

学部卒業論文

# ニュートリノの反応断面積測定

氏本郁也  
笹木遥  
林春向

理学部理学科

指導教員：中家剛教授・木河達也助教

2026年3月

# 概要

本研究では、1 GeV ニュートリノビームを鉛ガラス標的に照射し、荷電カレント準弾性散乱 (CCQE) 事象の断面積測定を行った。検出器は鉛ガラス (LG) と、Veto 用プラスチックシンチレータ (PS) 10 枚で構成し、「LG と PS 1 枚のみが反応したイベント」を CCQE 候補と定義した。3 日間 (約 45 時間) で取得した 952376 イベントを解析し、閾値  $4\sigma$  で  $51 \pm 7$  イベント、 $5\sigma$  で  $35 \pm 6$  イベントを CCQE 候補として得た。一方、候補事象の空間分布はシミュレーションで期待される前方優位性より弱く、総反応数も理論見積りの約  $1/2 \sim 1/3$  に留まった。

## Contents

<b>1</b>	<b>実験目的</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>理論的背景</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>実験方法</b>	<b>3</b>
3.1	検出器	3
3.2	J-PARC ニュートリノビームライン	3
3.3	DAQ	5
<b>4</b>	<b>結果・解析</b>	<b>7</b>
4.1	解析手法	7
4.1.1	データ取得	8
4.1.2	bunch の決定	8
4.1.3	threshold の決定	9
4.1.4	イベントの判定	10
4.2	結果	11
4.3	誤差評価	12
<b>5</b>	<b>考察</b>	<b>12</b>
5.1	シミュレーション	12
5.1.1	geant4 の詳細設定	12
5.1.2	NEUT について	13
5.1.3	シミュレーション結果	13
5.2	結果の解釈	15
5.3	今後の課題	15
<b>6</b>	<b>結論</b>	<b>16</b>

## 1 実験目的

ニュートリノは反応断面積が極めて小さく、物質透過性が高い。そのため、通常の検出器サイズでは有意な事象数の獲得が難しく、反応断面積の実測は基礎的かつ重要な課題である。

## 2 理論的背景

標準模型において、強い相互作用、弱い相互作用、電磁気力のうち、ニュートリノは弱い相互作用のみを行う粒子とされる。この相互作用には大きく分けて2種類が存在し、W ボソンが仲介粒子となる反応 (CC 反応) と Z ボソンが仲介粒子となる反応 (NC 反応) がある。このうち我々が検出器で検出可能な反応は、荷電レプトンを伴う CC 反応である。CC 反応の種類は以下のものに分けられる。

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

ニュートリノが中性子と相互作用し対応するレプトンとプロトンになる反応：

$$\nu_\ell + n \rightarrow \ell^- + p$$

(b) **Charged Current single pion creation (CC1 $\pi$ )**

ニュートリノが核子 (N) と相互作用して対応するレプトンと核子とパイオンになる反応：

$$\nu_\ell + N \rightarrow \ell^- + N' + \pi$$

この反応は中間状態に以下のようなものを持つ

$$\begin{aligned} \nu_\ell + p &\rightarrow \ell^- + \Delta^{++} \rightarrow \ell^- + p + \pi^+, \\ \nu_\ell + n &\rightarrow \ell^- + \Delta^+ \rightarrow \ell^- + n + \pi^+, \\ \nu_\ell + n &\rightarrow \ell^- + \Delta^+ \rightarrow \ell^- + p + \pi^0. \end{aligned}$$

(c) **Charged Current coherent pion production (CC coherent  $\pi$ )**

原子核を励起してその励起エネルギーがパイオンとして放出される反応：

$$\nu_\ell + A \rightarrow \ell^- + \pi^+ + A$$

(d) **Deep Inelastic Scattering (DIS)**

高エネルギーで核子内部のクォークと散乱し、多数のハドロンを生成：

$$\nu_\ell + N \rightarrow \ell^- + X$$

(X：多ハドロン終状態)

図1にダイアグラムを示す。

また、図2はニュートリノのエネルギーに対する各反応の断面積を示したものであるが、本実験で用いるニュートリノビームのエネルギーは、1GeV 程度であるので、CCQE 反応及び、CC1 $\pi$  反応が主な反応となる。

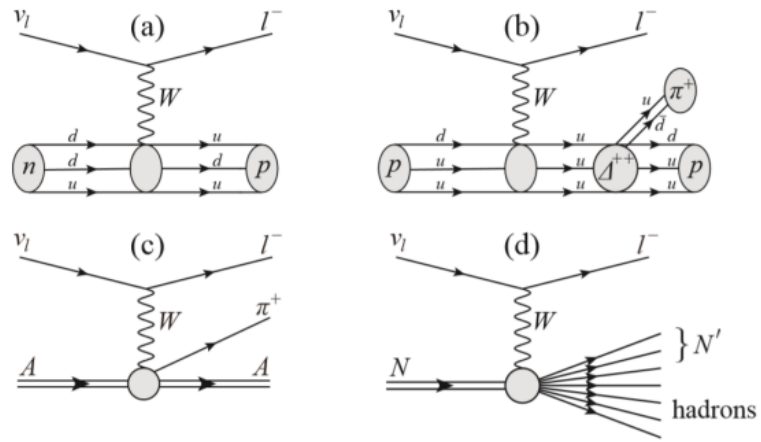


図 1: 各ニュートリノ反応のダイアグラム

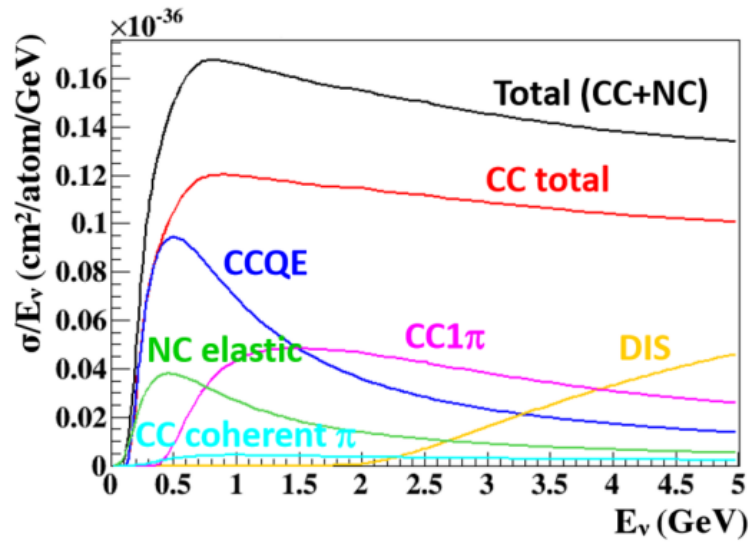


図 2: ニュートリノのエネルギーに対する各反応の断面積

### 3 実験方法

#### 3.1 検出器

本実験の検出器は、鉛ガラス (LG) 標的と Veto 用プラスチックシンチレータ (PS) で構成した。LG で生成された  $\mu^-$  が通過するとチェレンコフ光が発生し、LG に取り付けられた PMT でその信号を読み出す。

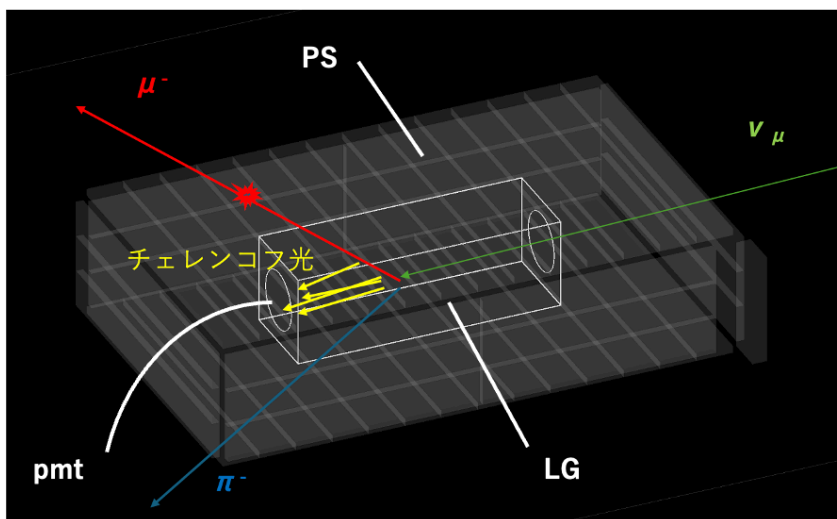


図 3: CCQE 反応が起きた時の各検出器の応答

まず、LG 部について説明する。LG は直角台形を側面に持つ台形台の形をしている。この LG の後面に PMT 接続部があり、光電面にグリスを塗り PMT(Hamamatsu R6683) を接続した。使用した鉛ガラスは、PbO が 55%、K O が 4%、SiO が 39%、Na O が 2% で構成され、密度は 4.08 g/cm<sup>3</sup> である。この材料を選択した理由は、高密度であることから他の物質に比べてニュートリノとの相互作用が期待できる点に加え、チェレンコフ光を発生する特性を持ち、ターゲットであると同時に検出器としても機能するためである。さらに、鉛ガラスの上面・下面・右面・左面にはアルミニウム (Al) を施し、チェレンコフ光を鏡面反射させることで光量の増加を図った。一方で、前面の PMT と接していない反対の面には、ブラックテープを用いて覆っている。LG 部は当初、ビームの前後に 2 台の PMT をつけて、光量差から飛跡方向を識別する計画であったが、実測では PMT 故障のため 1 台読み出しで運用した。

PS は厚さ10mm、幅50mm、長さ350mm 細長いシンチレータを並べて板を作り、PMT 数の制約から PS 信号は板単位で 1 つの PMT へ光ファイバーを用いて集約し、各板の応答有無を事象判定に用いる。10 枚の板で LG 部を直方体の形で囲うようにし、ビーム方向に平行な面はビーム方向の前後に分割している。最後にこれらを暗幕で覆った。

ニュートリノビームが検出器に到達するまでに反応し生成される  $\mu^-$  (サンドミューオン) の貫通や LG 内 CC1 $\pi$  反応などで生じる「PS が 2 枚以上反応」する事象を Veto し、「LG と PS 1 枚のみ反応」したイベントを CCQE 候補として抽出した。ここで CC1 $\pi$  反応が起きた時必ずしも 2 枚の PS が鳴るとは限らず、1 枚のみ反応する場合があります完全には除去できないことは留意すべきことである。

#### 3.2 J-PARC ニュートリノビームライン

J-PARC ニュートリノ実験施設では、メインリングから取り出した陽子ビームをグラファイト標的に衝突させて二次粒子を生成し、電磁ホーンで正パイ中間子を前方収束させることで、主として  $\nu_\mu$  ビームを生成する。生成したパイ中間子はディケイボリウム中で崩壊し、ニュ

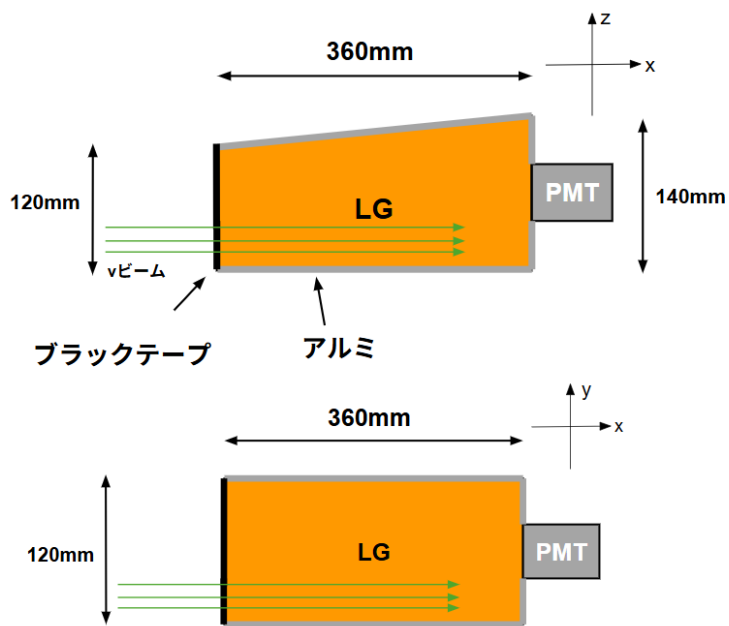


図 4: 鉛ガラス及び PMT の概略図 (x 軸方向にビームが出ている)

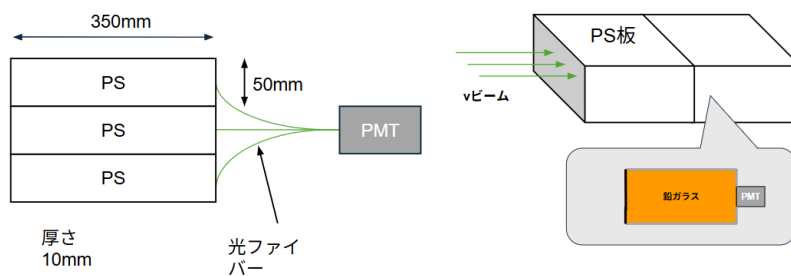


図 5: PS 及び PMT の概略図

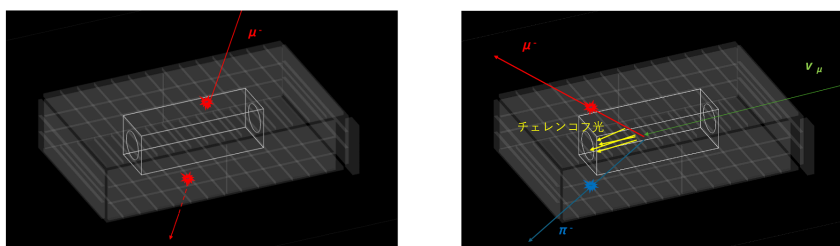


図 6: VETO されるべき反応が起きた時の各検出器の応答 (左がサンドミューオン通過時、右が CC1π 反応が起きた時)

ニュートリノはビームダンプを通過して下流検出器へ到達する。ビーム方向・強度の安定性は、ビームモニターおよびミュオンモニターで監視される。

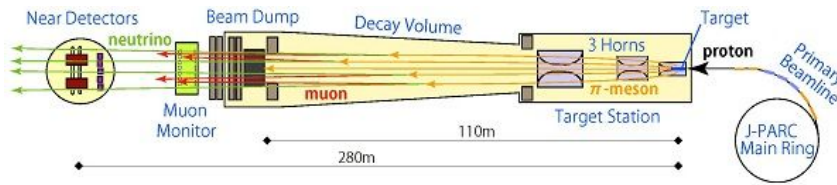


図 7: ニュートリノビーム生成概要

### 3.3 DAQ

ビームは約 1.3 秒周期で供給され、1 spill は 8 bunch から構成される。1spill は約 $4.1\mu\text{s}$ の幅を持ちその中に bunch が $581\text{ns}$ 間隔で並んでいる (図8)。LG に接続された PMT には約 1600V、PS に接続された PMT には約 1300V の電圧をかけ、各 spill のビームタイミング信号を基準に、LG および PS の PMT 出力を同時収集した。信号はアンプ (TKY-0351) で増幅した後、CAEN32ch デジタイザへ入力し、波形として記録した。この時アンプは、PS2、3、4、10 には 2 回、それ以外の LG、PS には 1 回ずつかけている。データ取得では beam trigger に delay を与え、トリガー時刻から $16.3\mu\text{s}$ 区間を読み出した。(図9)

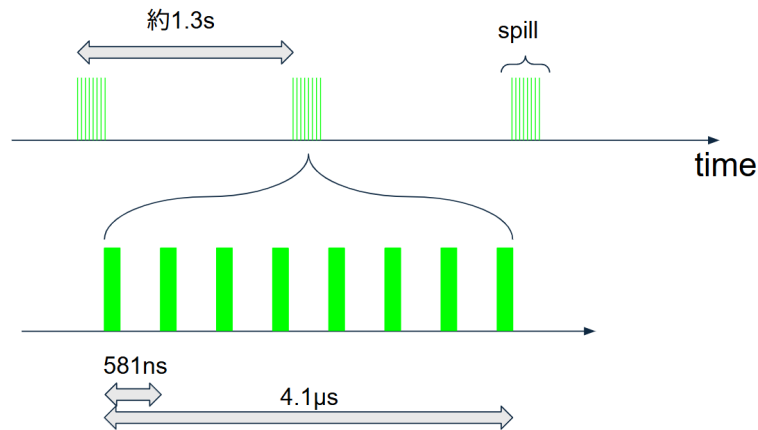


図 8: ニュートリノビーム構造

本実験では、J-PARC ニュートリノビームラインにおいて、NM-B2 に装置を配置して測定を行った。測定期間は 1/25~27 の 3 日間で、実効取得時間は約 45 時間である。

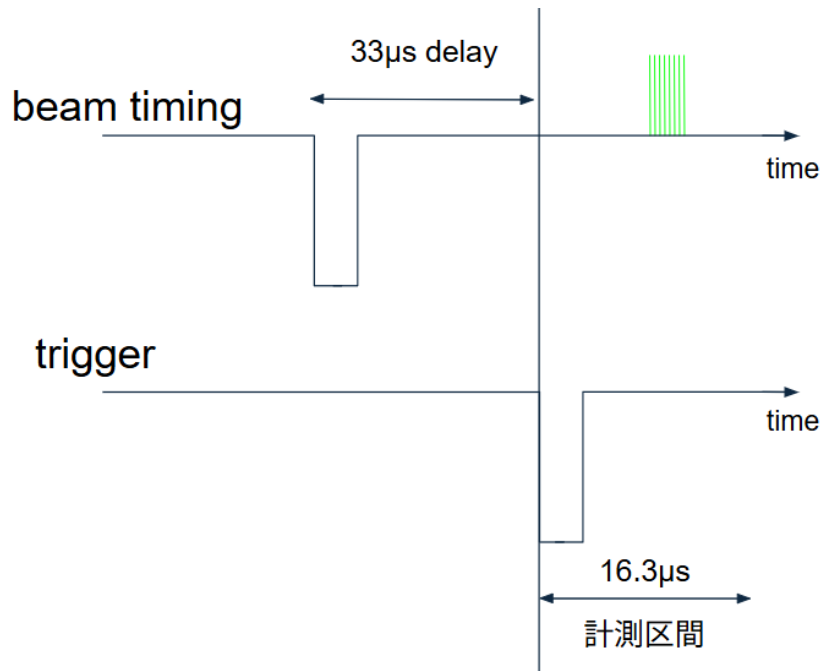


図 9: データ記録タイミングにおける時間のダイアグラム

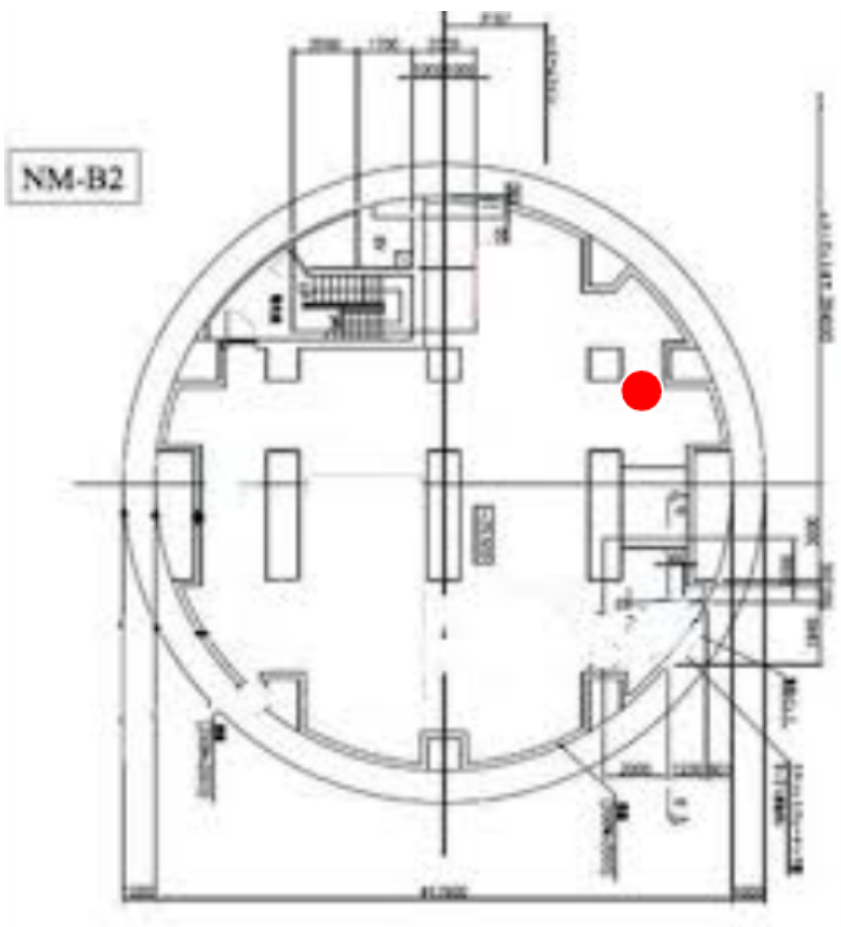


図 10: NM-B2 地図 (赤丸の場所に検出器を置き測定)



図 11: 実際のセットアップ

## 4 結果・解析

今回の実験では、ビームが稼働していない間も beam trigger が出続けていたため、ビーム稼働状況のデータを参照し、ビーム稼働時のデータと停止時のデータに分類した。

ビームが稼働時のデータは 952376 イベントが記録されており、ビーム稼働状況のデータから、POT 換算で  $2.8 \times 10^{19}$  POT であることがわかった。ビーム停止時のデータは 166024 イベントが記録されており、これらは信号の閾値を決める際にバックグラウンドのサンプルとして利用した。これらのデータを以下の手順で解析し、CCQE 反応のイベント数と、その際に反応した PS の位置の分布を算出した。

### 4.1 解析手法

解析の概要を図12に表す。

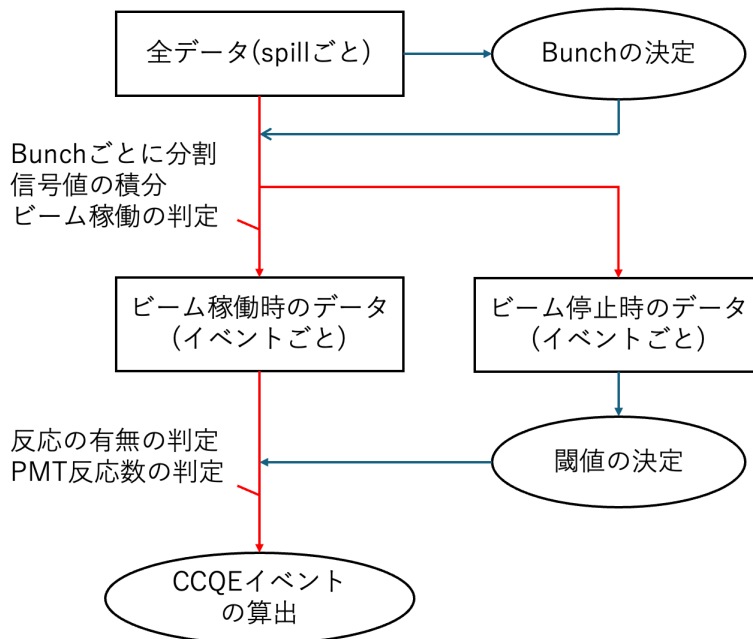


図 12: 解析の流れ

#### 4.1.1 データ取得

今回使用した ADC は 1sampling が 16ns のものであり、各トリガーに対し 1024sampling ずつ信号を記録した。各波形の前半部分を baseline 設定に使用するため、ビームトリガーの位置は中心付近にくるように調整した。ADC から取得した生の波形の例を図13に示す。

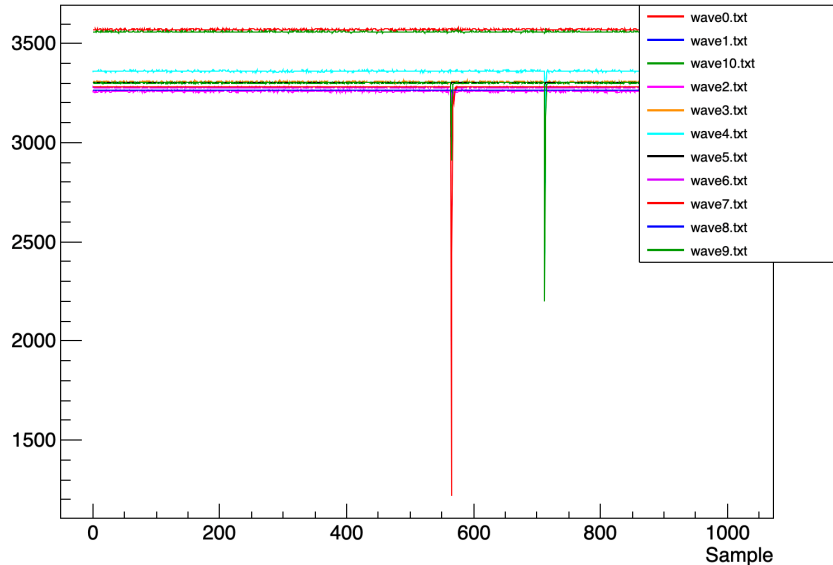


図 13: 生波形の例

この図は、1spill 分の 10 枚の PS と LG からの波形を全て重ねて表示している。この図の場合、2 箇所ピークはそれぞれ、PS が 2 枚反応しており、異なる bunch に対応したサンドミュオンが 2 回装置を貫通した場合の波形だと考えられる。

#### 4.1.2 bunch の決定

生の波形は 1spill ごとに記録されるので、8 つの bunch に分けて記録し直す必要がある。そのために、各 spill ごとに最大値を取ったタイミング（横軸）を記録し、ヒストグラムにした。その際、最初の 50sampling 分の平均値を baseline とし、baseline から下にふれた幅が最大値を取るタイミングを記録した。その結果が図14である。

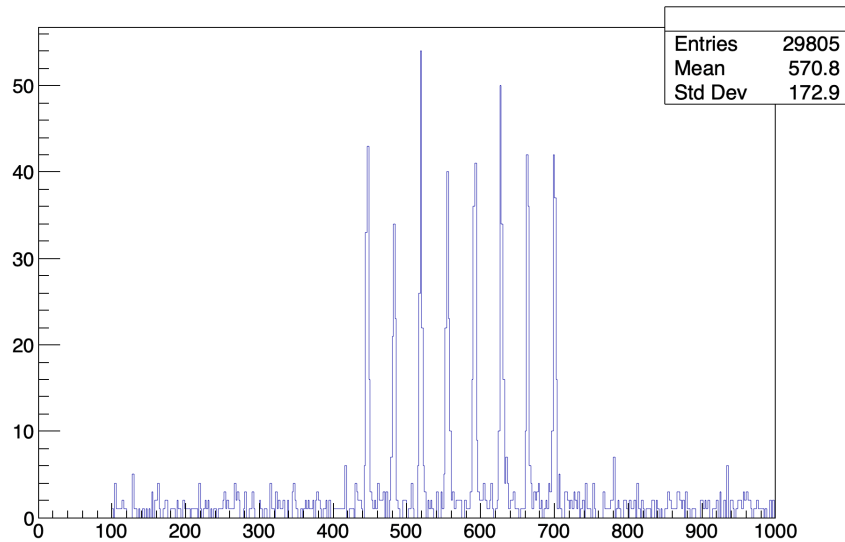


図 14: 最大値を取ったタイミングの分布

このように 8 つの bunch に対応した場所にピークが立つので、gauss フィッティングにより各ピークの位置を特定。それを元に、1spill の信号を 8 イベントの信号に分離し、信号の大きさ、イベント番号などをまとめて root ファイルに保存した。

各信号の大きさは、baseline から下側に振れた時の振れ幅を積分することで計算しており、上に振れた際は無視している。この時、ノイズやビーム幅の影響を考慮し、積分範囲は bunch の中心から 10sampling ほどに設定した。また、信号を分離する際、ビーム稼働状況のデータを参照し、ビーム稼働時と停止時のデータに分類して記録した。

#### 4.1.3 threshold の決定

粒子の反応を識別するための threshold の決定のため、ビーム停止時のデータを使用した。166024 イベントの信号の積分値をヒストグラムとし (図15)、gauss フィッティングを適用して  $5\sigma$  の値を閾値とした (今回は参考として  $4\sigma$  の結果も記載する)。PMT の個体差を考慮し、各 PMT に対し同じ方法で閾値を設定した。(図16)

### Integral {FileID==0}

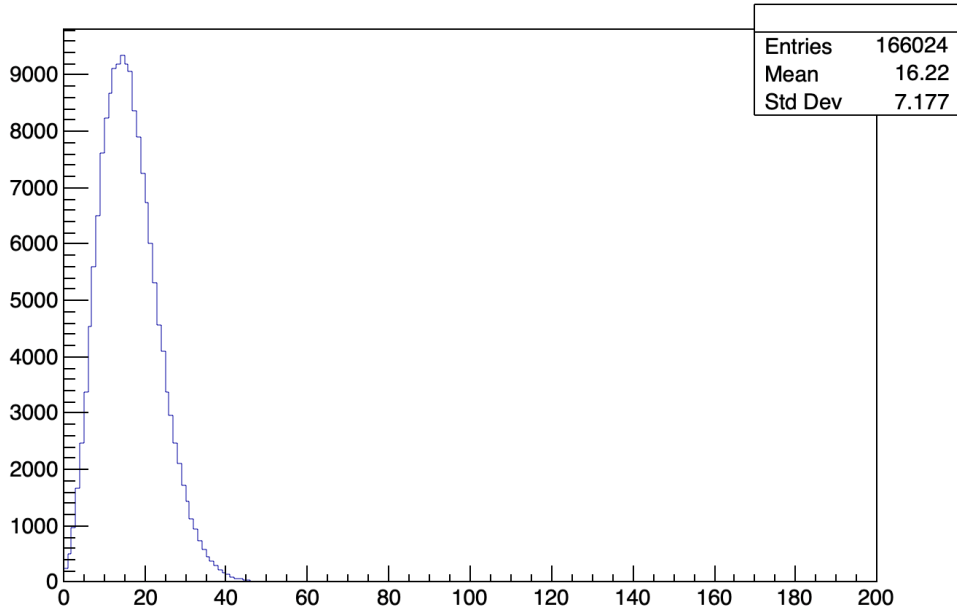


図 15: ノイズとなる信号のヒストグラム。これらを見捨てるような threshold をフィッティングで算出する。

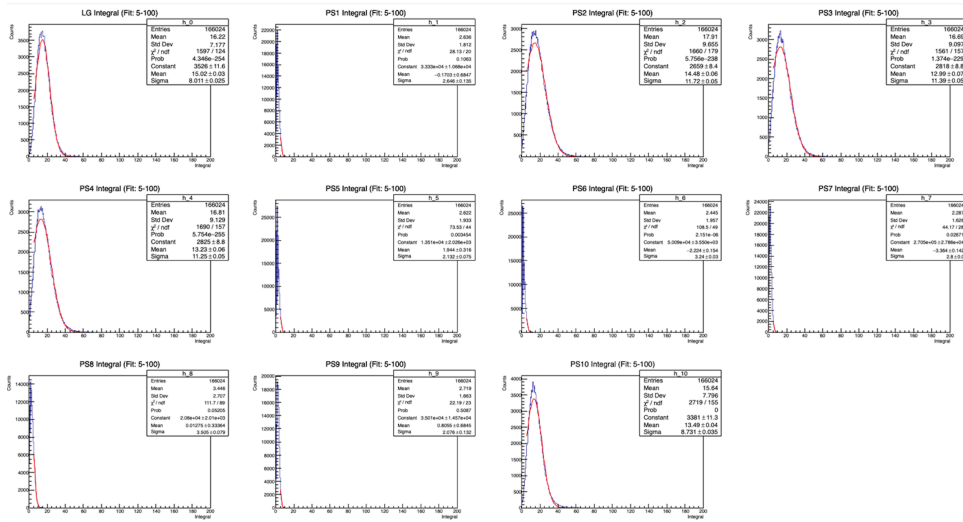


図 16: 各 PMT の threshold 決定のためのフィッティング

#### 4.1.4 イベントの判定

求めた閾値を使い、ビーム稼働時のデータ (952376 イベント) を解析。同じイベント番号を持つデータ 11 個を参照し、LG と PS1 枚のみが反応したイベントを CCQE 反応と判定。CCQE 反応のイベント数、反応した PS の位置を算出した。また、同じ閾値でビーム停止時のデータも解析し、CCQE 反応が 0 イベントとなるかどうかを確認した。

## 4.2 結果

課題研究 P2 の 2020 年度のレポートを参考にし、データ量やビームのエネルギー、標的の体積などから今回の実験における CCQE 反応の理論値を見積もると、98 イベント程度となった。

実験から算出した CCQE 反応のイベント数、反応した PS の位置の分布は以下のとおりである

Table 1: 解析結果

閾値条件	実験値	理論値	反応 PS の内訳
$5\sigma$	$35 \pm 6$	$98 \pm 10$	手前：16 (46%)、奥：19 (54%)
$4\sigma$	$51 \pm 7$	$98 \pm 10$	手前：31 (61%)、奥：20 (39%)

=== 2. LG + 1 Partner Coincidence Analysis ===			
Condition: (LG exists) AND (Total Hits == 2)			
Partner	Count	Rate(%)	Location
PS5	8	22.86	上奥
PS9	8	22.86	下奥
PS10	8	22.86	下手前
PS7	4	11.43	上手前
PS2	3	8.57	右手前
PS1	1	2.86	右奥
PS3	1	2.86	奥
PS4	1	2.86	手前
PS6	1	2.86	左奥
<b>Total LG+1 Events</b>	<b>35</b>	<b>100.00</b>	
--- Group Summary (Based on Location Name) ---			
<b>Contains 'Temaie' (手前)</b>	<b>16</b>		
<b>Contains 'Oku' (奥)</b>	<b>19</b>		

図 17: CCQE イベントの PS の反応位置の分布 ( $5\sigma$ )

=== 2. LG + 1 Partner Coincidence Analysis ===			
Condition: (LG exists) AND (Total Hits == 2)			
Partner	Count	Rate(%)	Location
PS10	11	21.57	下手前
PS9	9	17.65	下奥
PS5	7	13.73	上奥
PS4	6	11.76	手前
PS7	6	11.76	上手前
PS2	5	9.80	右手前
PS1	3	5.88	右奥
PS8	3	5.88	左手前
PS3	1	1.96	奥
<b>Total LG+1 Events</b>	<b>51</b>	<b>100.00</b>	
--- Group Summary (Based on Location Name) ---			
Contains 'Tema'e' (手前)	31		
Contains 'Oku' (奥)	20		

図 18: CCQE イベントの PS の反応位置の分布 ( $4\sigma$ )

PS の反応位置の分布については、後述のシミュレーションの結果と比較する。

### 4.3 誤差評価

統計誤差は候補数  $N$  に対して  $\sqrt{N}$  で評価した。系統誤差要因として、閾値設定、ベースライン推定、PS 読み出しの集約方式、検出効率評価の不定性がある。

## 5 考察

### 5.1 シミュレーション

結果を考察するためにシミュレーションと比較する。実験を再現するために Geant4 を用いて幾何構造を作成し、ニュートリノ反応で発生する粒子を仮想的に打ち込むシミュレーションを行った。

#### 5.1.1 geant4 の詳細設定

Geant4 内での設定は以下のように行った。

- 鉛ガラスジオメトリ： $11.2 \times 12.1 \times 36 \text{ cm}^3$  の直方体
- 鉛ガラスの密度・組成： $4.78 \text{ g/cm}^3$ 、Si 13.5%、O 29.4%、Pb 57.1%
- 鉛ガラス周りは厚さ 1 mm の Al
- プラスチックシンチレータ： $42 \times 70 \times 15$  の箱で厚さは 1 cm
- プラスチックシンチレータは荷電粒子が通ったらヒットと（検出率 100% 仮定）してカウント
- ニュートリノ反応は扱えないため NEUT という別のシミュレーション結果を用いた

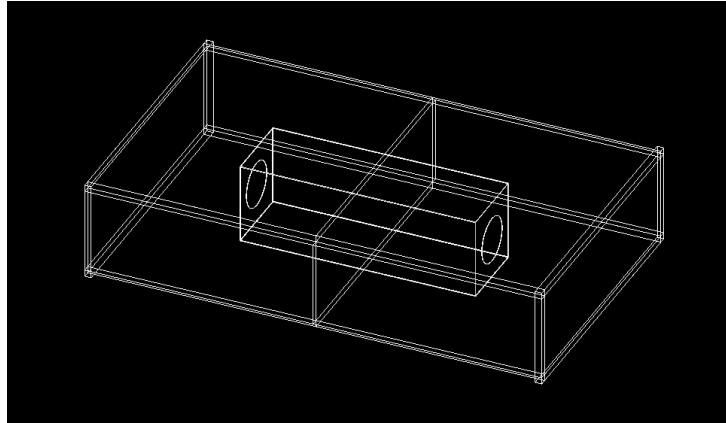


図 19: Geant4 シミュレーション設定の概略図

### 5.1.2 NEUT について

NEUT とはニュートリノ反応を扱うことができるシミュレーションである。

NEUT は私たちの PC に構築するのが困難なため、本実験では同フロアで行っている別実験に（WAGASI 実験、NINJA 実験）用いるための NEUT の既存のシミュレーションデータを流用した。これにより J-PARC のニュートリノビームフラックスを再現し、角度もおおよそ同様に行うことができている。別実験はオレンジ色の丸地点で行われている。

**シミュレーションの前提** しかし、別実験のほうでは鉛ガラスは用いていないため、鉄で反応した反応を取り出しその時の生成粒子とその放出方向を用いて反応数に対する各場所のプラスチックシンチレータの反応数の割合を用いることとした。質量数が反応の確率には大きくかわるが、散乱方向には大きくかわらないと仮定した。また反応場所は鉛ガラス内で一様ランダムと仮定した。理由はニュートリノの減衰に対して装置が十分薄いため。

### 5.1.3 シミュレーション結果

実際に 1 発打ったシミュレーションの画像が以下である。

各色の線はそれぞれ水色はチェレンコフ光、赤色はミューオン、紫色は陽子、の軌跡である。このシミュレーションを複数回繰り返して、ヒットしたシンチレータの位置を記録した。その結果は以下の通りになった。

上記の結果は鉄と反応したものを 4000 件ランダムに用いた結果である。本実験では鉛ガラスが反応したものかつ外側のプラスチックシンチレータが一枚反応したものを取り出しているため、シミュレーション結果もどれか 1 枚のみが鳴ったものを取り出している。

**実験結果との比較** シミュレーションでは前方（Front 側）に対応する割合を  $0.124 + 0.091 + 0.018 + 0.016 + 0.008 = 0.257$ 、後方（Back 側）に対応する割合を  $0.262 + 0.225 + 0.165 + 0.051 + 0.041 = 0.744$  とした。

実験結果は、 $4\sigma$  条件で手前 31/51 (0.608)、奥 20/51 (0.392)、 $5\sigma$  条件で手前 16/35 (0.457)、奥 19/35 (0.543) である。

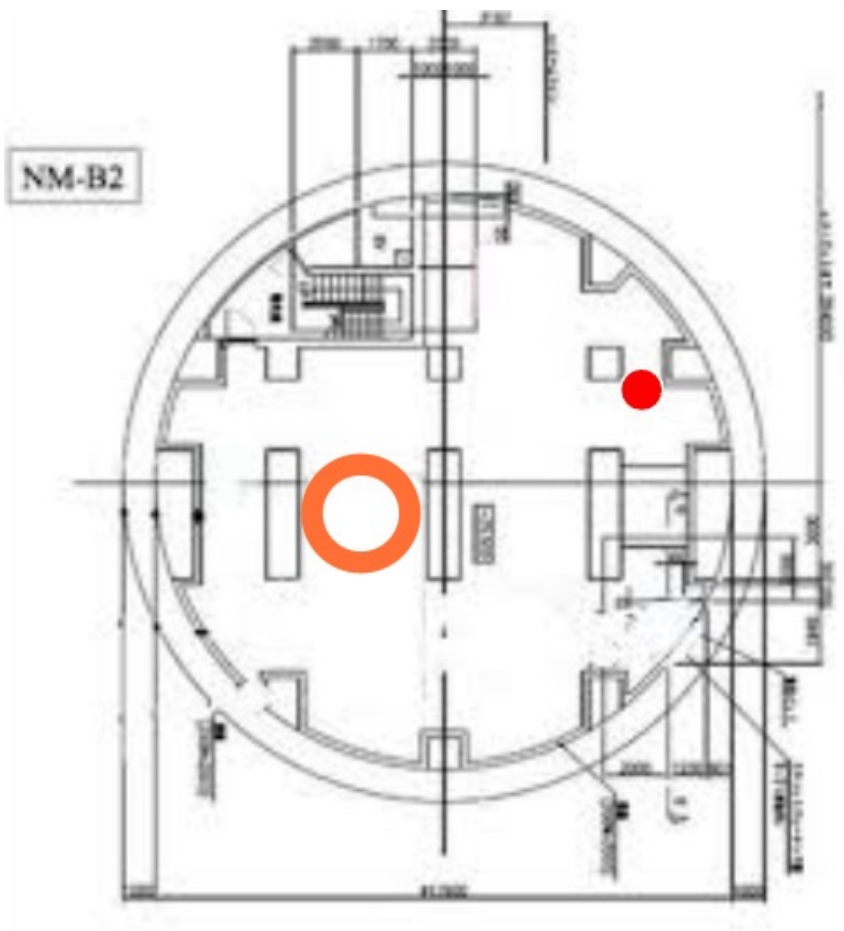


図 20: 別実験 (WAGASCI/NINJA) の位置 (NM-B2)

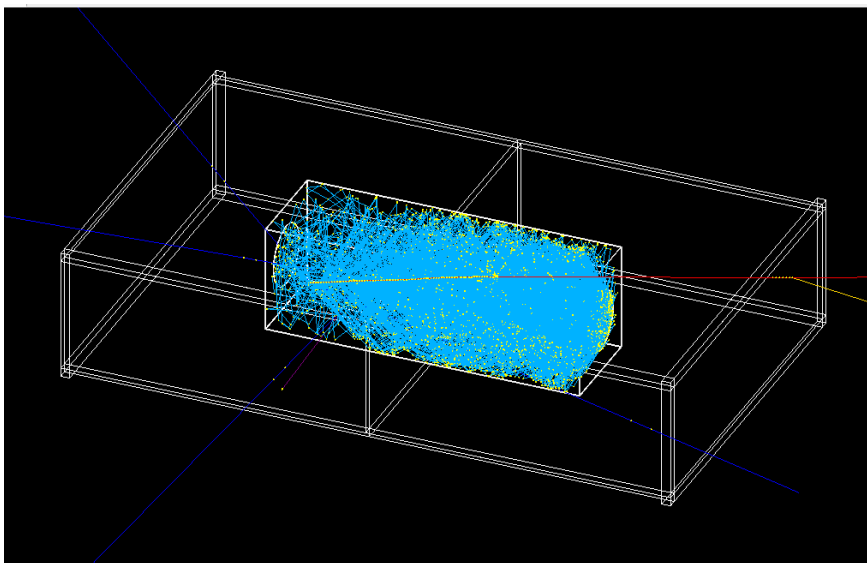


図 21: 1 イベントのシミュレーション表示

Table 2: 各 PS におけるシミュレーション反応数・統計誤差・割合

配置場所	イベント数	統計誤差 ( $\sqrt{N}$ )	割合	誤差
BottomBack	276	16.6	0.262	0.014
TopBack	237	15.4	0.225	0.013
Back	174	13.2	0.165	0.011
BottomFront	131	11.4	0.124	0.010
TopFront	96	9.8	0.091	0.009
LeftBack	54	7.3	0.051	0.007
RightBack	43	6.6	0.041	0.006
LeftFront	19	4.4	0.018	0.004
RightFront	17	4.1	0.016	0.004
Front	8	2.8	0.008	0.003
Sum	1055	32.5	—	—

Table 3: シミュレーション値と実験値の数値比較 (統計誤差付き)

指標	シミュレーション	実験 ( $4\sigma$ )	実験 ( $5\sigma$ )
前方割合	$0.257 \pm 0.015$	$0.608 \pm 0.068$	$0.457 \pm 0.084$
後方割合	$0.744 \pm 0.024$	$0.392 \pm 0.068$	$0.543 \pm 0.084$
前方/後方	$0.345 \pm 0.023$	$1.551 \pm 0.449$	$0.842 \pm 0.289$

## 5.2 結果の解釈

シミュレーションの結果よりビーム下流での反応数はビーム上流の反応数の三倍程度になることがわかった。これはニュートリノ反応の理論と一致するものである。しかし本実験では  $4\sigma$  では前方のほうが多く、 $5\sigma$  でも後方が多くなったとはいえ依然 1 対 1 程度になってしまっている。また割合とは別に反応数も理論より少なくなっている。これは検出器の感度が低すぎた、もしくはノイズとの区別がうまくいっていないことによると考えられる。

原因としては主に以下のようなものが考えられる。

- 各プラスチックシンチレータ threshold 設定がおかしく、下流側のデータを捨ててしまっている。
- 上流側のプラスチックシンチレータに想定より多くのノイズが乗っている。
- 下流のプラスチックシンチレータの検出率が事前測定ほど出ていない。
- そもそも検出率が低く、統計が少ない。
- 鉄と酸化鉛で散乱方向に差があり、酸化鉛だと後方散乱が増える可能性。
- シミュレーションのプラスチックシンチレーターにも検出率を加味する。
- 外からきて鉛ガラスで止まったミュオンを除去できていない。周辺で反応したミュオンは下流向きに飛ぶため、そのミュオンが止まると上流側に飛んだように見られてしまう。

## 5.3 今後の課題

前に上げた原因を解決するために、以下の課題を挙げる。

- 検出器を大きくする。  
統計量を増やして明確にする。
- プラスチックシンチレータの数を増やし、細分化する。より細かく軌跡を追うことで veto 性能を向上させる。
- 鉛ガラスの PMT を上流下流両方に付け、チェレンコフ光の光量の異方性で（主に上流からきて鉛ガラスで止まる）サンドミュオン veto 強化。
- threshold を決めるための解析手法の見直し。
- シミュレーションの設定をより実際の実験に近づける（台形柱を直方体に近似したのを直すなど）。
- NUET を自分たちの実験用に作ること。
- 各実験器具の手入れを見直し、検出効率やノイズの把握をより高精度におこなう。

このような点が挙げられる。本実験直前に鉛ガラスの PMT を壊してしまったのは悔やまれるが、それ以上に精度に疑問が残る結果となってしまった。

## 6 結論

LG+PS 検出器を用いて CCQE 候補事象を抽出し、 $4\sigma$  条件で  $51 \pm 7$ 、 $5\sigma$  条件で  $35 \pm 6$  事象を得た。一方で、事象分布の異方性および総反応数は期待と差が見られ、統計と系統の両面で改良が必要であることを確認した。

## 謝辞

指導教員の中家さん、木河さん、TA の大谷さん、青柳さんをはじめとする高エネルギー研究室の皆様、現地で協力いただいた伊東さん、ならびに J-PARC 利用でお世話になった KEK 関係者の皆様に深く感謝いたします。

## References

- [1] A. Author, B. Author, *Title of Paper*, Journal **12**, 34–56 (2020).
- [2] C. Author, *Book Title*, Publisher (2018).
- [3] 2020 年度課題研究 P2 レポート（ニュートリノ）[https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/P2/P2-20/P2\\_2020\\_report\\_neutrino.pdf](https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/P2/P2-20/P2_2020_report_neutrino.pdf).