

ニュートリノ-核子散乱の微分散乱断面積測定

京都大学理学部 課題研究 P2

大内 柁人 川上 将輝 藤原 拓 細谷 享平

2020年5月18日

概要

ニュートリノは、 β 崩壊のエネルギースペクトルを説明するために、中性の相互作用をほとんどしない粒子として予言された。我々は、ニュートリノの存在を確かめ、弱い相互作用理論の検証をするために、ニュートリノと核子との散乱の断面積を測定し、理論との比較を行った。

J-PARC のニュートリノビームライン上に鉛の標的とプラスチックシンチレータからなる検出器を設置し、ニュートリノの反応によって生成されるミュオンを測定した。測定は 2020 年 2 月 2 日から 4 日の間に行い、およそ 30 時間分の有効なデータを得られた。そのうちに含まれていたニュートリノイベントの候補は 151 events であった。背景事象、検出器の検出効率やノイズを考慮した結果、ニュートリノイベントは 131 events と見積もられた。ニュートリノ反応の散乱角分布は、シミュレーションとおおむね一致したものの、全イベント数はシミュレーションによる推定 183 events と比較すると少なかった。これは、シンチレータの効率を正しく評価できていないことが原因であると考えられる。

目次

第 I 部	はじめに	1
1	実験の目的	1
2	ニュートリノ反応の理論	1
第 II 部	実験方法	4
3	ニュートリノビーム	4
3.1	J-PARC について	4
3.2	ビームの生成	4
3.3	ビームの構造	5
3.4	ビーム強度	5
4	測定装置	7
4.1	基本設計	7
4.2	装置のデザインに対する要求	10
4.3	ターゲット	10
4.4	ミューオンの検出	10
4.4.1	プラスチックシンチレータ	10
4.4.2	波長変換ファイバー	11
4.4.3	MPPC	11
4.4.4	GOMI コネクター/クッキー/治具	12
4.4.5	ADC	14
4.5	トラッキングデザイン	15
4.6	配線図	17
4.7	設計/製作/インストール	18
第 III 部	データ解析	23
5	解析手法	23
6	解析結果	24
7	イベント数の補正	26
7.1	ニュートリノ事象数の評価	26
7.1.1	VETO プレーンにおけるノイズの評価	26
7.1.2	tracker の検出効率	27

7.2	背景事象数の評価	28
7.2.1	トラッカーにおけるノイズの評価	28
7.2.2	VETO シンチレータの検出効率	30
7.2.3	偶発イベント	33
7.3	まとめ	33
8	シミュレーションとデータ解析結果の比較	34
8.1	シミュレーション	34
8.2	結果との比較	36
9	反省と改善点	37
Appendix A	装置の設計の詳細	40
Appendix B	測定に使用した自作回路について	45
B.1	1 ch MPPC 読み出し回路	45
B.2	電源分配回路	45
Appendix C	装置の角度分解能について	47
Appendix D	データ間の時間同期	49

図目次

2.1	ニュートリノ-核子間の種々の相互作用	3
2.2	ニュートリノ反応の断面積をエネルギーの関数として示したグラフ	3
3.1	J-PARC の加速器群	4
3.2	ニュートリノビームの生成	5
3.3	ビームの構造	5
3.4	ニュートリノビームのエネルギーに対するフラックスの分布	6
3.5	ニュートリノモニタ棟俯瞰図	6
3.6	INGRID 検出器	6
4.1	概略図	7
4.2	模式図	8
4.3	サンドミューオン	9
4.4	VETO デザイン	9
4.5	鉛	11
4.6	シンチレータ	11
4.7	MPPC	12
4.8	GOMI コネクター	12
4.9	クッキー・治具	13
4.10	各パーツの接続図	13
4.11	平本ボードから ADC まで	13
4.12	クロストーク	14
4.13	2 種類の ADC	14
4.14	約 30 μ s の delay の様子	15
4.15	トラッキング	16
4.16	角度について	16
4.17	配線図	17
4.18	VETO の sum の取り方と番号対応	18
4.19	寸法図 (y)	19
4.20	寸法図 (x)	19
4.21	作業風景その 1	20
4.22	作業風景その 2	20
4.23	VETO 写真	20
4.24	前方シンチ写真	20
4.25	後方シンチ横写真	21
4.26	後方シンチ縦写真	21
4.27	インストール風景その 1	21
4.28	インストール風景その 2	21
4.29	全体俯瞰写真	22

4.30	全体側面写真	22
4.31	暗幕で遮光した状態の写真	22
5.1	ADC のデジタル波形	23
5.2	シンチレータの反応数と時刻の関係	24
6.1	ミューオンの散乱角度分布	25
6.2	貫通イベントの散乱角度分布	25
7.1	各 bunch における、VETO の波高最大値の分布	26
7.2	前方シンチレータの波高分布の一例	28
7.3	後方シンチレータの波高分布の一例	28
7.4	検出効率 98 % の VETO プレーンの波高分布	28
7.5	検出効率 87 % の VETO プレーンの波高分布	28
7.6	前方, 後方での信号とノイズの時間分布	29
7.7	トラッキング可能な信号とノイズの時間分布	29
7.8	VETO シンチレータの検出効率テストの様子	31
7.9	VETO シンチレータの波高分布	32
7.10	シンチレータの隙間による efficiency 変化のテストの様子	32
7.11	ニュートリノイベントの散乱角度分布最終結果	33
8.1	NEUT により得られたミューオンのエネルギー分布	35
8.2	NEUT により得られたミューオンの角度分布	35
8.3	Geant4 により得られたミューオンの角度分布	36
8.4	シミュレーションと実験から得られた, ミューオンの角度分布	37
A.1	ファイバーと MPPC の受光面を接続する治具 (cookie)	40
A.2	cookie, MPPC, 平本ボードを接続する土台 (jig)	40
A.3	後方プレーン. ビーム下流側から見たもの.	40
A.4	後方プレーン. ビームに対して垂直方向から見たもの.	41
A.5	後方プレーン. ビーム上流側から見たもの.	41
A.6	前方プレーン. ビーム上流側から見たもの.	42
A.7	前方プレーン. ビーム下流側から見たもの.	42
A.8	VETO プレーン. ビーム方向から見たもの.	43
A.9	VETO プレーン. ビームに対して垂直方向から見たもの.	43
A.10	VETO プレーンをパーツごとに分解したもの.	43
A.11	実験装置全体. ビーム上流側から見たもの.	44
B.1	1 ch MPPC 読み出し回路	45
B.2	1 ch MPPC 読み出し回路の写真	45
B.3	MPPC 電圧分配回路図	46
B.4	MPPC 電圧分配回路の写真	46
C.1	前方 (7, 7), 後方 (10, 8) で $\cos \theta$ が取り得る値	48
C.2	前方 (7, 7), 後方 (10, 13) で $\cos \theta$ が取り得る値	48
C.3	前方 (7, 7), 後方 (10, 16) で $\cos \theta$ が取り得る値	48
C.4	前方 (7, 7), 後方 (10, 17) で $\cos \theta$ が取り得る値	48

D.1	記録した生データ	49
D.2	後方イベントの spill 番号分布 1	50
D.3	後方イベントの spill 番号分布 2	50

表目次

7.1	offset の波高分布の Gaussian fitting の結果	26
7.2	検出効率テストの結果	30
8.1	NEUT によるシミュレーション時に用いた各パラメータ値.	34
8.2	シミュレーションと実験からそれぞれ得られたニュートリノ反応イベント数.	36

第 I 部

はじめに

1 実験の目的

ニュートリノの存在が予言されたのは 1930 年である。当時、 α 線のエネルギースペクトルが単色であるのに対し、 β 線は連続であることが観測され、一見エネルギー保存則を破っているように見えるという困難があった。これを説明するために Pauli は、電氣的に中性でほとんど相互作用しない粒子がエネルギーと運動量を持ち去ったのではないかと考えた [1]。1934 年、Fermi が β 崩壊を記述する 4 点相互作用理論を提唱し、この中性の粒子はニュートリノと名付けられた [2]。そして、1956 年に Reines らによって原子炉から生じるニュートリノと原子核との反応を塩化カドミウムと液体シンチレータからなる検出器で観測することに成功し、ニュートリノの存在が確かめられた [3]。

さて、我々の目的はニュートリノの存在を確かめ、弱い相互作用理論の検証をすることである。そのために、核子-ニュートリノ散乱の微分断面積を測定し、理論による予言と比較を行う。稀にしか起こらないニュートリノの反応を観測するため、J-PARC の世界最高強度のニュートリノビームをお借りした。

2 ニュートリノ反応の理論

ニュートリノは弱い相互作用のみをするが、相互作用には電荷をもつ W ボソンが媒介する charged current 反応 (CC) と、電荷をもたない Z ボソンが媒介する neutral current 反応 (NC) の 2 種類が存在する。このうち、ニュートリノと核子の散乱において我々の検出器が感度を持つ荷電レプトンを生成するのは CC 反応のみである。NC 反応は荷電レプトンを生成しないが、パイオンを生成しその崩壊によって γ 線が生じることがある。これは検出器に飛跡を残さないため、CC 反応と判別可能である。従って、本実験では CC 反応のみを考えることとする。ニュートリノと核子との反応は、以下のような種類に分類される。

(a) Charged Current Quasi-Elastic scattering (CCQE)

低エネルギー (およそ 1 GeV 以下) において最も主要な反応は荷電カレント準弾性散乱 (CCQE) と呼ばれる反応である：

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

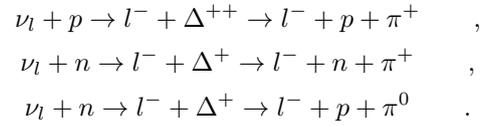
ニュートリノと中性子が散乱し、レプトンと陽子が生じる。

(b) Charged Current single pion creation (CC1 π)

やや高エネルギーの領域では荷電カレント 1 パイオン生成反応と呼ばれる、ニュートリノと核子が散乱し、レプトン、核子、パイオンが生成される反応が起こる：

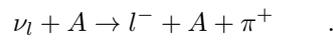
$$\nu_l + N \rightarrow l^- + N' + \pi \quad .$$

N, N' は核子を表す。これは、散乱のエネルギーによって中間状態として Δ 粒子が生成され、非常に短い時間でパイオンと核子に崩壊することで起こる：



(c) Charged Current coherent pion production (CC coherent π)

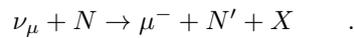
これは、ニュートリノと原子核の反応である。ニュートリノの輸送したエネルギーが原子核を励起し、基底状態に落ちる際にパイオンを生成する：



A は原子核を表す。反応後はレプトンと (反応前と同じ) 原子核、パイオンが生じることになる。

(d) Deep Inelastic Scattering (DIS)

さらに高エネルギーでは深非弾性散乱と呼ばれる、ニュートリノが核子中のクォークと反応することでレプトンと多数のハドロンを生じる反応が起こる：



N, N' は核子を、 X は複数のハドロンを表す。これは高エネルギー領域 (およそ 5 GeV 以上) で主要な反応となる。

以上の反応の模式図を図 2.1 に示す。これらの反応の断面積をエネルギーの関数として示したものが図 2.2 である。後述のように、本実験で使用したニュートリノビームのエネルギーはおよそ 1 GeV であるため、CCQE と CC1 π が主要な反応となる。

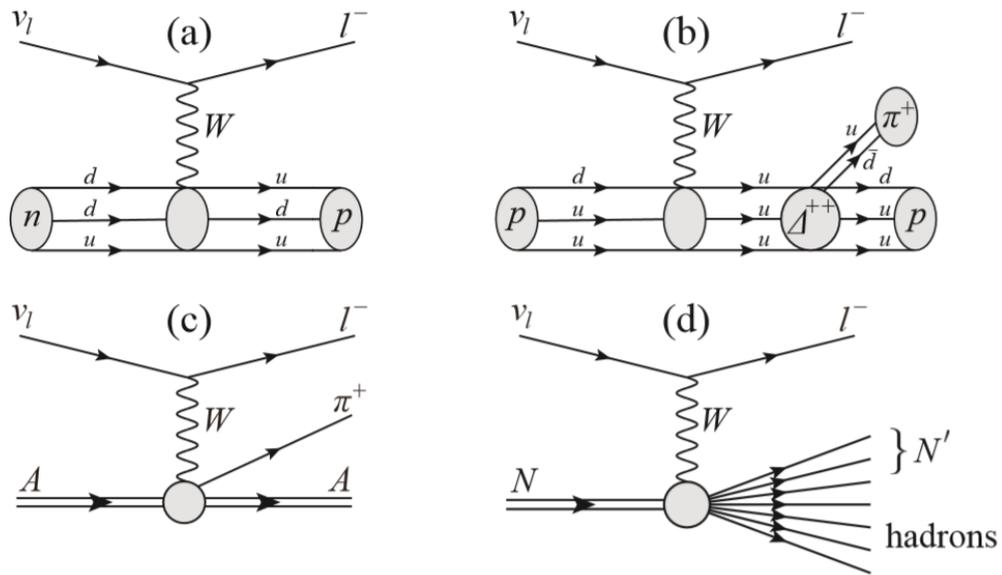


図 2.1 ニュートリノ-核子間の種々の相互作用 [4]. それぞれ (a):CCQE,(b):CC1 π ,(c):CC coherent π ,(d):DIS のダイアグラム.

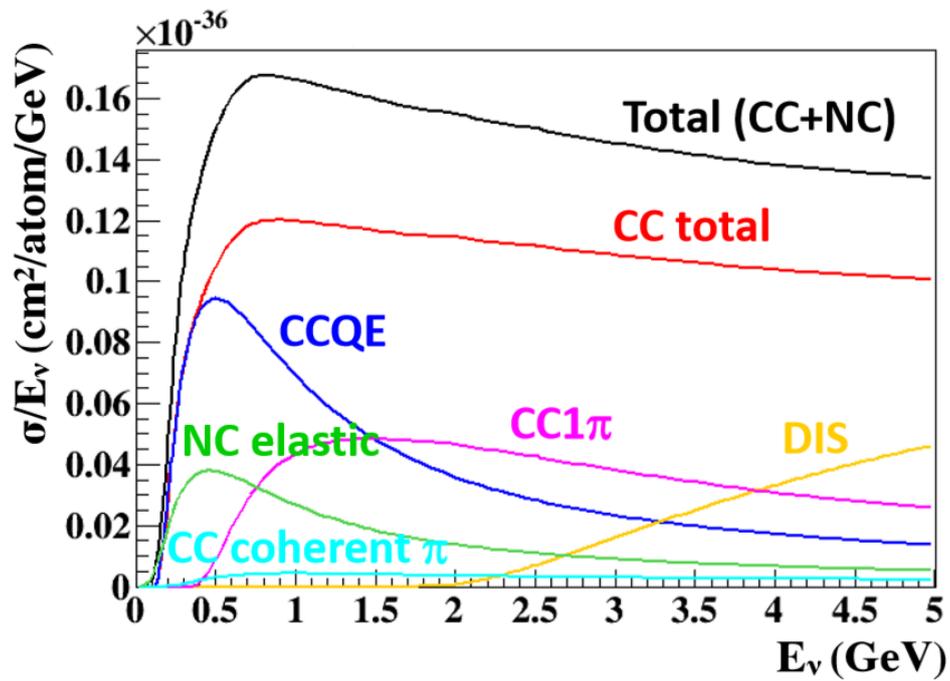


図 2.2 ニュートリノ反応の断面積をエネルギーの関数として示したグラフ [5]. 我々が用いるニュートリノビームのエネルギーはおよそ 1 GeV である.

第 II 部

実験方法

3 ニュートリノビーム

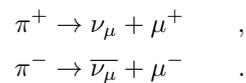
3.1 J-PARC について

本実験は茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) にて行った. 世界屈指の高強度陽子加速器であり, ニュートリノビームに関しては世界最高強度を誇る.

3.2 ビームの生成

図 3.1 に J-PARC の航空写真を示す. まず, 線形加速器 (LINAC) により 400 MeV まで加速した陽子をシンクロトロン (RCS : Rapid-Cycling Synchrotron) によって 3 GeV に加速する. そして Main Ring(MR) によって 30 GeV にまで加速される.

この陽子ビームをグラファイト標的に照射することでパイオンが生成される. 図 3.2 に示すように, 電磁ホーンにより収束されたパイオンが崩壊する事によりミューオンとニュートリノが生成し, 地中を進む間にミューオンが吸収されることでニュートリノビームとなる.



π^\pm のどちらを収束させるかによってニュートリノか反ニュートリノかが決まるが, 我々は π^+ を収束させることによって得られるニュートリノビームを利用した.



図 3.1 J-PARC の加速器群. 陽子を線形加速器とシンクロトロンをもちいて 30 GeV まで加速する. 30 GeV まで加速された陽子は炭素標的に入射し, パイオンの崩壊を経てニュートリノビームとなる.

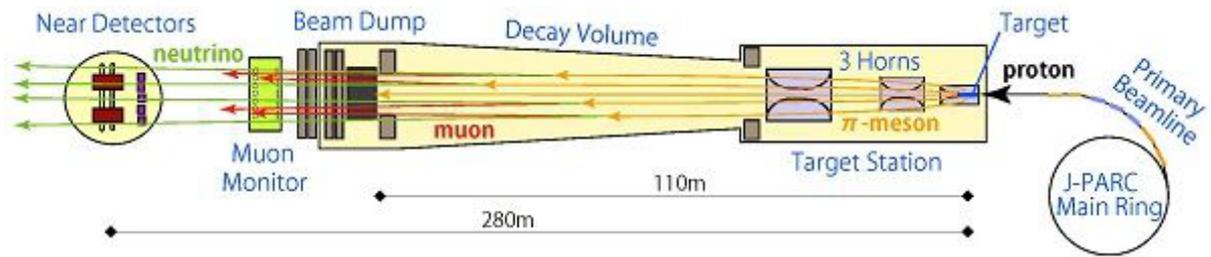


図 3.2 ニュートリノビームの生成.

3.3 ビームの構造

図 3.3 に示すように、ニュートリノビームは spill と呼ばれる単位で 2.48 秒毎に射出される。一つの spill は 8 個の bunch からなる。

3.4 ビーム強度

ニュートリノビームの強度は spill 当たりの POT(Proton On Target) という単位で表される。これは、ニュートリノビームを生成するためにターゲットに打ち込んだ陽子の数を表している。我々が実験を行ったのは 2020 年 2 月 2 日から 4 日にかけてであり、その間の加速器の運転における一次陽子ビームのパワーは平均 515 kW であった。陽子は 30 GeV に加速されているので、1 spill あたりのビーム強度は

$$\frac{515 \text{ kW} \times 2.48 \text{ sec/spill}}{30 \text{ GeV/POT}} \approx 2.66 \times 10^{14} \text{ POT/spill}$$

となる。

ニュートリノビームの強度のエネルギーに対する分布は、測定位置がビームの中心軸からどれだけズれているかに大きく依存する。ビーム生成点から測ったビーム中心軸との角度を off-axis 角と呼ぶ。図 3.4 は様々な off-axis 角におけるニュートリノビームのエネルギー分布である。

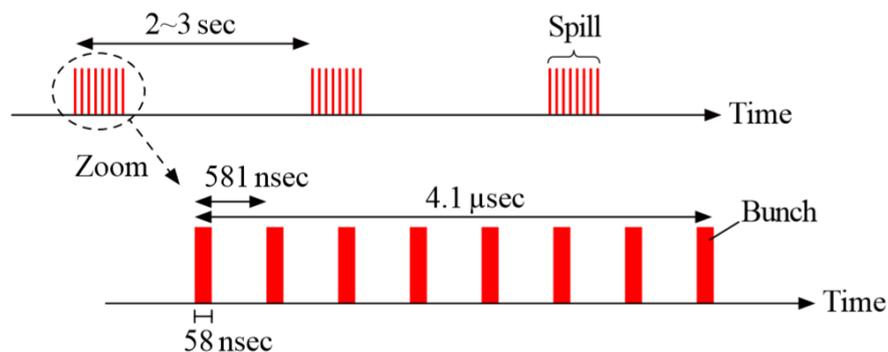


図 3.3 ビームの構造

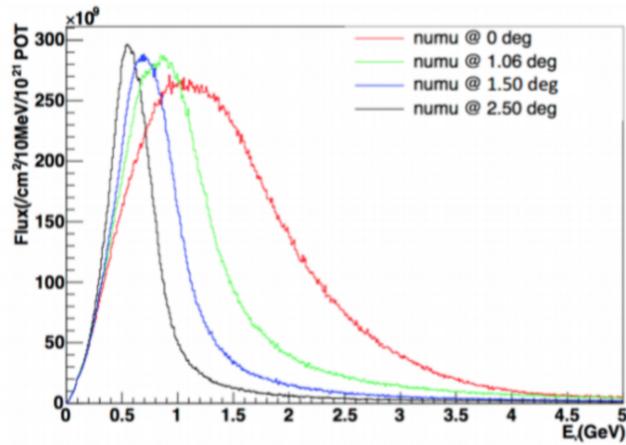


図 3.4 ニュートリノビームのエネルギーに対するフラックスの分布 [6]. 我々の検出器の off-axis 角はおよそ 1.0 度である.

我々は、ニュートリノモニタ棟 B2 フロアに設置された、INGRID と呼ばれる前置検出器の足元に装置を置いて実験を行った. 図 3.5 にニュートリノモニタ棟の俯瞰図を示す. INGRID は十字型の検出器で、その中心がビーム軸の中心軸と一致しており、on-axis 検出器と呼ばれる. ニュートリノモニタ棟はビーム生成点からおよそ 280 m の位置にあるため、我々の検出器の off-axis 角はおよそ

$$\arctan\left(\frac{5}{280}\right) \approx 1.05^\circ$$

である. 図 3.6 から分かるように、ビーム中心から測定位置まではおよそ 5 m であることを用いた.

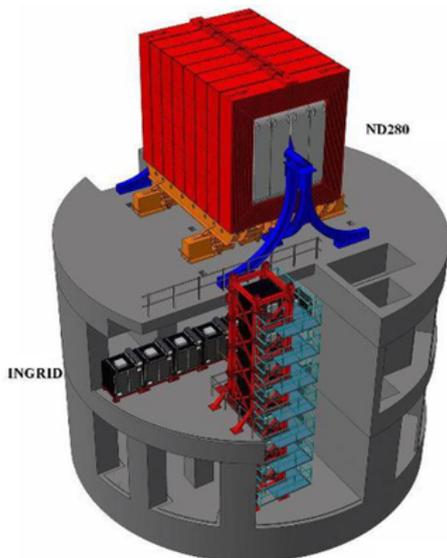


図 3.5 ニュートリノモニタ棟. ND280 の置いてある階が B1, INGRID の横向きモジュールが置いてあるのが SS, 最下階が B2 フロアである.

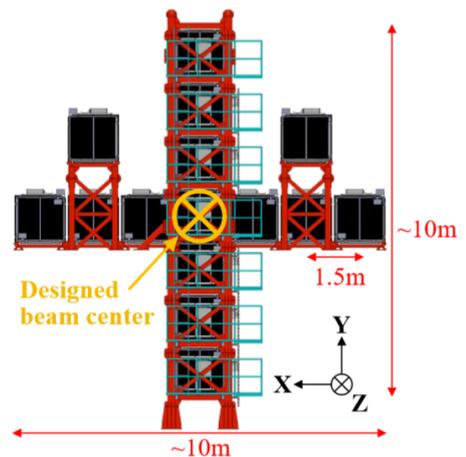


図 3.6 INGRID 検出器. ビームは z 軸正の方向. 我々は INGRID の下端のビーム下流側に検出器を設置した.

4 測定装置

本章では、本実験の目的であるニュートリノ反応の微分散乱断面積測定のために、我々が設計し製作した測定装置について説明をしていく。

4.1 基本設計

まず、ニュートリノ反応をどのようにして捉えるのか、その基本となる概念を説明する。図 4.1 に示すのが本実験のセットアップの概略図である。ビーム上流から順に VETO 用シンチレータ (“VETO プレーン”), ターゲットである鉛, ニュートリノ反応で生じたミュオンズのトラッカーである “前方シンチレータ” 及び “後方シンチレータ” と配置した。

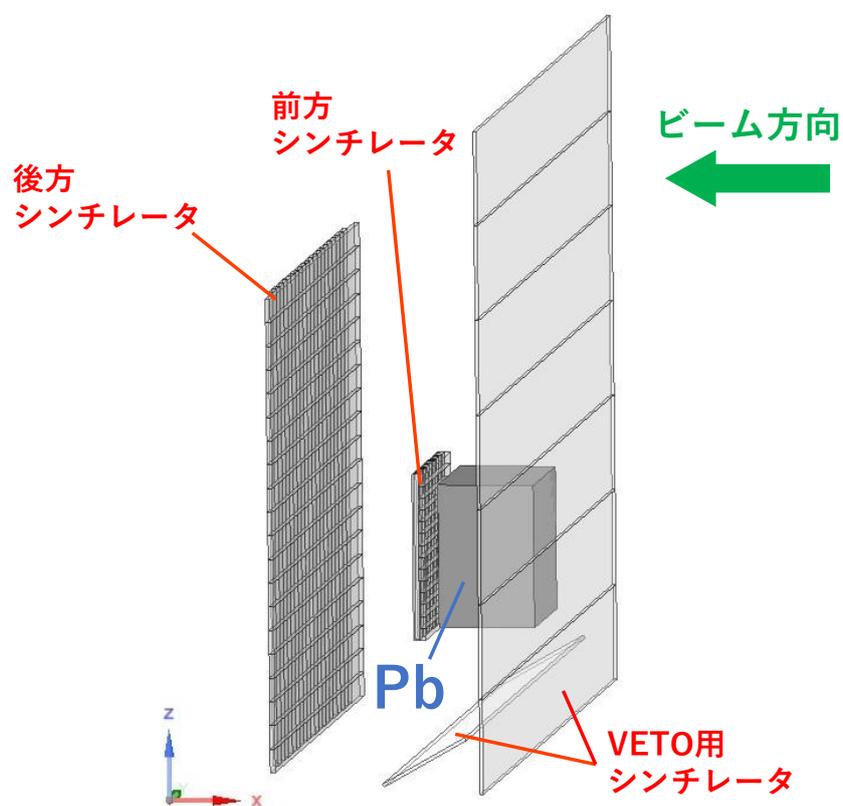


図 4.1 本実験の概略図。ビーム上流から順に VETO 用シンチレータ, ターゲット (Pb), トラッカーである前方及び後方シンチレータと並んでいる。

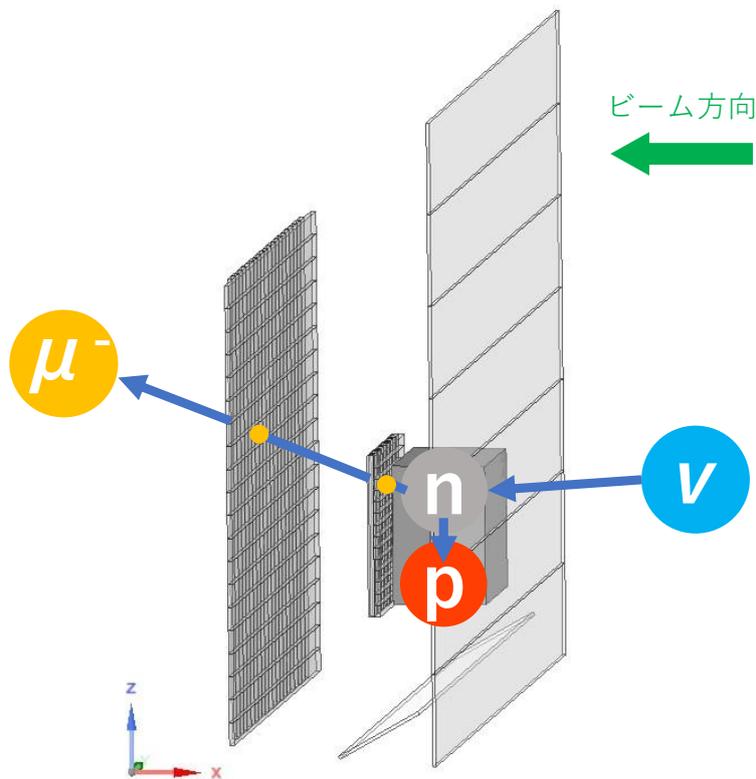


図 4.2 ニュートリノ反応事象の例. ニュートリノビーム中のニュートリノがターゲット中の核子と反応し、ミューオンを生成する様子を表している.

図 4.2 の模式的な図で示す通り、ニュートリノビームがターゲットに照射されると、ビーム中のニュートリノが稀にターゲット中の核子と反応を起こす (図は今回の主たる反応, CCQE の場合のもの). この時, 反応によって生成されるミューオンの飛跡をターゲットよりビーム下流側にある前方, 後方の 2 層のトラッカーで捉える.

その際に, 様々な要因で外から飛来してくる, ターゲット由来でない荷電粒子 (以後, サンドミューオンと呼ぶ) と, 我々の本来欲しいターゲット由来のニュートリノ反応によるミューオンとを区別するために, VETO プレーンを設置している (図 4.3). 前方, 後方シンチレータの任意の点同士を結ぶ直線を引いたときには, 必ずその直線上に VETO プレーンが配置されるように検出器を設計した (図 4.4). つまり, 我々の見たいニュートリノ反応が起こり, 2 層のトラッカーに信号が来ている時には, 同時刻に VETO プレーンからの信号がないということを要求する.

この基本設計をもとに, 我々が実際に設計, 製作をした測定装置の各部について, 次節以降で詳しく説明する.

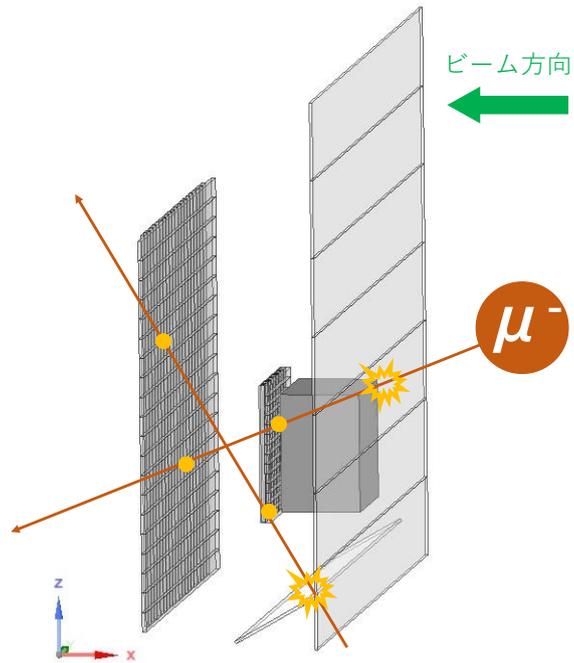


図 4.3 サンドミュオン事象の例. 主に周りの岩盤やコンクリート中の核子とニュートリノが反応して生成されたミュオンが飛来してくる.

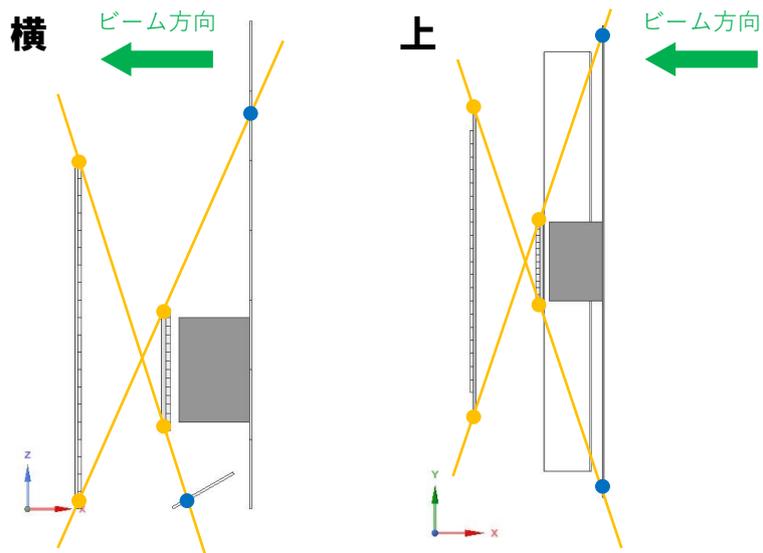


図 4.4 前方, 後方の二層のトラックerを通った際, 必ず VETO プレーンも通る. 図はその一例.

4.2 装置のデザインに対する要求

各部詳細を見ていく前に、ここでは装置に対する大まかな要求について触れておく。実際に装置を設計するにあたり、装置のデザインに対する要求は主に3つある。

1つ目は、検出するミュオン飛跡をトラッキングし、ビーム方向に対する角度を決定しうるトラッカーをデザインし、実際に形にすることである。今回の我々の実験では、細長いシンチレータをビーム方向から見て縦(鉛直方向)に並べたものと横(水平方向)に並べたものを重ねて配置し、2層で1つの検出器とすることでその位置を決め、さらにそれを2つ配置することでミュオン飛跡を2点決めることができるので、その飛跡を再構成できるといったトラッカーデザインとした。

2つ目は、装置を実際に J-PARC の NM(ニュートリノモニター)棟 B2 フロアにインストールできるようなデザインにすることである。具体的に最も制約が厳しいのは NM 棟の内部にある地上と B2 フロアを結ぶエレベータの大きさであり、今回我々が作った装置はその容量を大きく越えるものであったので、分割してエレベータに搭載可能なデザインにした。

3つ目は、安全面を最大限考慮した設計にすることである。我々の行う実験の性質上、数日間放置しておいても絶対に倒れないような設計にしておくことが必須であり、基準として特に横から 1G の負荷がかかった(重心位置にその物体の重さと同じ力が水平方向にかかるとした)際に倒れない構造であることが要求された。

これらの項目を全て満たす装置をデザインし、実際に製作した。

4.3 ターゲット

今回の実験において、ターゲットとして選んだのは鉛である。我々が見たいニュートリノと核子の弱い相互作用は減多に起こらない。限られた実験期間において、統計的に扱うことのできる量のデータを集めるためには、核子となるべく反応しやすい密度の大きい物質を用いる必要があった。また現実的に調達が可能という点から鉛を選んだ。

実際に我々の使った鉛の写真を図 4.5 に載せる。鉛ブロック (5 cm × 10 cm × 20 cm, 約 11.3 kg) を縦に 6 つ、横に 3 つ、計 18 個積み、全体で 30 cm × 30 cm × 20 cm, 約 200 kg のターゲットとした。この鉛ブロックは J-PARC ハドロングループよりお借りしたものである。

また、架台にはユキ技研製アルミフレームのレコフレームを使用している。これにより耐荷重約 1 t を確保し、数日間の実験を行っている最中、約 200 kg の鉛を安定して支えておくのに十分な強度を持たせた。

4.4 ミュオンの検出

次に、ターゲットからのミュオンを捉える原理について説明する。

ミュオンがプラスチックシンチレータを通過する際に放出されるシンチレーション光を、波長変換ファイバーによって MPPC に送り、光子として検出する。その信号を ADC に送り、デジタル信号として読み出す。ここで出てきた機器、装置類について順に説明していく。

4.4.1 プラスチックシンチレータ

今回捉えたいのは荷電粒子であるミュオンであったので、トラッキング、及び VETO 用のプレーンにはプラスチックシンチレータを用いた。プラスチックシンチレータ内を荷電粒子が通過すると、その際に落とし

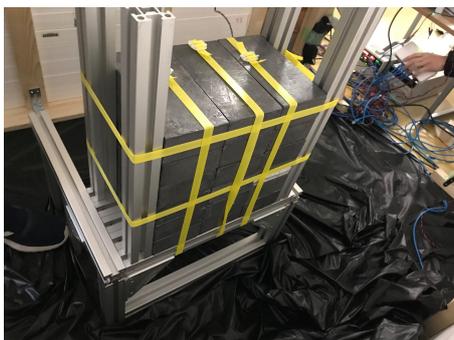


図 4.5 本実験で用いた鉛. 手前に見えている面がビーム方向に垂直な面. 安全面を考慮し, 架台と鉛を縛り付けて固定した.

たエネルギー量分のシンチレーション光が放出される. 図 4.6 に実際に実験で用いたものの写真を載せる. 写真の左のものから順に, 前方 ($25 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$), 後方 ($50 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$), VETO ($200 \text{ mm} \times 1800 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$) に用いた.

4.4.2 波長変換ファイバー

波長変換ファイバーはプラスチック製の光ファイバーの一種である. このファイバーをプラスチックシンチレータの内部に通しておくことで, シンチレータの発したシンチレーション光を吸収する. またこのファイバーは減衰しにくい長波長の光を再発光させ, それを内部で全反射させる性質があるので, ファイバーの先に MPPC を繋げることで, シンチレータからの信号を伝える役割を果たす. ファイバーの表面に傷が入ると本来全反射して届かはずの光が失われ, 検出効率の低下を引き起こしてしまうので, 取り扱いには十分に注意した.

4.4.3 MPPC

MPPC (Multi Pixel Photon Counter) とは, 浜松ホトニクス製の半導体光検出器で, 優れたフォトンカウンティング能力を持つ. MPPC に適切な電圧を印加することで, 光子が入射するとその個数のおよそ 10^6 倍ほどの電子を増幅出力することができる.

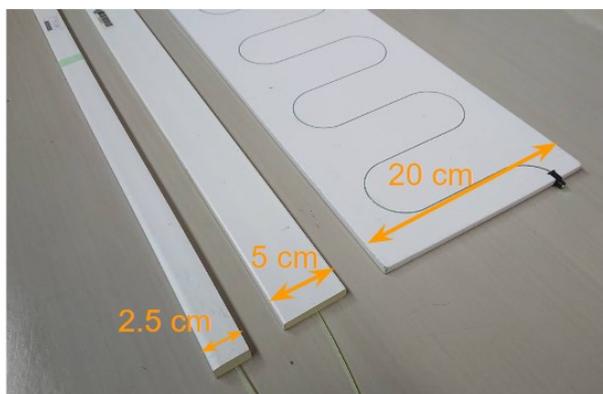


図 4.6 本実験で用いたプラスチックシンチレータ. 左から順に前方, 後方, VETO に用いた. 元々はそれぞれ SB, INGRID, SMRD に用いられているもの.

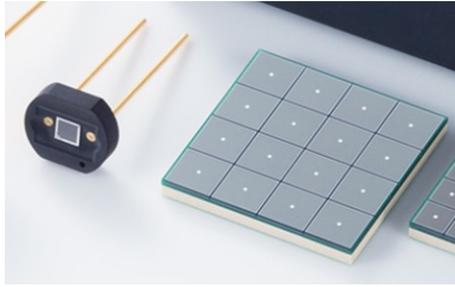


図 4.7 本実験で用いた MPPC. 左が 1ch-MPPC で VETO の両端に用いた. 右が 16ch-MPPC でトラック用に計 4 つ用いた.

図 4.7 に今回我々が実際に使った MPPC の写真を載せる. この写真で左側のものが一般的な MPPC で, 今回これを我々は 1ch-MPPC と呼ぶ. 今回の実験では VETO プレーンの両端に装着し, 全部で計 16 個用いた. 右のものは MPPC の受光面が 4×4 マスの 16 個分並んだもので, これを我々は 16ch-MPPC と呼ぶ. こちらはトラックとなる前方, 及び後方のそれぞれ縦, 横に 1 つずつ, 計 4 つ用いた.

4.4.4 GOMI コネクター/クッキー/治具

上記の MPPC の受光面をしっかりファイバーの先端に接触させないと MPPC 内に信号が届かず, 測定に支障をきたす. そこで 1ch-MPPC には図 4.8 のような“GOMI コネクター”が T2K 実験グループによって開発されており, 我々も今回の実験においてこれを用いた. これによりファイバーの先端と MPPC 受光面を安定した接触状態にしておける. GOMI コネクターに接続したファイバーの先端の面にぎらつきがあると, そこで乱反射を起こし, MPPC 受光面にフォトンが到達しにくくなることが考えられるので, この面はきれいに研磨した.

また, 16ch-MPPC 用のコネクターとして, 今回新たに 3D プリンターを用いてクッキーと治具を製作した (図 4.9, 詳しい図面は Appendix A に掲載). 京都大学高エネルギー物理学研究室所属の平本さんより, この 16ch-MPPC の信号を束ね, フラットケーブルを用いて ADC に送ることのできる機構を持つボード (以後, 我々はこれを“平本ボード”と呼ぶ) をお借りし用いた. この平本ボードに 16ch-MPPC を装着するのだが, この受光面にファイバーを 16 本分安定して接触させなければならない. クッキーは多数のファイバーを束ね, ファイバーの先端面を揃える役割を果たす. 治具は平本ボードとクッキーとを固定するために用いられる. これらをしっかり金具で固定することで, クッキーのファイバー先端面と 16ch-MPPC 受光面が安定して接触した状態となる.

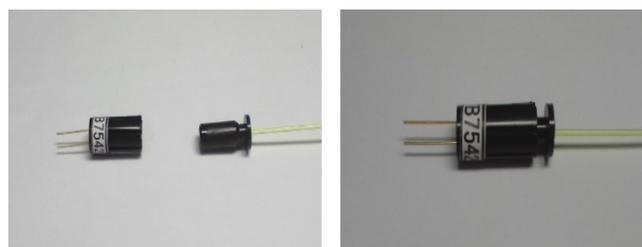


図 4.8 GOMI コネクターによって MPPC とファイバーが装着される様子. 左が装着前で, 右が装着後.

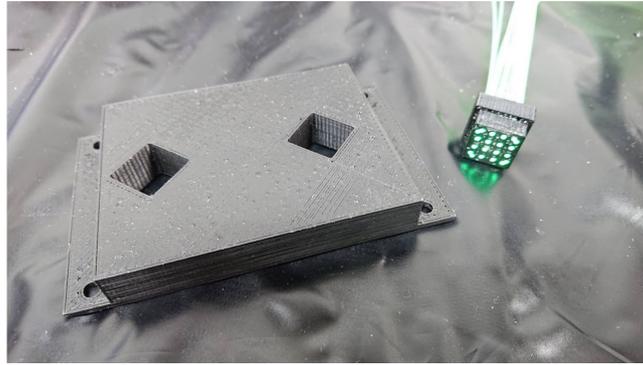


図 4.9 左が治具で, 右がクッキー. クッキーには既にファイバーが 20 本取り付けられている.

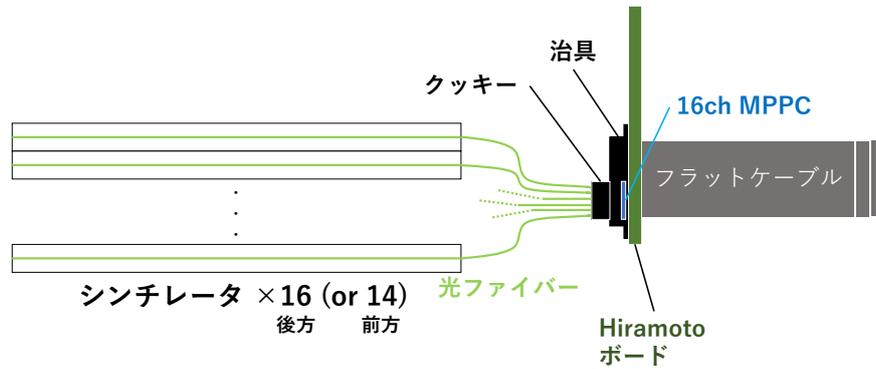


図 4.10 シンチレータから平本ボードまで信号が伝達する部分の模式図.



図 4.11 平本ボードから ADC までフラットケーブルを介してつながっている様子. 16ch-MPPC 電源と書かれてあるところに電源コードをつないで MPPC に電圧をかける.

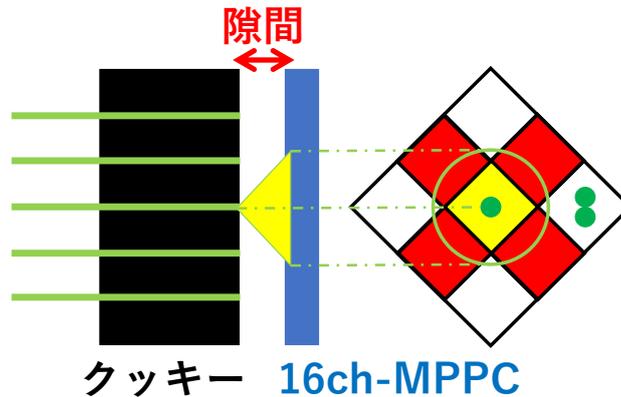


図 4.12 クロストークの模式図. 隙間が大きいほど隣のチャンネルに影響を及ぼす. 右側の 16ch-MPPC を模した図で, 黄色領域が本来の信号の位置, 赤色がクロストークしうる位置である. また一番右の 2 つの緑点は 1ch に 2 つ分のファイバーが刺さった時のファイバーの位置.

クッキーは計 20 個の穴が開いており, そこにファイバーを通すようになっている. 何故 20 個の穴が必要かはトラッカーデザインの議論をする際に触れるが, 16 個の受光面に対し 20 本のファイバーを束ねるので, 今回は 4 隅の穴を 2 つにし, 残りは 1 つの穴で 1ch 対応とした. これはクロストークになるべく留意した故の配置である. クロストークとは, 図 4.12 に示すように, 主にクッキーと 16ch-MPPC 受光面との隙間によって, 本来特定のチャンネルにしか届かない光子が漏れ出てしまい, 隣のチャンネルが光子を受け取り, 信号を出してしまうことである. 1ch に 2 つ分のファイバーが刺さる箇所はよりこの影響が大きいと思われるため, 今回は 4 隅に配置する形とした.

4.4.5 ADC

MPPC で増幅されたアナログ信号を ADC に送り, ここでデジタル化を行う. そしてこのデジタル信号を ADC から DAQ 用 PC へと送り, 波形として記録する. 今回用いたものは図 4.13 に示す 2 種類の ADC である. トラッカーに用いた 16ch-MPPC から来た信号は ADC-SiTCP(BeaBeans Technology 製) へ, VETO プレーンに用いた 1ch-MPPC から来た信号は CAEN 製 ADC へとそれぞれ送られる.

ADC-SiTCP は 40 MHz サンプルングで, 1 台で 16ch 分の読み出しが可能である. これを計 4 台使用した. また, CAEN 製 ADC は 250 MHz サンプルングで, 入力は最大で 8ch である. これを 1 台使用した.



図 4.13 ADC の写真. 左が ADC-SiTCP, 右が CAEN 製 ADC.

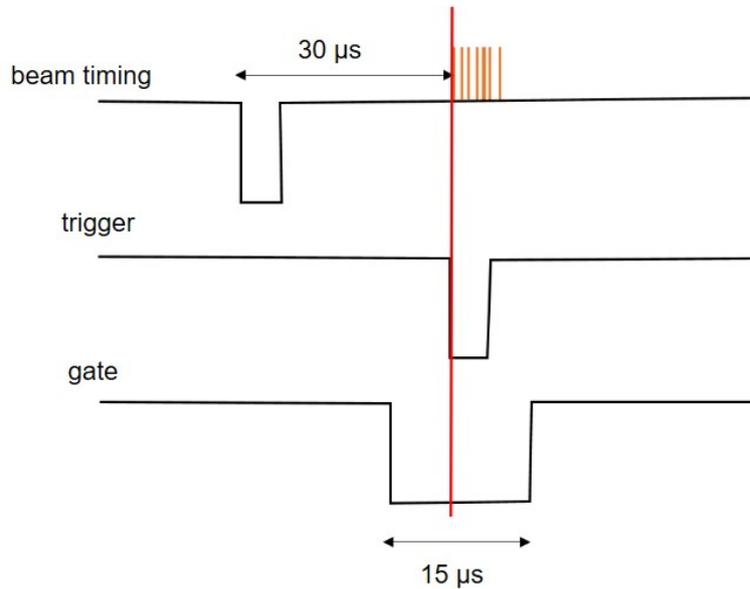


図 4.14 ビームタイミング信号と実際にビームが来る時間差 $30\mu\text{s}$ を delay モジュールで調整した。

前章で説明した通り、ニュートリノビームは 2.48 s 毎のスピルに数 μs 間しか来ておらず、全時間のデータをとっていると、無駄なデータを取りすぎることになる。そこで波形を記録するにあたり、ビームタイミング信号をトリガーとすることで、ビームが来ていると思われる数 μs 間を含んだ、その前後のデータのみを集めた。ここで、ビームタイミング信号は、NM 棟にニュートリノビームが実際に届く約 $30\mu\text{s}$ 前に来ているので、信号を delay させることでトリガータイミングを調整し、そこを中心に $15\mu\text{s}$ 分のデータを集めた (図 4.14)。

4.5 トラッキングデザイン

今回の実験の目的を達成するために必要な角度分布を測定できるトラッキングのデザインとして、図 4.15 のようなものを考えた。4.4.1 節で説明した細長いプラスチックシンチレータを縦横に並べた層を 2 層用意し、2 次元での位置をそれぞれで特定することで、3 次元の飛跡が再構成できる。また、以後の解析の際に、前方横、縦、後方横、縦の層をそれぞれ F_x , F_y , B_x , B_y と表すことにする。

前方では 14 枚 + 14 枚、後方では 20 枚 + 20 枚のシンチレータを用いた。また前方、後方の縦横でそれぞれ 16ch-MPPC 及び ADC を 1 つずつ用いた。4.4.4 節で説明した通り、16ch-MPPC に対して 20 本のファイバーを入力したのは、前方ではチャンネルが足りるが、後方ではそのままでは足りず、どこか 4 箇所、2 本を 1 つにまとめなければならなかったためである。今回の実験では、後方シンチレータには幅 5 cm のものを用いており、端の 2 本ずつ、2 組を束ねることにし、実質幅 10 cm の領域が両端に 2 箇所ずつできるようにした。

このことはさほど大きな問題にはならない。なぜなら、今回の測定において大角度の散乱は断面積が小さいからである。図 4.16 より、このトラッキングデザインで測定できる角度はおおよそ 60° より小さい。後述する通り、我々の行ったシミュレーションの結果から、今回の実験において 60° より大きな角度の散乱事象の割合は 1.7% 程度と予測された (詳しくは 8 章シミュレーションの項を参照)。よってこのトラッキングデザインで我々の欲しい角度分布は十分得ることができると判断した。先ほどの問題も、後方で端にあたるような飛跡のものは大体が大角度のものであるので、以上の議論からあまり問題がないと判断した。

模式図 (立体)

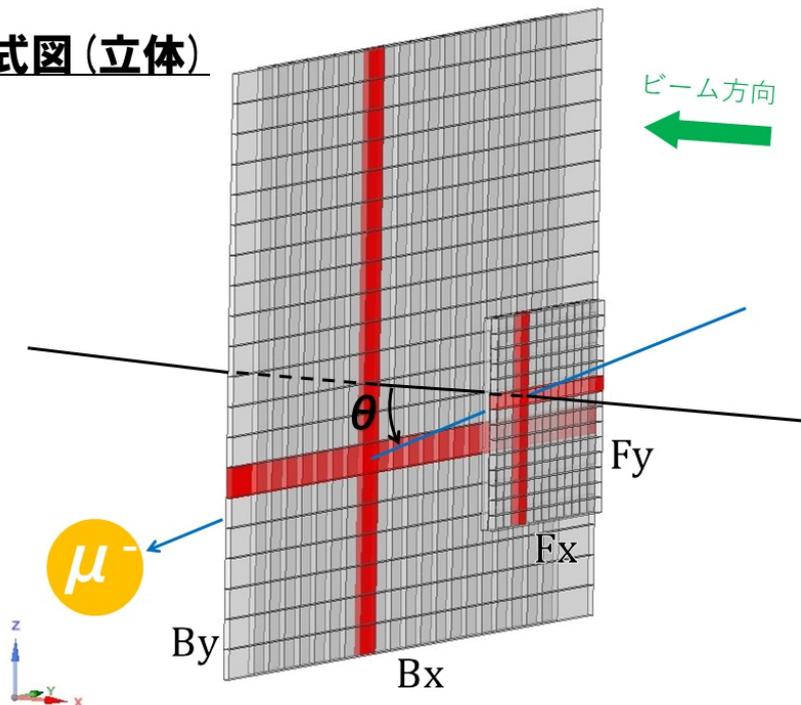


図 4.15 トラッキングの模式図. ミューオンがトラッキングされる際, 同時に 4 枚のシンチレータが反応して信号を出す. 以後, 前方横, 縦, 後方横, 縦をそれぞれ F_x , F_y , B_x , B_y と表す.

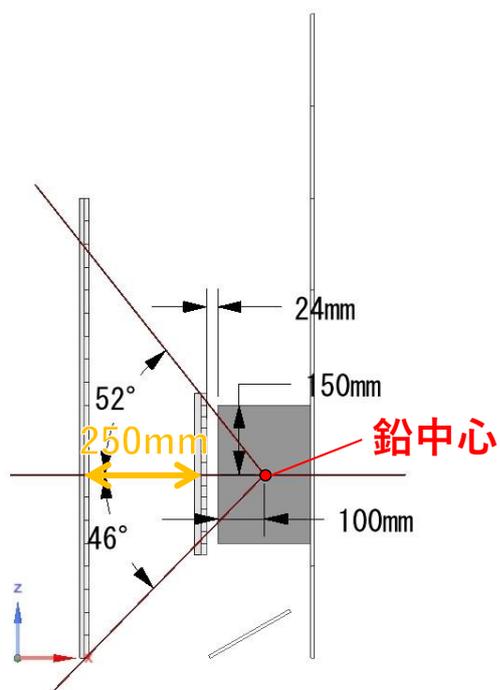


図 4.16 鉛中心から見た時に測定できるおよその最大角. 前方シンチと後方シンチの中心間の距離は 250 mm とした.

また、前方シンチと後方シンチの距離については 25 cm とした。この距離は角度の分解能に大きな影響を与える。今回のトラッキングデザインでは、前方、及び後方での測定点はそれぞれ、信号の来たシンチレータの縦横の重なるの部分であり、実際は四角い領域となる。よって、この距離が遠ければ遠いほど角度分解能が良くなり、逆に近いと角度のズレが大きくなる。今回の実験においては、角度分解能を高くする必要はさほどなく、後述する Geant4 でのシミュレーション結果から、この距離を 25 cm とすると、我々の欲しい角度分布を測定できると判断した (詳しくは Appendix C を参照)。

4.6 配線図

検出器への電圧の分配、信号読み出し等の配線は図 4.17 のようになっている。トラッキングに用いた 16ch-MPPC はそれぞれ ADC-SiTCP で読み出し、データはイーサネット、hub を介して DAQ 用 PC に送る。VETO に用いた 1ch-MPPC 16 個分の信号は、“analog sum” を用いて図 4.18 のように 4ch 分にまとめ、CAEN 製 ADC で読み出し、データを DAQ 用 PC に送る。両読みしにすることで、VETO の efficiency を高める (これは考察で触れる)。また、1ch-MPPC の読み出しを正確に行うために、自作の読み出し回路を取り付けている (詳しくは Appendix B を参照)。番号の選び方の偏りは、ミューオンがほぼ前方散乱するという点から、鉛のある高さの VETO プレーンがより細かい分解能を得られるように決めた。

また、トリガーに用いたビームタイミング信号は、B2 フロアに備え付けてあったモジュールから引っ張ってきて、先述した通り 30 μ s 分 delay させ、各 ADC のトリガーとして用いている。

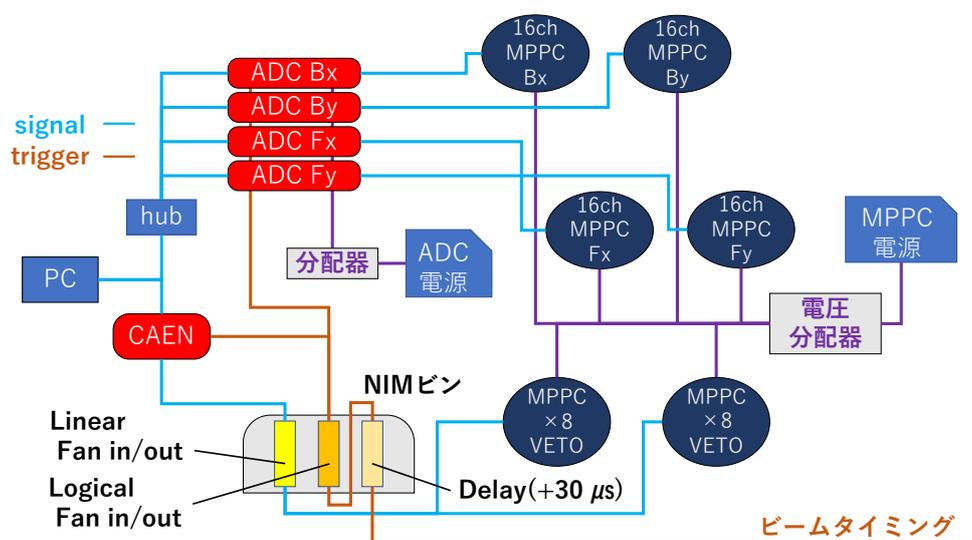


図 4.17 配線の概念図。紺色の楕円に MPPC と書かれているところは、シンチレータからファイバー、MPPC、そして 16ch-MPPC であれば平本ボードへと信号が伝達する機構の部分をもとめて描いている。16ch-MPPC - ADC 間はフラットケーブル、ADC - hub - PC 間はイーサネット、CAEN 製 ADC - PC 間は USB ケーブル、その他の部分は同軸ケーブルを用いた。MPPC や ADC の電力の供給は、まず各電源から自作の電圧分配器に電圧をかけ、そこで電圧を細かく調整して各モジュールに電圧を印加するようにした (Appendix B を参照)。ビームタイミング信号は NM 棟に備え付けてあったモジュールより引っ張ってきている。図は簡略化されているが、実際は決められたスペースから出ないようにかなり所狭しと配線されていた。

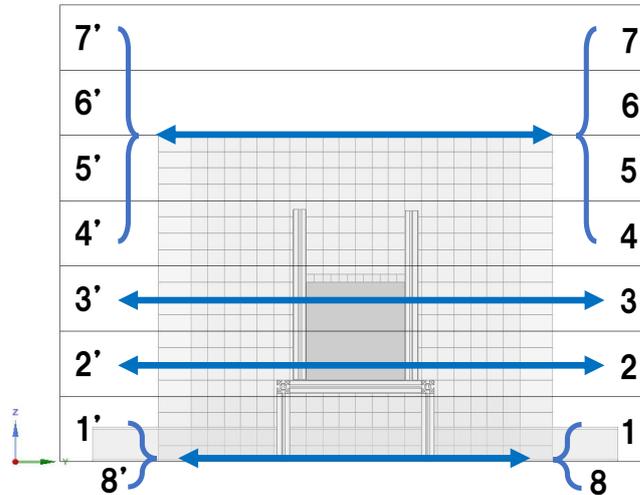


図 4.18 VETO の番号対応及び sum の取り方の図. 2, 2' 及び 3, 3' は鉛のある高さのプレーンなので, 1 枚ずつ読み出すようにした. 8, 8' は 1 枚だけ鉛の下に横たわっている VETO プレーンのことを指す.

4.7 設計/製作/インストール

以上の議論をもとに, 検出器のデザインを決定し, 詳細な設計図を作成した.

まず, 決定された図 4.1 の各部の寸法を図 4.19 及び図 4.20 に示す. 前方は幅 2.5 cm のシンチレータを 14 本並べ, 全体で $35 \times 35 \text{ cm}^2$, 後方は幅 5 cm のシンチレータを 20 本並べ, 全体で実質 $100 \times 100 \text{ cm}^2$ (横方向は両側 10 cm ずつはみ出しているが, その部分はトラッカーとして機能しない) とした. また, 4.1 節で述べたように, 前方, 後方シンチレータの任意の点同士を結ぶ直線を引いたときには, 必ずその直線上に VETO プレーンが配置されるようにしなくてはならないので, 以上の大きさの前方, 後方シンチに対して, この要求を満たすような大きさの VETO プレーンを配置した.

基本的には図 4.19 及び図 4.20 のシンチレータに, 木枠を取り付けて自立するようにするのだが, この段階で, 装置全体がかなりの大きさになることが予想された. 4.2 節で触れた通り, NM 棟 B2 フロアにインストール可能で, かつ安全な設計が求められる. 大きさの具体的な要求としては, 幅 76 cm × 奥行 120 cm × 高さ 208 cm のエレベータに乗るということであり, 特に後方シンチ, VETO シンチはそのままのサイズでは収まらない. 後方は縦の層と横の層でパーツを分け, また VETO は上下で分割する設計にし, この要求を満たした.

また, 各パーツ単体では, 安全性の要求にある横からの 1G に耐えられる設計ではないが, 後方と VETO の木枠の足などを固定し, 装置全体を 1 つの大きな塊とすることでこの要求を満たすことができる. VETO と鉛もそれぞれの面が接している状態である.

設計は 12 月中旬に固まり, 12 月下旬から 1 月中にかけて制作を行った. これらは京都大学ですべて作成し, NM 棟のエレベータに乗る状態で京都から茨城県東海村まで運送してもらい, B2 フロアに搬入したら最終的に各パーツを合体し, インストールが完成する.

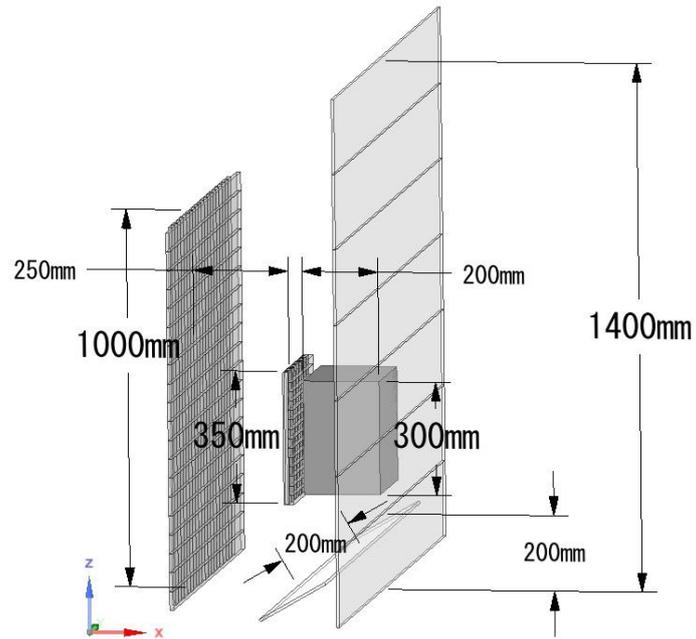


図 4.19 寸法図その 1. こちらは図 4.1 と同じ方向から見ており、ビーム方向は右から左である.

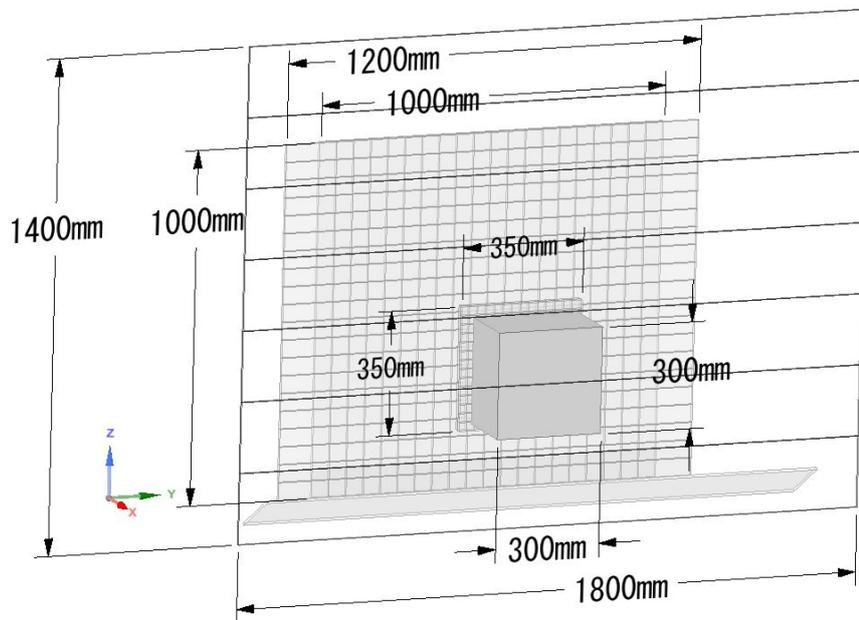


図 4.20 寸法図その 2. こちらはビーム方向上流から下流に向かって装置を見た時の図であり、ビーム方向は手前から奥である.

図 4.21 から図 4.31 にその制作風景, 実際に制作した各パーツ, インストール風景, 完成状態の写真を掲載する. また, 木枠の付いた状態での最終的な設計図は Appendix A に掲載した (各パーツごとの寸法, 分割したときの状態, 及び装置全体の大きさや様子を載せている).



図 4.21 京都大学にて VETO シンチの木枠取り付け作業中.



図 4.22 前方シンチにファイバー及びクッキーをセットしている最中. ファイバーが痛まないようにゴム手袋をし, 素手で触らないようにしている.



図 4.23 VETO シンチ. 木の境目で上下のパーツを分解できる.



図 4.24 前方シンチ. ファイバー, クッキー, 治具, 平本ボード, フラットケーブルを繋げた状態.



図 4.25 後方の横 (水平方向). 単体のパーツとしては一番重たく, 製作も一番苦労した.



図 4.26 後方の縦 (鉛直方向). 構造上このパーツだけシンチの見える面がビーム方向と逆.



図 4.27 インストール風景その 1. 足もバラバラで運びこむので, 自立するように真っ先にとりつける.



図 4.28 インストール風景その 2. 各々分担しながら作業を進める. インストール自体はとても順調に進んだ.



図 4.29 完成した装置を上から見た写真. ビーム方向はこの写真の右奥から左手前に向かう方向である. 右奥には T2K 前置検出器の on-axis 検出器 INGRID の下端が写っている.

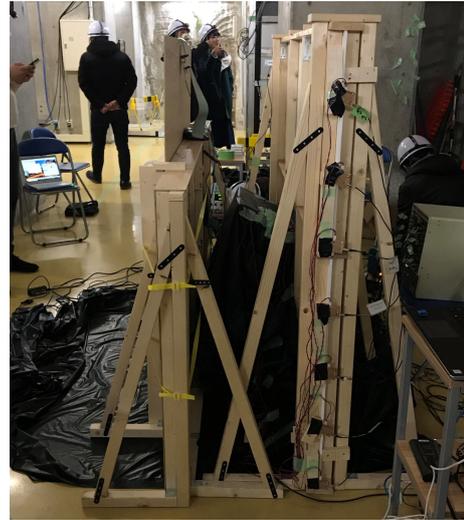


図 4.30 横から見た写真. ビーム方向は写真の右から左に向かう方向. 鉛と前方シンチレータは暗幕に包まれていて見えていない.



図 4.31 外からの光が測定の妨げとならないよう, 念入りに全体を暗幕で覆った.

第 III 部

データ解析

2020 年 2 月 2 日の午前 3 時から 2 月 4 日午前 2 時までデータ取得を行った。ビームが停止していた時間や測定機器のトラブルでデータが取れなかった時間を除いて、29.5 時間 (42882 spills) 分のデータを取得した。ビームパワーは平均 515 kW だったので、 1.14×10^{19} POT 相当のニュートリノビームデータを得ることが出来た。POT の計算は以下の通りである。

$$\frac{515 \text{ kW} \times 2.48 \text{ sec/spill}}{30 \text{ GeV/POT}} \times 42882 \text{ spill} \simeq 1.14 \times 10^{19} \text{ POT} .$$

取得した ADC のデジタル波形を用いて以下に説明する方法で解析を行い、ニュートリノ事象数および発生したミュオンノンの角度分布を算出した。

5 解析手法

図 5.1 は FADC のデジタル波形の一例である。信号以外の部分の波高の平均値を offset として、offset から波高がある値より大きかったものを信号として識別した。この閾値 (threshold) は、前方・後方シンチレータについては様々な値でシグナルノイズ比を調べたうえで、十分ノイズを除外できる値を設定した。設定した threshold における前方・後方シンチレータのノイズの評価については 7.2.1 節で、検出効率の評価については 7.1.2 節で触れる。VETO 用シンチレータについては、本測定とは別に行った検出効率テストの結果を参考に、offset + 20 を threshold とした。検出効率テストの結果とこの threshold の妥当性については第 7.1.1 節と 7.2.2 節で詳しく述べる。

また、このような波高による信号識別に加えて、反応時刻による識別も行った。ニュートリノビームは 8 つの bunch に分かれており、各 bunch に対応した時刻以外の反応はニュートリノ反応とは無関係だと考えられ

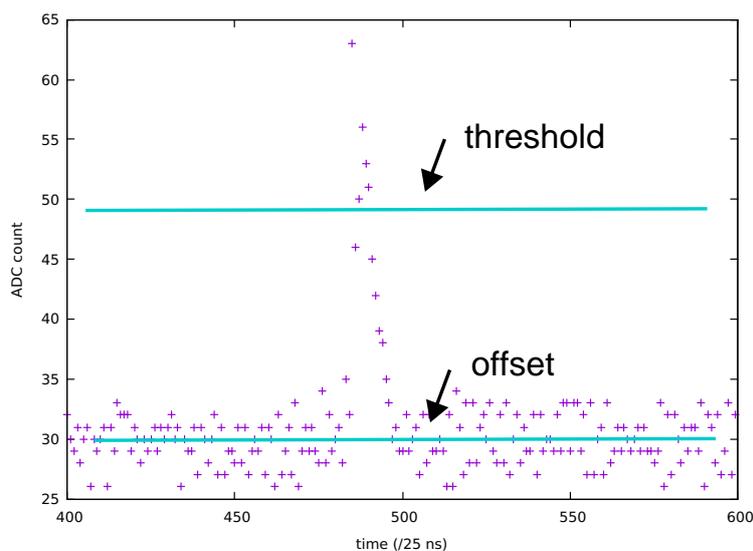


図 5.1 ADC のデジタル波形。中央付近に信号が確認できる。信号以外の部分の波高の平均値を offset と見なした。

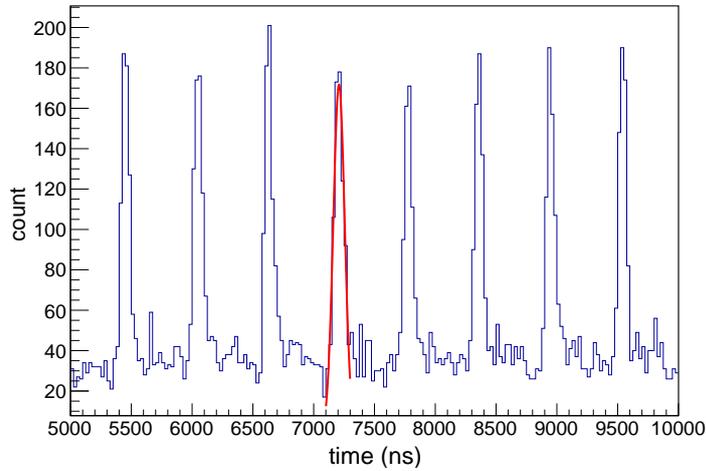


図 5.2 シンチレータの反応数と時刻の関係. トリガー時刻を基準として, シンチレータが反応した時刻をヒストグラムに描いた. 図中の赤線はガウシアンフィッティングの結果である.

る. 図 5.2 はトリガー時刻を基準としてシンチレータが反応した時刻をヒストグラムに描いたものである. 各 bunch に対応した時刻で 8 つのピークが確認できる. 各 bunch に対応する検出時刻の分布に対してガウシアンでフィッティングし, その結果のガウシアン標準偏差を σ として, ピークの中心から 2σ 以内の時刻の信号のみを選び出した (bunch cut). またそれと同時に, その信号がどの bunch に対応するものかを示す bunch 番号を割り振った.

以上のように各シンチレータから選び出した信号について, 同一 spill かつ同一の bunch 番号のものを同じ反応からきていると判断し, トラッキングを行った.

6 解析結果

VETO, 前方, 後方の全てのシンチレータが反応したイベントは, 装置外で発生したミュオンが装置を突き抜けたものと考えられる. よってこれを貫通イベントと定義する. 逆に, VETO プレーンが反応せず, 前方, 後方のシンチレータのみが反応したイベントは, 装置内部の鉛ターゲットでニュートリノが反応して発生したミュオンを捉えたものと考えられる. よってこれをニュートリノイベントと定義する.

解析の結果, イベント数はニュートリノイベントが 151, 貫通イベントが 796 であった. さらにニュートリノイベントと貫通イベントそれぞれについて反応位置をもとに散乱角を計算した結果, 図 6.1, 6.2 のようなヒストグラムが得られた. 散乱角の計算は, ミュオンがシンチレータの中心を通ったと仮定して行った. 測定装置の分解能については Appendix C で触れる.

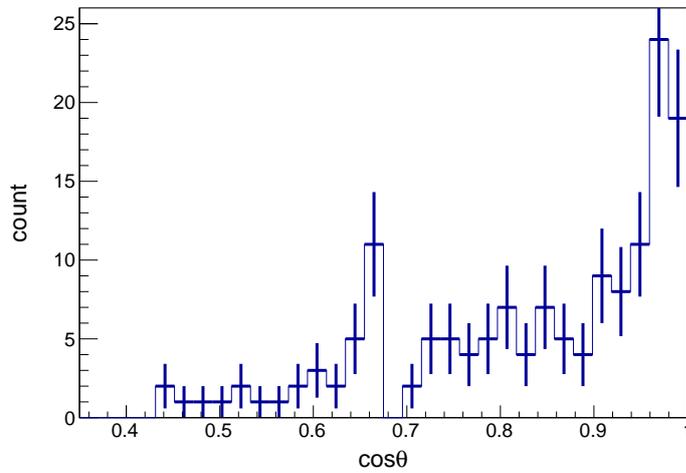


図 6.1 ミューオンの散乱角度分布. 図中には統計誤差を縦線で示している. また, Appendix C で触れるように $\cos \theta$ の値には最大で ± 0.05 程度の誤差があるが, 散乱角によって誤差の大きさが異なるなど, ヒストグラムに反映することが難しい. そこで, 測定ではシンチレータの中心を通ったものとして角度を計算し, シミュレーション側で装置のセットアップを再現することで, 測定結果とシミュレーションを比較している.

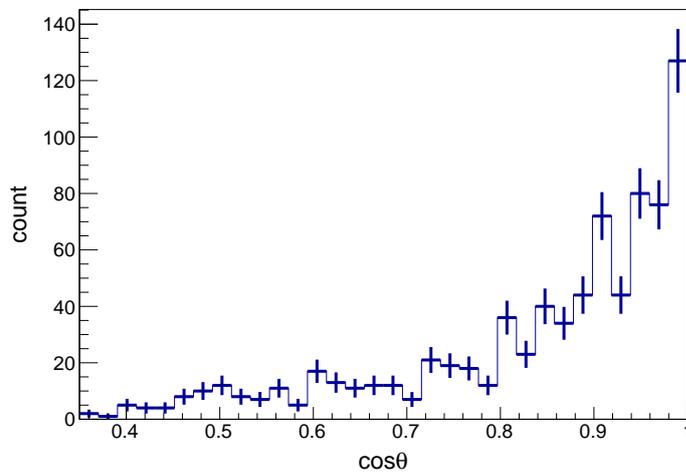


図 6.2 貫通イベントの散乱角度分布. 図中には統計誤差を縦線で示している. $\cos \theta$ の値の誤差については図 6.1 と同様である.

7 イベント数の補正

7.1 ニュートリノ事象数の評価

7.1.1 VETO プレーンにおけるノイズの評価

ここでは, VETO プレーンがノイズを検出してしまうことによってニュートリノイベントを貫通イベントとしてしまう割合を考える.

図 7.1 は各 bunch における波高の最大値をヒストグラムにしたものである. 左側の山は offset に対応している. これに対して Gaussian fitting した結果は表 7.1 の通りであった.

信号判定の threshold は VETO の検出効率テストにより, offset の平均から +20 ADC counts で決定した. この threshold の値は平均すると 1131 であり, offset の最大値の平均からはおよそ 3.9σ の位置に定めたことになる. 3.9σ の信頼度はおよそ 99.99038% である. 今 offset の波高は 1 bunch 内での最大値を取っているの
で, offset の正規分布の内 threshold よりも大きい右の部分は, ノイズを誤って VETO 信号と判別してしまう bunch を意味している. 以上から, offset からのノイズを信号としてしまう確率は約 $\frac{1-0.9999038}{2} = 4.81 \times 10^{-5}$ となる. この確率は十分小さく, ノイズを信号としてしまう可能性は無いものとしてよい.

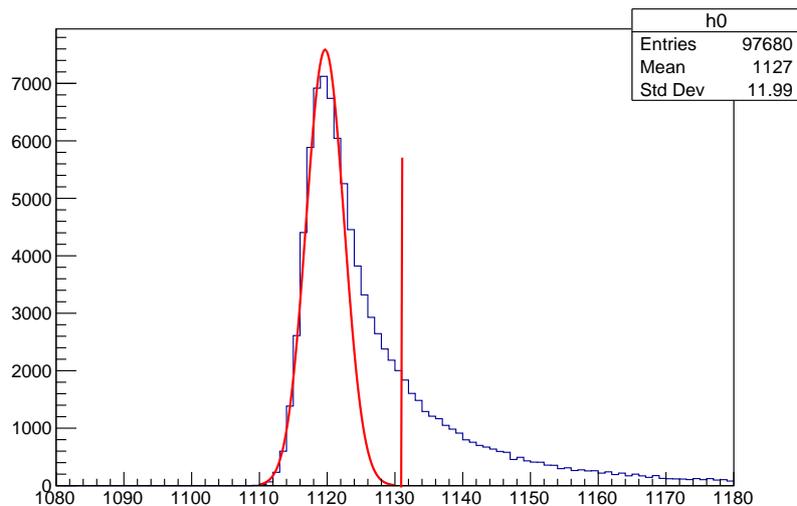


図 7.1 各 bunch における, VETO の波高最大値の分布. offset のピークに Gaussian fitting を行った. 縦線は threshold を示している.

表 7.1 offset の波高分布の Gaussian fitting の結果

mean	error	σ	error
1.120×10^3	$\pm 2.2 \times 10^{-2}$	2.8	$\pm 1.4 \times 10^{-2}$

7.1.2 tracker の検出効率

今回の実験では時間の制約のため tracker（前方、後方シンチレータ）の検出効率テストを行うことが出来なかった。そこで、波高分布と threshold の高さの関係を参考にして tracker の検出効率の見積もりを試みた。

1 つの spill の中で最も波高が大きかった点の波高の値をヒストグラムに描くと、前方、後方シンチレータの波高分布は図 7.2 および 7.3 のようになった。また、検出効率既知の VETO シンチレータについても同様に波高分布を描くと図 7.4, 図 7.5 のようになった。図 7.4 は検出効率が 98 %, 図 7.5 は検出効率が 87 % の VETO シンチレータの波高分布である。検出効率が 98 % と高かった図 7.4 の波高分布では 2 つのピークが見られ、左側の高いピークが offset の最大値の分布、右側のなだらかなピークが信号の波高分布を表していると考えられる。一方、検出効率が 87 % であった図 7.5 の波高分布では、offset 部分と信号部分が混ざり合い境目が区別できなくなっている。threshold を設定したとき、波高分布の図において threshold より左側にある信号はノイズとして捨てられる。よって offset と信号の波高分布が混ざり合っているような場合には、捨てられる信号の数が多くなり検出効率は低下すると考えられる。

前方、後方シンチレータについては検出効率は未知であるが、波高分布は検出効率がよくなかった図 7.5 と似た形となっていた。正確な検出効率を知ることは難しいが、前方、後方シンチレータの検出効率は 90 % 程度かそれ以下である可能性が示唆される。

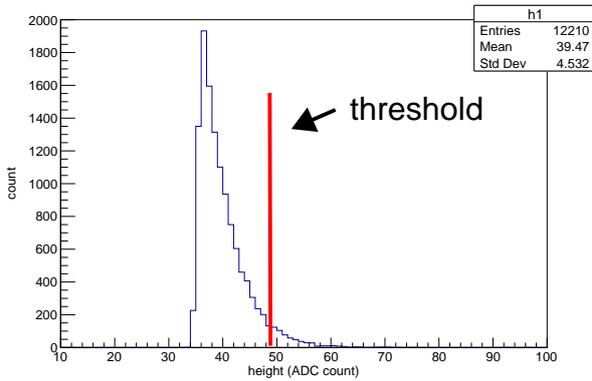


図 7.2 前方シンチレータの波高分布の一例

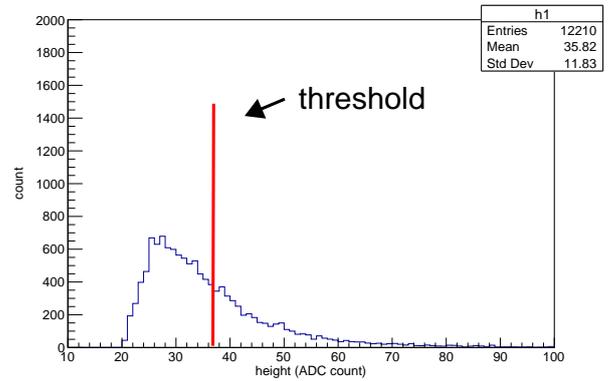


図 7.3 後方シンチレータの波高分布の一例

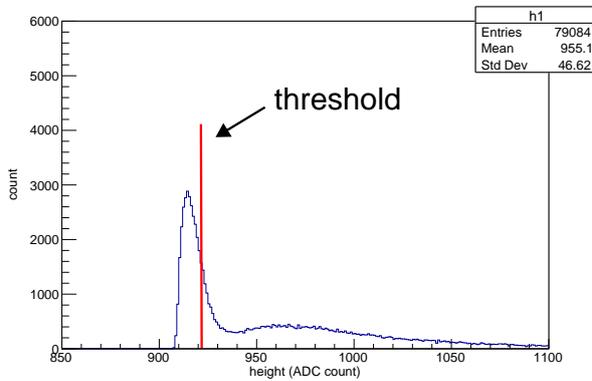


図 7.4 検出効率 98 % の VETO プレーンの波高分布

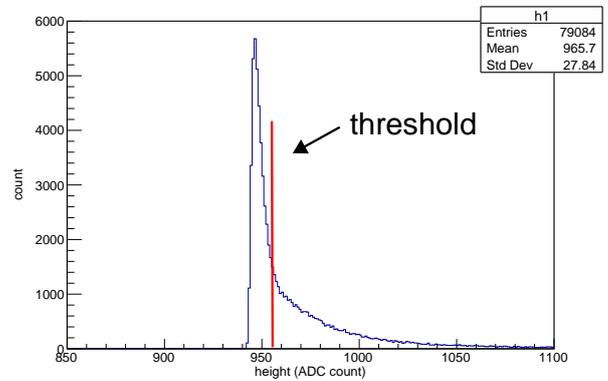


図 7.5 検出効率 87 % の VETO プレーンの波高分布

7.2 背景事象数の評価

7.2.1 トラッカーにおけるノイズの評価

トラッカーのシンチレータに対する threshold の値は信号とノイズの比率を参考に設定した。ここではその threshold の値でノイズを確実に排除できている（ノイズを誤って信号と判断する確率が極めて低い）ことを確認する。

まず、10000 spills 分のデータについて前方、後方それぞれが反応した時間分布をヒストグラムにしたものが図 7.6 である。こちらは bunch cut は行っておらず、コインシデンスの判定については時間差がおおよそ bunch 幅 2σ 未満のものを同時イベントとみなした。8bunch にあたる部分にピークが確認できる。しかし 8bunch にあたる時間以外にも信号は少ないながらも存在していて、これが信号に混入したノイズであると考えられる。今、4000~5000 ns および 10000~11000 ns の部分の count をすべてノイズであるとみなすと、そこからノイズのレートを見積もることができる。実際に計算すると、前方では 25 ns あたり 1.49 counts, 後方では 25 ns あたり 0.56 counts となる。

次に、さらに前方と後方でコインシデンスを取ったものが図 7.7 である。こちらでは 4000~5000 ns およ

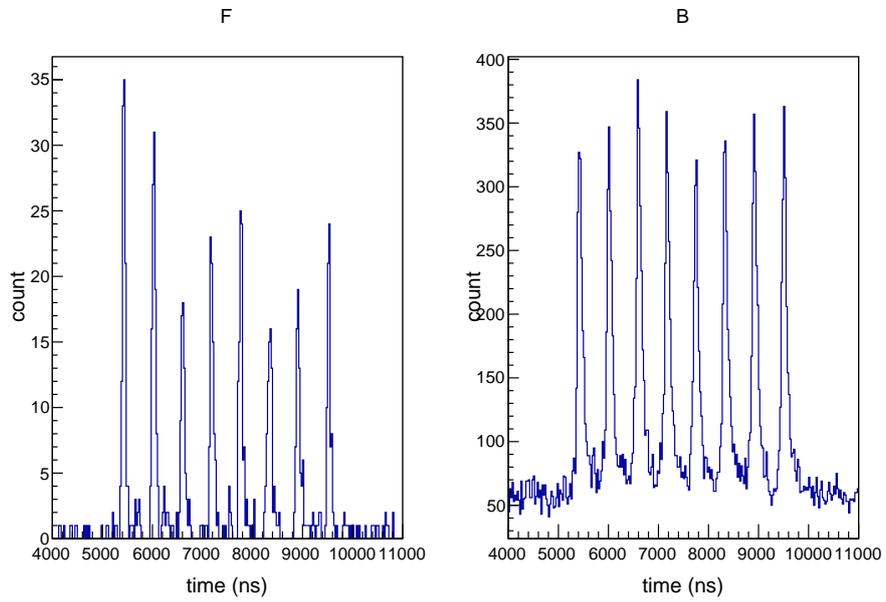


図 7.6 前方, 後方それぞれでの信号の時間分布. 左が前方, 右が後方. 10000 spills 分のデータを解析した.

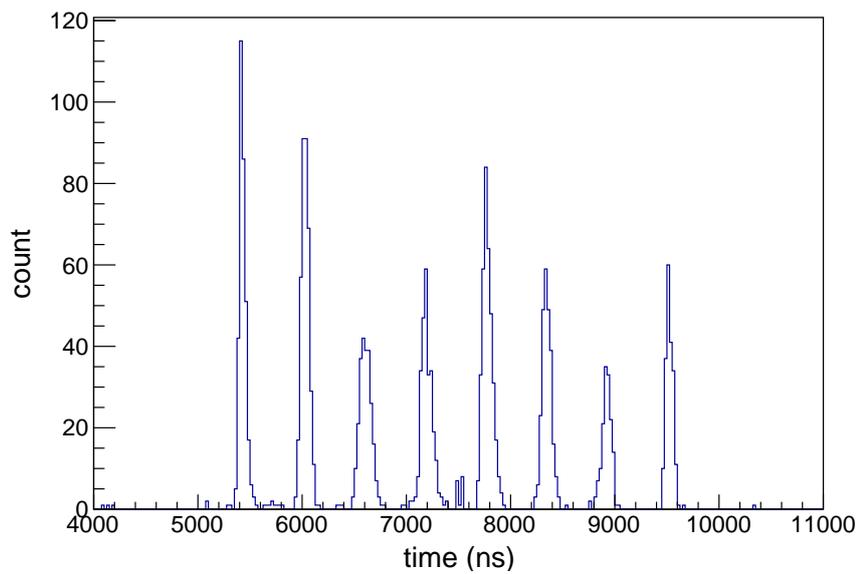


図 7.7 トラッキング可能な信号の時間分布. 10000 spills 分のデータを解析した.

表 7.2 検出効率テストの結果. 3-右は基盤の故障のため測定できなかった. 本測定では動作していた.

channel	トリガー回数	検出数	検出効率	検出数 (OR)	検出効率 (OR)
1-左	120460	119440	0.992	119645	0.993
1-右		105065	0.872		
2-左	83411	82675	0.991	82803	0.993
2-右		75282	0.903		
3-左	80910	79820	0.987	79820	0.987
3-右		-	-		
4-左	81632	80189	0.982	80330	0.984
4-右		71089	0.871		
5-左	144334	143137	0.992	143402	0.994
5-右		127480	0.883		
6-左	146943	145701	0.992	145923	0.993
6-右		123171	0.838		
7-左	114323	113172	0.990	113389	0.992
7-右		99924	0.874		
8-左	303293	301829	0.995	-	-
8-右	470257	467773	0.995		

び 10000~11000 ns の部分の count は合計でわずか 4 counts である. そこから見積もられるノイズレートは 25 ns あたり 0.05 counts となる. このことから本解析のトラッキング可能なイベントについては, トラッカーのノイズの影響は十分無視できると考えられる.

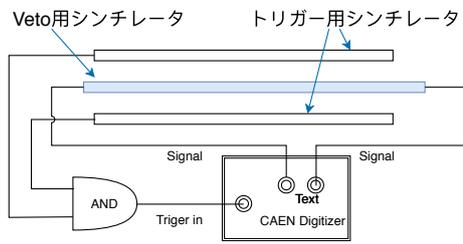
7.2.2 VETO シンチレータの検出効率

VETO シンチレータの性能を調べるため, 本実験終了後に検出効率テストを行った. 図 7.8 のように, 1 枚の VETO シンチレータの上下をトリガー用シンチレータで挟み, 床に寝かせて設置した. 2 枚のトリガー用シンチレータを宇宙線ミュオンが突き抜けた信号をトリガーとして, およそ半日ずつ測定を行った. トリガー用シンチレータは, VETO シンチレータと同じ幅のものを真上と真下に設置しているため, トリガーがかかったときには間に置かれた VETO シンチレータにも宇宙線ミュオンが突き抜けていると考えられる. よって,

$$\text{検出効率} = \frac{\text{VETO シンチレータの信号が threshold を超えた回数}}{\text{トリガー回数}}$$

の計算で検出効率を算出した. 表 7.2 がその結果である. VETO シンチレータには識別番号をふってあり, それぞれ左右の両読み出しとなっている. 表 7.2 に記した左右とはビームの上流側から見た方向である. 効率にばらつきはあるものの, 全体的に左側の効率が高く, 左右の論理和をとると全てのシンチレータについて 98~99% の検出効率であった. 左側の MPPC に印加する電圧が右側と比べて高めに設定されていたため, 敏感に反応したものと考えられる. また各 MPPC からの信号について, 1 回のトリガーイベントのうち最も波高の大きかった点の波高をヒストグラム描くと, 波高分布は図 7.9 のようになった. 検出効率が高かった左側では offset と信号の分布が分かれていることが確認できる.

また, VETO シンチレータの検出効率に影響を与える要因として, シンチレータとシンチレータの間隙を



(a) 検出効率テスト概念図



(b) 効率テスト時の写真

木枠の上に置かれている、遮光シートで包まれた板がトリガー用シンチレータ。下側にも同じものが設置されている。

図 7.8 VETO シンチレータの検出効率テストの様子

ミュオンがすり抜ける場合が考えられる。この影響を調べるため、写真 7.10 のように 2 枚の VETO シンチレータの間にトリガー用シンチレータを置いて検出効率を調べる実験を行った。

$$\text{検出効率} = \frac{\text{VETO シンチレータのいずれかが反応した回数}}{\text{トリガー回数}}$$

として計算した結果、検出効率は 98.1% となり、隙間を考慮しない場合と比べて大きな差は見られなかった。

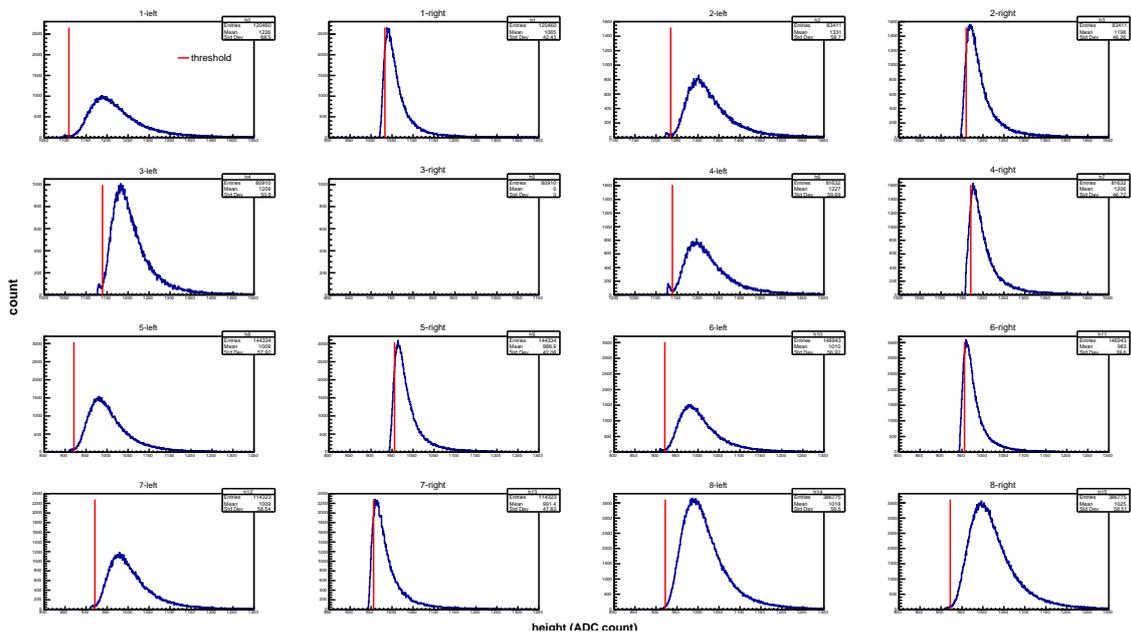


図 7.9 VETO シンチレータの波高分布. 検出効率テストではトリガーイベントのうち9割以上が信号ありのイベントのため, 大きい山が信号分布に対応し, 左側の小さな山が offset に対応していると考えられる. 検出効率がよかった左側では offset と信号の分布が分かれた形になっている.



図 7.10 シンチレータの隙間による efficiency 変化のテストの様子. 2枚の VETO シンチレータにまたがるようにトリガー用シンチレータを設置した.

7.2.3 偶発イベント

背景事象の一つとして、前方と後方それぞれ個別の反応が偶然同時に起きた場合が考えられる。本測定では、この場合も区別なくニュートリノイベントとカウントしてしまう。この事象がニュートリノイベントにどれほど含まれているのかを見積もる。まず、ニュートリノイベントと識別されることから、VETO が反応していないことが必要条件である。前方、後方それぞれの反応として、前方は VETO が反応しない、かつ前方が反応、かつ後方が反応しない ($\neg\text{VETO} \wedge \text{前方} \wedge \neg\text{後方}$) イベントを、後方は VETO が反応しない、かつ前方が反応しない、かつ後方が反応 ($\neg\text{VETO} \wedge \neg\text{前方} \wedge \text{後方}$) したイベントを数え上げた。これらのイベント数を全バンチ数で割り、前方、後方がある spill のある bunch で反応する確率とした。結果確率は、前方は 7.40×10^{-4} 、後方は 1.52×10^{-2} となった。これら 2 つの確率を掛け合わせることで、ある spill のある bunch で前方と後方の双方が偶然同時に反応する確率を見積もれる。掛け合わせた結果確率は 1.12×10^{-5} となり、これに改めて全 bunch 数を掛け合わせ、ニュートリノイベントに混在している偶発イベント数は約 3.83 と見積もられた。

7.3 まとめ

tracker の検出効率は定量的な評価ができなかったため、それ以外の上記の結果をまとめる。まず、貫通イベントを、VETO プレーンの inefficiency によってニュートリノイベントとしてしまう数を求めると

$$796 \times 0.02/0.98 = 16.25 \text{ events}$$

よって、ニュートリノイベントのうちの偽ニュートリノイベントを除くと、正しいニュートリノイベント数は

$$151 + 0 - 16.25 - 3.83 = 131 \text{ events}$$

となる。

以上の評価に基づき角度分布を修正し、最終的に得られたニュートリノイベントの角度分布が図 7.11 である。誤ってニュートリノイベントとされた貫通イベントについて図 6.2 をスケーリングしたものを差し引いたのち、その他のイベント数の評価について全体で 131 イベントとなるようスケーリングした。

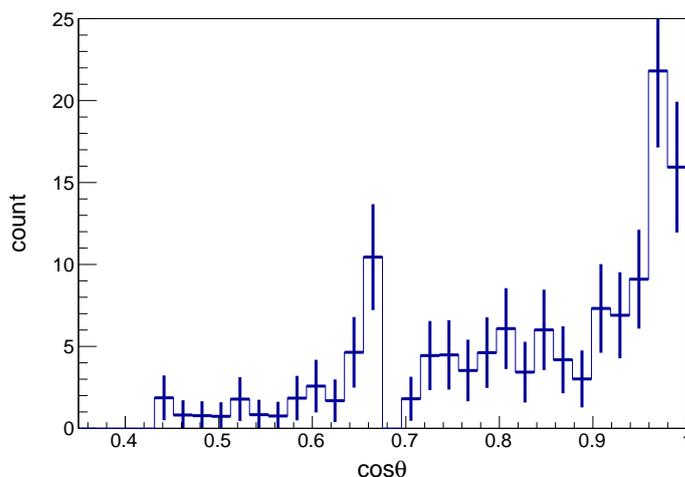


図 7.11 ニュートリノイベントの散乱角度分布最終結果. 図 6.1 の角度分布に背景事象の評価による修正を加えた。

8 シミュレーションとデータ解析結果の比較

シミュレーションの結果と本実験の結果を比較し、考察を行う。

8.1 シミュレーション

シミュレーションは、次の二段階のステップで行った。

- 1) NEUT[7][8] を用いて、ニュートリノ反応によるミューオンの発生数とその散乱角の角度分布をシミュレートする。
- 2) Geant4 を用いて、検出器中にニュートリノ反応によるミューオンを発生させ、検出効率、アクセプタンスを含め実際に観測される観測数とその角度分布をシミュレートする。

1) NEUT によるシミュレーションについては、まず WAGASCI 実験 [8] のシミュレーションデータをお借りした。WAGASCI 実験は、私たちが実験を行った J-PARC ニュートリノモニター棟 B2 フロアで行われている実験で、水ターゲットを用いてニュートリノの微分散乱断面積の測定を目指している。データは、私たちが装置を構えた位置とほとんど変わらない Off-axis 角 1.05 度の位置に水ターゲットを配置した際のニュートリノ反応をシミュレーションしたものである。パラメータの値を表 8.1 をもとに自分たちの実験用に設定しなおして、ニュートリノ反応によるミューオンの発生数を計算した。結果はイベントの総数が約 570、エネルギー分布と角度分布はそれぞれ図 8.1, 8.2 のようになった。

表 8.1 NEUT によるシミュレーション時に用いた各パラメータ値。

ターゲット密度	ターゲット断面積	ターゲット厚さ	陽子数 : 中性子数	POT [515 kW, 42882 spills]
11.34 g/cm ³	30cm × 30cm	20 cm	82 : 126	1.14 × 10 ¹⁹

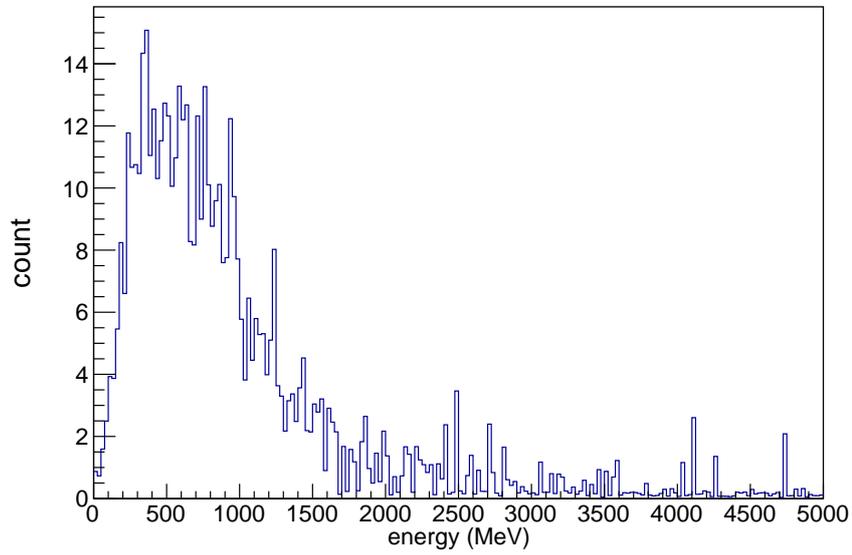


図 8.1 NEUT により得られた、ニュートリノ反応により生じるミュオンのエネルギー分布.

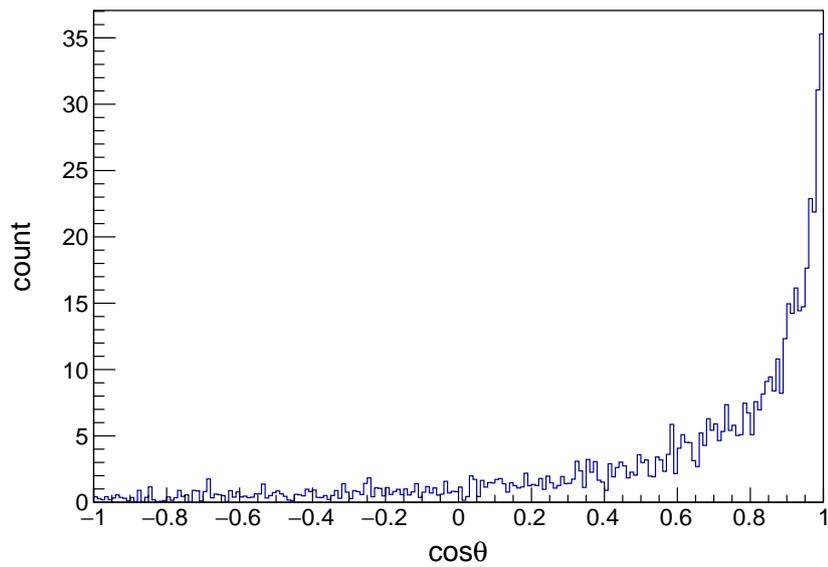


図 8.2 NEUT により得られた、ニュートリノ反応により生じるミュオンの角度分布.

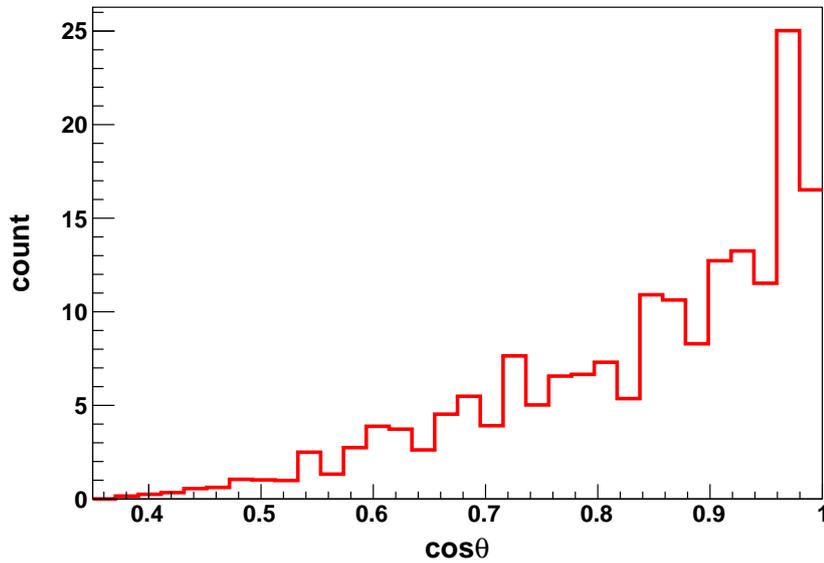


図 8.3 本実験のセットアップで Geant4 により得られたミューオンの角度分布.

2) 以上により得られた, ニュートリノ反応で発生するミューオンのエネルギー分布と角度分布を用いて, Geant4 によるシミュレーションを行った. Geant4 内で観測装置の機構を可能な限り再現したうえで, 鉛ブロック中の任意の点から図 8.1, 8.2 の分布に従うようなミューオンを発生させ, 観測で得られるニュートリノイベント数とその角度分布を見積もった. なお, Geant4 上で 4 層のトラッカーを通過したミューオンを観測で得られるニュートリノイベントとし, トラッカーの検出効率は考慮していない. シミュレーションの結果, 観測されるニュートリノイベント数は約 183, 角度分布は図 8.3 のようになった. このうち 180 events が $\cos\theta > 0.5$ のものである.

8.2 結果との比較

改めてシミュレーションの結果と観測で得られた結果を合わせて示す. まず得られたニュートリノイベント数は表 8.2 のようになり, それぞれの角度分布を重ねて示したのが図 8.4 である.

表 8.2 シミュレーションと実験からそれぞれ得られたニュートリノ反応イベント数.

シミュレーション	実験結果
183 ± 3	131 ± 11

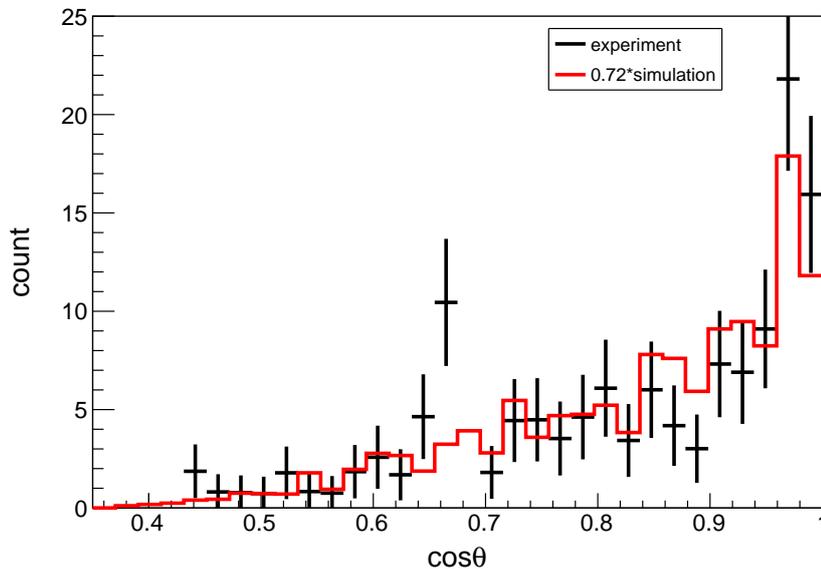


図 8.4 シミュレーションと実験それぞれから得られた、ニュートリノ反応により生じたミューオンの角度分布. シミュレーション結果を赤線で、実験結果をエラーバー付きの黒線で示している.

観測できたニュートリノイベントは、シミュレーションよりも大幅に少ない結果となってしまった。これはトラックの検出効率が影響していると考えられる。トラックに用いた各シンチの検出効率が 90% 程度とそれほど高くない可能性が高いことは、7.1.2 節で示した。仮に各シンチの検出効率が 90% であるとする、ニュートリノイベントは前方、後方計 4 枚のシンチレータのコインシデンスを取ったものであるため、トラック全体としての検出効率は $0.9^4 = 0.66$ 、すなわち 66% となってしまふ。これがニュートリノイベント数が大幅に少なかった一番の原因であったと考えられる。

一方角度分布に関しては、図 8.4 を見てわかる通り、概ねシミュレーションと一致した結果が得られた。

9 反省と改善点

tracker の効率を定量的に評価できなかったために、厳密なイベント数の評価は行うことができなかった。定性的な評価によると tracker の効率はあまり良くないと推測されるので、作製の段階からチェックを行うべきであったと反省している。

また、角度分布に関して $\cos\theta = 0.65$ 付近にシミュレーションと大きく離れた値が観測された。entry 数が少ないために統計誤差の範囲でないとは言いきれないが、ビーム下流側から tracker を通過し、鉛に吸収された宇宙線や、veto プレーンの隙間を通過した sand ミューオンが観測されたものとも考えられる。この検証のためには、装置から鉛を外した状態で測定をすれば良かったのだが、時間的な猶予がなかったために行うことができなかった。

謝辞

この場を借りて、本実験に協力してくださっ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、実験の計画段階から J-PARC 現地での実験まで全面的に協力していただき、実験や解析の方法について多くの助言をいただきました。さらに、J-PARC とのミーティングや物品購入など様々な面でお世話になりました。

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 フロアの利用の許可をしていただき、一週間の滞在の間大変お世話になりました。特に、塚本さんには実験計画に対するアドバイスをいただき、実験当日も装置の確認をしていただきました。また、J-PARC ハドロングループの皆様には、実験に使用する鉛ブロックを貸していただきました。ニュートリノグループの皆様には前置検出器の見学を許可していただき、木河さんにはその案内もしていただきました。

本学技術部の山本さんには、3D プリンターを用いた装置のパーツの制作をしていただきました。適切なパーツを作るための相談に乗っていただき、何度も試作に協力していただきました。

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。辻川さん、森さんには TA として 1 年間協力していただきました。辻川さんには種々の実験器具の使い方を教えていただき、特に 16ch MPPC とその周辺機器や、BBT 製 FADC のような、我々が不慣れなことに関しては特にお世話になりました。また、主にソフトウェア関連のトラブルは辻川さんに対処していただきました。森さんには CAEN 製 FADC の DAQ プログラムを用意していただき、本実験中にも現地でお世話になりました。

中村さんには、我々が困難に直面し作業が滞っていたとき、何度も協力していただきました。電子工作のノウハウを伝えて下さったり、電子回路のチェックを手伝っていただいたり、装置の組み立てに際して物品の購入を提案していただいたりなど、多岐にわたって大変お世話になりました。李 耀漢さんには P2 メンバーの一員として、全面的に協力していただきました。特に CAD ソフトを用いた装置の設計や、装置の作製の際はお世話になりました。また、J-PARC での実験中もお世話になり、装置の受け取りや、現地での組み立て、臨時的追加の加工に協力していただきました。平本さんには、MPPC やその専用基盤を貸していただきました。また、J-PARC の実験中にも助言をいただき、ほかの誰もが疑わなかったビームタイミング信号のモジュールの不具合を発見することができました。安達さんには、3D プリンターの使用方法について教えていただきました。小林さんには、基板カッターを用いた専用基盤の作製をしていただきました。安留さんには、WAGASCI 実験のシミュレーションのデータをお借りしました。

皆様のご協力のお陰でここまで実験を進めることができました。ありがとうございました。

参考文献

- [1] W. Pauli, Handbuch der Physik, vol. xxiv (1931) 1
- [2] E. Fermi, Z. Phys. 88 (1934) 161
- [3] F. Reines and C.L. Cowan, Jr., Phys. Rev. 90 (1953) 492, Phys. Rev. 113 (1959) 273
- [4] Tatsuya Kikawa, Measurement of Neutrino Interactions and Three Flavor Neutrino Oscillations in the T2K Experiment, 京都大学大学院博士論文, 2014
- [5] Y. Hayato. Neut. Nucl. Phys. (Proc. Suppl.), B112(13):171 – 176, 2002.
- [6] Riku Tamura, Construction and performance of a neutrino detector for neutrino-nucleus interaction cross-section measurements, 東京大学大学院修士論文, 2018
- [7] Y.Hayato, Neut, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 112, 171, 2002
- [8] 安留 健嗣, 新検出器 Baby MIND を導入した T2K-WAGASCI 実験の最適化と解析アルゴリズムの構築, 京都大学大学院修士論文, 2018
- [9] 2015 年度 課題研究 P2 レポート https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/nanjo/P2/2015/p2_2015_report.pdf
- [10] 2018 年度 課題研究 P2 レポート https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/P2/P2-18/P2_2018_report_muonium.pdf

Appendix A 装置の設計の詳細

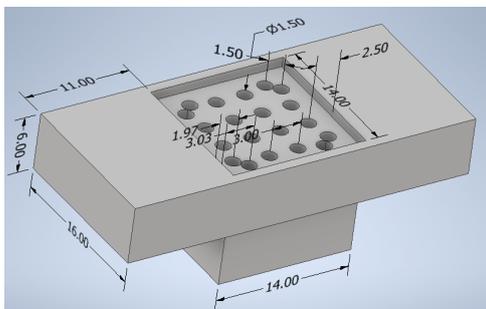


図 A.1 ファイバーと MPPC の受光面を接続する治具 (cookie). 素材は PLA で, 3D プリンターによって作成した.

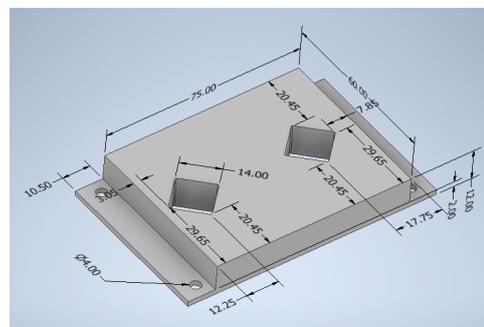


図 A.2 cookie, MPPC, 平本ボードを接続する土台 (jig). 素材は PLA で, 3D プリンターによって作成した.

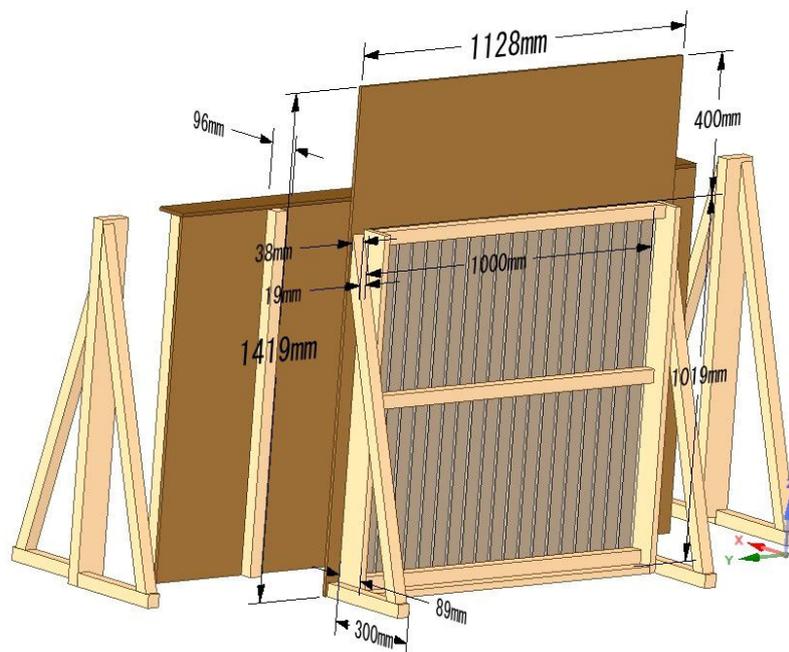


図 A.3 後方プレーン. ビーム下流側から見たもの.

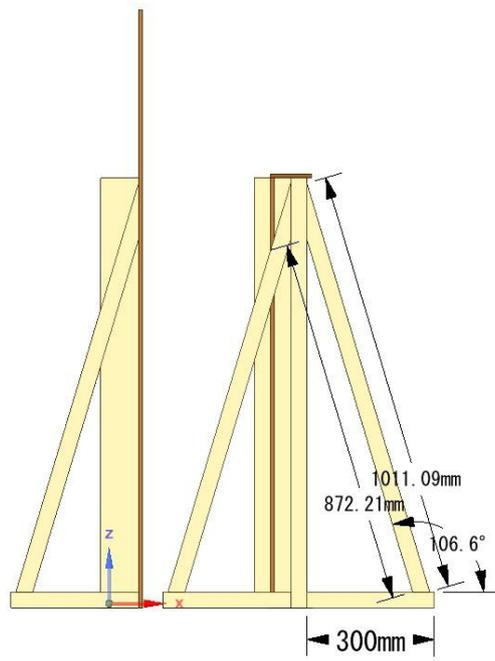


図 A.4 後方プレート. ビームに対して垂直方向から見たもの.

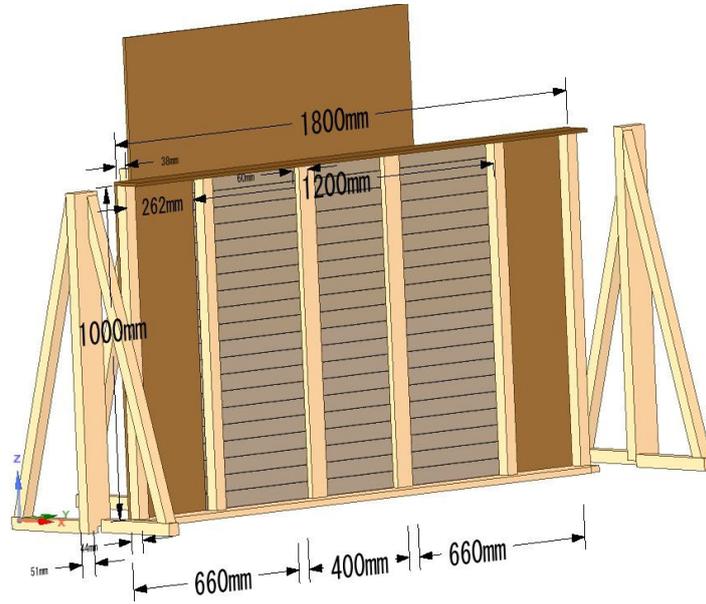


図 A.5 後方プレート. ビーム上流側から見たもの.

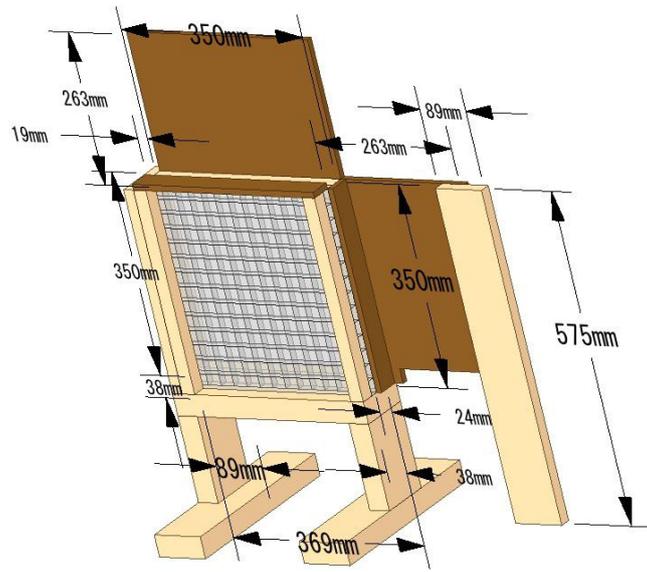


図 A.6 前方プレーン. ビーム上流側から見たもの.

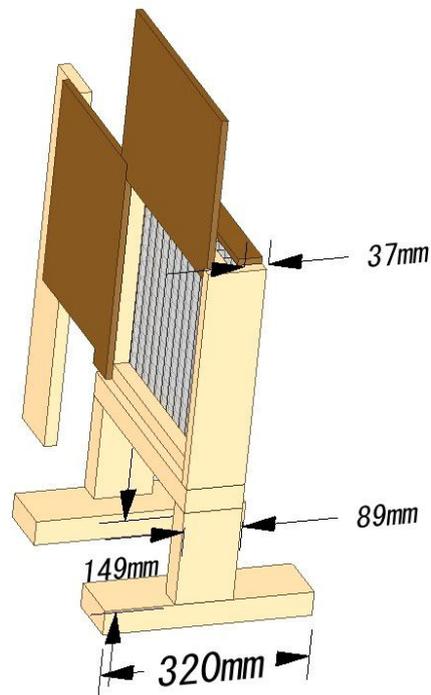


図 A.7 前方プレーン. ビーム下流側から見たもの.

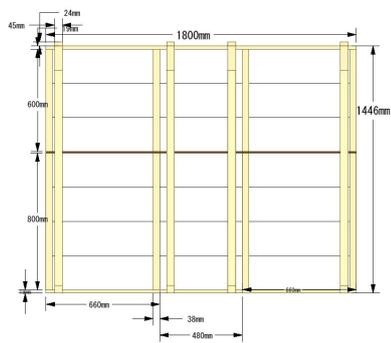


図 A.8 VETO プレーン. ビーム方向から見たもの.

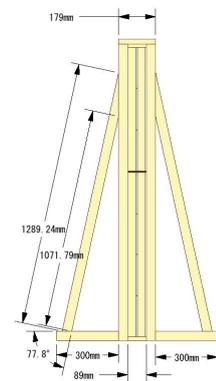


図 A.9 VETO プレーン. ビームに対して垂直方向から見たもの.



図 A.10 VETO プレーンをパーツごとに分解したもの.

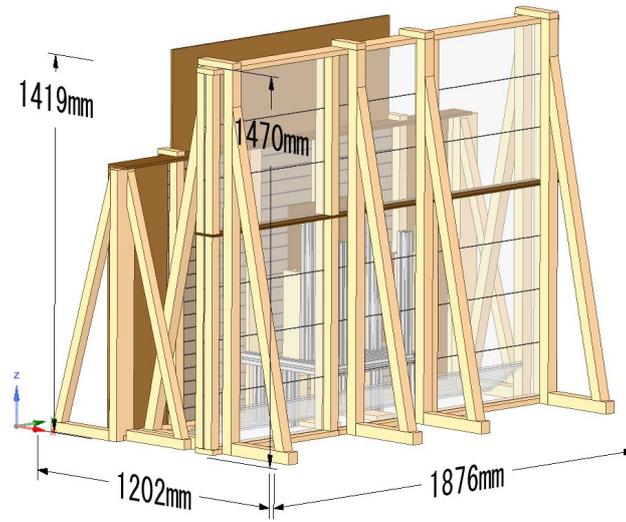


図 A.11 実験装置全体. ビーム上流側から見たもの.

Appendix B 測定に使用した自作回路について

B.1 1 ch MPPC 読み出し回路

本実験で使用した 1 ch MPPC は時定数 20 ns 程度の非常に短いパルスを出力する。40 MS (Mega Hz Sampling) の FADC-SiTCP では 25 ns ごとに波高が記録されるため、波形が正しく記録できない可能性がある。そこで波形をなまらせる読み出し回路を作成した。図 B.1 はその回路図、図 B.2 はその写真である。電源からのノイズを除去するローパスフィルターと、出力波形をなまらせるローパスフィルターで構成されており、IC ソケット部に MPPC の着脱が可能である。ローパスフィルタの時定数 τ は抵抗値 R とコンデンサーの電気容量 C を用いて $\tau = RC$ と表される。信号出力部のローパスフィルターでは 39 Ω の抵抗と 470 pF のコンデンサーを使用した。

なお実験前に FADC-SiTCP が故障したため、実際には 250 MS の CAEN 製 digitizer を使用して測定を行った。

B.2 電源分配回路

本実験では、16 ch MPPC4 個と 1 ch MPPC16 個を使用した。1 ch MPPC には 70~72 V、16 ch MPPC に 60~65 V の電圧をかける必要がある。そこで電源分配回路を作成し、1 台の電源で 20 個の MPPC に電圧をかけることが出来るようにした。図 B.3 はその回路図、図 B.4 は回路の写真である。可変抵抗の抵抗値を変更することで各 MPPC にかける電圧を微調整できる。電源電圧を 75 V に設定しておく、16 ch MPPC には 60~72 V、1 ch MPPC には 62~75 V の範囲で調整して電圧を印加できる。

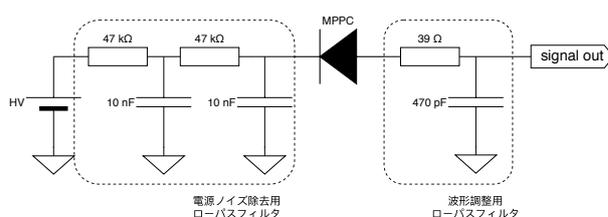


図 B.1 1 ch MPPC 読み出し回路

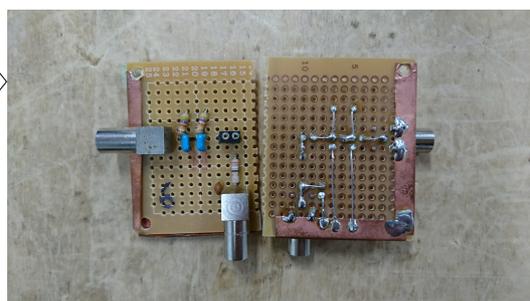


図 B.2 1 ch MPPC 読み出し回路の写真

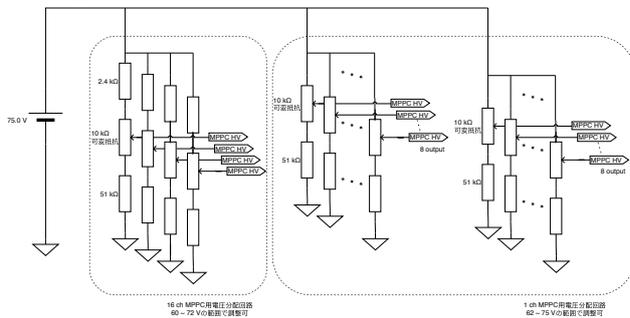


図 B.3 MPPC 電圧分配回路図

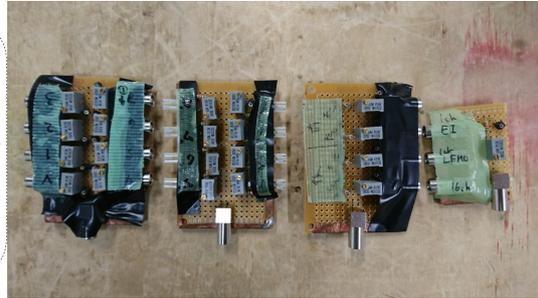


図 B.4 MPPC 電圧分配回路の写真

Appendix C 装置の角度分解能について

測定装置は格子状にシンチレータを配置することで反応位置を特定する構造になっているが、シンチレータの幅の分だけ位置決定に不定性を持っている。すなわち、反応した縦横のシンチレータが交叉する四角形の領域のどの部分で反応したかまでは特定することが出来ない。解析ではこの四角形の領域の中央を通ったとみなして散乱角を計算した。こうして計算した散乱角と実際の散乱角にどの程度の違いがあるかを調べるために、次の手順でシミュレーションを行った。

1. 前方, 後方プレーンのそれぞれについて反応した縦横のシンチレータの組を指定する。
2. 1. のシンチレータの組で指定される四角形の領域の中から乱数を用いてランダムに反応点を選ぶ。
3. 選んだ反応点の位置をもとに散乱角の $\cos\theta$ の値を計算し, ヒストグラムに詰める。
4. 2. と 3. の手順を繰り返す。

様々なシンチレータの位置の組み合わせで上記のシミュレーションを行い, 実際の散乱角の取り得る幅を調べた。図 C.1~C.4 はその結果のヒストグラムである。上流側から見て左から m 番目, 下から n 番目のシンチレータの組を (m,n) と表すと, 図 C.1 は前方 (7, 7), 後方 (10, 8), 図 C.2 は前方 (7, 7), 後方 (10, 13), 図 C.3 は前方 (7, 7), 後方 (10, 16), 図 C.4 は前方 (7, 7), 後方 (10, 17), で計算した結果である。散乱角の大きさによって大きな差があるが, $\cos\theta$ の値にして最大 0.1 程度の幅があることがわかった。

このような装置の分解能による誤差は, 散乱角によって異なるなど複雑であり, その影響を角度分布のヒストグラムに反映することが難しい。代わりにシミュレーションでは, 実際の装置のセットアップおよび解析方法を再現しヒストグラムを描いている。これにより測定結果とシミュレーションによる理論値を直接比較できるようにした。

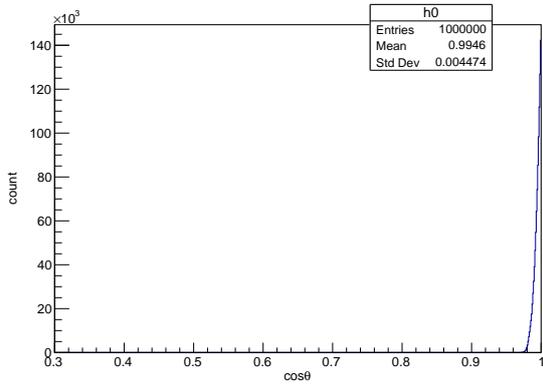


図 C.1 前方 (7, 7), 後方 (10, 8) で $\cos\theta$ が取り得る値. 解析では $\cos\theta = 1.00$ と計算される.

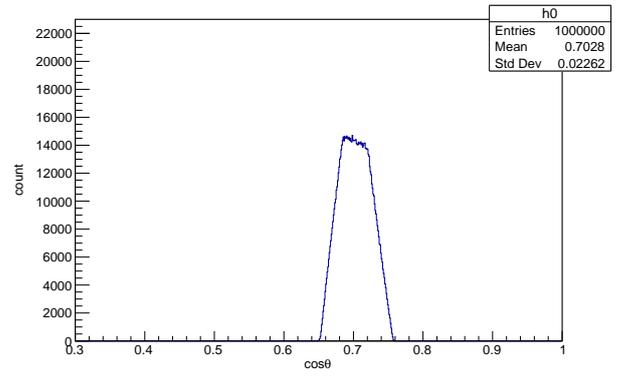


図 C.2 前方 (7, 7), 後方 (10, 13) で $\cos\theta$ が取り得る値. 解析では $\cos\theta = 0.70$ と計算される.

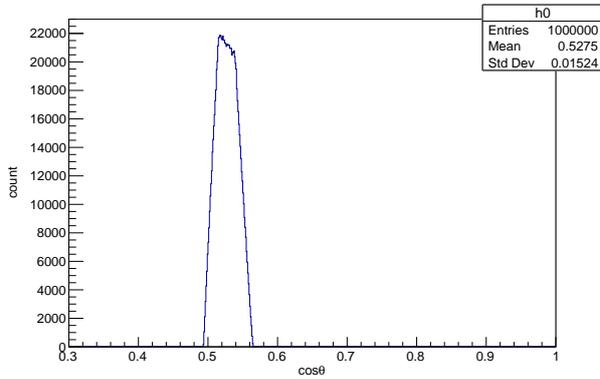


図 C.3 前方 (7, 7), 後方 (10, 16) で $\cos\theta$ が取り得る値. 解析では $\cos\theta = 0.53$ と計算される.

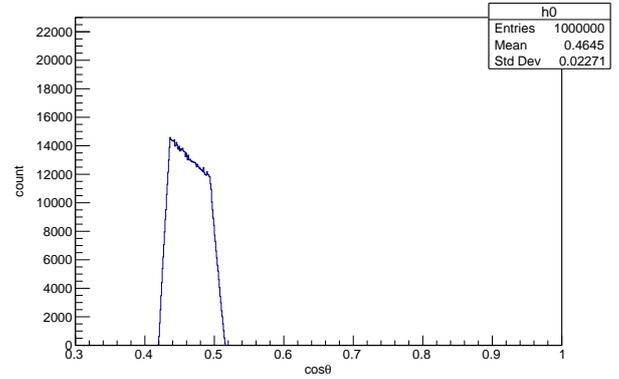


図 C.4 前方 (7, 7), 後方 (10, 17) で $\cos\theta$ が取り得る値. 解析では $\cos\theta = 0.46$ と計算される. 後方の 17 番目と 18 番目のシンチレータはまとめて読みだしているため, 解析では $5\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ の領域の中心をとっている.

Appendix D データ間の時間同期

本実験のデータ取得において、トラッカー 4 層には各層につき 1 台、計 4 台の ADC-SiTCP, VETO プレーンには CAEN 製 ADC をそれぞれ用いた。delay をかけたビームタイミング信号をトリガーとし、その前後数 μs のデータを各 ADC からノート PC に記録したわけだが、各 ADC データ間でどのデータが同一のビームタイミング信号によるデータかを対応付ける必要がある。このために、各データの先頭にデータを取得したときの時刻を記録するようにした (図 D.1)。なお、時刻は PC 内の時計の時刻である。この時刻が十分に近いデータ群が、同一スピル (ビーム) のデータとし、各データ間の対応付けが同一スピルのものになるよう揃えた。さらに、この時刻を参考にビームが停止していた間のデータや時間対応がうまく取れない部分のデータを取り除いた。以上、時刻の対応付けが確実な部分のデータのみを取り出し、その対応付けが揃うようデータを整理したうえで、解析にあたった。

しかし、各層についてコインシデンスを取るところで問題が生じた。図 D.2, 後方 2 層のコインシデンスを取ったイベントで、そのイベントがデータ取得開始から数えて何番目の spill (ビーム) のものか (spill 番号) についてヒストグラム化したものである。6600 番目の spill を境に、イベント数が急激に少なくなったことが分かる。もちろん、ビーム停止時間のデータは取り除き済みであるので、ビームが止まったり出力が落ちたりしたわけではない。ここで、spill 番号の対応を一つずらし、すなわちコインシデンスの条件「Bx の spill 番号=By の spill 番号」を「Bx の spill 番号=By の spill 番号 +1」と変えたうえでコインシデンスをとり、同じようにヒストグラムにしたものが図 D.3 である。今度は 6600 番目以降の spill でイベント数が急増したことが分かる。このような現象は各 ADC 間の各所で見られた。様々な可能性を考えたとうえで、私たちは先頭行に記した時刻で対応を揃えても、spill 番号の対応は各所でずれている、という結論に達した。上記の後方 2 層の例のように、spill 番号を 1 つずつずらしながらコインシデンスをとりヒストグラムにし見比べることで、どこを境にど

```
#Event Time: 2020/02/02 03:07:58.048872587
6 9 10 8 15 7 5 8 15 11 7 10 11 16 7 10
6 8 9 6 15 7 2 9 13 12 9 11 11 15 9 8
8 9 9 6 13 7 7 9 12 13 7 10 9 17 7 9
4 11 10 7 13 8 4 8 15 12 7 10 9 16 7 10
7 8 12 7 14 9 6 9 16 13 8 9 10 17 10 9
7 12 8 8 13 6 5 10 13 11 7 8 10 16 7 9
7 12 11 9 14 7 7 8 13 10 7 13 11 17 9 8
6 14 7 8 14 7 6 7 14 13 6 9 11 14 8 10
6 17 9 7 15 7 6 8 15 13 7 7 9 15 9 8
7 19 8 7 14 6 6 9 14 11 7 9 10 15 9 11
7 20 11 6 13 6 6 8 15 14 8 9 10 16 8 9
4 23 9 4 11 5 6 6 12 12 5 9 11 16 11 10
5 22 7 8 13 6 5 10 13 11 8 9 11 15 7 7
9 16 7 8 14 6 5 8 15 10 8 9 8 16 7 6
5 12 11 4 12 6 6 8 13 12 6 9 9 16 10 9
5 11 13 8 13 8 6 10 13 13 3 10 11 16 10 12
5 11 10 6 16 6 6 7 16 12 8 11 11 16 8 10
6 12 10 7 16 8 4 9 13 11 7 10 11 16 8 11
10 10 9 6 15 6 7 8 17 12 8 10 10 17 8 9
11 9 11 7 14 8 9 8 16 13 6 11 11 17 8 9
10 10 10 5 13 7 7 8 17 12 6 8 10 17 8 9
13 8 9 6 13 6 6 8 15 12 7 9 11 16 9 8
```

図 D.1 PC に記録したデータの 1 部分。先頭にデータを取得した時刻を記録した後、その時刻での ADC カウントが記録されている。

れほど spill 番号がずれているのかが推察できる。本実験における結果は全て、以上のように spill 番号のずれと思われる部分を修正しコインシデンスを取ったうえでの結果である。

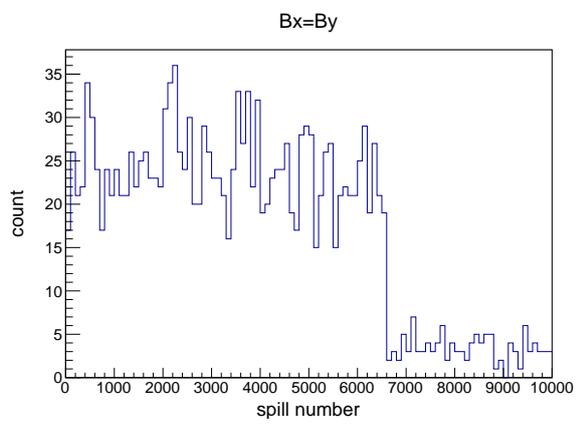


図 D.2 後方の 2 層のコインシデンスイベントの, spill 番号についてのヒストグラム.

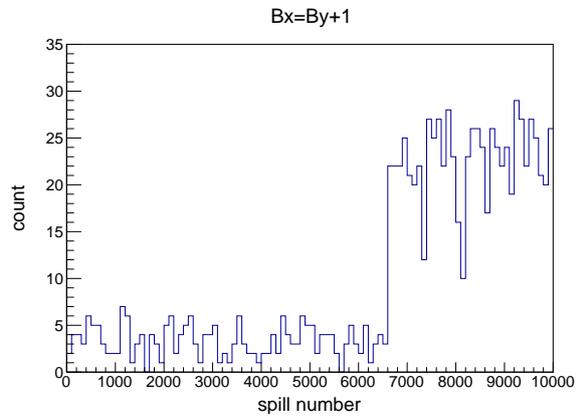


図 D.3 spill 番号を 1 つずらしたうえで後方 2 層のコインシデンスを取ったイベントの, spill 番号についてのヒストグラム.