修士論文

T2K 実験における
ニュートリノビームモニターの開発

京都大学理学研究科 物理学宇宙物理学専攻
物理学第二分野 高エネルギー物理学研究室

栗本佳典

平成 18 年 2 月 1 日

概 要

2009 年に開始予定の T2K 長基線ニュートリノ振動実験はミューオンニュートリノ消失モードにおける振動パラメータの精密測定、未発見の電子ニュートリノ出現モードの探索を主な目標とする次世代ニュートリノ振動実験である。この実験では東海村で現在建設中の陽子シンクロトロン加速器を用いてミューオンニュートリノを生成し、295km 先のスーパーカミオカンデ (SK) で観測する。この実験の最も大きな特徴はニュートリノビームの軸を SK の方向から 2.5 度ずらす「off-axis 法」と呼ばれる方法を用いる事である。この off-axis 法を用いれば SK に届くニュートリノのエネルギー領域をニュートリノ振動確率が最大になるエネルギーに一致させる事ができる。ただし、ニュートリノビームの方向と SK に向かうニュートリノのエネルギーに強い相関があるのでニュートリノビームの方向を精度よく測定する事が要求される。

本研究ではこの要求を達成するために重要な役割を担う「ニュートリノビームモニター」の設計、開発を行った。ニュートリノビームモニターは陽子標的から 280m の位置に設置されニュートリノ反応を直接用いてビームの方向を測定する。我々はニュートリノビームモニターとして、ビーム軸周りに検出器モジュールを十字型に配置する「N-Grid 検出器」を採用した。各検出器モジュールでニュートリノの荷電カレント反応によるミューオンを観測し、そのイベント数を用いてビーム中心を再構成する。また各検出器モジュールは鉄とシンチレーターのサンドイッチ構造になっている。

本研究では、まず T2K 実験が目標とするニュートリノ振動パラメータの測定精度を得るために必要なビーム方向の測定精度を求めた。次に、モンテカルロ (MC) シミュレーションを用いて N-Grid 検出器内のニュートリノイベントをシミュレートし目標の測定精度を得るために十分な統計量がある事を示した。さらに実際にニュートリノビームの方向がずれた場合をモンテカルロシミュレーションによって再現し、そのずれに対しても N-Grid 検出器は十分な感度を持つ事を示した。また、測定精度とニュートリノビーム方向のずれに対する感度の両方の要求から、各検出器モジュールのニュートリノイベントの系統誤差を 2%以内におさえなければならない事を示した。

次に、ニュートリノイベント数の系統誤差の研究を行った。系統誤差の主な原因は、バックグラウンド含有率、検出器モジュールの検出効率である。そこで、前者に関しては N-Grid 検出器が置かれるホールの壁で起きたニュートリノ反応による二次粒子をシミュレートし、シグナルに対するバックグラウンドの含有率を評価した。その結果、バックグラウンド含有率は要求される系統誤差の 2%に比べて十分小さい事を示した。後者に関しては、まず MC シミュレーションによりシンチレーターの検出効率の不定性がビーム方向の測定に及ぼす影響を調べた。その結果、シンチレーターの検出効率が 99.5% であれば十分要求を満たす事を示した。そして、波長変換ファーバー読み出しの方法として、シンチレーターに対して平行に波長変換ファイバーを複数並べて読み出す方法、1 本の波長変換ファーバーを曲げてシンチレーターに埋め込み、それを読み出す方法の二つをパイオンビームと宇宙線を用いてテストした。その結果、両方で 99.5%の検出効率を得ることができた。また、1 本のファイバーを曲げてシンチレーターに埋め込む方法の方が、ファイバー、読み出しチャンネルの両方を少くできる事が分かった。

以上の研究の結果、シンチレーターの検出効率、バックグラウンドの含有率による不定性を含めても N-Grid 検出器がニュートリノビームモニターとして十分な性能を発揮する事を示した。よって N-Grid 検出器を実機に採用する。

目 次

第 1 章　T2K 実験 **4**
1.1　ニュートリノ振動と実験の現状 4
1.2　T2K 実験 4
1.2.1　概要と目的 4
1.2.2　off-axis 法 5
1.2.3　ニュートリノビームライン 5
1.2.4　前置検出器 8
1.2.5　スーパーカミオカンデ 8

第 2 章　ニュートリノビームモニター **9**
2.1　動機 9
2.2　ニュートリノビームの方向とニュートリノ振動測定 10
2.3　ニュートリノビームモニターに対する要請 10
2.3.1　モニターすべきビームプロファイルの範囲 10
2.3.2　ニュートリノ標的 11
2.3.3　ニュートリノのエネルギー領域 12
2.3.4　この節のまとめ 12
2.4　N-Grid 検出器 13

第 3 章　N-Grid 検出器の性能評価 **17**
3.1　モンテカルロシミュレーション 17
3.1.1　ビームラインシミュレーション 17
3.1.2　ニュートリノ反応シミュレーション 17
3.1.3　検出器シミュレーション 18
3.2　ビーム中心の再構成 18
3.2.1　イベントセレクション 19
3.2.2　ビーム中心の再構成 22
3.3　ビームのずれに対する感度 23
3.3.1　ニュートリノビームの方向のずれ 23
3.3.2　N-Grid 検出器で検出すべきビームのずれ 25
3.3.3　N-Grid 検出器の応答 25
3.4　系統誤差に対する要請 30
3.4.1　方法 30
3.4.2　結果 31
3.4.3　トラッカーの検出効率 31
3.5　レイヤー数、レバーアームの長さについての考察 33

3.5.1 方法 . . . 35
3.5.2 結果 . . . 36

第 4 章 バックグラウンド事象の研究 39
4.1 N-Grid 検出器と検出器ホールの位置関係 . . . 39
4.2 全二次粒子をもちいたバックグラウンド含有率の評価 . . . 39
4.2.1 ニュートリノイベントの生成 . . . 39
4.2.2 イベントセレクション . . . 41
4.2.3 結果 . . . 41
4.2.4 側面の veto カウンター . . . 43
4.2.5 残ったイベント . . . 45
4.3 高エネルギー二次粒子のバックグラウンドに対する寄予 . . . 46
4.3.1 ニュートリノイベントの生成 . . . 46
4.3.2 結果 . . . 49
4.4 この章のまとめ . . . 52
4.5 課題 . . . 52

第 5 章 シンチレーターの波長変換ファイバー読み出しの研究 54
5.1 動機 . . . 54
5.2 KEK-PS T1 ビームラインにおけるシンチレーターの光量測定 . . . 54
5.2.1 測定の方法 . . . 54
5.2.2 セットアップ . . . 55
5.2.3 TOF カウンターによる粒子識別 . . . 55
5.2.4 光量の定義 . . . 58
5.2.5 各組み合わせに於ける光量比較 . . . 58
5.2.6 10cm 幅シンチレーターを読出すのに必要なファイバーの本数 . . . 58
5.3 宇宙線によるシンチレーターの光量測定 . . . 63
5.3.1 実験の方法 . . . 63
5.3.2 セットアップとデータ収集ロジック . . . 63
5.3.3 測定 . . . 65
5.3.4 測定結果 . . . 65
5.4 結論と考察 . . . 65

第 6 章 結論 69

第1章　T2K実験

この節では、ニュートリノ振動について簡単に説明し、T2K 実験の概観を述べる。

1.1　ニュートリノ振動と実験の現状

ニュートリノ振動とは、ニュートリノが飛行中に他のフレーバーに変化する現象で、ニュートリノが質量を持つ場合に起こる。ニュートリノが振動する確率は、振動のパラメーターの Δm^2(質量の二乗差) と $\sin^2 2\theta$(混合角)、飛行距離 L(km)、ニュートリノのエネルギー E_ν(GeV) を用いて以下の様にかける。

$$P(\nu_\alpha \to \nu_\beta) \ = \ \sin^2 2\theta \sin^2(1.27\Delta m^2 \frac{L}{E_\nu}) \tag{1.1}$$

現在、$\nu_\mu \to \nu_\tau$ モードに関しては、SK グループによる大気ニュートリノの観測 [1] と加速器ニュートリノを用いた K2K 実験 [2] によりその存在はほぼ確実に確かめられた。振動パラメーターは $\Delta m^2_{23} = 1.9 \sim 3.0 \times 10^{-3}\mathrm{eV}^2$ 、$\sin^2\theta_{\mu\tau} > 0.9$ が 90%C.L. で決まっている [1]。また、$\nu_e \to \nu_x(\nu_e \to \nu_\mu$ 及び $\nu_e \to \nu_\tau)$ モードについても SK[3] や SNO 実験 [4] による太陽ニュートリノ観測や KamLAND 実験 [5] による原子炉ニュートリノの測定により確立された。 この振動パラメーターは $\Delta m^2_{12} = 7 \sim 9 \times 10^{-5}\mathrm{eV}^2$ 、$\tan^2\theta_{\mu\tau} \sim 0.40$ である。一方で、$\nu_\mu \to \nu_e$ モードはまだ見つかっていない。

1.2　T2K 実験

1.2.1　概要と目的

T2K 実験は茨城県東海村に現在建設中の 40 GeV 陽子シンクロトロンを用いてミューオンニュートリノビームを生成し、295km 離れた岐阜県飛騨市にあるスーパーカミオカンデ (SK) で観測する次期長基線ニュートリノ振動実験である。実験では、まずニュートリノが生成された直後のニュートリノフラックスやエネルギースペクトルを前置検出器で測定し、SK でのニュートリノ反応事象数、エネルギースペクトルを予想する。そして、SK で実際に観測された値と予測値を比較する事でニュートリノ振動パラメータを測定する。

ニュートリノビームの強度は K2K 実験の約 50 倍で、5 年のランを行なう。以下に目的を挙げる。

電子ニュートリノ出現の探索　唯一、未発見の $\nu_\mu \to \nu_e$ モードを探索する。$\sin^2 2\theta_{13}$ に対する感度は、$\Delta m^2 \ = \ 3 \times 10^{-3}\mathrm{eV}^2$ において $\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.006$ まで到達できる。これは現在の上限値 [6] のおよそ 20 倍の感度である。

ミューオンニュートリノ消失の振動パラメータの精密測定　すでに確立された $\nu_\mu \to \nu_\tau$ モードの振動パラメータ $(\sin^2 2\theta_{\mu\tau}, \Delta m^2_{23})$ の精密測定をする。感度は $\delta(\sin^2\theta) \sim 0.01$、$\delta(\Delta m^2_{23}) \sim 10^{-5}\mathrm{eV}^2$ である。

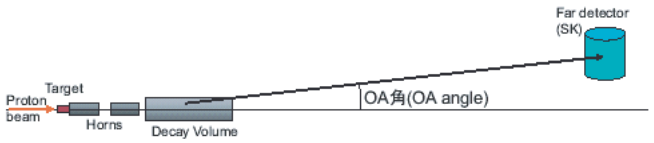

図 1.1: オフアクシス法の概念図

相互作用しないニュートリノ (ν_s) の探索 中性カレント反応事象数を計測する事で、相互作用しない ν_s に振動している $\nu_\mu \to \nu_s$ モードと $\nu_\mu \to \nu_\tau$ を区別する。

1.2.2 off-axis 法

T2K 実験のもっとも大きな特長は、ビーム軸を SK の方向から 2.5 度 (off-axis 角) ずらす、off-axis 法と呼ばれる方法を用いる事である (図 1.1)[7]。この方法により、SK におけるニュートリノエネルギースペクトルに幅のせまいピークを持たせ、そのピーク値をニュートリノ振動確率の高いエネルギー領域に合わせる事が出来る。

ニュートリノビームは陽子を標的に照射して生成したパイオンを崩壊させて作る。そのため、この off-axis 法ではパイオンの進行方向から 2.5 度の角度をもって飛びだすニュートリノを観測する事になる。ニュートリノが飛びだす角度を θ とすると、ニュートリノのエネルギー (E_ν) は

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - P_\pi \cos\theta)} \tag{1.2}$$

と表わせる。ここで m_π、m_μ はそれぞれ親パイオン、ミューオンの質量を、E_π、P_π はそれぞれ親パイオンのエネルギー、運動量を表わす。図 1.2 にニュートリノエネルギーとその親パイオンの運動量の関係を示す。点線はニュートリノがパイオンの進行方向に飛びだした場合で、実線は 2.5 度の角度をもって飛びだした場合をそれぞれ示している。これをみるとパイオンの進行方向に対してニュートリノが飛びだした場合、そのエネルギーは親のパイオンのエネルギーに比例して大きくなっていく事がわかる。それに対して、2.5 度の角度で飛びだしたニュートリノのエネルギーは親パイオンのエネルギーにほとんどよらなくなる。これが幅の狭いピークを持ったエネルギースペクトルになる理由である。また、図 1.3 に off-axis 角が 2.5 度の時の SK でのニュートリノエネルギーフラックスを示す。この時のピーク値は約 0.65GeV なので、$\Delta m^2_{23} = 2.8 \times 10^{-3}\mathrm{eV}^2$、$\sin^2 2\theta_{\mu\tau} = 1$(K2K 実験のベストフィット値 [2]) を仮定してニュートリノ振動確率を計算すると、

$$P(\nu_\mu \to \nu_\tau) \;=\; \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \times (2.7 \times 10^{13})(\mathrm{eV}^2) \times \frac{295\mathrm{km}}{0.65\mathrm{GeV}}) \;\sim\; 1 \tag{1.3}$$

となり、off-axis 角の 2.5 度は適当な値である。

このように、off-axis 法は長基線ニュートリノ振動実験における有効な手法である。しかし、off-axis 角がずれるとエネルギースペクトルのピークの位置がずれるためビーム方向を非常に精度よく測らねばならない。要求される精度についての定量的な議論は 2.2 で行なう。

1.2.3 ニュートリノビームライン

T2K 実験では 40 GeV 陽子シンクロトロンで加速された陽子をニュートリノビームライン [8] へ取りだして使用する。表 1.1 に陽子ビームのパラメータを示す。図 2.1 にニュートリノビームライ

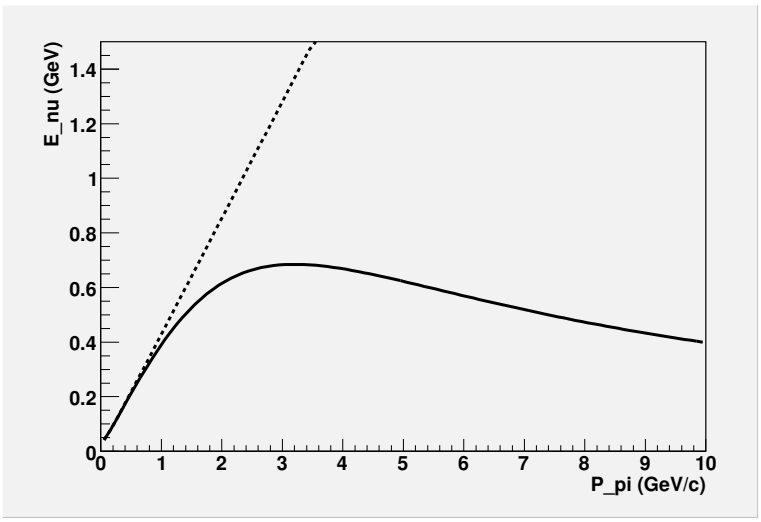

図 1.2: ニュートリノエネルギーと親パイオンの運動量の関係。実線は親パイオンの方向に対して 2.5 度で飛び出したニュートリノを、点線は親パイオンと同じ方向で飛び出したニュートリノをそれぞれ表わしている。

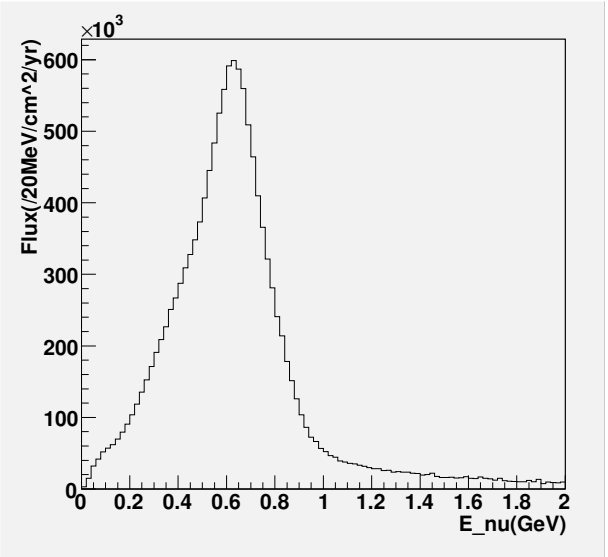

図 1.3: off-axis 角 2.5 度に置ける SK でのニュートリノフラックス。

陽子エネルギー	40 GeV
ビーム強度	750 kW
スピル中の陽子数	3.3×10^{14} 個
スピル間隔	3.53 sec
スピル幅	5.2 μsec
バンチ数	8

表 1.1: 陽子ビームのパラメータ

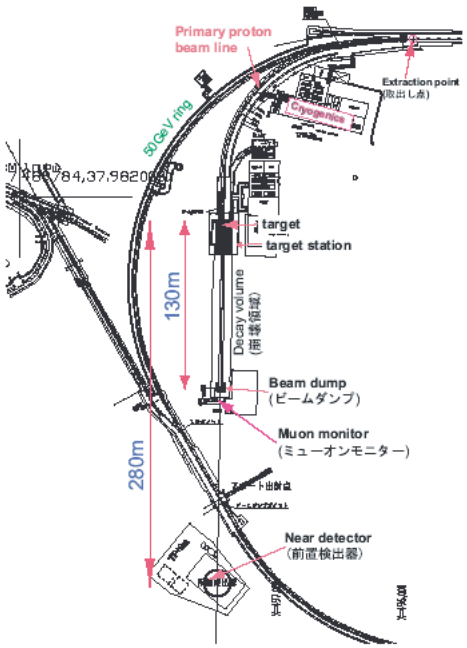

図 1.4: ニュートリノビームラインの概観

ンの概観図を示す。以下にその構成要素について簡単に述べる。

標的、電磁ホーン

取りだされた陽子ビームはグラファイト標的に照射される。それによって生成されたパイオンは 3 つの電磁ホーンによりビーム軸方向に集束される。また、標的は最上流の電磁ホーンの内部に収容されている。

崩壊トンネル

この様にして生成、集束されたパイオンは電磁ホーンの後に続く約 110m の崩壊トンネル内で $\pi^+ \to \mu\nu_\mu$ のように崩壊してニュートリノを生成する。崩壊トンネルの終端にはビームダンプが置かれ、陽子やそれによって生成されたハドロン、及びそれらの崩壊で出来たミューオンの 5 GeV/c

以下のものはこれに吸収される。

ミューオンモニター

ビームダンプの直後 (標的から 130m) にはミューオンモニターを設置し、ビームダンプを通過した 5 GeV/c 以上のミューオンのプロファイルと強度を測定する。このミューオンのほとんどが $\pi^+ \to \mu\nu_\mu$ によって出来たものなので、このミューオンを測定することで間接的にニュートリノビームの方向や強度を測定している事になる。

1.2.4　前置検出器

標的から 280m のところに前置検出器を設置する。前置検出器には役割の違う以下の二種類がある。

on-axis(ニュートリノビームモニター)

この検出器は親パイオンのビーム方向に設置され、ニュートリノ反応を直接もちいてビーム方向を測定する。この検出器に関する研究が本論文の主題である。

off-axis

この検出器は親パイオンのビーム方向から約 2.0 度ずれた設置され、ニュートリノのフラックスやエネルギースペクトルを測定し、SK での事象数やエネルギースペクトルを予測する。また、ニュートリノ相互作用の精密測定も行なう。

1.2.5　スーパーカミオカンデ

T2K 実験では、ニュートリノ生成点から 295km 離れた岐阜県神岡町にある大型水チェレンコフ装置スーパーカミオカンデを後置検出器として用いる。ここで観測されたニュートリノ反応の事象数とエネルギースペクトルを、off-axis 前置検出器の測定から予測される値と比較して、ニュートリノ振動パラメーターを測定する。

第2章　ニュートリノビームモニター

この章では、まず始めに本論文の主題であるニュートリノビームモニターの動機について述べる。次にニュートリノビームモニターに課される要求について説明する。そして最後に、我々がニュートリノビームモニターとして採用した N-Grid 検出器のデザインを紹介する。

2.1　動機

長基線ニュートリノ振動実験においてニュートリノビームを正しい方向に向ける事は最も重要である。なぜならニュートリノビームの方向を間違えると後置検出器におけるニュートリノビームのフラックスとエネルギーが変化し、ニュートリノ振動パラメーターの測定を誤るからである。さらに、T2K 実験では off-axis 法のためスーパーカミオカンデにおけるニューリノエネルギースペクトルのピーク値がビーム方向と強い相関を持っているのでその重要性はなお高い。以上の理由から T2K 実験ではニュートリノビームの方向を測定する検出器は必要不可欠である。

T2K 実験ではニュートリノビームの方向を測定する検出器として、まず、ビームダンプ直後 (陽子ターゲットから 140m) にミューオンモニターを設置する。ミューオンモニターではミューオンの方向を測定する事で、間接的にニュートリノビームの方向を測定する。しかし、ミューオンモニターで測定されるミューオンの運動量は 5 GeV/c 以上であり、これは全体のミューオンの 7.3 %にすぎず、また、SK で観測するニュートリノとは異なるエネルギー領域のニュートリノをみている事になる。そのため、実際のニュートリノビームの方向がミューオンモニターで測定した方向と一致している事を確かめる必要がある。

そこで、ニュートリノ検出器ホール (陽子ターゲットから 280 m) の親パイオンのビーム軸上に (on-axis) にニュートリノビームモニターを設置する (図 2.1)。この検出器では、ニュートリノ反応を用いて直接ビーム方向を測定する。

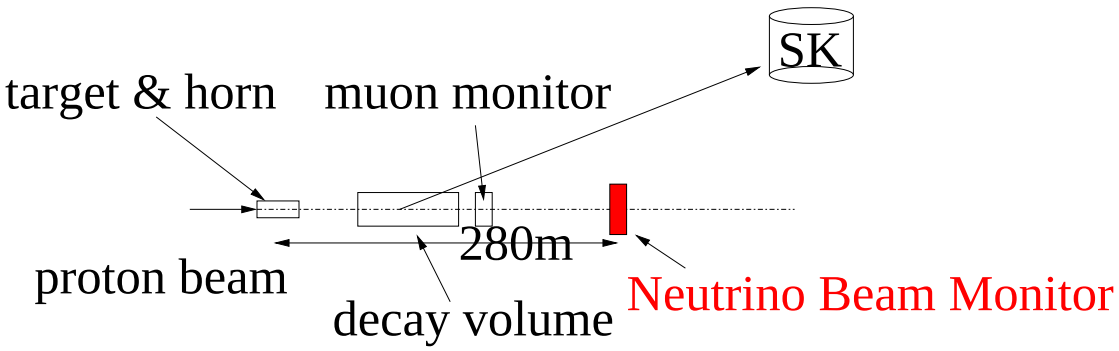

図 2.1: ニュートリノビームモニターの位置

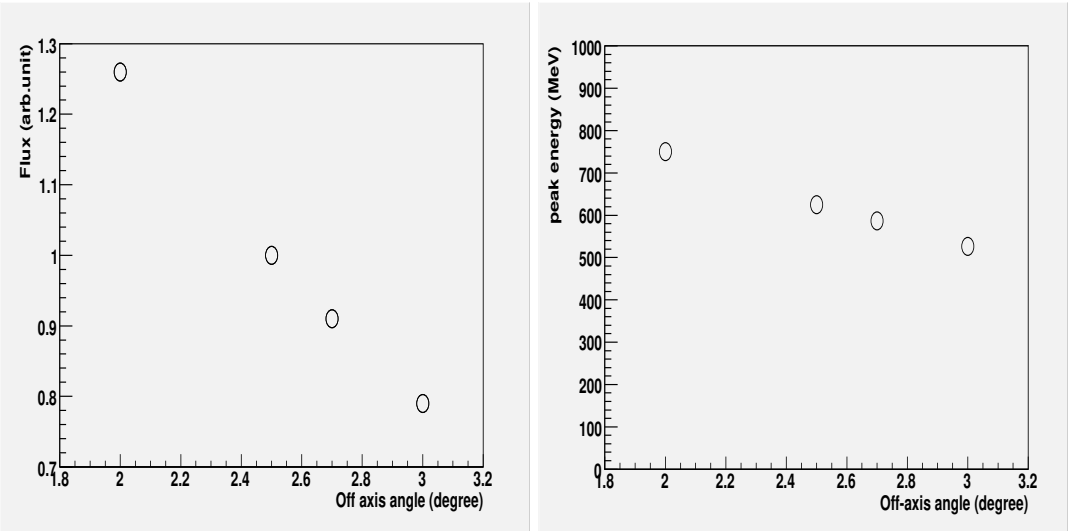

図 2.2: off-axis 角が 2.0,2.5,2.7,3.0 度の時の SK におけるニュートリノのフラックス (左)、およびエネルギースペクトルのピーク値 (右)

2.2　ニュートリノビームの方向とニュートリノ振動測定

ニュートリノビームの方向がニュートリノ振動の測定に与える影響を考察する。図 2.2 に off-axis 角が 2.0,2.5,2.7,3.0 度の時のニュートリノのフラックス (左図) とエネルギースペクトルのピーク値 (右図) を示した。この図から、1mrad のずれに対して、ニュートリノエネルギーのピーク値は約 13 MeV 変化し、フラックスは約 3%変化している事が読み取れる。ニュートリノエネルギー 13 MeV のずれはニュートリノエネルギースペクトルのピーク値 (約 650 MeV) に対して、2%程度であり、これはエネルギーの測定を間違える原因となる。また、フラックスの不定性 3%は SK での事象数予測の不定性と見なせる。エネルギースケール、SK での事象数予測が振動パラメータ $(\sin^2 2\theta, \Delta m^2)$ の決定精度に及ぼす影響についてはすでに研究がなされている [9]。それによると SK での事象予想値、エネルギースケールの不定性がそれぞれ 3 %以内であれば、T2K 実験における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統計誤差である、$\delta(\sin^2 2\theta) = 0.009$、$\delta(\Delta m^2) = 5 \times 10^{-5}$ eV^2 ($\Delta m^2 = 2.7 \times 10^{-3}$ eV^2、$\sin^2 2\theta = 1$ を仮定) よりも小さい系統誤差で抑えられる。よって、1mrad よりも十分よい精度でビーム方向を測る必要があると言える。1mrad はニュートリノビームモニターが置かれる標的から 280m の位置で 28cm に対応する。

2.3　ニュートリノビームモニターに対する要請

2.3.1　モニターすべきビームプロファイルの範囲

ニュートリノビームモニターでは、まずニュートリノ標的をビーム軸を中心に設置する。そして、標的内のニュートリノ反応の位置分布 (プロファイル) の中心を再構成する事でビーム方向を測る。図 2.3 にニュートリノビームモニターが設置される陽子ターゲットから 280 m の位置におけるニュートリノ反応の水平方向のプロファイルを示す。この図から分かるようにニュートリノビームは広く分布しているため、プロファイルから中心を再構成するには最低でも ± 5 m をカバーする

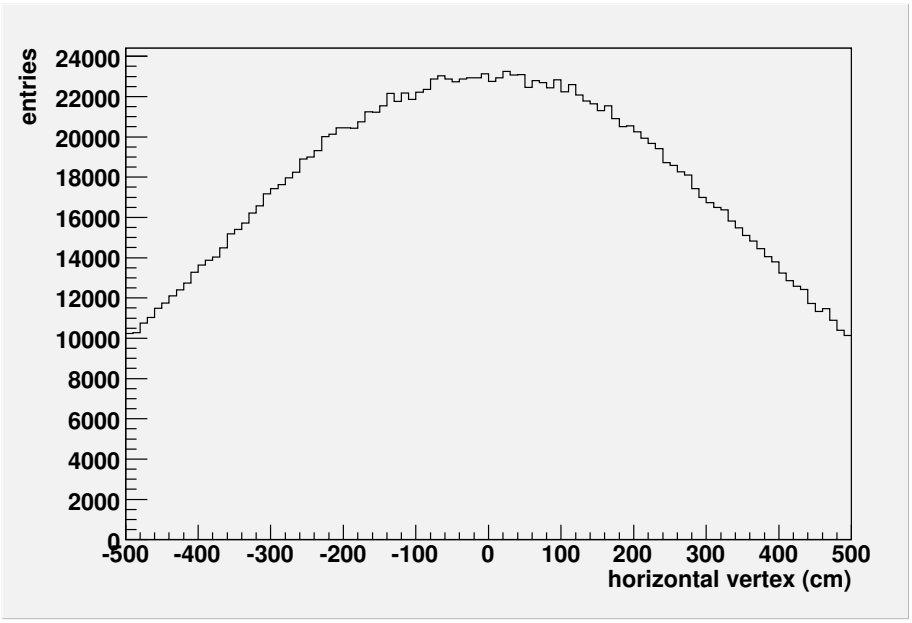

図 2.3: 反応をおこしたニュートリノの水平方向のプロファイル。このプロファイルは鉛直方向には $\pm 50\mathrm{cm}$ の領域を積分している。

必要がある。

2.3.2 ニュートリノ標的

ニュートリノビームモニターではニュートリノ反応を用いるのでミューオンモニターの様なスピル毎の測定は不可能である。しかし、少なくともビームのコミッショニングの時にビームのずれが物理結果に影響を及ぼさない程度である事を確認する必要がある。また、ビームのコミッショニング時にはビーム強度がデザイン値 $(0.75\ \mathrm{MW})$ の $1\ \%$程度である事が予想される。そこで我々は、デザイン値の $1\ \%$のビーム強度において、一ヶ月程度の統計量でビーム方向を必要な精度で測定する事を目標にしている。その時のニュートリノイベント数はおよそ 2000 イベント$/\mathrm{ton}$ である (図 2.3 で示した領域の積分値)。この数字から、ニュートリノ標的としてどれぐらいの質量が必要かをある仮定のもとで以下の様に概算する事ができる。まず、ニュートリノイベントの検出効率が 20%、そのイベント数の系統誤差 2%を仮定する (3.4 を参照)。そして、プロファイルの測定の為には、上で述べたビーム軸から $\pm 5\ \mathrm{m}$ の間で少なくとも $5 \sim 10$ 点位の観測点が必要である。また、各点のイベント数の統計誤差を系統誤差と同程度の 2%にするために、イベントセレクション後で 2000 イベント程度、反応数自体で 10000 イベント以上が必要である。すると、全観測点で 100000 イベント程度が目安となり、そのためには数十トン級のニュートリノ標的が必要である。

また、ニュートリノビームモニターはデザイン値の強度が達成されてからは、1 日毎にビーム強度や方向の安定性をモニターにする。ただ、イベント数としてはデザイン値の 1%のビーム強度における 1 か月の方が厳しい条件なので、以後はそちらの条件を使う。

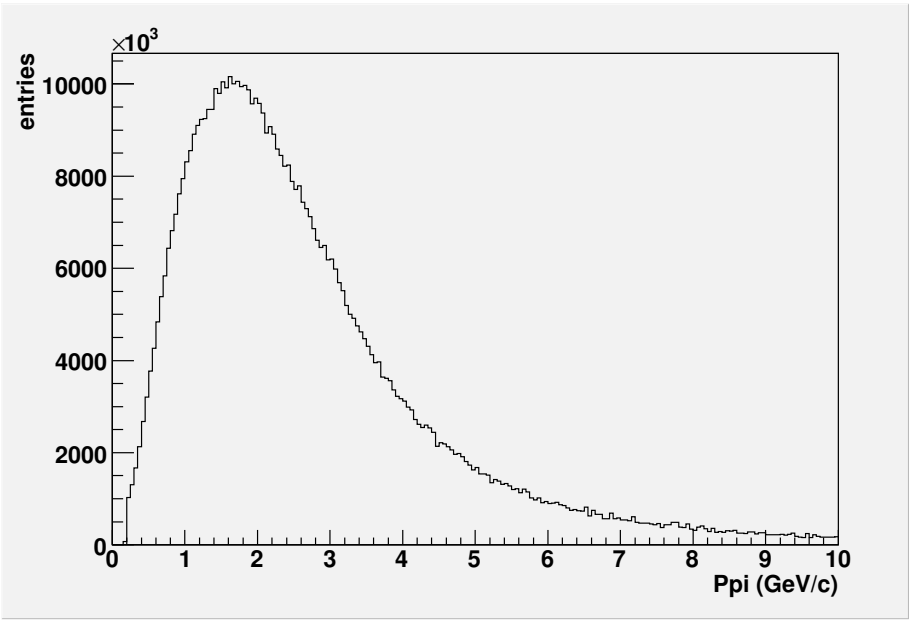

図 2.4: SK に向かうニュートリノに崩壊する親パイオンの運動量

2.3.3　ニュートリノのエネルギー領域

ここでは、ニュートリノビームモニターで測定すべきニュートリノのエネルギー領域について考察する。まず、図 2.4 に SK に向かう (親パイオンビームの進行方向に対して 2.5 度の方向) ニュートリノに崩壊する親パイオンの運動量スペクトルを示す。これをみると 6 GeV/c 以下のパイオンが全体の大半 (94%) を占めている。よって、6 GeV/c 以下のパイオンの崩壊により、ニュートリノビームモニターの方向 (パイオンの進行方向) に飛んだニュートリノのエネルギー領域を測定すればよい。図 2.5 にニュートリノビームモニター設置位置におけるニュートリノエネルギースペクトルを示す。黒いヒストグラムがニュートリノ全体を示し、赤いヒストグラムは親パイオンのエネルギーが 6 GeV/c 以下であるニュートリノを示す。この図から親パイオンのエネルギーが 6 GeV/c 以下であるニュートリノを測定するには、3 GeV 以下のニュートリノを検出すれば十分である事が分かる。

2.3.4　この節のまとめ

以下にこの節でみてきたニュートリノビームモニターに対する要請をまとめる。

- 数十トンのニュートリノ標的
- ビーム中心から ±5 m の領域をカバーする。
- 3 GeV 以下のエネルギー領域のニュートリノを検出する。

これらの要請を満たした上で、できるだけ安価で頑丈なデザインが望ましい。

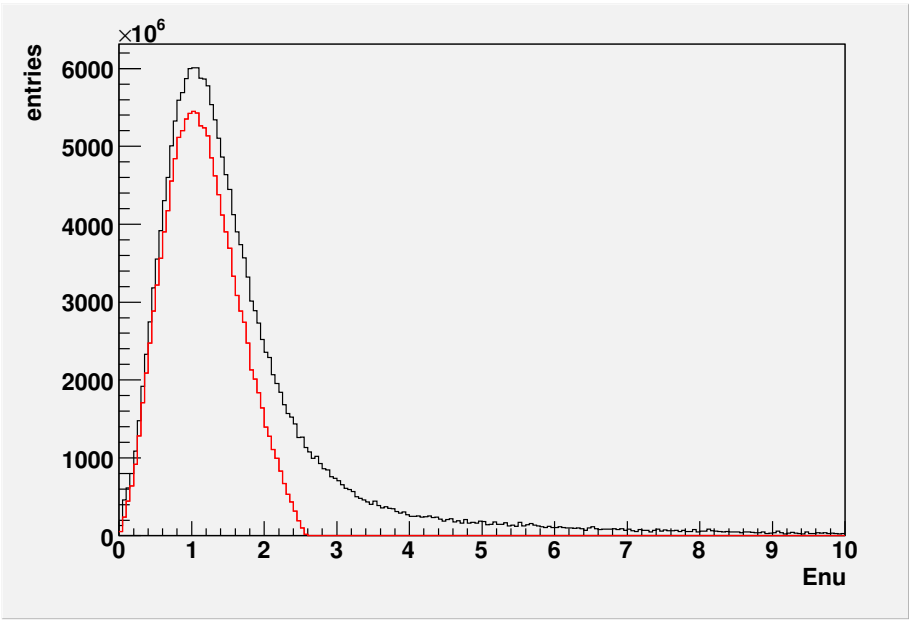

図 2.5: ニュートリノビームモニター設置位置におけるニュートリノエネルギースペクトル。黒色のヒストグラムは全ニュートリノを、赤色のヒストグラムは、親のパイオンの運動量が 6 GeV/c 以下であった時のニュートリノをそれぞれ示す。

2.4 N-Grid 検出器

われわれは前節の条件を踏まえて、ビーム軸を中心に比較的扱い安い大きさの検出器モジュールを並べてビーム中心を測る方法を考案した [10]。この方法により、ビームプロファイル全体を数メートル四方の巨大標的で覆う従来のデザイン [11] に比べて、読出しチャンネルや標的の量を大幅に減らす事が出来る。具体的には、図 2.6 のように 1m×1m×1m の検出器モジュール 14 個をビーム軸を中心に十字型に配置し、ビーム方向を測定する方法を採用した。この検出器全体を N-Grid 検出器とよぶ。これにより ±5m の領域をカバーすることができる。そして、各検出器モジュールは図 2.7 のように 10 cm 厚の鉄ターゲットとトラッカーのサンドイッチ構造になっており、計 110 トンの大質量ターゲットを実現する。N-Grid 検出器では、鉄で生成されたニュートリノ荷電カレント反応によるミューオンをトラッカーで捕える事によりニュートリノイベントを同定する。そして、各検出器モジュールのニュートリノイベント数分布からビーム中心を再構成する事でニュートリノビームの方向を測る。また、各検出器モジュールの側面はシンチレーターで囲まれている。この側面のシンチレーターと前面のシンチレーターは外部からのバックグラウンドを除く veto カウンターとして使用される。

以下に各検出器の構成要素について説明する。

トラッカー (および前面の veto カウンター) 図 2.8 のように、各トラッカー (および前面の veto カウンター) は、100 cm × 10 cm × 1 cm の棒シンチレーターによって、水平方向、鉛直方向にセグメント化されている。このセグメントによりミューオンの飛跡が再構成できる。これらは、図 2.7 の様に 100 cm × 100 cm × 10 cm の鉄ターゲットと交互に配置される。また、この棒シンチレーターの本数は、1 つのモジュールあたり、20(各トラッカーカウンター)×10(レイヤー数)+20(前面の veto カウンター) = 220 本、N-Grid 検出器全体で 220 ×

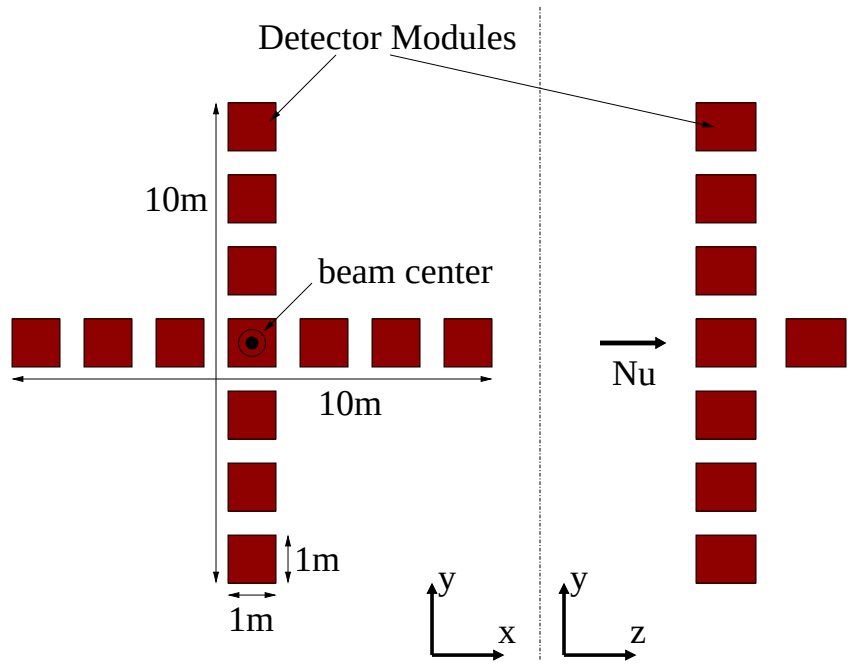

図 2.6: N-Grid 検出器

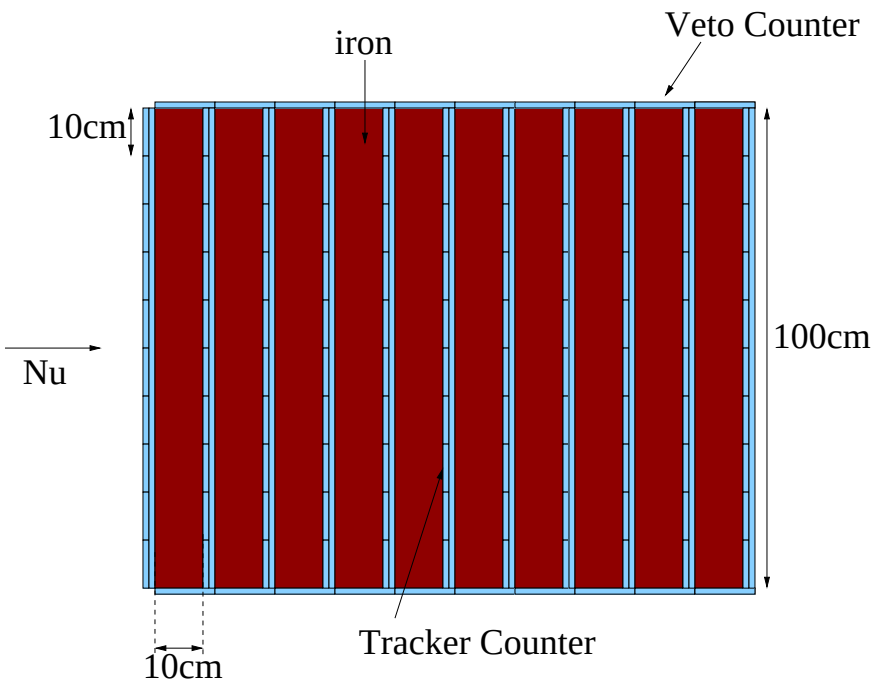

図 2.7: 検出器モジュール

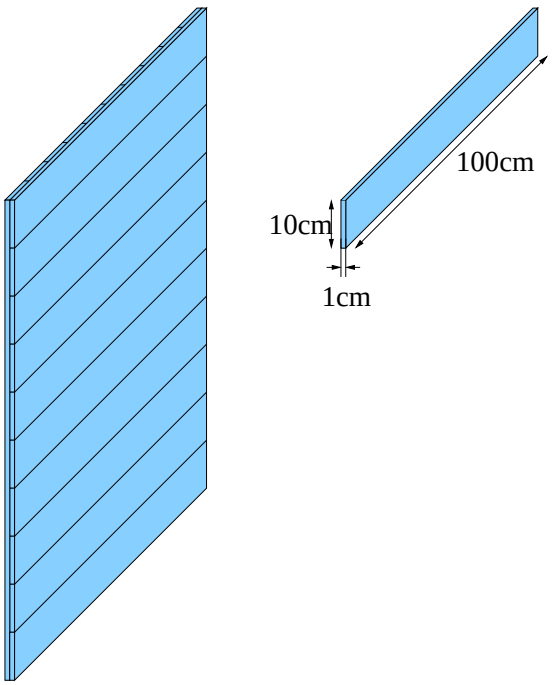

図 2.8: トラッカー (前面の veto カウンター)。

14(モジュール数) = 3080 本である

側面の **veto** カウンター 検出器ホール (図 2.10) の上流の壁でニュートリノ反応を起こし、その反応でできた粒子が N-Grid 検出器のシンチレーターにヒットすると、それはバックグラウンドイベントとなる。これは N-Grid 検出器の測定における主なバックグラウンドである。その為、図 2.9 の様に検出器モジュールの側面を veto カウンターで囲む必要がある。4 章において、これら側面の veto カウンターが無ければ、N-Grid 検出器での測定を困難にする事を定量的に示す。また、各側面の veto カウンターは 100cm × 12cm × 1cm のシンチレーターでセグメント化されている (この理由は 3.2.1 で明らかにする)。この側面の veto カウンターに使うシンチレーターの枚数は、10×4(側面)×14(モジュール数) =560 枚である。

読出し (光検出器、波長変換ファイバー) シンチレーターの光量は、波長変換ファイバーを通じて光検出器で読出す。光検出器は現在開発中の MPPC(multi pixel photon counter)[12] を使用する予定である。必要な読出しチャンネル数は、シンチレーター 1 枚を一本の波長変換ファイバーでその両端を読出すと仮定すると、(3080(トラッカー、前面の veto カウンター) + 560(側面の veto カウンター))×2(両端) = 7280 チャンネルである。ただし、シンチレーター 1 枚あたりの波長変換ファイバーの本数や長さを決定するには、測定によってミューオンに対する検出効率が十分である事を確認する必要がある。シンチレーターの検出効率に対する要請に関しては 3.4.3 で述べる。また、実際に波長変換ファイバー読出しのテスト実験を行なっており、詳細は 5 章で述べる。

次章ではこの N-Grid 検出器がこの章で述べた要求を満たしている事をモンテカルロシミュレーションを用いて示す。

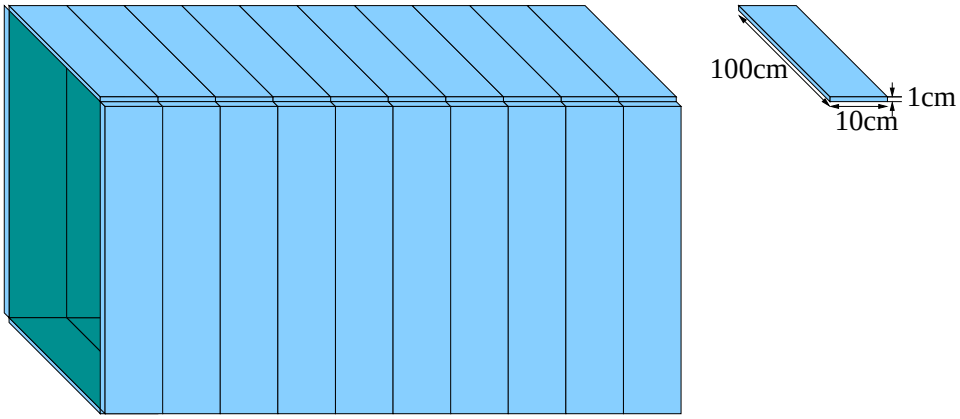

図 2.9: 側面の veto カウンター。

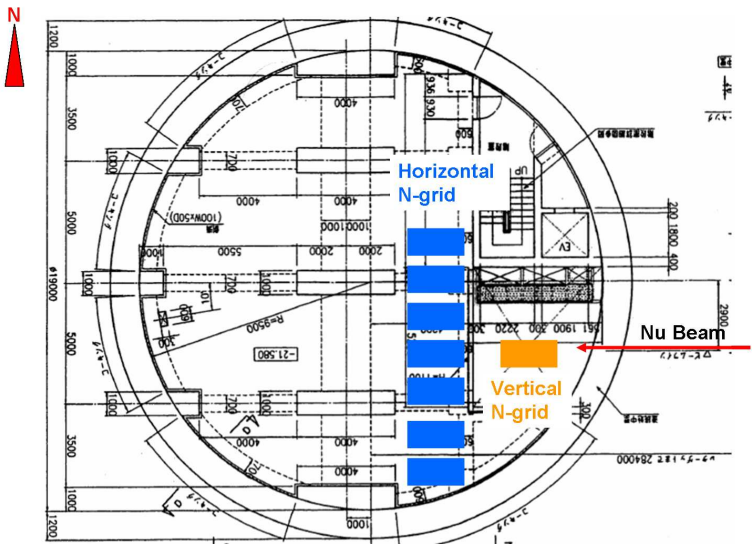

図 2.10: 検出器ホール (上から見た図)。

第3章　N-Grid検出器の性能評価

本章では N-Grid 検出器の性能評価をモンテカルロシミュレーションを用いて行なう。

3.1　モンテカルロシミュレーション

この節では性能評価に用いたモンテカルロシミュレーションについて述べる。N-Grid 検出器でのニュートリノ反応をシミュレートするにはまず、標的に陽子が入射してからニュートリノが生成するまでのビームラインシミュレーションを用いて N-Grid 検出器に入るニュートリノの情報 (エネルギー、位置、方向、フレーバーなど) を得る。次に、得られたニュートリノの情報からニュートリノ反応シミュレーションにより、ニュートリノ相互作用による二次粒子を生成する。最後に検出器シミュレーションにより、その二次粒子による検出器のレスポンスをシミュレートする。以下にそれぞれのシミュレーションプログラムについて説明する。

3.1.1　ビームラインシミュレーション

ビームラインシミュレーションは、ニュートリノビームを生成する課程のシミュレーションを行なうプログラムで Geant3[13] を用いて作られている。陽子ビームをターゲットに入射させ、π 中間子や K 中間子を生成する。それらの粒子は電磁ホーンの磁場により集束され、崩壊トンネルで崩壊しニュートリノを生成する。そして、前置検出器のおかれる領域内に入ってきたニュートリノの情報のみを記録する。

図 3.1 に N-Grid 検出器が置かれる領域でのニュートリノのフラックスを示す。この領域でのニュートリノの内訳は、ν_μ が 93.5%、$\bar{\nu_\mu}$ が 5.7%、ν_e が 0.7%、$\bar{\nu_e}$ が 0.1% である。以下ではニュートリノビームの大部分を占めるミューオンニュートリノについてのみ考える事にする。

3.1.2　ニュートリノ反応シミュレーション

ニュートリノ反応シミュレーションは検出器内でのニュートリノと核子、原子核との相互作用をシミュレーションするプログラムで以下の相互作用が考慮されている。

- 荷電カレント準弾性散乱: $\nu + N \rightarrow l + N'$
- 荷電カレント 1π 生成反応: $\nu + N \rightarrow l + N' + \pi$
- 荷電カレントコヒーレント π 生成反応: $\nu + {}^{16}O \rightarrow l + {}^{16}O + \pi$
- 荷電カレント深非弾性散乱: $\nu + N \rightarrow l + N' + m\pi's$
- 中性カレント弾性散乱: $\nu + N \rightarrow \nu + N$

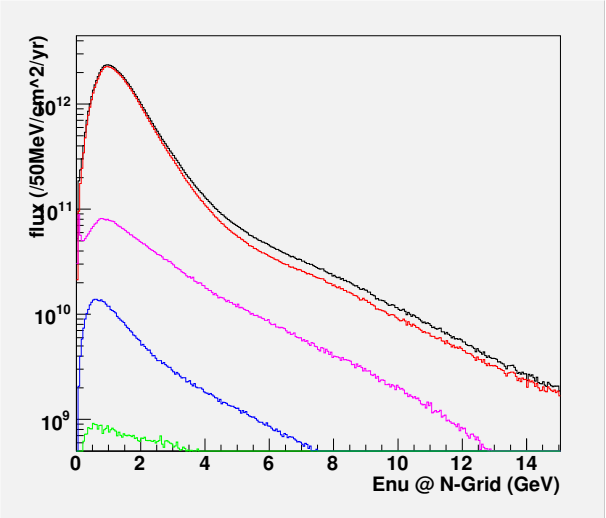

図 3.1: N-Grid 検出器を設置する領域でのニュートリノフラックス。上から全てのニュートリノ、ν_μ、$\bar{\nu_\mu}$、ν_e、$\bar{\nu_e}$ のフラックスを表わす

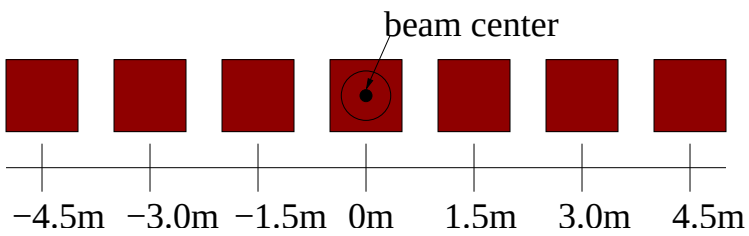

図 3.2: シミュレーション上での N-Grid 検出器モジュールの配置

- 中性カレント 1π 生成反応: $\nu + N \rightarrow \nu + N + \pi$
- 中性カレントコヒーレント: π 生成反応 $\nu + {}^{16}O \rightarrow \nu + {}^{16}O + \pi$
- 中性カレント深非弾性散乱: $\nu + N \rightarrow \nu + N' + m\pi's$

3.1.3　検出器シミュレーション

検出器のシミュレーションには geant4[14] を用いた。ここではニュートリノ反応シミュレーションによって生成された粒子の検出器での伝搬および、シンチレーターにおけるエネルギー損失をシミュレートする。シミュレーションでは簡単の為に水平方向のみに 7 個の検出器モジュールを配置した (図 3.2)。また N-Grid 検出器では荷電カレント反応のミューオンを捕えるので二次粒子としてはミューオンのみを生成した。

3.2　ビーム中心の再構成

ここではどのようにビーム中心を再構成するのかを示す。

3.2.1 イベントセレクション

N-Grid 検出器では検出器モジュール内でおきたニュートリノ反応イベントを同定するために、まず以下の二つのイベントセレクションを行なう。シンチレーターのヒットの定義は、MIP(minimum ionazation particle) の平均エネルギー損失の 1/10 以上のエネルギー損失があった時に、「ヒットがあった」とする。

tracker cut ミューオンの飛跡を再構成するため、連続した三層のトラッカーにヒットがある事を要求した。

veto cut 外部からのバックグラウンドを除去するため、前面と側面の veto カウンターを用いた。前面のカウンターに対しては単純にヒットがあったイベントを除いた。側面の veto カウンターでは、前方からのバックグラウンドを除くため、図 3.3 のようにヒットがあった最上流のトラッカーよりもさらに上流の veto カウンターにヒットがあったイベントのみを除いた。

さらに必要に応じて、次の cut を行なう。このカットの必要性は次節で明らかにする。

$\theta_\mu^{rec} > 20^\circ$ **cut** ニュートリノのエネルギーとミューオンの散乱角には相関があり、ニュートリノのエネルギーが高いほど、ミューオンは前方に飛びやすい。そこで、再構成されたミューオンの方向とビーム方向の為す角度 (θ_μ^{rec}) が 20° 以上である事を要求する事で、モニターすべき領域である 3GeV 以下のニュートリノの純度を上げる (表 3.1)。図 3.4 にニュートリノエネルギーと θ_μ^{rec} の相関を示す。今回のシミュレーションではミューオンのみを生成しているので、ヒットのあったシンチレーターの位置情報から最小二乗法による直線フィットすることで θ_μ^{rec} を計算している。また、この時の角度分解能は 5.9° である (図 3.4)。なお、トラッカーのシンチレーターのセグメントの大きさを 10cm から 5cm に細かくすると、角度分解能は 4.2° になる。もしセグメントの大きさが角度分解能を決めているなら、セグメントが半分になれば、角度分解能も半分になるはずであり、この結果はセグメントを 10cm から小さくしていくと多重散乱による寄与が無視できなくなる事を意味している。よって、10cm のセグメントは適当である。

以後は、ミューオンの角度によるセレクションを含めないものと、含めたもの 2 通りのイベントセレクションについて考える。

	ニュートリノエネルギーの平均値	3GeV 以下のニュートリノの割合
generated	2.9GeV	0.71
tracker cut + veto cut	4.1GeV	0.60
$+ \theta_\mu^{rec} > 20^\circ$	2.9GeV	0.75

表 3.1: ミューオンの角度によるセレクションがある場合とない場合の比較。

各イベントセレクションに於けるニュートリノエネルギースペクトルを図 3.5 に示す。また図 3.2 に示した検出器モジュールのうち左の四つに関する各イベントセレクション毎の検出効率を表 3.2 に示す。なおこの時のイベント数は、デザイン値のビーム強度の 1%で 1 か月間の統計量に対応する。これをみると、イベントセレクション後のニュートリノイベント数は 2000 程度ないしそれ以上ある事が分かる。よって N-Grid 検出器は 2.3.2 に述べたイベント数に対する条件を満たしている。

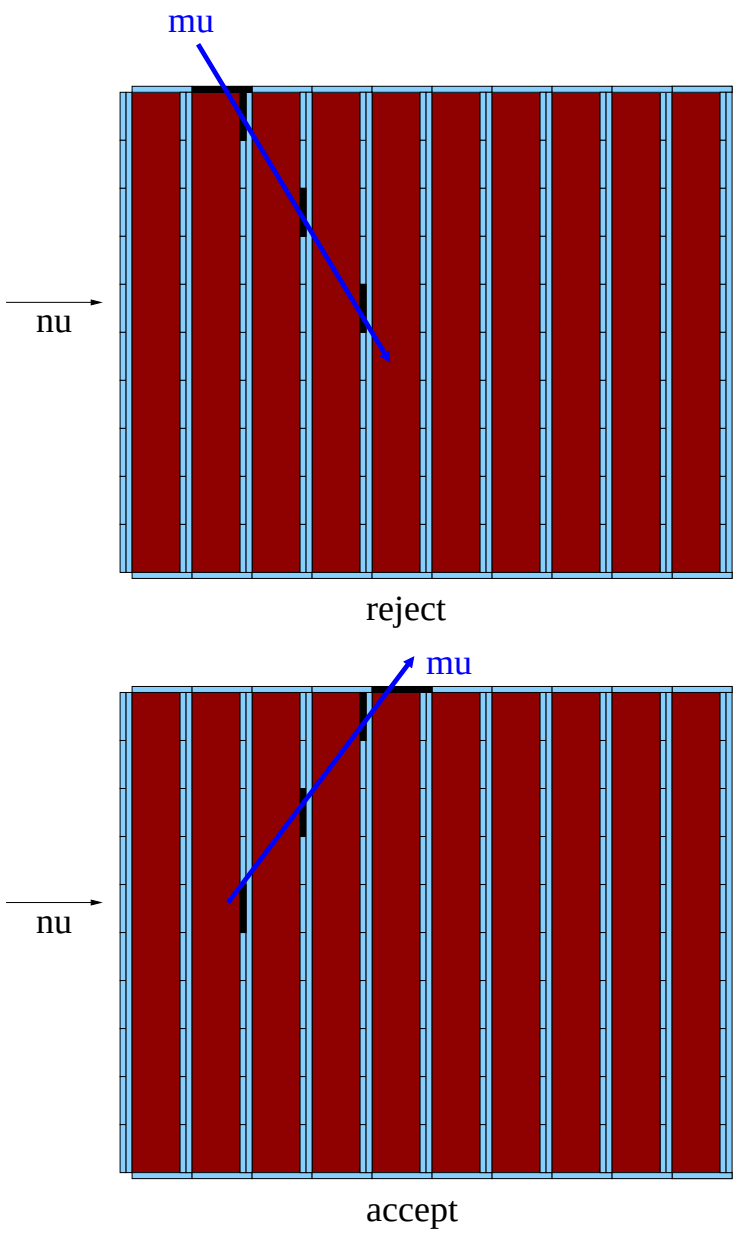

図 3.3: veto cut

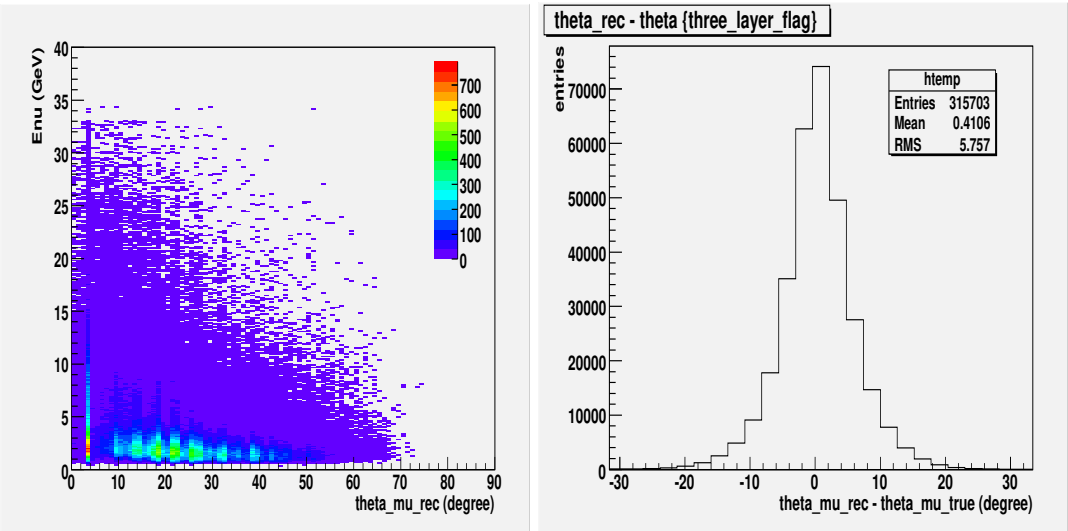

図 3.4: 左図は θ_μ^{rec} とニュートリノエネルギーの相関を示す。右図は $\theta_\mu^{rec} - \theta_\mu^{true}$(真のミューオンの角度) 分布である。

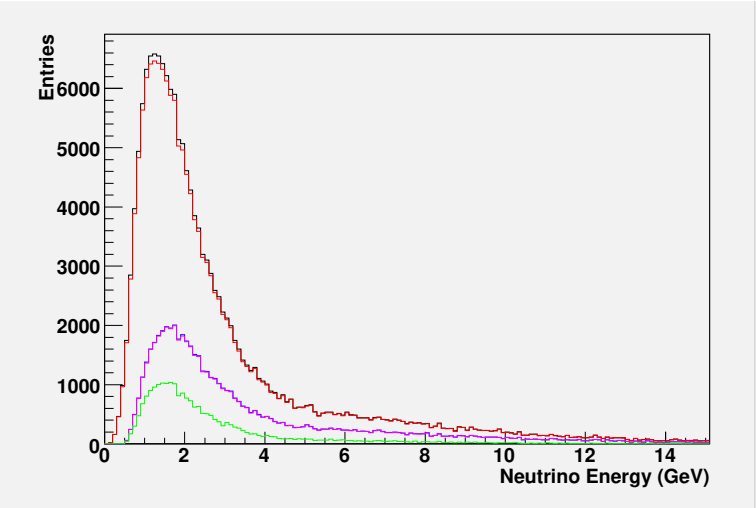

図 3.5: 各イベントセレクションに於けるニュートリノエネルギースペクトル。上から generated、veto cut 、tracker cut 、tracker cut + veto cut 、tracker cut + veto cut + $\theta_\mu^{rec} > 20^\circ$ cut の場合を表わしている。

検出器モジュールの位置	-4.5m		-3.0m		-1.5m		0.0m	
	♯ of ev.	efficiency	♯ of ev.	efficiency	♯ of ev.	efficiency	♯ of ev.	efficiency
Generated	15520		22757		28702		30668	
tracker cut	5017	0.32	7918	0.35	10377	0.36	11093	0.36
veto cut	15233	0.98	22326	0.98	28233	0.98	30178	0.98
tracker cut + veto cut	4967	0.32	7857	0.35	10282	0.36	11023	0.36
$+ \theta_{\mu}^{rec} > 20^{\circ}$ cut	1971	0.13	3108	0.14	4143	0.14	4278	0.14

表 3.2: 検出器モジュールの各イベントセレクションに於けるイベント数と検出効率

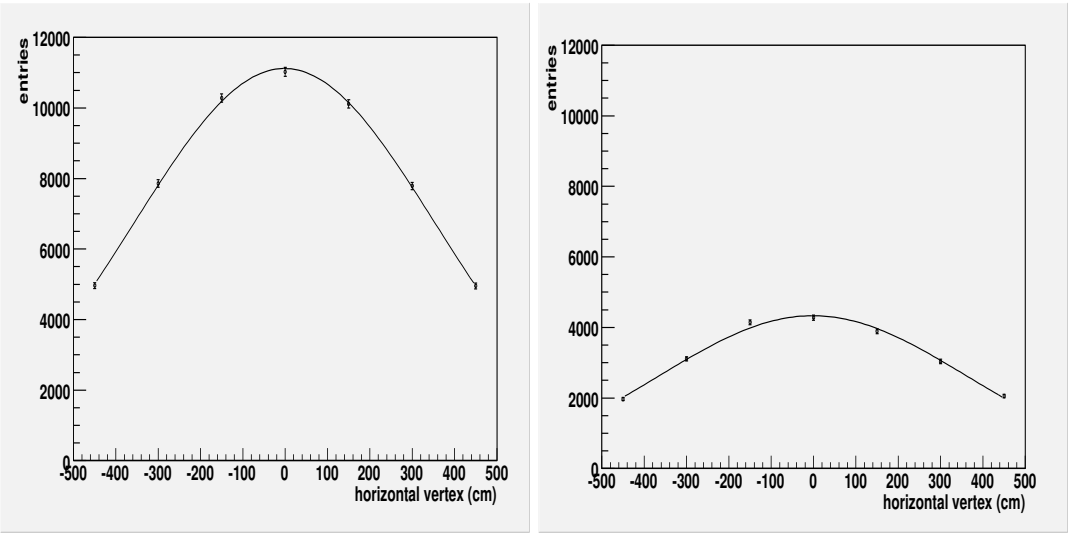

図 3.6: 中心再構成。左右の図はそれぞれミューオン角度のセレクションを用いない時と用いる時のサンプルを示す。統計量はともにデザイン値の 1%の強度で 1 か月分である。

図 3.5 から分かるように、ミューオンの角度のセレクションを使う場合もそうでない場合も、モニターすべき 3 GeV 以下のニュートリノが大部分を占める分布をしている。また、ミューオンの角度のセレクションを使うと、3 GeV 以下のニュートリノの純度が向上する。

3.2.2 ビーム中心の再構成

イベントセレクション後に残った各検出器モジュールのイベント数をビーム中心、ビーム中心から ±1.5m、±3.0m、±4.5m 離れた地点のイベント数としてガウス分布を仮定してフィッティングを行なった (図 3.6)。そして、そのガウス分布関数の mean を再構成されたビーム中心と定義し、mean のエラーを再構成中心の精度とした。フィッティングの結果を表 3.3 に示した。なお、この時の統計量は、デザイン値の 1%の強度で 1 か月分に対応する。

表 3.3 の結果、どちらのイベントセレクションを用いても、中心再構成の精度は要求される精度 28cm よりも十分よい。ただし、実際のビームのずれに対して N-Grid 検出器が感度を持つ事を示す必要がある。次節では、ビームがずれた場合にビーム中心を再構成し、N-Grid 検出器の性能が

$\theta_{\mu}^{rec} > 20^{\circ}$	再構成中心 (cm)	精度 (cm)
なし	-1.4	2.4
あり	-2.2	3.6

表 3.3: 中心再構成の結果

十分であるかどうかを評価する。

3.3 ビームのずれに対する感度

この節では実際にビームがずれた時の N-Grid 検出器の応答をみる。物理結果に影響するビームのずれを十分な感度で測定する事はこのビームモニターの最重要課題である。

3.3.1 ニュートリノビームの方向のずれ

1 章で述べたように、ニュートリノビームは陽子ビームを標的に当てて生成されたパイオンを電磁ホーンで集束させ、そのパイオンが崩壊してできたニュートリノを使っている。そのため、ニュートリノビームの方向がずれる原因というのは多く存在する。とくに、電磁ホーンのアライメントがずれたり、陽子ビームが標的の中心からずれた位置に入射した場合、そのずれは収束課程で増幅され、結果としてニュートリノビームの方向がずれる。また、このような場合、必ずしも全てのニュートリノビームの方向が同じようにずれるとは限らない。例として、陽子ビームが標的の中心からずれて入射した時のニュートリノビームの振舞をモンテカルロシミュレーションを使って調べる。図 3.7 はニュートリノエネルギー毎のニュートリノ反応プロファイルを示す。 赤点が陽子ビームを標的の中心に入射させた場合、青点は標的の中心から 3mm ずらして入射させた場合を示し、右下の矢印は陽子ビームをずらした方向である。図 3.7 のそれぞれのプロファイルをガウス分布関数でフィッティングし、その中心値を陽子ビームがずれた時とずれてない時を比較した (図 3.8)。

図 3.8 をみると 1 GeV から 3 GeV のニュートリノビームは陽子ビームのずれに対して負の相関を持っているのに対し、3 GeV 以上のニュートリノは正の相関を持っている。その結果、全エネルギー領域を積分していしまうと陽子ビームのずれに対する感度が悪くなる。このようにエネルギーが低い領域と高い領域で逆のずれ方をしていると、全エネルギー領域をまとめて測定した時にビームのずれが検知できなくなる可能性がある。そのため、異なるエネルギー領域でビームプロファイルを測定する事が望ましい。とくに、2.3.3 で述べたように、3 GeV/c 以下のニュートリノを N-Grid 検出器で測定する事は、SK に向かうニュートリノに崩壊する親パイオンと同じ運動量領域の親パイオンからのニュートリノを測定するという意味で重要である。この理由から、ミューオンの角度によるセレクションを用いて、もとのサンプルとは異なる平均エネルギーを持ち、さらに 3 GeV/c 以下の純度が高いサンプルでビーム方向の測定をする事は非常に有効である。以後はニュートリノビームの方向がずれる原因として陽子ビームが標的の中心からずれた位置に入射した場合を仮定して議論を進める。なぜなら、現時点で我々が知っているニュートリノビームの方向をずらす原因の中では、陽子ビームが標的の中心からずれて入射して場合にニュートリノ振動測定に対して最も影響を与えるからである [8]。

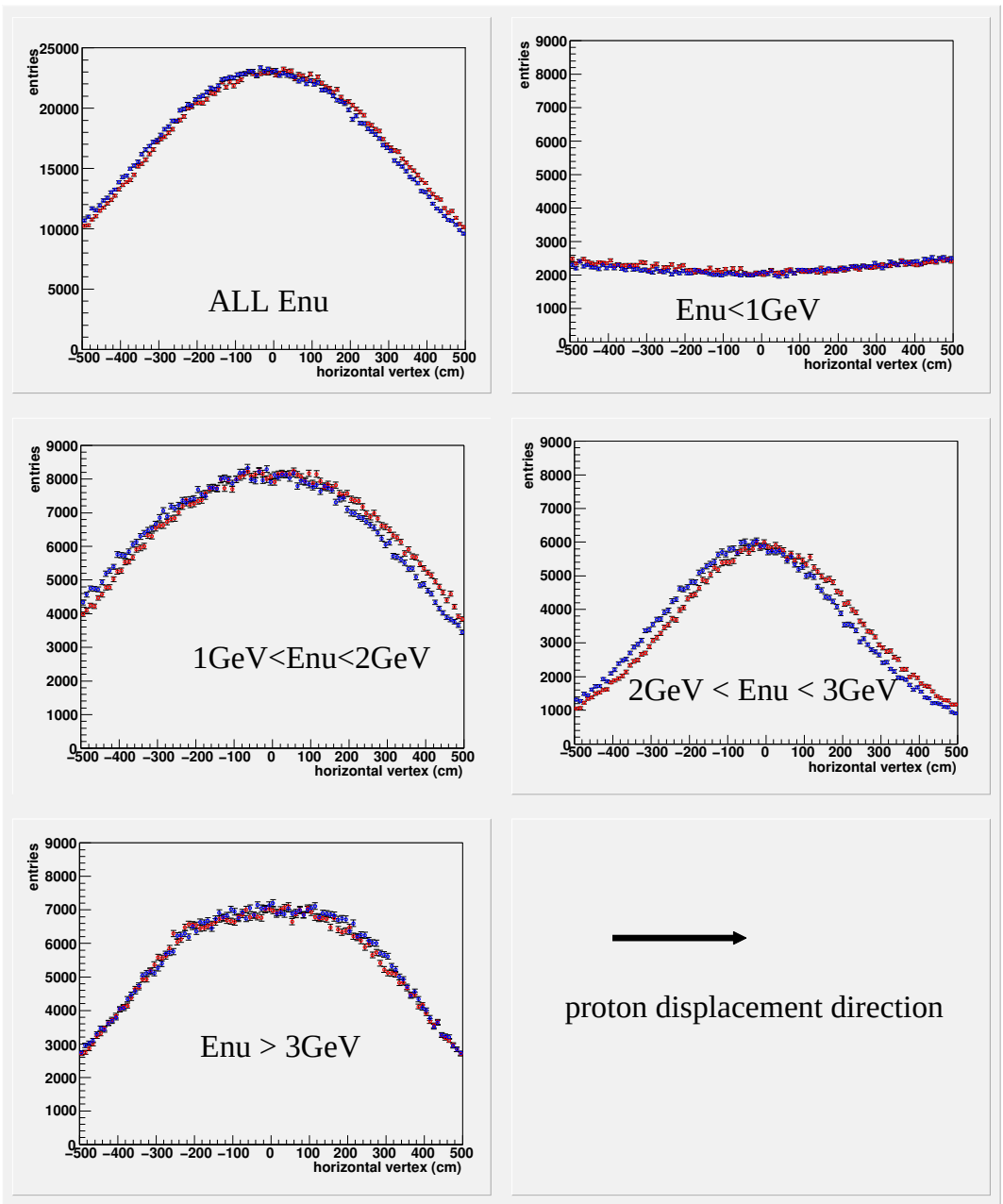

図 3.7: エネルギー別のニュートリノ反応プロファイル。赤は陽子ビームを標的の中心に入射させた場合、青は標的の中心から 3mm ずらして入射させた場合。右下の矢印は陽子ビームをずらした方向をしめす。

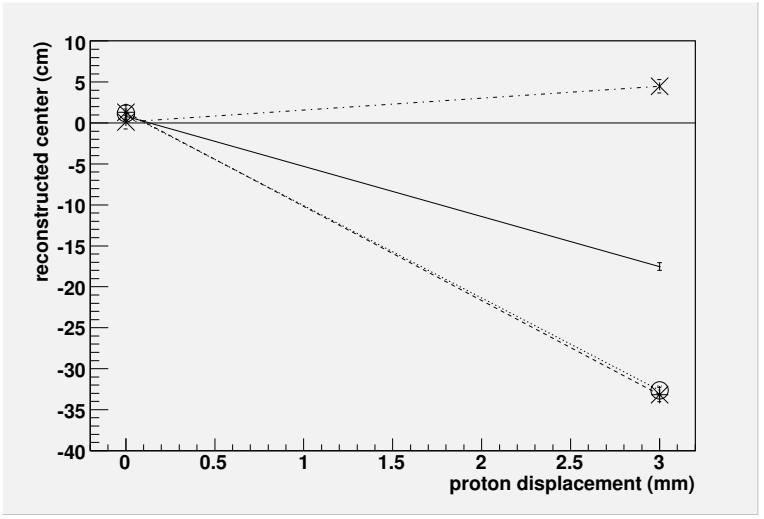

図 3.8: 陽子ビームのずれとニュートリノビームのずれの相関。実線、破線、点線、破点線はそれぞれ、 全ての Enu(ニュートリノエネルギー), ,1GeV<Enu< 2GeV,2GeV<Enu<3GeV,Enu>3GeV の場合を示している。

3.3.2 N-Grid 検出器で検出すべきビームのずれ

陽子ビームの入射位置が標的の中心からずれた時に予想される SK でのニュートリノフラックスの値を図 3.9(上) に、エネルギースペクトルのピーク値を図 3.9(下) にそれぞれ示す [8]。図中の「 ybm+1 mm 」とは「 鉛直方向に+1 mm 陽子ビームをずらす 」という意味である。前章で述べたように物理的要請からフラックス、エネルギースペクトルのピーク値の変化を 3 %で抑える必要がある。これらの図から陽子ビームのずれが 3 mm 以内であれば、フラックス、エネルギースペクトルのピーク値の変化は 3 % 以内である事が分かる。よって、N-Grid 検出器では陽子ビームが標的の中心から 3 mm ずれた時に対して、感度を持てばよい。

3.3.3 N-Grid 検出器の応答

陽子ビームが標的の中心に入射した場合と、中心から 3mm 水平方向にずれて入射した場合において検出器シミュレーションを用いて N-Grid 検出器の応答を調べた。感度をもとめるために、まず実際に想定している統計量 (デザイン値の 1%のビーム強度で 1ヵ月) でビーム中心の再構成を行ない、再構成中心の測定精度をもとめる。そして、陽子ビーム 3 mm のずれに伴うニュートリノビームの再構成中心のずれを求め、そのずれが測定精度に比べてどの程度であるかを見ればよい。ただし、再構成中心の値自体は統計誤差の範囲で真の値からばらついてしまうので、先の統計量の約 10 倍のサンプルを用いて再構成中心の値を求め、それを真の再構成中心とした。そこで $sensitivity$ を以下のように定義する (図 3.10)。

$$sensitivity = \frac{\Delta X_{true}}{\sigma} \tag{3.1}$$

ここで ΔX_{true} は陽子ビームのずれ 3 mm に伴う真の再構成中心のずれ、σ は想定した統計量を用いてビーム中心を再構成したときの再構成中心の誤差である。この $sensitivity$ をミューオンの角

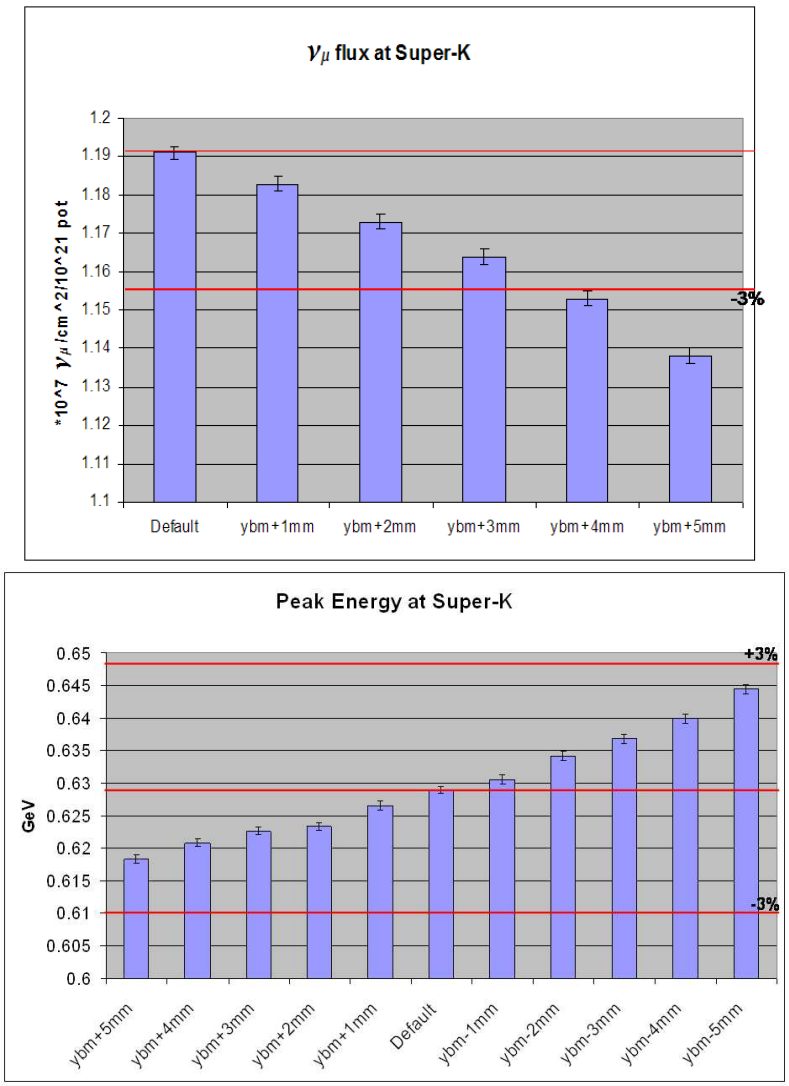

図 3.9: 陽子ビームのずれと SK でのニュートリノフラックスの関係 (上) と陽子ビームのずれと SK でのニュートリノエネルギースペクトルのピーク値の関係 (下)

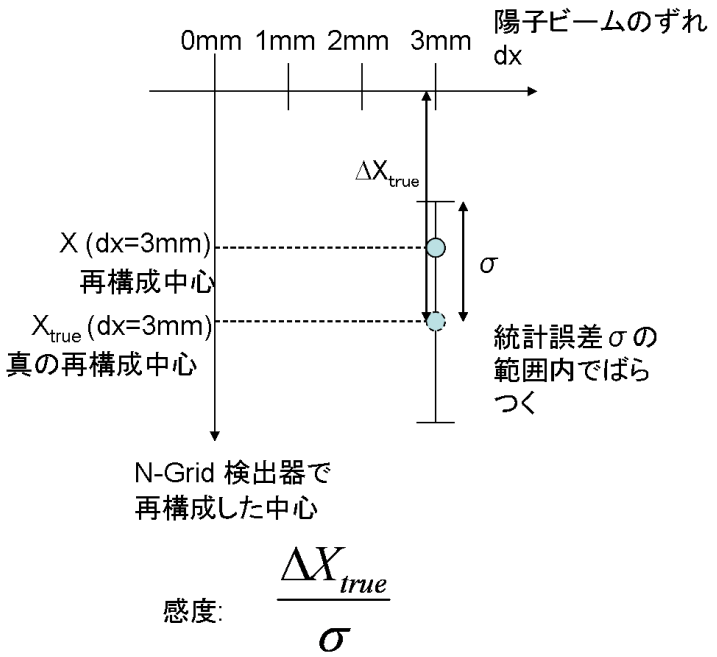

図 3.10: 感度の定義

度によるセレクションをおこなったサンプルと行なっていないサンプルの二つの場合で計算した。結果を表 3.4 に示す。

$\theta_\mu^{rec} > 20°$	真の再構成中心のずれ	統計誤差	*sensitivity*
なし	-15.8cm	2.4cm	6.5
あり	-22.4cm	3.6cm	6.2

表 3.4: ビームのずれに対する感度 (*sensitivity*)

この結果を見ると陽子ビーム 3mm のずれに対して、N-grid 検出器は十分な感度を持っている事がわかる。また、二つのイベントセレクションを比較するとミューオンの角度によるカットを用いない場合は、高統計だが再構成中心のずれは小さく、逆にミューオンの角度によるカットを用いた場合は統計量は少ないが再構成中心のずれが大きくなり、結果として *sensitivity* は両者とも同程度の値を持つ。再構成中心のずれが両者の間で異なる事は、これまでの結果から定性的に説明できる。図 3.8 で見たようにニュートリノエネルギーが 1 ~ 3 GeV の領域ではニュートリノビームのずれは陽子ビームのずれに対して負の相関をもつが、3 GeV 以上の領域では正の相関をもつ。そのため、図 3.5 でミューオンに角度によるカットを加えると、全体のニュートリノに対する 3 GeV 以下の純度が大きくなり、陽子ビームのずれに対してより強い負の相関をもつサンプルになる。

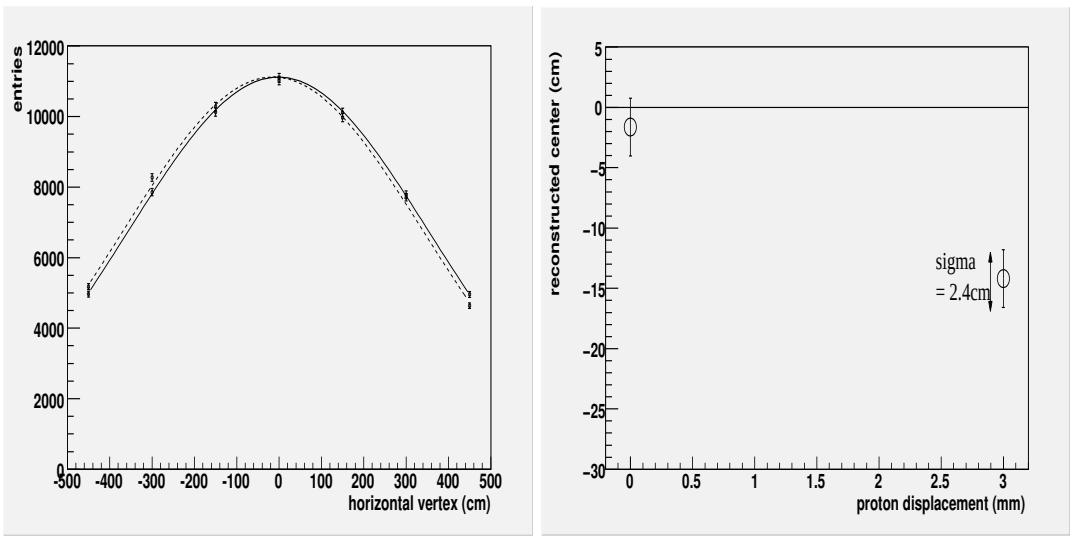

図 3.11: 想定された統計量における、ミューオンの角度によるカットを用いないサンプルでの中心再構成。右図は各検出器モジュールでのイベント数をガウス分布関数でフィットしており、実線は陽子ビームがずれていない場合、点線は陽子ビームを 3mm ずらした場合をそれぞれ表わす。ここできめた再構成中心の誤差が実際の測定誤差に対応する。

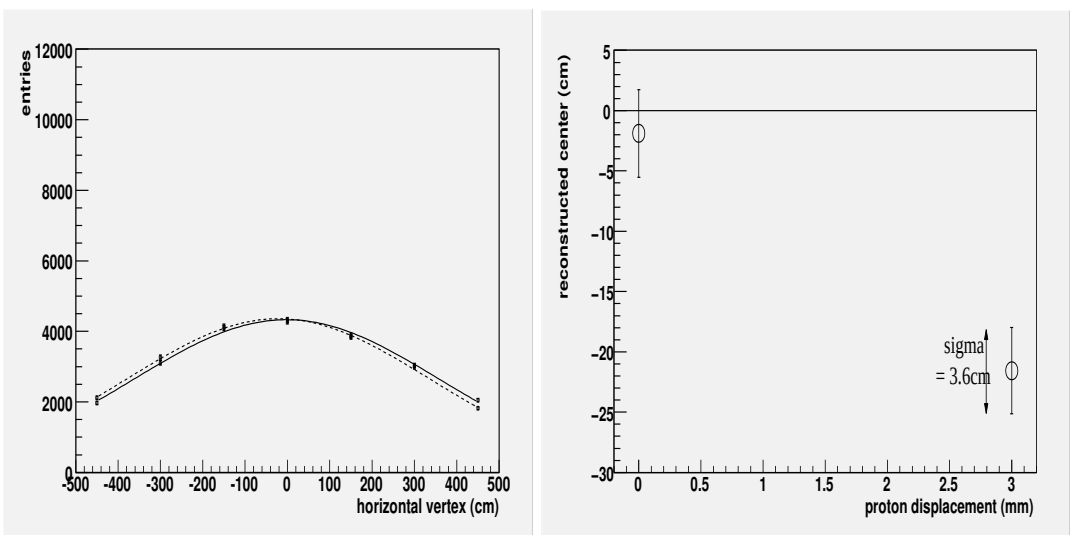

図 3.12: 図 3.11 に同じ。ミューオンの角度によるカットを用いたサンプルでの中心再構成。

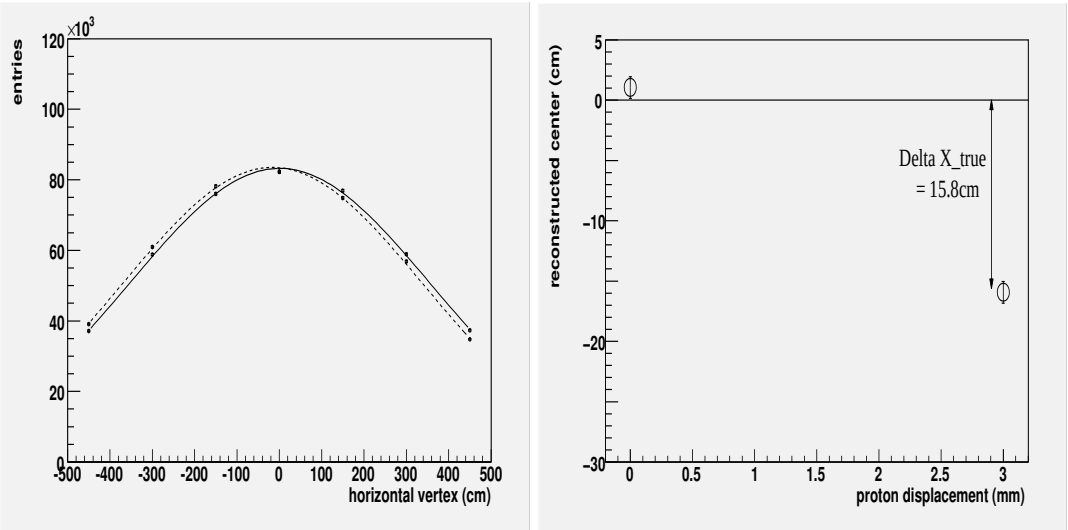

図 3.13: 十分な統計量における、ミューオンの角度によるカットを用いないサンプルでの中心の再構成。上図では各検出器モジュールでのイベント数をガウス分布関数でフィットしており、実線は陽子ビームがずれていない場合、点線は陽子ビームを 3mm ずらした場合をそれぞれ表わす。ここできめた再構成中心を真の再構成中心 X_{true} とする。下図は再構成中心と陽子ビームのずれの関係を表わす。

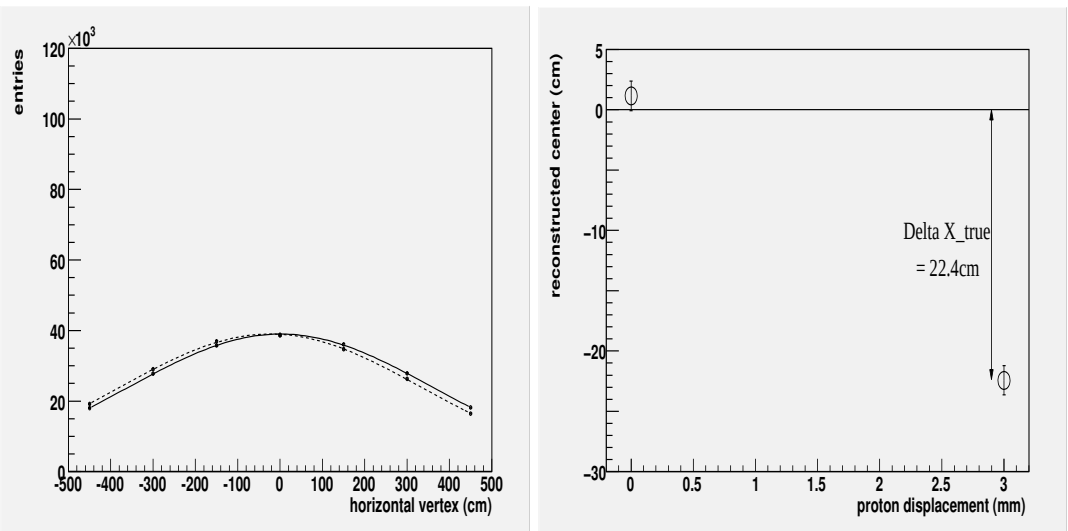

図 3.14: 図 3.13 に同じ。ミューオンの角度によるカットを用いたサンプルでの中心再構成。

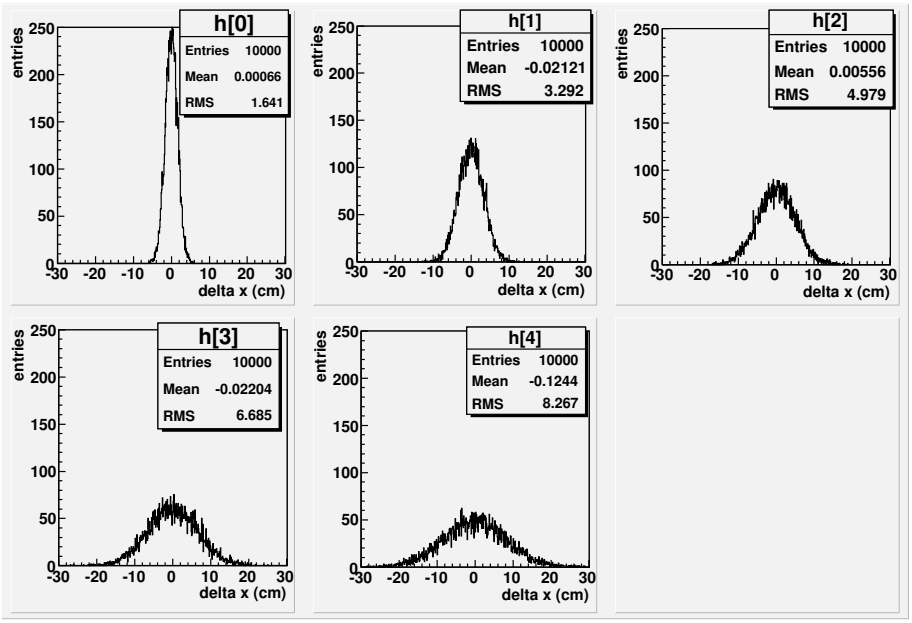

図 3.15: ミューオンの角度によるカットを用いない時の $\delta(X)$ 分布。左上から検出器モジュールのイベント数の系統誤差が 0.01,0.02,0.03,0.04,0.05 の場合をそれぞれ示す。

3.4　系統誤差に対する要請

前節では陽子ビームの入射位置のずれに対する N-Grid 検出器の感度は統計誤差のみを考えれば十分である事が分かった。しかし、検出器を設計するためには系統誤差の寄予を抑えておく必要がある。この節では系統誤差が前節におけるビームのずれに対する感度にどのように影響を及ぼすかを評価し、各検出器モジュールで測定されるニュートリノイベント数の系統的不定性に対する要請を求めた。

3.4.1　方法

検出器モジュールのイベント数がある系統誤差を持つと仮定する。その系統誤差の範囲内で検出器モジュールのイベント数を変化させ、中心を再構成する。その時の再構成中心がもとの再構成中心にくらべてどれだけずれるかを見ればよい。具体的には、以下に示した方法を用いた。

まず各検出器モジュールにおける事象撰択後の真のイベント数を N_i $(i = 1 \sim 7)$、系統誤差を $\delta(N_i)$ とする。各検出器モジュールの系統誤差は $\frac{\delta(N_i)}{N_i}$ を標準偏差とするガウス分布であると仮定する。次に、そのガウス分布にそった乱数を生成し、その数を真のイベント数からの変化の割合 f_i とする。そして、$(1 + f_i)N_i$ を各検出器モジュールでのイベント数として中心を再構成する。その時の再構成中心と真の値 N_i での再構成中心とのずれを $\delta(X)$ とする。これを 10000 回くり返して真の再構成中心からのずれ $\delta(X)$ の分布を作り、その RMS を再構成中心の系統誤差とした。この時、各検出器モジュールのイベント数 N_i の系統誤差 $\frac{\delta(N_i)}{N_i}$ が、0.01、0.02、0.03、0.04、0.05 の 5 つの場合で再構成中心の系統誤差を求めた。図 3.15、3.16 はそれぞれ、ミューオンの角度によるカットを用いない時、用いた時の $\delta(X)$ 分布である。各ヒストグラムの左上の番号 $(\mathrm{h}[0]$ から $\mathrm{h}[4])$ は、検出器モジュールのイベント数の系統誤差が 0.01,0.02,0.03,0.04,0.05 の場合をそれぞれ表わす。

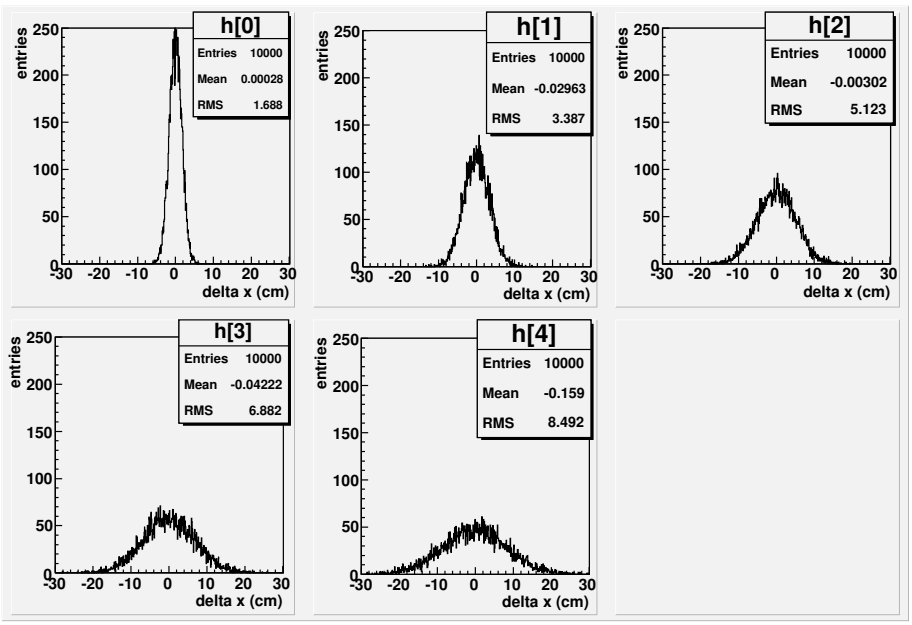

図 3.16: ミューオンの角度によるカットを用いた時の $\delta(X)$ 分布。左上から検出器モジュールのイベント数の系統誤差が 0.01,0.02,0.03,0.04,0.05 の場合をそれぞれ示す。

3.4.2 結果

検出器モジュールでのイベント数の系統誤差に対して、再構成中心の精度との関係を図 3.17 にしめす。 $*$ が先に述べた方法で求めた系統誤差である。また $\circ$、$\times$ はそれぞれ統計誤差、統計誤差と系統誤差の 2 乗和のルートである。また左右のグラフは、ミューオンの角度によるカットを用いない場合と用いた場合にそれぞれ対応する。この図から分かるように検出器モジュールのイベント数の系統誤差が 2%を超えると再構成中心の系統誤差は統計誤差よりも大きくなる。

また、ここで求めた系統誤差、統計誤差と系統誤差の 2 乗和のルートをつかって、式 3.1 で定義した陽子ビームが標的の中心から 3mm ずれた場合に対する $sensitivity$ を求めた。図 3.18 にその結果をしめす。横軸が、各検出器モジュールの系統誤差、縦軸が $sensitivity$ である。記号は図 3.17 と同様で、$*$ が系統誤差のみを、また $\circ$、$\times$ はそれぞれ統計誤差のみ、統計誤差と系統誤差の 2 乗和のルートを使って $sensitivity$ を計算した場合に対応する。左右のグラフは、ミューオンの角度によるカットを用いない場合と用いた場合にそれぞれ対応する。検出器モジュールのイベント数の系統誤差が 2%の時は、陽子ビームのずれ 3mm に対する $sensitivity$ は 4 程度 (統計のみの時は 6 程度) であり、十分優位なずれとして測定可能であるが、5%程度になると 2 前後になり十分な $sensitivity$ とは言えない。この結果から、各検出器のモジュールのイベント数の系統誤差を 2%に抑えなければならないと結論した。

また、ミューオンの角度によるカットがあるサンプルを用いると (右図)、系統誤差を加えて計算した $sensitivity(\times)$ が、そのカットを用いない場合 (左図) に比べてよい事がわかる。

3.4.3 トラッカーの検出効率

各検出器モジュールのイベント数の系統誤差の要因としては、

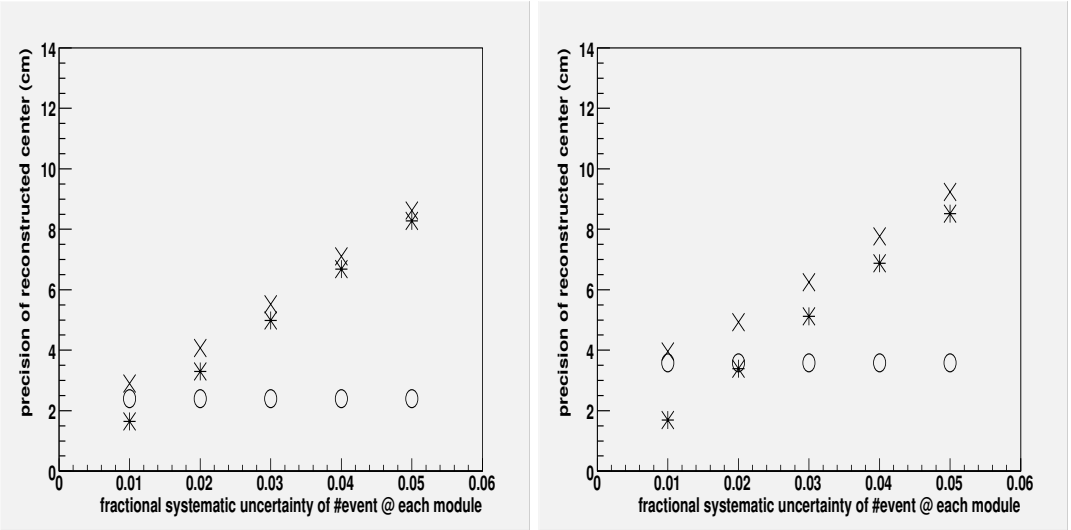

図 3.17: 検出器モジュールのイベント数の系統誤差と再構成中心の測定誤差の関係。○は統計誤差のみ、∗は系統誤差のみ、統計誤差と系統誤差の 2 乗和のルートの各場合をそれぞれ示す。また左右は、ミューオンの角度によるカットを用いない場合と用いた場合にそれぞれ対応する。

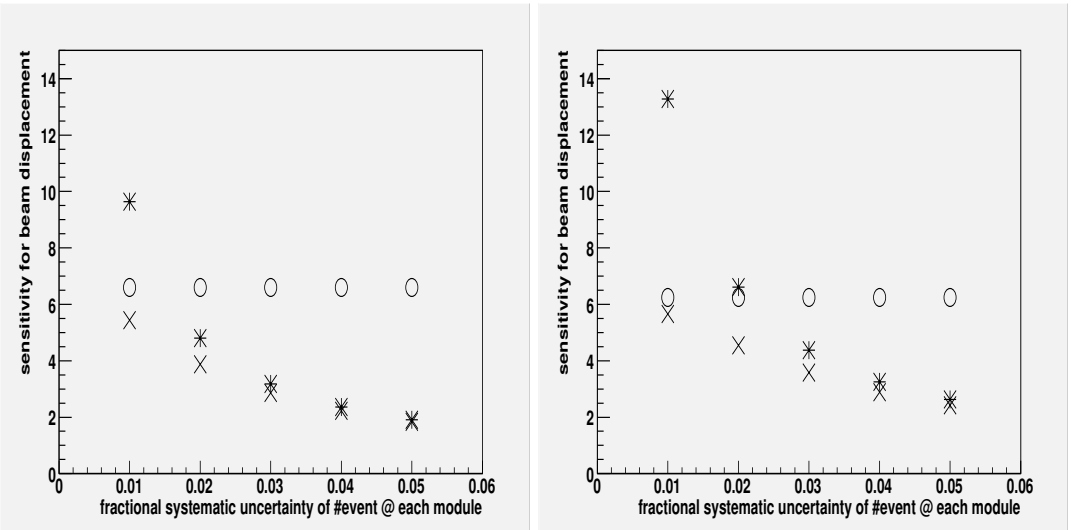

図 3.18: 検出器モジュールのイベント数の系統誤差と陽子ビームのずれ 3mm に対する感度の関係。○は統計誤差のみ、∗は系統誤差のみ、×は統計誤差と系統誤差の 2 乗和のルートの各場合をそれぞれ示す。また左右は、ミューオンの角度によるカットを用いない場合と用いた場合にそれぞれ対応する。

- バックグラウンド含有率の不定性
- 検出効率の不定性

が主に挙げられる。バックグラウンドに関しては、検出器ホールの壁で起きるニュートリノ相互作用の二次粒子が主である。このバックグラウンドに関してはモンテカルロシミュレーションを行なっており、詳細を 4 章に述べる。検出効率の不定性を十分小さくするには、veto カウンターやトラッカー の検出効率 が十分である事が不可欠である。

ここでは検出器モジュールのニュートリノイベント数とトラッカーの検出効率の関係をモンテカルロシミュレーションで計算し、トラッカーの検出効率に要請を求めた。

方法

第三章の検出器シミュレーションと事なる点はヒットの定義のみである。シンチレーターに閾値以上のエネルギー損失があった場合に、0 から 1 の一様乱数を振り、その値が検出効率よりも小さかったときにヒットとした。この検出器シミュレーションを検出効率 100.0%から 99.0%まで、0.1%刻みで行い、イベントセレクション後のニュートリノイベント数の変化をみた。

結果

図 3.19(上) に中心の検出器モジュールにおけるイベントセレクション後のイベント数のトラッカーの検出効率に対する関係を示す。また、図 3.19(下) にイベント数の変化した割合とトラッカーの検出効率に対する関係を示す。このイベントセレクションにはミューオンの角度によるカットは使っていない。図 3.19(下) をみるとトラッカーの検出効率 1%の変化にたいして、イベント数は約 4%変化している事が分かる。これよりニュートリノイベント数を 2%の精度で測定するにはトラッカーの検出効率の不定性を 0.5%に抑えれなければならない。トラッカーの平均検出効率が 99.5%以上であることが示せれば、この要求は十分達成される。よって N-Grid 検出器のトラッカーの平均検出効率として、99.5%を要求した。これを達成するため、シンチレーターの波長変換ファイバー読みだしの実験を行なった。詳細は 6 章で述べる。ただし、このシミュレーションでは単純に 3 つの連続したトラッカーにヒットがあるイベント以外は全て除いているため、このシミュレーションで除かれたイベントでもミューオンの飛跡を再構成できる場合もある (例えば、ミューオンが 5 つのトラッカーを突き抜け、そのうち 3 番目のトラッカーに inefficiency があった場合)。そのため、99.5%の検出効率は非常に厳しい要求になっている。

3.5 レイヤー数、レバーアームの長さについての考察

これまで、N-Grid 検出器モジュール配置として図 3.2 に示したデザインに固定して議論を行なってきた。この節では、レイヤー (トラッカー一枚+鉄標的一枚) 数、レバーアーム (検出器の中心から端までの長さ) を変えたデザインの性能評価を行なう。価格面で図 3.2 で示したデザインの実現が厳しくなった時の為に、妥協できる部分とそうでない部分を明白にしておく事は重要である。レイヤー数は直接、鉄や読み出しにかかる費用に関係している。また、レバーアームは検出器ホールの大きさに関係する。

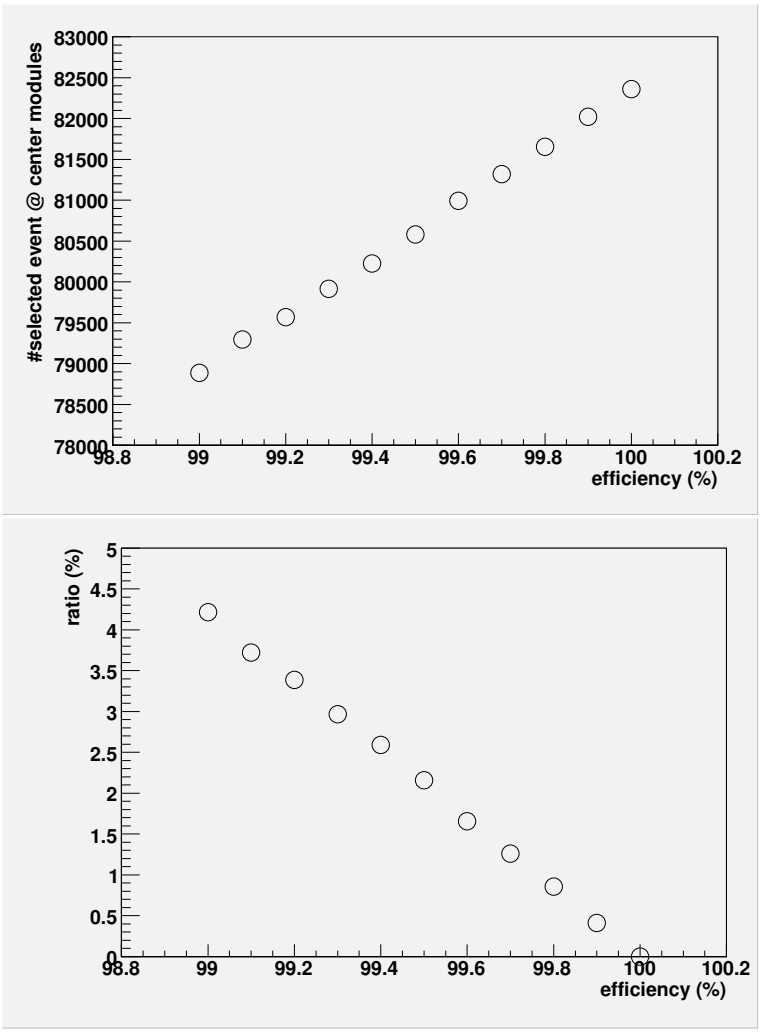

図 3.19: 検出器モジュールでのイベント数とトラッカーの検出効率の関係 (上)。検出器モジュールのイベント数の変化した割合とトラッカーの検出効率の関係

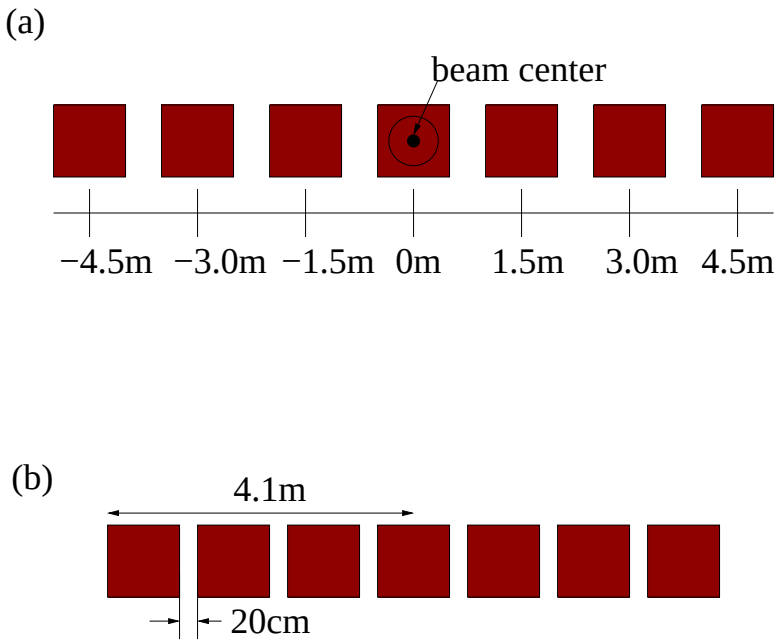

図 3.20: 検出器モジュールの配置。

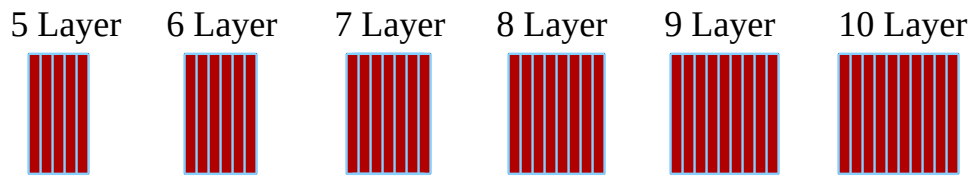

図 3.21: レイヤー数 5 から 10 の時の検出器モジュールを横から見た図。

3.5.1 方法

検出器モジュールの配置として、図 3.20 に示した (a),(b) の二つの場合について考える。

(a) 図 3.2 と同じ。検出器モジュールの 7 個で、レバーアーム 5 m、また各検出器モジュールの間隔は 50cm である。

(b) 検出器のモジュールの数は 7 個のままだが、検出器モジュールの間隔を 20cm にして、レバーアームを 4.1m にした。

この二つの配置の場合のそれぞれに対して、図 3.21 の様に各検出器モジュールのレイヤー数が 5 ~ 10 層の 6 通りで、検出器シミュレーションを行ない、3.2.2 と同様に中心の再構成を行い、再構成された中心の統計精度を求めた。また、再構成された中心の系統誤差についても、3.4.1 と同様の方法で求めた。このとき、検出器モジュールでのイベント数の系統誤差を要求の 2%と仮定した。もちいたサンプルはミューオンによる角度にカットを用いていないものである。

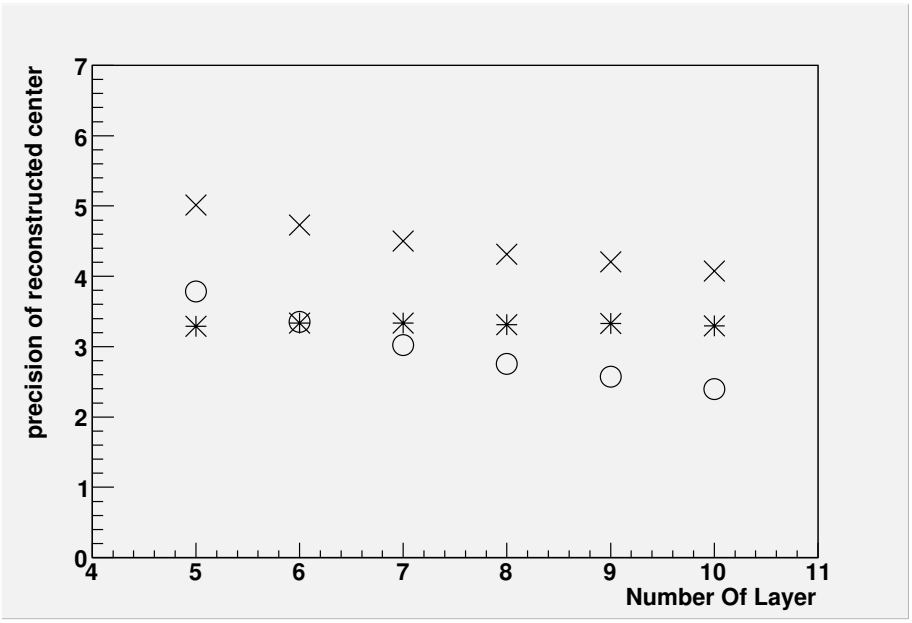

図 3.22: レバーアーム 5.0 m の時のレイヤー数と再構成中心の測定誤差の関係。○ は統計誤差のみ、∗ は系統誤差のみ、統計誤差と系統誤差の 2 乗和のルートの各場合をそれぞれ示す。

3.5.2　結果

レイヤー数と再構成中心の精度の関係

図 3.22 にレバーアーム 5.0 m の時の再構成中心の精度とレイヤー数の関係を示す。○ は統計誤差のみ、∗ は系統誤差のみ、統計誤差と系統誤差の 2 乗和のルートの各場合をそれぞれ示している。レイヤー数が減るとイベント数が減少するので統計誤差は大きくなる。 レイヤー数が N の時、tracker cut により連続した 3 層のヒットを要求すると下流の 2 レイヤーで生成されたミューオンは殆どカットされるため、実質的な標的となるのは N-2 レイヤーである。よって、各レイヤー数の時の統計誤差は 10 レイヤーの時の統計誤差 σ_{stat} (cm) を使うと、

$$\sigma_{stat}\sqrt{\frac{10-2}{N-2}} \tag{3.2}$$

と予想される。実際、σ_{stat} に 2.4 cm(図 3.3) を代入すると、図 3.22 に示した統計誤差 (○) とほぼ一致する。一方で系統誤差はレイヤー数にはよらない。よってその系統誤差を σ_{sys} (cm) と置くと、系統誤差と統計誤差の 2 乗和のルートは、

$$\sqrt{\sigma_{stat}^2\frac{10-2}{N-2}+\sigma_{sys}^2} \tag{3.3}$$

となり、モジュールの配置が変わらなければ、レイヤー数がある値の時の再構成中心の統計誤差 σ_{stat}、系統誤差 σ_{sys} の二つを求めれば、任意のレイヤー数に対する再構成中心の誤差を式 3.3 によって求めることが出来る。

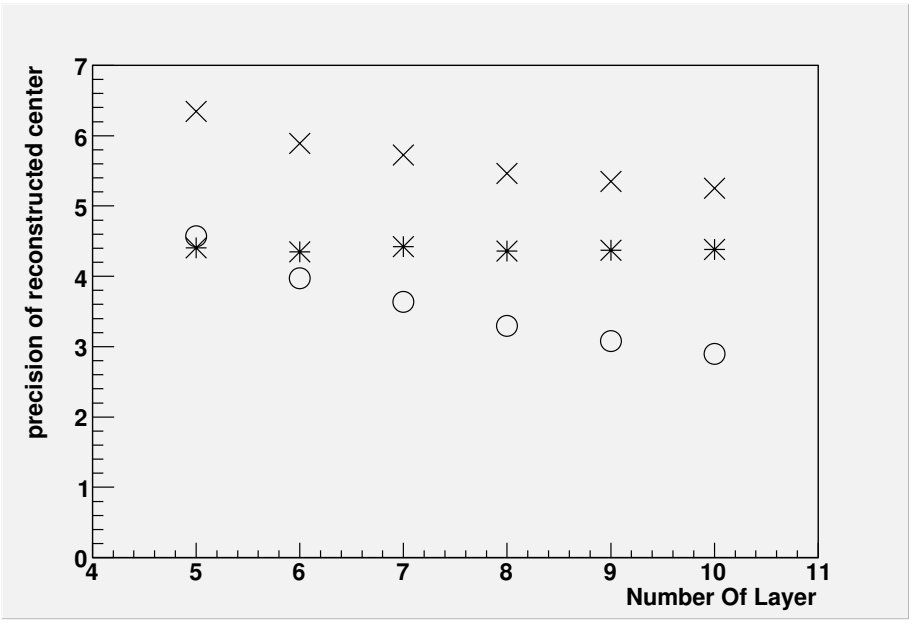

図 3.23: レバーアーム 4.1 m の時のレイヤー数と再構成中心の測定誤差の関係。○は統計誤差のみ、∗は系統誤差のみ、統計誤差と系統誤差の 2 乗和のルートの各場合をそれぞれ示す。

レバーアーム

図 3.23 にレバーアーム 4.1 m の時の再構成中心の精度とレイヤー数の関係を示す。○は統計誤差のみ、∗は系統誤差のみ、統計誤差と系統誤差の 2 乗和のルートの各場合をそれぞれ示している。レイヤー数と誤差の関係は、先に述べたようにレイヤー数がある値の時の再構成中心の統計誤差 σ_{stat}、系統誤差 σ_{sys} の二つを求めれば、任意のレイヤー数に対する再構成中心の誤差を式 3.3 によって求めることが出来る。ここでは、このレバーアーム 4.1 m の時の系統誤差と、先のレバーアーム 5.0 m の時の系統誤差 (図 3.22) を比較する。すると、レバーアームが 4.1 m の系統誤差 4.4 cm は、5.0 m の系統誤差 3.3cm に対してかなり悪い値になっている。図 3.24 に 3.4.1 で定義した $\delta(X)$ 分布を示す。左図がレバーアーム 5.0 m の時を、右図がレバーアーム 4.1 m の時をそれぞれ示す。この分布の RMS が再構成中心の系統誤差である。系統誤差と統計誤差両方 $(\times)$ を考えると 10 レイヤーのままレバーアームを 4.1 m にすると、レバーアーム 5 m でレイヤーを 5 レイヤーにした時と同じ精度 (約 5cm) になってしまう。よって、予算が不足した場合、レバーアームを縮める (N-Grid 検出器のスペースを狭くする) という選択肢は出来るだけさけ、レイヤー数を減らしチャンネル数や鉄の量を減らすという方針の方がよい。

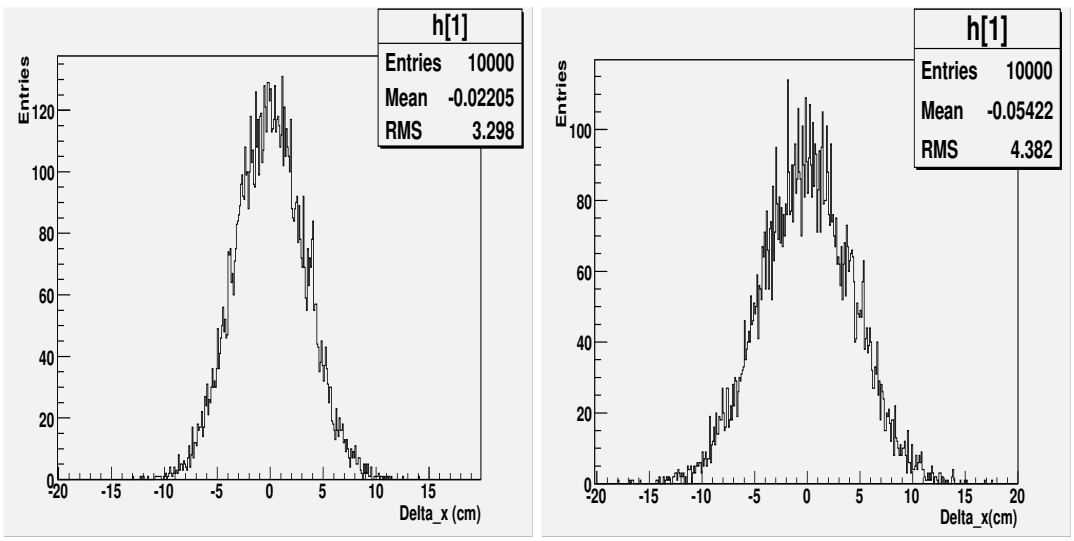

図 3.24: 各検出器モジュールの系統誤差が 2%の時の $\delta(X)$ 分布。左図がレバーアーム 5.0 m の時を、右図がレバーアーム 4.1 m の時をそれぞれ示す。この分布の RMS が再構成中心の系統誤差である。

第4章　バックグラウンド事象の研究

前章で各検出器モジュールにおけるニュートリノイベント数の不定性を 2%以内に抑えなければならない事を示した。その不定性の原因のひとつとして、観測されたニュートリノイベントに含まれるバックグラウンド含有率が挙げられる。主なバックグラウンドは N-Grid 検出器が置かれる検出器ホールの壁でおこるニュートリノ反応からの二次粒子によるものである。このようなバックグラウンド事象は、検出器ホールの壁やその外側の土の質量を正確に測定するのが不可能なため、正確にその量を予測する事は難しい。よって、バックグラウンドの量自体をシグナルの 2%より十分小さくする事が望ましい。ここでは、モンテカルロシミュレーションをもちいて、検出器ホールの壁でニュートリノイベントを生成し、その二次粒子が N-Grid 検出器での測定に及ぼす影響を調べた。

また、第 2 章で紹介した veto カウンターの必要性について、このバックグラウンドのシミュレーション結果から定量的に議論する。

4.1　N-Grid 検出器と検出器ホールの位置関係

図 4.1 に検出器シミュレーションのジオメトリを示す。ニュートリノ反応を生成した領域は、ビーム軸方向に垂直な平面はビーム軸を中心に 20m × 20m の範囲、ビーム軸方向には壁の表面から 10m の範囲である。あとに示すように、バックグラウンドのシミュレーションにはこの領域で十分である。また、検出器モジュールは 2.4 で紹介したデザイン通りに水平方向、鉛直方向に 7 個づつ並べた。

4.2　全二次粒子をもちいたバックグラウンド含有率の評価

4.2.1　ニュートリノイベントの生成

まず始めに、ビームラインシミュレーション、ニュートリノ反応シミュレーションを行ない、図 4.1 の赤太線で示した領域の二次粒子を生成した。ただし、生成した統計量は最大ビーム強度の 1%のときで約 2 日分である。統計量が少ないのは、N-Grid のシグナルをシミュレーションする時に比べて範囲も広く、ビーム方向の質量も大きいのでよりイベント生成に時間 がかかるからである (図 4.2)。そして、生成された二次粒子の全てを検出器シミュレーションに通した (図 4.3)。ニュートリノ反応で直接生成される粒子には、前節のミューオンの他に陽子、パイオン、中性子などがある (3.1.2)。この時、ニュートリノ反応点はビーム軸方向に一様になる様にした。また、バックグラウンドをシグナルと比較するために N-Grid 検出器内のニュートリノ反応もシミュレートした。またシンチレーターのヒットの定義は、トラッカー (1.3cm 厚) は 0.26 MeV 以上のエネルギー損失があった場合、veto カウンター (1.0cm 厚) は 0.20 MeV 以上のエネルギー損失があった場合にそれぞれ「ヒットがあった」としている。これらは MIP(minimum ionization paritcle) がシンチレーター中で落す平均エネルギー損失の 10 分の 1 である。ただし、実際の実験ではエネルギー損

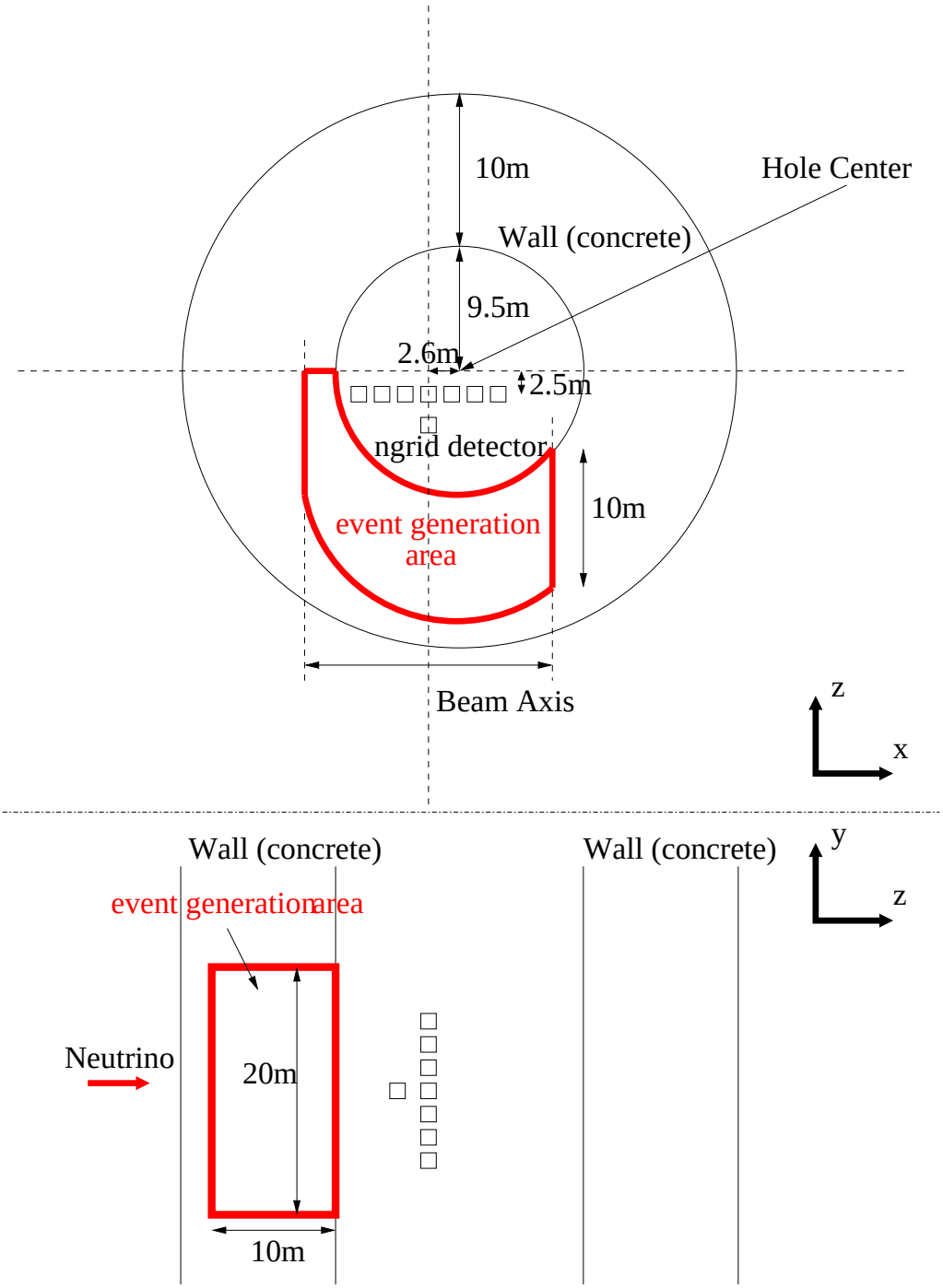

図 4.1: モンテカルロシミュレーションのジオメトリ

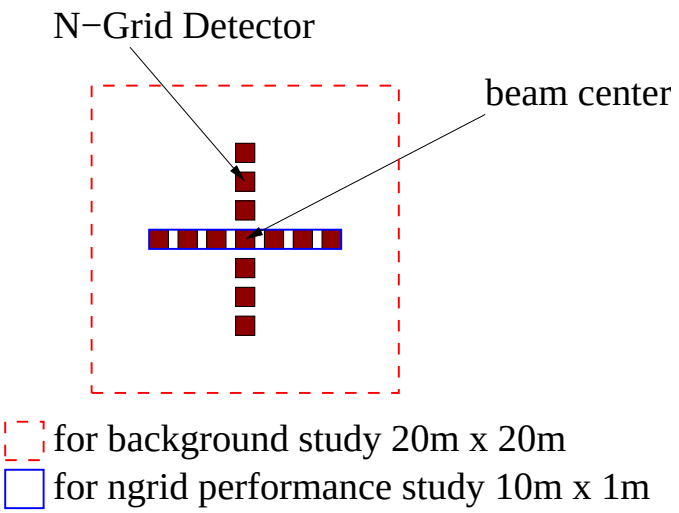

図 4.2: バックグラウンドイベントの生成点領域と、N-Grid 検出器の性能評価に使ったイベントの生成点領域の違い。

失はシンチレーション光として光検出器で読出すので、観測されるエネルギー損失はフォトン統計でばらつく。この効果を含めたシミュレーションは今後の課題である。

4.2.2 イベントセレクション

前章で定義したミューオンの角度によるカット無し (layer cut と veto cut) のイベントセレクションを用いる。ただし、この章では側面の veto カウンターが本当に必要かどうかを判断するために、veto cut を front veto cut(前面の veto にヒットがない) と side veto cut (側面の veto カウンターを使った veto) の 2 段階に分け、front veto cut だけを使った時点のバックグラウンドの量も評価する。

4.2.3 結果

表 4.1 に各イベントセレクションのバックグラウンドのイベント数を、表 4.2 にシグナルのイベント数をそれぞれ示す。このイベント数は最大ビーム強度の 1%で 2 日分の統計量である。表中の x,y はそれぞれ水平方向、鉛直方向にならんだ検出器モジュールを意味している。 また、バックグラウンドのシグナルに対する割合を表 4.3 にしめす。イベントセレクションの「hit」は、「その検出器モジュール内のシンチレーターに少なくとも 1 つ以上のヒットがあった」という意味である。この「ヒット」の時のバックグラウンド、シグナルのイベント数を比較すると、バックグラウンドの方が多い。また、水平方向のモジュールに着目すると、ニュートリノビーム軸から-4.5m -3.0m -1.5m のところに置かれたモジュールのイベント数が、その逆側に置かれたモジュールのイベント数よりも多い傾向がある。これは、図 4.1 をみると分かるように、ビーム中心と、検出器ホールの中心がずれている為、壁から検出器モジュールまでの距離が左右のモジュールで異なるからである。バックグラウンドイベントがシグナルに比べて多く、さらに、ニュートリノビームの中心に対し非対称であれば、明らかにビーム中心の測定を間違う。そのため、イベントセレクションによるバッ

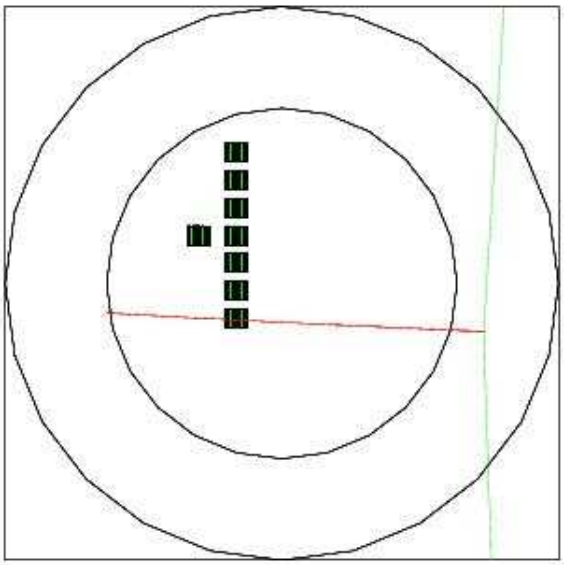

図 4.3: バックグラウンドのイベントディスプレイ。赤線は荷電カレント反応によるミューオンである。ビームは左側から来ている。

検出器モジュール (水平方向)	-4.5m	-3.0m	-1.5m	0.0m	1.5m	3.0m	4.5m
hit	1330	1585	1622	1168	1503	1438	1206
tracker cut	399	539	629	483	585	510	392
front veto cut	568	565	519	499	468	480	464
tracker cut + front veto cut	97	127	114	137	105	106	84
selected (+ side veto cut)	0	2	2	0	2	1	0
検出器モジュール (鉛直方向)	-4.5m	-3.0m	-1.5m	0.0m	1.5m	3.0m	4.5m
hit	1222	1673	2036	2161	2085	1827	1466
tracker cut	370	535	745	764	791	624	499
front veto cut	477	640	753	778	739	681	551
tracker cut + front veto cut	110	131	171	153	146	98	84
selected (+ side veto cut)	1	1	1	1	0	0	0

表 4.1: 各イベントセレクションにおけるバックグラウンドのイベント数。上が水平方向の検出器モジュール、下が鉛直方向の検出器モジュールにおける値である。最大ビーム強度の 1%で 2 日分の統計量を用いた。

検出器モジュール (水平方向)	-4.5m	-3.0m	-1.5m	0.0m	1.5m	3.0m	4.5m
hit	588	986	1129	1265	1164	840	663
tracker cut	274	475	532	602	559	384	291
front veto cut	558	944	1070	1222	1103	823	648
tracker cut + front veto cut	257	449	506	578	521	376	282
selected (+ side veto cut)	234	399	445	498	459	336	257

表 4.2: 各イベントセレクションにおけるシグナルのイベント数 (水平方向の検出器モジュールのみ)。最大ビーム強度の 1%で 2 日分の統計量を用いた。

クグラウンド除去は必須である。図 4.4 にシンチレーターにヒットがあった時のニュートリノ反応点の分布を示す。これをみると N-Grid 検出器にヒットをもたらすニュートリノイベントは、ビーム中心付近、壁の表面付近に集中しており、この集中している領域に対して、ニュートリノイベントを生成した領域は十分広い事がわかる。また、0m 地点の水平方向の検出器モジュールのバックグラウンド数が少ないのは 0m 地点の鉛直方向の検出器モジュールの真後にあるからである。

4.2.4 側面の veto カウンター

「tracker cut + front veto cut」のイベントセレクション後に着目すると、シグナルに対するバックグラウンドの割合が 3 割程度になっている事がわかり、目標の 2%以下に比べて大きすぎる。よって、この時点でのバックグラウンド除去は十分ではない。このイベントセレクションで残るバックグラウンドは側面から直接入って来るミューオン (図 4.5) が大半を占める。そのため、側面の veto カウンターを使ってそのようなバックグラウンドを除去する事は重要である。

検出器モジュール (水平方向)	-4.5m	-3.0m	-1.5m	0.0m	1.5m	3.0m	4.5m
hit	2.3	1.6	1.4	1.7	1.3	1.7	1.8
tracker cut	1.4	1.1	1.2	1.3	1.0	1.3	1.3
front veto cut	1.0	0.60	0.70	0.64	0.42	0.58	0.72
tracker cut + front veto cut	0.38	0.28	0.23	0.26	0.20	0.28	0.30
selected (+ side veto cut)	0	0.0050	0.0045	0.0020	0.0044	0.0030	0

表 4.3: 各イベントセレクションにおけるバックグラウンドのシグナルに対する割合 (水平方向のモジュールのみ)。ただし、+0m のモジュールに付いては上流の方の値を使って計算した。

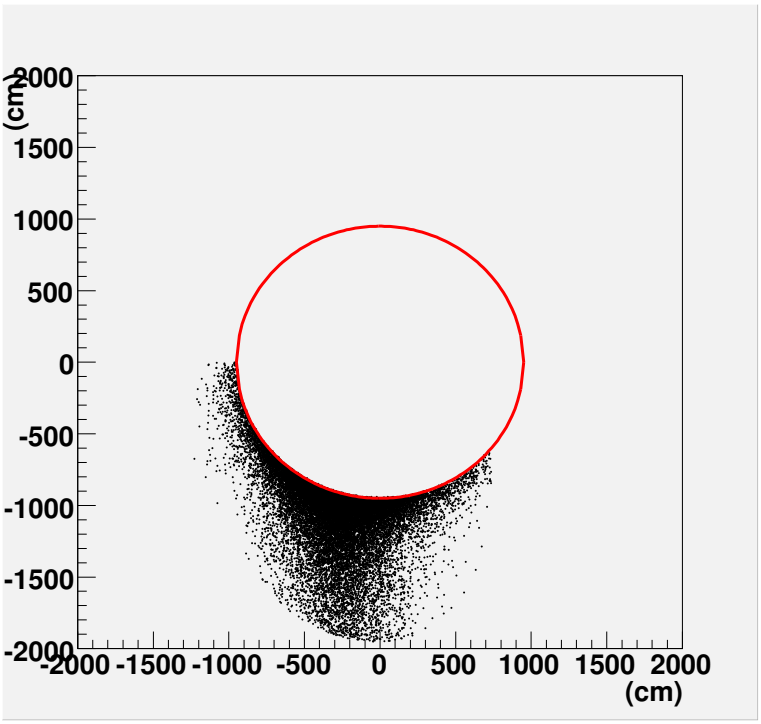

図 4.4: シンチレーターにヒットがあった時のニュートリノ反応点分布。赤線はホールの壁を表わす。

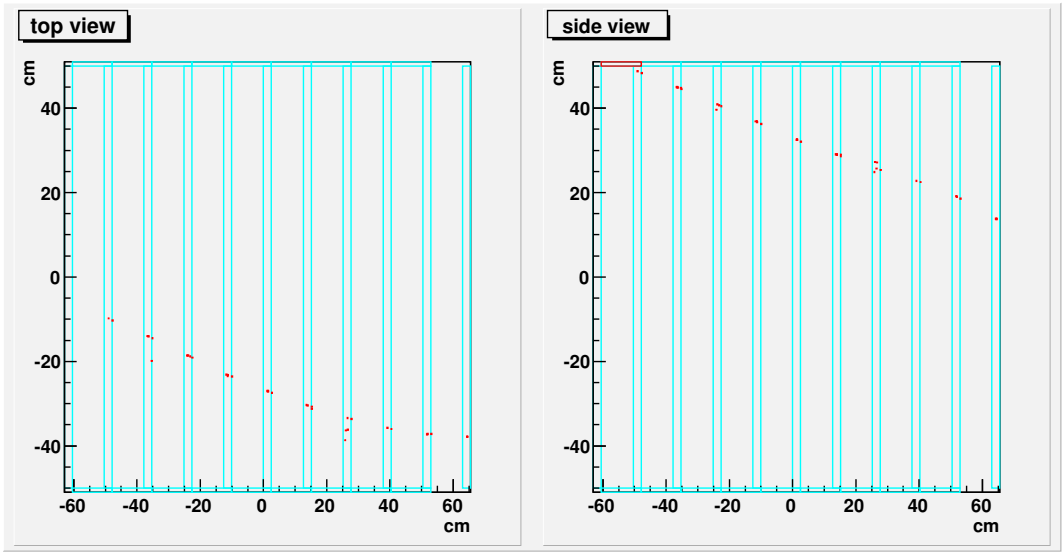

図 4.5: 側面から入射し、検出器モジュールにヒットしたミューオンのイベントディスプレイ。縦線で囲まれた細長い領域がトラッカーで、上下ある横長の四角が veto カウンターを表わしている。

4.2.5 残ったイベント

側面の veto カウンターによるイベントセレクションを加えると、最後に残ったイベントは計 11 イベントであった。この時、シグナルに対するバックグラウンド含有率は全てのモジュールに於いて 0.5%以下となり、目標の 2%よりも小さい値になっている。しかし、統計が 0 ~ 2 イベントしかなく誤差が大きい (70% ~ 100%) ので、さらに統計量を増やす必要がある。統計量を増やすためにビームラインシミュレーションからイベントを作ろうとすると、先に述べた理由から莫大な時間がかかってしまう。より効率的にバックグラウンドのシミュレーションを行なう為に、まずこのシミュレーションで残って来た 11 イベントを理解する。以下にこれら 11 イベントの内訳を示す。

電磁シャワー (6 イベント) 11 イベント中 6 イベントは電磁シャワーのヒットによるイベントであった (図 4.7)。電磁シャワーの原因として中性パイオンの崩壊によるガンマ線があげられる。中性パイオンには、ニュートリノ反応によって直接生成されるものとニュートリノ反応で直接生成された別のハドロンが壁などの物質と反応して生成されるものの二通りがある。

陽子 (2 イベント) 2 イベントは陽子のヒットによるイベントであった (図 4.8)。また、このヒットした陽子はニュートリノ反応により直接生成されたものではなかった。しかし、ヒットのあった検出器モジュール内にニュートリノ反応で直接生成された中性子 (3 GeV/c 程度) が止まっていた。この事から、ニュートリノ反応で直接できた中性子がモジュール内の原子核と反応して陽子を反跳させたと考えられる。

ミューオン (2 イベント) 2 イベントはミューオンのヒットによるイベントであった (図 4.9)。この二つのイベントでは、側面の veto カウンターと前面の veto カウンターのすき間付近からミューオンが入射したため、ミューオンは前面の veto カウンターを図 4.6 の様にかすめる程度になってしまい、殆どエネルギー損失をしなかった。しかし、これらのイベントは前面の veto カウンターを十分大きくする事で除去できる。

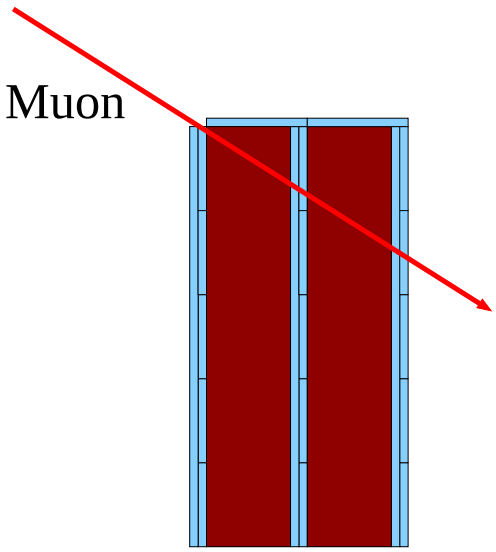

図 4.6: 側面と前面の veto カウンターのすき間を通るミューオン。

パイオン　残りの 1 イベントは π^- のヒットによるイベントであった (図 4.10)。このパイオンは、ニュートリノ反応により直接生成されたものでは無かった。よって、ニュートリノ反応により直接生成されたハドロンが検出器または壁の物質と反応して生成されたものである。

次節では、これらの 11 イベントのうち寄与の大きかった電磁シャワーと陽子のヒットに関してさらに詳しい研究を行なう。

4.3　高エネルギー二次粒子のバックグラウンドに対する寄予

前節の結果から、バックグラウンドのシグナルに対する含有率は 0.5%以下と目標の 2%以下に比べて十分低い値であった。しかし、残ったイベント数は 0 ~ 2 イベントであり、統計誤差が大きい (70% ~ 100%)。よって、さらに統計量を増やしてバックグラウンド含有率を評価する必要がある。そこで、バックグラウンドの主な寄与である電磁シャワーと陽子のヒットによる二種類のバックグラウンドに的をしぼって研究を行なった。具体的には、電磁シャワーの原因をニュートリノ反応で直接生成された 1 GeV/c 以上の中性パイオンからのガンマ線であると仮定する。また、陽子のヒットに関しては、ニュートリノ反応で直接生成された 1 GeV/c 以上の中性子が検出器内の陽子を反跳させた事によると仮定する。そして、モンテカルロシミュレーションにより、大量のニュートリノ反応による中性子、中性パイオンを検出器ホールの壁で生成し、シグナルに対するバックグラウンド含有率を評価した。

4.3.1　ニュートリノイベントの生成

統計量を効率的に増やすため、イベントの生成をビームラインシミュレーションから行なう代わりに、以下の手順で 1 GeV/c 以上のニュートリノ反応による中性子、 中性パイオンによるバックグラウンドイベントを生成した。

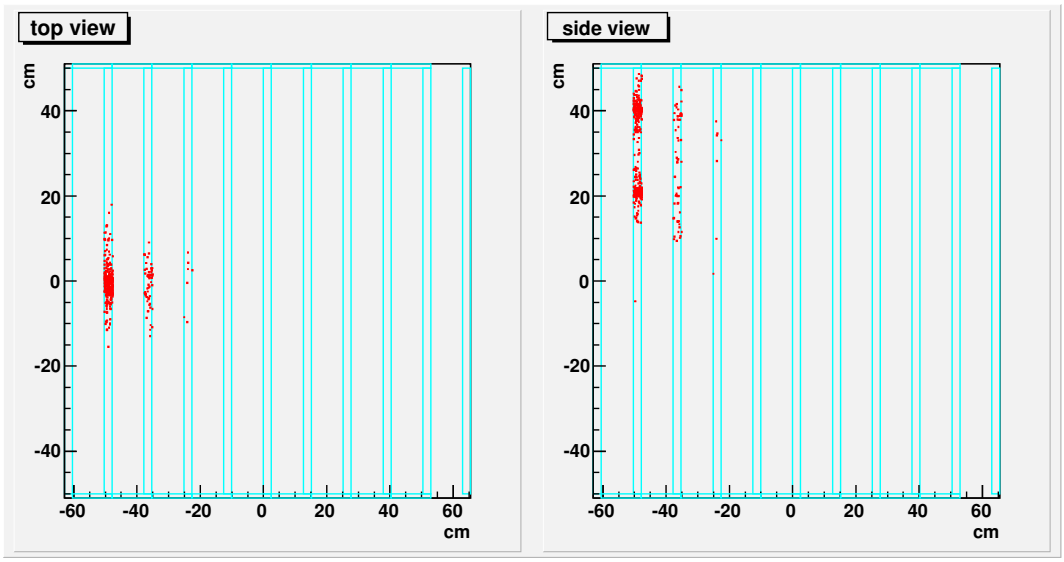

図 4.7: イベントセレクションで生き残るバックグラウンド (電磁シャワー)。

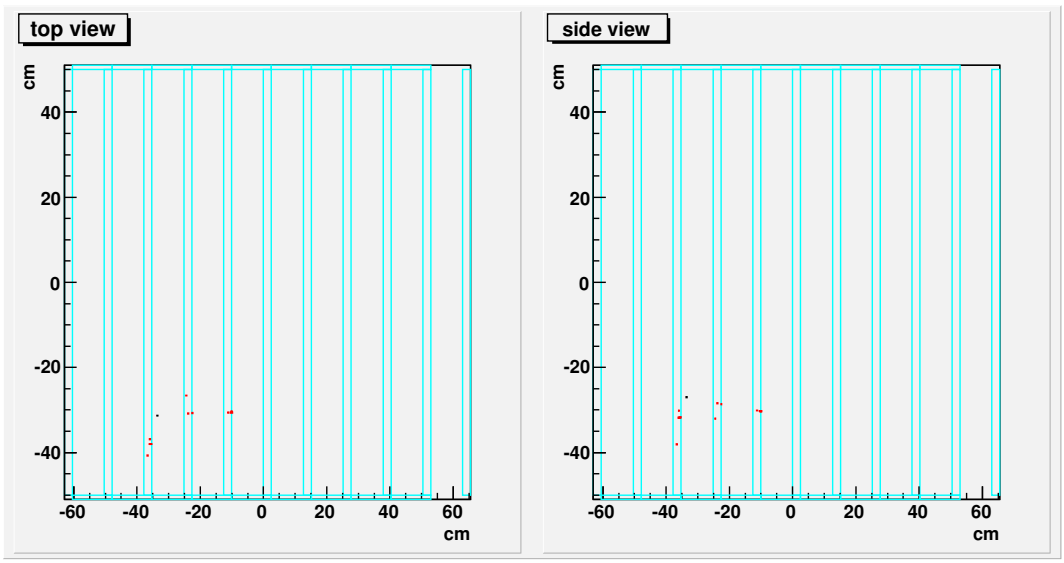

図 4.8: イベントセレクションで生き残るバックグラウンド (陽子)。

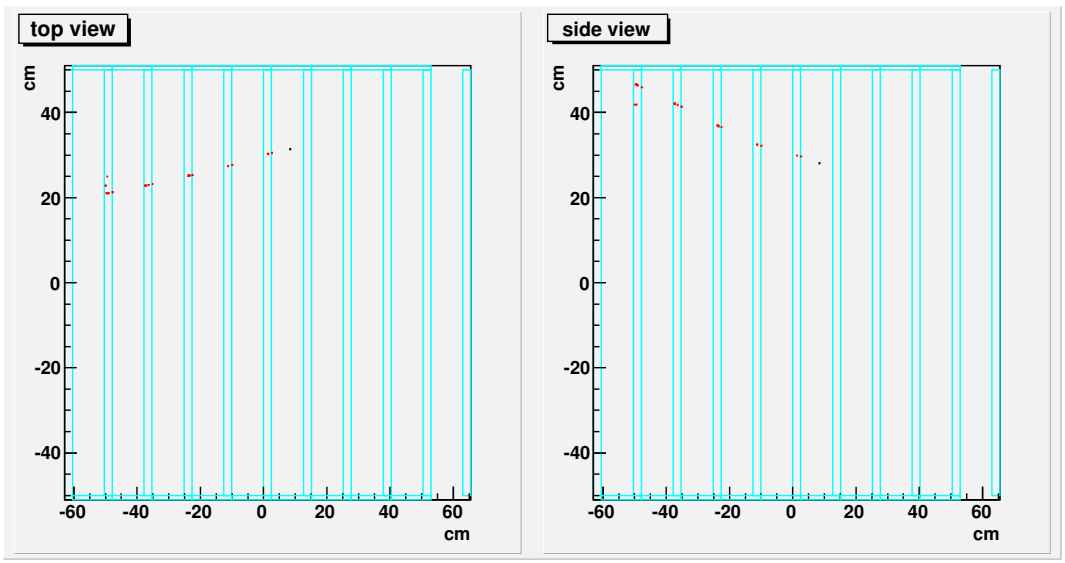

図 4.9: イベントセレクションで生き残るバックグラウンド (ミューオン)。前面の veto カウンターと側面の veto カウンターの隙間を通っている。

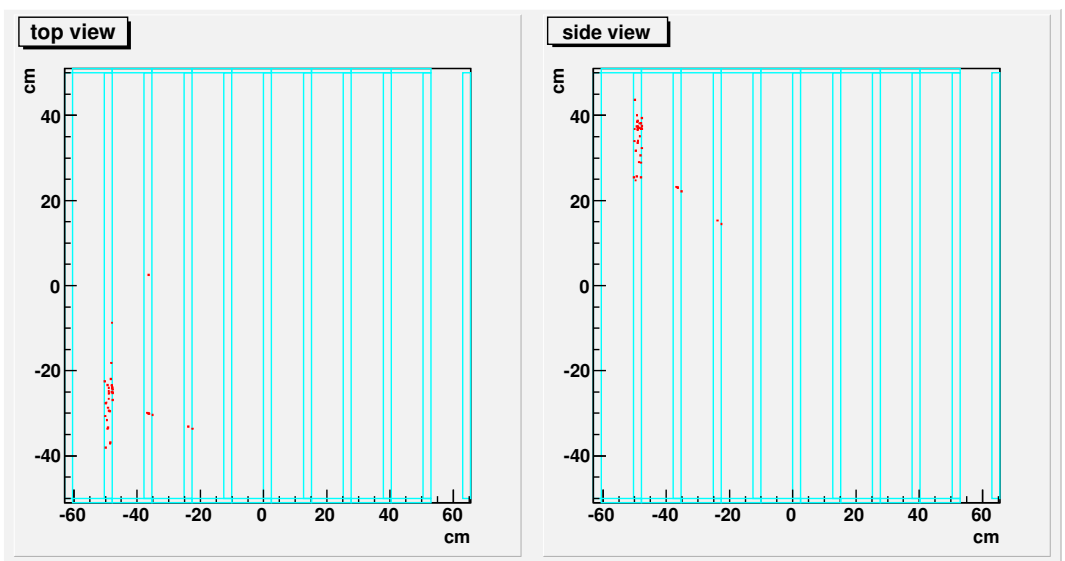

図 4.10: イベントセレクションで生き残るバックグラウンド (パイオン)

1. 生成点 (ビーム軸に垂直な平面) 前節で生成した、ビーム軸に垂直な平面 20m × 20m のニュートリノイベントを用いて、1 GeV/c 以上の中性子 (中性パイオン) の生成点 (ニュートリノ反応によりその粒子が生成された点) の分布を作る (図 4.11)。そして、これを確率密度関数として乱数を振り 1 GeV/c 以上の中性子 (中性パイオン) の生成点のビーム軸に垂直な平面での座標をきめる。

2. 生成点 (ビーム軸方向) 図 4.12 は検出器モジュール内で止まった 1 GeV/c 以上の中性子のビーム軸方向の生成点分布を示す。この図で横軸の原点は壁の表面であり、数値はその表面からビーム軸上流方向の深さを示している。当然、壁の表面付近で出来た中性子の方が検出器モジュールに届きやすいので、ビーム軸方向に一様に崩壊点を分布させると壁の深いところで出来た粒子はほとんどが検出器モジュールに届かず寄予しない。この無駄をさける為に、図 4.12 を指数関数でフィットし、それを確率密度関数として乱数をふりビーム軸方向の反応点を決めた。そして、決まったビーム軸方向の座標を z、その点での確率密度を $P(z)$ とした時、そのイベントは $w(z) = const./P(z)$ 個できたと考え、この $w(z)$ を重みとして情報に加えた。この方法を用いる事で、見かけ上はより多くのイベントがビーム軸方向に一様に生成されている事になる。ただし、壁の深いところ ($P(z)$ が小さい領域) では実際にイベントを生成した数は少ないので統計誤差は大きくなる。

3. 粒子の情報 上の様にして決めた反応点から、1 GeV/c 以上の中性子、 中性パイオンの運動量とその方向を入力すれば検出器シミュレーションが可能である。この 1 GeV/c 以上の中性子 (中性パイオン) の運動量とその方向の情報として、前章の N-Grid 検出器の性能評価の為に生成した大量のニュートリノイベントを使用した。ここで問題になるのは、バックグラウンドイベントの生成に使う生成点の領域が N-Grid 検出器の性能評価のために生成した領域と異なる事である。ビーム方向に垂直な平面で、前者は 20m × 20m、後者は 10m × 1m と大きく異なる (図 4.2)。しかし、両者の運動量スペクトルを比較してもほとんど違いはみられない (図 4.13)。よって、10m × 1m の領域の中性子 (中性パイオン) を 20m × 20m の領域に用いても問題は無いと判断した。

上記の工夫により、1 GeV/c 以上の中性子 (中性パイオン) のみではあるが前節の約 100 倍のイベント、すなわち最大強度の 1%で約 200 日分のイベントを作った。

4.3.2 結果

以下に 1 GeV/c 以上の中性子、パイオンのシミュレーション結果をそれぞれ述べる。

中性子

表 4.4 に 1 GeV/c 以上の中性子でバックグラウンドイベントを生成した結果を示す。数値はイベントセレクション後のものである。シグナルに対する比は全てのモジュールで 0.1% 以下である事が 20 ~ 30%の統計精度で分かった。この 1 GeV/c 以上の中性子によるバックグラウンドを全ての検出器モジュールで足しあわせると 349±25 イベントで、そのうち、ヒットがあった検出器モジュール内で中性子が止まっていたイベントは、328±24 イベントであった。このイベントが前節のシミュレーションで 2 イベントあった事から、100 倍の統計量なら 200±140 イベントある事が予想される。よって、この結果は前節の結果と一致している。また、1 GeV/c という運動量閾値が

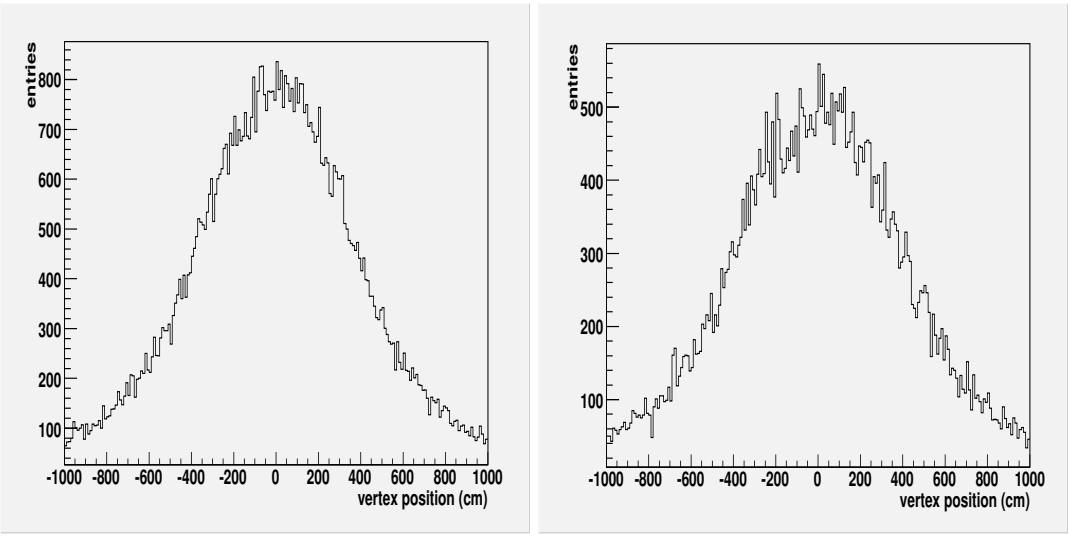

図 4.11: 1 GeV/c 以上の中性子 (左) と 中性パイオン (右) の生成点分布 (ビーム軸に垂直な平面)。水平方向と鉛直方向を分布を足しあわせたものである。

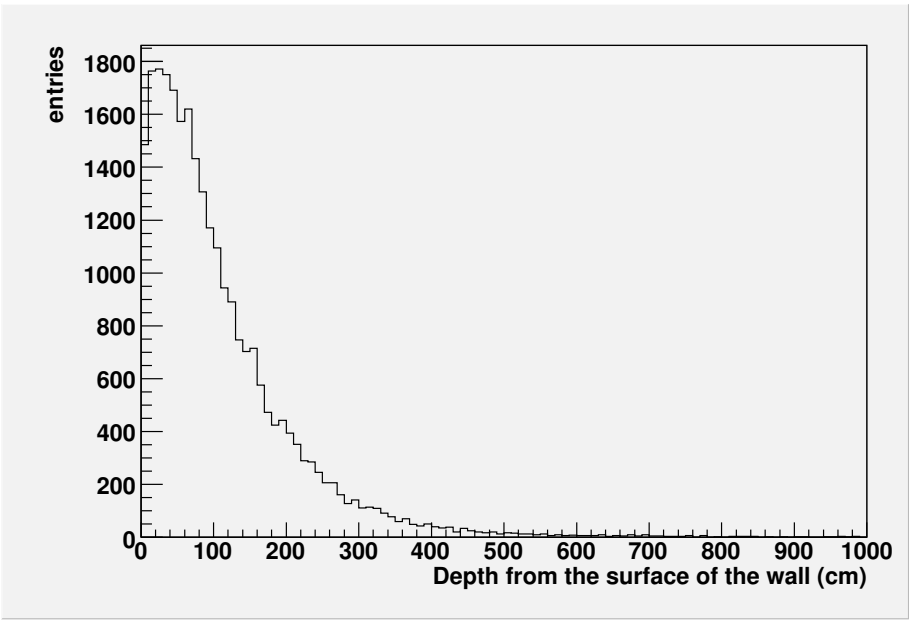

図 4.12: 検出器モジュールの内で止まった 1 GeV/c 以上の中性子 (左) のビーム軸方向の生成点分布。原点は壁の表面で、横軸の数値は壁からビーム軸上流方向の深さを示している。

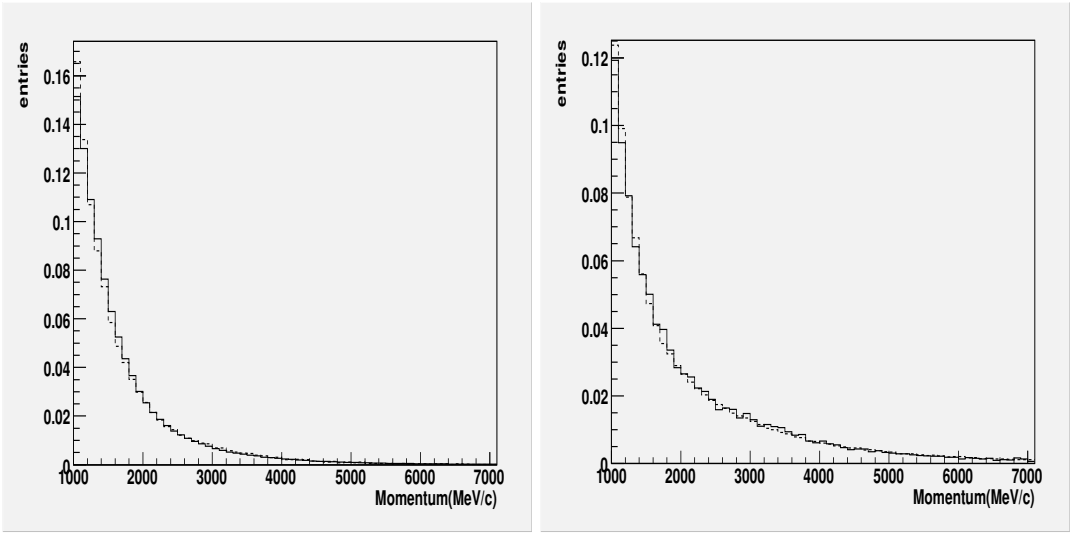

図 4.13: 1 GeV/c 以上の中性子 (左) と 中性パイオン (右) の運動量分布。点線が 20m × 20m で、実線が 10m × 1m で生成したものである。

検出器モジュール (x or y)	-4.5m	-3.0m	-1.5m	0.0m	1.5m	3.0m	4.5m
signal (水平方向)	21595	33998	44049	48199	44819	34219	21665
background (水平方向)	15.2(4.3)	14.1(4.4)	31.2(7.1)	8.5(3.0)	33.7(8.7)	32.4(10.6)	20.9(6.7)
background (鉛直方向)	17.0(4.7)	35.3(8.9)	36.7(7.9)	44.7(8.2)	27.8(5.9)	18.5(5.0)	12.5(3.9)
$\frac{background}{signal}$ (%)	0.07	0.04	0.07	0.09	0.08	0.09	0.09

表 4.4: イベントセレクション後のシグナルとバックグラウンドの比較 (1 GeV/c の中性子のみ)。統計量は最大ビーム強度の 1%で 200 日に相当する。background で括弧で囲まれた数は統計エラーを表わす。最後の比は background(水平方向) と signal(水平方向) の比であるが、0m 地点の検出器モジュールに関しては、上流鉛直方向のバックグラウンドをもちいて比を計算した。

妥当であるかを確かめるために閾値を 600 MeV/c まで下げて同じシミュレーションを行なった。その結果、イベントセレクション後に残ったイベントは 352 イベントであった。これは、1 GeV/c が閾値の時の 349 イベントに比べて 1 %しか増加していない。よって、1GeV/c という閾値は十分なものである。

中性パイオン

表 4.4 に 1 GeV/c 以上の 中性パイオンでバックグラウンドイベントを生成した結果を示す。数値はイベントセレクション後のものである。シグナルに対する比は全てのモジュールで 0.1% ないしそれ以下である事が 20% ~ 30%の統計精度で分かった、このバックグラウンドを全ての検出器モジュールに付いて足しあわせると 242±17 イベントとなる。前節で、全ての二次粒子についてシミュレーションを行なった結果、6 イベントの電磁シャワーのバックグラウンドのイベントがあった。よって、統計が 100 倍になれば 600±250 イベント程度の電磁シャワーのバックグラウンドが

検出器モジュール (x or y)	-4.5m	-3.0m	-1.5m	0.0m	1.5m	3.0m	4.5m
signal (水平方向)	21595	33998	44049	48199	44819	34219	21665
background (水平方向)	23.1(5.1)	17.6(4.3)	19.1(4.7)	5.4(2.4)	18.0(4.4)	21.8(5.0)	15.4(4.0)
background (鉛直方向)	17.2(4.5)	22.5(5.6)	19.7(4.7)	19.5(4.5)	26.2(5.4)	10.9(3.5)	6.2(2.6)
$\frac{background}{signal}$ (%)	0.11	0.05	0.04	0.04	0.04	0.06	0.03

表 4.5: イベントセレクション後のシグナルとバックグラウンドの比較 (1 GeV/c の 中性パイオンのみ)。統計量は最大ビーム強度の 1%で 200 日に相当する。background で括弧で囲まれた数は統計エラーを表わす。最後の比は background(水平方向) と signal(水平方向) の比であるが、0m 地点の検出器モジュールに関しては、background(鉛直方向) と signal(水平方向) の比をとっている。

予想される。この事から、統計エラーが大きいが中心値を信用すれば、この 1 GeV/c 以上の中性パイオンは電磁シャワーのバックグラウンドに 1/3 程度寄予する事がわかる。また、この中性パイオンに関しても閾値を 500 MeV/c まで下げ、同じシミュレーションを行なった。その結果、イベントセレクション後のイベント数は 254 イベントであった。 これは 1 GeV/c が閾値の時の 242 イベントに比べて 5%しか増加していない。よって、この中性パイオンに関しても 1 GeV/c という閾値は十分である。

4.4 この章のまとめ

検出器ホールの壁でおこるニュートリノ反応の二次粒子がバックグラウンドとして N-Grid 検出器に及ぼす影響を調べた。まず、始めに全二次粒子を用いて検出器ホールの壁でニュートリノイベントを生成した。その結果、イベントセレクション後に残って来るバックグラウンドは、シグナルに対して全ての検出器モジュールで 0.5%以下である事が分かった。しかし、この時のシミュレーションの統計量は各検出器モジュールあたり 0 ~ 2 イベント (全部で 11 イベント) であり、誤差は 70% ~ 100%である。次に、これらのバックグラウンドの原因は 1 GeV/c 以上の中性子と中性パイオンであると推測し、1 GeV/c 以上の中性子と中性パイオンのみを先のシミュレーションの約 100 倍生成した。その結果、中性子、中性パイオンでそれぞれ 350 イベント、240 イベントがイベントセレクション後に残り、各検出器モジュールにおけるバックグラウンドのシグナルに対する割合は 0.1%ないしそれ以下であることが 20% ~ 30%の精度で分かった。

4.5 課題

しかし、一方で全ての二次粒子を用いた場合の数から予想される全バックグラウンド数は、すき間から入射したミューオンによるものを除いて (11-2)×100 = 900 イベントであり、中性子 (350 イベント)、中性パイオン (240 イベント) だけでは、説明しきれない事も分かった。このうち、もっとも理解を深める必要があるのは、6×100 = 600 イベント程度が期待される電磁シャワーによるバックグラウンドである。電磁シャワーのバックグラウンドは、高エネルギーの荷電パイオンや陽子が物質と相互作用して、中性パイオンを作ったり、ケイオンの崩壊で中性パイオンができ、そのようにして出来た中性パイオンからの γ 線が原因となる可能性がある。実際、始めのシミュレーションで得られた 6 イベントの電磁シャワーのうち、3 イベントには中性子、中性パイオン以外にも、

1 GeV/c 以上の陽子、ケイオン、荷電パイオンのうちどれかがニュートリノ反応二次粒子として含まれていた。よって、本章で中性子、中性パイオンについて行なったのと同様の研究を、ニュートリノ反応による高エネルギーの陽子、ケイオン、荷電パイオンで行なう事が今後の課題である。

第5章　シンチレーターの波長変換ファイバー読み出しの研究

N-Grid 検出器のトラッカーに使用するシンチレーターの開発の為に、パイオンビーム、および宇宙線をもちいたテスト実験を行なった。本章では、その詳細を述べる。

5.1　動機

現在、われわれは N-Grid 検出器のトラッカーに使用するシンチレーターの読出し方法として波長変換ファイバー読み出しという方法を採用する。波長変換ファイバー読み出しとは、波長変換ファイバーをシンチレーターに密着させ、シンチレーション光を波長変換ファイバーに吸収、再発光させて、その光を光検出器で読出す方法である。

3 章ではトラッカーの平均検出効率が 99.5%あればよい事をしめした。この要求を満たすトラッカーを開発するためは、実際にプロトタイプを作成し、要求をみたしている事を測定により確かめなければならない。それが本実験の動機である。

5.2　KEK-PS T1ビームラインにおけるシンチレーターの光量測定

まず最初に、2005 年 11 月に KEK の 12GeV プロトンシンクロトロンの T1 ビームラインで行なったテスト実験について述べる。

5.2.1　測定の方法

図 5.1 に測定の概念図を示す。測定はパイオンビームをシンチレーターに入射させて行なった。シンチレーターはロシア製のものを使用した。ロシア製シンチレーターの表面には 7 本の溝が掘られており、そこに波長変換ファイバーをはめ、マルチアノード光電子増倍管を用いてファイバーを一本一本別々に読みだした。以下に使用したシンチレーター、波長変換ファイバー、光電子増倍管の説明を記す。

シンチレーター　ロシア製の 17cm×17cm×1cm プラスチックシンチレーターを使用した。T2K 実験の前置検出器用に開発されているプロトタイプで、表面に ϕ1mm 波長変換ファイバー用の溝が 2.5cm 間隔で 7 本掘られている。また、表面に反射剤が付いているものとそうでないものをそれぞれ使用した。

波長変換ファイバー　クラレ Y-11(200),Y-7(200) の二種類を使用した。ともに ϕ1mm で Y-11、Y-7 は波長変換材の種類を示し、200 は波長変換材の濃度で 200ppm という意味である。

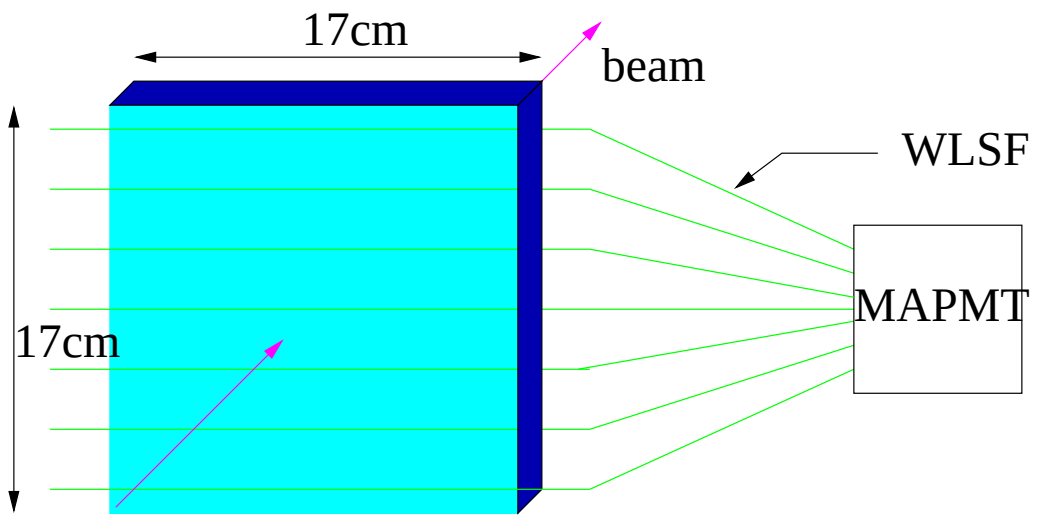

図 5.1: 測定の概念図

光検出器 浜松フォトニクス製 64CH マルチアノード光電子増倍管 H8804 を使用した。印加電圧は-900V に設定した。この時のゲインはおよそ 2×10^6 である。

またこの測定を以下のシンチレーターと波長変換ファイバーの組み合わせで行なった。

反射剤 (シンチレーター)	波長変換ファイバー
なし	Y-11
なし	Y-7
あり	Y-11

5.2.2 セットアップ

この測定のセットアップを図 5.2 に、トリガーロジックを図 5.16 に示す。装置の上流には約 3m の間隔で二つのシンチレーションカウンターがおかれており、この間を飛行する時間を測定することで陽子とパイオンを識別する。この二つのカウンターを TOF(time of fight) カウンターと呼ぶ。さらに測定するシンチレーターの前後に 1cm×10cm で厚さ 5mm のシンチレーションカウンターを垂直に交叉させて配置した。このカウンターを Finger カウンターと呼ぶ。この Finger カウンターと TOF カウンター両方のコインシデンスをトリガーにする事で粒子が測定するシンチレーターに対して垂直に入射し、かつ突き抜けている事を保障した。

5.2.3 TOF カウンターによる粒子識別

この測定では MIP(Minimum Ionization Particle) である 1.4GeV/c のパイオンを陽子と識別するために TOF カウンターを用いた。MIP の撰択が必要な理由は、ニュートリノビームモニターで捕えるミューオンの殆どが MIP であり、単位長さあたりのエネルギー損失が陽子と異なるからである。図 5.4 に TOF1 と TOF2 の粒子が通る時間差 (ΔT) の分布を示す。時間分解能はパイオンで 180ps、陽子で 150ps であった。

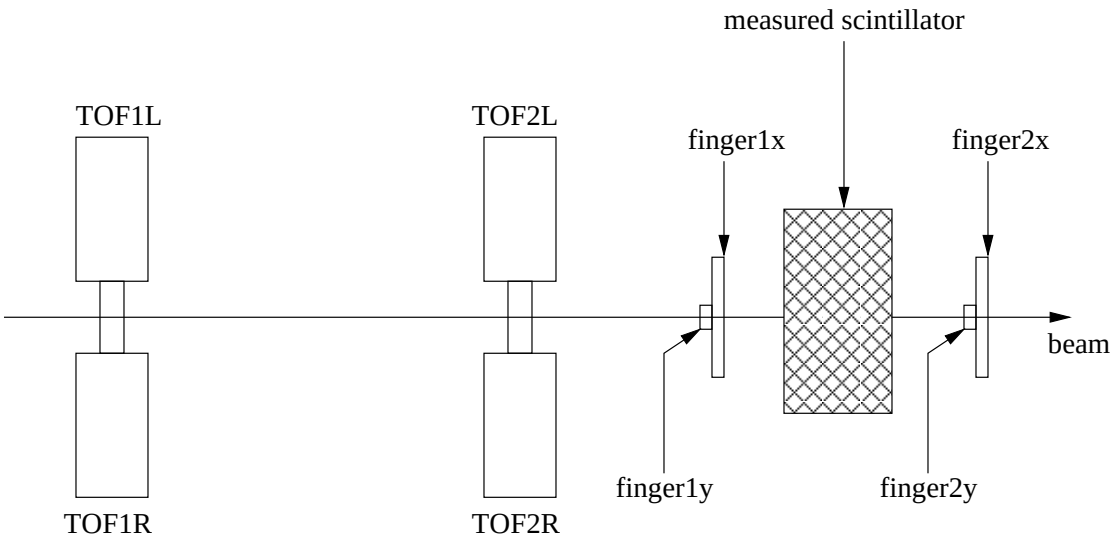

図 5.2: ビームテストセットアップ

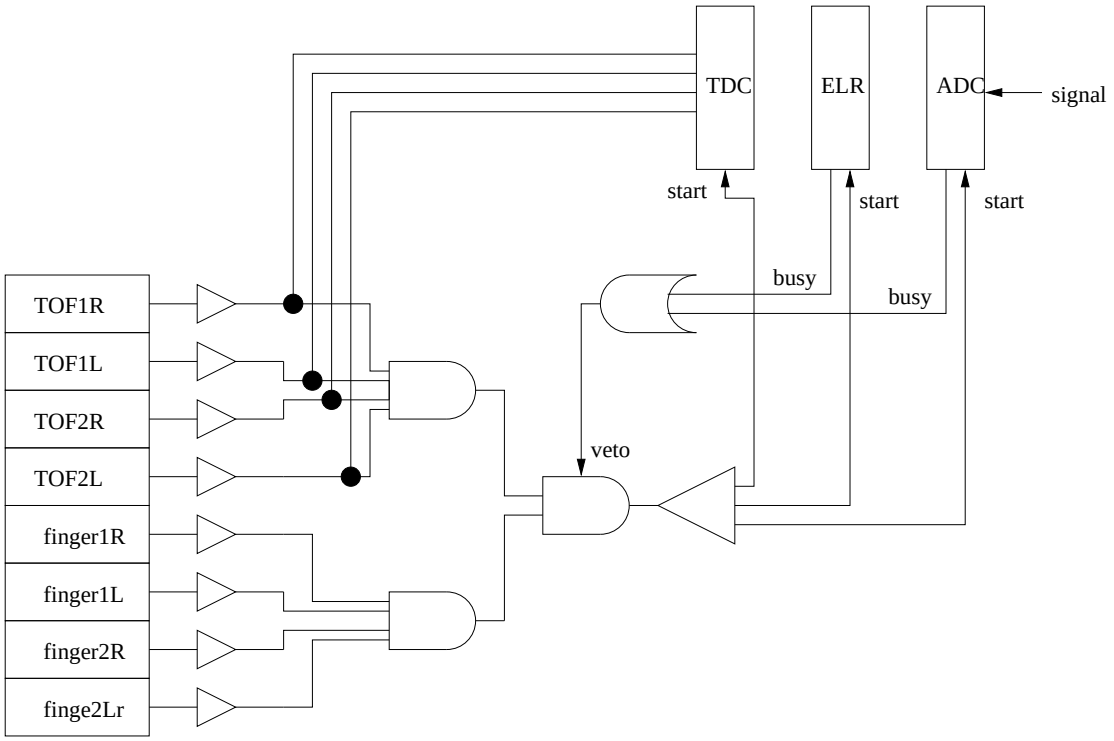

図 5.3: トリガーロジック

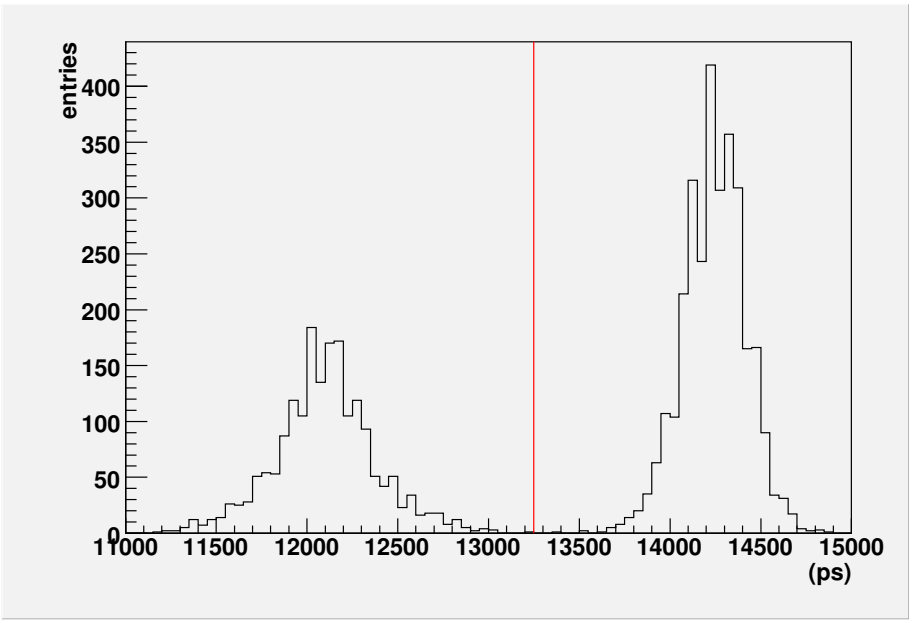

図 5.4: (ΔT) 分布。縦線より左がパイオンで右がプロトンである。

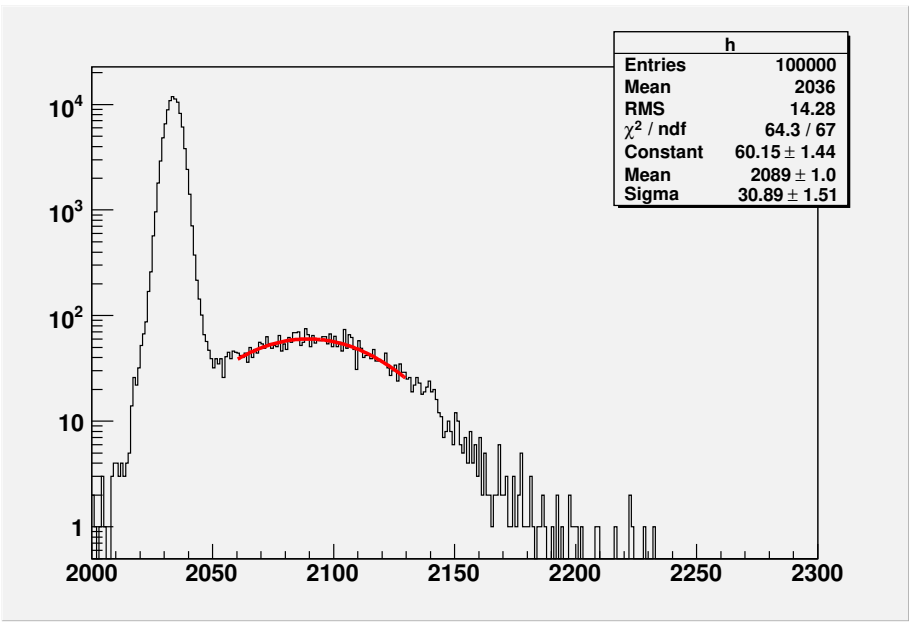

図 5.5: 1p.e. ピーク

組み合わせ	光量 (p.e.)
反射剤あり、Y-11	20.0
反射剤なし、Y-11	9.2
反射剤なし、Y-7	6.2

表 5.1: 光量の比較

5.2.4　光量の定義

この測定では、光量を次のように定義する。

$$\text{光量} = \frac{ADC \text{ 分布の } mean}{1p.e.\text{ピークの } ADC \text{ カウント}} \tag{5.1}$$

また、1p.e. ピークの ADC カウントはビームタイム中に LED を用いて測定した。図 5.5 に典型的なチャンネルの 1p.e. ピークの図を示す。

5.2.5　各組み合わせに於ける光量比較

図 5.6 にシンチレーターの中心に入射させたときの光量分布を示す。左から順に、「反射剤あり、Y-11」「反射剤なし、Y-11」,「反射剤なし、Y-7」の測定結果を表わしている。光量はすべて、1.4GeV/c パイオンの入射によるものであり、全ての波長変換ファイバーの和をとっている。これら三つの分布の平均を計算した結果を、表 5.1 にしめす。 表 5.1 より反射剤によって光量が約 2 倍増加し、また、Y-11 の方が Y-7 よりも 1.5 倍光量が多い事が分る。よって、この後はもっとも光量の多い「反射剤あり、Y-11」の組み合わせのみに関して述べることにする。

5.2.6　10cm 幅シンチレーターを読出すのに必要なファイバーの本数

ニュートリノビームモニターでは 10 cm の幅のシンチレーターを想定している。そこで、10 cm の範囲で図 5.7 のように 1cm 間隔で 10 点にビームを入射させた。各入射点で得られたファイバー 1 本の光量 (ファイバー番号 3)、2 本の光量の和 (ファイバー番号 2,4)、3 本の光量の和 (ファイバー番号 2,3,4) をそれぞれ求めた (ここで使ったファイバー番号は、図 5.7 に示した Fiber Number の事である)。これら、三つの場合について、各ビーム入射位置に対する光量を 図 5.8 に示す。上から波長変換ファイバー 3 本の光量の和、2 本の和、1 本の光量をそれぞれ示している。また、図 5.9 は図 5.7 の一番上の点にビームが入射した場合の光量分布である。 同様に三つの場合において粒子入射位置と 1.4GeV/c パイオンの検出効率の関係を図 5.10 の右上のグラフに示す。また検出効率の平均値、検出効率が最小の時の値 (図 5.7 で示した入射点の内一番下の点に入射した場合) を表 5.2 にしめす。また、検出効率は以下で定義される。

$$(\text{検出効率}) = \frac{0.5p.e.\text{以上のイベント数}}{\text{全イベント数}} \tag{5.2}$$

ここで 0.5p.e. という閾値はノイズが充分に小さく、検出効率を出来るだけ大きくするように選んだ値である。図 5.11 は左からそれぞれ、シグナル, ペデスタルの分布を示し、図中の赤線は 0.5p.e. の閾値である。また、図 5.12 に閾値を変えていったときのシグナル、ペデスタル (ノイズ) の検出効率を示す。図 5.11 と図 5.12 から 0.5p.e. の閾値は適当な事がわかる。

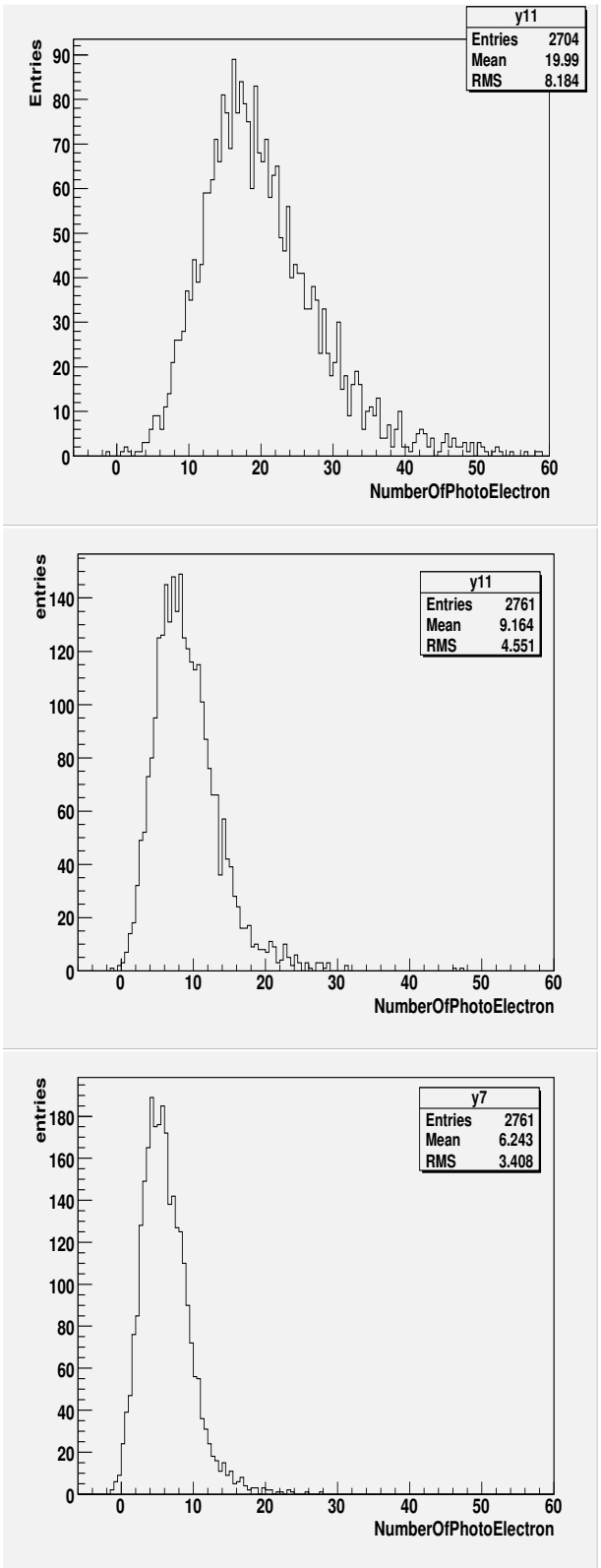

図 5.6: 左から「反射剤あり、Y-11」「反射剤なし、Y-7」「反射剤なし、Y-11」の光量分布をそれぞれ示す。

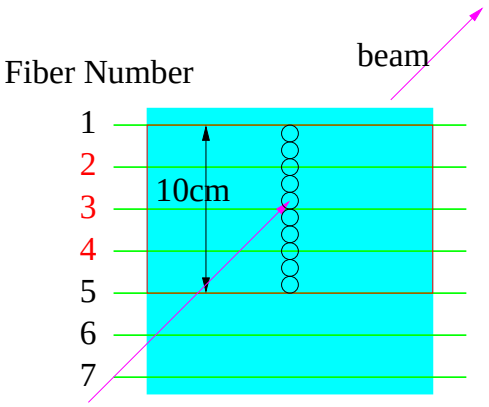

図 5.7: ビーム入射位置と光量測定を行なうファイバーの位置関係。丸印はビームを入射させた点に対応する。

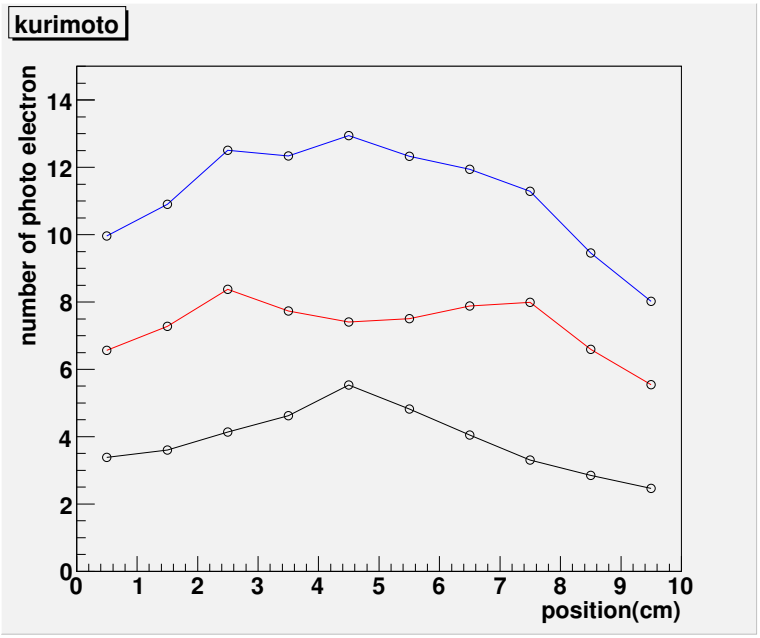

図 5.8: ビームの入射位置と光量の関係。上から波長変換ファイバー 3,2,1 本の光量の和を示している。

	平均検出効率	検出効率の最小値
ファイバー 1 本	0.913	0.818
ファイバー 2 本	0.988	0.970
ファイバー 3 本	0.995	0.991

表 5.2: 平均検出効率と検出効率の最小値

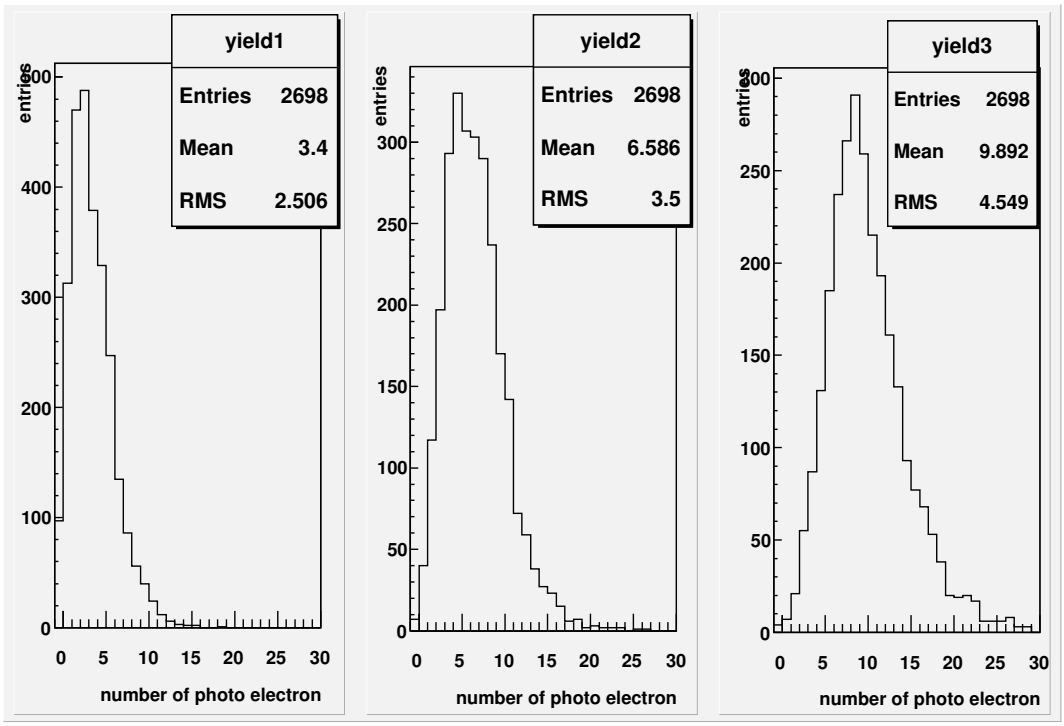

図 5.9: 光量分布。左から、波長変換ファイバー 1,2,3 本の光量の和を示す。

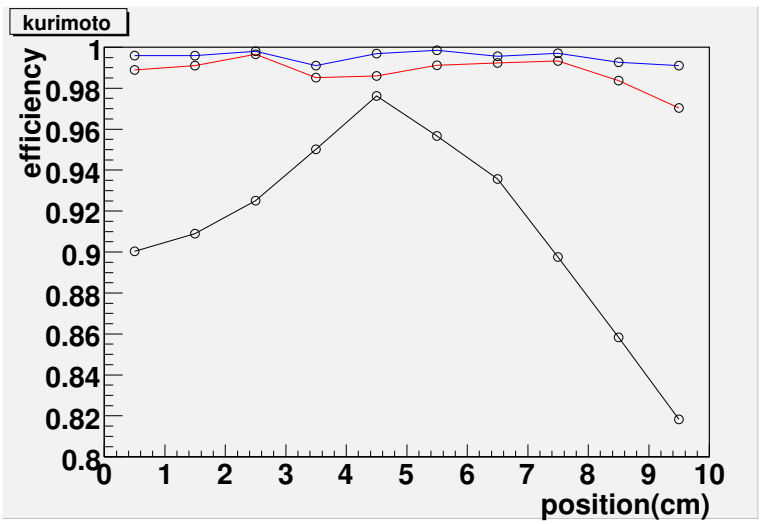

図 5.10: 各波長変換ファイバー読み出しにおける検出効率。上から順に、それぞれ波長変換ファイバー 3,2,1 本の光量の和での計算結果を示している。

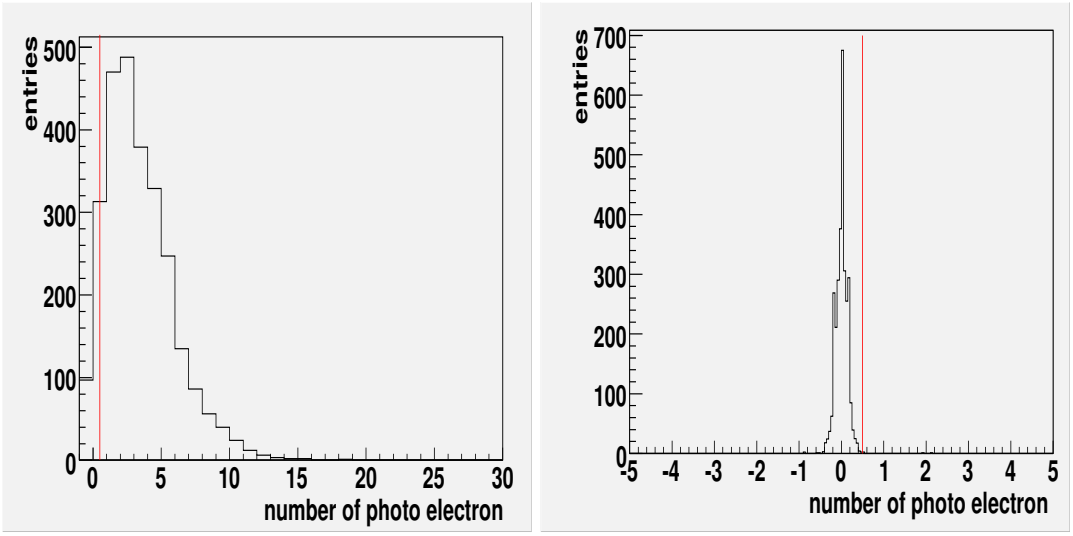

図 5.11: シグナル分布 (左) とペデスタル分布 (右)。赤線は 0.5p.e. の閾値を示す。シグナルは波長変換ファイバー 1 本読み出しでビームの入射位置をファイバーから 4.5cm 離れた点にしたときのものである (図 5.7 で示した入射位置で一番上の点。)

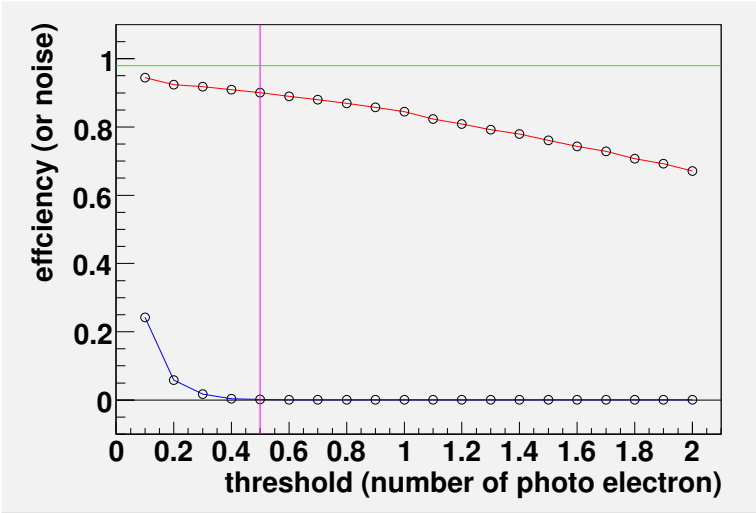

図 5.12: 閾値と検出効率の関係。上下のグラフはそれぞれシグナル、ペデスタル (ノイズ) の検出効率をそれぞれ示している。

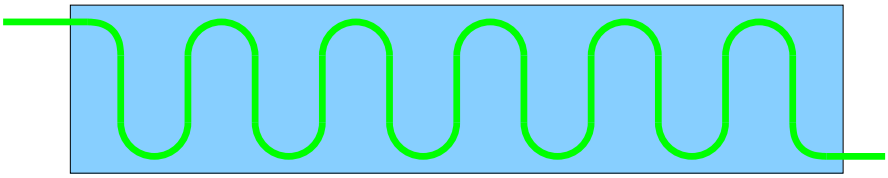

図 5.13: ファイバーを曲げて埋めこんだシンチレーター。

図 5.10、表 5.2 から分るように、平均検出効率 99.5%を得るにはこの読出し方法で、3 本のファイバーを用いなければならない事が分かる。

5.3 宇宙線によるシンチレーターの光量測定

反射剤つきのロシア製シンチレーター、Y-11 の ϕ1mm 波長変換ファイバー、64 マルチアノード PMT を使用した場合で、3 本の波長変換ファイバー用いてを 10 cm 幅のシンチレーターからの光量を読出せば、平均 99.5%の検出効率を得られる事が分かった。しかし、金額面、技術面からみて読出しファイバーは出来るだけ少ない事が望ましい。改善策としては径のより大きなファイバーを用いる、量子効率の大きな光検出器を使用する、といった方法が考えられる。また、これらの方法とは別に、 図 5.13 の様に、波長変換ファイバーを曲げて埋めこむ事でシンチレーターの各点からファイバーまでの距離を近くする方法もある。シンチレーター中の光量の減衰長がおよそ 6 cm である事から、ファイバーと各点間の距離は 6 cm より十分短くすればよい。そのような読み出し方法のテストを宇宙線を用いて行なった。本節ではそのテストの詳細および結果を述べる。

5.3.1 実験の方法

実験では、シンチレーターを宇宙線が通過したときのシンチレーターの光量を測定する。シンチレーターは前節のビームテストの時と同じロシア製のものを使用した。このシンチレーターは図 5.14 の様に波長変換ファイバー用の溝が掘ってある。この溝に ϕ1.0mm の波長変換ファイバー Y-11(200) を埋めこみ片側を光電子増倍管で読出した。この時使用した光電子増倍管は浜松フォトニクス製の H8643 で、前節で使用したマルチアノード光電子増倍管よりも、緑色の波長に対する量子効率が 1.2 ~ 1.3 倍高い。

5.3.2 セットアップとデータ収集ロジック

この測定のセットアップを図 5.15 に、トリガーロジックを図 5.16 に示す。この測定では、ロシア製シンチレーターの上下にトリガーカウンターを配置し、両方のカウンターのコインシデンスをデータ収集のトリガーとした。これによって、宇宙線がロシア製シンチレーターを突き抜けている事がいえる。またシンチレーターに入射する角度が垂直に近い宇宙線だけを選ぶために、2.5 cm×2.5 cm で厚さ 1.3 cm のシンチレーターと ϕ1.5 mm の波長変換ファイバー Y-11(200) を用いて作成した (図 5.17) トリガーカウンターを用いた。

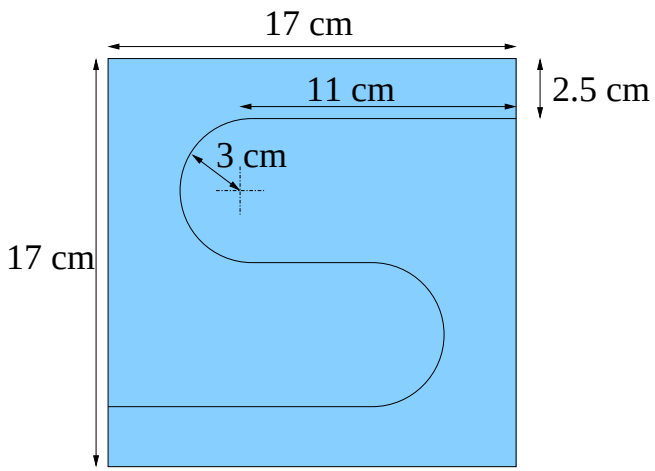

図 5.14: 実験に使ったシンチレーター。中に書かれた線はファイバーの溝を表わしている。

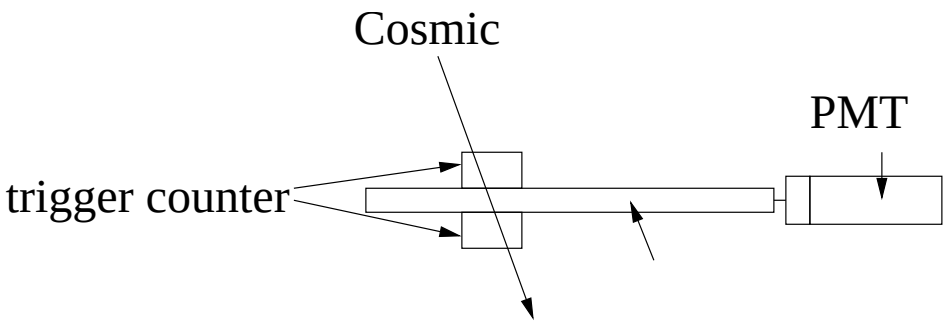

図 5.15: 本測定のセットアップ

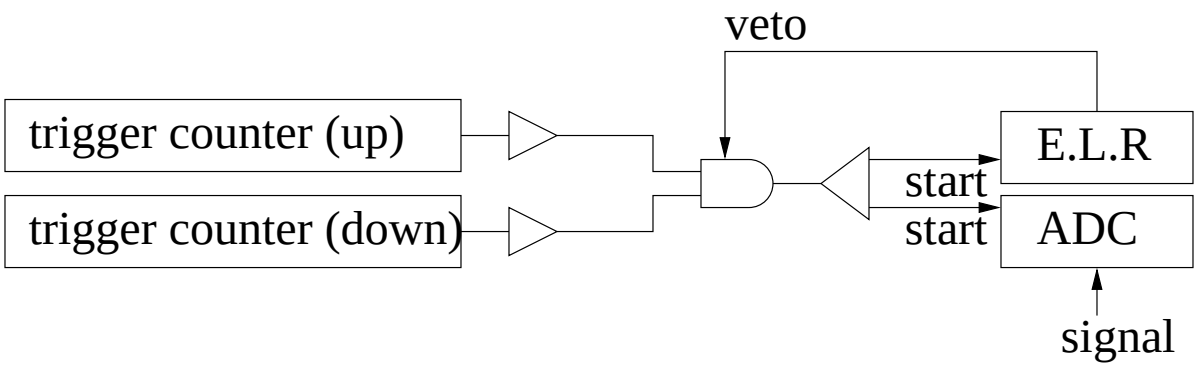

図 5.16: データー収集ロジック。E.L.R. はイベントラムレジスターの略である。

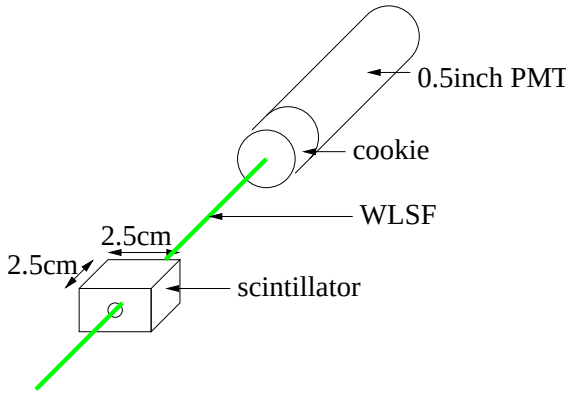

図 5.17: この測定で使用したトリガーカウンター。

5.3.3 測定

位置スキャン

図 5.18 に示した八点で測定を行なった。実機では、図 5.21 のように、幅 10cm 程度のシンチレーターを想定しているので中心付近 (点 2 ~ 7) を主にスキャンした。さらに念のため光量が最も低いと予想される角の付近 (点 1,8) の測定を行った。また、1 つの点に対して約 2000 イベント取得した。

PMT ゲインの較正

光量を求める為に、PMT の 1p.e.(photo electron) のシグナルを測定した。図 5.19 に 1p.e. の分布を示す。図のように、1p.e. ピークをガウス分布関数でフィッティングして 1p.e. ピークの ADC カウントを求めた。また、この測定は各位置スキャンの測定前と測定後の計 16 回測定した。測定した 16 個の 1p.e.ADC カウントのばらつきはその平均値に対して 3%以内におさまっていた。この事から、測定期間中は PMT のゲインは非常に安定していたと言える。

5.3.4 測定結果

表 5.3 に各入射位置に対する光量と検出効率をしめす。なお、光量、検出効率の定義はそれぞれ、前章と同様である。この結果から平均の検出効率として 99.5%が得られた。また、図 5.13 の様な幅 10cm のシンチレーターにした時に関係する 6 点 (2-7) に関しては、平均で 99.7% が得られた。さらに、最も光量が低いと予想される点 (1,8) でも 99%以上の efficiency が得られた。図 5.20 に入射位置ごとの光量分布を示す。

5.4 結論と考察

N-Grid 検出器のトラッカーに用いるシンチレーターとして、図 5.1 のようにシンチレーターに対して平行にファイバーを並べる場合と、図 5.13 の様をファイバーを曲げて埋めこむ場合の二つを侯補として挙げ、テスト実験を行なった。その結果、前者の読出し方法の場合、ファイバーが 3 本必要な事が分かった。また、後者に関しては、作成したプロトタイプ (図 5.14) で、平均検出効

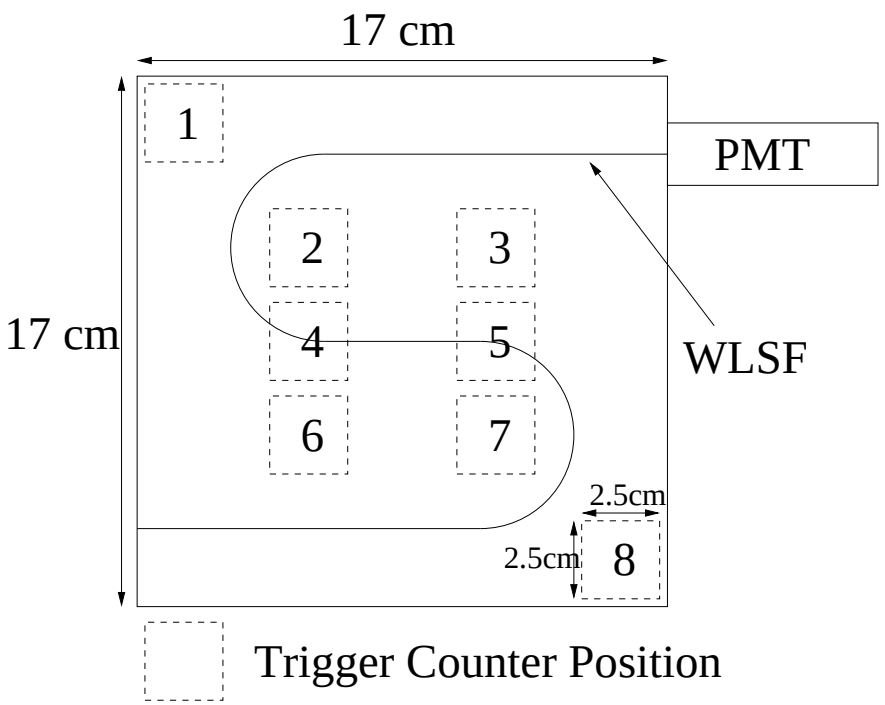

図 5.18: 点線の四角がトリガーカウンターを置いた位置。

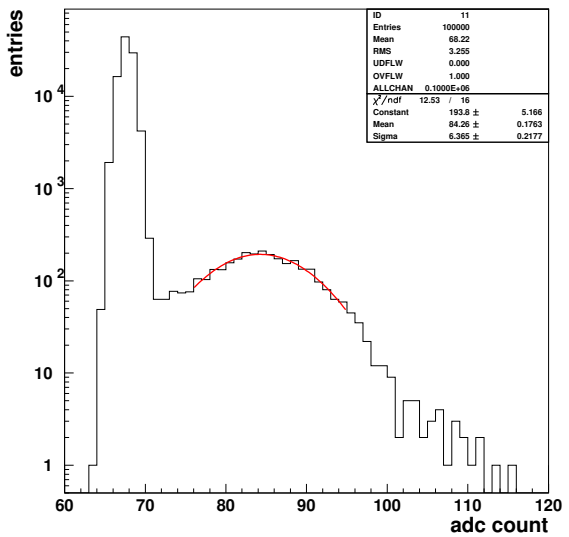

図 5.19: 1p.e. ピーク

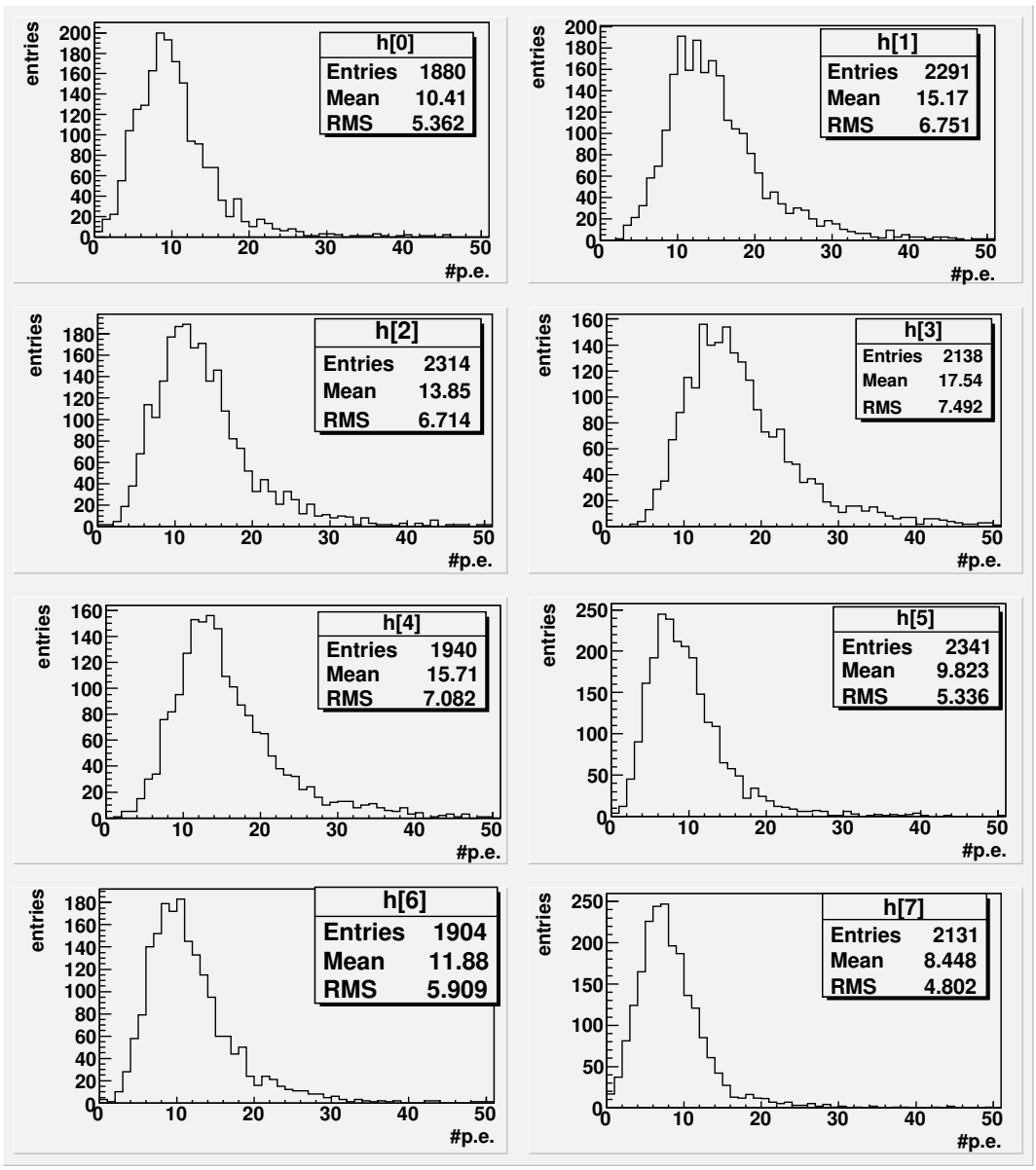

図 5.20: 光量の分布。各ヒストグラムの右上の番号は図 5.18 で示した入射位置に対応する。

宇宙線の入射位置	光量 (p.e.)	検出効率 (%)
1	10.8	99.2
2	15.7	99.7
3	14.4	99.3
4	17.9	99.7
5	16.3	99.8
6	10.3	99.7
7	12.2	99.7
8	8.9	99.1
平均	13.3	99.5

表 5.3: 測定結果。番号は図 5.18 で示した入射位置に対応する。

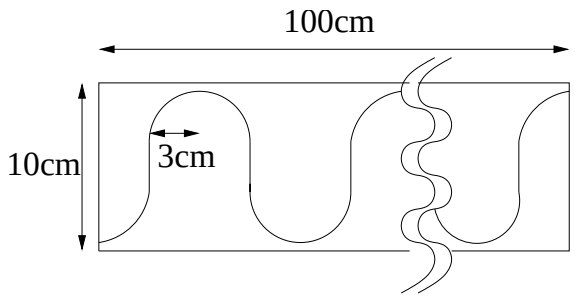

図 5.21: 実機に用いるシンチレーターのデザイン

率は要求を満たす 99.5%であった。曲げて埋め込む場合に、実機 (長さ 100m、幅 cm) では図 5.21 で示した様になる。この時、ファイバーの全長は約 2m である。一方で、シンチレーターに平行にファイバーを並べる場合、実機におけるファイバーの全長は 1.0m × 3 本 = 3m であり、チャンネル数、ファイバーの長さという面で曲げた一本のファイバーで読出す方が得である。次に、曲げてファイバーを埋め込む方法を図 5.21 のように実機で採用した場合、十分な光量が得られるかを考察する。宇宙線による測定の結果と、この時のファイバーの全長は約 2m である事を使えば、実機の性能は以下のように予測できる。今回の測定で最も光量が少なかった点で 8.9p.e. が得られている。ファイバーの減衰長は約 3.5m[15] である事を考えるとシンチレーターの中心で $8.9\times e^{-100/350}$ = 6.7p.e.、端では、$8.9\times e^{-200/350}$ = 5.0.p.e. が最低で得られる事が分かる。これで、ファイバーの両端を光検出器で読み出せば最低でも 12p.e. 程度の十分な光量が得られる事が分かる。しかし、さらにチャンネル数を減らす為にファイバーの片側のみで読み出す事が望ましい。これに関しては、現在開発中の MPPC(multi pixel photon counter)[12] という緑の波長領域 (波長変換ファイバーの発光波長) での量子効率がさらに高い光検出器を使う事で解決できる可能性は十分にある。これらの結果から、曲げてファイバーを埋め込む方法を実機に採用する。

第6章　結論

本研究では、次期ニュートリノ振動実験である、T2K 実験のためのニュートリノビームモニターの開発を行なった。ニュートリノビームモニターでは、ニュートリノビームの方向をニュートリノ反応を捕える事によって直接測定する。ニュートリノ振動パラメータの系統誤差を統計誤差の範囲内に抑えるにはニュートリノビームの方向を 1mrad 以内の精度で測定しなければならない。1mrad はニュートリノビームモニターの位置で 28cm に対応する。

始めにニュートリノビームモニターに対する要請を求めた。具体的には、ビーム中心から ± 5 m の範囲を検出器がカバーする必要がある事、数十トンのニュートリノ標的が必要な事、3 GeV 以下のニュートリノを主に検出する必要がある事を示した。

その条件を満たすため、コンパクトな 14 個の検出器モジュールをビーム軸まわりに十字形に配置する N-Grid 検出器を考案した。これにより、ビームの水平方向と鉛直方向にはビーム中心から、$\pm$5m の領域をカバーする事ができる。また、各検出器モジュールは $1\ \mathrm{m} \times 1\ \mathrm{m} \times 1\ \mathrm{m}$ の鉄とシンチレーターのサンドイッチ検出器になっており、全ての検出器モジュールの合計で計 110 トンの大質量標的を実現する。N-Grid 検出器では各検出器モジュールで荷電カレント反応のミューオンを捕え、そのイベント数分布から中心を再構成する。

次に、N-Grid 検出器の性能評価をモンテカルロシミュレーションを用いて行なった。まずは、ビームが理想的な場合のシミュレーションを行なった。その結果、ビーム中心の再構成の精度が 2.4cm となり目標の 28cm という精度に比べて十分よい事を示した。そして、ビームがずれた時の振る舞いを調べる為に、例として陽子ビームが標的の中心から 3mm ずれて入射した場合をシミュレートした。陽子ビーム 3mm のずれは物理結果に影響するので N-Grid 検出器はそれに対して十分な感度を持っている必要がある。このシミュレーションによって陽子ビームが標的からずれて入射すると、3 GeV 以上の高エネルギーニュートリノは陽子ビームがずれた方向と同じ方向にずれるが、3 GeV 以下の低エネルギーニュートリノではずれる方向が逆になる事が分かった。その事から、エネルギー領域の異なる複数のサンプルでニュートリノビームの方向を測る必要があると判断し、従来のサンプルに加えて、捕えたミューオンの角度が 20° で以上である事を要求し、3 GeV/c 以下のニュートリノの純度を上げたサンプルでも中心の再構成を行なった。その結果、陽子ビームが標的の中心から 3mm ずれて入射した時のニュートリノビームの再構成中心は標的の中心に入射した場合の再構成中心から、ミューオンの角度のカット使ったサンプルを用いた場合で 22.4 ± 3.6 cm、そのカットを使っていないサンプルで 15.8 ± 2.4 cm ずれていた。よって、両方のサンプルで陽子ビーム 3mm のずれに対して十分な感度を持っている事が分かった。 さらに、各検出器モジュールでのイベント数の系統誤差を 2%以内に抑える必要がある事をモンテカルロシミュレーションによって示した。同時に、系統誤差を 2%以内におさえるには、シンチレーターの検出効率が 99.5%以上であれば十分である事を示した。

続いて、系統誤差の主な要因となるバックグラウンドを定量的に評価する為、検出器ホールの壁で起こるニュートリノ反応をシミュレートした。その結果、各検出器モジュールの側面には veto カウンターが必要な事を示した。また、側面の veto カウンターによるカット後に残ってくるイベントには電磁シャワーまたは陽子のヒットによるものが主に存在し、それら全てを合わせるとシグ

ナルの 0.5%以下である事が、70% ~ 100%の統計精度で分かった。これは系統誤差からくる要求の 2%よりも十分小さい値である。さらに、精度よくバックグラウンド含有率を評価するため、電磁シャワーと陽子のヒットがそれぞれ、ニュートリノ反応で直接生成された中性パイオン、中性子によると仮定して、ニュートリノ反応による中性パイオン、中性子のみの統計量を 100 倍にした。その結果、両者ともにシグナルの 0.1%以下である事を 20% ~ 30%程度の統計誤差で示した。

最後に、T2K 実験で使用予定であるシンチレーターの波長変換ファイバー読出しのテストを行なった。まずはパイオンビームを用いて、シンチレーターの長さ方向に対して平行にファイバーを並べて読出すテスト実験を行なった。その結果、系統誤差への要求からくる 99.5%以上の平均検出効率を得るには、ファイバーの本数が 3 本必要な事を示した。また、シンチレーターの各点とファイバー間の距離を出来るだけ短くする為に、一本のファイバーを曲げてシンチレーターに埋め込み、それを読出すテストを宇宙線を用いて行なった。この時、必要なファイバーの長さは先の 3 本で読出す方法に比べて 2/3 になる。測定の結果、要求される 99.5%以上の平均検出効率が得られる事を示した。この結果から読み出しチャンネル数が少く、ファイバーの長さが短い、1 本のファイバーを曲げてシンチレーターに埋め込む方法を実機のシンチレーターに採用する。

以上から、N-Grid 検出器がニュートリノビームモニターとして十分な性能を持っており、かつ現実的な検出器である事を示すことができた。よってこの N-Grid 検出器のデザインを実機デザインとして採用する。

関連図書

[1] Y. Ashie *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], Phys. Rev. Lett. **93**, 101801 (2004) [arXiv:hep-ex/0404034].

[2] E. Aliu *et al.* [K2K Collaboration], Phys. Rev. Lett. **94**, 081802 (2005) [arXiv:hep-ex/0411038].

[3] S. Fukuda *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], Phys. Lett. B **539**, 179 (2002) [arXiv:hep-ex/0205075].

[4] S. N. Ahmed *et al.* [SNO Collaboration], Phys. Rev. Lett. **92**, 181301 (2004) [arXiv:nucl-ex/0309004].

[5] T. Araki *et al.* [KamLAND Collaboration], Phys. Rev. Lett. **94**, 081801 (2005) [arXiv:hep-ex/0406035].

[6] M. Apollonio *et al.* [CHOOZ Collaboration], Phys. Lett. B **466**, 415 (1999) [arXiv:hep-ex/9907037].

[7] E889 Collaboration Physics Design Report BNL No.52459,April,1995

[8] J-PARC Neutrino Facility Technical Design and Development (Interal) Report,May 2005

[9] 平出克樹 修士論文 J-PARC ニュートリノ振動実験のための off-axis 前置検出器の基本設計および APD 読み出し系の開発2005

[10] この N-Grid 検出器は KEK の市川温子助手のアイディアである。

[11] K2K 実験では、7.6 m×7.6 m の鉄標的とドリフトチェンバーのサンドイッチ構造の MRD(muon range detector) を用いて、ニュートリノビームのプロファイルを測定している。
T.Ishii *et al.* (K2K MRD Group), Nucl. Instrum. Meth. **A482**, 244 (2002)

[12] 信原岳 修士論文　新型光検出器 MPPC の開発 2006

[13] GEANT-Detector Description and Simulation Tool, Application Software Group, Computing and Networks Division, CERN (1993)

[14] S.Agostinelli *et al.* [GEANT4 Collaboration], Nucl. Instrum. Meth. B **506**, 250 (2003)

[15] 森田太智 修士論文 K2K 長基線ニュートリノ実験全感知型シンチレータ飛跡検出器における波長変換ファイバー読み出しシステムの性能評価 2004

謝辞

表 6.1 に本修士論文をまとめるにあたり、僕が感謝している人、その所属、そして何に対して感謝しているかを示す (もしくは何を教わったか、何でお世話になったか)。

氏名	所属	僕が感謝している事 (教わった事)	備考
西川公一郎教授	京都大学	T2K 実験に参加できた事、local meeting での指導	
中家剛助教授	京都大学	研究が行き詰まった時の適切な指導	
横山将志助手	京都大学	ビームテスト現場での実戦的な指導	
早戸良成助教授	ICRR	ニュートリノ反応シミュレーション、ビームテスト	
市川温子助手	KEK	年末の on-axis meeting	
田中秀和博士	京都大学	フェルミ研での予備実験	
長谷川雅也さん	京都大学	ビームテスト計画時における経験に基づく助言	
山本真平さん	京都大学	ソフトウェア、エレキ	
久保田淳さん	京都大学	ソフトフェア	
平出克樹さん	京都大学	fiber 抜き、ソフトウェア	
江澤孝介君	京都大学	ビームテスト	
栗本佳典君	京都大学	この論文に関係すること全て	僕
黒澤陽一君	京都大学	ビームテスト	
信原岳君	京都大学	ビームテスト	
田口誠君	京都大学	ビームテスト	
松岡広大君	京都大学	ビームテスト	

表 6.1: 謝辞