

修士論文

T2K 長基線ニュートリノ振動実験における
INGRID 検出器によるニュートリノイベントの探索
(Search for Neutrino Events by the INGRID Detector of
the T2K Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment)

大阪市立大学大学院
理学研究科 数物系専攻
尾崎 称



概要

T2K (Tokai to Kamioka) 実験は、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 (J-PARC) にて生成された大強度ニュートリノビームを、295km 離れた岐阜県神岡町にあるスーパーカミオカンデに向けて打ち込み、各検出器で観測されるニュートリノ反応を比較してニュートリノ振動を観測するものである。ニュートリノ振動とは、ニュートリノが空間を伝搬中に異なるフレーバーのニュートリノに変化する現象であり、振動の確率は2成分の場合で以下のように表される。

$$P(t; \nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(1.27 \cdot \Delta m^2 [\text{eV}^2] \cdot \frac{L[\text{km}]}{E[\text{GeV}]} \right)$$

ここで、 t は時間、 α, β はニュートリノのフレーバー、 L, E はニュートリノの飛行距離およびエネルギー、 $\theta, \Delta m^2$ は混合角および質量自乗差である。T2K 実験では、各振動パラメータの精密測定、ならびに未発見の振動モードである ν_e appearance の発見を目的とする。

本研究では、ニュートリノビームモニター INGRID (Interactive Neutrino GRID) の製作と性能評価、および INGRID を用いたニュートリノイベントの検出を行った。INGRID はシンチレータトラッキングプレーン 11 枚と、鉄標的 9 枚が交互に並んだ構造のモジュールを、縦横合わせて 16 個配置した検出器である。入射したニュートリノビームは、INGRID 内部で CCQE (Charged Current Quasi Elastic) 反応を起こし、荷電粒子の軌跡を残す。これを検出することで、ニュートリノイベントを探索するとともに、各モジュールで検出されるイベント数分布からビーム中心を再構成する。INGRID の内部では、プラスチックシンチレータで発光したシンチレーション光を、波長変換ファイバーで吸収・波長変換・放射し、小型の光検出器 MPPC (Multi Pixel Photon Counter) で読み出す。我々は 2008 年 8 月からトラッキングプレーンを一枚ずつ手作業で製作し、現在までの間に、宇宙線光量測定による性能評価、モジュールの組み立て、ピット内へのインストールを完了した。また、2009 年 11 月から INGRID で検出され始めているニュートリノイベントについて報告する。

目次

1	序論	2
1.1	ニュートリノ	2
1.2	ニュートリノ振動	2
1.2.1	振動確率	2
1.2.2	ニュートリノ振動実験と振動パラメータ	4
2	T2K 実験	6
2.1	実験の概要	6
2.2	ニュートリノ振動の測定方法	7
2.3	ニュートリノビームライン	7
2.3.1	On-axis Detector -INGRID-	9
2.3.2	Off-axis Detector	9
2.4	前置検出器 - ND280	10
2.5	後置検出器 - スーパーカミオカンデ	11
2.6	off-axis ビーム	13
3	INGRID(Interactive Neutrino GRID detector) 検出器	14
3.1	INGRID に対する要請	14
3.2	INGRID の構造	16
3.2.1	トラッキングプレーン	17
3.2.2	VETO プレーン	18
3.3	INGRID アクティブコンポーネント	18
3.3.1	シンチレーター	18
3.3.2	波長変換ファイバー	19
3.3.3	MPPC	20
4	INGRID の製作と宇宙線光量測定	25
4.1	トラッキングプレーンの組み立て	25
4.2	INGRID トラッキングプレーンの性能評価	27
4.2.1	MPPC のノイズ試験	27
4.2.2	宇宙線光量測定による性能評価	28
4.2.3	検出効率	34
5	モジュールの組み立てとインストール	36
5.1	問題点と解決策	36
6	ニュートリノイベントの探索	39
6.1	画像処理によるニュートリノイベント探索の効率化	39
6.2	ニュートリノイベントの検出	42

1 序論

1.1 ニュートリノ

ニュートリノとは、重力相互作用を除く弱い相互作用のみが働く中性レプトンである。1930年、ニュートリノは β 崩壊で放出される粒子のエネルギー保存のために Pauli によって予言され、中性の小さいものという意味でニュートリノと名づけられた。1934年には Fermi によって理論的に定義づけられた。また、ニュートリノは弱い相互作用しかしないため直接検出することが大変困難であったが、原子炉からの反電子ニュートリノを逆 β 崩壊によって捕えることで、1956年、Reins と Cowan によって実験的にもその存在が確かめられた。その後、1962年には π 中間子の崩壊過程で生じるニュートリノビームを標的に当てることで、ミューオンニュートリノが発見された。続いて、2000年にはタウニュートリノ発見され、1995年には CERN で行われた LEP 実験において、Z ボソンの崩壊幅測定からニュートリノの世代が3世代、すなわち ν_e, ν_μ, ν_τ が存在することが明らかになった。

ニュートリノの質量は、現在標準理論において0とされているが、1998年にスーパーカミオカンデグループによって大気ニュートリノの世代間振動が観測されたことから、ニュートリノに有限の質量があることが明らかとなった。

1.2 ニュートリノ振動

1.2.1 振動確率

弱い相互作用の固有状態(ν_e, ν_μ, ν_τ)と質量の固有状態(ν_1, ν_2, ν_3)とは一般的に同じでない。例えば生成された ν_μ は $\nu_\mu = \sum c_i \nu_i$ と書ける。ニュートリノが微小でも質量を持つとすれば、各 ν_i は空間中を各々の質量の違いに対応して異なった速度で伝搬し、生成時とは異なった弱い相互作用の固有状態として検出されるはずである。これをニュートリノ振動という。3種類のニュートリノは質量の固有状態の混合状態になっており、

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

と書くことができる。また、3世代間の混合行列UはMNS(牧・中川・坂田)行列と呼ばれ、3つの混合角 $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ 及び、1つの複素位相 δ を用いて、

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

$$= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

と表わされる。このとき、 s_{ij}, c_{ij} はそれぞれ $\sin\theta_{ij}, \cos\theta_{ij}$ を表わす。

ここで、 ν_μ, ν_e 間の真空中での振動確率を考える。単位系は自然単位系を用いる。時刻 t における質量の固有状態を ν_1, ν_2 とし、それぞれの質量を m_1, m_2 とすると、 ν_e, ν_μ は、混合 θ を用いて、

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu(t) \\ \nu_e(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1(t) \\ \nu_2(t) \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

と表せる。時間発展の *Schrödinger* 方程式とその解は

$$\begin{aligned} i \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \nu_1(t) \\ \nu_2(t) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} E_1 & 0 \\ 0 & E_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1(t) \\ \nu_2(t) \end{pmatrix} \\ \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \nu_1(t) \\ \nu_2(t) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \nu_1(0)e^{-iE_1 t} \\ \nu_2(0)e^{-iE_2 t} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (1.5)$$

である。これを (1.4) 式より与えられる 2 つの式のうち第 1 式に代入して、

$$\begin{aligned} \nu_\mu(t) &= \nu_1(t)\cos\theta + \nu_2(t)\sin\theta \\ &= \nu_1(0)\cos\theta e^{-iE_1 t} + \nu_2(0)\sin\theta e^{-iE_2 t} \end{aligned} \quad (1.6)$$

また、(1.4) 式の逆行列をとって、

$$\begin{pmatrix} \nu_1(t) \\ \nu_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\mu(t) \\ \nu_e(t) \end{pmatrix}. \quad (1.7)$$

今、時刻 $t=0$ で ν_μ のみが存在したとすると、 $\nu_\mu(0) = 1, \nu_e(0) = 0$ となるから

$$\begin{pmatrix} \nu_1(0) \\ \nu_2(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{pmatrix}. \quad (1.8)$$

以上より、

$$\begin{aligned} \nu_\mu(t) &= \cos\theta\nu_1(t) + \sin\theta\nu_2(t) \\ &= \nu_1(0)\cos\theta e^{-iE_1 t} + \nu_2(0)\sin\theta e^{-iE_2 t} \\ &= \cos^2\theta e^{-iE_1 t} + \sin^2\theta e^{-iE_2 t} \end{aligned} \quad (1.9)$$

となる。時刻 t で ν_μ を観測する確率は、

$$\begin{aligned}
P(t; \nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) &= \left| \frac{\nu_\mu(t)}{\nu_\mu(0)} \right|^2 = \left| \nu_\mu(t) \right|^2 = \nu_\mu^*(t) \nu_\mu(t) \\
&= (\cos^2\theta e^{iE_1 t} + \sin^2\theta e^{iE_2 t})(\cos^2\theta e^{-iE_1 t} + \sin^2\theta e^{-iE_2 t}) \\
&= \sin^4\theta + \sin^2\theta \cos^2\theta e^{-i(E_1 - E_2)t} + \sin^2\theta \cos^2\theta e^{i(E_1 - E_2)t} + \cos^4\theta \\
&= (\sin^2\theta + \cos^2\theta)^2 - 2\sin^2\theta \cos^2\theta + \sin^2\theta \cos^2\theta (e^{-i(E_1 - E_2)t} + e^{i(E_1 - E_2)t}) \\
&= 1 - 2\sin^2\theta \cos^2\theta + \sin^2\theta \cos^2\theta 2\cos(E_2 - E_1)t \tag{1.10} \\
&= 1 - 2\sin^2\theta \cos^2\theta (1 - \cos(E_2 - E_1)t) \\
&= 1 - \frac{\sin^2 2\theta}{2} (1 - \cos(E_2 - E_1)t) \\
&= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{E_2 - E_1}{2} t.
\end{aligned}$$

ここで、 $m \ll p$ のとき $E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \simeq p + \frac{m_i^2}{2p}$ ($i = 1, 2$) と近似できる。また、時間 t の間にニュートリノが走る距離は、 $L = ct = t$ (自然単位系) である。L は飛行距離 [km]、 Δm^2 は質量 2 乗誤差 [eV^2]、E はニュートリノのエネルギー [GeV] であるから、最終的に振動確率 P は

$$\begin{aligned}
P(t; \nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) &= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{(m_2^2 - m_1^2)}{4p} t \\
&= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta m^2}{4p} t \quad (\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2) \tag{1.11} \\
&= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 1.27 \frac{\Delta m^2}{E} L
\end{aligned}$$

となる。これより、ニュートリノ振動の確率 P は 2 つのパラメーター ($\sin^2 2\theta, \Delta m^2$) を持ち、飛行距離 L およびエネルギー E_ν の関数として振動することがわかる。また、フレーバー状態が異なる質量固有状態の混合状態 ($\theta \neq 0$)、かつ、質量固有状態が縮退していない場合 ($\Delta m^2 \neq 0$) のみ振動が起こることがわかる。この振動確率が最小となる、すなわちニュートリノ振動の効果が最もよく表れるニュートリノのエネルギーは、

$$\frac{1.27 \Delta m^2 [eV^2] L [km]}{E [GeV]} = \frac{\pi}{2} \tag{1.12}$$

より求められる。T2K 実験においては $L=295\text{km}$ と一定値であるので、ニュートリノのエネルギーをこの式に合うように定めることで、ニュートリノ振動に対する実験の感度を上げることができる。

1.2.2 ニュートリノ振動実験と振動パラメータ

現在までに行われたニュートリノ振動実験の概要と、それによって割り出されたパラメータの値を以下にまとめる。

- $\Delta m_{23}^2, \theta_{23}$

1998年のスーパーカミオカンデによる大気ニュートリノの観測から、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_x$ ニュートリノ振動の存在が明らかになった。その後も加速器で人工的に作られたニュートリノを用いた、¹K2K 実験、MINOS 実験、OPERA 実験から同様のモードのニュートリノ振動が観測された。 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ を仮定した場合の振動パラメータは、90%の信頼度で以下のおとりである。

$$\Delta m_{23}^2 = 2.1 \sim 2.7 \times 10^{-3} eV^2$$

$$\sin^2 2\theta_{23} > 0.92$$

$$\theta_{23} \sim (45 \pm 8)^\circ$$

- $\Delta m_{12}^2, \theta_{12}$

スーパーカミオカンデ、SNO 実験による太陽ニュートリノの観測、また、カムランド原子炉における反電子ニュートリノの観測により、 $\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau$ というモードで振動が起きていることを発見した。その振動パラメータは 68%の信頼度で以下の通りである。

$$\Delta m_{12}^2 = 7.6 \sim 8.6 \times 10^{-5} eV^2$$

$$\theta_{12} = (33.9_{-2.2}^{+2.4})^\circ$$

- θ_{13}

θ_{13} については、CHOOZ 実験の結果から 90%の信頼度で以下の上限が与えられているのみである。

$$\Delta m_{13}^2 = 2.4^{-3} eV^2$$

$$\sin^2 2\theta_{13} < 0.14$$

¹T2K 実験の前身である K2K 実験は、茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 12GeV 陽子シンクロトロンで生成されたニュートリノビームを、250km 離れたスーパーカミオカンデに向けて打ち込んだ実験である。1999年6月～2004年11月にかけて行われた。



図 2.1: T2K 実験概要図

2 T2K 実験

2.1 実験の概要

T2K(Tokai-to-Kamioka) 実験は、茨城県東海村にある J-PARC で生成された加速器起源のミューオンニュートリノを、295km 離れた岐阜県神岡にあるスーパーカミオカンデ (Super KAMIOKA Nucleon Decay Experiment, 以下 SK) で検出する長基線ニュートリノ振動実験である。(図 2.1 参照)

本実験では、J-PARC・50GeV 陽子シンクロトロンにて陽子を 30GeV まで加速し、グラフアイト標的との衝突によって生成されたパイオンが飛行中に崩壊して生成されるほぼ純粋なミューオンニュートリノビームを、世界最大の水チェレンコフ型検出器である SK に向けて打ち出す。ビームは J-PARC 施設内の前置検出器によってモニターされ、ニュートリノビーム生成直後のフラックス、エネルギー分布、及び角度分布が測定され、これらのデータを元に SK でのニュートリノ反応事象数、及びエネルギースペクトルが予測される。そして、実際に SK で観測されたデータとの比較により、ニュートリノ振動のパラメーターを精密に測定する。この実験の主な目的は以下の 2 点である。

- 未発見の振動モードである、 ν_e appearance の発見、ならびに $\sin^2 2\theta_{13}$ の測定
本実験において $\sin^2 2\theta_{13}$ に対する感度は、 $\Delta m_{13}^2 = 3 \times 10^{-3} eV^2$ のとき 90% の信頼度で $\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.006$ である。
- ν_μ disappearance による $\sin^2 2\theta_{23}, \Delta m_{23}^2$ の精密測定
 $\sin^2 2\theta_{23} = 1.0$ のとき、90% の信頼度で $\delta(\Delta m_{23}^2) \sim 10^{-4} eV^2$ まで期待できる。

2.2 ニュートリノ振動の測定方法

- $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動場合

振動後の ν_τ は次の荷電カレント反応 (CC 反応) により τ 粒子を生成する。

$$\nu_\tau + N \rightarrow \tau^- + N' + \pi \quad (2.1)$$

ところが、T2K 実験で生成されるニュートリノのエネルギーは約 1 GeV であり、閾値が 3.47 GeV である τ 粒子を生成することができない。したがって、振動の効果は ν_μ 反応事象数の減少という形で観測する。このような観測方法を「 ν_μ disappearance」と呼ぶ。 ν_μ を観測するには、荷電カレント準弾性散乱 (CCQE 反応) を利用する。

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p \quad (2.2)$$

この反応は 2 体反応であるため、生成されるミューオンの運動量と入射ニュートリノビームに対する角度さえわかれば、ニュートリノのエネルギーは以下の式より決定することができる。

$$E_\nu = \frac{m_N E_\mu - m_\mu^2/2}{m_N - E_\mu + p_\mu \cos\theta_\mu}. \quad (2.3)$$

ここで、 m_N, m_μ はそれぞれ核子、ミューオンの質量、 E_μ, p_μ はそれぞれミューオンのエネルギーと運動量、 θ_μ はミューオンのニュートリノビームに対する角度である。

- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の場合

ν_e の観測にも CCQE 反応を利用する。この反応で生成される電子を検出することで、振動で生成された ν_e ニュートリノ反応を観測する。このような観測方法を「 ν_e appearance」と呼ぶ。検出器の中で起こる電磁シャワーを観測することで、最初に生成された元の電子を同定する。また、このとき、中性カレント π^0 生成反応の π^0 崩壊から出る 2 本の線がバックグラウンドとなる事象がある。そのため、前置検出器より ν_μ ビーム中の ν_e 混入率、およびバックグラウンド量を正しく評価する必要がある。

2.3 ニュートリノビームライン

J-PARC のニュートリノビームラインは、陽子を誘導する 1 次ビームラインと、陽子ビームが標的に衝突した後の 2 次ビームラインから成る。50 GeV に加速された陽子はグラファイトのターゲットへ向けて照射され衝突する。それによって生成された π^+ は電磁ホーンによって強く収束され、その後崩壊領域にて π^+ の崩壊からニュートリノが生成される。生成されるニュートリノの平均エネルギーは約 1 GeV である。図 2.2 にニュートリノビームラインの模式図を示す。

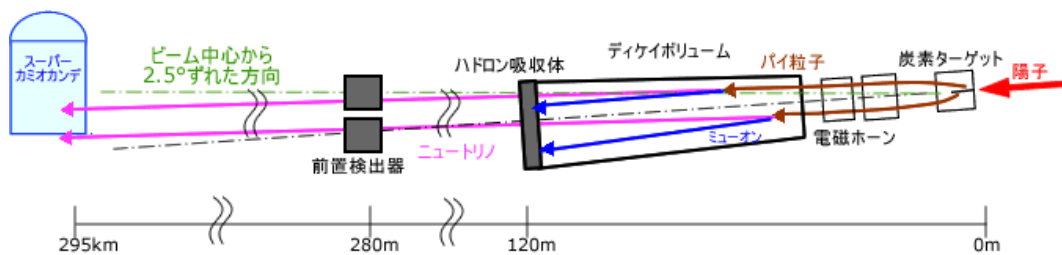


図 2.2: ニュートリノビーム生成の模式図

表 2.1: 陽子ビームパラメータのデザイン値

ビームエネルギー	50 GeV
ビーム強度	750kW
1 スピル内の陽子数	3×10^{14} 個
スピル幅	$4.3 \mu s$
1 スピル内のバンチ数	8 個
バンチ間隔	598nsec
バンチ幅	58nsec

- 一次陽子ビームライン

400MeV リニアック、3 GeV 陽子シンクロトロン、50GeV 陽子シンクロトロンで加速された陽子は、1 次陽子ビームラインによってSK の方向へ約 80° 曲げられ、二次粒子生成標的まで輸送される。陽子ビームパラメータのデザイン値を表 2.3 に示す。
- グラファイト標的

次に、陽子ビームは2 次粒子生成標的に照射されて大量のパイオンを生成する。グラファイト標的の長さは、ハドロン相互作用長の約 2 倍の 90cm、直径は約 26mm で、第一ホーンの内部に収容されている。また、ビームによる加熱を防ぐため、ヘリウムガスで冷却される。
- 電磁ホーン

グラファイト標的内で生成された π^+ は、3 台の電磁ホーンを通ることでビーム軸方向に収束される。電磁ホーンはトロイダル電磁石が成り、320kA の電流を流すことにより励磁される。
- 崩壊トンネル

電磁ホーンによって収束されたパイオンは、その後続く長さ約 94m の崩壊トンネルを通り抜けることで $\pi \rightarrow \mu \nu_\mu$ と崩壊し、ニュートリノを生成する。崩壊トンネルはヘリウムガスで満たされた鉄容器で、その周囲は約 6 m の厚いコンクリートシールドで覆わ

れており、さらに内部は水で冷却されている。トンネルの終端にはビームダンプが置かれ、陽子や崩壊せずに残ったパイオンなどのハドロン、低エネルギーのミュオンが吸収される。

- ミュオンモニター

ビームダンプの直後にはミュオンモニターが置かれ、ニュートリノとともに生成されたミュオンの空間分布や強度をスピルごとにモニターする。ミュオンとニュートリノのフラックスには強い相関があるため、ニュートリノビームの方向を間接的にモニターすることができる（図 2.3）。

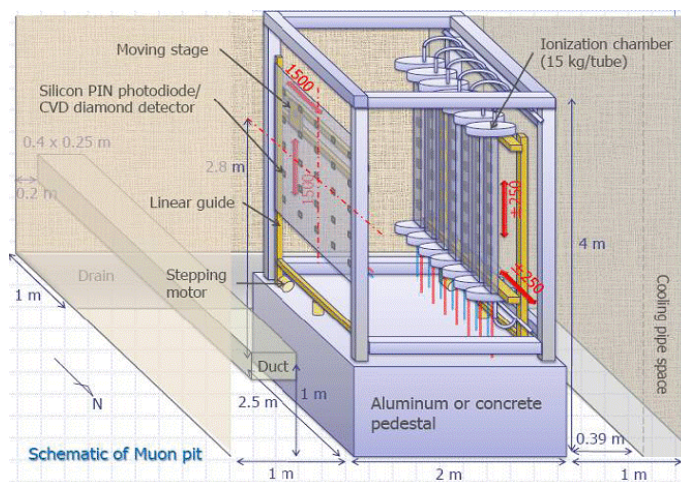


図 2.3: MUMON

2.3.1 On-axis Detector -INGRID-

INGRID (Interactive Neutrino GRID) は、11 層のシチレーターと 10 層の鉄から成る 16 のモジュールが、X,Y 方向それぞれに設置される。これらひとつひとつがニュートリノビーム標的となり、各モジュールで検出されるイベント数分布からビーム中心を再構成し、ビーム方向を精度良くモニターする。Off-axis でニュートリノに崩壊する親パイオンの運動量のほとんどが 6 GeV/c 以下であり、そこから得られる 3 GeV 以下のニュートリノの検出を行う。ビームコミッション時では 1ヶ月、通常ランでは 1日ごとのモニターが可能である。INGRID については第 3 章より詳しく述べる（図 2.5）。

2.3.2 Off-axis Detector

一方、Off-axis 検出器では、ニュートリノ振動前のニュートリノビームのフラックスやエネルギースペクトル等を求める。ここで取得するデータから、ニュートリノ振動がな

い場合に予想されるスーパーカミオカンデにおけるフラックスやスペクトルと、実際にスーパーカミオカンデで測定された結果を比較する。Off-axis 検出器は、生成された π^0 を測定する P0D (Pi-Zero Detector)、ミューオンの運動量を測定する TPC (Time Projection Chamber)、ニュートリノ反応で生成される陽子の方向と飛跡を測定する FGD (Fine Grained Detector)、Tracker (TPC+FGD)、および P0D でのニュートリノ相互作用により生じた 線 を測定する ECAL (Electromagnetic CALorimeter)、検出器側面を抜けたミューオンの運動量を測定する SMRD (Side Muon Range Detector) から構成される (図 2.6 参照)。

2.4 前置検出器 - ND280

前置検出器には、ビーム軸上に設置される On-axis 検出器と、スーパーカミオカンデの方向に設置される Off-axis 検出器の 2 種類がある (図 2.4)。前置検出器 (Near Detector) は、ターゲットから 280m の場所に位置することから、ND280 と呼ばれている。

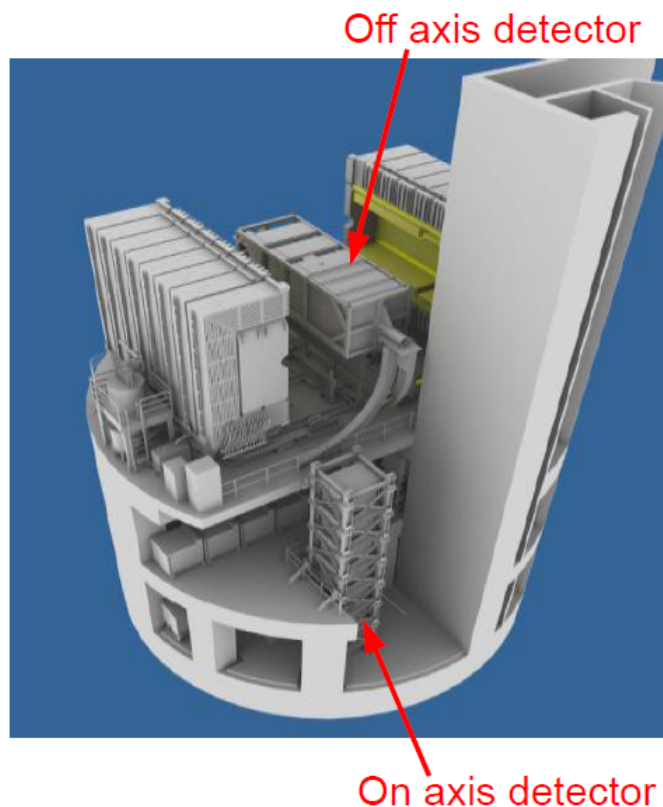


図 2.4: ND280 の概観図

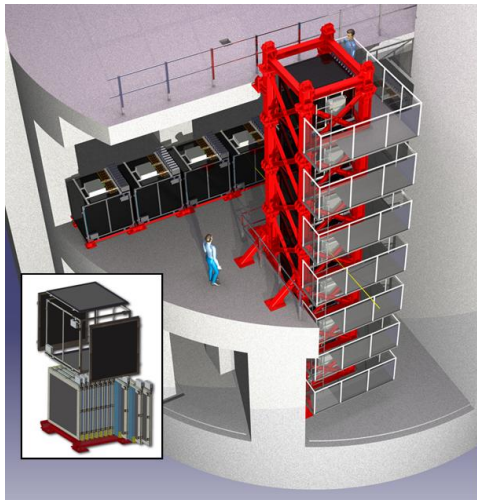


図 2.5: On-axis Detector の概観図

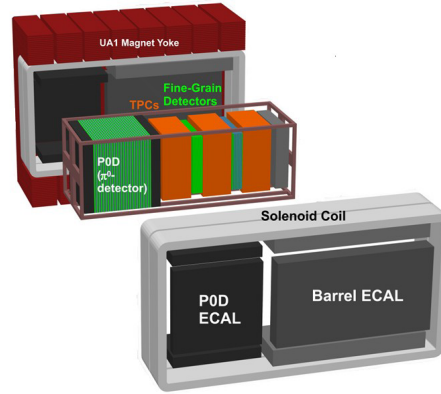


図 2.6: Off-axis 検出器の概観図

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 (SK) は、岐阜県神岡鉱山地下 1000m に設置された円筒型の巨大なニュートリノ観測装置である。地下に設置したのはニュートリノ検出の妨げとなる宇宙線によるノイズをカットするためである。前身となるカミオカンデの 20 倍以上の感度を持っており、水の量は 50000 トンである。32000 トンの内水槽と 18000 トンの外水槽の二重構造で、外水槽は岩盤からくる中性子や γ 線を遮蔽し、岩盤を突き抜けてくる宇宙船ミューオンおよび、内水槽から抜け出てくる粒子を検知する。内水槽の内壁には直径 50cm の光電子増倍管 11200 本、外水槽には直径 20cm の光電子増倍管 1880 本が取り付けられている。さらに環境放射線のバックグラウンドを下げるために装置を高度に気密化し、高性能の純水精製装置を取り付けている。また光電子増倍管はより感度の高い改良型を用いている。

次に、検出原理を述べる。この装置では、ニュートリノと水分子中の他の粒子が相互作用をした結果荷電粒子が放射するチェレンコフ光を観測して、その形状、光量分布、時間分布などから粒子の種類、方向、運動量などの情報を得る。なお、チェレンコフ光とは、荷電粒子が物質中を運動する時荷電粒子の速度 v が物質中の光速 c/n (ただし c は真空中の光速、 n は物質中の屈折率) よりも速い場合に、荷電粒子の進行方向に対して放射角 θ (ただし $\cos \theta = c/nv$) が出る光のことである。物質中の周りの原子が分極し、荷電粒子通過後にその分極が解かれることによる。

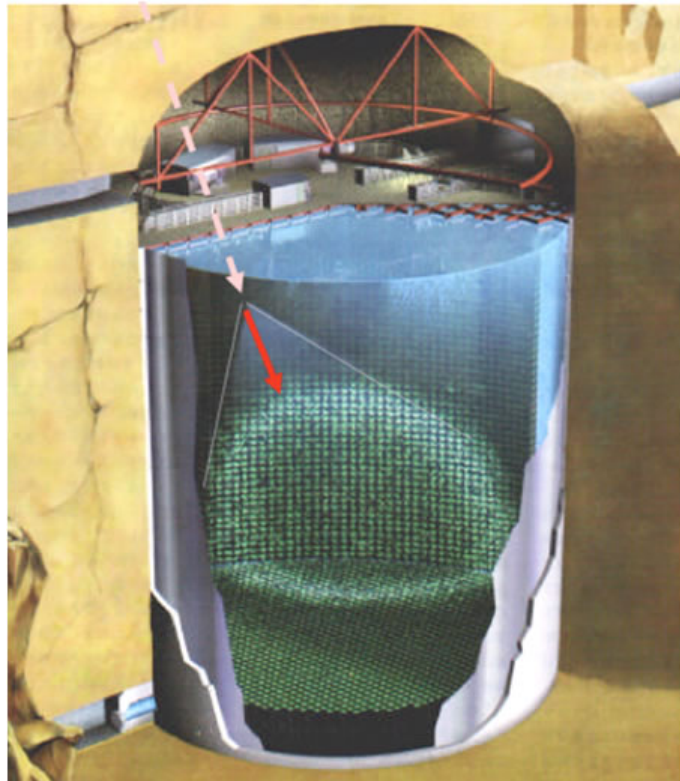


図 2.7: スーパーカミオカンデの概観図

2.6 off-axis ビーム

T2K 実験では、加速器を用いたニュートリノ振動実験としては世界初の Off-axis ビームを導入する。これは、ニュートリノビームの軸を検出器の方向からわずかにずらすことで、ニュートリノビームのエネルギースペクトルに幅の狭いピークを持たせる手法である。この角度のずれを Off-axis 角 (θ_{OA}) という。

ニュートリノビームを標的に当てて生成したパイオンの 2 体崩壊 $\pi \rightarrow \mu\nu_\mu$ によって飛び出るニュートリノのエネルギーは、以下ようになる。

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos\theta_{OA})} \quad (2.4)$$

ここで、 m_π, E_π, p_π はそれぞれパイオンの質量、エネルギー、及び運動量、 m_μ はミューオンの質量である。図 2.8 にあるように、パイオンの崩壊で放出されるニュートリノのエネルギーは、親パイオンの進行方向からの角度が大きくなるにつれて親パイオンのエネルギーに依らなくなる (図 2.8)。また、に Off-axis 角 が $2\sim 3^\circ$ の場合にスーパーカミオカンデで観測が予測されるニュートリノエネルギースペクトルを示す。ニュートリノ振動の効果が最もよく表れるニュートリノのエネルギーは約 600MeV であるので、このエネルギー領域にニュートリノビームのピークを合わせることが要求される。図 2.9 を見るとわかるように、600MeV のところにピークを持つような off-axis 角は、 $\theta_{OA} = 2.5^\circ$ であり、T2K 実験ではこの角度を採用している。

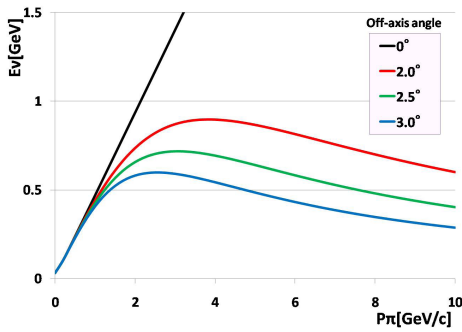


図 2.8: 親パイオンの運動量とニュートリノエネルギーの関係

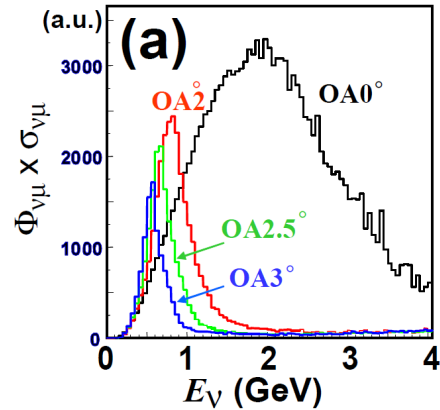


図 2.9: $\theta_{OA} = 2^\circ, 2.5^\circ, 3^\circ$ のときに SK に向かうニュートリノのフラックス

3 INGRID(Interactive Neutrino GRID detector) 検出器

3.1 INGRID に対する要請

INGRID には大きく分けて 4 つの条件が要請される。

- ビーム方向

親パイオンの崩壊から発生するニュートリノのエネルギーと Off-axis 角の間には強い相関がある。ニュートリノビームのエネルギースペクトルのピーク値、及びフラックスは、グラフィット標的に対して 1mrad ずれただけで、それぞれ約 2%、3% の変化を引き起こす。これらは SK で測定されるエネルギーと事象数予測に不定性を与える。この不定性がそれぞれ 3% 以内であれば、系統誤差はミューオンニュートリノ消失モードの振動パラメーターのそれよりも ($\delta(\sin^2 2\theta) = 0.009, \delta(\Delta m^2) = 5^{-5} eV^2$) 小さく抑えることができる。したがって、INGRID では 1mrad よりも良い精度でビーム方向を測定する必要がある。

- ビーム領域

図 3.1 に、INGRID の設置されるニュートリノ検出器ホールで予測されるニュートリノビームの水平方向プロファイルを示す。この図からわかるように、ニュートリノビームは広い分布を持って入射してくるため、ビーム中心を再構成するためには、最低でも $\pm 5m$ の領域をカバーすることが要求される。

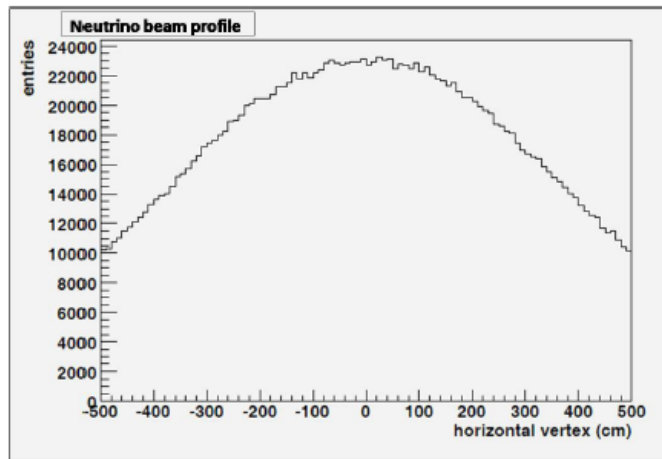


図 3.1: ニュートリノビームプロファイル

- ビーム標的

INGRID は、デザイン値の 1% のビーム強度において、1 ヶ月間の統計量でビーム方向を測定することが要求される。このときのニュートリノイベント数は、図 3.1 の領域において 2000 イベント/ton/month である。ニュートリノイベントの検出効率を 20%

と仮定すると、そのイベント数の系統誤差を 2 % 程度に抑えるためには、ニュートリノビーム標的は全体として 25 ~ 50 トン級の質量を要する。

- 検出効率

図 3.2 は、モジュールごとのイベント数分布から、ビームプロファイルを再構成した図である。ここでは INGRID 内部での荷電カレント反応によって生成されたミュオンのみを考慮している。黒色はシミュレーション上でのニュートリノ反応数、青色は「シンチレータを 3 枚連続で突き抜けている」かつ「VETO プレーンがビームの最下流で反応している」という条件でカットを加えた場合のイベント数である。このときビーム中心の再構成精度をガウス分布でフィットし、そのピークをビーム中心、フィット誤差を再構成の精度とすると、再構成精度は約 3 cm で、要求される 28cm よりも十分良い。また、図 3.2 の図中右に示すように、得られたミュオンの飛跡情報から、ニュートリノビームに対する生成角度を再構成 (θ_{μ}^{rec}) し、その大きさが 20° 未満である場合をカットしたものが赤色の分布である。これは、ニュートリノエネルギーとミュオンの散乱角の相関 (ニュートリノエネルギーが高いほどミュオンは前方に向かって飛び出す) から考慮したカット条件で、モニターすべきエネルギー領域のニュートリノの純度を上げるためである。この条件での中心再構成の精度は約 4 cm で、この場合も 28cm より十分良い精度である。

また、ビームコミッショニングでは 1 か月に 1 モジュールあたり 2000 イベントが見込まれており、各モジュールでのイベント数の系統誤差は 2 % 以下に抑えられることが要求される。そのため系統誤差の原因となるモジュールの検出効率の不定性は、モンテカルロシミュレーションより、0.5 % 以下に抑える必要があることがわかる。

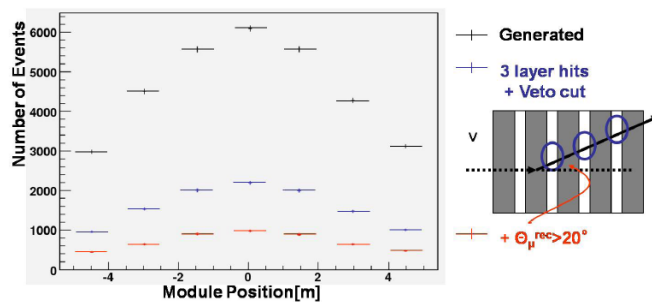


図 3.2: シミュレーションによるビーム中心の再構成

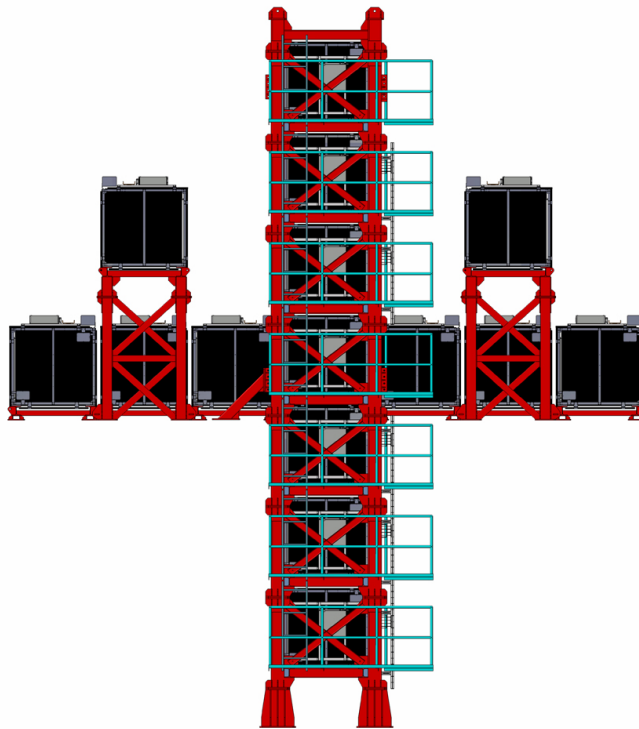


図 3.3: INGRID 概観図

3.2 INGRID の構造

図 2.5 はニュートリノ検出器ホールに設置される INGRID 検出器の概観図である。INGRID は全 16 のモジュールから成る。水平・垂直方向に各 7 個を十字に配置し、²第 1 象限、第 2 象限の位置に残り 2 つのモジュールを配置する (図 3.3)。

各モジュールは、11 枚のシンチレータ層 (以下、トラッキングプレーン) と 9 枚の鉄標的を交互に重ねたサンドウィッチ構造になっている (図 3.4)。トラッキングプレーンはビーム方向に対して垂直平面上にセグメント化されており、鉄との荷電カレント反応によって生成される荷電粒子を再構成する。モジュールの大きさは 120cm × 120cm × 86cm である。鉄の重さは 1 モジュールあたり約 6.6 トンで、ビーム強度が 1 % のとき、1 ヶ月あたり約 2600 イベントの検出が見込まれる。また、各モジュールはバックグラウンドイベンを排除するために、³上下左右側面の 4 面を VETO プレーンで覆う (図 3.5)。トラッキングプレーン、VETO プレーンについては次節で詳細を述べる。

²当初は第 1 象限、第 3 象限の位置に配置する計画であったが、ピット内のスペース、およびインストールの便宜上、このように変更された。

³ただし、隣り合うモジュール間は共通する 1 枚の VETO プレーンを用いる。

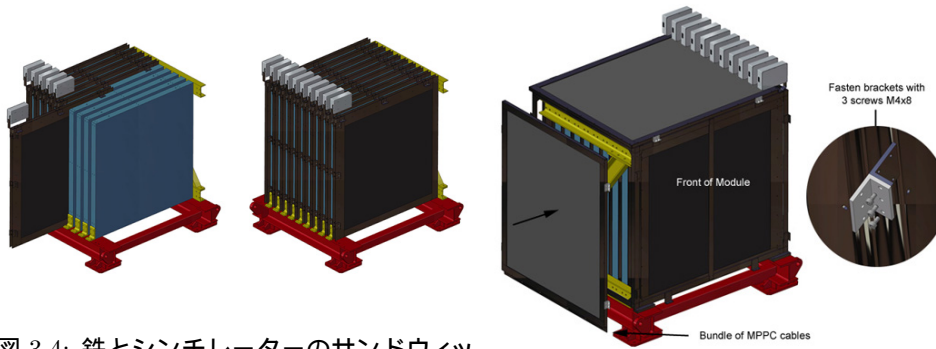


図 3.4: 鉄とシンチレーターのサンドウィッチ構造

図 3.5: VETO プレーンで覆う

3.2.1 トラッキングプレーン

INGRID で使用されているトラッキングプレーンの全チャンネル数は、16(モジュール) × 11(プレーン) × 48(チャンネル) = 8448 チャンネルである。トラッキングプレーンの内部はシンチレーターの2層構造になっており、各層はそれぞれ垂直に24本ずつのシンチレーターが配置されている。これによってモジュールに収めたときに上面、側面双方からイベントを見ることが可能となる。一枚の重さは約80kgである。トラッキングプレーンは、アクティブコンポーネントやケーブルの他に、アルミ製の外枠、表面を覆う遮光用プラスチックパネル、側面の取り外し可能なアルミカバー、遮光用ゴムから成る。構造の概観を図3.6に示す。

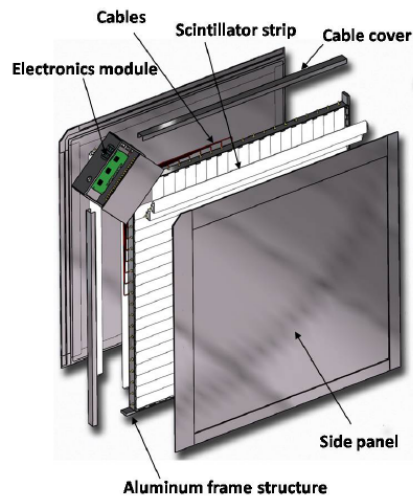


図 3.6: トラッキングプレーンの内部構造

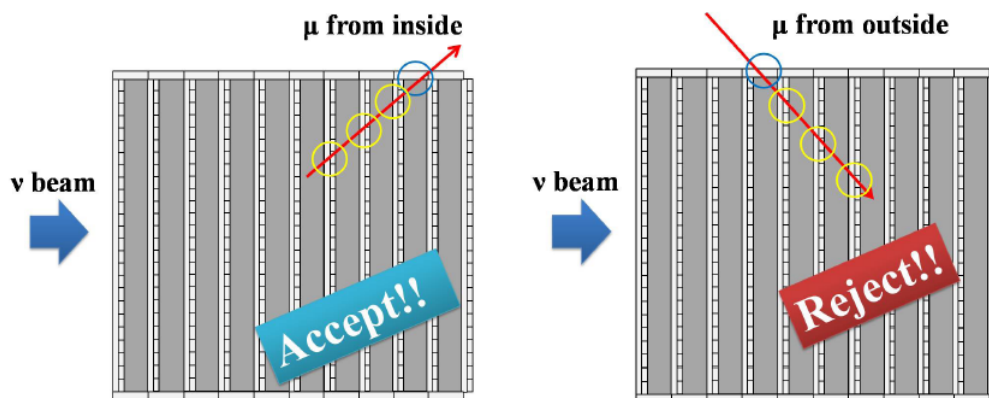


図 3.7: ビーム由来のニュートリノ反応の例 (左)、バックグラウンドによるニュートリノ反応の例 (右)

3.2.2 VETO プレーン

VETO プレーンは、各モジュールの上下左右を覆う形で配置され、ニュートリノイベントのバックグラウンドをカットする役割を担う。図 3.7 に示すように、ビーム由来のイベントであればモジュールの内部でミュオンが生成されるため、VETO プレーンが最後に反応する。一方で、外部からのミュオン、つまりバックグラウンドであれば、外側の VETO プレーンが先に反応する。VETO プレーンの構造は基本的にシンチレータープレーンと同じであるが、チャンネル数が 22 チャンネルの 1 層構造となっている。VETO プレーンは全 52 枚であるので、全チャンネル数は、52 (プレーン) × 22 (チャンネル) = 1144 チャンネルである。また、3 タイプの長さのシンチレーターがあり (112cm, 120cm, 130cm)、配置される場所によってプレーンの大きさが異なる。配置される向きは、ビーム方向に対して内部のシンチレーターがセグメント化される向きである。

3.3 INGRID アクティブコンポーネント

INGRID では、ニュートリノ反応によって生成された粒子がシンチレーターを通過する際に出すシンチレーション光を、波長変換ファイバーによって吸収・再放出させ、終端の MPPC まで伝達させて光量を読み出す。このシステムをアクティブコンポーネントと呼ぶ。以下にシンチレーター・波長変換ファイバー・MPPC の詳細を記す。

3.3.1 シンチレーター

アメリカのフェルミ研究所で開発された、押し出し型のプラスチックシンチレーターを用いる。寸法は 1 × 5 × 120 cm、重量は一本あたり約 600 g である。これらを水平・垂直方向に各 24 本敷き詰めて 1 枚のトラッキングプレーンとなる。

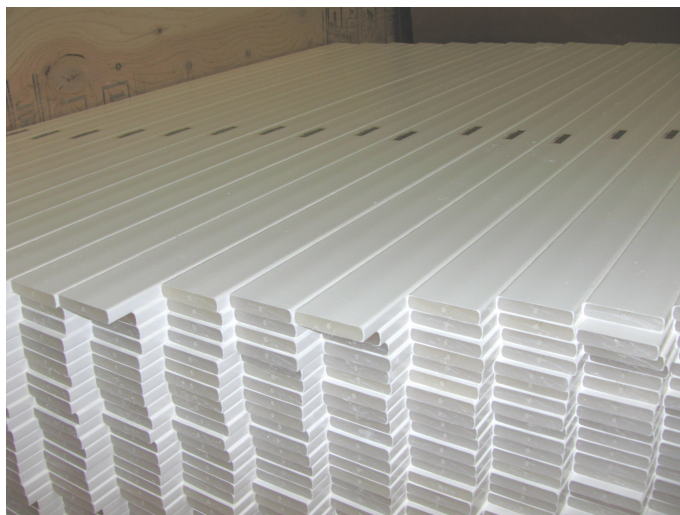


図 3.8: 押し出し型のプラスチックシンチレーター。表面に反射材が塗られている。

シンチレーターの組成は、ポリスチレンをベースに⁴PPO、⁵POPOP をそれぞれ質量比で 1%, 0.01% 混ぜたものである。また、切断面を除く 4 側面に酸化チタンベースの反射材が 250 μm 厚で塗られ、これによってシンチレーション光の集光効率を向上させる。それと同時に、隣り合うシンチレーターへの光漏れを防ぎ、セグメント化を可能にする。シンチレーターの中央には直径約 3 mm の穴があいており、ここに波長変換ファイバーを通す。

3.3.2 波長変換ファイバー

通常、光ファイバーに側面から入ってきた光は、全反射条件を満たすことができないため、そのまま外部に出ていく。よってその光を伝送することはできない。一方、波長変換ファイバーには、中心に波長変換材（ある波長領域の光を吸収してそれより長い波長領域の光を等方的に再発光する物質）が混ぜ込まれているため、再発光された光のうち全反射条件を満たすものはファイバーの中を伝搬することができる。

本実験では、長波長変換ファイバーとしてクラレ社の Y-11(200)MS を使用する。Y-11 は波長変換材の種類、200 は混ぜ込まれた波長変換材の濃度とファイバー径の積（単位は $[\text{ppm} \cdot \text{mm}]$ ）、MS はマルチクラッド S 型であることを示す。マルチクラッドとは、ファイバー表面が二重にコーティングされている構造で、シングルクラッドに比べてファイバー内部の全反射条件を満たす角度が大きく、伝送される光量も大きくなる。また、S 型というのは、ファイバーコアのポリエチレン繊維が揃っていることを示しており、曲げに強い構造である。

ファイバー径は約 1 mm、吸収波長のピークは 420nm でシンチレーターの発光波長のピーク

⁴2,5-diphenyloxazole($C_{15}H_{11}NO$)

⁵1,4-Bis-[2-(5-phenyloxazolyl)]-benzene($C_{24}H_{16}N_2O_2$)



図 3.9: ファイバーと GOMI コネクタ。右の写真のようにコネクタとファイバーを一体化させる。もう一方のコネクタには MPPC が装着されており、この 2 つを取りつけることでファイバー端面と MPPC を密着させる。

(425nm) とほぼ一致する。また発光波長のピークは 450nm で、この波長領域における MPPC の量子効率 は 70 % と高い (PMT の場合約 15 %)。

ファイバーはシンチレーターと同じ長さ に切断され、一端に GOMI コネクタが取り付けられる。GOMI (General Optical MPPC Injection) コネクタは、ファイバー断面と MPPC 光電面の接続と取り外しを可能にしたコネクタで、京都大学によって開発された。取り付け、取り外しが容易で、かつ密着性に優れており、光量の再現性が高いという特徴を持つ。また、MPPC 側と反対側の断面には反射材が塗布される。

断面の研磨不足、ファイバーの傷や汚れは検出光量不足の原因となるため、特に注意しなくてはならない。図 3.9 に GOMI コネクタ、およびファイバー取り付け時の概観を示す。

3.3.3 MPPC

MPPC (Multi Pixel Photon Counter) は、光電子増倍管に代わる次世代の半導体光検出器であり、2007 年に浜松ホトニクスにより開発された。1.3mm 四方の受光面に 667 個の APD (Avalanche Photo Diode) ピクセルを搭載しており (図 3.11)、1 ピクセルにつき 1 つの光子を検出することができる。特徴としては、優れたフォトンカウンティング能力 (入射フォトン数に対して、優れた検出効率) を持つこと、コンパクトな形状であること、磁場の影響を受けないこと、高いバイアス電圧で動作 (~70V) すること、常温で動作する一方で温度依存性があるという点である。T2K 実験では、S10362-13-050CK 型を使用する。

APD は半導体光検出器で、その動作モードはある電圧を境にノーマルモードとガイガーモードに分けられる。モードの変化する電圧値をブレイクダウン電圧 (V_{bd}) と呼ぶ。ゲイン (光電子の増幅率) はノーマルモードで 100 以下であるのに対し、ガイガーモードでは 10^6 程度である。また、ノーマルモードでは APD に入射した光子数に比例した電荷量を入力するのに対し、ガイガーモードでは電圧値に依らない一定の電荷量を入力する。ガイガーモードで出力

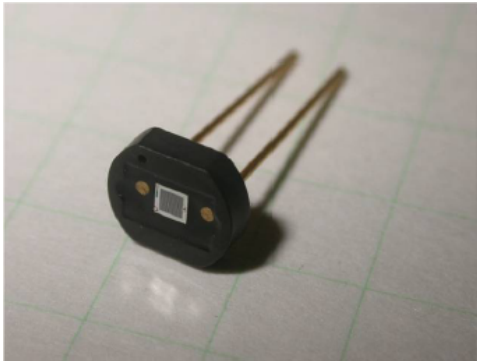


図 3.10: MPPC

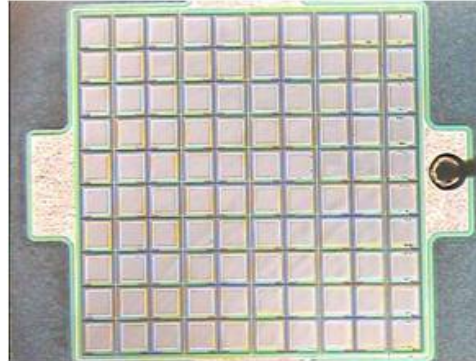


図 3.11: MPPC の APD ピクセル

される電荷量 Q と電圧値の関係は、以下のとおりである。

$$Q = C(V_{bias} - V_{bd}) \quad (3.1)$$

ここで、 V は付加したバイアス電圧、 C は APD ピクセルのキャパシタンスである。次に、ゲインは APD ピクセルの内部で発生した電子 - ホール対がガイガー放電によってどの程度増幅されたかで定義される。

$$Gain = \frac{1 \text{ ピクセルが出す電荷量 } (Q)}{\text{素電荷 } (e)} \quad (3.2)$$

APD ピクセルのキャパシタンス C を用いると、

$$\begin{aligned} Gain &= \frac{C}{e}(V_{bias} - V_{bd}) \\ &= \frac{C}{e}\Delta V \end{aligned} \quad (3.3)$$

と書ける。ここで $\Delta V = V_{bias} - V_{bd}$ とした。式 3.3 から、温度が一定のときゲインはバイアス電圧に対して線形に変化する。1 APD ピクセルのキャパシタンス C は、測定結果から傾きを求めることで定められる。

また、実際に実験を行う上では、0p.e.⁶を示すベDESTアルピークと 1p.e. シグナルピークとの差をゲインと定義した。図 3.12 に示す MPPC の ADC 分布の、1つ目と2つ目のピークの差がそれに当たる。この方法は 4.2.1 で述べるノイズテストにおいてゲインを求めるために用いた。この図を見るとわかるように、光電子ピークが綺麗に分かれており、またピークごとの間隔が揃っていることから、MPPC の増幅率は各 APD ピクセルで一定であると言える。

次に、MPPC の欠点であるノイズについて述べる。

- ダークノイズ

MPPC は固体素子であるため、熱励起やトンネル効果によるノイズが発生する。特に

⁶p.e. は photoelectron (光電子) の略である。

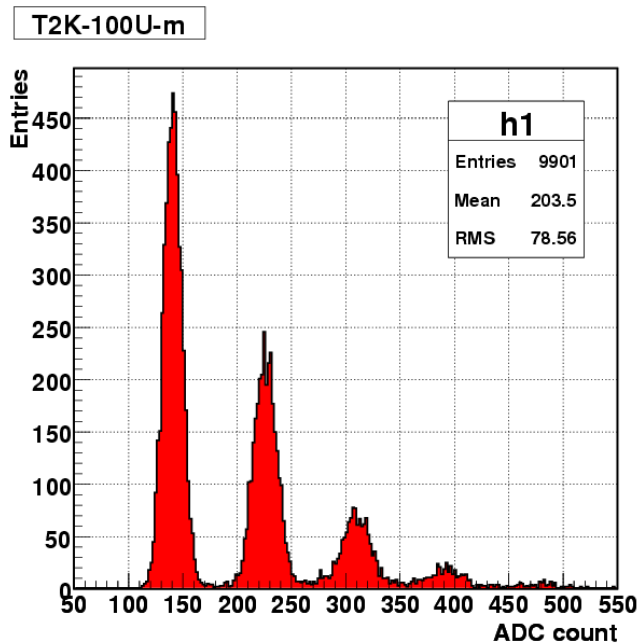


図 3.12: MPPC のノイズの ADC 分布。一番左のピークがペDESTALピーク、二番目のピークが 1p.e. シグナルピークである。

MPPC はガイガーモードで動作するので、ノイズ成分も同様に増幅され、光子による信号と区別できない。このような、熱に由来するノイズをダークノイズといい、ノイズレートの典型的な値は 20 、 $\Delta V = 1.0$ のとき 500kHz 程度である。ダークノイズは温度が低くなるほど小さく抑えることができる。

- アフターパルス

MPPC の各ピクセルは光子が入射すると電子なだれを起こして一定の大きさの信号を出力するが、発生したキャリアが半導体内の結晶欠陥にトラップされると、本来出すはずの信号よりも遅れて、さらに異なる大きさの信号を出力する。これをアフターパルスと呼ぶ。温度が低いほどキャリアが結晶欠陥にトラップされる確率が上がるため、それに伴ってアフターパルスも増加する。

- クロストーク

APD ピクセルにおいて、入射した光子とは別の電子なだれ過程で生成された光子が別の APD ピクセルで検出されると、そこでまた新たな電子なだれが発生し、MPPC の出力は実際に入射した光子数よりも高い値を出力する。これをクロストークと呼ぶ。

ダークノイズについては温度管理を徹底し、アフターパルス、クロストークについては 15~25 の温度領域では大きな温度依存性は認められないため、事前に測定したクロストーク&アフターパルスレートを実際に検出された信号から取り除くことで対処する。 $\Delta V = 1.5$ のとき、

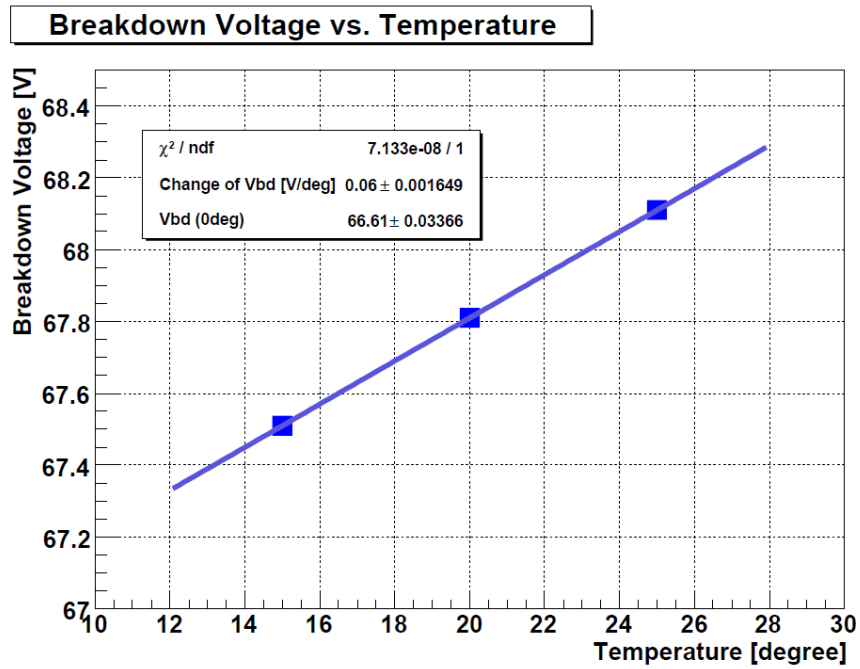


図 3.13: ブレイクダウン電圧の温度依存性。温度が高くなるにつれてブレイクダウン電圧値も上げる。

クロストーク&アフターパルスレートは18%で、0.1Vあたり0.23V増加、ゲインは 7.5×10^5 で、0.1Vあたり 0.47×10^5 増加する(図 3.13, 図 3.15)。また、ブレイクダウン電圧 V_{bd} は、温度に線形に依存し、1.0 あたり約 0.06V 変化する(図 3.14)。

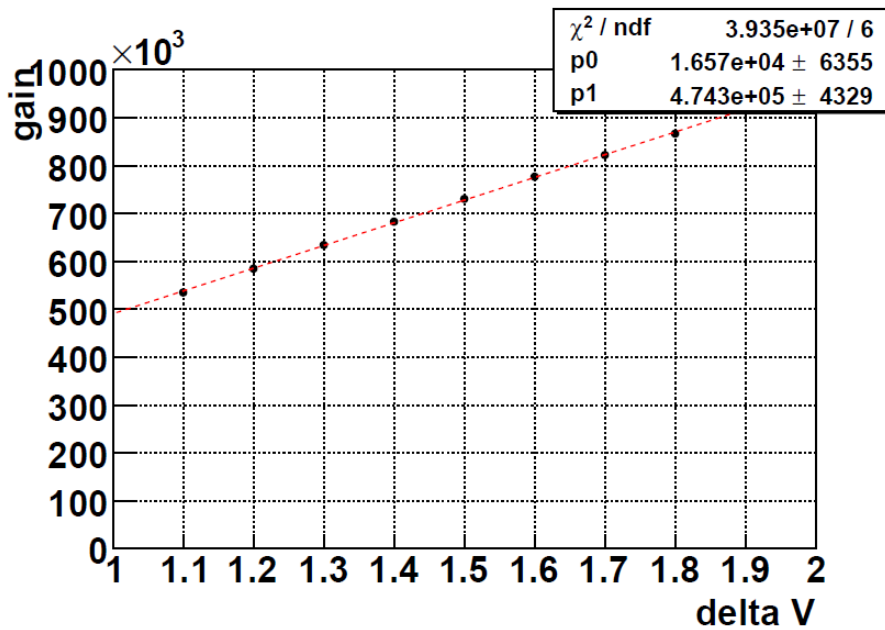


図 3.14: ゲインの ΔV 依存性。バイアス電圧とブレイクダウン電圧の差 (ΔV) が大きくなるほどゲインも増える。

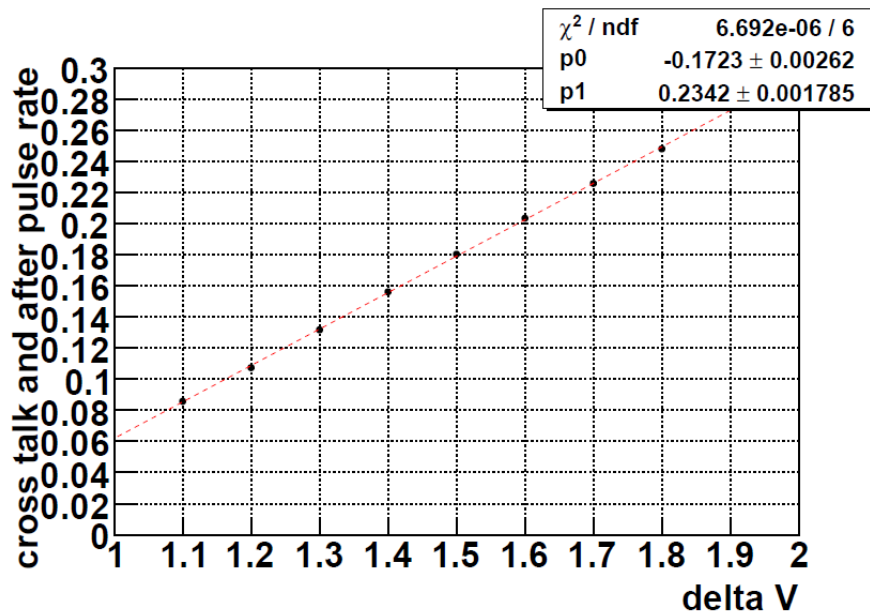


図 3.15: クロストーク&アフターパルスレートの ΔV 依存性。 ΔV が大きくなるほどクロストーク&アフターパルスレートも上がってしまう。

4 INGRID の製作と宇宙線光量測定

4.1 トラッキングプレートの組み立て

2008年8～12月にかけて、J-PARCにて176枚のトラッキングプレート、および52枚のVETOプレートの製作が体系的に進められた。以下にトラッキングプレートの製作のおおまかな手順を示す。

1. フレームの組み立て（下）

アルミ製のフレームを組み立て、隙間ができないように遮光ゴムをフレームに沿って貼る。なお、遮光ゴムは光漏れを防ぐため図4.4のように階段状に切断されており、切れ目同士を合わせて隙間ができないようにする。その上から遮光板を置く。

2. 接着剤の混合と塗布

接着剤はセメダイン社のPM200の2液を2対1の割合で混合したものである。遮光板の両端と中央の3ヶ所に、3本線を引くように塗布する。

3. シンチレーターの配置

シンチレーター層一層目にシンチレーター24本を敷き詰める。24本目とフレームの間には、ゴム製のスペーサーを挿入し、あそびがないようにする。上から接着剤を、今度は「田」の字状に塗布し、同様に1層目のシンチレーターに対して垂直の方向に2層目のシンチレーター24本とスペーサーを配置する。

4. フレームの組み立て（上）

2層目のシンチレーター層の上から接着剤を塗布（3本線）し、その上から遮光板を乗せ、同様に遮光ゴムを張り付けたアルミフレームを組み立てる。その後上から錘を置いて一晩硬化する。

5. ファイバーの挿入とケーブリング

硬化したシンチレータープレートは、最後にGOMIコネクタを取りつけたファイバーをシンチレーターの穴に通し、ケーブル側のコネクタと接続する。ケーブルがカバーに挟まって断線しないよう、ケーブルを固定するために穴にゴムを被せる。ケーブルカバーを固定し、ケーブリングをして完成となる。

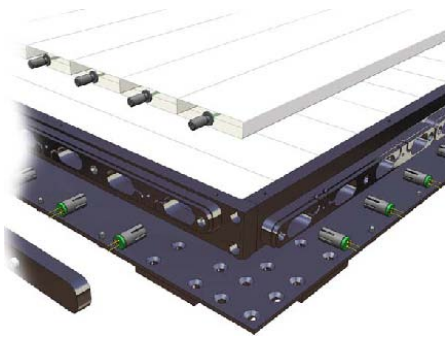


図 4.1: トラッキングプレーン内部の概観

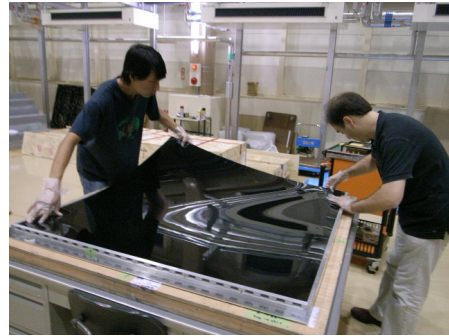


図 4.2: フレームを組み立てて、遮光板を敷く



図 4.3: 接着剤を2 : 1の割合で混合する

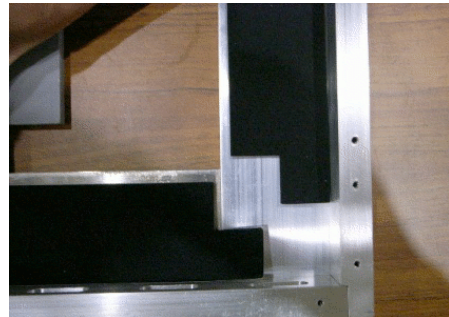


図 4.4: 遮光ゴムを貼り合わせる

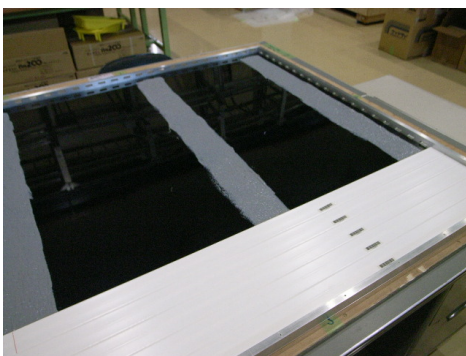


図 4.5: 1層目のシンチレーターを敷き詰める

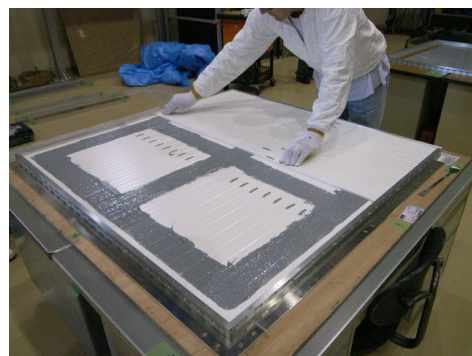


図 4.6: 2層目のシンチレーターを敷き詰める



図 4.7: 錘を置いて一晚硬化する

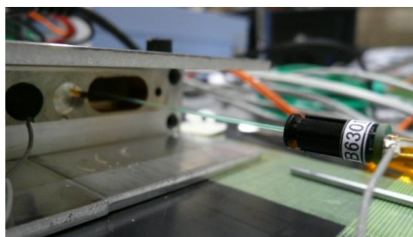


図 4.8: ファイバーを挿入する

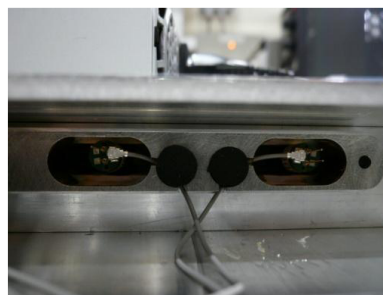


図 4.9: ケーブルが断線しないよう遮光ゴムで固定する

4.2 INGRID トラッキングプレーンの性能評価

4.2.1 MPPC のノイズ試験

各チャンネルの宇宙線光量測定を行う前に、MPPC のノイズの ADC 分布を確認して、正常に動作しているかどうか試験を行った。これによって異常が見られた場合、原因は以下の通りであった。

- ケーブルの断線・PCB 基盤の電極が逆になっている
この場合、ADC 分布はペダスタルピークのみで、光電子によるピークは見られない。
- MPPC の付け間違い
チャンネルを付け間違えると、ブレイクダウン電圧 V_{bd} とバイアス電圧 V_{bias} の差 ΔV が正しく設定されない。MPPC のゲインは ΔV に比例するので、その結果ゲインの増加や減少が見られる。図 4.10 に、2つのチャンネルを逆にして付けていたためにゲインの増減が起こった場合の例を示す。横軸はチャンネル番号、縦軸はゲインである。3チャンネル目と4チャンネル目にチャンネルの付け間違いが認められる。

また、ノイズレートが 1.6MHz を超える場合、および京都大学において事前に測定したノイズレートのデータと比較して 50 %以上のずれがあった場合は、MPPC を交換した。このように、ノイズ試験ではトラッキングプレーンの製作過程でのミスを発見するとともに、MPPC 自体の不良を調べることができる。

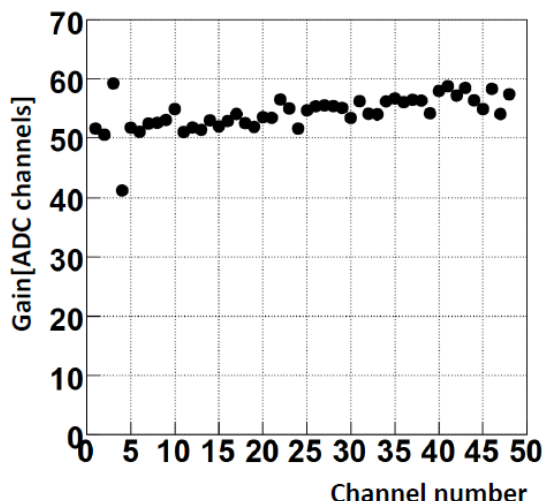


図 4.10: 2つのチャンネル間で MPPC を付け間違えていた場合のゲインの増減。3チャンネル目と4チャンネル目にチャンネルの付け間違いが認められる。

4.2.2 宇宙線光量測定による性能評価

完成したトラッキングプレーン、および VETO プレーンは、その場で宇宙線を用いた光量測定が行われた。この試験では、トラッキングプレーンを 4 枚重ね合わせ、各トラッキングプレーンを別のトラッキングプレーンに対して宇宙線トリガーとした。4 時間で 300 ~ 400 イベントの宇宙線データを取得し、その後オフラインで解析を行った。なお、読み出しはランダムトリガー、ADC ゲート幅は 250nsec である。

図 4.2.2 は宇宙線イベントディスプレイの一例である。この図において、ひとつひとつのセルはシンチレーターの断面図を表現しており、光量の強さに応じて色分けされている。図 4.11 に示すカラーコードは光量と色の対応関係を示している。なお、6p.e. 未満のイベントは表示しておらず、また、50p.e. を超えるイベントはすべて赤色で表示されている。

次に、平均光量を各チャンネルごとに求めた。宇宙線がトラッキングプレーンを通過したイベントであることを選別するために、以下の条件を満たさないイベントをカットする。図 4.14 は、宇宙線試験のセットアップの断面図である。ここで、赤色は着目するチャンネル、黄色は

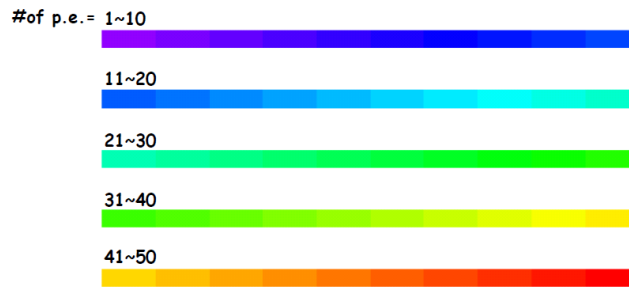


図 4.11: イベントディスプレイのカラーコード。フォトエレクトロン数に対応している。

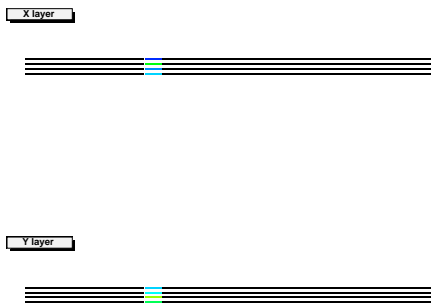


図 4.12: イベントディスプレイの一例。上段は X レイヤーの断面図、下段は Y レイヤーの断面図である。宇宙線が真上から突き抜けているのがわかる。

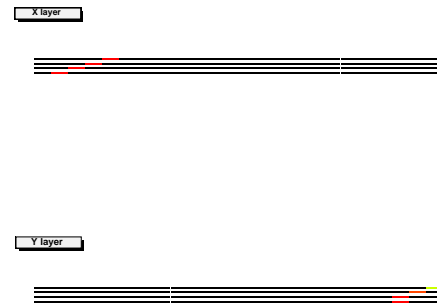


図 4.13: イベントディスプレイの一例。宇宙線が斜めから入っている。

条件を課すチャンネルの一例である。

カット条件

1. 着目しているチャンネルの光量が 6.5p.e. 以上であること。
2. 自身のトラッキングプレーンより上 2 枚 (または下 2 枚) のトラッキングプレーンの同じ向きのシンチレーター層において、着目しているチャンネルと同じ列、および隣り合う列のチャンネル (計 3 つ) の光量が 6.5p.e. 以上であること。
3. 上下に挟まれた異なる方向のシンチレーター層の少なくとも 1 つのチャンネルにおいて、

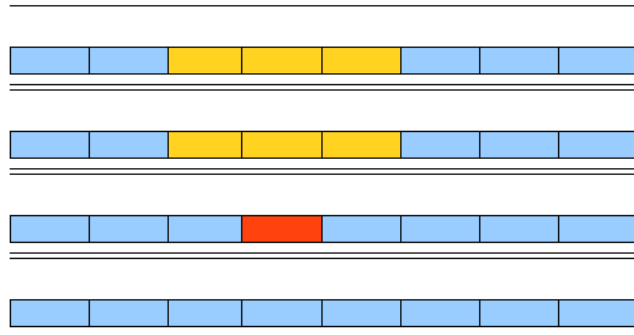


図 4.14: 宇宙線試験セットアップの断面図

光量が 6.5p.e. 以上であること。

なお、最上（下）部のシンチレーター層で、自身よりも上（下）にシンチレーター層の存在しない場合、3つ目の条件は、片面に接する一層のみのシンチレーター層に課せられる。ここで、6.5p.e. は MPPC のノイズ信号を排除するためのカット条件である。この結果得られる典型的な光量分布の例を、図 4.15、図 4.17 に示す。

また、図 4.16 に示す通り、全 8448 チャンネルの平均光量は 40.0p.e. で、最も光量の低いチャンネルでも 25.9p.e. と、十分高い集光能力があることが確かめられた。

このような試験を行い、19p.e. を閾値として光量の低いチャンネルやデッドチャンネルがないか、全 8448 チャンネルをチェックする。現場解析において不具合の発見されたチャンネルは、その場でトラッキングプレーン側面のケーブルカバーを開けて検査を行う。その結果、不具合の原因は以下の通りであることがわかった。また、ファイバーが GOMI コネクターの根元で折れていた場合の光量分布の一例を、図 4.18 に示す。バッドチャンネルとなる原因

- ファイバーに由来するもの
断面の研磨不足および反射材の塗布不足、ファイバー表面の傷、GOMI コネクターの根元で折れている
- MPPC に由来するもの
受光面の汚れ、チャンネルマップデータベースとの相違、PCB 基盤との接続ミス
- その他
光漏れ、TFB ボードや PCB 基盤の故障、ケーブルの破損

これらのことから、各部品は慎重に扱うとともに、ファイバーを扱う際は手袋を着用したり、ケーブルをケーブルカバーで挟まぬよう、カバーを取り付ける際は治具を用いるなどの対策を取った。なお、すべてのバッドチャンネルは修理が完了し、問題がないことが確認された。

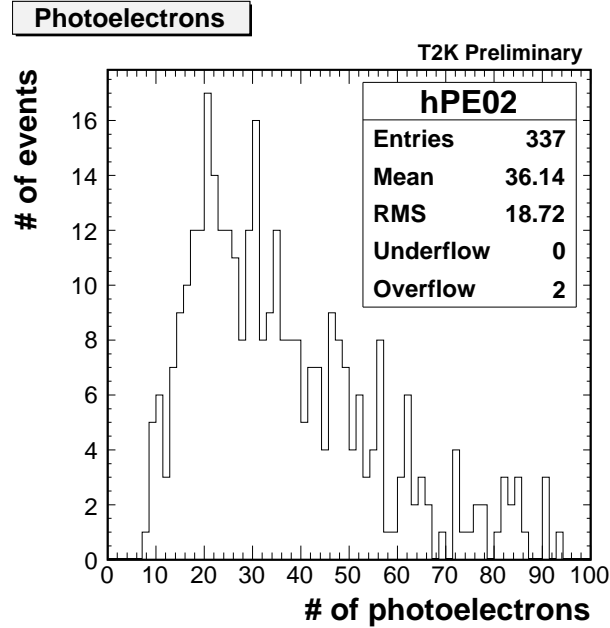


図 4.15: あるチャンネルの光量分布。横軸はフォトエレクトロン数、縦軸はイベント数である。この4時間の間に337の宇宙線イベントがあり、出力光量の平均値は36.1p.e.であったことを示している。

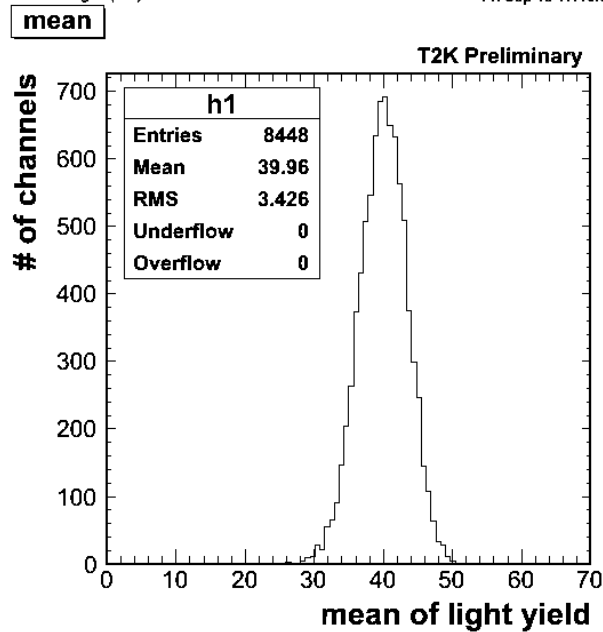


図 4.16: トラッキングプレーン全8448チャンネルの平均光量。横軸は各チャンネルの平均光量、縦軸はチャンネル数である。

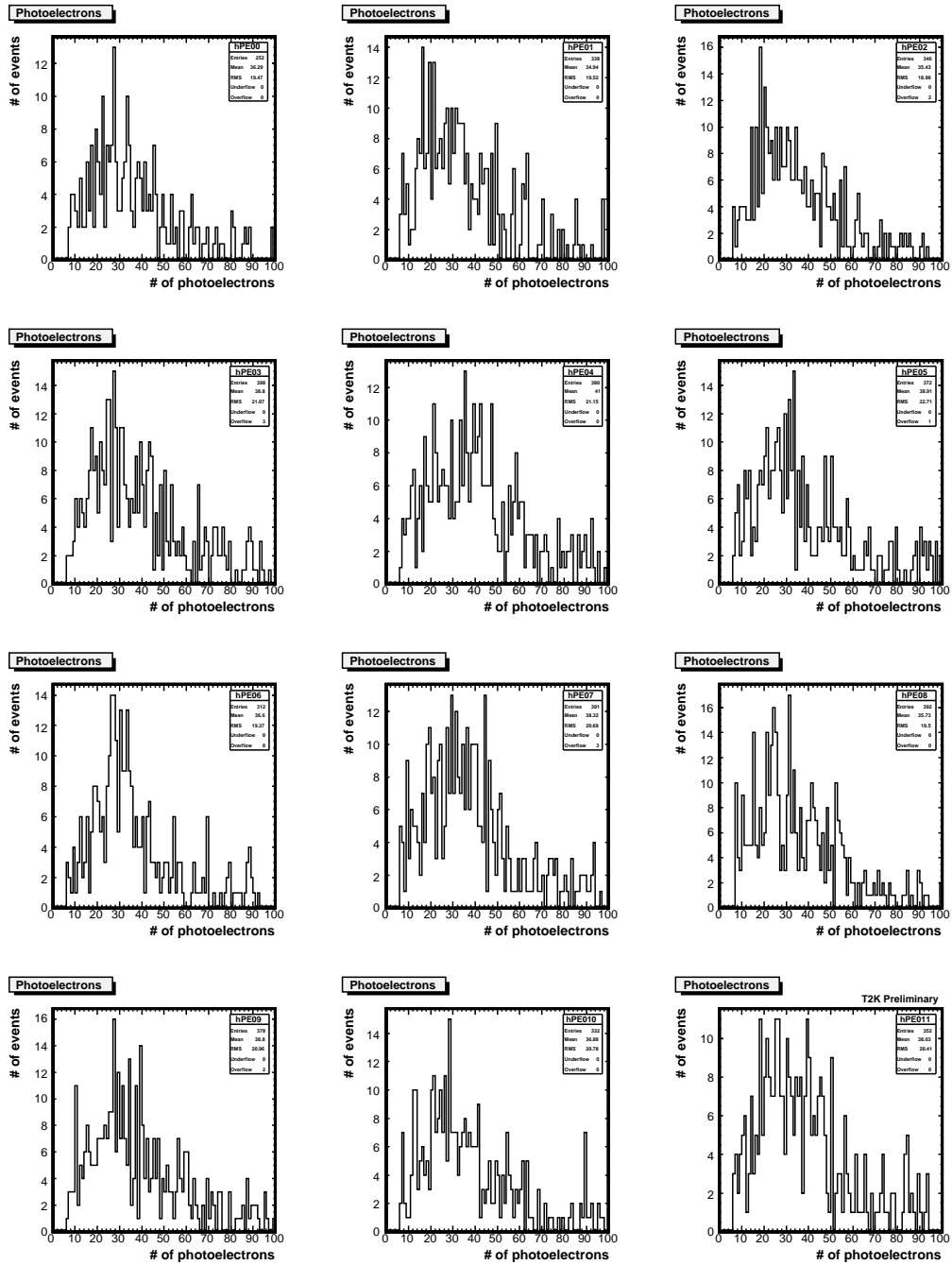


図 4.17: 12 チャンネル分の光量分布

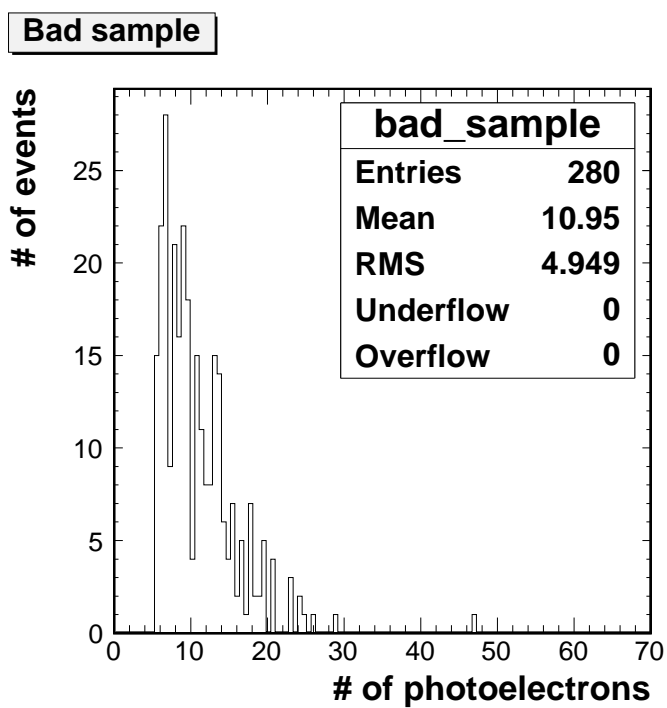


図 4.18: GOMI コネクターが根元で折れていた例。検出できるイベント数が少ない他、平均光量も 11.0p.e. と低い。

4.2.3 検出効率

第 4.22 節の宇宙線光量測定において、試験に合格したトラッキングプレーンが中央に存在していた場合、そのシンチレータプレーンの検出効率を求めた。解析の結果、176 プレーン中 57 枚のトラッキングプレーンの検出効率を求めることができた。以下に、宇宙線イベント、ミスイベントのイベントセレクションについて述べる。図 4.19 は、下から 2 番目のトラッキングプレーンの検出効率を求める場合の例である。

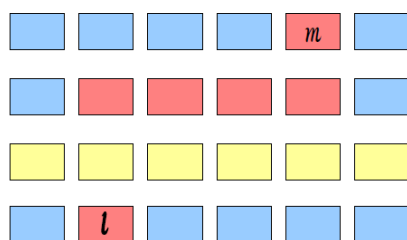


図 4.19: 下から 2 番目のトラッキングプレーンの検出効率を求める場合のイベントセレクションの方法

- 着目している層以外の X,Y 各層 (合計 7 層) に、それぞれ 1 ch ずつ 9.5p.e. 以上のヒットを要求する。
- 一番上と一番下のトラッキングプレーンの、自身と同じ方向の層において、9.5p.e. 以上のヒットを要求する。そのヒットチャンネルを l, m とする。
- 中央の 2 枚の層のうち、着目していない方の層において、 l ヒットチャンネル m があれば、宇宙線イベントと定義する。なお、ヒットチャンネルを n とする。
- 着目する層において、 l ヒットチャンネル n があればヒットイベント、なければミスイベントとする。

なお、不感率は ミスイベント数/宇宙線イベント数 として求める。その結果、各トラッキングプレーンの宇宙線イベント数の平均値は 8691 イベント、ミスイベント数の平均値は 44 イベントであった。検出効率は 99.5%、不定性は 0.07% と求まり、目標である 0.5% より十分良い精度となった。

各トラッキングプレーンにおける宇宙線イベント数およびミスイベント数の分布を図 4.20 に、それによって算出した各トラッキングプレーンの不感率の分布を、図 4.21 に示す。最も不感率の高いトラッキングプレーンで、不感率は 0.8 % であった。ミスイベントはそのシンチレーターの不感そのものの他に、シンチレーターの隙間を通過したギャップイベント、シンチレーター層間の相対位置のずれによるイベント、また、2 つの宇宙線が同時に入射した kink イベントもミスイベントとしてカウントされ、見掛け上の不感率を上げてしまう。

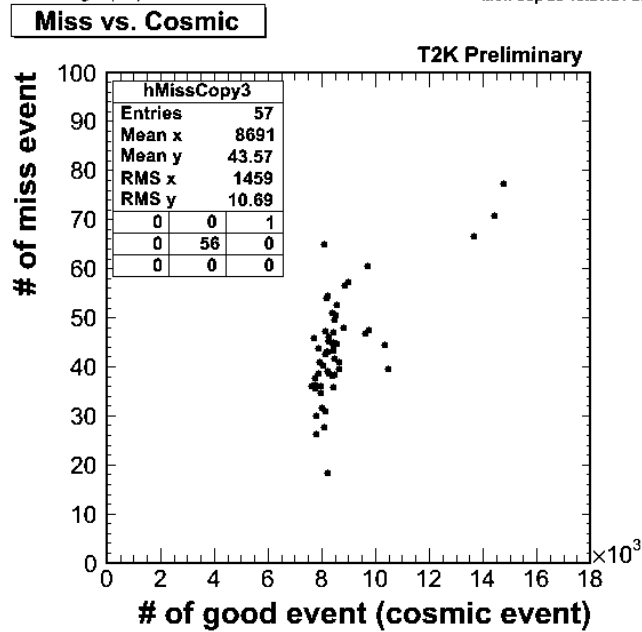


図 4.20: 各トラッキングプレーンの宇宙線イベント数、およびミスイベント数の分布。右上のイベント数の多い3点は、48時間の長時間試験をしたプレーンによるものである。

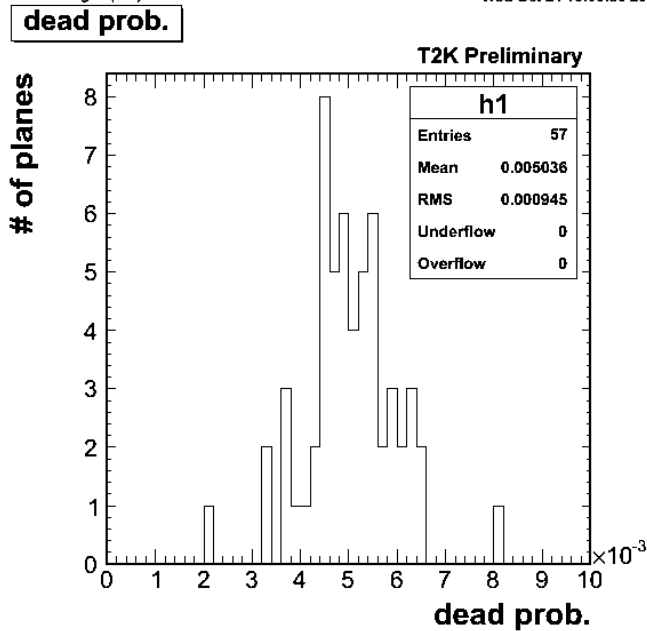


図 4.21: 各トラッキングプレーンの不感率の分布。最も高い不感率は0.8%であった。

5 モジュールの組み立てとインストール

宇宙線光量試験において全トラッキングプレーンに問題がないことを確かめた後、2009年2月に1st モジュールの組み立て、およびND280 ピット内へのインストールが完了した。同年6～8月にかけては残りの13モジュールの組み立てとインストールを行い、Horizontal モジュール（横型モジュール7個）と Vertical モジュール（盾形モジュール7個）が完成した。

図5.1は、組み立て前の鉄層のみの構造で、鉄の厚さは6.5cmである。その間に一枚ずつトラッキングプレーンを挿入する。鉄と鉄の間隙は4.2cmである。また、VETO プレーンの設置位置はビーム上流から見た場合、右側面は10.6cm、左側面は10.9cm、上側面は8.4cm、下側面は5.9cm の隙間が空いている。

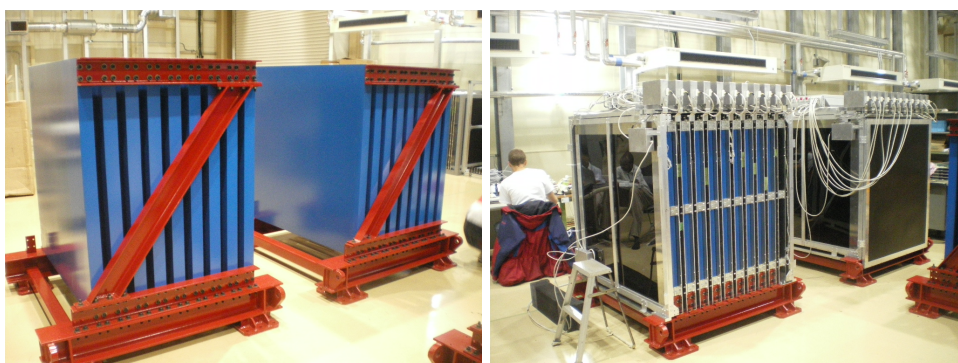


図 5.1: トラッキングプレーン挿入前の鉄層 図 5.2: トラッキングプレーン挿入後

データの読み出し系は、TFB (Trip-t Front end Board)、Back end Board、オンライン PC から成る。TFB は各トラッキングプレーンに1台搭載されており（VETO プレーンは2枚で1台）MPPCの信号を読み出し、Back-end Board にデータを送る。Back-end Board には、データを受け取りイベントビルドをして OnlinePC へそのデータを送る RMM(Readout Merger Module) が2つと、RMM にデータを取るよう指令を送る MCM (Master Clock Module)、そして宇宙線トリガーの制御を行う CMT (Commissioning Trigger Module) が1つ搭載されている。OnlinePC は Back-end Board と通信を行い、さらにコントロールルームから接続できるようにしている。

5.1 問題点と解決策

- ストラクチャーのねじ部分の錆
湿度の上昇によって、ストラクチャーのねじ部分が錆びつくという問題が起こった（図5.6）。対策として、空気の流れを作るためのファンと、Vertical モジュールをビニール製のテントで覆いその中に除湿器2台を設置した。
- MPPC ノイズの異常
ノイズ試験の結果、光漏れが原因とみられる異常が認められたため、Horizontal モジュー



図 5.3: モジュールのピット内へのインストール作業



図 5.4: Vertical モジュール

ル全体をブラックシートで覆うことで対処した。また、モジュール組み立て時にかかった負荷による、ケーブルの破損・断線も認められたため、ケーブルの交換を行うとともにケーブリング作業を慎重に作業を行った。



図 5.5: Horizontal モジュール



図 5.6: 錆

6 ニュートリノイベントの探索

6.1 画像処理によるニュートリノイベント探索の効率化

ニュートリノイベントを探索するにあたって、ビームのデータは莫大な量になるため、人為的に全てのニュートリノイベントを選別するのは極めて困難である。そこで我々は、Hough変換を用いてミュオンが通った直線的な飛跡を自動的に検出する技術を開発した。x-y平面上のある点は、極座標変換することでただひとつの曲線として表現することができる。このとき、もしすべての点に共通するただひとつの直線が存在すれば、r-座標上の曲線にもただひとつの交点が存在することになる。Hough変換は、この交点を見つけることによって直線を検出する方法である。すなわち、曲線の交点を探すことが、ミュオンの描く直線的な軌跡の検出に直接的に結びつく。これをニュートリノのイベントディスプレイに応用するには、まず、イベントディスプレイ上のある点を原点に定め、そこから反応のあった各セルの中心座標を求める。原点から各座標までの距離を r 、なす角を θ とした場合、

$$r(\theta) = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (6.1)$$

が成り立つので、上式の x, y に反応のあったセルの座標を代入すれば、曲線に変換することができる。まず、図 6.1 に Hough 変換の一例を示す。5つの曲線の交点座標 (r, θ) は、5点を結ぶ直線までの原点からの距離となす角に対応している。

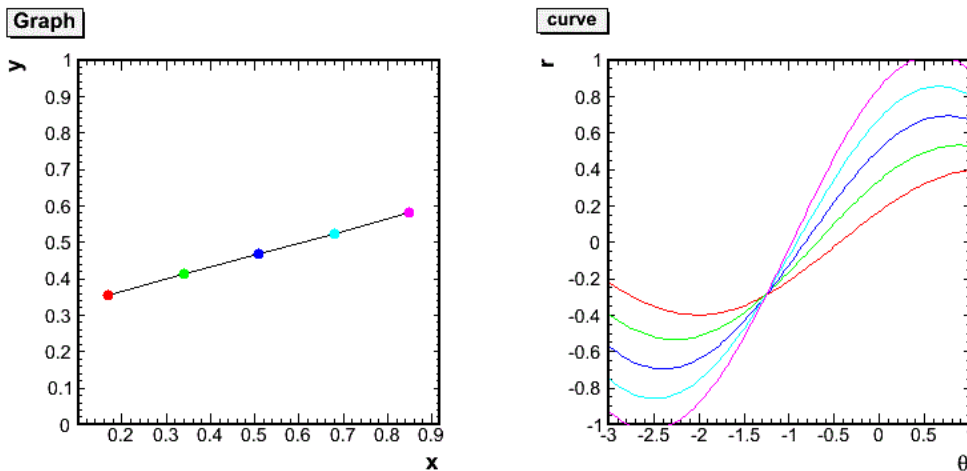


図 6.1: Hough 変換

次に、これを実際のイベントディスプレイに応用した図が、図 6.2 である。これはトラッキング平面的宇宙線光量試験におけるイベントディスプレイの一例である。セルの色と曲線の色が対応している。さらにこれをモジュールのイベントディスプレイに応用すると、図 6.3 のようになる。自動で交点を検出するには、画像をデジタル化し密度の高いピンとして検出する。

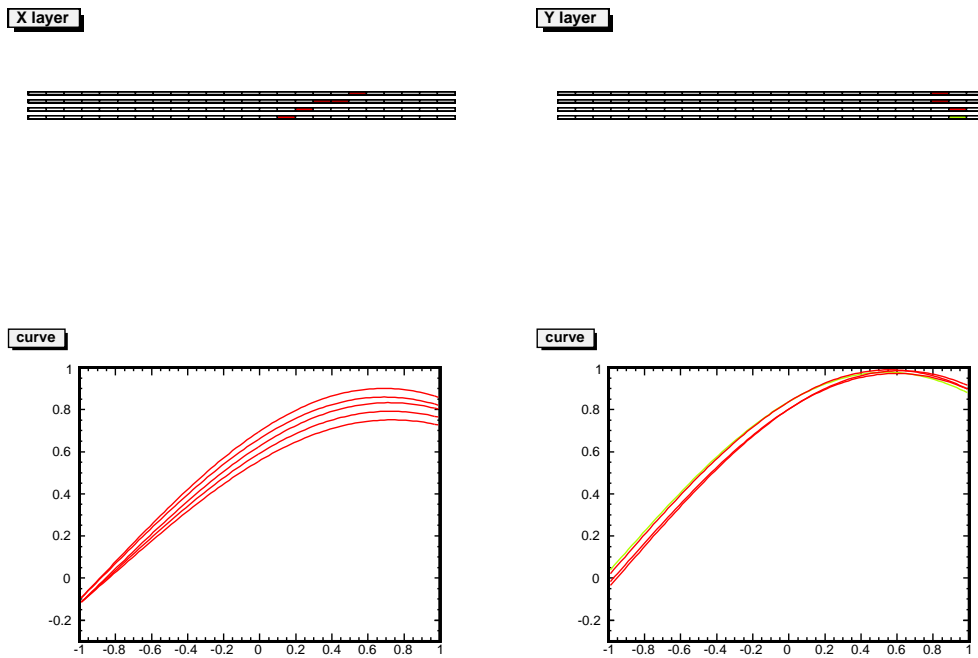


図 6.2: Hough 変換のイベントディスプレイへの応用の一例

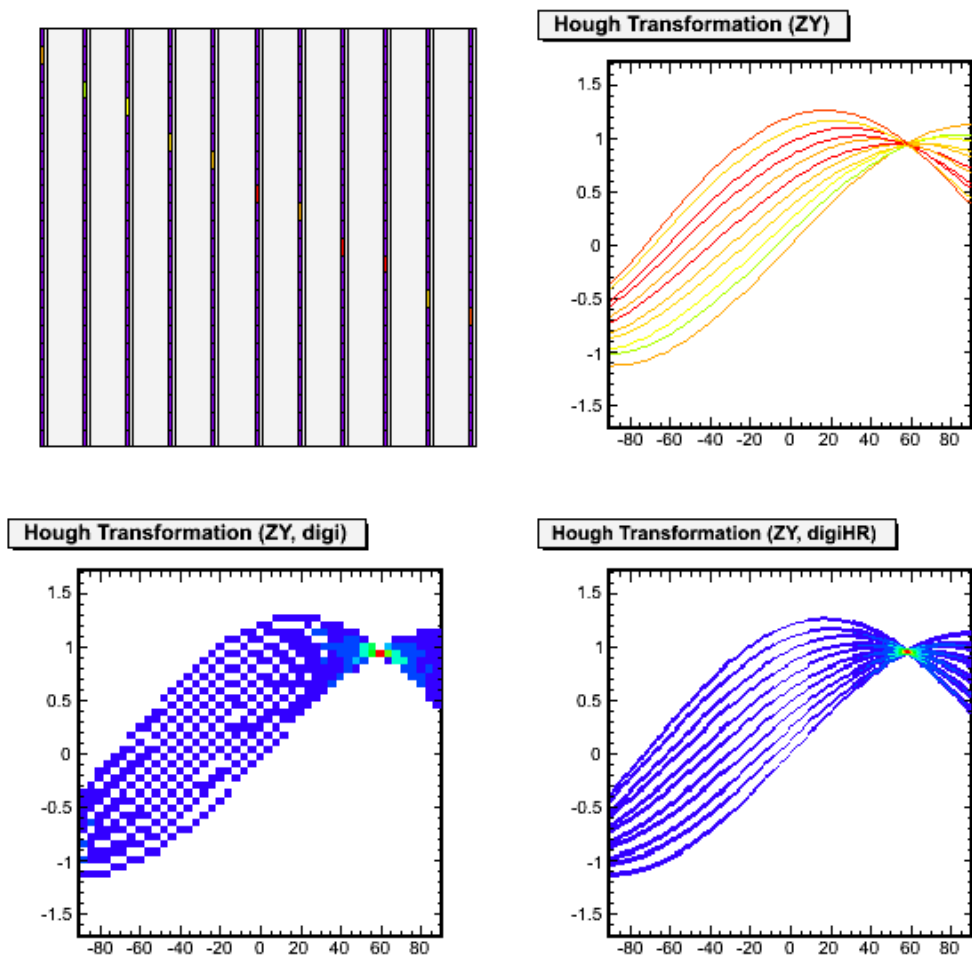


図 6.3: 上の2つの図はイベントディスプレイと曲線の一例。右下はデジタル化した図、左下はさらに解像度を上げた図である。

6.2 ニュートリノイベントの検出

2009年4月よりビームコミッショニングが開始され、同年11月には INGRID グループとして初めてのニュートリノイベントの検出に成功した(図 6.4)。このときのビームエネルギーは 30GeV、陽子数は1バンチあたり 4×10^{11} 個である。図 6.5 はその他の INGRID 由来のニュートリノイベント、図 6.6 はロックミュオン (INGRID 以前の壁をターゲットに生成されたミュオン) によるイベントである。

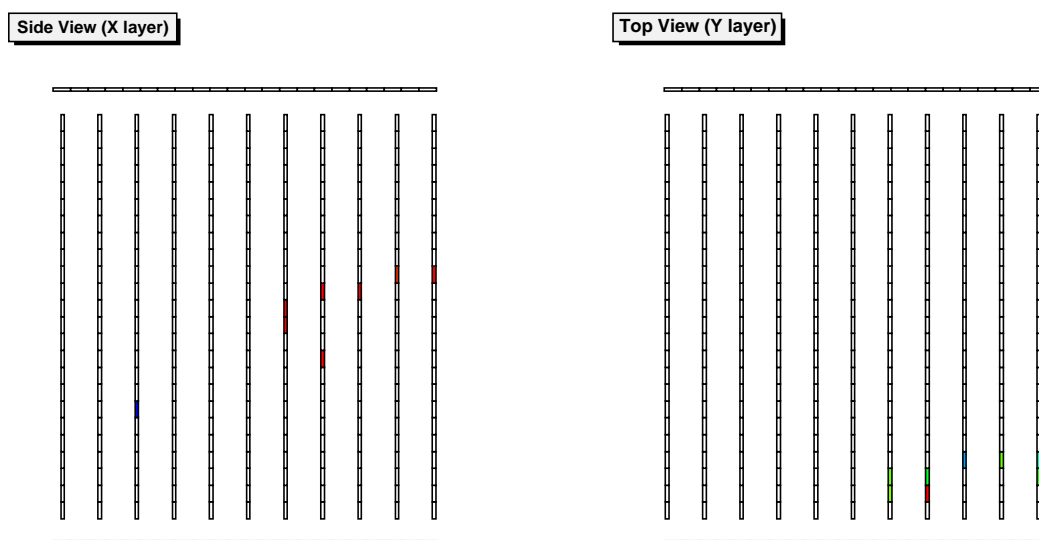


図 6.4: 1st ニュートリノのイベントディスプレイ。2009年11月22日。左側は横から見た図、右側は上から見た図である。

2009年11,12月のビームコミッショニングにおいて、バックグラウンドとして扱われるロックミュオンや宇宙線イベントと INGRID 由来のニュートリノイベントを区別するために、次のようなカット条件でイベントセレクションを行った。なお、光量が 10p.e. 以上のチャンネルをヒットチャンネルと定義する。

- up-stream VETO プレーンにヒットチャンネルがある (図 3.7 参照)。
- 1枚目のトラッキングプレーン (ビーム最上流) にヒットチャンネルが存在する。
- ヒットチャンネルのあるアクティブプレーン (同一のトラッキングプレーンにおいて、X 層、Y 層共に反応のあるチャンネルのあるプレーン) が 2枚以上存在する。

その結果、755 イベント中 363 イベントが INGRID 由来のニュートリノイベント、392 イベントがバックグラウンドであった。

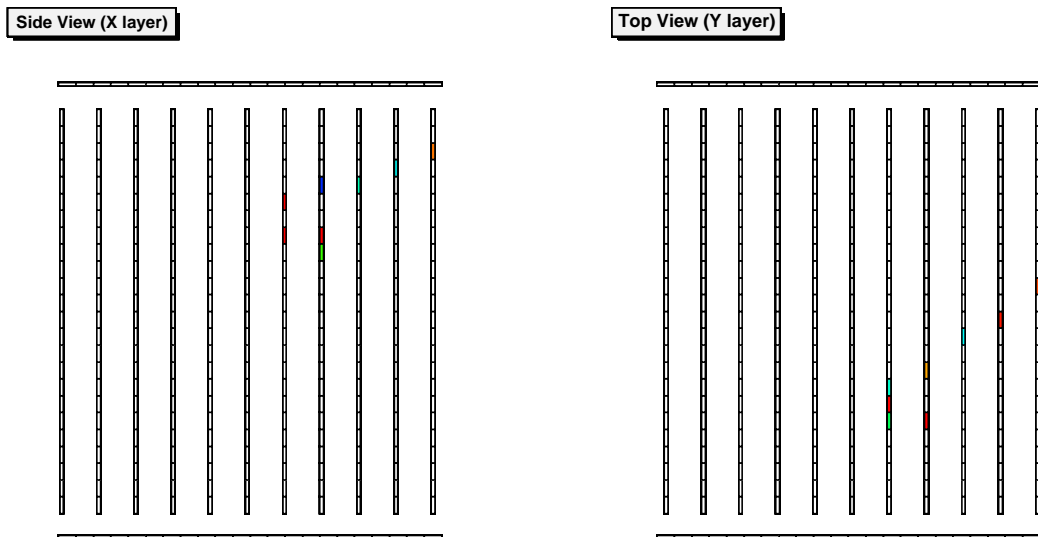


図 6.5: INGRID 由来のニュートリノイベントのサンプル

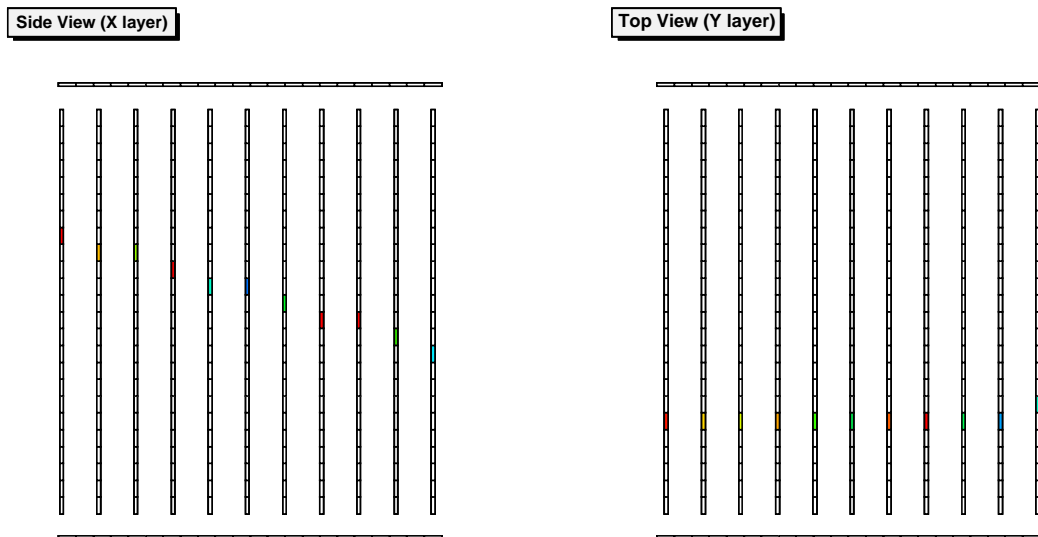


図 6.6: 壁で起こったニュートリノイベントのサンプル。トラッキングプレーンの1枚目からミュオンが突き抜けている。

結論

INGRID モジュールを製作する前に行ったトラッキングプレーンの性能評価では、ノイズ試験および宇宙線光量測定を行い、各チャンネルに異常がないことを確認した。異常のあったチャンネルは、人為的な組み立てミス（チャンネル、PCB 基盤の付け間違い）の他に、ファイバー、ケーブル、MPPC の傷や汚れで、これらは各部品を交換することにより問題を取り除くことができた。その結果、INGRID トラッキングプレーン全 8448ch の出力光量の平均値は 40.0p.e.、検出効率の平均値は 99.5 % であり、不定性は 0.07 % であった。これは要求される精度（不定性が 0.5 % 以下）より十分良い値である。

次に、モジュール組み立ておよび INGRID 検出器ホール内へのインストール後再度ノイズ試験を行ったところ、光漏れや作業中のケーブルの断線が原因と見られる読み出しの異常が生じたため、遮光シートでモジュール全体を覆う等の対策を取った。また、湿度によるねじ部分の錆付きに関しては、モジュール全体をテントで覆い、ファンや除湿器を設置することで対処した。

その後 Horizontal モジュール、Vertical モジュールの計 14 モジュールが正常に動作することが確認され、2009 年 4 月からのビームコミッショニングに臨んだ。同年 11 月には、INGRID グループとしては初のニュートリノイベントの検出に成功した。11,12 月のビームコミッショニングで検出されたニュートリノイベント 755 イベントのうち、363 イベントが INGRID の鉄標的で生成されたニュートリノイベントであることが確認された。

なお、今後残りの 2 モジュールをインストールし、2010 年 3 月より物理ランの開始が予定されている。

参考文献

- [1] 「素粒子物理学」 原康夫, 稲見武夫, 青木健一郎 (朝倉書店)
- [2] 「KEK-神岡間ニュートリノ振動実験」 西川公一郎 (日本物理学会誌 Vol.52 No.9)
- [3] 「ニュートリノ振動研究の現状」 南方久和 (日本物理学会誌 Vol.53 No.10)
- [4] 「Introduction to High Energy Physics」 DONALD.H.PERKINS (CAMBRIDGE)
- [5] 「T 2 K 長基線ニュートリノ振動実験ニュートリノのビームモニター INGRID の製作と性能評価」 大谷将士 (京都大学 修士論文)
- [6] 「T2K 長基線ニュートリノ振動実験ニュートリノビームモニター INGRID に用いるシンチレーターと光子検出器 MPPC の性能評価」 川向裕之 (京都大学 修士論文)
- [7] 「半導体光検出器 MPPC の性能評価システムの構築」 五味慎一 (京都大学 修士論文)
- [8] 「Evidence for Muon Neutrino Oscillation in an Accelerator-based Experiment」 前坂比呂和 (京都大学 博士論文)
- [9] 「Results from K2K and status of T2K」 Yuichi Oyama Apr,2009
- [10] 「Measurement of Neutrino Oscillation by K2K Experiment」 E.Aliu et al. Apr,2008

謝辞

この論文を仕上げるに当たって、大学院修士課程の2年間を支えてくださった皆様に感謝いたします。教授の奥沢先生、準教授の清矢先生、山本先生には、大学院に入って初めて高エネルギー物理学を勉強することになり右も左もわからなかった私を、一から丁寧に指導してくださいました。不出来な生徒でしたが、根気よく教えてくださり本当にありがとうございました。先生方は研究者としてばかりか、人としても尊敬でき、私が生活面においてもこの2年間を乗り越えることができたのは先生方のあたたかみがあってこそこのことで、大変感謝しております。先輩方、同期の田代君と吉田さん、後輩の皆様にも大変お世話になりました。今年度に入ってからは研究室のメンバーも大幅に増え、にぎやかで楽しい研究生生活を送ることができました。特に、松村さんとは何度となく東海村出張を共にし、研究生生活・プライベート共にとても楽しく充実した時間を過ごすことができました。

また、京都大学の皆様、中でも大谷さん、南野さんには東海へ行くたびにお世話になりました。大変有意義な経験をさせていただき感謝しております。そのほかの日本各地、世界各地のT2K コラボレーターの皆様、ありがとうございました。

2年間を振り返ると、本当に多くの方々に関わってきたことを実感いたします。皆様から学んだことを無駄にせぬよう、これからも精進したいと思います。最後に、2年間遠くから見守って支えてくれた家族、友人の皆様、心からありがとうございました。