

NINJA 実験 RUN9 で用いた
シンチレーショントラッカーの性能評価

横浜国立大学 理工学部
数物電子・情報系学科 物理工学 EP
学籍番号 1864258
守山 新星

2022 年 2 月 15 日

概要

T2K 実験は、茨城県東海村の J-PARC から岐阜県神岡町の Super-Kamiokande に大強度ニュートリノを打ち込む長基線ニュートリノ振動実験である。NINJA 実験では T2K 実験のニュートリノビームを原子核乾板で観測することでサブミクロンの位置分解能でニュートリノと鉄や水などの標的物質との反応を精密に測定する。しかし、原子核乾板は高い位置分解能を持つ一方で時間分解能を持たない。このため、NINJA 実験では、エマルションシフターとシンチレーショントラッカーの間で飛跡接続を行うことで原子核乾板に時間情報を付与する。

シンチレーショントラッカーは合計 248 本のプラスチックシンチレーターバーが縦と横それぞれ 4 層ずつ重なるように配置されており、バーに沿って波長変換ファイバーを装着し、その先端にフォトンカウンティングデバイス MPPC が接続された構造となっている。そこに MPPC 読み出し用モジュールである EASIROC module を用いることで DAQ システムを構築している。

本研究では 2021 年 4 月に実施した NINJA 実験 RUN9 の測定データをもとに解析を行なった。まず T2K のニュートリノビームデータに対し、シンチレーショントラッカーがどのくらいの効率でデータを取得できているかを確認した。その後、シンチレーショントラッカーの測定データから ADC や multi hit TDC の詳細を見ていき、トラッカーの性能評価を行なった。加えて、トラッカーとその下流にあるミューオン検出器 BabyMIND との飛跡接続の現状について報告する。

目次

第 1 章	ニュートリノ振動	4
1.1	ニュートリノ	4
1.2	ニュートリノ振動	5
第 2 章	T2K 実験	7
2.1	概要	7
2.2	ニュートリノビーム	7
2.3	Off-axis 法	8
2.4	前置検出器	9
2.4.1	INGRID	9
2.4.2	ND280	10
2.4.3	WAGASCI 検出器	11
2.4.3.1	Proton Module	11
2.4.3.2	Wall MRD	11
2.4.3.3	BabyMIND	12
2.5	後置検出器：スーパーカミオカンデ	12
第 3 章	NINJA 実験	13
3.1	目的	13
3.2	CCQE 反応と 2p2h 反応	13
3.3	検出器群	14
3.3.1	ECC	14
3.3.2	エマルジョンシフター	15
3.3.3	シンチレーショントラッカー	16
3.3.3.1	構造	16
3.3.3.2	検出原理	17
第 4 章	エレクトロニクス	18
4.1	MPPC	18
4.1.1	基礎特性	19
4.2	NIM	19
4.3	EASIROC module	20

第 5 章 NINJA 実験 RUN9 と解析の現状	22
5.1 DAQ システム	22
5.2 トラッカーのデータ取得効率と安定性	23
5.3 ダークパルスによる各チャンネルの点検	25
5.4 ゲインキャリブレーション	25
5.5 ADC データ	27
5.6 multi hit TDC データ	28
5.7 トラッカーと BabyMIND の飛跡接続	30
第 6 章 結論	34
参考文献	36

第1章

ニュートリノ振動

1.1 ニュートリノ

素粒子とは、自然界の物質を構成する最も基本的な構成要素である。これまでに 12 種類のものが見つかっており、以下の表のようにまとめられる。

表 1.1 物質の構成粒子

名称	第1世代	第2世代	第3世代	電気量
クォーク	u (アップ)	c (チャーム)	t (トップ)	$\frac{2}{3}e$
	d (ダウン)	s (ストレンジ)	b (ボトム)	$-\frac{1}{3}e$
	ν_e (電子ニュートリノ)	ν_μ (ミューイオンニュートリノ)	ν_τ (タウニュートリノ)	0
レプトン	e (電子)	μ (ミューイオン)	τ (タウ)	$-e$

私たちの身の回りのすべての物質はクォークとレプトンから構成されている。クォークは強い力の相互作用で結合する性質を持っているのに対し、レプトンは強い力で結合することはない。

ニュートリノはレプトンの一種であるが、電気的に中性であるため、その存在を観測することは容易ではない。ニュートリノは、 β 崩壊によるエネルギースペクトルが連続的になることを説明するために、検出できない軽い中性粒子があると推測され、1930 年に W.Pauli によってニュートリノが考案された。その後、1956 年に F.Reines によって反ニュートリノが発見され、1962 年に L.M.Lederman らによってニュートリノには電子型とミュー型の少なくとも 2 種類あることが分かった。さらに 1989 年に CERN の電子陽電子衝突型加速器 LEP(Large Electron Positron Collider) で、中性ベクトル Z^0 の崩壊を調べることで、ニュートリノが 3 種類あることが分かった。

1.2 ニュートリノ振動

素粒子の標準理論では、ニュートリノの質量は 0 であるとされているが、1962 年に坂田昌一・牧二郎・中川昌美によって、ニュートリノが質量を持ち、時間発展とともにフレーバーの種類が移り変わる現象が提唱および定式化された。この現象をニュートリノ振動という。

ニュートリノの質量が 0 でないとき、3 種類のフレーバーの固有状態 $|\nu_e\rangle$, $|\nu_\mu\rangle$, $|\nu_\tau\rangle$ とその質量の固有状態 $|\nu_1\rangle$, $|\nu_2\rangle$, $|\nu_3\rangle$ は異なり、以下のように線形結合で表すことができる。

$$\begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_\tau\rangle \end{pmatrix} = U_{PMNS} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \\ |\nu_3\rangle \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

ここで、 U_{PMNS} はポンテコルボ・牧・中川・坂田行列と呼ばれるユニタリ混合行列で、

$$\begin{aligned} U_{PMNS} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \quad (1.2) \end{aligned}$$

と記述される。ここで、 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ ($\theta_{ij} = \theta_{12}, \theta_{23}$ 及び θ_{13}) であり、 θ_{ij} は固有状態 $|\nu_i\rangle$, $|\nu_j\rangle$ の混合角、 δ_{CP} は CP 位相を表している。 $\delta_{CP} \neq 0, \pi$ のとき、CP 対称性は破られている。

次に、2 つのニュートリノフレーバー間、 ν_e と ν_μ の振動について考える。2 つのフレーバーの固有状態は質量の固有状態の線形結合で表すことができ、

$$\begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta |\nu_1\rangle + \sin \theta |\nu_2\rangle \\ -\sin \theta |\nu_1\rangle + \cos \theta |\nu_2\rangle \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

質量の固有状態 $|\nu_i\rangle$ ($i=1, 2$) の時間発展は、位置 x , 運動量 p_i , エネルギー E_i を用いて、

$$|\nu_i(t)\rangle = |\nu_i(0)\rangle e^{-i(E_i x - p_i t)} \quad (1.4)$$

となる。これを ν_e について書くと、

$$|\nu_e(t)\rangle = \cos \theta |\nu_1(0)\rangle e^{-i(E_1 x - p_1 t)} + \sin \theta |\nu_2(0)\rangle e^{-i(E_2 x - p_2 t)} \quad (1.5)$$

さらに相対論的に考えて、 $m_i \ll p_i$ かつ $E_i \sim p_i$ とすると、

$$p_i = \sqrt{{E_i}^2 - {m_i}^2} \sim E_i - \frac{{m_i}^2}{2E_i} \quad (1.6)$$

と近似することができる。

ここで、2つのニュートリノフレーバーの質量固有状態の2乗質量差を $\Delta m^2 = {m_1}^2 - {m_2}^2$ 、エネルギーを $E = E_1 = E_2$ 、ニュートリノの飛来距離を $L = x = t$ とすると、式(1.5)は以下のようになる。

$$|\nu_e(t)\rangle = \cos\theta |\nu_1(0)\rangle e^{-i\frac{{m_1}^2 L}{2E}} + \sin\theta |\nu_2(0)\rangle e^{-i\frac{{m_2}^2 L}{2E}} \quad (1.7)$$

したがって、 $t=0$ でフレーバー ν_e だったものが、 L だけ飛来した後にフレーバー ν_μ に変化する振動確率 $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$ は、

$$\begin{aligned} P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) &= |\langle \nu_\mu | \nu_e \rangle|^2 \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2}{4E} L \right) \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 [\text{eV}^2]}{E [\text{GeV}]} L [\text{km}] \right) \end{aligned} \quad (1.8)$$

となる。同様に、振動確率 $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$ は、

$$\begin{aligned} P(\nu_e \rightarrow \nu_e) &= 1 - P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) \\ &= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 [\text{eV}^2]}{E [\text{GeV}]} L [\text{km}] \right) \end{aligned} \quad (1.9)$$

となる。そして式(1.8)から、混合角 θ と2乗質量差 Δm^2 がともに0でない時にニュートリノ振動が起きることが分かる。

現実的にはニュートリノフレーバーは3種類存在し、その場合の振動確率は以下のような。

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j}^3 \text{Re}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L \right) \\ &\quad + 4 \sum_{i>j}^3 \text{Im}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin \left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L \right) \cos \left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L \right) \end{aligned} \quad (1.10)$$

第2章

T2K 実験

2.1 概要

T2K(Tokai to Kamioka) 実験とは、茨城県那珂郡東海村の J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) 加速器で生成したニュートリノビームを、295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡町のスーパーカミオカンデで観測することによって、長距離飛来中にニュートリノ振動が起こるかを測定する素粒子実験である(図 2.1)。人工的にビームの極性を変えることができ、 ν_μ から ν_e への振動パラメータの精密測定、ニュートリノの CP 対称性の破れの検証を目的としている。

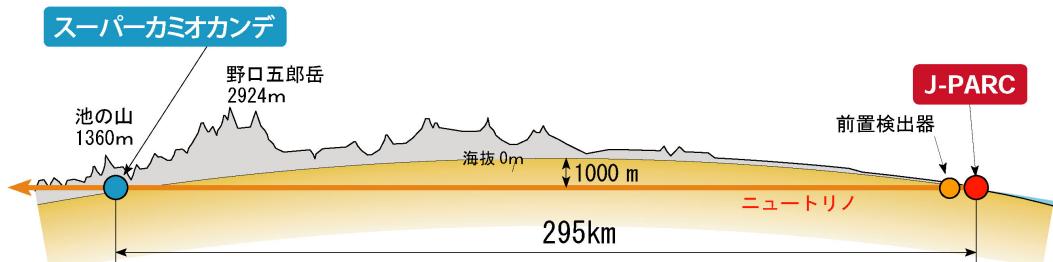


図 2.1 T2K 実験 [1]

2.2 ニュートリノビーム

J-PARC はニュートリノビームを 3 種類の加速器 LINAC(LINear ACcelerator), RCS(Rapid Cycling Synchrotron), MR(Main Ring) で生成する実験施設である(図 2.2)。

まず、LINAC で負水素イオン H^- を 400 MeV まで加速し陽子に変換する。その後、RCS で 3 GeV まで加速されて陽子ビームとなり、MR でさらに 30 GeV まで加速される。加速された陽子は 2.48 s の周期のスピンでグラファイト標的に打ち込まれる。陽子ビームの各スピンは 4.1 μ s の時間幅で、8 つのバンチを持つ構造となっている。グラファイト標的に衝突することにより、多くの 2 次粒子が作られる。このうち正電荷を持つ π 中間子を 3 台の電磁ホーンで前方に収束し、標的から下流 94 m のディケイボリュームを通過する間に以下の

ようにミューオンとミューニュートリノの対に崩壊する。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (2.1)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2.2)$$

電磁ホーンの極性を変えることにより、収束させる π 中間子の電荷を変更、すなわち選択的にニュートリノビームまたは反ニュートリノビームを取り出すことができる。

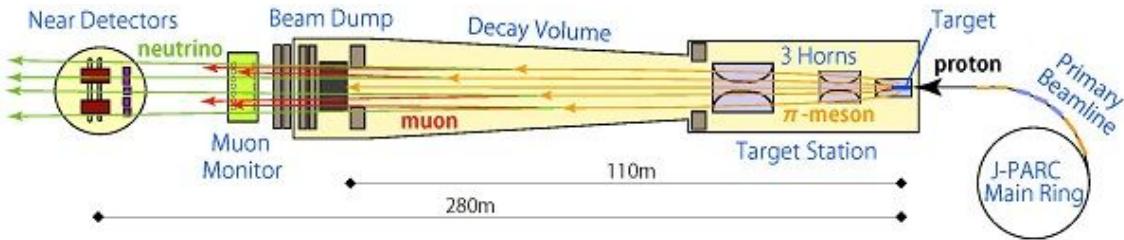


図 2.2 ニュートリノビームライン [2]

2.3 Off-axis 法

Off-axis 法は、ニュートリノビームラインの軸を検出器の方向から数度ずらすことにより、シャープなニュートリノのエネルギー分布を得る方法(図 2.3)で、T2K 実験は世界で初めてこの手法を適用した。T2K 実験では Off-axis 角 2.5° を採用しており、スーパークミオカンデに到達するビームのエネルギーを、ニュートリノ振動の確率が最も高くなるようにしている。図 2.4 に予想されるニュートリノ振動の確率(上段: $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$, 中段: $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$)と 3 つの Off-axis 角で得られるニュートリノビームのエネルギースペクトラム(下段)を示す。図を見ると、0.6 GeV 付近のエネルギー(Off-axis 角 2.5°)の時に、振動確率が上段で最小、中段で最大となっていることが分かる。

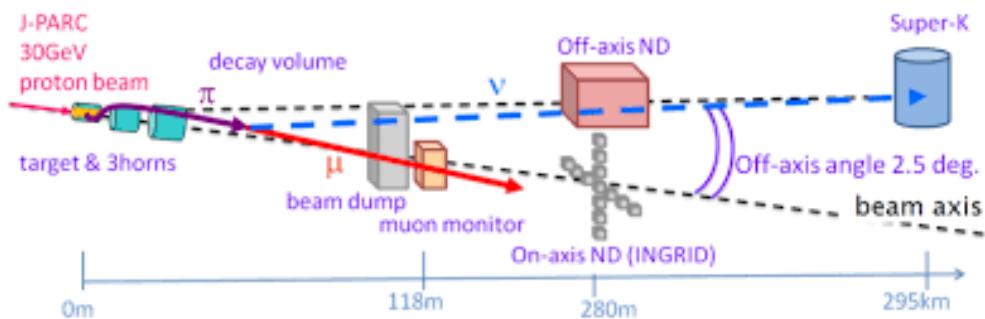


図 2.3 Off-axis 法の概要 [3]

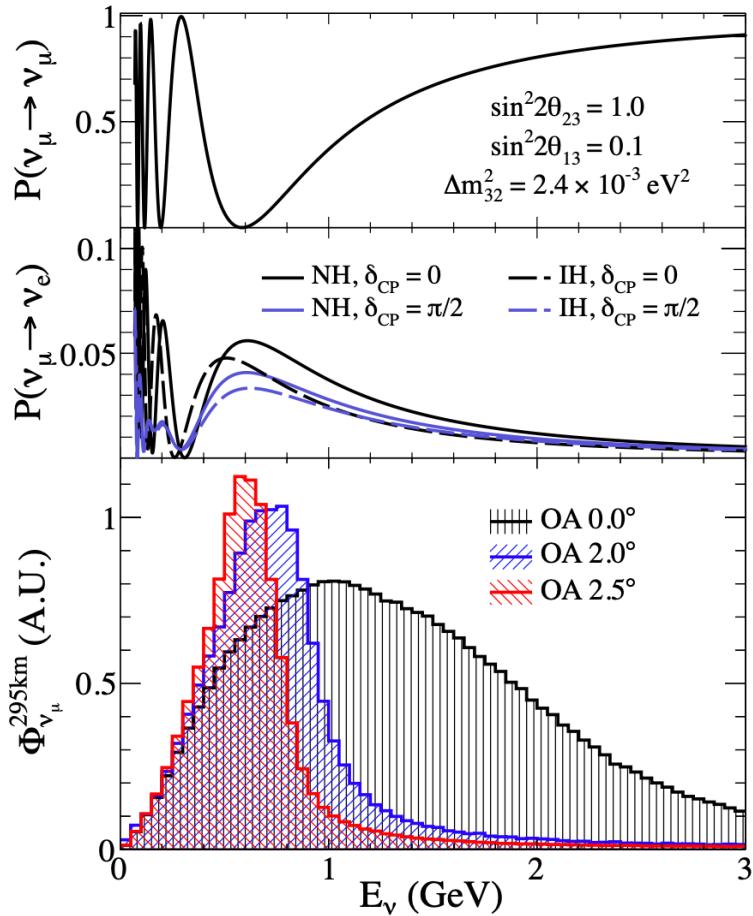


図 2.4 予想されるニュートリノ振動の確率 (上段: $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$, 中段: $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$)
 3 つの Off-Axis 角で得られるニュートリノビームのエネルギースペクトラム (下段) [4]

2.4 前置検出器

前置検出器は、グラファイト標的から 280 m 下流にある検出器群のことであり、ビーム軸上に設置された INGRID(On-axis 検出器) とビーム軸から Off-axis 角 2.5° だけ離れた軸上に設置されている ND280(Off-axis 検出器) から構成されている (図 2.3).

2.4.1 INGRID

INGRID(Interactive Neutrino GRID) 検出器は計 14 個の検出器モジュールが十字に配置された On-axis 検出器である (図 2.5). 検出器中の鉄が標的となってニュートリノ反応を直接検出することにより、ニュートリノビームの方向と強度をモニターする.

2.4.2 ND280

ND280(Near Detector 280) は後置検出器であるスーパーカミオカンデ方向かつ電磁石の中に配置された Off-axis 検出器である(図 2.6). ニュートリノ振動が起こる前のニュートリノフラックスとエネルギースペクトルの測定を行なう.

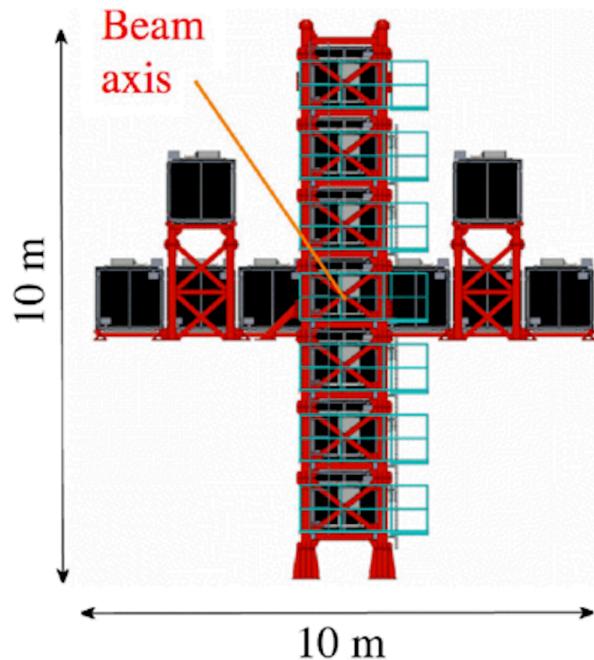


図 2.5 INGRID [1]

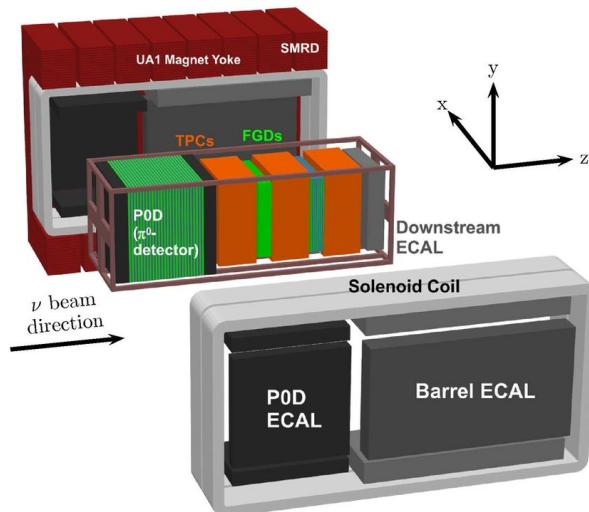


図 2.6 ND280 [1]

2.4.3 WAGASCI 検出器

WAGASCI(WAtter Grid And SCIntillator) は Off-axis 角 1.5° の場所に配置された検出器である。プラスチックシンチレータとその内部を水で満たし独特な 3 次元構造を持つ WAGASCI Module が 2 つ、それらの間に配置されている Proton Module、両側面にニュートリノ反応由来のミューオンを検出する Wall MRD(Muon Range Detector)、下流側には Baby MIND(Magnetized Iron Neutrino Detector) が設置されている(図 2.7)。水とプラスチック反応断面積比を高精度で測定することにより、T2K 実験の系統誤差を大きく削減することを目的としている。

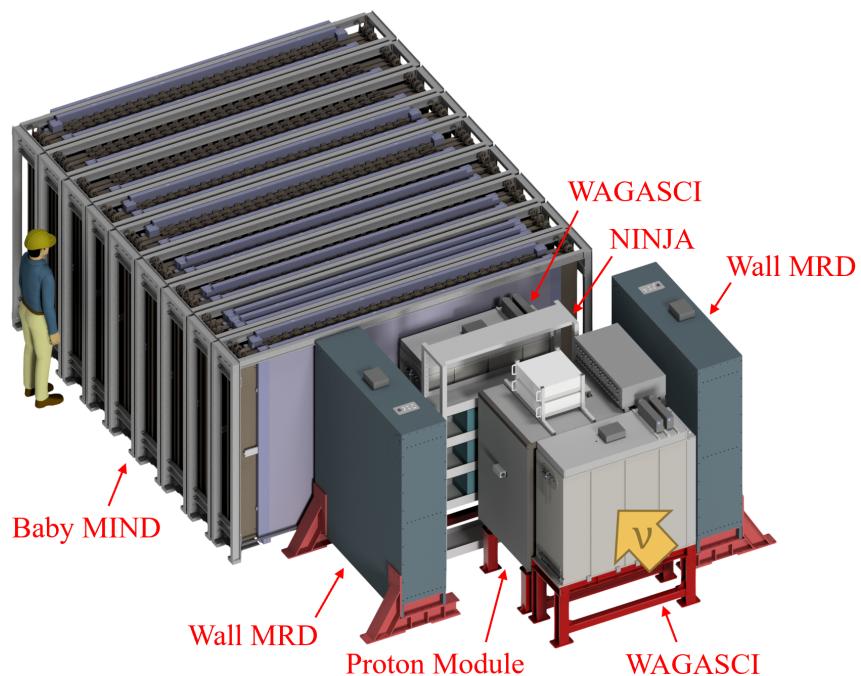


図 2.7 WAGASCI 検出器

2.4.3.1 Proton Module

Proton Module は、その大部分がプラスチックシンチレータ層で占められた炭化水素 (CH) 標的検出器で、ビーム軸方向中心に設置されている。その名の通り、飛跡の短い陽子の飛跡も検出でき、ニュートリノ反応検出に適している。

2.4.3.2 Wall MRD

Wall MRD は、WAGASCI Module の両側面に配置された MRD である。プラスチックシンチレータ層と鉄層からなり、WAGASCI Module 内で起きたニュートリノ反応による荷電粒子のうち大角度方向に飛んだも

のを捉え、粒子識別と方向同定、運動量測定を担う。

2.4.3.3 BabyMIND

BabyMIND は、WAGASCI 検出器群で下流側に設置されている MRD である。内部に鉄コア磁石を搭載しており、磁場をかけて荷電粒子ミューオンの曲がる方向を見ることで電荷の正負を識別している。電荷識別は、ニュートリノ反応と反ニュートリノ反応を区別するのに必要とされる。

2.5 後置検出器：スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデは、岐阜県飛騨市神岡町旧神岡鉱山内に設置された、東京大学宇宙線研究所が運用する世界最大の水チレンコフ宇宙素粒子観測装置である（図 2.8）。直径 39.3 m、高さ 41.4 m のタンクには約 13,000 本の光電子増倍管（内水槽 11,129 本、外水槽 1,885 本）が取り付けられ、5 万 t の水を標的として用いている。水標的と衝突し、ニュートリノから出た荷電粒子が水中の光の速度よりも速くなると、チレンコフ光が円錐形に放出される。この光を光電子増倍管で観測することで、荷電粒子のエネルギー、進行方向、位置、粒子の種類を決定する。また、電子ニュートリノによるイベントの場合、電子は水中で電磁シャワーを起こすためチレンコフ光のリングはぼやける一方、ミューオンニュートリノによるチレンコフリングは綺麗に観測される。この違いを用いて、荷電粒子を生成したニュートリノが μ か e かを 99% の精度で識別している。

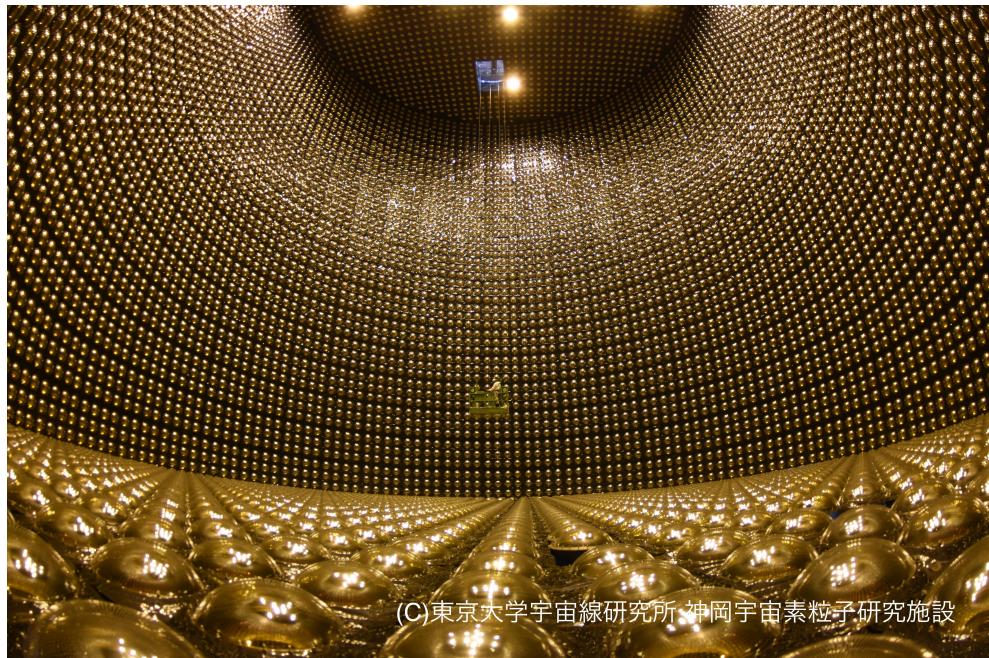


図 2.8 スーパーカミオカンデ内部 [5]

第3章

NINJA 実験

3.1 目的

NINJA(Neutrino Interaction research with Nuclear emulsion and J-PARC Accelerator) 実験はサブミクロンという高い位置分解能をもった原子核乾板を用いて、ニュートリノと鉄や水などの標的物質との反応を精密測定する実験である [6]. 特徴として、原子核乾板を用いることで 2p2h 反応由来の低運動量 (~ 200 MeV/c) の陽子を観測できることにある。NINJA 実験は 2p2h 反応を精密に測定することで、ニュートリノ-原子核反応の系統誤差を削減することを目的としている。

3.2 CCQE 反応と 2p2h 反応

ニュートリノは直接観測することができないため、ニュートリノと原子核の反応で生成した粒子を間接的に観測している。そのため、ニュートリノと原子核すなわち核子との反応についての理解が必要である。T2K 実験においては、ニュートリノエネルギー領域が 1 GeV 付近であるため、CCQE(Charged Current Quasi Elastic) 反応が主である。図 3.1 に CCQE 反応のダイアグラムを示す。 n は中性子、 p は陽子である。CCQE 反応は 2 体反応で、標的核子が静止していれば、荷電レプトンの情報のみでニュートリノエネルギーの再構成が可能である。

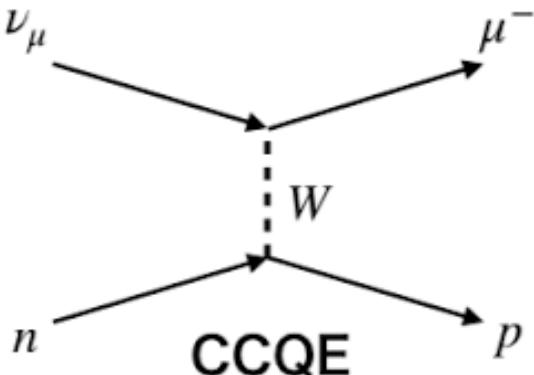


図 3.1 CCQE 反応のダイアグラム

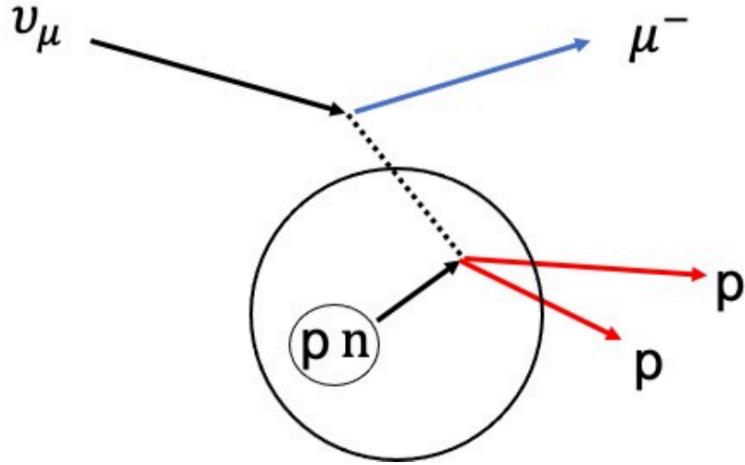


図 3.2 2p2h 反応のダイアグラム

しかし, CCQE 反応とよく似た反応に 2p2h 反応がある. 図 3.2 にダイアグラムを示す. CCQE 反応との相違点は, 2p2h 反応では陽子が 2 個生成されることである. したがって, 検出器が陽子を検出できないと, CCQE 反応との区別ができるず, 系統誤差につながる. また, 2p2h 反応由来の陽子は運動量が低く, これを詳細に観測することが不定性の抑制につながる.

3.3 検出器群

NINJA 実験で用いられた検出器は ECC, エマルションシフター, シンチレーショントラッカーの主に 3 つに分けられる. この節では, 各検出器について説明していく.

3.3.1 ECC

ECC(Emulsion Cloud Chamber) は原子核乾板フィルムと標的物質を交互に重ね合わせた構造の検出器である(図 3.3). 標的物質としては鉄や水が使われ, 今回のランでは重水を標的物質として用いた.

ECC にニュートリノが入射し, 標的物質と反応して生成した荷電粒子が原子核乾板に痕跡を残す. それを現像することによって飛跡を読み取ることができる. また, サブミクロンほどのもの位置分解能を持つ. さらに, 水 ECC より下流の方では, 鉄 ECC と SS(Special Sheet) がある. 鉄 ECC は運動量測定に特化しており, SS では距離を作ることで角度分解能を上げている.

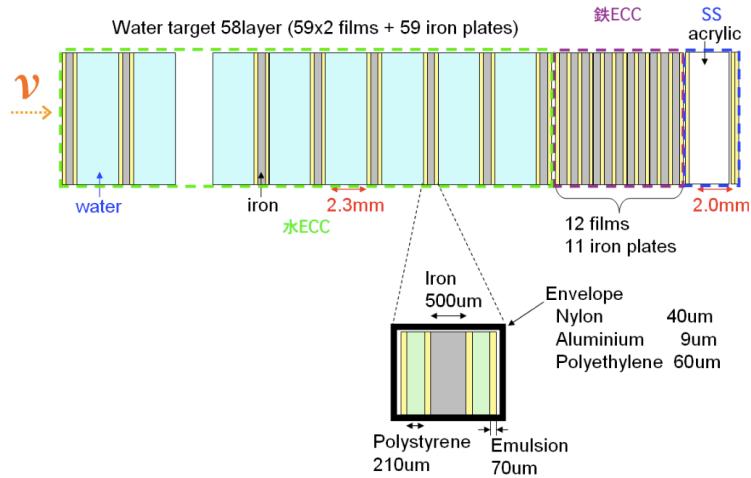


図 3.3 ECC の構造 [7]

3.3.2 エマルションシフター

原子核乾板はサブミクロンほどの位置分解能を持ちながら、時間分解能を持たない。そのため、周辺の検出器と飛跡接続を行なうには時間情報を付与する必要がある。NINJA 実験ではエマルションシフター（図 3.4）と後述するシンチレーショントラッカーを用いて、ECC に記録された飛跡の位置情報に時間情報を付加する。

エマルションシフターは複数枚の原子核乾板を異なる周期で動かし、その間で飛跡接続を行なうことで時間情報を付与する検出器である。NINJA 実験では、4 時間周期と 4 日周期で往復する原子核乾板とその間に固定された原子核乾板を配置した構造となっている。この 3 つの間で飛跡接続を評価することにより、サブミクロンの位置分解能と 4 時間程度の時間分解能を得ることができる。



図 3.4 エマルションシフター [7]

3.3.3 シンチレーショントラッカー

次に本研究の要であるシンチレーショントラッカーについて説明する。

3.3.3.1 構造

シンチレーショントラッカーは、合計 248 本のプラスチックシンチレータ（図 3.5）がその大部分を占めている。これを縦と横それぞれ 4 層ずつ重なるように配置している（図 3.6）。なお、横向きが Y 軸、縦向きが X 軸に対応している。図 3.5 に示した緑色の線は波長変換ファイバーを装着するための溝である。ファイバーはシンチレーション光を吸収し、さらに減衰しにくい長波長の光を再発光する。この光が全反射しながらファイバーの端まで到達し、後述する半導体光検出器 MPPC によって光量を検出する（図 3.7）。

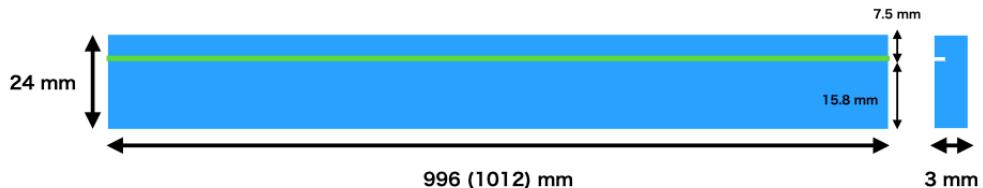


図 3.5 プラスチックシンチレータ [7]



図 3.6 横向きに配置されたプラスチックシンチレータ [8]



図 3.7 シンチレータの先から伸びた波長変換ファイバーが MPPC に接続されている。[8]

3.3.3.2 検出原理

先述の通り、シンチレーショントラッカーは、プラスチックシンチレータの光をファイバーを通して MPPC に送る。そこからさらに、後述する EASIROC Module を使うことで、どのプラスチックシンチレータが発光したのかを特定する。そして、発光したシンチレータの位置を元に飛跡の再構成を行なう。

今回の実験で用いたシンチレーショントラッカーは図 3.8 のような配置となっている。このようにプラスチックシンチレータをずらして配置することにより、どの層にヒットがあって、どの層にヒットがないのかという情報を活用することにより、シンチレータの数を減らしながらも高い位置分解能を実現することが可能になる。

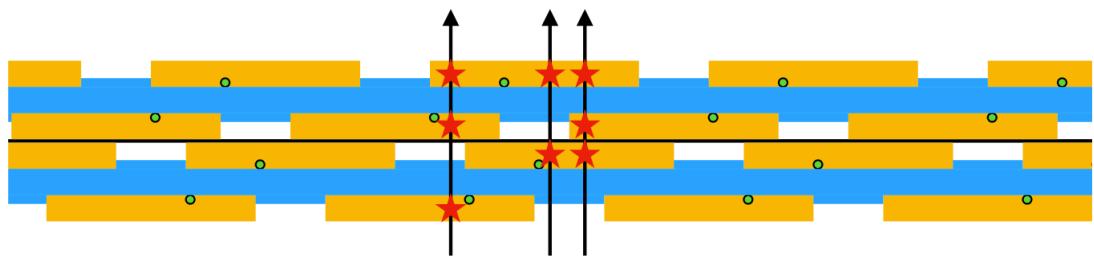


図 3.8 シンチレーショントラッカーの配置 [7]

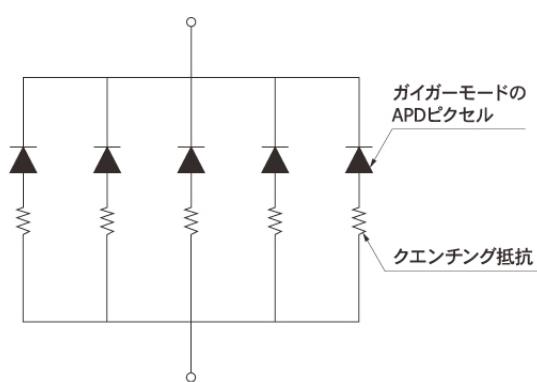
第4章

エレクトロニクス

この章では、本実験で用いたエレクトロニクスについて説明する。

4.1 MPPC

MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) [9] は、浜松フォトニクスによって開発されたフォトンカウンティング(光子計測)デバイスのことである。ガイガーモードの APD(Avalanche Photo Diode)とクエンチング抵抗の組み合わせを1ピクセルとして、多数のピクセルを電気的接続した構造をしている。APDの逆電圧を降伏電圧以上にするとガイガーモードと呼ばれる状態になり、1つのフォトンの検出でも大きな出力を得ることができ、ガイガー放電は素子内部の電場が保たれる間は放電が続く。この放電を止めて次のフォトンを検出するために、APDとクエンチング抵抗を直列に接続する(図4.1)。そうすることでAPDからの出力電流が抵抗を通して電圧降下を起こし、素子内部の電場が低下することで放電が止まる。



KAPDC0029JA

図 4.1 MPPC の構造 [9]

4.1.1 基礎特性

次に, MPPC の基礎特性について述べる.

ゲイン

1 ピクセルが 1 フォトンを検出して発生したパルスの電荷量 Q を素電荷 e で割った値をゲインと定義する.

$$\text{Gain} = \frac{Q}{e} \quad (4.1)$$

Q は逆電圧 V_R と降伏電圧 V_{BR} に依存し, 次のように表される.

$$Q = C \times (V_R - V_{BR}) \quad (4.2)$$

C は 1 ピクセルの容量を示す.

式 (4.1), (4.2) から, ピクセル容量が大きいほど, 逆電圧が高いほど, ゲインが大きくなることが分かる.

ダークパルス

MPPC では光子だけでなく, 熱電子によってもパルスが発生する. このパルスをダークパルスといい, 1p.e. と同等まで増倍されるため, フォトンによるパルスと区別できない. また, 観測されたダークパルスの数をダークカウントといい, 1 秒あたりのダークパルスの数をダークカウントレートという.

クロストーク

あるピクセルで電子雪崩が起きた際に, その周囲のピクセルにも侵入してしまい, そこでも電子雪崩を引き起こす現象のことである. これにより, 実際に入射した光子よりも多い数の光子が入射したように見える.

4.2 NIM

NIM(Nuclear Instrument Modules) はアメリカの原子力委員会によって制定された規格の回路である. NIM モジュールは 8 種類に大別でき, それぞれのモジュールが個々の性質や目的を持っている. また NIM の論理信号の電圧の規格は -0.8 V が YES 信号, 0 V が NO 信号となっている.

本実験で用いたモジュールの機能を以下の表 4.1 にまとめた.

表 4.1 本実験で用いた NIM モジュールの機能

モジュール名	機能
EASIROC module	MPPC の信号を読み出す(最大 64ch).
Gate Generator	YES 信号が入力されると, 設定した遅延時間・時間幅の YES 信号を出力.
Fixed Delay	YES 信号が入力されると, 決められた時間だけ遅延させて出力.
Fan I/O	各モジュールの論理和 OR をとって YES 信号を出力.
Coincidense	各モジュールの論理積 AND をとって YES 信号を出力.
Discriminator	YES 信号の整形.

4.3 EASIROC module

EASIROC(Extended Analogue Silicon-pm Integrated Read Out Chip) はフランスのオメガグループが開発した MPPC 読み出し用 ASIC(Application Specific Integrated Circuit) であり, 1つのチップで 32 チャンネルの MPPC を読み出すことが可能である. EASIROC module はこの ASIC チップを 2 枚搭載しており, 最大 64 チャンネルの MPPC の信号を読み取ることができる. 以下に EASIROC module の写真 (図 4.2) と回路概略図 (図 4.3) を載せる.



図 4.2 EASIROC module の写真 [10]

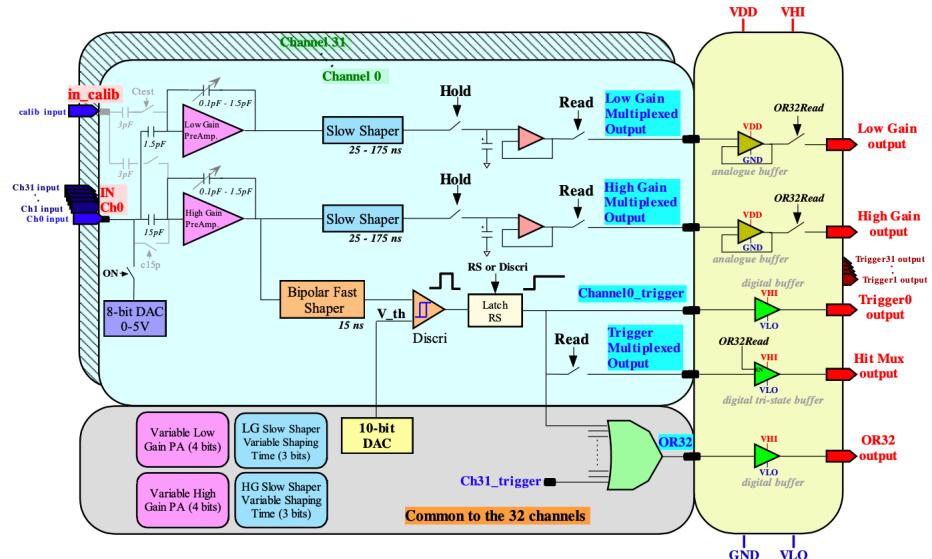


図 4.3 EASIROC module の ASIC チップの回路概略図 [10]

今回用いた EASIROC module では、電圧を測定する波高検出型 ADC(Analog to Digital Converter)と呼ばれる方式で、MPPC の信号をアナログ信号からデジタル信号に変換する。また、もう一つの方式に、ある時間幅で波形を積分して電荷を測定する電荷積分型がある。さらに、multi hit TDC(Time to Digital Converter)と呼ばれる機能も持っており、ADC とは独立して各チャンネルの立ち上がり時間(Leading time)と立ち下がり時間(Trailing time)を記録できる。

次に EASIROC module が MPPC の信号を読み出す流れについて説明していく。まず、波高検出型 ADC は増幅率の異なる high gain と low gain の 2 種類があり、入力された MPPC の信号はそれぞれの ADC に 10:1 に分配される。high gain の信号はさらに fast shaper と slow shaper の 2 つの整形器に分けられる。fast shaper では時間測定するために 15 ns の立ち上がり時間で整形され、さらに Discriminator に送られる。slow shaper の立ち上がり時間は、25~175 ns の範囲で調整可能である。この Discriminator を通った後に TRIG 信号が発行される。ここで、波高を検出する際、自動的にピークを検出することはできないため、ピークを一定時間保持する必要がある。これをピークホールドという。発行された TRIG 信号を、時間調整することでピークホールドをするための HOLD 信号を生成する。ホールドのタイミングが違うと正しく電荷を測定することができないため、使用者自身の手で適切に調整をする必要がある。この調整には HOLD 信号に Delay をかける方法を用いる。先述の multi hit TDC は HOLD 信号が入力されてからレンジ 4096 ns で TSTOP 信号が入力されるまで記録を行なう。ADC はデータ取得からデータ転送の間に数 μ s を要するため、その間の MPPC の信号のデータを読み取ることができないが、multi hit TDC はこの間も独立して測定を行なうことができる。

以下の表 4.2 は本実験で用いた EASIROC module の信号である。

表 4.2 本実験で用いた EASIROC module の信号

信号の種類	信号名	機能
デジタル入力信号	HOLD	信号が入力されるとピークホールドを行なう。
	ACCEPT	ADC が次のデータを取ることを許可する信号。
	TSTOP	multi hit TDC の時間基準点。
デジタル出力信号	TRIG	Discriminator から発行された各チャンネルの MPPC 信号がトリガー条件を満たしていたら、トリガー信号を出力する。 この信号を適切に遅延させて各デジタル入力信号に入力する。
	SYNC OUT	複数の EASIROC module を同期させる。
アナログ出力信号	HG 1/2	ASIC の slow shaper を通り、ピークホールドされた後の high gain 信号を出力。

第 5 章

NINJA 実験 RUN9 と解析の現状

2021 年 4 月に J-PARC の NM 棟にて NINJA 実験 RUN9 が実施された。ここでは、RUN9 で設定したシンチレーショントラッカーの DAQ(Data AcQuisition) システムとその解析の現状について述べる。

5.1 DAQ システム

シンチレーショントラッカーでは、X, Y 層のそれぞれ 2 台、計 4 台の EASIROC module を用いる。それらを同時に駆動するための DAQ システムについて説明する。図 5.1 に DAQ システムのフローチャートを載せる。

まず、GATE BEAM の信号をビームトリガー信号といい、ビームトリガー信号は時間幅 6 μs 、周期 2.48 s のタイミングで発行され、ニュートリノビームとスピルタイミングを同期している。トラッカーの DAQ システムはそのスピルタイミングに連動している。ビームトリガー信号は 31 μs 遅延させて入力する。この遅延時間の間に MPPC からのトリガー信号があればその信号を、なければビームトリガー信号を GATE DUM. に送り、さらに 5 μs だけ遅延させたダミートリガーをデータとして取得する。MPPC からのトリガー信号は X 層と Y 層のトリガー信号の AND 信号によって生成されたものである。ここで、ダミートリガーを 5 μs 遅延させているのは、ニュートリノビームの時間幅 4.1 μs より後に来るようになるためである。このようにダミートリガーがビームトリガーの最後に来るようになると、各スピルにおいて必ずデータを取得することができる。MPPC からの信号とダミートリガーは FAN BEAM に送られる。COIN ALL にはビームトリガー信号と FAN BEAM の OR 信号、さらに 4 台の EASIROC module の同期のために Y1 モジュールの SYNC OUT 信号が送られる。その後 COIN ALL の AND 信号が Gate Generator である GATE HOLD/TSTOP/ACCE. に送られるが、ここで各モジュールで遅延時間を適切に設定する必要がある。GATE HOLD ではピークホールドを正しく行なうためにトリガーが発行されてすぐに、GATE TSTOP では multi hit TDC のレンジ 4096 ns の時間内ということを考慮して約 4080 ns に設定する。ACCEPT 信号は、次の周期のビームトリガーより前に送ればよいので、4096 ns より十分に長く、次のビームトリガーが来る前の 100 ms に設定した。そして ACCEPT 信号が送られて初めて EASIROC module はデータを取得する。

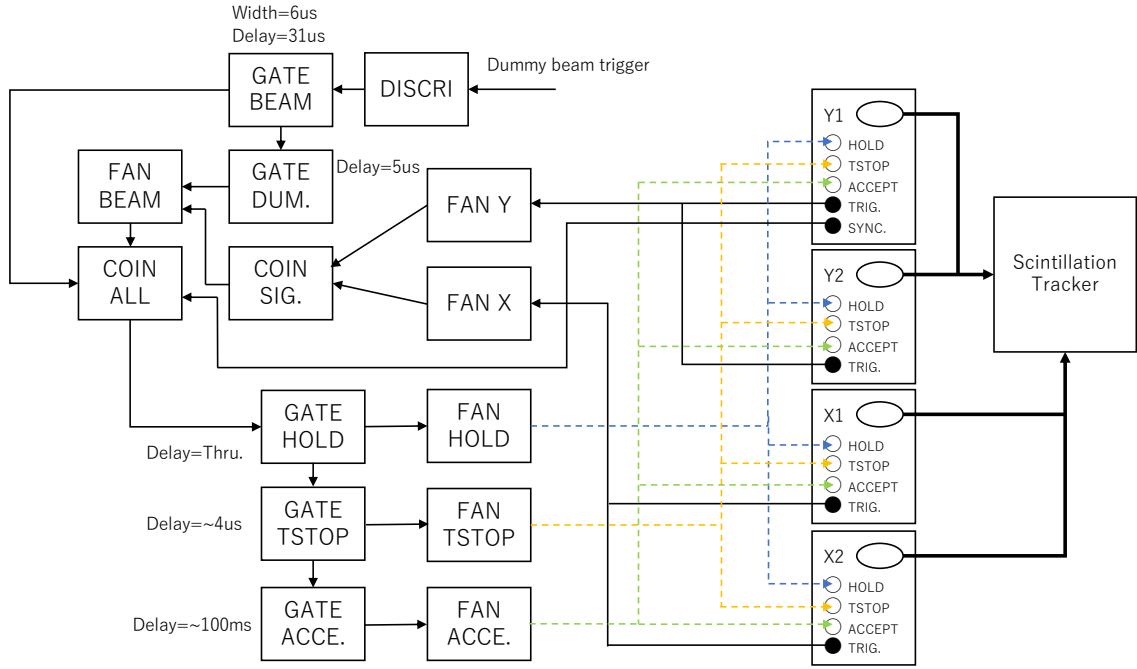


図 5.1 DAQ システム

5.2 トラッカーのデータ取得効率と安定性

トラッカーはビームと同期しており、2.48 s に 1 回データを記録し、その時に時間情報となる unixtime も取得している。一方で、T2K のニュートリノビームの unixtime や P. O. T.(Protons On Target) は、トラッカーとは別のコンピュータで Beam Summary Data という形で記録されている。そこで、トラッカーと Beam Summary Data を用いて、トラッckerがビームのタイミングに合わせてデータを取得できているかを確認した。図 5.2 はトラッckerの unixtime と T2K の Beam Summary Data の unixtime を同期したものである。ここで、線が途切れて P. O. T. が蓄積されていない期間があるが、これは加速器のメンテナンスでビームが照射されていないからである。ニュートリノビームのスピルに対してトラッckerは大部分のデータを取得できており、データ取得効率は 99% であった。トラッckerは subrun を切り替えるのに十数秒ほど必要でその間はデータを取得できないため、Inefficiency の大部分はそのことが原因であると考えられる。

次に DAQ システムで正しくニュートリノ反応事象を測定できているかを確認した。ここで、トラッckerで観測されるミューオンのほとんどがニュートリノビームと実験ホールの壁の反応で生成されたミューオン、すなわちサンドミューオンである。また、2.2 節で述べたとおり、ニュートリノは、280 m 上流にあるグラファイト標的に陽子ビームが衝突することで生成される。したがって、生成されるニュートリノの数は陽子数 (P. O. T.) に比例する。このため、トラッckerで観測される P. O. T. あたりのサンドミューオンの数は概ね一定になることが期待される。ここで、各スピルに対して X, Y 層でそれぞれ 2 枚以上でシンチレータがなったイベントをサンドミューオンイベントとしてカウントした。図 5.3 に示したとおり、全測定期間にわたり P. O. T. あたりのイベント数は $0.72 \text{ events}/10^{15} \text{ P. O. T.}$ で概ね一致し、安定してデータを取得できていることが確認できた。

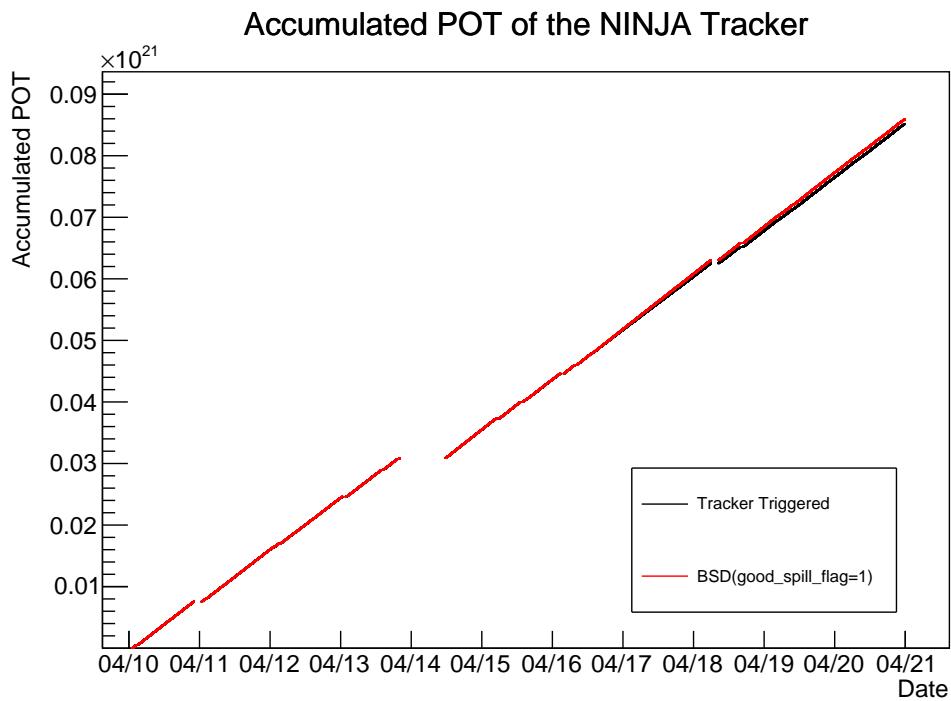


図 5.2 トラッカーの unixtime と T2K の Beam Summary Data を同期した。横軸が日付、縦軸は蓄積された P. O. T. を表している。

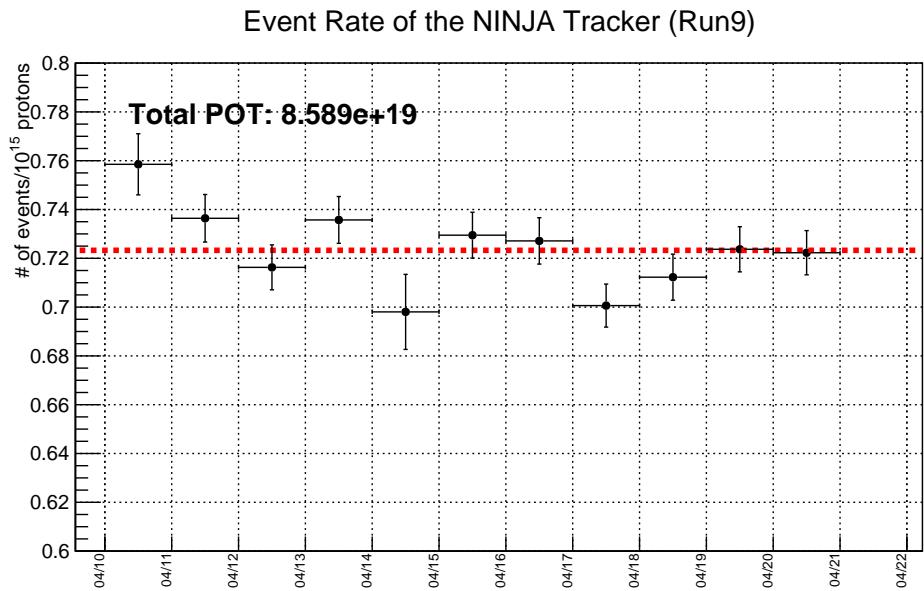


図 5.3 P. O. T.あたりのトラッカーのイベント数をプロットした。横軸が日付、縦軸は 10^{15} P. O. T. あたりのイベント数を表している。エラーバーは統計誤差である。

5.3 ダークパルスによる各チャンネルの点検

DAQ システムを用いてデータを取得した後、各チャンネルの ADC 分布のダークパルス確認し、故障しているチャンネルがないか点検した。ADC 分布を確認してみたところ、3 つのチャンネル (ch17, 66, 240)において、得られた光量が著しく低いことが分かった。図 5.4 に典型的な ADC 分布と故障していると考えられる 3 チャンネルの ADC 分布の図を示す。これら 3 チャンネルでは MPPC の故障が原因であると考えられるため、今後のランでは交換する必要がある。

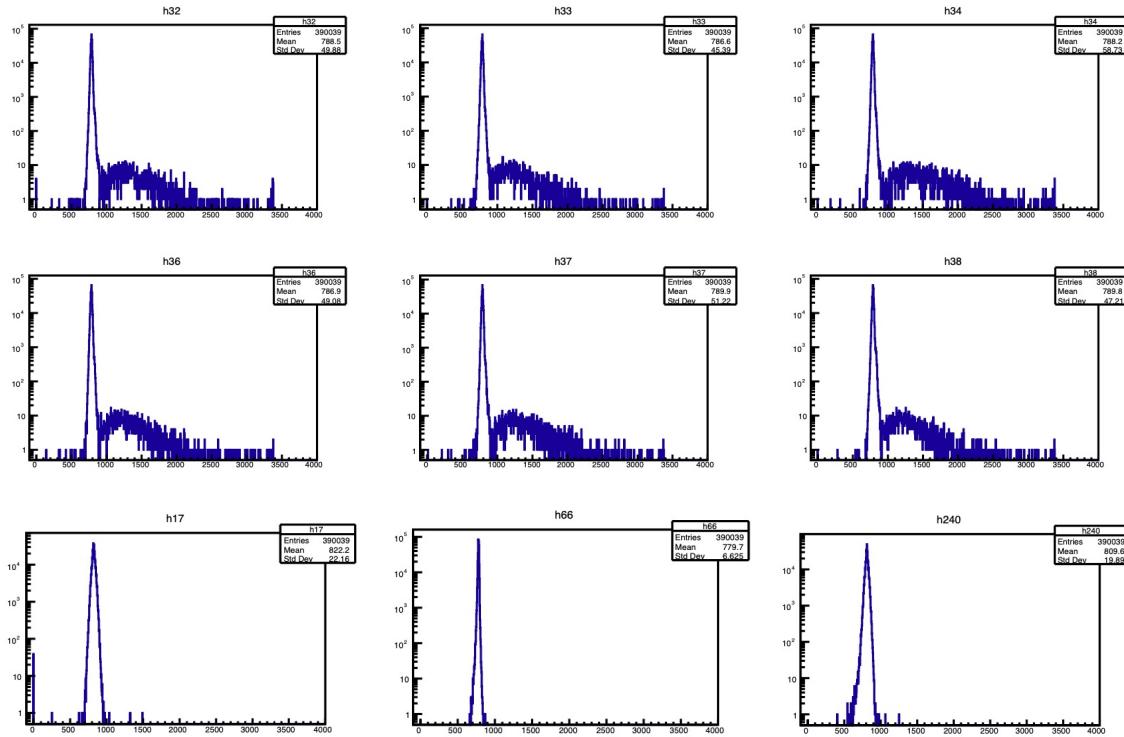


図 5.4 上 2 段は正常な 6 チャンネルの ADC 分布。下 1 段が故障していると考えられる 3 チャンネルの ADC 分布。

5.4 ゲインキャリブレーション

上記の故障している 3 つの MPPC 以外のチャンネルに関して、ニュートリノビーム測定時のダークカレンタを用いて、ペデスタル、1 p.e., 2 p.e. のピークサーチを行ない、それら 3 つで線形フィッティングすることでゲインを算出した。図 5.5 にピークサーチをした結果の一例を載せる。

次にピークサーチした結果から、ペデスタル～2 p.e. の ADC を読み取り、図 5.6 のように横軸を p.e.、縦軸を ADC としてプロットした。さらにそれらのプロットを一次関数でフィッティングを行ない、その傾きをゲインとした。各プロットが直線に乗っていることが分かる。以降、各 MPPC のヒット閾値を 2.5 p.e. として解析を行なった。

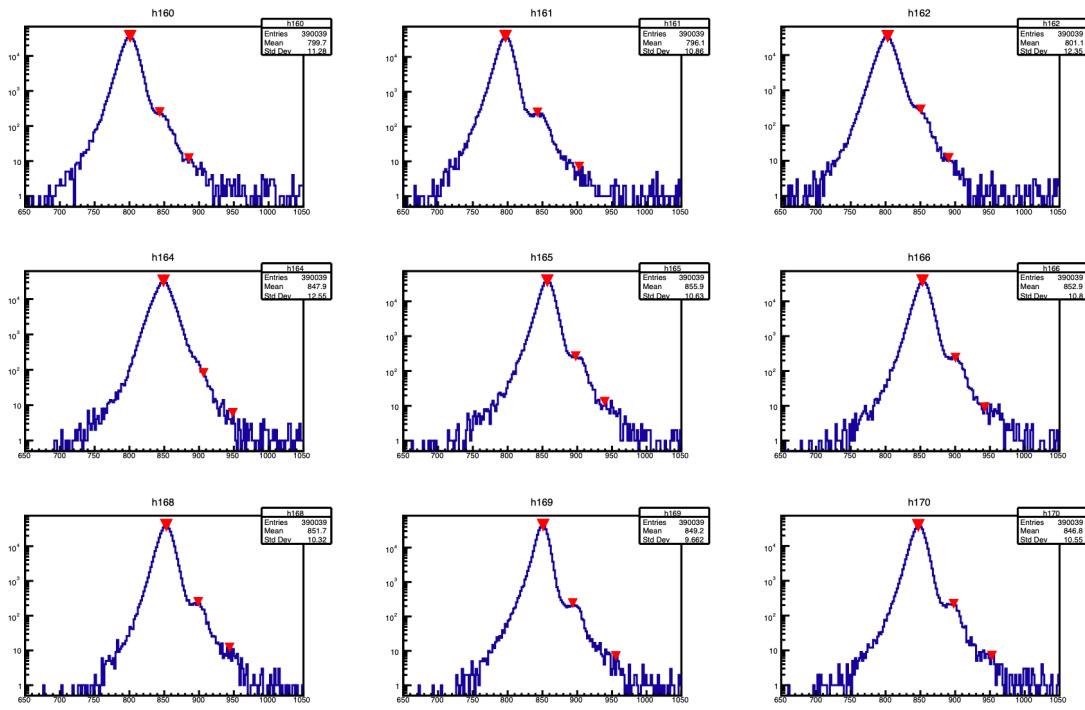


図 5.5 ニュートリノビーム測定時のダークカレント信号を用いてピークサーチをした結果の一例

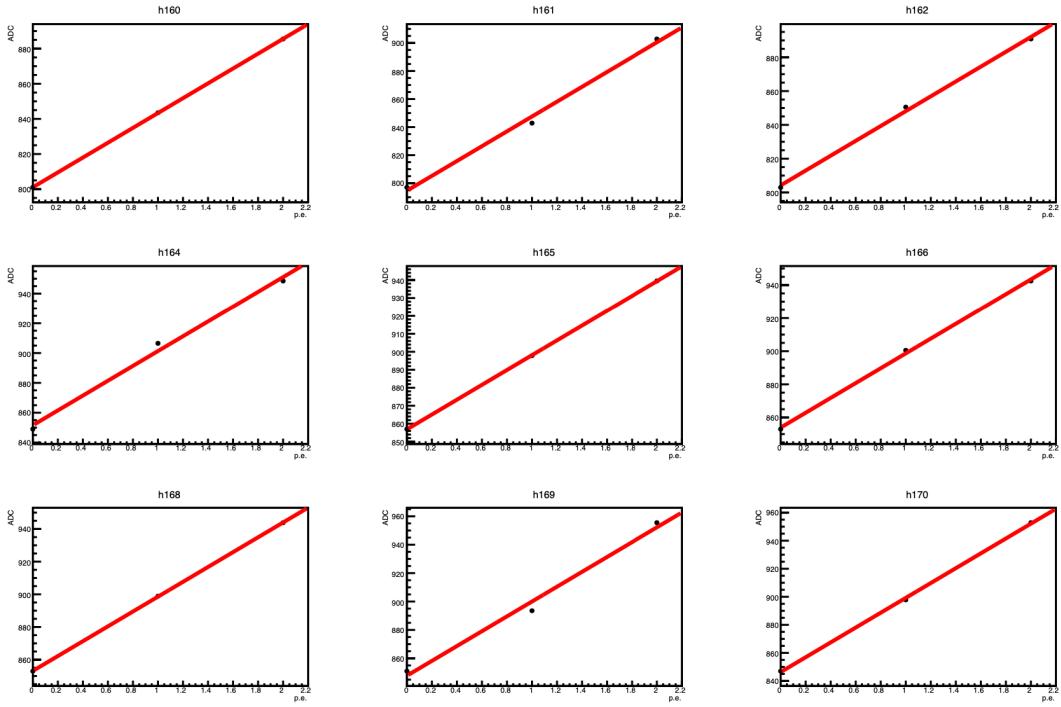


図 5.6 ニュートリノビーム測定時のダークカレント信号を用いてペデスタル, 1p.e., 2p.e. の 3 つのピークを一次関数フィッティングした結果

5.5 ADC データ

EASIROC module によって記録された ADC データを確認した。図 5.7 は X, Y 層の各チャンネルで閾値 2.5 p.e. を超えたイベント数の分布である。

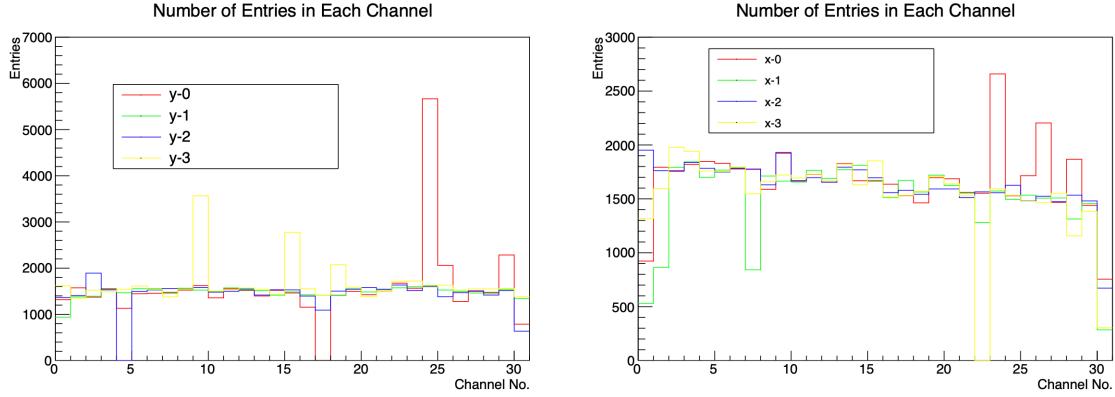


図 5.7 X, Y 層の各チャンネルで閾値を超えたイベント数。閾値を 2.5 p.e. にした場合。左が Y 層、右が X 層のものである。

ほとんどのチャンネルではイベント数は約 1000~2000 程度である。ここで、ニュートリノビームはトラッカーに対してほぼ垂直で来るため、どのチャンネルにも同程度のイベント数が来ると予想される。しかし、実際には明らかに他のチャンネルよりイベント数が多いチャンネルがいくつか存在した。これは MPPC の暗電流が他のチャンネルに比べて大きいことにより、実際より多くのイベントをカウントしてしまっていると考えられる。そこで閾値を 2.5 p.e. から 3.5 p.e. にしてカットをかけたのが以下の図 5.8 である。閾値を再設定する

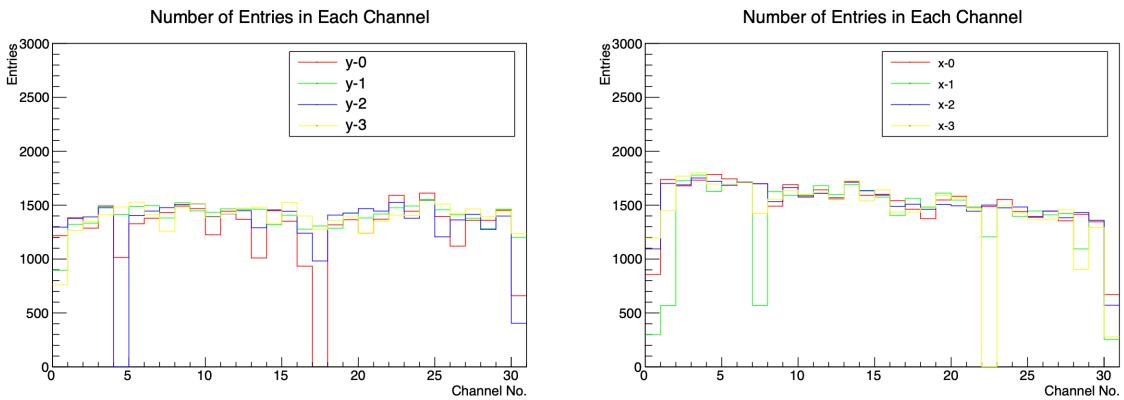


図 5.8 X, Y 層の各チャンネルで閾値を超えたイベント数。閾値を 3.5 p.e. にした場合。左が Y 層、右が X 層のものである。

ことにより、他の正常なチャンネルと同様にイベント数が落ちていたことが分かる。また、イベント数が 0 のチャンネルが MPPC が故障しているチャンネルである。各層で端のチャンネルのイベント数が低いのは、トラッカーの端では X 層と Y 層が完全に重なっていないため、2 層の AND 信号によって生成されるトリガー信号の生成割合自体が低いからである。X 層について見てみると、チャンネル番号が大きくなるにつれてイベ

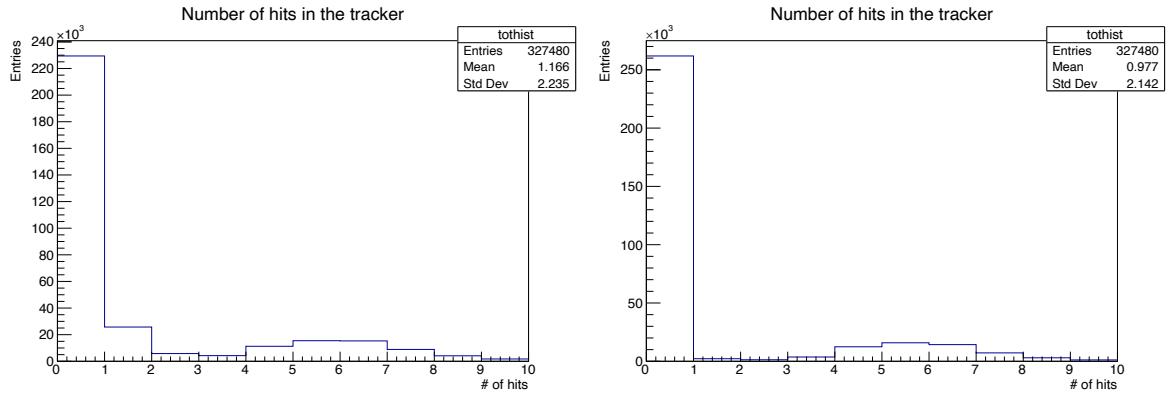


図 5.9 各イベントで閾値を超えたヒット数の分布. 左は閾値 2.5 p.e., 右は 3.5 p.e. ヒット数 1~3 のところで特に違いが見られる.

ント数が減少している. これは, トラッカーが Off-axis 角 1.5° のところに配置されており, トラッカーの左右で Off-axis の値が変化するからである. Off-axis の値が大きくなるほどニュートリノビームからずれていくためイベント数は減少する.

次に各イベントで閾値を超えたヒット数の分布が図 5.9 である. 閾値を 2.5 p.e. と 3.5 p.e. のそれぞれに設定した. 生成された荷電粒子がトラッカーを突き抜ける時, X, Y 層のそれぞれで 2~4 チャンネルでヒットするため, この分布は 4~8 チャンネルでピークを持つはずであり, 実際に 2 つの分布とも期待通りのピークとなっている. しかし, 閾値 2.5 p.e. の分布ではヒット数 1~3 のイベント数が 3.5 p.e. の分布に比べて多い. これも先述の MPPC の暗電流が大きいことにより, ヒット数が多くカウントされてしまっていることが原因であると考えられる. ここで, それぞれの分布でイベント全体におけるヒット数が 2 以上のイベントの割合を出してみると, 2.5 p.e. では約 20%, 3.5 p.e. では約 17% であった. また, P. O. T. あたりのイベント数 $0.72 \text{ events}/10^{15} \text{ P. O. T.}$ に, 今回の測定の平均陽子数 2.23×10^{14} を掛けることで, 1 スピルあたりのサンドミューオンの平均イベント数が $0.72 \times 0.223 = 0.16 \text{ events/spill}$ である. トラッカーはスピル毎に必ずデータを取得しているので, 0.16 events/spill から期待されるイベント全体に対するヒットが期待されるイベントの割合は 16% である. このことから, 閾値として 3.5 p.e. が適切であると判断した.

5.6 multi hit TDC データ

EASIROC module は一度データを取得すると, データ転送のために 2 μs ほどデータを取得することができない. したがって, 1 スピルで複数のイベントが起こった場合には, 最初のイベントの時間情報と全チャネルの ADC データのみを記録し, それより後のイベントのデータは記録されない. 一方で, multi hit TDC はトリガー信号が発行された後に各チャネルで初めて閾値を超えた時間を記録し, 最初のイベントから 4 μs 以内であれば, 各チャネルで独立して時間情報を取得できる.

まずは, multi hit TDC に記録されている leading time を見て, ニュートリノビームのバンチ構造を確認した. multi hit TDC ではトリガー信号が発行されたから TSTOP 信号が入力されるまでの時間が記録される. したがって, leading time = 4080 ns の時に最も大きいピークを迎える, leading time の右から左に向かって 2 ヒット目以降のヒット時間が記録されていく. 図 5.10 を見ると, 4080 ns から約 580 ns ごとにピークが立つ

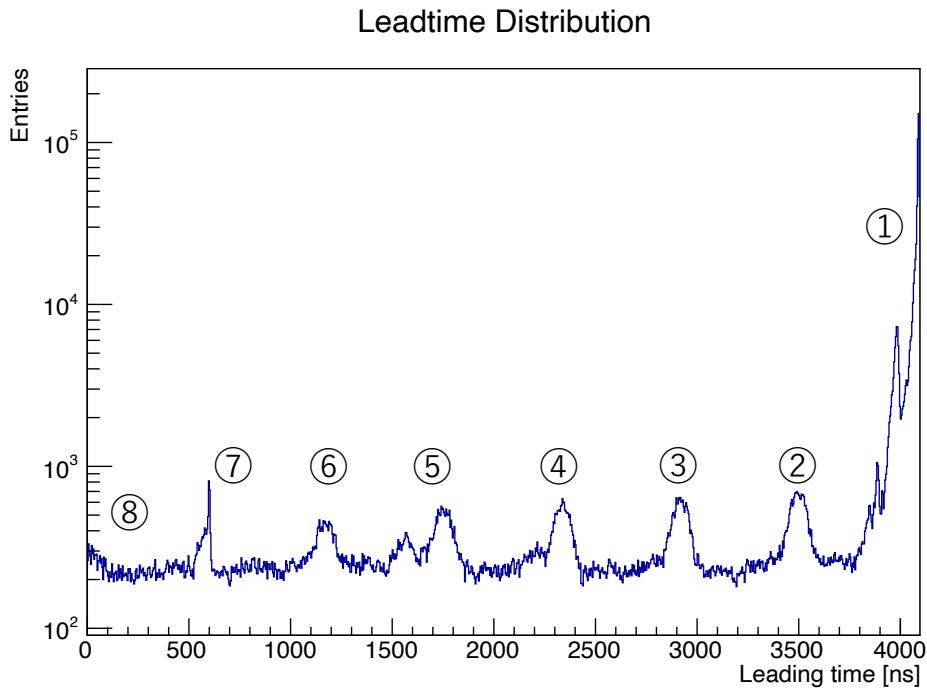


図 5.10 multi hit TDC の leading time の分布

ており、全部で 8 つのピークが確認できた。

次に、全てのバンチでデータを取得できているかを確認した。ニュートリノビームのスピン幅は約 $4.1 \mu\text{s}$ である一方、multi hit TDC のレンジは最大で 4096 ns であるため、全てのバンチを覆うことはできない。そのため、DAQ システムでは 1 スピルで複数イベントが起きたときの各バンチ差の時間を記録している。このことを利用して、ADC では記録できない 1 スピルで起きた複数イベントのデータ取得について以下のとおり考察した。1 スピルあたりのサンドミューオンの平均イベント数が 0.16 events/spill から、ポアソン分布の式に当てはめると、複数イベントのイベント数が 2 である確率は 95% である。すなわち複数イベントのほとんどが 2 イベントで、別々のバンチで 1 イベントずつ観測される。ここでバンチ差 n を考えたとき、 $n = 1$ は (①, ②) ~ (⑦, ⑧) の 7 組あり、 $n = 2$ は (①, ③) ~ (⑥, ⑧) の 6 組、と順々に減っていき、 $n = 7$ の時は (①, ⑧) の 1 組となる。したがって、バンチ差が 1 つ増えるにつれて観測されるイベント数は確率的に 6/7 ずつ少なくなっていくはずである。これを横軸をバンチ差、縦軸を各バンチ差のイベント数のグラフでプロットした時、直線に乗っているかどうかを確認した。イベント数のカウントについて、 $TDC = (4080 - n \times 580) \pm 100$ を求め、この中にイベントがあればカウントした。ここで 100 という値は 1 つのバンチの幅を表す。プロットの結果を図 5.11 に示す。プロットが期待通り直線に乗っていることを確認でき、DAQ システムが 8 バンチ全てのデータを取得できていることが分かった。

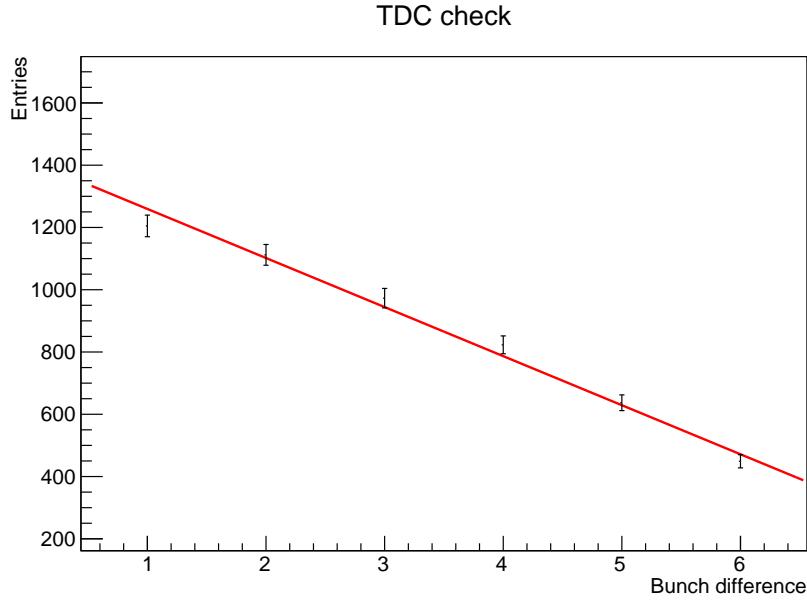


図 5.11 各バンチ差におけるイベント数のプロット

5.7 トラッカーと BabyMIND の飛跡接続

トラッカーとミューオン飛程検出器 BabyMIND を飛跡接続していくにあたって、まずは 4 月 15 日の 1 日分のデータを用いて評価を行なった。図 5.12 に WAGASCI 検出器であるアクティブ標的検出器プロトンモジュールと BabyMIND, NINJA 検出器トラッカーの配置概略図を示す。これらプロトンモジュールと BabyMIND を通過したようなサンドミューオンを用いてトラッカーへの飛跡接続を行なった。

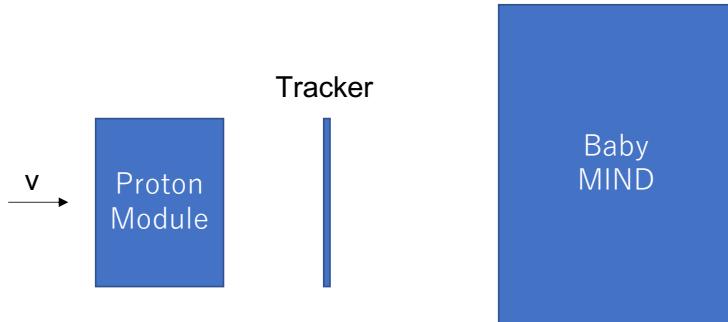


図 5.12 J-PARC, NM 棟, B2 フロアにおける WAGASCI 検出器群とトラッカーの配置概略図

まずはプロトンモジュールと BabyMIND の両方でヒットがあったイベントを抽出し、その unixtime の前後 2 s でトラッカーにもイベントが存在するかを確認した。トラッカーにもイベントが存在した場合、X, Y 層のそれぞれで 2 枚以上のヒットがあるか、すなわちサンドミューオン由来のイベントかを調べた。その結果 134 イベントについてヒットが存在した。その後、それら 134 イベントについて、ヒットしたチャンネルのイベントディスプレイを確認した。図 5.13 にある 2 つのイベントにおけるサンドミューオンのイベントディス

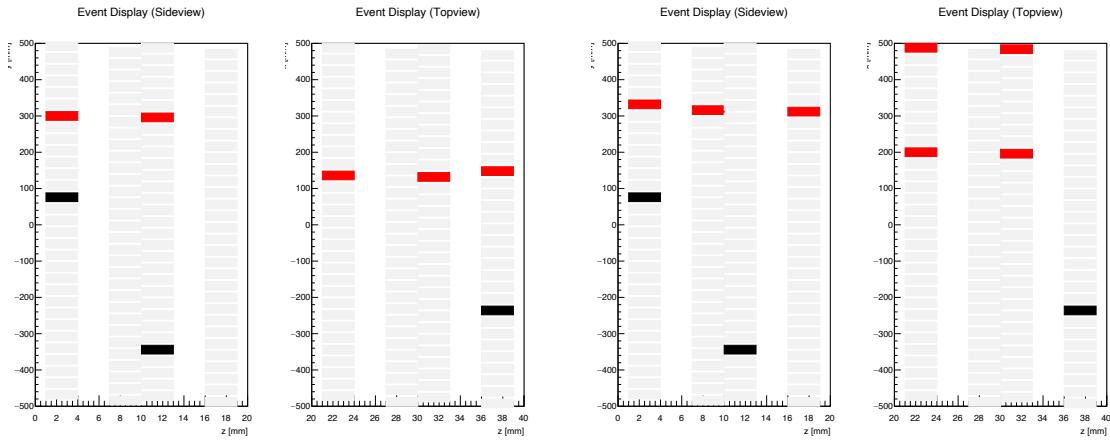


図 5.13 ある 2 つのイベントにおけるサンド缪ォンのイベントディスプレイ. (左)1 本の飛跡が綺麗に見えている. (右) 飛跡が複数見えている.

プレイを示す. 赤色が閾値を超えたヒットチャンネル, 黒色が故障しているチャンネルを表す. 左図は綺麗に 1 本の飛跡が見えているが, 中には右図のように飛跡が複数見えているものがいくつかあった. 今回, 飛跡が複数見えるものに関しては解析から省いた. 今後これらの取り扱いについて考える必要がある.

その後, トラッカーのヒット位置の再構成を行なった. 図 5.14 に示したとおり, ヒットチャンネルのシンチレータの中心をそのチャンネルのヒット座標とし, それらヒットチャンネルの座標の平均をそのイベントのヒット座標として再構成を行なった. 4 月 15 日分のデータを用いたサンド缪ォンイベントのヒット座標再構成の分布を図 5.15 に示す. トラッカーの全域にわたってサンド缪ォンイベントが来ていることが分かる.

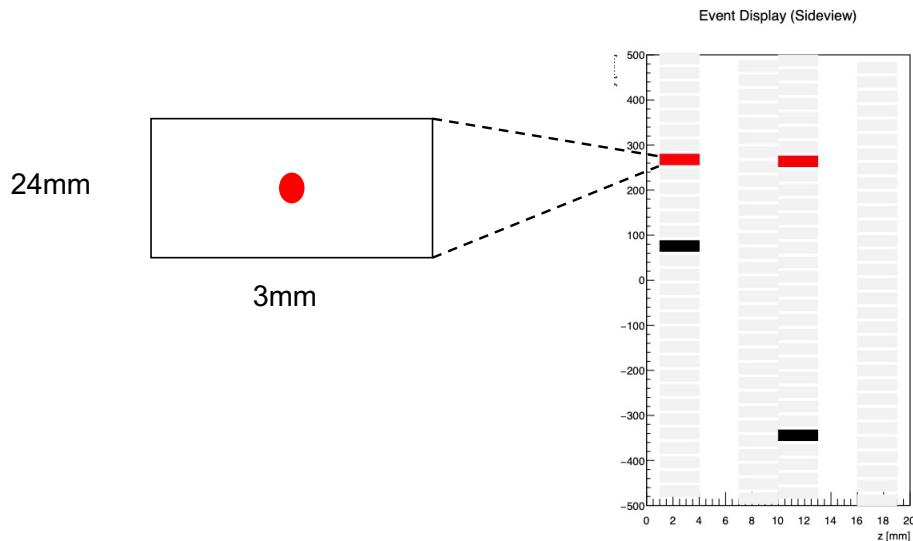


図 5.14 あるイベントにおけるサンド缪ォンのイベントディスプレイ. シンチレータの中心 (赤丸) をヒット座標とした.

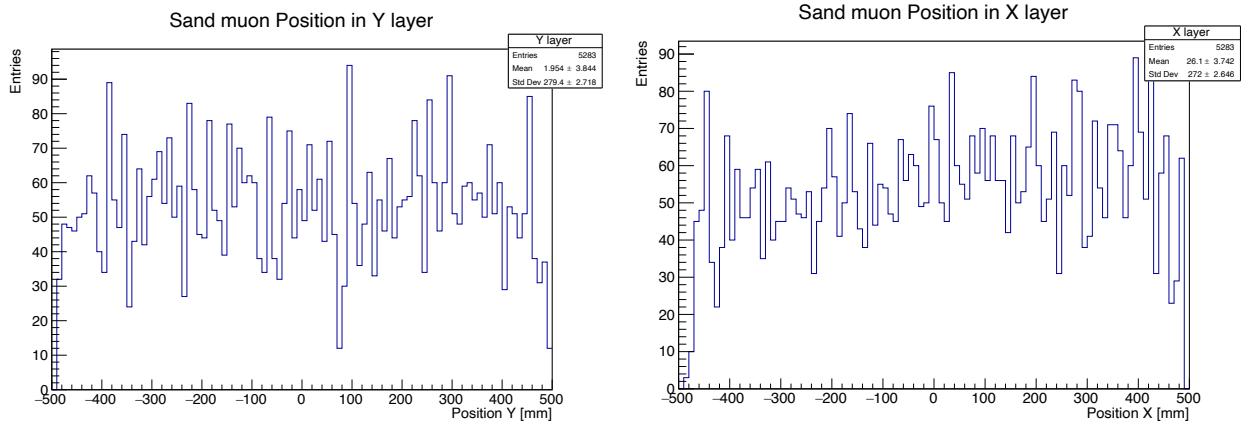


図 5.15 4月15日分のデータを用いたサンドミューオンイベントのヒット座標再構成の分布

トラッカーの端のイベント数が少ないので、複数ヒットがある場合、各ヒットチャンネルのヒット座標の平均を計算していることが原因であると考えられる。

次に、マッチングした 134 イベントについて、BabyMIND 内で再構成されたトラックのヒット座標と角度情報 (tangent) を用いて、トラッカーの方に外挿し、外挿した直線が通過した位置がトラッカーの有感領域内にある場合に、その位置を推定されるトラッカーのヒット座標とした。綺麗に飛跡が見えるイベントかつトラッカーの有感領域内にヒットがあるイベントが 73 イベント存在した。その後、73 イベントに関して、BabyMIND から外挿して推定されたトラッcker のヒット座標 $Y(X)_{\text{exp}}$ と実際のヒット座標の平均 $Y(X)_{\text{ave}}$ の差の分布を確認した。その分布を図 5.16 に示す。Y 層では $Y_{\text{exp}} - Y_{\text{ave}} = 5 \text{ cm}$, X 層では $X_{\text{exp}} - X_{\text{ave}} = -6 \text{ cm}$

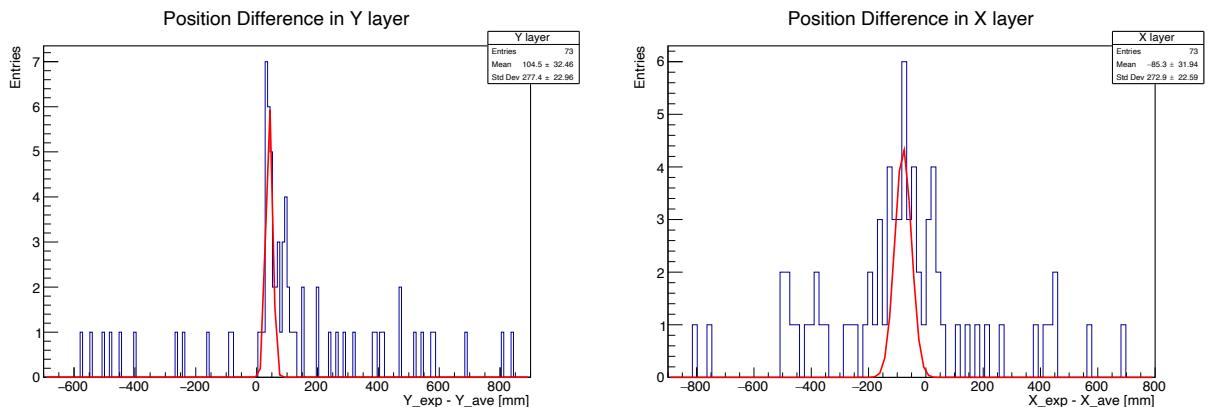


図 5.16 BabyMIND からの外挿で推定されたトラッcker のヒット座標と実際のヒット座標の平均との差。

cm のところにピークが立っており、最大で 80 cm 程度ずれているものも存在した。それが 0 cm 付近のところでは、BabyMIND とトラッcker で同じ飛跡のイベントが観測され、それ以外のところでは別の飛跡が偶然つながったことで位置ずれが生じていると考えられる。正しく飛跡接続できていれば、ピークは 0 付近に立つはずであるが、実際は Y 層で 5 cm, X 層で -6 cm にピークが立っており、BabyMIND とトラッcker のアライ

メントがずれていることも考えられる。また、図 5.16 に、0 付近のガウシアンフィットを赤線で示した。Y 層では σ が 1.2 cm、X 層では σ が 2.9 cm と分布の広がりを持っている。これは、トラッカーのヒット座標をシンチレータの中心としていることや BabyMIND の飛跡再構成の精度に原因があると考えられ、今後改善が必要である。

第 6 章

結論

本研究では 2021 年 4 月に取得した NINJA 実験 RUN9 のニュートリノビームデータを解析し, シンチレーショントラッカーの性能評価を行なった。まずは, 陽子数あたりのイベント数が統計誤差の範囲で安定していることを確認し, DAQ システムが十分に動作していることが分かった。その後, EASIROC module に記録されている ADC データを確認して, 使用している 248 チャンネルのうち 3 チャンネルについて MPPC が故障していることが分かった。この 3 チャンネルに関しては今後のランでは交換する必要がある。また, 各チャンネルのゲインを測定し, 閾値を 2.5 p.e. に設定した。X, Y 層の各チャンネルで閾値を超えたイベント数の分布を確認したところ, いくつかのチャンネルで明らかに他のチャンネルよりイベント数の多いものが存在した。これらは MPPC による暗電流が大きいことが原因であると考え, 閾値を 3.5 p.e. にすることでフラットなイベント数分布を得ることができ, MPPC による影響を解消した。multi hit TDC を用いた解析ではニュートリノビームの 8 バンチ構造を確認した。さらに, ADC では記録できない, 1 スピルで複数イベントが起きた場合についても, 全てのバンチでデータが取得できていることを確認した。

最後に, プロトンモジュールと BabyMIND のデータを用いて, トラッカーと飛跡接続を行なった。飛跡接続の評価には, 4 月 15 日に得られたデータを用いた。まずはそれぞれの検出器に記録されている unixtime で同期を行ない, イベントのマッチングをした。マッチしたイベントに関してイベントディスプレイを確認したところ, 綺麗に飛跡が見て取れた。その後, BabyMIND の再構成されたヒット座標と角度情報を用いてトラッカーに外挿し, 推定されるヒット座標と実際のヒット座標の差の分布を確認した。ピークが確認でき, トラッカーによる位置測定が可能であることが分かった。

以上より, トラッカーが高効率でデータを取得しており, そのデータにも問題が無いことが分かった。飛跡接続に関して, まだ 1 日分のデータしか見ていないことと, 解析自体にまだ改良の余地があることから, 結果のさらなる向上が期待できる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご指導、ご協力いただきました。この場を借りて感謝申し上げます。

指導教員の南野彰宏准教授には、授業やミーティング等で大変お忙しい中、多くのことをご指導いただきました。特に研究に対する姿勢や考え方など、今後の研究活動において非常に大切なことを学びました。感謝いたします。

京都大学院高エネルギー物理学研究室 D2 の小田川さんには、本研究を進めるにあたり、シンチレーショントラッカーのデータ解析の方法を教えていただき、手探りで研究を開始した私の質問に対しても親身になって様々な助言をくださいました。大変感謝申し上げます。

研究室の方々とはコロナ禍ということもあり、直接お会いする機会はほとんどありませんでしたが、研究室ミーティングで皆さん的研究に触ることは自分にとって良い刺激になるものでした。特に同室で同期でもある天内くん、森田くんとはお互いの研究について話したり、助言しあったりするだけでなく、他愛のない雑談をしたりなど楽しい時間を過ごすことができ、私にとって大きな支えにもなっていました。改めて感謝申し上げます。

参考文献

- [1] The T2K Experiment, "<https://t2k-experiment.org/ja/about-t2k/>"
- [2] J-PARC, "<https://j-parc.jp/Neutrino/ja/nu-facility.html>"
- [3] C. Giganti, "Latest results from T2K and T2K Phase II," in Proceedings, Prospects in Neutrino Physics (NuPhys2017): London, UK, December 20-22, 2017, pp. 61-69, 2018.
- [4] K. Abe et al. [T2K Collaboration], "T2K neutrino ux prediction", Phys. Rev. D 87, 012001 (2013)
- [5] スーパーカミオカンデ, "<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>"
- [6] T. Fukuda et al., "First neutrino event detection with nuclear emulsion at J-PARC neutrino beamline", Prog. Theor. Exp. Phys. 063C02, 2017
- [7] 小田川高大, "原子核乾板を用いたニュートリノ反応精密測定実験のための大面積シンチレーショントラッカーの開発", 京都大学修士論文 (2020)
- [8] 金島遼太, "NINJA 実験におけるシンチレーショントラッカーのニュートリノビーム測定に向けた運用試験", 横浜国立大学学士論文 (2021)
- [9] 浜松ホトニクス MPPC 技術資料,
["https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents\\99_SALES_LIBRARY/ssd/mppc_kapd9008j.pdf"](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents\\99_SALES_LIBRARY/ssd/mppc_kapd9008j.pdf)
- [10] Omega group, EASIROC DATA SHEET, 2011.