

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 理工学部
数物・電子情報系学科 物理工学 EP
学籍番号 1764074
金島遼太

2021年2月12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 実験は T2K 実験の大強度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様々な標的物質の間の相互作用を精密に測定する。

原子核乾板に記録される荷電粒子の飛跡は時間分解能を持たない。このため、NINJA 実験では、原子核乾板とシンチレーショントラッカーの間で飛跡のマッチングを行うことで原子核乾板に記録された荷電粒子の飛跡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に並べられ、バーに沿って接着された波長変換ファイバの片側先端に半導体光検出器の MPPC が接続された構造を持つ。シンチレーショントラッカーは高い時間分解能と位置分解能を持ち、原子核乾板の飛跡に対して時間情報を付与するのに適した検出器である。

シンチレーショントラッカーには光検出器である MPPC の信号の読み出しに EASIROC module を用いる。本研究ではまず EASIROC module を用いて MPPC で LED の光量測定を行った。その後、J-PARC にてシンチレーショントラッカーの組み上げと運用試験を実施した。運用試験では故障している部品の点検と宇宙線イベントの観測を行った。

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	4
第 2 章	T2K 実験	6
2.1	概要	6
2.2	ニュートリノビーム	7
2.2.1	Off-axis 法	7
2.3	前置検出器	9
2.3.1	INGRID	9
2.3.2	ND280	9
2.3.3	WAGASCI	10
2.4	後置検出器：スーパーカミオカンデ	10
第 3 章	NINJA 実験	12
3.1	CCQE 反応と 2p2h 反応	12
3.2	NINJA 実験の目的	13
3.3	実験のセットアップ	13
3.3.1	ECC	13
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	15
第 4 章	エレクトロニクス	18
4.1	MPPC	18
4.1.1	ダークノイズ	19
4.2	NIM	19
4.3	EASIROC module	19
第 5 章	EASIROC module を用いた MPPC の測定	23
5.1	測定方法	23
5.2	測定結果	25

第 6 章	シンチレーショントラッカーの運用試験	26
6.1	DAQ エレクトロニクスの組み上げ	26
6.2	MPPC のダークノイズを用いた各チャンネルの点検	28
6.3	ゲインキャリブレーション	28
6.4	宇宙線イベント	29
第 7 章	まとめと展望	33

第1章 ニュートリノ振動

1.1 ニュートリノ

物質を構成する素粒子であるクォークとレプトンは表 1.1 のようにそれぞれ 3 世代のグループに分けられ、合計 12 種類存在する。

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	アップ	チャーム	トップ
	ダウン	ストレンジ	ボトム
レプトン	電子	ミュー粒子	タウ粒子
	電子ニュートリノ	ミューニュートリノ	タウニュートリノ

表 1.1: クォークとレプトン

1930 年に Pauli は、 β 崩壊で放出される電子のエネルギー分布が離散的にならない現象を説明するために電荷を持たず非常に軽い素粒子としてニュートリノを考案した。ニュートリノは中性のレプトンであり、標準理論では質量を持たないとされている。ニュートリノは荷電レプトンに対応した「フレーバー」により ν_e 電子ニュートリノ、 ν_μ ミューニュートリノ、 ν_τ タウニュートリノの 3 種類に分類することができる。また、ニュートリノは弱い相互作用と重力相互作用のみ行う。

1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノには 3 種類のフレーバーの固有状態 $|\nu_e\rangle, |\nu_\mu\rangle, |\nu_\tau\rangle$ はそれぞれ 3 種類の質量の固有状態 $|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle, |\nu_3\rangle$ の線形結合で式 (1.1) のように表すことができる。

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

ここで U_{PMNS} は Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata 行列と呼ばれるユニタリ行列であり、式 (1.2) で表される。

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{-i\delta} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

式(1.2)において、 θ_{ij} は固有状態 $|\nu_i\rangle, |\nu_j\rangle$ 間の混合角であり、 δ は CP 位相と呼ばれ $\delta \neq 0, \pi$ のとき CP 対称性が破られている。

ニュートリノ振動とはニュートリノが飛行中にそのフレーバーが変化する現象である。まず ν_e と ν_μ の2世代間のニュートリノ振動について考える。式(1.1)と同様に各フレーバーの固有状態は質量の固有状態の混合状態であるとすると以下の式(1.3)で表せる。

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

ν_i の時間発展は

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

となるので ν_e の時間発展は

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

となる。ここで相対論的に考えると $m_i \ll p_i$ であるから $t = L, p_i = \sqrt{E_i^2 - m_i^2} \simeq E_i - m_i^2/2E_i$ の近似を用いる事ができる。また、 $L(=x=t)$ をニュートリノの飛行距離、 $E_1 = E_2, \Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$ とすると式(1.5)は以下となる。

$$\begin{aligned} |\nu_e(t)\rangle &= \cos\theta|\nu_1\rangle e^{-i\frac{m_1^2 L}{2E_1}} + \sin\theta|\nu_2\rangle e^{-i\frac{m_2^2 L}{2E_2}} \\ &= e^{-i\frac{m_2^2 L}{2E}} (\cos\theta|\nu_1\rangle e^{-i\frac{\Delta m^2 L}{2E}} + \sin\theta|\nu_2\rangle) \end{aligned} \quad (1.6)$$

よって、 ν_e が $t=0$ で生成され、 L だけ飛行した後ときに ν_μ に変化する振動確率 $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$ は

$$\begin{aligned} P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) &= |\langle \nu_\mu | \nu_e(t) \rangle|^2 \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta m^2}{4E} L \end{aligned} \quad (1.7)$$

となる。また、ここまでは $\hbar = 1, c = 1$ の自然単位系で考えていたが、SI 単位系で考えると式(1.7)は

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

となる。式(1.8)を考えると、振動確率は二乗質量差に依存しているためニュートリノが質量を持たなければニュートリノ振動は起こらないことが分かる。1998年に実際にニュートリノ振動が確認され、標準理論を覆しニュートリノは質量を持つことが示された。

第2章 T2K実験

2.1 概要

T2K(Tokai to Kamioka) 実験とは、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) で作られ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にある水チェレンコフ形検出器スーパーカミオカンデで観測する長基線ニュートリノ実験である (図 2.1)。ニュートリノを 295 km 飛ばす事により人工的にニュートリノ振動を観測することができ、 ν_μ, ν_e 間の振動パラメータの精密測定やニュートリノの CP 対称性の破れの解明を目的としている。

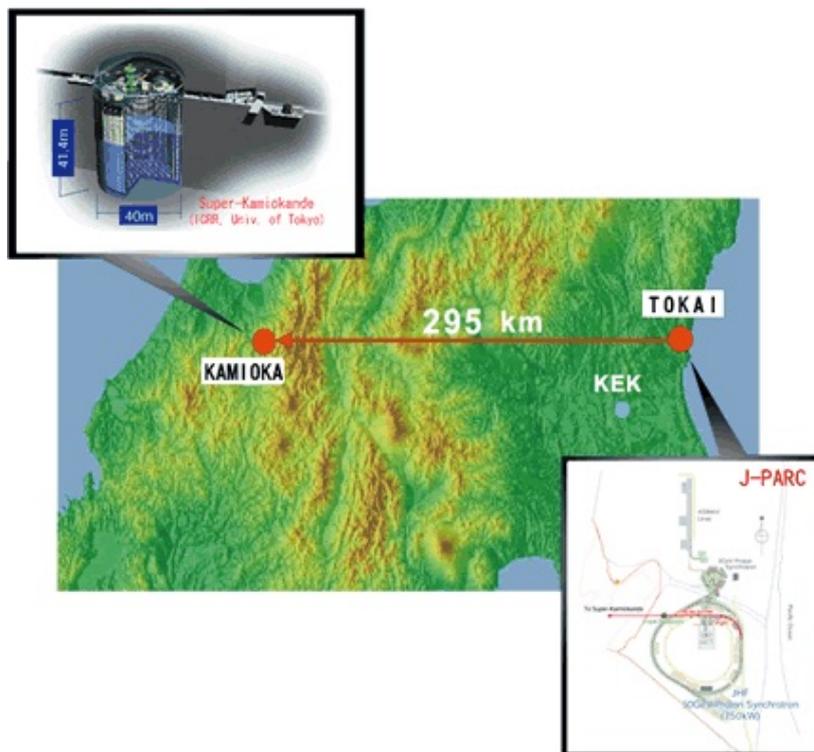


図 2.1: T2K 実験概略図 [1]

2.2 ニュートリノビーム

J-PARCではニュートリノビームが(図2.2)の3種類の加速器によって作られる。まずLINAC(LINear Accelerator)で負水素イオン H^- が400 MeVまで加速され陽子に変換される。その後、RCS(Rapid Cycling Synchrotron),MR(Main Ring)で3 GeVまで加速される。加速された陽子は2.48sの周期のスパルでグラファイト標的に打ち込まれる。また、各スパルは $4.1\mu\text{s}$ の時間幅を持ち、58nsの時間幅を持ったバンチが583nsの間隔で8つ連なったものとなっている。グラファイト標的に入射した陽子のハドロン反応により荷電 π 粒子を中心にしたハドロンが生成される。 π 粒子は3台の電磁ホーンにより収束され標的から下流94mのディケイボリュームによって式2.1で崩壊する。

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

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

電磁ホーンの極性を変更することで π^\pm 粒子のどちらを収束させるか、すなわちニュートリノと反ニュートリノのどちらを取り出すかを選択することができる。



図 2.2: J-PARC 加速器 [2]

2.2.1 Off-axis 法

Off-axis 法とは検出器をビーム軸上からずらして配置する(図2.3)方法で、これによりビームのエネルギー分布幅が軸上にあるよりも狭くなり、狙ったエネルギーのニュートリノの反応が観測し

やすくなる。図 2.4 に ν_μ が振動せず残る確率（生存確率）と $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動確率、Off-Axis 法におけるエネルギースペクトラムを示す。より多くのニュートリノ振動を観測するためには、振動確率が最大となるエネルギーにピークをもつニュートリノビームで実験するのが最適である。T2K 実験では 0.6 GeV 付近のエネルギーが最適であり、このエネルギー帯のスペクトルが最大となるように Off-Axis 角 2.5° を採用している。T2K 実験はこの Off-axis 法を初めて採用した実験であり、後置検出器であるスーパーカミオカンデがビーム軸上から 2.5° ずれた位置にくるようにビーム方向を調整している。

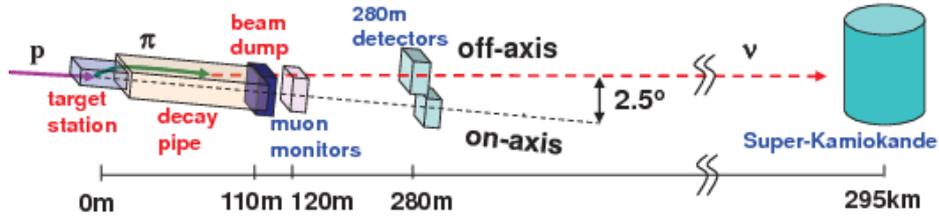


図 2.3: OffAxis 法の概要 [3]

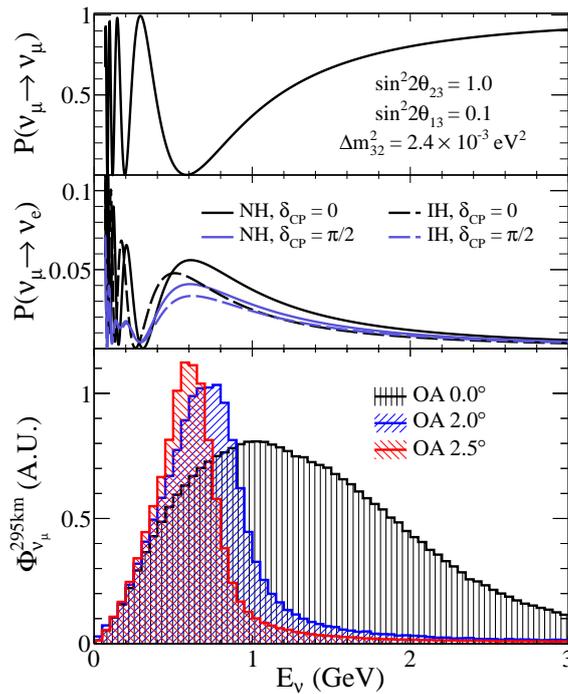


図 2.4: 上のグラフから ν_μ の生存確率、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動確率、3つの OffAxis 角におけるニュートリノビームのエネルギースペクトラム [4]

2.3 前置検出器

グラファイト標的から 280 m 下流の場所にはニュートリノ前置検出器が配置されており、生成直後のニュートリノの情報を得る役割がある。

2.3.1 INGRID

INGRID(Interactive Neutrino GRID) はビーム軸上に配置された On-axis 検出器である。計 14 個の検出器が図 2.5 のように十字に並べられている。検出器中の鉄とニュートリノの反応によって生成された荷電粒子をシンチレータで検出することで、ニュートリノビームの強度と方向を測定している。

2.3.2 ND280

ND280(Near Detector 280) はスーパーカミオカンデ方向に配置された Off-axis 検出器である。図 2.6 の 5 種類の検出器群が電磁石のなかに配置されている。ニュートリノ振動が起こる前のミューニュートリノのフラックスとエネルギースペクトル、反応断面積を測定している。

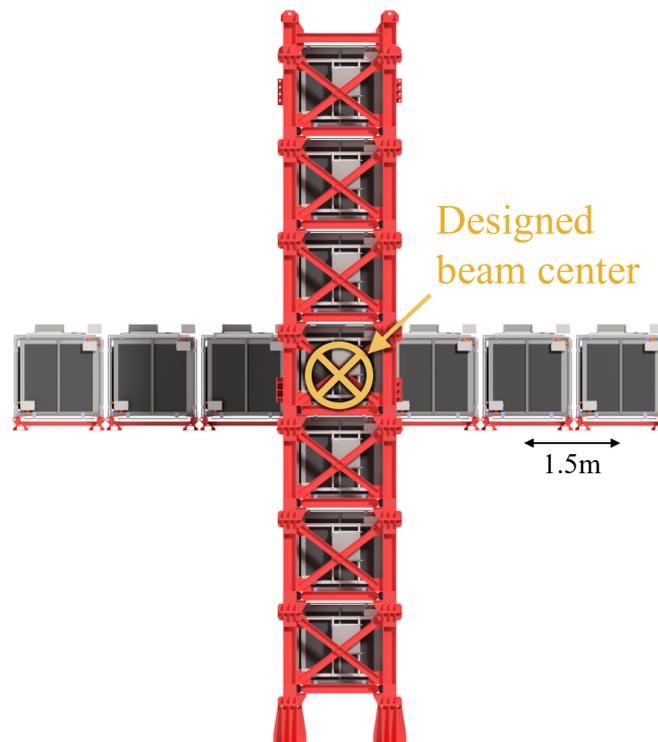


図 2.5: INGRID

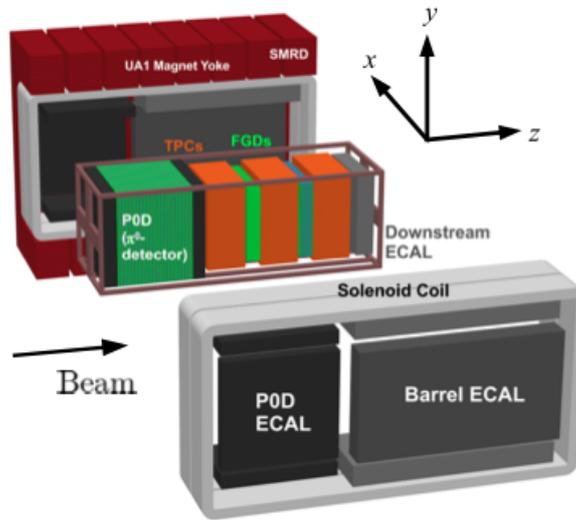


図 2.6: ND280

2.3.3 WAGASCI

WAGASCI(WATER Grid And SCIntillator) はビーム軸上から 1.5° ずれた場所に配置された Off-axis 検出器である。T2K 実験における最も大きな系統誤差であるニュートリノと標的原子核を反応断面積を誤差 10% 以内で測定することが目的である。WAGASCI 検出器は 4 種類 6 台の検出器で構成されている。中央の 2 台の WAGASCI モジュールは格子状にシンチレータが組み立てられており、ニュートリノの標的となる水が満たされている。WAGASCI モジュールの間にはプロトンモジュールが配置されている。両側に配置された WallMRD、下流側に設置された BabyMIND 検出器はニュートリノ反応で生成されたミューオンを検出する。

2.4 後置検出器：スーパーカミオカンデ

J-PARC から 295 km 離れた岐阜県神岡町には、T2K 実験の後置検出器スーパーカミオカンデが配置されている。スーパーカミオカンデは直径 39.3 m、高さ 41.4 m のタンクの中に 50 kt の純水が満たされた世界最大の純水チェレンコフ検出器である。

ニュートリノと標的物質の反応で生成された荷電粒子が水中での光の速さより速く運動するとチェレンコフ光と呼ばれる光が円錐状に放射される。この光をタンク壁面に設置された約 13,000 本（内壁 11,129 本、外壁 1,885 本）の光電子増倍管 (PMT) によって観測することで、荷電粒子のエネルギー、進行方向、位置、粒子の種類を測定することができる。荷電粒子が電子の場合、電磁シャワーを起こして観測されるチェレンコフ光のリングはぼやけるが、ミューオンの場合はまっすぐ直進するため綺麗なリングを観測される。この違いを用いて、荷電粒子を生成したニュートリノの種類の識別を 99% の精度行うことが可能である。

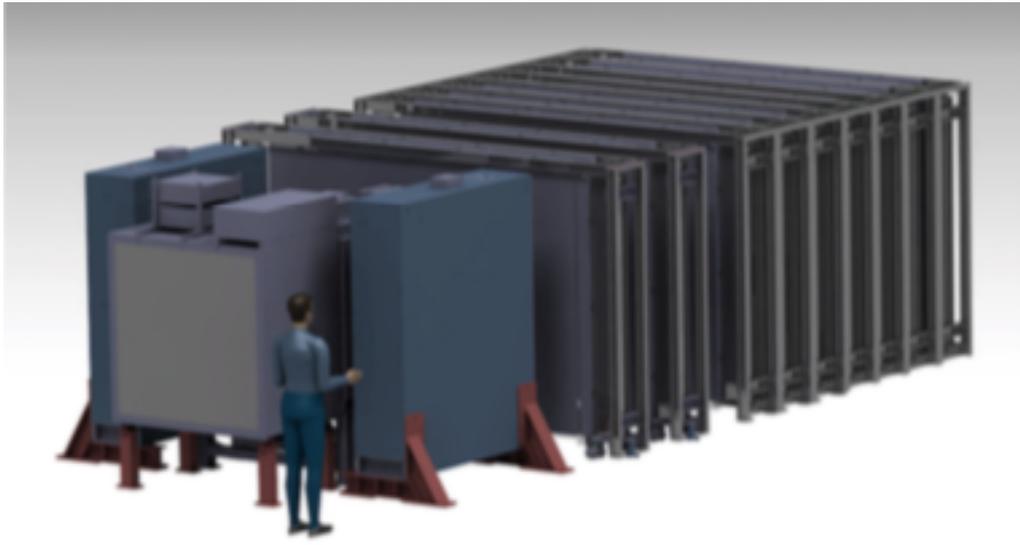


図 2.7: WAGASCI 実験

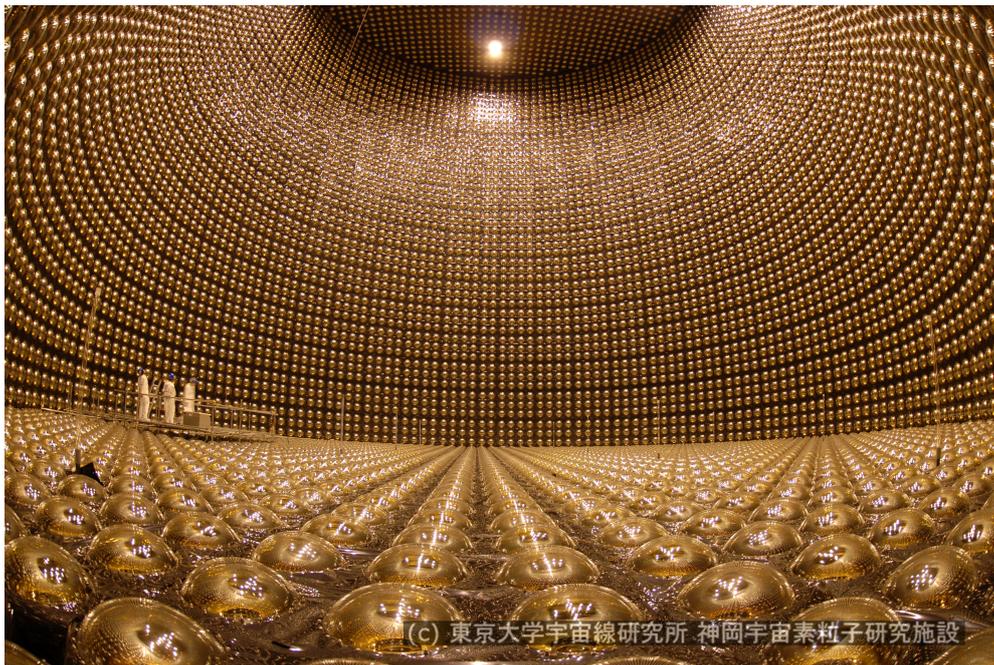


図 2.8: スーパーカミオカンデ [5]

第3章 NINJA実験

3.1 CCQE反応と2p2h反応

ニュートリノを直接検出するのは困難であるためニュートリノ検出器はニュートリノと原子核で生成された粒子を測定することで間接的にニュートリノを測定する。CCQE(Charged Current Quasi Elastic) 反応は T2K 実験で用いるニュートリノエネルギー領域において最も支配的なニュートリノと原子核の反応モードである。図 3.1 に CCQE 反応のダイアグラムを示す。CCQE 反応は 2 体反応なので、生成されたレプトンの終状態を測定することでニュートリノのエネルギーを再構成することができる。

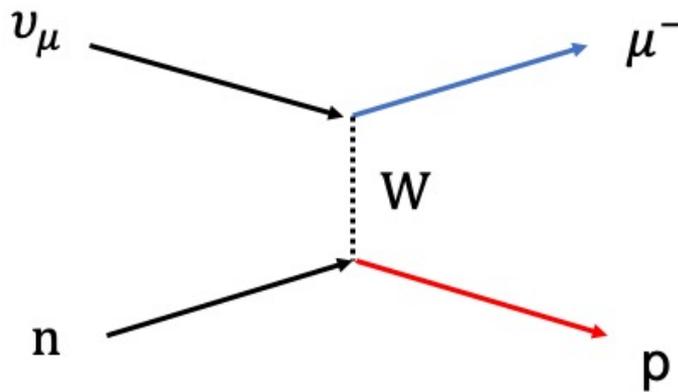


図 3.1: CCQE 反応のダイアグラム

CCQE 反応に似たニュートリノ反応モードに 2p2h 反応という反応がある。図 3.2 に示したダイアグラムのように 2p2ph 反応は CCQE 反応と同じく陽子とレプトンが生成される反応であるが、2p2h 反応では陽子が 2 個生成される。このため、ニュートリノ検出器が陽子を検出できなければ、CCQE 反応であると誤認してしまい、ニュートリノのエネルギーを間違えて再構成してしまう。この 2p2h 反応の存在が T2K 実験におけるニュートリノ振動パラメータ測定の大きな系統誤差になっている。このため 2p2ph 反応の詳細な測定は不可欠である。この 2p2h 反応の詳細な測定には低運動量の陽子の短い飛跡も測定できる位置分解能を持った検出器を使用する必要がある。

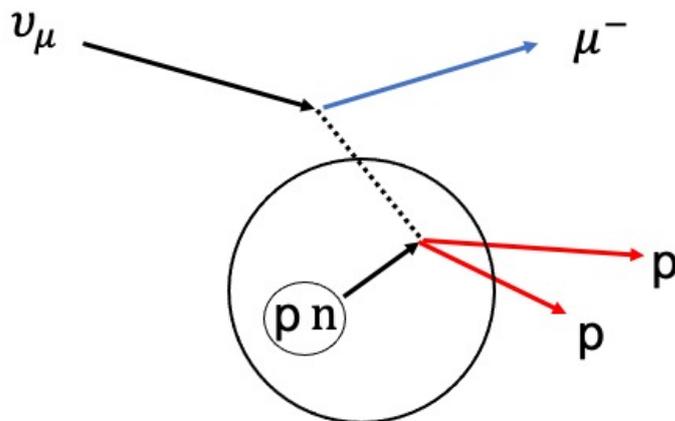


図 3.2: 2p2h 反応のダイアグラム

3.2 NINJA 実験の目的

NINJA (Neutrino Interaction research with Nuclear emulsion and J-PARC Accelerator) 実験は高い位置分解能をもった原子核乾板と大強度ニュートリノビームを用いて、ニュートリノと様々な標的物質との反応を精密測定する実験である。原子核乾板を用いれば 2p2ph 反応由来の低運動量 ($> 200 \text{ MeV}/c$) の陽子を観測できる。NINJA の実験は 2p2h 反応を精密に測定することで、ニュートリノと原子核の反応の系統誤差を削減する。

3.3 実験のセットアップ

NINJA 実験は WAGASCI 検出器と同じく J-PARC ニュートリノモニター棟地下 2 階に設置されており、Off-Axis 1.5° にあたる。図 3.3 に NINJA の実験の検出器のセットアップを示す。NINJA 実験は主に ECC、エマルジョンシフター、シンチレーショントラッカーの 3 つの検出器で構成される。

3.3.1 ECC

ECC (Emulsion Cloud Chamber) は原子核乾板と様々な標的物質を交互に並べた構造の検出器である (図 3.4)。標的物質には鉄や水などが使われる。後置検出器のスーパーカミオカンデでは水が標的物質であるため、水とニュートリノの反応の測定は重要である。また、2021 年 3 月から行う予定のニュートリノビーム測定では重水標的 ECC を使用する。

ECC にニュートリノが入射して標的物質と反応してできた荷電粒子は原子核乾板に飛跡を残す。ビーム照射後に原子核乾板を現像し、荷電粒子の飛跡を専用の読み取り機で読み取ることでニュートリノと標的物質の反応をサブミクロンの位置分解能で測定できる。

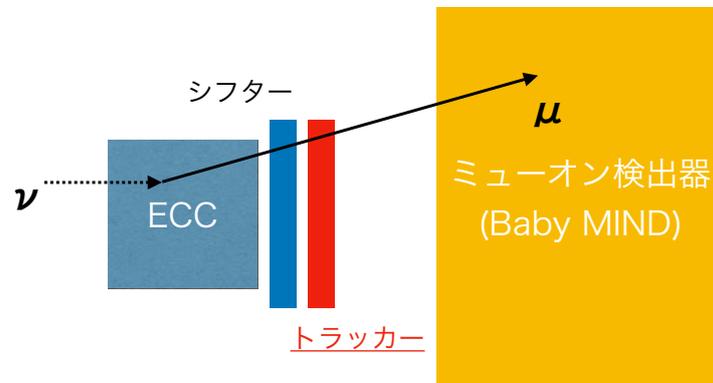


図 3.3: NINJA 実験のセットアップ。ECC で生成されたミューオンの飛跡をエマルジョンシフターとシンチレーショントラッカーによって、Baby MIND まで接続する。[6]

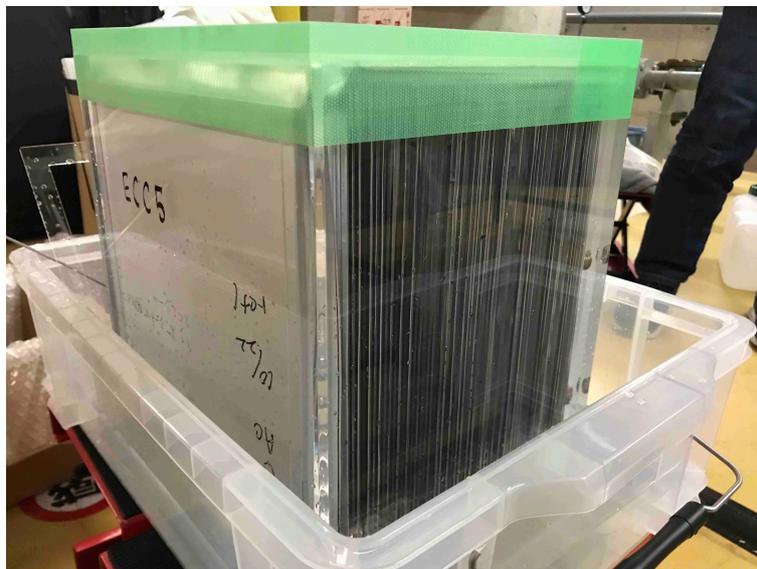


図 3.4: 2019 年 11 月から 2020 年 2 月までのニュートリノビーム測定で用いた水 ECC[6]

3.3.2 エマルジョンシフター

ECCは非常に高い位置分解能を持つ一方、蓄積される飛跡は時間情報を持たない。このため、ECC単体ではBaby MINDなどの周辺検出器と飛跡を接続することはできない。そこでNINJA実験では、エマルジョンシフターとシンチレーショントラッカーを用いてECCの飛跡に時間情報を付与する。

エマルジョンシフターは複数の原子核乾板がそれぞれ異なった周期で動くことで飛跡の通過時間を測定する検出器である。4時間で往復する原子核乾板と4日で往復する原子核乾板があり各原子核乾板同士に記録された飛跡の組み合わせを考慮することで4時間程度の時間分解能が得られる。また原子核乾板を用いているため記録された飛跡はサブミクロンの位置分解能を持っている。



図 3.5: 2019年11月から2020年2月までのニュートリノビーム測定で用いたエマルジョンシフター [6]

3.3.3 シンチレーショントラッカー

シンチレーショントラッカーはエマルジョンシフターと同じく、ECCの飛跡に時間情報を付与しBaby MINDなどの周辺検出器と飛跡の接続を行う検出器である。シンチレーショントラッカーの位置分解能は2.9 mmとなっており、検出効率はMIP(Minimum Ionization Particle)のミューオ

ンに対してはほぼ 100% となっている。また、シンチレーショントラッカーの時間分解能は高く、後述する EASIROC module の機能の multi hit TDC を用いれば 1 ns 単位での測定が可能である。

検出器の構造

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バーが大部分を占める。バーを縦と横に並べた層が縦横 4 層ずつ重なっている (図 3.6)。バーに沿って波長変換ファイバが接着されており、波長変換ファイバの片側先端には半導体光検出器の MPPC が接続されている (図 3.7)。MPPC は同軸ケーブルでケーブル変換基盤に接続され、基盤はフラットケーブルで MPPC 読み出し用エレクトロニクスの EASIROC module に接続されている (図 3.8)。



図 3.6: シンチレーショントラッカー: y 軸 (横向き) のプラスチックシンチレータバー
図 3.7: シンチレーショントラッカー: バーの端から伸びたファイバが MPPC に接続されている。

検出原理

プラスチックシンチレータバーは荷電粒子が通過するとシンチレーション光を発光する。この光を波長変換ファイバによって MPPC まで送り、EASIROC module で MPPC の信号を読み出すことで、荷電粒子が通過して発光したバーを特定する。そして発光した複数のバーの組み合わせから荷電粒子の飛跡を再構成する。プラスチックシンチレータバーは縦横それぞれ 4 層が図 3.9 のようにずれた状態で重なっている。ずらして重ねることで発光が無かったという情報も飛跡の再構成に用いることができるため、チャンネル数を削減することが可能である。

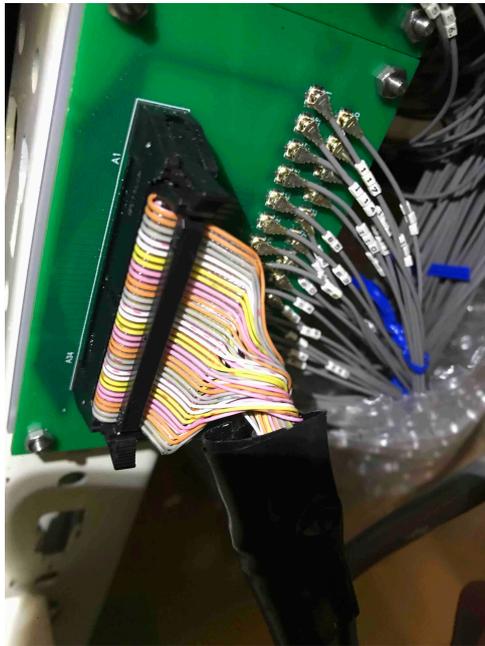


図 3.8: シンチレーショントラッカー: ケーブル変換基盤に接続された同軸ケーブルとフラットケーブル

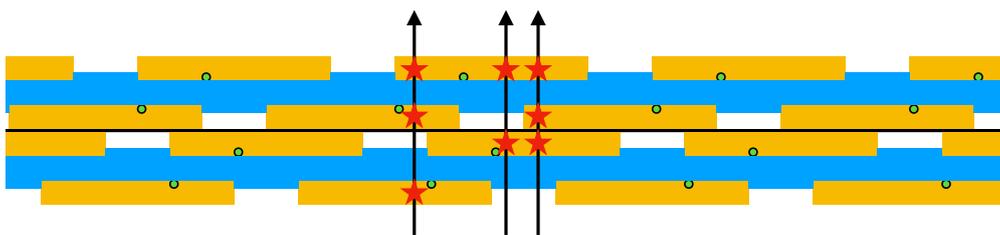


図 3.9: シンチレーショントラッカー: ずれた状態で重なっているシンチレータバー [6]

第4章 エレクトロニクス

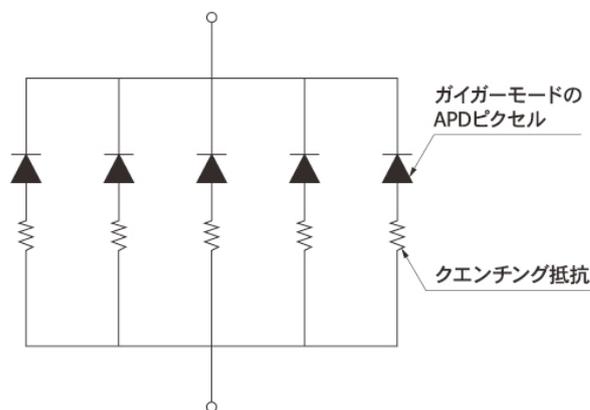
本章では本研究に用いたエレクトロニクスについて述べる。

4.1 MPPC

MPPC(Multi Pixel Photon Counter) は浜松フォトニクスが開発した半導体光検出器であり、APD(Avalanche Photo Diode) をマルチピクセル化して作られている。MPPCはAPDに降伏電圧以上の電圧を加えたガイガーモードで用いることで、優れたフォトンカウンティング能力を持つ。ガイガーモードのAPDに光子が入射するとガイガー放電が起こり印加電圧とブレイクダウン電圧 V_{bd} の差に比例した電荷が出力される。出力される電荷 Q は C をAPDのキャパシタンスとすると以下の式で表せる。

$$Q = C(V - V_{bd}) \quad (4.1)$$

ガイガー放電は入射した光子の数に関わらず起こるため図4.1のように複数のAPDを並列に並べることで入射した光子数に応じた電荷が出力され、光子数を計測することができる。また、クエンチング抵抗はガイガー放電が起こった後にクエンチング抵抗における電圧降下によってAPDの電圧をブレイクダウン電圧まで下げてアバランシェを止める役割がある。



KAPDC0029JA

図 4.1: MPPC の構造 [7]

4.1.1 ダークノイズ

MPPCは光子が入射していない場合でも熱電子などによって放電が起こることがあり、この現象をダークノイズと呼ぶ。ダークノイズの単位時間当たりのレートは印加電圧と温度に依存しており、印加電圧と温度が高い程レートは高くなる。ダークノイズでも1p.e.と同等の電荷が出力されるため、実際に光子が来た場合と区別することはできない。

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主に原子力実験や素粒子実験に用いられる回路の規格である。それぞれのモジュールは実験で頻繁に必要とされる単一の機能を持っている。またNIMの論理信号の電圧の規格は $-0.8V$ がYES信号、 $0V$ がNO信号となっている。図4.2は本研究で用いたNIMモジュールとクレートの写真である。また本研究で用いたNIMモジュールの機能を表4.1に載せる。



図 4.2: 本研究で用いた NIM

4.3 EASIROC module

EASIROC(Extended Analogue Silicon-pm Integrated Read Out Chip)はフランスのEcole Polytechniqueのオメガグループが開発したMPPC用読み出し用ASICである。1つのチップで32chのMPPCを読み出し可能であり、バイアス調整、波形整形増幅器、discriminatorなどの機能を備えている。EASIROC moduleはこのASICチップを2枚搭載したモジュールであり、最大64chのMPPCを接続することができる。図4.3にEASIROC ASICの概略図を載せる。

MPPCの信号をデータに読み出すときMPPCの信号はアナログ信号ではなくデジタル信号に変換する必要がある。この変換をADC(Analog-to-Digital Converter)と呼ぶ。ADCの方法は電圧

モジュール名	機能
EASIROC module	汎用 MPPC 読み出しモジュール 最大 64 チャンネルの MPPC を同時駆動することができる。
Gate Generator	YES 信号が入力されると、設定した時間だけ遅延させ、 設定した時間幅の YES 信号を出力する。
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 YES 信号を出力する。 今回用いたモジュールの遅延時間は 100 ns
Fan I/O	入力端子のいずれかに YES 信号が入力されると YES 信号を出力する。 論理演算の論理和 (OR) の役割
Coincidense	入力端子のすべてに YES 信号が入力されると YES 信号を出力する。 論理演算の論理積 (AND) の役割
Clock Generator	設定した周期、時間幅の YES 信号を出力する。

表 4.1: 本研究で用いた NIM モジュール

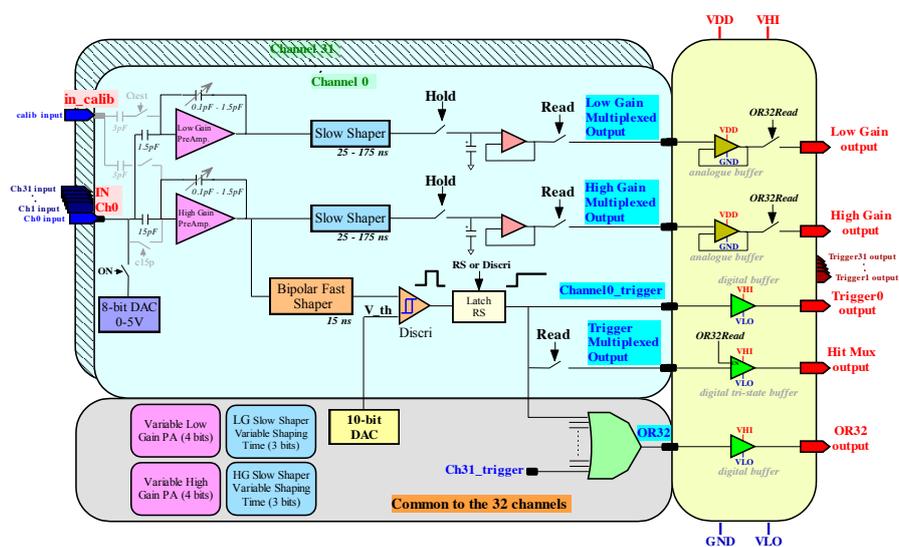


図 4.3: EASIROC ASIC の回路概略図 [8]

を測定する波高検出型 ADC と一定時間幅の電圧を積分し電荷を測定する電荷積分型 ADC の 2 種類が一般的であるが、EASIROC module は波高検出型 ADC を行う。

EASIROC module が MPPC のデータを読み出す流れを説明していく。まず、EASIROC module に入力された MPPC の信号は増幅倍率の異なる high gain PreAMP と low gain PreAMP に 10:1 の割合で分配され増幅される。増幅率は可変であり、high gain 側で 10 から 150 倍、low gain 側で 1 から 15 倍に増幅する。high gain 側の信号は fast shaper と slow shaper の 2 つの成形器に分配される。

fast shaper では時間測定用に 15 ns の立ち上がり時間で成形されて discriminator に送られる。discriminator に信号が送られた後、後述するピークホールドのための trigger 信号が発行される。slow shaper では 28 ns から 180 ns の間で可変な立ち上がり時間で成形されて電荷測定が行われる。電荷測定で波高を検出する際、自動でピークの検出はされないため波高のピークを一定時間保持させる必要がある。これをピークホールドと呼ぶ。EASIROC module の HOLD 入力端子に信号が入力されると slow shaper 以降の回路が遮断され、この時点の波高をキャパシタが保持することでピークホールドが行われる。このホールドのタイミングは使用者の手で調整する必要がある。図 4.4 から図 4.5 にホールドされていないときの波形、正しくピークホールドされている波形、ホールドのタイミングが遅いときの波形を示す。EASIROC module は multi hit TDC(Time-to-Digital Converter) という各チャンネルの立ち上がり時間と立ち下がり時間を記録する機能を持っている。これは ASIC チップの機能ではなく EASIROC module に搭載された FPGA(Field-Programmable Gate Array) に実装された機能である。multi hit TDC は HOLD 信号が入力されてからレンジ 4096 ns の内に TSTOP 信号が入力されるまで記録を行う。また、multi hit TDC は ADC と独立に動いているため電荷測定している間に入力された MPPC 信号も記録することができる。表 4.2 に本研究で使用する EASIROC module の信号を載せる。

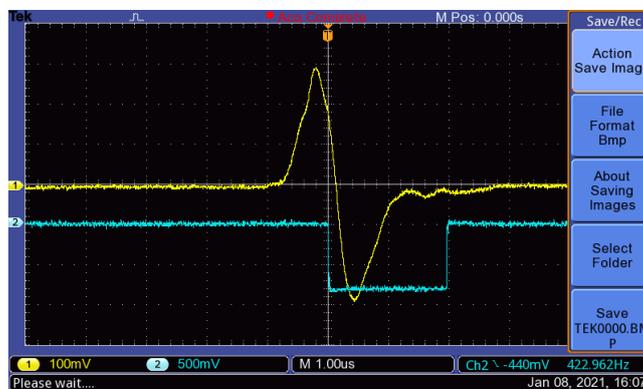


図 4.4: hold されていない波形；黄色の波形は MPPC の信号、青色の波形は HOLD 信号

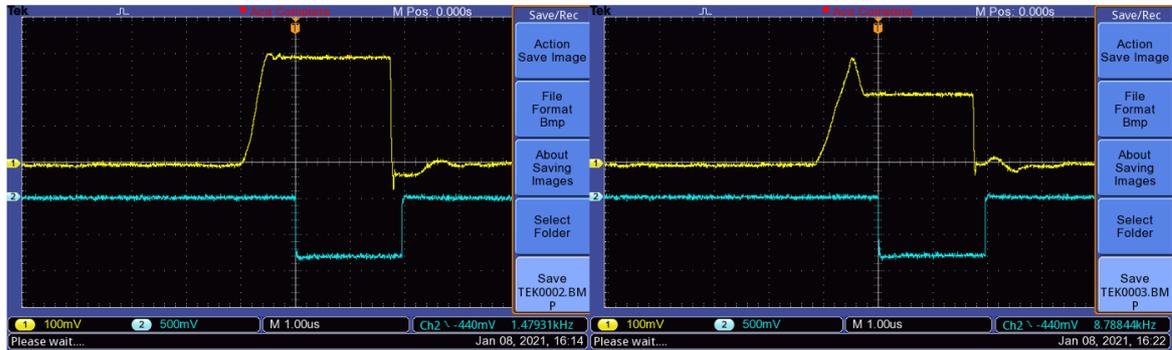


図 4.5: 正しく hold された波形 (左) とピーク後に hold された波形 (右)

デジタル 入力信号	HOLD ACCEPT	信号が入力されるとピークホールドを行う。 信号が入力されると次のデータを取ることを許可する。 TSTOP 信号の十分あとに入力する。
	TSTOP	信号が入力されたタイミングが multi hit TDC の時間基準点となる。 HOLD 信号が入力されてから 4096 ns 以内に入力する必要がある。
デジタル 出力信号	TRIG SYNC OUT	discriminator に送ら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場合トリガー信号が出力される。 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。 複数の EASIROC module の同期のために使用される。
アナログ 出力信号	HG1/2	各チップにおける high gain 信号が slow shaper を通った後にピークホールドされた波形を出力する。

表 4.2: EASIROC module の信号

第5章 EASIROC moduleを用いた MPPC の測定

J-PARC での運用試験の前に横浜国立大学にて EASIROC module を用いた MPPC の測定を行った。測定の方法と結果を述べる。

5.1 測定方法

MPPC に LED を照射し、その光量の測定を行った。図 5.1 に MPPC の測定に用いたエレクトロニクスのセットアップを示す。

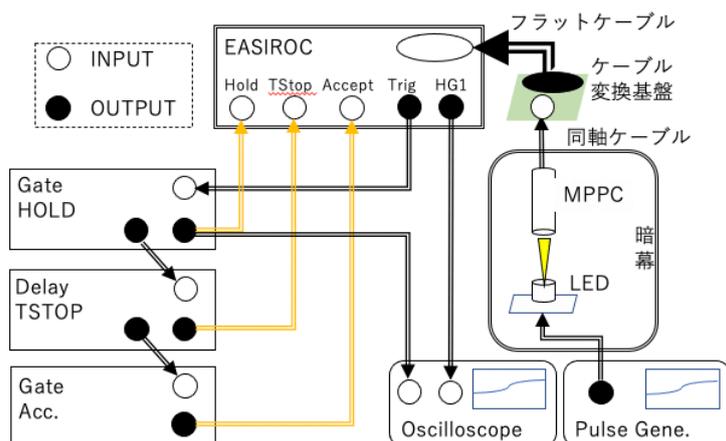


図 5.1: セットアップ

MPPC と LED は図 5.2 のような配置で箱の中に設置し、この箱を暗幕で覆い遮光した。LED は $1\text{ k}\Omega$ の抵抗と直列で接続させ、Pulse Generator を用いて周期 1 kHz 、時間幅 $10\ \mu\text{s}$ 、電圧 1.21 V のパルス電圧を加えた。MPPC は同軸ケーブルによってケーブル変換基盤と接続した。そして、基盤に接続したフラットケーブルを EASIROC module に接続した。EASIROC module のトリガー条件は MPPC を接続している ch が閾値を超えた場合とした。また閾値はすべての光量を測定できるように EASIROC で用いられる閾値パラメータである DAC code を十分低い 750 に設定した。EASIROC module の TRIG 信号は GateGenerator(HOLD) で適切にピークホールドで



図 5.2: LED (左側) と MPPC (右側) の配置

きるように遅延させ、出力信号を EASIROC module の HOLD に信号を入力した。GateHOLD の出力信号を FixedDelay(DelayTSTOP) に入力して 300 ns 遅延させて、TSTOP 信号を入力した。TSTOP 信号は HOLD 信号の後に入力されれば良い事に加え、MPPC を 1 チャンネルしか接続していない場合 multi hit TDC の機能は必要ないため TSTOP 信号が入力されるタイミングは今回のタイミングで問題はない。その後、DelayTSTOP の出力信号を GateGenerator(Gate Acce.) に入力し、1 ms 遅延させて ACCEPT 信号を入力した。図 5.3 にこの測定における各信号のタイミングチャートを示す。

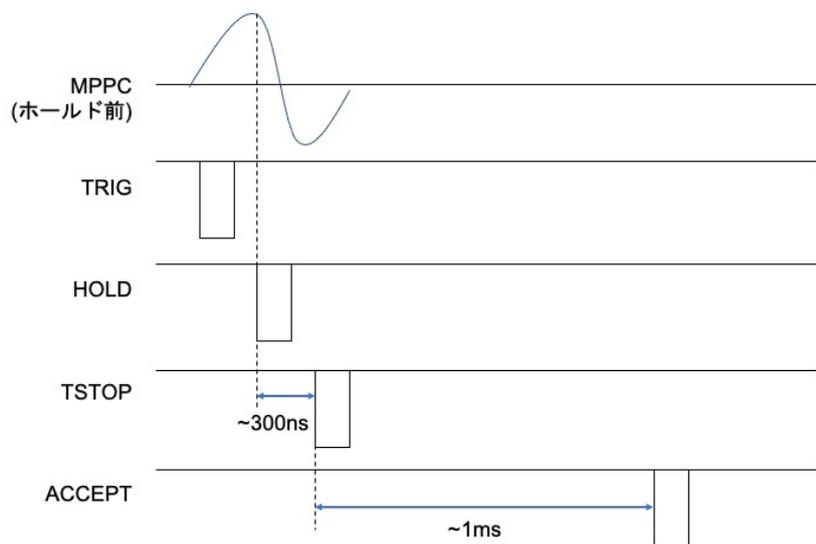


図 5.3: 各信号のタイミングチャート

5.2 測定結果

測定の結果を図 5.4 に示す。横軸は EASIROC module で測定した MPPC 信号の ADC カウントであり、縦軸はそのエントリー数である。光量を計算するにはゲイン (1 光子 (p.e.) 当りの ADC カウント) を計算する必要がある。0 p.e. に当たるペDESTAL と 1 p.e. のピークに図 5.5 のようにダブルガウシアンフィッティングをすることで 2 つのピークの中央値の差を計算しその値をゲインとした。

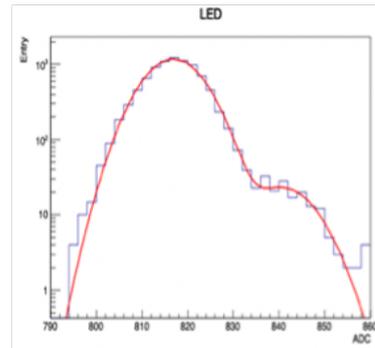
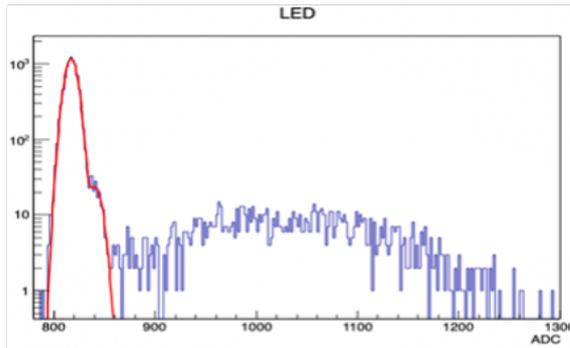


図 5.4: LED を照射したときの ADC 分布

図 5.5: ペDESTAL と 1 p.e. 付近の ADC 分布。赤い曲線はダブルガウシアンフィッティング結果

フィッティングの結果ゲインは 24 ADCcount/p.e. となった。この結果から、図 5.4 における 900 ~1200 ADC に分布している LED 光によるイベントは 3~16 p.e. であることが分かる。

第6章 シンチレーショントラッカーの運用 試験

2021年1,2月に、J-PARC,NM棟にてシンチレーショントラッカーの運用試験を行った。試験は以下の手順で行った。

1. シンチレーショントラッカーのDAQエレクトロニクスの組み上げ
2. データを取得
3. 各chのADC分布をもとに、故障しているchの確認
4. ピークサーチによるゲインキャリブレーション
5. ゲインをもとに宇宙線イベントの統計を取得
6. 宇宙線イベントの飛跡を確認

6.1 DAQエレクトロニクスの組み上げ

シンチレーショントラッカーで用いる4台のEASIROC moduleを同時に駆動するためDAQエレクトロニクス(図6.1)とそのデータ収集システムについて説明する。

シンチレーショントラッカーではEASIROC moduleをY軸用とX軸用にそれぞれ2台ずつの計4台使用する。Y軸とX軸の両方でトリガーがかかったときにデータ取得を行うシステムを組んだ。Y軸とX軸のEASIROC moduleTRIG信号をそれぞれFAN Y,Xに通した後にCOIN Trig.に通してAND信号にした。このAND信号をXYトリガーと呼ぶ。

次に、データ取得のレートを一定にするためのシステムを組み込んだ。まず、Clock Generatorを用いて周期100Hzの信号を作り、この信号の時間幅を $6\mu\text{s}$ になるようにGATE BEAMを用いて調節した。なお、実際のビームテストではビームトリガーが2.48s周期で送られてくるためClock Generatorを用いることはない。GATE BEAMの信号をビームトリガーと呼ぶ。ビームトリガーをGATE Dum.とCOIN ALLに送った。GATE Dum.の信号をダミートリガーと呼ぶ。ビームトリガーの時間幅 $6\mu\text{s}$ の間にXYトリガーがなかった場合でもデータ取得を行うために、ダミートリガーがビームトリガーの最後に送られるように $5\mu\text{s}$ 遅延させた。ビームトリガーとダミートリガーのタイミングチャートを図6.2に載せる。その後、ダミートリガーとXYトリガーをFAN Trig.に送りOR信号とした。このOR信号をCOIN ALLに送り、ビームトリガーとのANDをとった。また、COIN ALLには4台のEASIROC moduleの同期のためにEASIROC module Y1からSync. OUT信号を送った。

COIN ALLの信号をGATE(FAN) HOLD、TSTOP、Acce.に通し、各EASIROC moduleのデジタル入力信号に送った。また、運用試験では利用していないがビームテストではmulti hit TDC

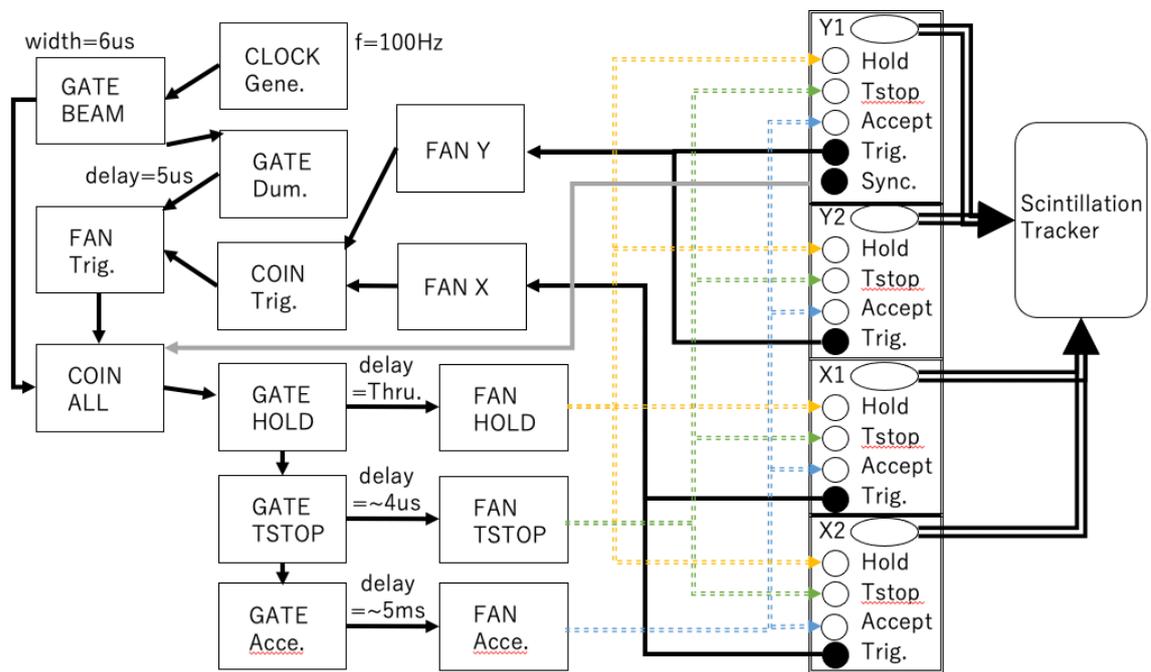


図 6.1: DAQ エレクトロニクス

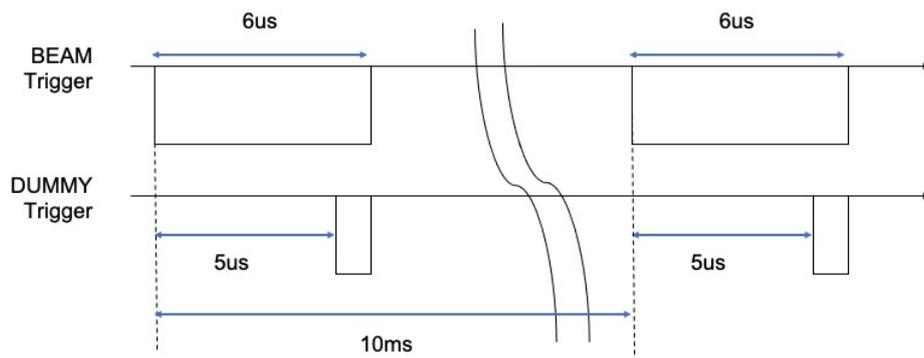


図 6.2: ビームトリガーとダミートリガーのタイミングチャート

を利用するため、HOLD 信号が入力されてから 4096 ns 以内に TSTOP 信号が入力されるように GATE TSTOP の遅延時間を $4\mu\text{s}$ に調節した。ACCEPT 信号は次の周期のビームトリガーより前に送られればよいので、4096 ns より十分長く、10 ms より短い 5 ms に遅延させた。

6.2 MPPC のダークノイズを用いた各チャンネルの点検

前節のデータ収集システムでデータを取得後、各チャンネルの ADC 分布のダークノイズの分布を確認し故障しているチャンネルが無いかどうか点検を行った。各チャンネルの ADC 分布を確認すると EASIROC のチップごとに ADC 分布の特徴が異なっていることが分かった。また、3 つチャンネルに関しては光量が著しく低く、1 つチャンネル (ch66) は同じチップのチャンネルと見比べてペDESTAL のピークしか得られていないことが分かった。図 6.3 に各チップの典型的な ADC 分布と故障している 4 つのチャンネルの ADC 分布を載せる。故障しているチャンネルに関しては、MPPC が故障していると考えられるため今後交換する必要がある。

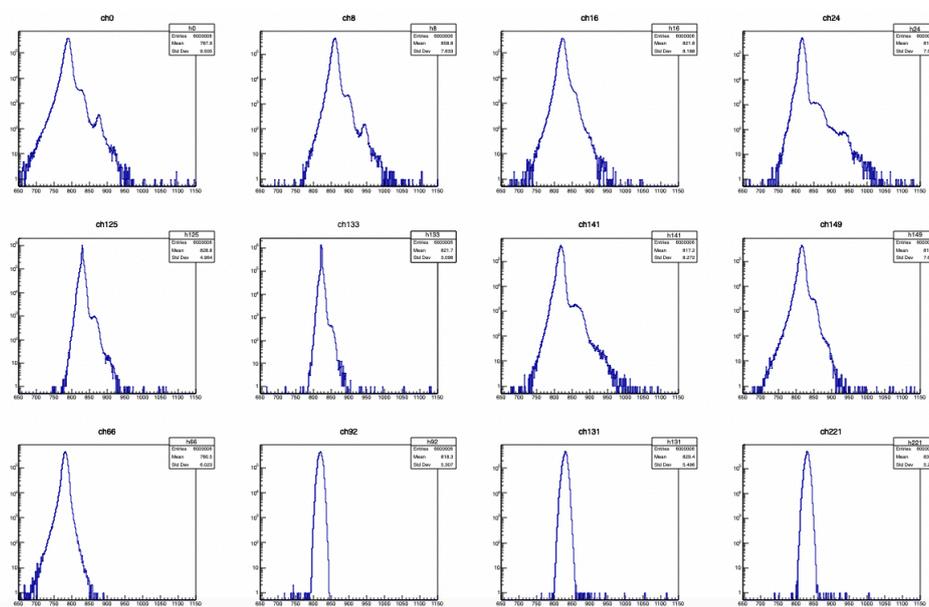


図 6.3: 上 2 段は正常な 8 つのチャンネルの ADC 分布。下 1 段は故障していると考えられる 4 チャンネル

6.3 ゲインキャリブレーション

各 ch を点検後、故障しているチャンネル以外のチャンネルのゲインキャリブレーションを行った。ペDESTAL、1p.e.、2p.e. のピークが測定できているため、ピークサーチを用いて 3 つのピークの中央値を探し、それら 3 つで線形フィッティングを行い、ゲインを算出した。

図 6.4 にピークサーチの結果を示す。多くのチャンネルは3つのピークを正しくサーチすることができたが、図 6.5 のように正しくピークサーチが行えていないチャンネルが 10 チャンネルあった。この 10 チャンネルに関してはペDESTALと 1p.e. の差をゲインとした。

ピークサーチを正しく行えたチャンネルは図 6.6 のように横軸を p.e.、縦軸を ADC として、3

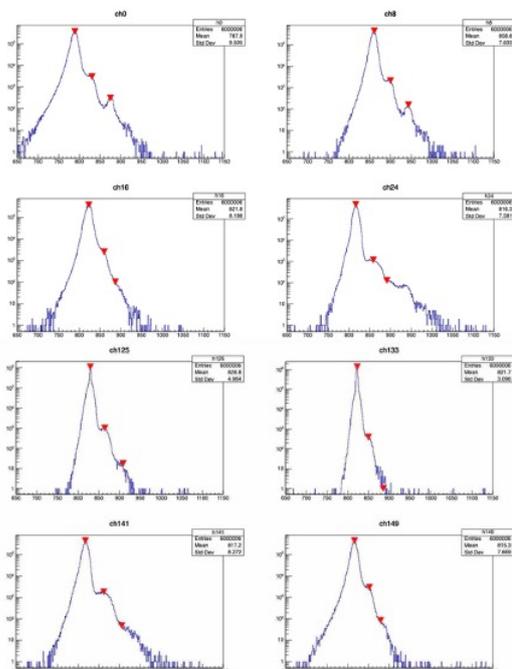


図 6.4: ピークサーチの結果

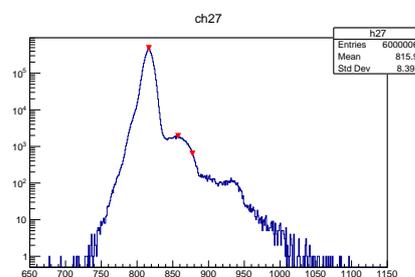


図 6.5: ピークサーチの失敗例

つのピークの (p.e., ADC) を一次関数でフィッティングを行い、その傾きをゲインとした。図 6.7 に 244 チャンネルのゲインキャリブレーションの結果を示す。横軸は各 EASIROC module のチャンネル番号、縦軸はそのチャンネルに接続された MPPC のゲインを表す。各チップごとのゲインのばらつき (平均値に対する標準偏差の割合) は約 3~20% となった。

6.4 宇宙線イベント

ゲインを計算した後、各チャンネルの最小電離粒子に対する平均光量を測定した。5.5p.e. 以上のイベントが宇宙線イベントであるとして、全体の ADC 分布から 5.5p.e. 以上に相当する領域を抜き出して解析を行った。全 244 チャンネルの宇宙線イベントの平均光量とイベント数を図 6.8 に結果を示す。図 6.8 から宇宙線イベント数が 0 であったチャンネルが 3 チャンネルあった。このチャンネルはシンチレーションバーやファイバが破損しているために光量が得られなかった可能性があるが、測定時間が足りていない可能性もある。今後は宇宙線イベントの観測時間を伸ばし、より詳細に解析を行う。また、イベント数が極端に多いチャンネルが 1 チャンネルあった。このチャンネルに関しては遮光が不十分であった可能性があるため、2021 年 3 月のニュートリノビーム照射前

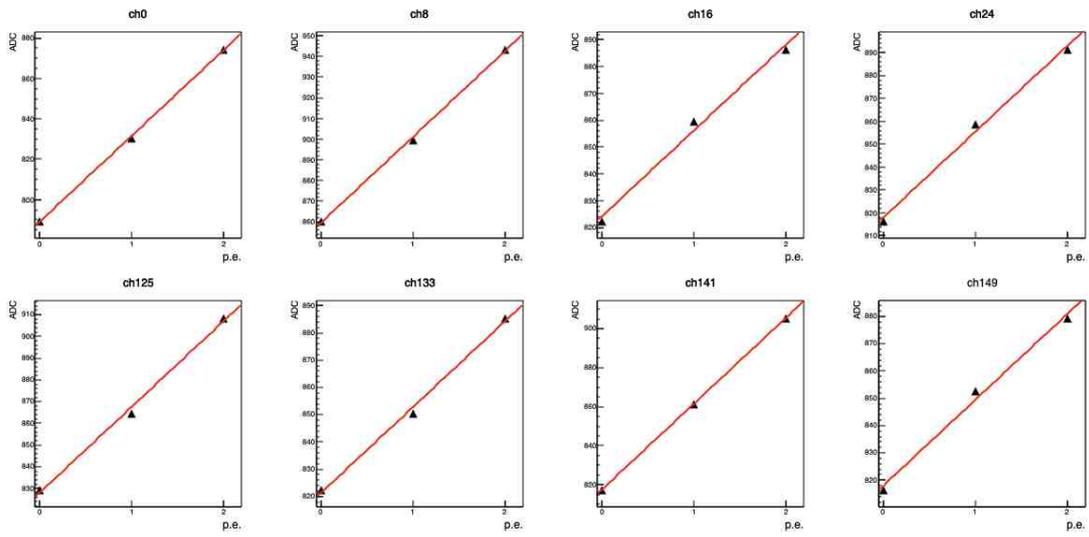


図 6.6: p.e. 数と ADC カウントの関係。

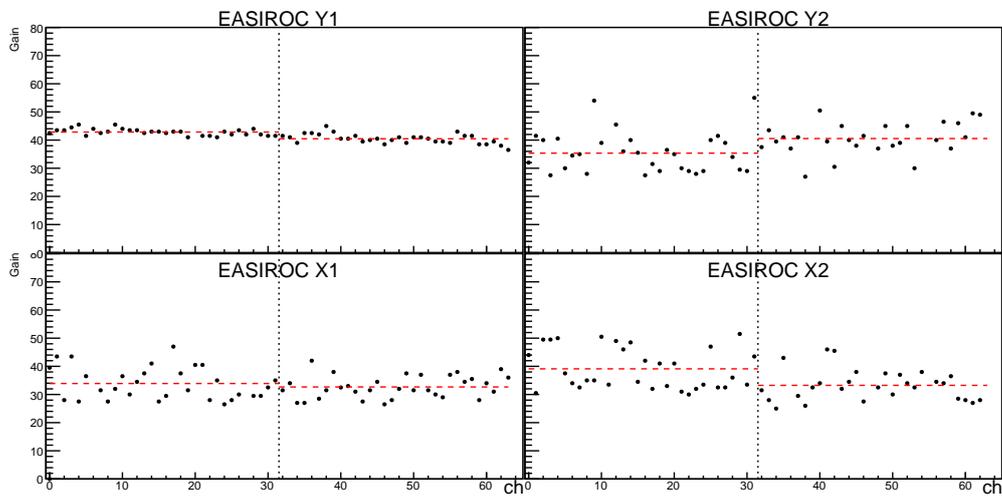


図 6.7: 各チャンネルのゲイン。赤の直線は各チップのゲインの平均値を表す。

に遮光の状態を確認する。

図 6.9 にシンチレーショントラッカーで観測されたある 1 つの宇宙線イベントのイベントディスプレイを示す。赤い四角は発光があったチャンネルを表しており、宇宙線が通過した場所に飛跡が見て取れる。

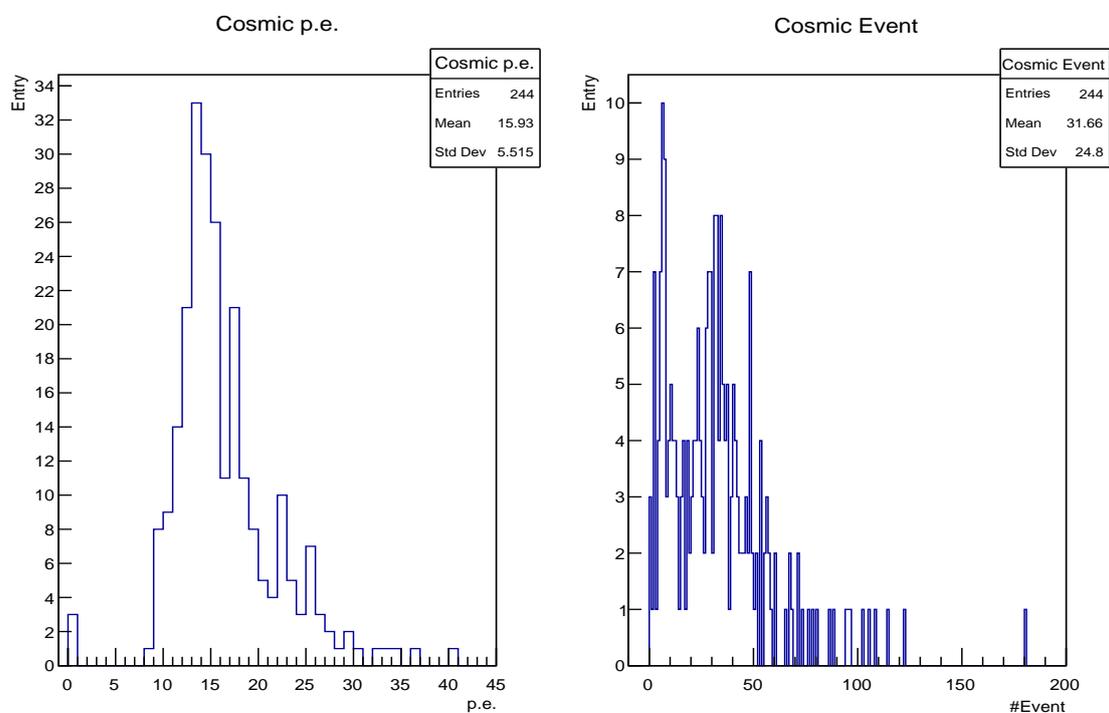


図 6.8: 左；宇宙線イベントの平均光量、右；宇宙線イベント数。

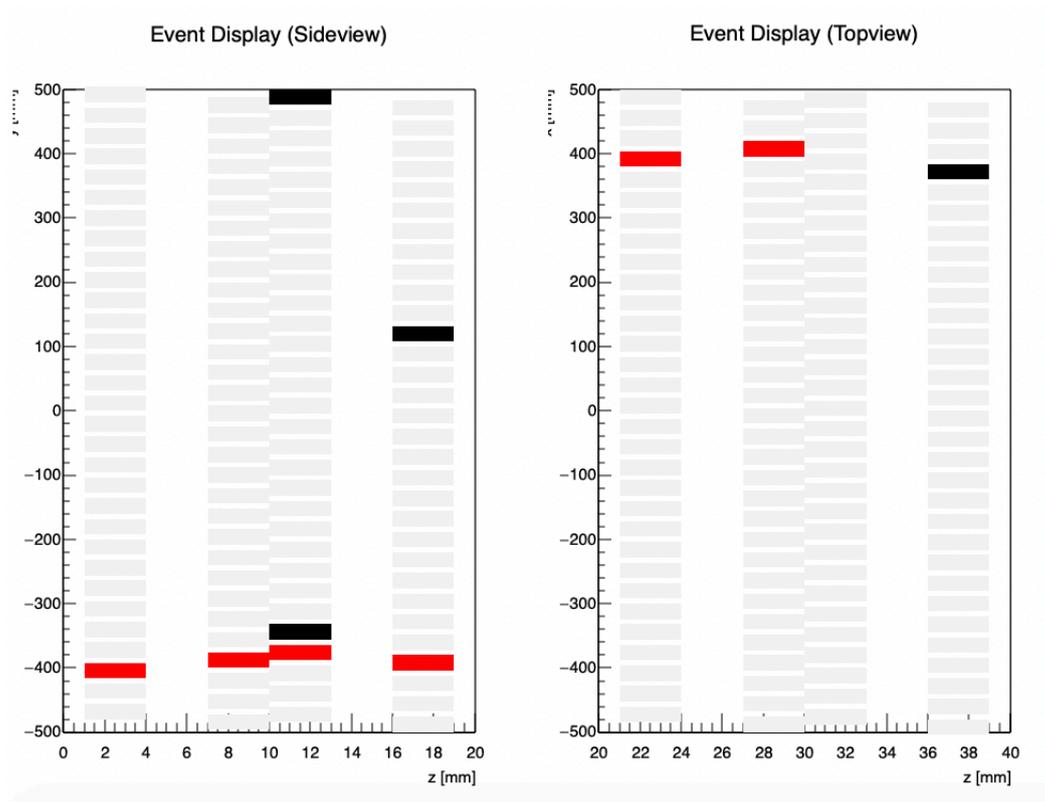


図 6.9: 宇宙線イベントディスプレイ。赤は発光があったチャンネル、黒は MPPC が故障している 4 チャンネル

第7章 まとめと展望

本研究では2021年3月に行われるニュートリノビーム測定に向けて、NINJA実験におけるシンチレーショントラッカーのDAQエレクトロニクスの組み上げと運用試験を行った。運用試験では使用している248チャンネルのうち、4チャンネルはMPPCが故障していることがわかった。また、3チャンネルはシンチレータバーもしくは波長変換ファイバが故障している可能性があることが分かり、今後宇宙線イベントの測定時間を増やして調査を進める。2021年度に行われる次回のニュートリノビーム測定までに交換を行う必要がある。また、1チャンネルに関しては光量がほかのチャンネルよりも多く測定されていたため、ニュートリノビーム照射前に遮光を確認を行う。本研究により、NINJA実験のシンチレーショントラッカーは、2021年3月からのニュートリノビーム測定に向けた準備を完了できた。

謝辞

本研究に際して、多くの方々にご支援、ご協力いただきました。この場を借りて感謝の意を表します。

指導教員の南野彰宏准教授には、研究から進路の事まで大変手厚くご支援いただきました。また、私が研究に行き詰まった時には親身に相談に乗っていただき、解決へと導いてくださいました。深く感謝申し上げます。

福田努 YLC 特任助教には J-PARC への出張に際し、大変お世話になりました。NINJA 実験のような最先端の研究に携わらせていただいた事に大変感謝申し上げます。

京都大学高エネ研 D1 の小田川さんには、EASIROC module の使い方からシンチレーショントラックの立ち上げ、データの解析方法など、本研究に際し多大なるご支援とご指導いただきました。ここに御礼申し上げます。

研究室の方々にはコロナ禍で直接お会いする機会はあまりありませんでしたが、ミーティングやゼミでの皆さんの熱意に触れることができたおかげで自分も研究を続けることができました。特に同期の藤中くんは J-PARC の出張中など、卒業研究に向け互いに助言し合って切磋琢磨する事ができました。感謝申し上げます。

参考文献

- [1] The T2K Experiment (<https://t2k-experiment.org>)
- [2] J-PARC 大強度陽子加速器施設 (<http://j-parc.jp/Acc/ja/index.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公式ホームページ (<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index.html>)
- [6] 小田川高大 (2020, 京都大学, 修士論文). 「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クの開発」
- [7] 浜松ホトニクス MPPC データシート
- [8] Omega 社 EASIROC Data sheet