式図を以下の図 5.1 に示した。

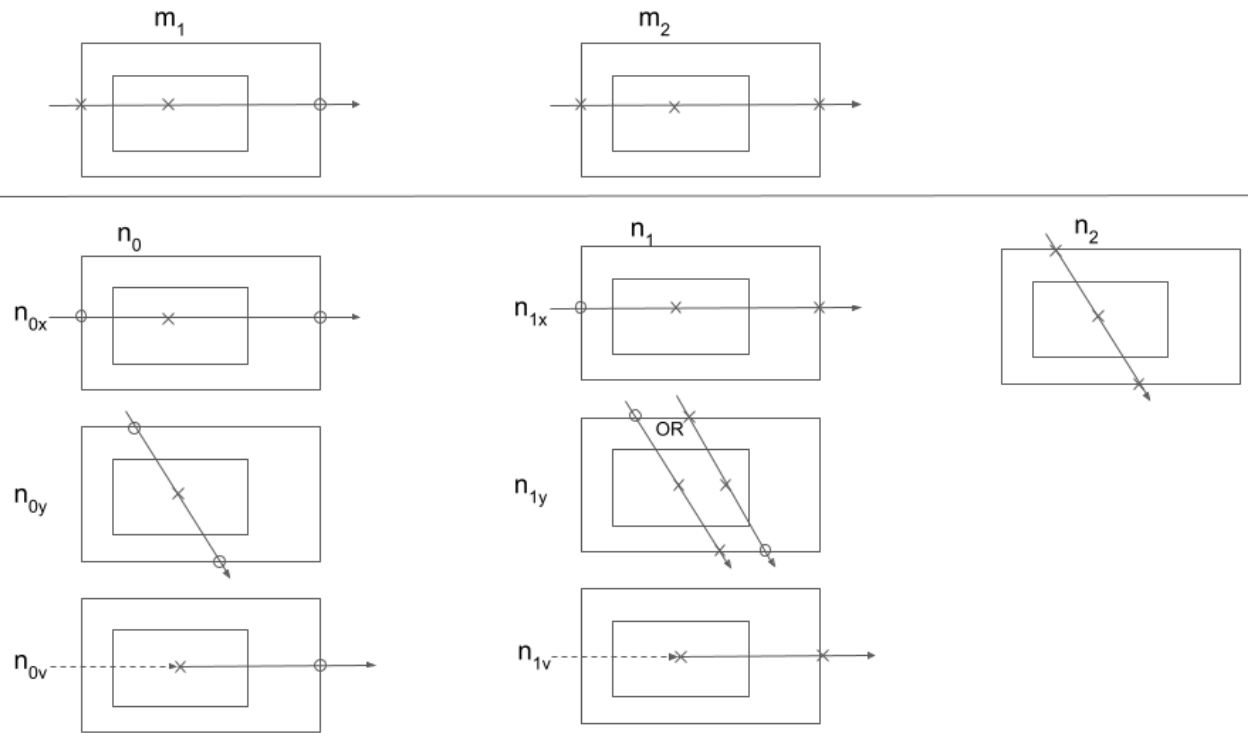


図 5.1 粒子の入射方向と検出の様子. 実線がミュオン, 破線がニュートリノを表す. \times 印がミュオンが通過して検出器で検出されたイベント, \circ 印がミュオンが通過したにもかかわらず検出器の inefficiency によって検出されなかったイベントを表す.

さらに, Off-axis 角 2.0° については, 鉛ガラスの数が半分であったため全て 2 倍して計算すると, Off-axis 角 1.1° :

表 5.1 Off-axis 角 1.1° での較正後の反応数.

POT	1.43×10^{19} POT
鉛ガラス反応数	6765
シンチレータ反応数 0	2437
前面以外のシンチレータが 1 面だけ反応	126
前面シンチレータのみ反応	0
前面及び他の 1 面以上のシンチレータが反応	1694
前面以外の 2 面以上のシンチレータが反応	2508
ニュートリノイベント数	126 ± 11
ミュオン VETO イベント数	4202 ± 65

Off-axis 角 2.0° :

表 5.2 Off-axis 角 2.0° での較正後の反応数.

POT	3.60×10^{18} POT
鉛ガラス反応数	282
シンチレータ反応数 0	81
前面以外のシンチレータが 1 面だけ反応	38
前面シンチレータのみ反応	0
前面及び他の 1 面以上のシンチレータが反応	74
前面以外の 2 面以上のシンチレータが反応	162
ニュートリノイベント数	38 ± 6.2
ミュオン VETO イベント数	236 ± 15.4

最後にこれを 1.0×10^{19} POT あたりのイベント数に直した。

表 5.3 1.0×10^{19} POT あたりのニュートリノ及びミュオンイベント数の比較.

	ニュートリノイベント数	ミュオンイベント数	ν イベント/ μ イベント
Off-axis 角 1.1°	88.1 ± 9.4	2938 ± 54	$(3.0 \pm 0.3) \times 10^{-2}$
Off-axis 角 2.0°	105.6 ± 10.3	655.6 ± 25.6	$(1.6 \pm 0.2) \times 10^{-1}$

5.2 Simulation との比較

実験を NEUT と呼ばれる WAGASCI 実験での反応及びニュートリノのシミュレーションのデータと, Geant4 (図 5.2) を用いた検出器のシミュレーションで再現し, 実験結果と比較した. NEUT は各位置においた 1.5m 四方, 厚み 1cm の水標的でおこるニュートリノ反応を simulate したものであり, この結果を今回の実験の鉛ガラスに適用する. このとき, 体積と POT に加え, 陽子-中性子比を鉛ガラスのもので換算した. なおこの際に用いた鉛ガラスの組成 [6] は, 表 5.4 の通り.

表 5.4 鉛ガラスの組成.

PbO	55%
SiO ₂	39%
K ₂ O	5%
Na ₂ O	2%
陽子数	64
中性子数	88

表 5.4 を用いて較正した結果を 5.5 に示す.

表 5.5 NEUT から見積もられるイベント数.

Off-axis 角 1.1°	331
Off-axis 角 2.0°	9.0

Geant4 を用いて実際の検出器の geometry を再現し, NEUT で得られたニュートリノ反応のミュオンを, 運動量そのまま鉛ガラス中の反応位置をランダムにおいて発生させ, 検出効率を計算した.

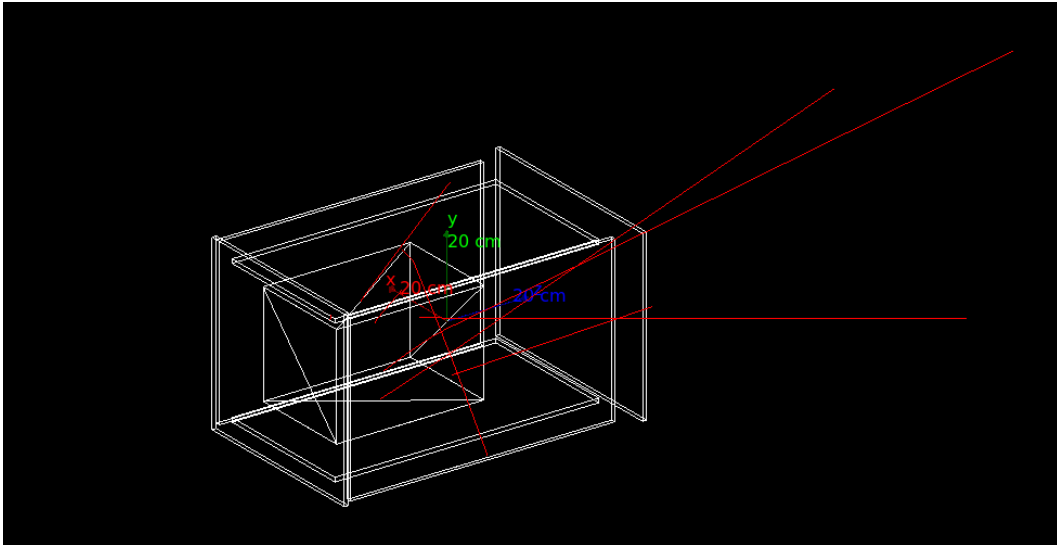


図 5.2 Geant4 での simulation 例 (10 イベント). Geant4 に入力する NEUT で生成したイベントは中性カレント反応も含むため, ミュオン信号の数はイベント数の 7 割程度となる.

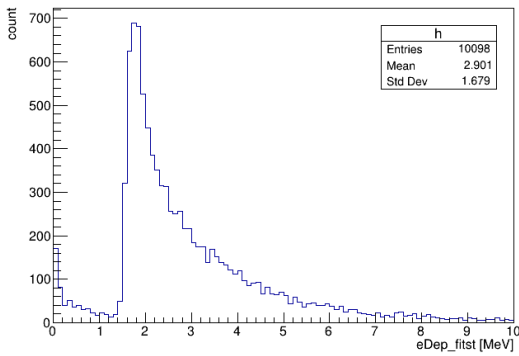


図 5.3 最もエネルギーを落とした面への energy deposit.

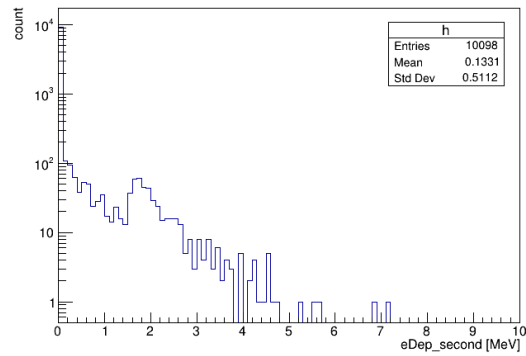


図 5.4 二番目にエネルギーを落とした面への energy deposit. 一面以上にエネルギーを落としたものについてプロットしている.

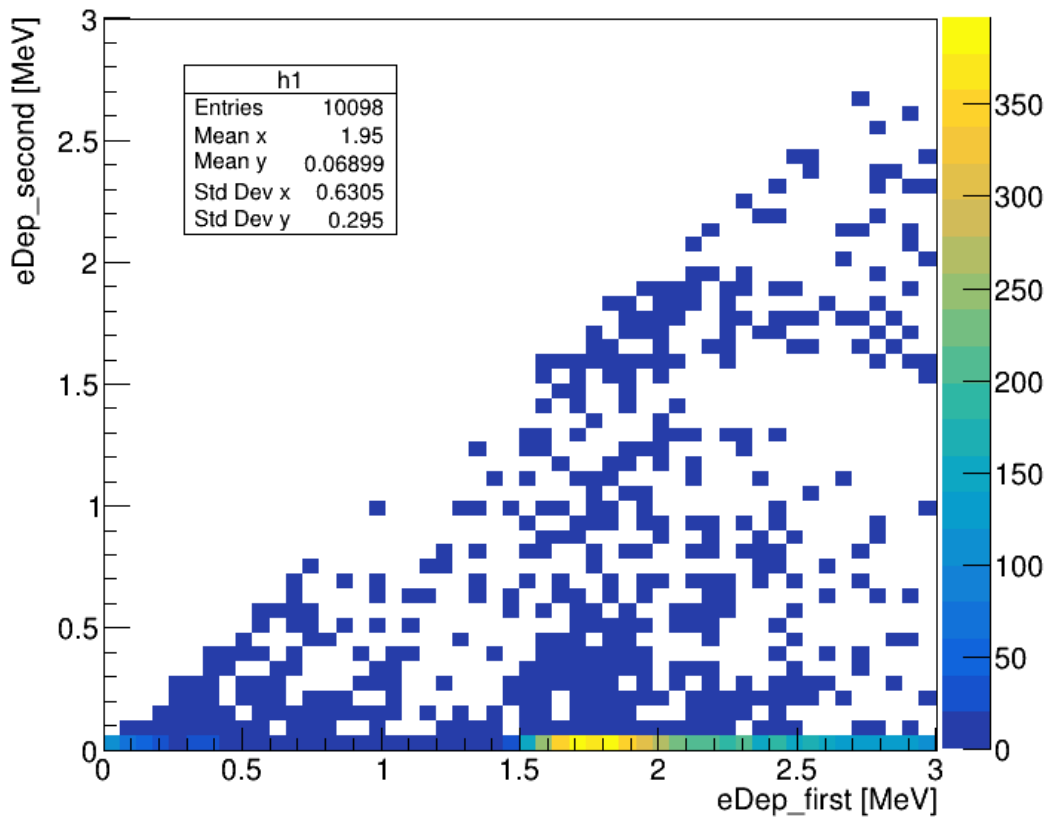


図 5.5 最もエネルギーを落とした面と二番目にエネルギーを落とした面への energy deposit の分布.

図 5.3, 5.4 にそれぞれ最もエネルギーを落とした面と 2 番目に落とした面への energy deposit を示す。図 5.4 から、この simulation ではニュートリノイベントしか発生させていないにもかかわらず、1300 イベント程度は他の面にもエネルギーを落としており、threshold を 0 MeV としてイベントを評価するとこれらは VETO されてしまうため、適切な threshold を課す必要があることがわかる。ここで、図 5.5 に一番、及び二番目にエネルギーを落とした面への energy deposit を分布させてみると、最もエネルギーを落とした面に 1.5 MeV 以上落としてそれ以外にはほとんど落としていないイベントが集中していることがわかる。このことから 1.5 MeV 以下を 0.1 MeV ごとに探索しイベント数が最大となるよう調べたところ、効率が最大となるのは threshold を 0.9 MeV に設定した時であり、この時イベント数は表 5.6 のようになった。

表 5.6 Geant4 により計算される検出効率.

事象	割合 (%)	備考
シンチレータ又は外側まで粒子が飛ぶ	99.8%	検出可能
シンチレータにエネルギーを落とす	96.1%(96.3%)	シンチレータによるカバー率に相当
シンチレータが 1 枚以上「反応」	90.8%(94.5%)	0.9MeV の threshold を超える
シンチレータが 1 枚のみ「反応」	85.4%(94.0%)	VETO されずに検出される

カッコ内の割合は上の行に対する個別の割合、「反応」は threshold を超えたエネルギーを落とすことを指す。表 5.6 からわかる通り、この装置はニュートリノイベントを 96.3% カバーし、全ニュートリノイベントのうち 85.4% を検出可能である。この理想的な割合をもって先ほどの NEUT から見積もられるイベント数を計算したところ表 5.7 ようになった。

表 5.7 Simulation と実験のイベント数の比較.

	simulation でのイベント数	実験でのイベント数	実験/simulation
Off-axis 角 1.1°	283 ± 17	126 ± 11	49.4 ± 4.7 %
Off-axis 角 2.0°	7.72 ± 2.8	38 ± 6.2	493 ± 194 %

Off-axis 角 1.1° のものは simulation より実際の結果のほうがニュートリノイベント数が半分程度と少ないのに対し、Off-axis 角 2.0° のものは simulation より実際の結果のほうが 5 倍程度多くなっている。

6 実験のまとめ

ニュートリノイベント数は、各 Off-axis 角で 1.0×10^{19} POT あたり次のようになった。

表 6.1 1.0×10^{19} POT あたりのニュートリノイベント数.

	simulation でのイベント数	実験でのイベント数
Off-axis 1.1°	197.9 ± 14.1	88.1 ± 9.4
Off-axis 2.0°	21.4 ± 4.6	105.6 ± 10.3

7 反省と改善点

Off-axis 角 1.1° の上下面シンチレータの Linear-FAN I/O および鉛ガラスの効率測定のため前面に取り付けた trig-counter と前面シンチレータの Linear-FAN I/O について、delay による波形の分離が見られなかった。Linear-FAN I/O と delay による波形の分離を事前にチェックすべきであった。また Off-axis 角 2.0° については、総ての Linear-FAN I/O モジュールが不具合を起こした。最初の不具合（原因は不明）が確認された時、不具合を起こした Linear-FAN I/O モジュールを他のものと入れ替えて動作を確認した。この時 NIM ビンの電源を切らずにモジュールを入れ替えたため、その後の総ての 33t Linear-FAN I/O モジュールが故障したと考えられる。また、J-PARC では中家さん、隅田さん、川上さんのご指導のもと、暗幕による遮光を十分に施して実験を行った。京都大学で事前に行ったシンチレータの効率測定でも遮光は十分に行うべきであったが、本実験に比べて不十分であったと考えられる。そのため効率測定では baseline の振れが大きく、本実験と同じ threshold におけるシンチレータの効率を見ることができなかった。

8 謝辞

この場を借りて、本実験にご協力いただいた多くの方々に感謝申し上げます。

指導教員の中家さん、隅田さんには、実験計画の段階から J-PARC 現地での実験、その後の解析まで全面的に協力していただき、右も左もわからない中で多くの助言をいただきました。また J-PARC とのミーティングや物品購入、鉛ガラスの確保など様々な面でお世話になりました。

塚本さんをはじめとする高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の皆様には、ニュートリノモニタ棟 B2 フロア利用をご許可いただき、一週間の滞在をさせていただき、また必要な電源や机をお貸しいただき大変お世話になりました。松原さんには LINEAR-FANI/O の故障の原因追及にあたって NIM ビンを別にお貸しいただきました。

ニュートリノグループの皆様には現地で NIM ビンや GateDelay Generator などの実験に必要な物品をお貸しいただきました。

本学高エネルギー物理学研究室の大学院生の皆様にもお世話になりました。TA の川上さん、中村さんには 1 年間にわたり特にお世話になりました。川上さんには物品の扱い方や PC について教えていただいたり、シンチレータやファイバー固定用のオプティカルセメントをはじめとして種々の物品を用意していただき、また現地でも多くのアドバイスをいただきました。中村さんには、PC のセッティングや Geant4 での simulation のためのコードの手助けをいただいたり、はんだ付けの方法から実験の方針まで多くの面でお世話になりました。

安留さんには WAGASCI 実験の simulation のデータをお貸しいただくのみならず、Off-axis 角 2.0° での NEUT simulation のデータを新たに作成していただくとともに、その扱いについて丁寧に教えていただき、また現地でも LINEAR-FANI/O のトラブルの際にご協力いただき大変お世話になりました。

参考文献

- [1] G Rajasekaran. The story of the neutrino. 2016.
- [2] Y. Fukuda et al The Super-Kamiokande Collaboration. Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos. 1998.
- [3] Y. Fukuda et al The Super-Kamiokande Collaboration. Measurement of the flux and zenith-angle distribution of upward through-going muons by super-kamiokande. 1999.
- [4] Megumi NARUKI. Lead-glass electromagnetic calorimeters for di-lepton measurement.
- [5] 浜松フォトニクス. Pmt について光電子増倍管 (pmt).
https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/pmt/about_pmts/index.html.
- [6] Toshi SUMIDA. Search for the decay $k=0$. 2008.