

K2K-SciBar 検出器

京都大学大学院 理学研究科

中家 剛 for K2K 実験グループ

nakaya@scphys.kyoto-u.ac.jp

2004年3月2日

1 はじめに

2003年10月K2K実験に新しい前置ニュートリノ検出器“SciBar”が導入されデータ収集を開始した。SciBar検出器は細分割されたシンチレータで構成された飛跡検出器で、ニュートリノ反応で生成される全粒子に対して高い感度を持っている。SciBar検出器により、K2Kビームのエネルギー（ $\sim 1\text{GeV}$ ）での「ニュートリノ反応」の研究が飛躍的に進展し、その結果K2K実験のニュートリノ振動に対する感度が向上すると期待されている。本稿ではSciBar検出器について詳しく紹介する。

2 K2K 実験

K2K実験の主目的は、スーパーカミオカンデの大気ニュートリノ観測で発見されたニュートリノ振動を、加速器で生成するニュートリノビームを用いて検証することである。K2K実験は、KEKでミュオンニュートリノビームを生成し、250km離れた神岡にあるスーパーカミオカンデ検出器（SK）でニュートリノを観測し、ニュートリノ振動を研究する^{1,2}。エネルギー E （GeV）のミュオンニュートリノが距離 L （km）を飛行した時の存在確率は、二世代間のニュートリノ振動の場合、

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{1.27\Delta m^2 L}{E}\right) \quad (1)$$

と表される。ここで θ が二種類のニュートリノ間の混合角、 $\Delta m^2 \equiv -\Delta m_3^2 - \Delta m_2^2$ （ eV^2 ）がその質量の二乗差である。ニュートリノ振動は、SKでの「ミュオンニュートリノ事象数の減少とそのエネルギー分布の変化」³や「電子ニュートリノ事象の出現」⁴として観測される。現在、K2Kは予想ニュートリノ事象数 $80.1_{-5.4}^{+6.2}$ に対し56事象観測とミュオンニュートリノの減少を観測した。ニュートリノエネルギーに関してK2Kでは、荷電カレント準弾性散乱を仮定しミュオンの運動量（ p_μ ）とビーム軸からの角度（ θ_μ ）を用い、

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

の関係式を使って測定する。SKでの1リングミュオン事象*を使って観測したニュートリノエネルギー分布（図1）はニュートリノ振動がある場合とよく一致している。

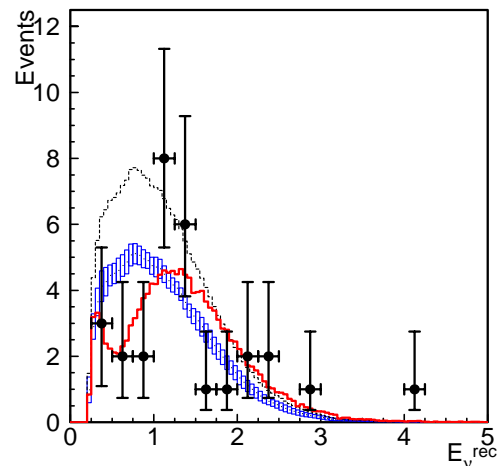


図1：スーパーカミオカンデで観測された1リングミュオン事象のエネルギー分布

点がデータでボックスエラー付きヒストグラムが振動なしの場合のシミュレーションによる予想である。シミュレーションの事象数はデータ数に規格化している。実線のヒストグラムはK2K実験で観測した振動パラメータの中心値（ $\sin^2 2\theta, \Delta m^2$ ）＝（ $1.0, 2.8 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ ）で予想されるエネルギー分布である。点線のヒストグラムは振動なしの場合に予想される事象数で規格化されたエネルギー分布である。

この結果、K2K実験はニュートリノ振動がない場合を99%以上の確率で否定し、許されるニュートリノ振動のパラメータ領域を図2の範囲で決定した。特に最大混合角（ $\sin^2 2\theta = 1.0$ ）での質量二乗差（ Δm^2 ）は（ $1.5 \sim 3.9$ ） $\times 10^{-3} \text{eV}^2$ と高精度で決定した。この値はスーパーカミオカンデの測定値とほぼ同精度で、少ない観測事象数でもニュ

* 「リング」は水チェレンコフ検出器で観測されたチェレンコフリングのことで、1リングが1粒子に対応する用語である。1リングミュオン事象とはミュオン1粒子だけが観測された事象である。

ートリノ飛行距離が決まっているため高精度で Δm^2 が決定できるという長基線加速器ニュートリノ振動実験の特徴が表れている。

今後、K2K 実験では最終的に約二倍のデータを蓄積し、より精密にニュートリノ振動を研究する予定である。

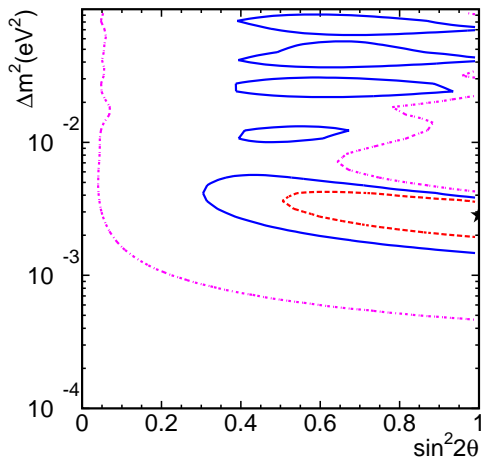


図 2: K2K 実験の測定で許容されるニュートリノ振動パラメータ ($\sin^2 2\theta, \Delta m^2$) の範囲

内側の破線が 68%、実線が 90%、点線が 99% の許容範囲である。測定された中心値 ($1.0, 2.8 \times 10^{-3} \text{eV}^2$) は右端中央の星印で示されている。

3 SciBar 検出器導入の動機

ニュートリノ振動の研究の進展から、ニュートリノ振動パラメータ Δm^2 は $(2 \sim 3) \times 10^{-3} \text{eV}^2$ と分かってきた。K2K 実験でニュートリノの振動確率が最大となるエネルギー (E) は式 (1) より $\Delta m^2 = 2.8 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ の場合 $E \sim 600 \text{MeV}$ に対応している。K2K ビームの平均エネルギーが 1.3GeV であることを考えるとニュートリノ振動は低エネルギーで起こることになり、 1GeV 以下の低エネルギーニュートリノフラックスを正確に測定することが重要となる。またニュートリノエネルギーは式 (2) の準弾性散乱の仮定を使って測定しているが、この方法では 1GeV 以上の高エネルギーニュートリノの非弾性散乱で生じるミュオン事象が低エネルギーニュートリノ事象として観測されることがある。図 1 で振動確率が最大となる 0.6GeV 付近で事象数がゼロになっていないのは、この高エネルギーニュートリノの非弾性散乱による事象が存在するためである。このためニュートリノ振動をより高精度で測定するためには、準弾性散乱以外のニュートリノ反応を観測し、ニュートリノ振動が起こっているエネルギー領域にある準弾性散乱以外のニュートリノ反応事象数を正確に見積もる必要がある。K2K 実験の前の結果では、準弾性散乱とそれ以外の反応の断面積比に 20% の不確定性を持っている。

低エネルギーニュートリノフラックスの精密測定、各種のニュートリノ反応の詳細な研究を目的に、新型のニュートリノ検出器を設置することが決まった。K2K 実験で KEK に設置されている前置ニュートリノ検出器の概略図を図 3 に示す。新型検出器は既存のシンチレーションファイバー/水標的サンドウィッチ検出器 (図 3 中央の SciFi/Water target) とミュオンレンジ検出器 (図 3 右側の Muon chamber) の間に設置された。

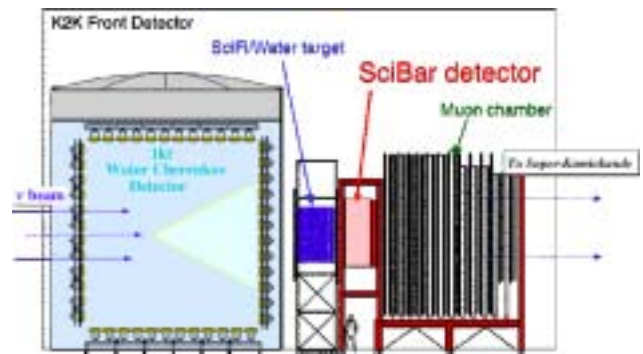


図 3: K2K-II 実験の前置ニュートリノ検出器

SciBar 検出器は SciFi 検出器とミュオン検出器の間に設置されている。ニュートリノビームは図の左側から入射される。

新型ニュートリノ検出器の特徴は、

- 低エネルギーニュートリノ荷電カレント準弾性散乱を高感度で測定するため、飛跡 10cm の陽子をトラッキングできること。
- 各種ニュートリノ反応を研究するために、検出器自身に不感領域がなく、ニュートリノ反応で生成されるすべての粒子が検出可能なこと。
- 観測された飛跡に対して、粒子識別が可能なこと。
- 新型検出器は実験後半に設置するため、一年程度の実験期間で十分なニュートリノ事象数を観測できる十分な質量を持つこと。

これらの条件を満たすため、細い棒状シンチレータを多数配置する全感知型飛跡検出器を設計した。検出器は多数の棒状シンチレータで構成されているので「SciBar (=Scintillator Bar)」検出器と名付けた。検出器の概略を図 4 に示す。SciBar 検出器は各シンチレータのヒットを使って飛跡を構成し、各シンチレータのエネルギー損失を測定することで dE/dx から粒子識別を行う。

また、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の探索には、ビーム中の電子ニュートリノフラックス (約 1%) と ν_μ 中性カレント反応による電磁シャワー事象の測定が重要となる。このため、SciBar 検出器は、下流に 11 radiation length の物質質量を持つ鉛とシンチレーションファイバーで構成されるスパゲティカロ

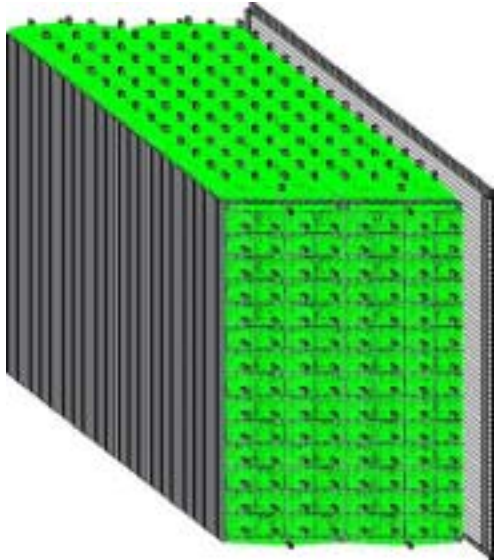


図 4 : SciBar 検出器の概略図

全体の大きさは $2.9 \times 2.9 \times 1.7\text{m}^3$ で、 $1.3 \times 2.5 \times 300\text{cm}^3$ のシンチレータ棒約 15,000 本から構成されている。各シンチレータは波長変換ファイバーを使って集光し、64 チャンネル光電子増倍管で光量を電気信号に変換する。また、SciBar 検出器下流には **Electron Catcher (=EC)** と呼ばれる 11 radiation length をもつ電磁カロリメータが設置されている。

リメータ、**Electron Catcher (=EC)**⁵ が設置されている。EC は、K2K に新しく参入したイタリア・スペイングループが CHORUS 実験に使用していた電磁カロリメータを再利用して導入した検出器である。

4 SciBar 検出器の基本性能

はじめに SciBar 検出器の構成要素を図 5 に示す。また検出器の基本パラメータを表 1 に示す。

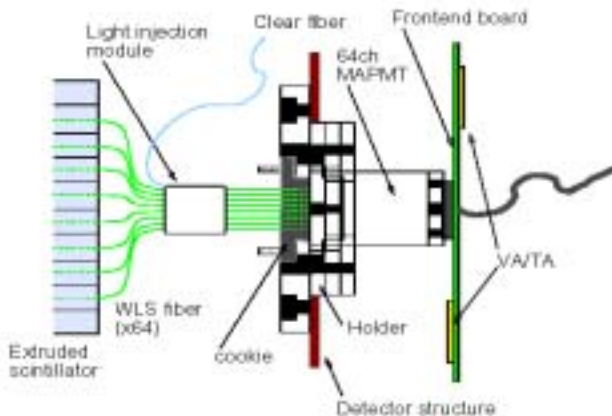


図 5 : SciBar 検出器の構成要素

左からシンチレータ、波長変換ファイバー、波長変換ファイバーを束ねているゲインモニター用 **Light Injection Module**、64 チャンネル光電子増倍管、フロントエンド電子回路。

表 1 : SciBar 検出器の基本パラメータ

大きさ (縦×横×奥行)	$2.9 \times 2.9 \times 1.7\text{m}^3$
重量	15 トン
シンチレータの大きさ	$1.3 \times 2.5 \times 300\text{cm}^3$
シンチレータ数	14,848 本 (内 14,336 本を MAPMT で読み、残り 512 本を 8 個の PMT でまとめ読み)
シンチレータ光量	16.5 光電子/cm (PMT の近く)
時間分解能	1.3nsec
エネルギー閾値	0.1MeV/シンチレータ
最大観測可能エネルギー	30MeV/シンチレータ
ノイズレベル	~3 ヒット/ビームオンタイム
ファイバー減衰長	350cm
PMT ゲイン	~ 6×10^5 @HV ~ 800V
クロストーク	~ 4%
粒子識別 (誤認率)	5% (1 GeV 以下の陽子/ π)

検出器はシンチレータ、波長変換 (WLS) ファイバー、64 チャンネル光電子増倍管 (MAPMT)、読み出し用電子回路、タイミング・トリガー制御回路、ゲインモニターから成っている。以下それぞれの各構成要素を紹介する。

4.1 SciBar 検出器全体構造

SciBar 検出器は図 4 に示すように、多数のプラスチックシンチレータ棒が重なった構造をしている。シンチレータ棒 116 本で 1 面を構成し、その大きさは厚さ 1.3cm 幅 290cm (=116×2.5cm)、高さ 300cm となる。このシンチレータ面を 2 組合わせて X 面、Y 面とし、1 モジュールができています。SciBar 検出器はこの X、Y 面をもつモジュールが計 64 個集まって構成されている。このため、全体の有感領域の大きさが縦 290cm、横 290cm、奥行き 166.4cm (=1.3×2×64) となっている。このシンチレータモジュールにそれぞれ横側と上側から波長変換ファイバーが挿入され、ファイバーはフロントエンド電子回路が装着されている MAPMT へとつながる。ここまでの全構成部品が温度管理した暗室の中に設置されている。暗室の外側には、VME クレーンを配置したラックが置かれており、読み出し用の電子回路とタイミング・トリガー制御回路が配置されている。

4.2 シンチレータ

シンチレータは米国フェルミ研究所で K2K 実験用に特別に製作したが、シンチレータの組成自身はフェルミ研 MINOS 実験で使われたものと同じである。シンチレータはポリスチレンベースで PPO と POPOP がそれぞれ 1%、0.03% 混入されている。シンチレータの大きさは 1 本当り

1.3×2.5×300cm³ で重量は約 1kg である。シンチレータは抽出手法を用いて 1 本当たり約 1 ドル (約 110 円) と低価格で製作された。SciBar 検出器デザインの初期の段階では、価格面から液体シンチレータの採用も考慮していたが、安価な固形シンチレータが入手可能となりフェルミ研に製作を依頼した。

シンチレータには 250 μ m 厚の酸化チタン (TiO₂) ベースの反射コーティングを施しており、集光性を上げている。シンチレータ中心には直径 1.8mm の穴が空いており、この穴に波長変換ファイバーを通して集光する。SciBar 検出器建設前にシンチレータのファイバー読み出し法の R&D の一環として、フェルミ研製シンチレータ、日本製シンチレータ、バイクロン、エリジェン社製液体シンチレータなど多数テストしたが、光量と価格の点からフェルミ研の抽出型シンチレータを採用した。シンチレータの光量はビームテストで SciBar で使うファイバーと PMT を用い測定され、単位長さ当たり 20 光電子/cm が観測された。これは SciBar 検出器の粒子識別性能を満たすのに十分な値である⁶。

4.3 波長変換 (WLS) ファイバー

波長変換 (WLS=Wave Length Shifting) ファイバーはクラレ社製の Y11(200)MS を採用している。Y11 ファイバーの吸収波長 430nm はシンチレータの発光波長 420nm にほぼ一致する。シンチレータ当たり十分な光量を確保するために直径 1.5mm ϕ のファイバーを使っている。光量とファイバー径はテスト実験からほぼ比例関係にあることが分かっている。ファイバーは 64 チャンネル光電子増倍管に接続するために 64 本を一まとめでファイバーバンドルとしてまとめている。このファイバーバンドルの端点を固定するために、クッキーと名付けたアクリル製の治具を用いる。計 14,336 本のファイバーを使って、224 個のファイバーバンドルが製作された。

ファイバーバンドル製作は京都大学で大学院生と学部生のアルバイトにより約三ヶ月間かけて行われた。作製されたファイバーバンドルは直ちに、ファイバーに傷が入っていないかの目視検査と LED を使った光量測定、減衰長測定を 1 本ずつについて行った。ファイバーの減衰長は SciBar 検出器のエネルギー補正に必要な値であり、実験室で全ファイバーについて約 2% の精度で測定した。これらの厳しい検査を通過したファイバーバンドルが KEK に送られ、検出器にインストールされた。図 6 に測定した計 14,336 本のファイバーの減衰長分布を示す。

ファイバーの減衰長は平均 350cm でその散らばりは、ファイバーの納品毎に系統的に変わっていることを測定から確認した。ファイバーバンドルの製作とテストに関しては文献⁷に詳しく述べられている。

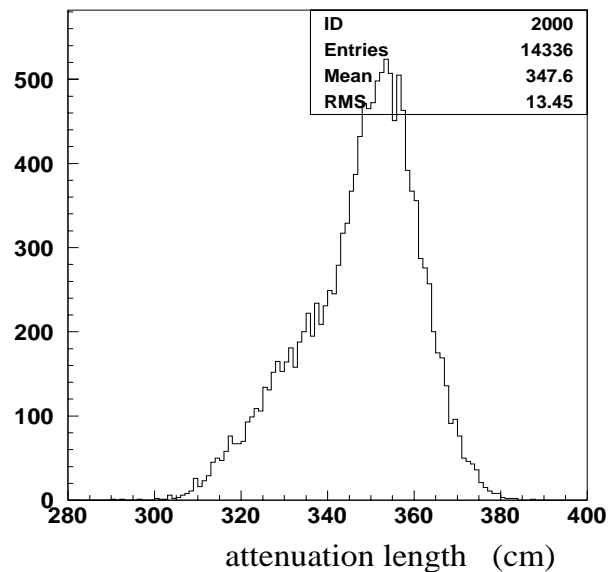


図 6 : 実験室で測定された 14,336 本のファイバーの減衰長の分布 平均は約 350cm である。

4.4 64 チャンネル光電子増倍管

SciBar は光検出器として浜松ホトニクス社製の 64 チャンネル光電子増倍管 (MAPMT: Multi Anode PMT) H8804 を使用している。H8804 は 2×2mm² に 64 分割 (8×8) された光電面を持つ。このため H8804 はコンパクトである反面、線形性とチャンネル間クロストークの問題を持つ。線形性に関しては、PMT の増幅率を $\sim 6 \times 10^5$ と低く抑え増幅器 (アンプ) を使うことで、粒子識別に必要な 200 光電子まで約 5% の線形性を保っている。光電面とファイバーを 100 μ m の精度で位置合わせすることで、チャンネル間クロストークを 4% と小さく抑えている。クロストークは親チャンネルからの補正が可能で、ある程度小さければ問題は生じない。MAPMT は、納品後ファイバーとの位置合わせを固定するために治具 (PMT フォルダー) に設置され、ファイバーとの位置合わせを 100 μ m の精度で行った。次に検出器にインストール前に以下の測定を行った。

- 1 光電子ピークの観測とゲインの測定
- 高電圧 - ゲイン (HV-Gain) 曲線の測定
- 各チャンネル間の相対ゲインの測定
- 線形性の確認

この測定をもとに、各 PMT に印加される高電圧の値を決定した。特に MAPMT は 64 チャンネルに一つの印加電圧しかないので、各チャンネルのゲインをできるだけ均一に保ち、ノイズレベルを各チャンネルに対して一定にし、エレクトロニクスのダイナミックレンジを稼ぎ、高い線形性を維持することが重要である。実験室で決定した印加電圧に対し、全 PMT の相対ゲイン分布を測定したデータを図 7 に示す。

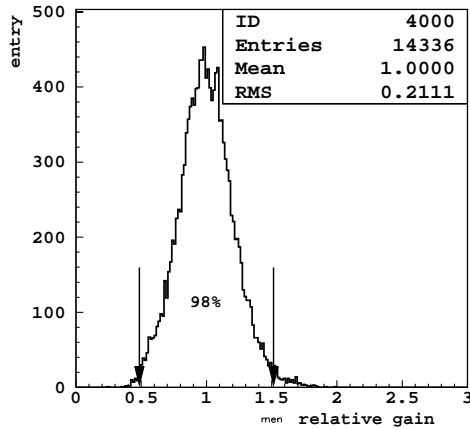


図 7: 決定された HV 値での全 PMT 14,336 チャンネルのゲイン分布

分布の幅は RMS で 21%、98% のチャンネルが相対ゲイン 0.5 ~ 1.5 の間に入っている。

図 7 より、ゲインの分布は RMS で 21% に抑えられていることが判る。典型的 PMT のゲインは 64 チャンネルの内の最小ゲインチャンネルと最大ゲインチャンネル間で 1:3 程度にばらついており、このばらつきが図 7 の分布の幅の原因となっている。後の章で紹介するニュートリノ事象のイベントディスプレイは、各 PMT のゲインが高精度で調整されているために、陽子とミュオントラックの違いが一目でわかる。SciBar 検出器に設置された MAPMT の性能とテストの詳細については文献⁸ に詳しく述べられている。

4.5 読み出し用電子回路

われわれは SciBar 検出器のために 64 チャンネル光電子増倍管 H8804 の読み出し専用電子回路を開発した。読み出し回路は、シリコンマイクロストリップ検出器の読み出しによく使われているノルウェー IDE 社製のバイキングチップを用いた。われわれの使用したバイキングチップ VA32HDR11 は 32 チャンネルの入力信号を持ち、シリコンよりもゲインが格段に高い光電子増倍管の信号を扱えるよう最大許容電荷が 10^8 電子と大きく設定されている。VA チップは各チャンネルの入力電流を積分し、一定時間後にその積分値を電圧としてホールドし電荷量を記録する。VA チップの動作の概略図を図 8 に載せる。

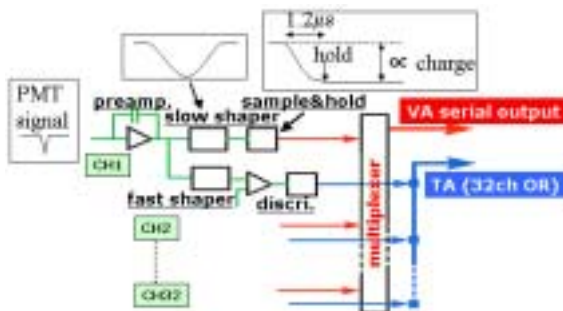


図 8: VA/TA の動作状況の概略図

入力電流は数百ナノ秒の時定数を持つ増幅器で積分され、 1.2μ 秒後にその電荷量を電圧値として保持する。その後、制御信号とクロックを使って、各チャンネルに保持された電圧を読み出すことにより、各チャンネルに記録された電荷量を計測する。2 個の VA32HDR11 を光電子増倍管に取り付ける回路に載せ、光電子増倍管からの 64 本の信号を 1 本の信号線で読み出せる仕様になっている。

電圧保持のためのタイミング信号は、IDE 社製の TA32CG チップによって生成される。TA32CG は 32 チャンネルの入力信号を速い時定数 (~70nsec) を持つ積分回路で積分し、信号がある閾値を越えた際にデジタル信号を発生するディスクリミネータの役割をする。更に TA チップ内で、32 チャンネルのディスクリミネータ出力のデジタル OR を取った信号をトリガー信号として外部に出力する。この TA の出力信号を VA のタイミング信号として用いる。

更に TA の出力を TDC で記録することで、検出器の時間情報を得ることができる。VA チップと TA チップは MAPMT に直接接続する専用電子回路 (FEB: Front-End Board) に載せられている。FEB の写真を図 9 に示す。

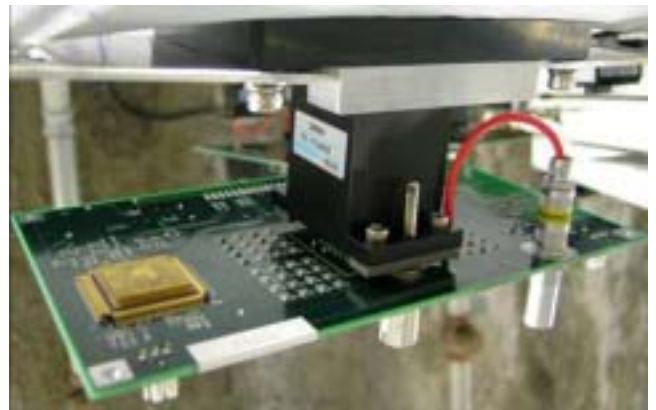


図 9: MAPMT に接続された FEB の写真

ラベルを貼った中央の箱が MAPMT で、基板上に見える大きめのチップが VA/TA を含んだパッケージである。

この VA/TA の載った FEB ボードをコントロールし、VA チップからの出力電圧を AD 変換して記録する VME9U 型の電子ボード DAQB (Data Acquisition Board) が開発された。DAQB には 8 個の FEB をコントロールできるよう、8 組の FEB、CPLD、ADC チップ群が載っている。

読み出し回路は、MAPMT からの微弱な信号を高い S/N 比で計測できるようにノイズを非常に小さく抑えている。ノイズは典型的な PMT ゲインで約 1/3 光電子程度である。ミュオンによる SciBar シンチレータの光量がファイバーの遠端で約 10 光電子なので、S/N 比は 30 が達成できている。

ADC は 12 ビット ADC を採用し、0.04MeV から 40MeV まで 0.02MeV 間隔[†]でエネルギー情報が記録できるようになっている。TA からの出力は各 PMT 当たり 2 個で、SciBar 全体で合計 448 チャンネルの時間情報がある。全 TA からの時間情報はアトラス実験で開発された AMT ボードを使い記録される。SciBar 電子回路の詳細な説明は文献^{9, 10}を参照して頂きたい。

4.6 タイミング・トリガー制御回路

SciBar 検出器では加速器からの信号をもとに、2.2 秒毎にニュートリノデータを収集する。ニュートリノデータに加えてビームサイクル間に、ペDESTALデータ、LEDデータ、宇宙線データの三種類のデータを実験中常時収集している。LEDデータは次章で述べるとして、ここでは宇宙線データを収集する際に用いるトリガーボードについて簡単に紹介する。トリガーボードは計 448 個の TA のヒット情報の内、半分の 224 個の情報を用いる。PMT 1 本はシンチレータモジュール (4.1 章参照) 8 組を読み出しているため、トリガーボードの入力はビーム軸方向に並ぶシンチレータモジュール 1 番～8 番、17 番～24 番、33 番～40 番、49 番～56 番からの時間情報である。トリガーボード上には FPGA が配置されており、上記のシンチレータモジュールに接続されている全 PMT の時間情報を個別に組み合わせ宇宙線トリガーを作ることができる。このため、様々なトリガー条件を設定し宇宙線事象を捕らえることができる。たとえば、検出器を上流から下流に完全に突き抜けた宇宙線イベント、検出器中で静止しミュオン崩壊して電子を出した事象などなどである。実験中はシンプルに上流から下流に完全に突き抜けた宇宙線事象のみをビームデータと共に収集した。

4.7 ゲインモニター

SciBar 検出器は約 15,000 チャンネルから構成されており、全シンチレータのエネルギー情報を解析に用いることから、全チャンネルの安定性をモニターすることが重要である。エネルギー較正には宇宙線を用いるが、各チャンネルを 1% の精度で較正するためには約三日間の宇宙線データが必要である。このため、三日にわたり各チャンネルのゲイン変動をモニターすることが必要となる。SciBar 検出器では、図 10 に示すように LED を光源としてその光量をフォトダイオードでモニターし、クリアーファイバーと光拡散器 (LIM = Light Injection Module) で光を全 WLS ファイバーに分配するシステムが開発された⁶。

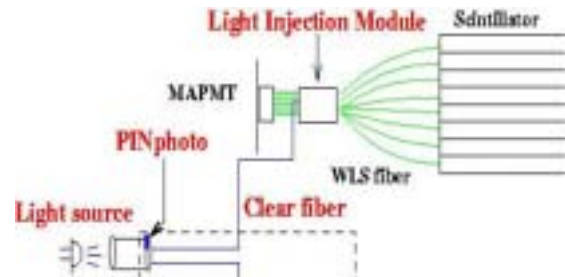


図 10 : SciBar ゲインモニター[‡]

このシステムでは全 14,336 チャンネルを計 4 個の LED でモニターできる。また LIM はデルリンと呼ばれるプラスチックファイバーよりも軟らかい物質でできており、ファイバーと触れてもファイバーに傷が付かないよう考えられている。各ファイバーにはミュオンにより生じる光量とほぼ同じ 20 光電子が分配されるように調整され、同一 PMT64 チャンネル内では 12% の均一さで光量が分配できている。ニュートリノデータ収集中はビームサイクル 2.2 秒毎のビームがない時に LED トリガーを送り、ゲインモニターのためのキャリブレーションデータを収集している。

5 SciBar 検出器建設

SciBar 検出器建設は 2000 年 12 月に行われた PS レビュー時に、K2K 実験のアップグレードとして提案され、プロジェクト開始を推奨された。そして 2002 年 12 月に最初のシンチレータモジュールを試験的に実験ホールに設置した。その際の記念写真を図 11 に載せる。



図 11 : SciBar 最初のシンチレータモジュールを搬入したときの記念写真

シンチレータモジュール表面に記された 2002 年 12 月 17 日の日付が見て取れる。

[†] ADC は 12 ビット (4,095 チャンネルまで) あるが、ADC は正負両方の信号に対応できるようにペDESTALが 2,000 チャンネル近辺にくるように設計されているので、実質 11 ビットになっている。

[‡] SciBar ゲインモニターは、開発した長谷川氏の名前に因んで HASEmoni (High Accuracy gain monitoring SystEm もしくは HASEgawa monitor) と名づけられた。

そして 2003 年 6 月 23 日から本格的に装置建設が開始した。建設期間は夏の間ビームが出ない 6 月末から 9 月末までの三ヶ月で行われた。装置建設はシンチレータモジュールを一日 2 組製作し設置するペースで、約一ヶ月間で全シンチレータを設置した。次に二週間かけて WLS ファイバーと PMT + FEB を装置に取り付ける作業が行われた。最後に二週間かけてケーブル設置、暗箱の遮光、VME モジュールの設置を行った。そして 2003 年 8 月 22 日に検出器は完成し、コミッショニングを開始した。9 月中は回路のバグ取り、不良モジュールの交換に追われ、9 月 20 日に最初の宇宙線データを観測した。そして 10 月 7 日 K2K 実験が再開されると、6 章で示すようにきれいなニュートリノ反応を観測することに成功した。

6 SciBar 検出器のニュートリノ反応観測

この章では実験開始後直ぐに SciBar で観測されたニュートリノ事象を紹介する。まず図 12 にニュートリノエネルギー測定に用いる荷電カレント準弾性散乱事象を紹介する。

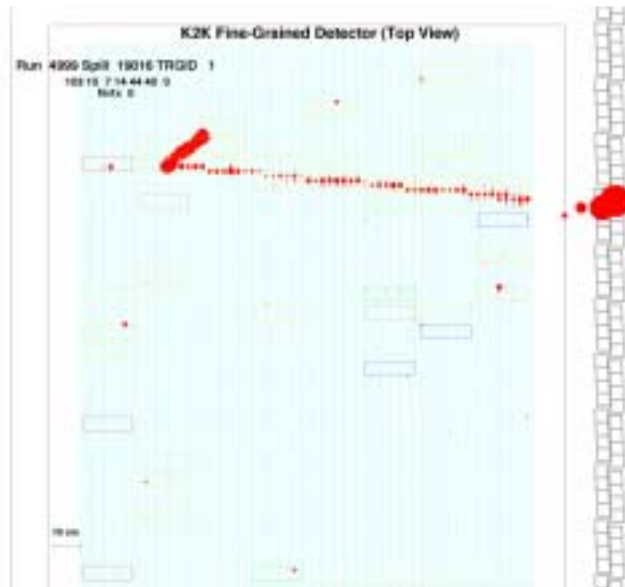


図 12: 荷電カレント準弾性散乱 $\nu + n \rightarrow \mu + p$ の事象候補

シンチレータに落ちていたエネルギーが小さい長い飛跡がミュオン、エネルギー損失の大きい短い飛跡が陽子と考えられる。

イベントディスプレイ中の赤丸はシンチレータのヒットを表しており、赤丸の大きさが観測されたエネルギーに対応している。また、イベント中に見られるボックスは TA の時間情報に対応している。ニュートリノビームが出る時間は 1.2 μ 秒であるが、TA の信号は約 50 μ 秒記録されていて、トラックに付随しない多くのノイズヒットも観測にかかる。このノイズヒットはビーム時間を限定すれば、イベント当たり約 3 ヒットと大幅に削減できる。

次の図 13 ~ 16 に様々なニュートリノ事象を示す。

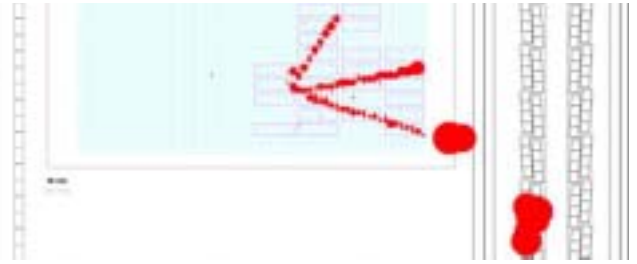


図 13: 3トラック事象の候補

ニュートリノ反応でミュオン、 π 、陽子が出ていると考えられる。代表的な反応例は荷電カレント 1π 生成反応で $\nu + p \rightarrow \mu + \pi + p$ である。

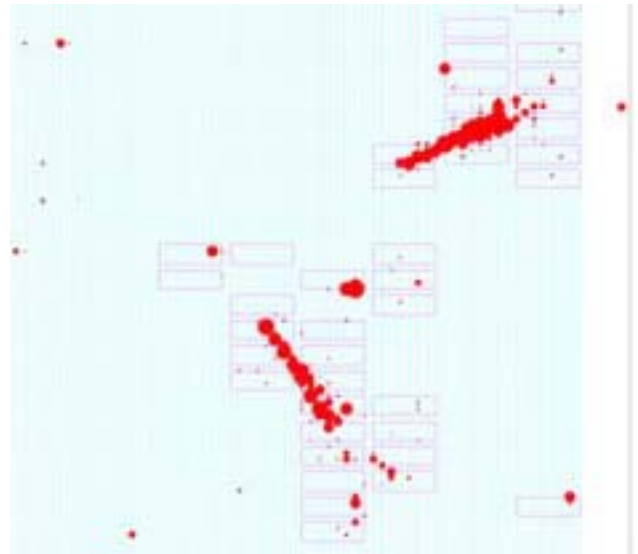


図 14: π^0 事象

$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ で両方の γ が e^+e^- に対生成したことが分かる。また π^0 の生成点付近にも微小な信号が観測されており、ニュートリノ反応バーテックスと考えられる。代表的な反応例は中性カレント π^0 生成反応で $\nu + n \rightarrow \nu + \pi^0 + n$ である。

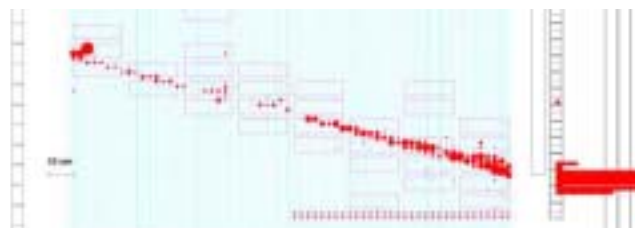


図 15: 電子ニュートリノ事象候補

長い方のトラックにシャワーの発達が見取れ、右端の EC で非常に大きなエネルギーが観測されている。バーテックス付近には陽子トラックも確認できる。代表的な反応例は電子ニュートリノの荷電カレント準弾性散乱 $\nu + n \rightarrow e + p$ である。

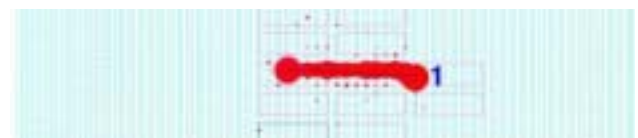


図 16: SciBar でエネルギー損失の大きな 1 トラックのみを観測した事象

中性カレント弾性散乱と考えられる。 $\nu + p \rightarrow \nu + p$ である。

以上見てきたように、SciBar 検出器で多種多様のニュートリノ反応が観測できる。2003 年 10 月 7 日から 2004 年 2 月 15 日の実験期間で、SciBar 検出器で約 30,000 事象以上のニュートリノ反応のデータが記録されていると見積もられている。ニュートリノデータの解析は現在進行中で、今回は割愛することとする。

7 宇宙線事象を使った SciBar 検出器の較正

SciBar 検出器のキャリブレーションは宇宙線事象を使って行う。ここでは、ファイバーの減衰長測定、各チャンネルのエネルギー較正、時間較正、検出器の位置調整について簡単に紹介する。これらの較正に使用する宇宙線の事象のイベントディスプレイを図 17 に示す。

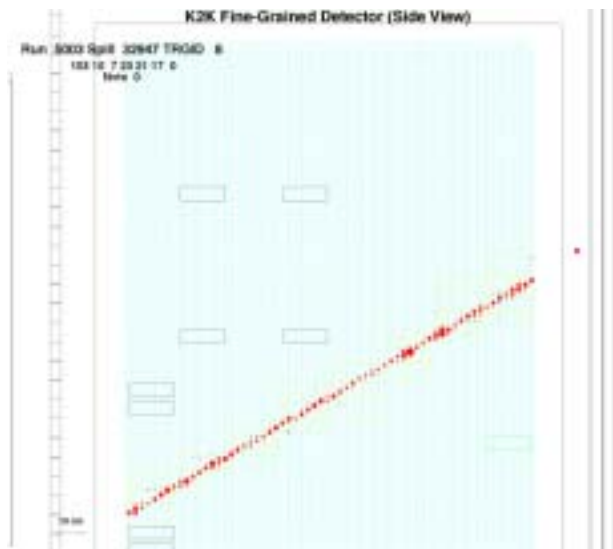


図 17: 宇宙線事象のイベントディスプレイの側面図
右上から宇宙線が入射している。

7.1 ファイバーの減衰長の測定

検出器のエネルギー応答を補正するためには、エネルギー測定位置依存性を知る必要がある。この位置依存性は主に WLS ファイバーの減衰によるが、ファイバー端の反射の影響も無視できない。検出器建設前に全 WLS ファイバーの減衰長は実験室で測定されているが、建設後もファイバーの減衰長に経年変化がないか調べるために、常時宇宙線を使ってファイバーの減衰長をモニターしていく必要がある。宇宙線を使って測定したあるシンチレータの PMT 側からの ADC (エネルギー) の距離依存性を図 18 に載せる。図 18 で測定されたファイバーの減衰長はインストール前に実験室で測定された値とよく一致していた。また、フィット曲線が対数プロットで直線にならないのは、末端での反射が原因であり、反射の効果は宇宙線データを用いて測定した。検出器インストール後全ファイバーに関して減衰長と反射の影響を測定し、エネルギーの位置補正に用いている。

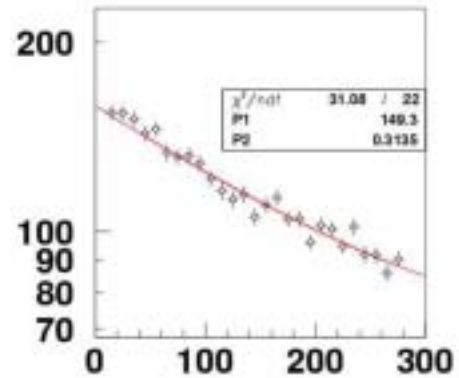


図 18: SciBar 検出器で測定した宇宙線によるエネルギー損失の場所依存性

縦軸はシンチレータ中の通過距離を補正した後の ADC カウントで、横軸は反応点から PMT までの光の WLS ファイバー中の伝播距離である。

7.2 エネルギー較正

SciBar 検出器のエネルギー較正は宇宙線ミュオンがシンチレータに落とすエネルギーを測定することで行う。このため、宇宙線ミュオンのトラックをもとに、ファイバーの減衰長による位置依存性、各シンチレータ中の通過距離、そして各 PMT チャンネルのゲイン補正を行う。PMT の絶対ゲインは 1 光電子測定で測った値を HV-Gain 曲線で印加電圧まで外挿することで求まる。これらの補正をした後のシンチレータで観測した典型的な宇宙線によるエネルギー分布を図 19 に載せる。

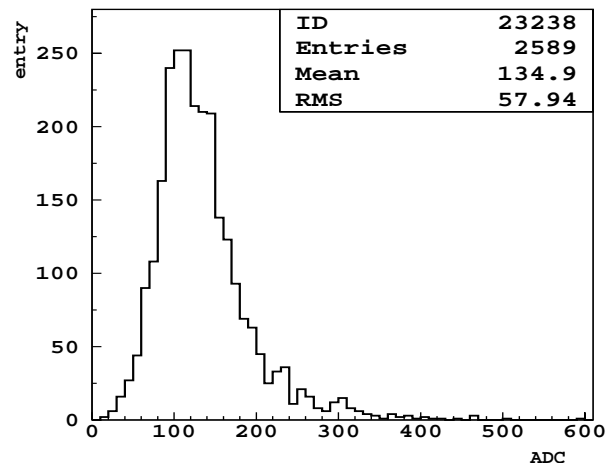


図 19: シンチレータ 1 本当たりの宇宙線によるエネルギー損失の ADC 分布

分布はランダウ分布型をしており、平均で 135ADC/cm のエネルギーが観測されている。ここで 1 光電子が約 7ADC カウントに対応しているので、このシンチレータの平均光量は約 20 光電子になる。同様の解析を全シンチレータについて行い、すべてのシンチレータの平均光量を求めた。その結果を図 20 に示す。

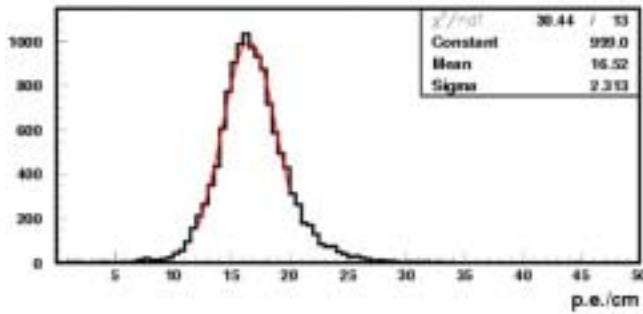


図 20 : 全シンチレータの平均光量分布

図 20 より SciBar のシンチレータの光量は宇宙線ミュオンに対して平均で 16.5 光電子/cm と測定された。宇宙線ミュオンの平均エネルギー損失が 2.1MeV/cm より、SciBar シンチレータの光量は 7.9 光電子/MeV となる。この光量はデザイン値通りであり、 dE/dx による粒子識別に必要なスペックを満たしている。

図 20 でシンチレータ当たりの光量が RMS = 2.3 光電子/cm とばらついているが、これは個々のシンチレータの光量が違うのではなく、ファイバーと PMT のガラス面との接触のためにばらついていると考えられている。実験では、図 20 の光量を基に各シンチレータのエネルギー損失を 2.1MeV/cm と設定するようにエネルギー較正を行う。

7.3 時間較正

SciBar 検出器はエレクトロニクスの関係から PMT 当たり 2 個、32 チャンネルをまとめた時間情報を持っている。宇宙線を使い、TQ (時間 - 電荷) 補正、ファイバー中の光の伝播速度の補正を行い、最近接チャンネルで時間分布の差を測定した。結果、SciBar 検出器の時間分解能は TA 1 チャンネル当たり 1.34nsec と測定された。SciBar 検出器ではこの時間情報を使い、ニュートリノ以外のバックグラウンドの識別や、トラックの進行方向の同定を行う。

7.4 検出器の位置調整

宇宙線を使ったキャリブレーションのもう一つ重要な点は検出器の位置調整である。SciBar 検出器は 64 個のシンチレータモジュール (4.1 章参照) から構成されている。検出器設置時に各モジュールは数 mm の精度で位置合わせを行っているが、その後宇宙線ミュオンの直線トラックを用いて各モジュールを $100\mu\text{m}$ の精度で位置調整 (アライメント) を行なった。また、SciBar 検出器と K2K の他の検出器 (後方ミュオンレンジ検出器) との位置調整も宇宙線ミュオンとニュートリノ反応で生成されたミュオンを用いて行った。

8 SciBar 検出器が拓く物理

SciBar 検出器は 3 章で述べたようにニュートリノ振動解析のために低エネルギー領域でのニュートリノフラックスを荷電カレント準弾性散乱を使って測定することと、スーパーカミオカンデでの 1 リングミュオン事象でのエネルギー測定で荷電カレント準弾性散乱以外の反応のバックグラウンドを正確に見積もることを主目的に建設された。しかし 6 章で見たように、SciBar は不感領域のない細分化された検出器で多種多様なニュートリノ反応を識別し、その反応の詳細な研究をすることができる。現在の 1GeV 領域のニュートリノ反応断面積のデータを図 21 に示す。図 21 より 1GeV 領域のニュートリノ反応のデータの精度はあまり高くはないことがわかる。SciBar の測定により 1GeV 領域のニュートリノ反応のデータの精度が上がり、研究が進展することを期待する。

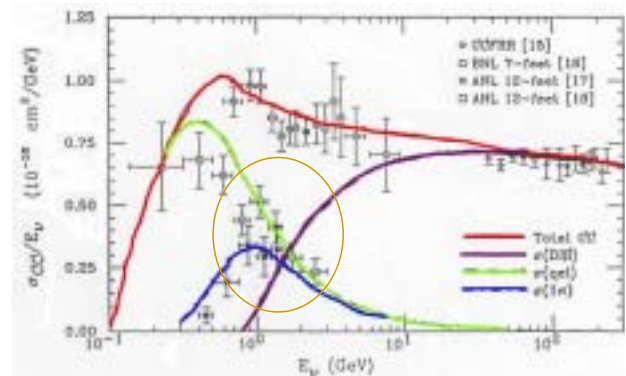


図 21 : ニュートリノ反応断面積

測定精度はエネルギーにも依るが約 20% の不定性を持っている。

SciBar を使い以下に挙げる各種ニュートリノ反応をより高精度で測定することを計画している。

- 荷電カレント準弾性散乱 $\nu + n \rightarrow \mu + p$ と、その微分断面積を記述する上でのモデルパラメータである軸ベクトル質量 (M_A) の測定
- 荷電カレント 1π 生成反応 $\nu + (n, p) \rightarrow \mu + (p, n) + \pi$ とその M_A (この反応では中間状態として Δ 共鳴を経由する)
- 荷電カレント深非弾性散乱による多重 π 生成反応 $\nu + (n, p) \rightarrow \mu + (p, n) + \pi + \pi \dots$
- 核子とのコヒーレントな荷電カレント π 生成反応 $\nu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu + {}^{12}\text{C} + \pi$
- 中性カレント弾性散乱 $\nu + p \rightarrow \nu + p$ と M_A
- 荷電カレント π^0 生成反応 $\nu + n \rightarrow \nu + n + \pi^0$ (J-PARC ニュートリノ実験で電子ニュートリノ出現探索の大きなバックグラウンドとなる)

- その他の稀な反応（例としては γ 線生成反応 $\nu + (n, p) \rightarrow \mu + (p, n) + \gamma$ やストレンジネス (K, Λ) 生成反応などなど）

以上の測定は、ニュートリノ反応のデータベースを一新するのはもちろんのこと、将来のニュートリノ実験に必要な不可欠の情報として価値が高い。このため多くのニュートリノ研究者がわれわれの結果を期待している。

電子ニュートリノのフラックスを SciBar で精密に測定して、SK での $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の探索感度を向上させることも重要な研究項目である。SciBar では約 10% 以下の精度で電子ニュートリノフラックスを測定できると考えられている。また前置検出器で短基線電子ニュートリノ出現事象 ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) の探索ができれば、LSND 実験の結果に対して制限を加えることも可能であり、今後の進展を期待する。

最後に、最近陽子スピンの寄与している可能性のある核子中のストレンジクォークのスピン寄与 Δs が、ニュートリノの荷電カレント準弾性散乱と中性カレント弾性散乱の断面積比から測定できると提案されている¹¹。この断面積比を 5% の精度で測定すれば、核子中の Δs に有意な情報を提供することができる。現在 K2K でも測定可能性の検討を開始した。

9 さいごに

SciBar 検出器は大勢の人の協力と援助により予定通り完成し、2003 年 10 月からデータ収集を開始した。SciBar は多種多様なニュートリノ反応のデータを記録しており、今後これらのデータの解析を通して新しい物理像の構築に貢献できることを期待している。SciBar はプロジェクトの立案から検出器完成まで約三年と最近の高エネルギー実験の中では比較的短期間で完成した。プロジェクトが予定通り進んだのは、実験メンバーの努力は当然のこととし、実験グループ外の多くの人々の援助によるところが大きい。

特に KEK 素核研の田井野先生には、検出器インストール中は、連日若い学生以上に精力的に検出器の組み立てをして頂いて本当に感謝しています。実験グループの一員としてグループを代表しここに感謝の意を表します。

SciBar 検出器の読み出し用電子回路開発は KEK 回路室の指導・援助の下、KEK・京大・韓国ソウル大学の共同で行われました。特に VA/TA 読み出し回路は KEK 回路室の村上様、タイミング・トリガー制御回路の開発は KEK 回路室の島崎様の多大な貢献があり、この場を借りて感謝の意を表します。

また、SciBar 検出器の建設に関して広島大学、神戸大学、京都大学、および韓国、アメリカ、スペイン、イタリアの

学部学生の多大な協力がありました。この場を借りて皆様にお礼を申し上げます。

参考文献

1. 実験の詳細は下記の K2K 実験 homepage を参照：
<http://neutrino.kek.jp/>
2. Detection of accelerator-produced neutrinos at a distance of 250 km, S. H. Ahn *et al.* (K2K Collaboration), *Phys. Lett.* **B511** (2001) 178-184.
3. Indication of Neutrino Oscillation in a 250 km Long-Baseline Experiment, M. H. Ahn *et al.* (K2K Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **90** (2003) 041801.
4. Search for Electron Neutrino Appearance in a 250 km Long-Baseline Experiment. M. H. Ahn *et al.* (K2K Collaboration), submitted to *Phys. Rev. Lett.*, hep-ex/0402017.
5. Performance of the CHORUS Lead-Scintillating Fiber Calorimeter. S. Buontempo *et al.*, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **54B** (1997) 198-203.
6. K2K 長基線ニュートリノ振動実験における全感知型飛跡検出器の基本性能の評価およびゲインモニターシステムの開発, 長谷川雅也, 京都大学修士論文(2003), <http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/paper/>
7. 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, 森田太智, 京都大学修士論文(2004), <http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/paper/>
8. 新型ニュートリノ検出器 SciBar に用いる光電子増倍管の性能評価とゲイン測定, 佐々木通, 京都大学修士論文(2004), <http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/paper/>
9. K2K 長基線ニュートリノ振動実験シンチレータトラッカーにおける読み出し用エレクトロニクスの開発, 山本真平, 京都大学修士論文(2003), <http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/paper/>
10. Development of the Readout System for the K2K SciBar Detector, M. Yoshida *et al.*, to be appeared at the proceedings of IEEE 2003 Nuclear Science Symposium.
11. Strangeness in the nucleon: neutrino-nucleon and polarized electron-nucleon scattering, W. M. Alberico *et al.*, *Phys. Rep.* **358** (2002) 227-308.