

千葉大学大学院理学研究科
修士論文

J-PARC E36 実験におけるスパイラルファイバー
トラックの性能評価

平成 27 年 8 月提出

基盤理学専攻
物理学コース

児玉 諭士

目次

序章

第1章 E36 実験の目的

- 1.1 本章の目的
- 1.2 E246 実験： $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ 崩壊における時間反転不変性の破れ
- 1.3 E06 実験：E36 実験の歴史的背景
- 1.4 E36 実験：レプトンフレーバー普遍性の破れ

第2章 E36 実験のための検出器

- 2.1 J-PARC におけるハドロン実験施設
- 2.2 E36 検出器：E246 検出器からの再利用および改良
- 2.3 E36 実験における粒子識別および運動量測定

第3章 検出器の改良および設置

- 3.1 検出器の準備および改良
- 3.2 実験エリアへの設置

第4章 スパイラルファイバートラッカー (SFT)

- 4.1 SFT の特徴と基本構造
- 4.2 ファイバーの交点位置の導出
- 4.3 SFT の実装

第5章 宇宙線による SFT の性能評価実験

- 5.1 宇宙線データを用いた SFT の較正
- 5.2 ファイバー交点への初期位相の導入
- 5.3 宇宙線データ測定
- 5.4 SFT データ解析
 - 5.4.1 SFT raw data
 - 5.4.2 MWPC とターゲットの解析
 - 5.4.3 初期位相の決定
 - 5.4.4 SFT 位置分解能

第 6 章 結論

付記

参考文献

謝辞

序章

素粒子物理学において弱い相互作用と強い相互作用、そして電磁相互作用の3つ相互作用を記述するために形作られた標準模型は、これまでに多くの素粒子物理現象を説明してきた。しかしそれは同時に、重力についての記述や暗黒物質と暗黒エネルギーの存在、バリオン数の非対称性などに対しての問題を残す結果となった。

茨城県那珂郡東海村にある大強度陽子加速器施設 (J-PARC) [4] では、TREK 実験グループが中心となってレプトン普遍性の破れを探索することを目的とした E36 実験[1]が現在行われている。E36 実験ではいくつもある K^+ の崩壊モードのうち $K^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ (Ke2) と $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ ($K\mu 2$) に崩壊する場合を選び、その2つの崩壊に対する崩壊分岐比の比 (R_K) を求める。 R_K が標準模型において計算上 e^+ と μ^+ と K^+ の質量比から精密に導き出せることに着目し、実験結果との比較を行うことで新しい物理を見出していく。

本実験で R_K を求めるにあたり、従来の実験で行われてきた K^+ を飛行中に崩壊させて放出粒子を測定するインフライト崩壊法ではなく、 K^+ をいったん減速停止させた状態で崩壊させてからの放出粒子を測定する静止 K^+ 法を採用している。J-PARC ハドロン実験施設内において、K1.1BR ビームラインより抽出してきた K^+ を標的として用意したシンチレーションファイバーターゲットに衝突させ停止させる。そして崩壊した K^+ から飛び出してくる e^+ と μ^+ を超伝導トロイダル磁石によって発生させた磁場で曲げ、トリガー段階での粒子識別を行いつつ粒子の通過位置を検出することで粒子の軌道を再構成し、運動量を導き出していく。

E36 実験で使用する検出器の多くはかつて茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で行われた E246 実験[2][3]で使用したものを再利用している。E246 実験では粒子の運動量の測定をマルチワイヤープロポーションナルチェンバー (MWPC) 3点によるトラッキング測定によって行われていた。しかし 100 分の 1 の精度での粒子識別を行えば十分だった E246 実験に対し、Ke2 は $K\mu 2$ の 4 万分の 1 程度の頻度でしか起きず、E36 実験では 1000 万分の 1 の精度で粒子識別を行う必要があった。それゆえにシリカエアロゲルカウンタ (AC) の新設や鉛ガラスチェレンコフカウンターの改良と並び、運動量の測定のためにもまた 3 点トラッキングより精度の高い 4 点トラッキングでの測定が行われることとなった。計画当初は GEM と呼ばれるトラッキング検出器を第 4 の検出器として追加する予定であったが、諸般の事情により用意できなくなってしまったため、それとは別に新たに用意したのが本研究で解説するスパイラルファイバートラッカー (SFT) である。

SFT は平たい帯状に束ねたシンチレーションファイバーを、ターゲットまわりの円筒に隙間なく 4 層巻き付けた形状をしており、上 2 層と下 2 層で左巻きと右巻きの異なる方向に

巻かれている。これは互いに交差し合いながら円筒を構成することで、実際に粒子が通過した際にその通過点を検出するためである。

SFT はシンチレーションファイバーによって作られた位置検出器として世界的に見て画期的な検出器である。これまでに使用されてきた位置検出器の中にはガス検出器、半導体検出器などが存在する。しかしそれらの検出器に比較して SFT は原材料にシンチレーションファイバーを使用することで高い位置分解能を持ちつつ極めて安価に制作が可能であり、また省スペースかつ任意の形状を取ることが出来る。

本研究では SFT の特徴および宇宙線を用いた性能評価実験を行い、そしてそれによる SFT におけるファイバーの巻き始めの初期位相の決定および SFT が持つ位置分解能について報告する。

第 1 章

E36 実験の目的

1.1 本章の目的

E36 実験は、高エネルギー加速器研究機構で行われてきた静止 K 中間子を用いた実験の流れを汲む研究である。主な研究テーマとして (1) $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$ ($K_{\mu 3}$) 時間反転不変性の破れの探索実験、(2) 弱い相互作用における Scalar や tensor などの exotic 相互作用テスト、(3) 低エネルギー QCD の研究、が挙げられる。J-PARC において更なる研究成果の飛躍が期待されるわけであり、検出器の改良を重ねることで実験の精度が向上する。その一方で、多くの実験手法や装置などは従来のやり方を踏襲していて、変わっていない部分も多くある。故に E36 を説明する上で、過去に行われた実験を参照することや E36 に至る一連の流れを理解することも必要になってくる。本章では E36 実験よりも先に実施された E246 実験(及び、E246 の upgrade 実験である E06)を引用しながら、E36 実験の物理的な背景や実験方法の概要について説明する。

1.2 E246 実験： $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$ 崩壊における時間反転不変性の破れ

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、施設内にある陽子シンクロトロンを用いて「 $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ ($K_{\mu 3}$) 時間反転不変性の破れの探索」を目的とした E246 実験を行った。時間反転不変性とは素粒子分野での運動において時間の流れを反転させたとき、反転させる前と後で粒子の振る舞いを機別することが不可能であるということである。

E246 実験はいわば E36 実験の前身的な実験と呼べ、E36 実験において使用されている検出器の多くは E246 実験にて使用されていたものを再利用している。E246 実験では E36 実験と同様に超伝導トロイダル磁石を使い、ミューオンの横偏極を精密に測定することで、そのゼロとの差異から時間反転対称性の破れを見つけようとしたのである。 K^+ 粒子が $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$ で三体崩壊するとき、ミューオンの横偏極は崩壊面に垂直な偏極成分として定義され(図 1.1)、



図 1.1 $K_{\mu 3}$ 崩壊のミュオン横偏極

$$P_T = \vec{\sigma}_\mu \cdot (\vec{p}_\pi \times \vec{p}_\mu) / |\vec{p}_\pi \times \vec{p}_\mu| \quad (1)$$

と書ける。よって P_T が 0 でない値を持つならば、時間反転不変性が破れているということを指し示している。

E246 実験では K^+ 粒子ビームを飛行中に崩壊させて生じてくる荷電粒子を測定する従来のインフライト崩壊実験法ではなく、いったん減速停止させてからの崩壊により生じてくる粒子の測定を行う静止 K^+ 方法を採用した。崩壊粒子の運動量的な全方位測定が困難であるインフライト崩壊実験法に対し、静止 K^+ 方法では崩壊粒子の全方位測定が可能であるため、Fitch 型チェレンコフカウンターによって選別された $660\text{MeV}/c$ の K^+ 粒子ビームをディグレーダーによって減速させ、トロイダル中央に設置した標的である 256 本のシンチレーションファイバーを束ねたターゲットへと衝突させる。 P_T の測定に当たって E246 実験の検出器では、超伝導トロイダル磁石が 12 回対称性を持つ 12 のセクターに分割されており、荷電粒子分析のためのトラッキング系および、 μ^+ が e^+ と $\bar{\nu}_e$ と $\bar{\nu}_\mu$ に崩壊した際における μ^+ と e^+ の相関関係から減速停止させた μ^+ より飛び出した崩壊 e^+ の右回り放出と左回り放出の強度の差から μ^+ の偏極を測定するポラリメーター、そして π^0 検出用にターゲットまわりを取り囲むように配置した 762 本の CsI(Tl) 結晶からなる光子検出器によって構成されていた(図 1.2)。

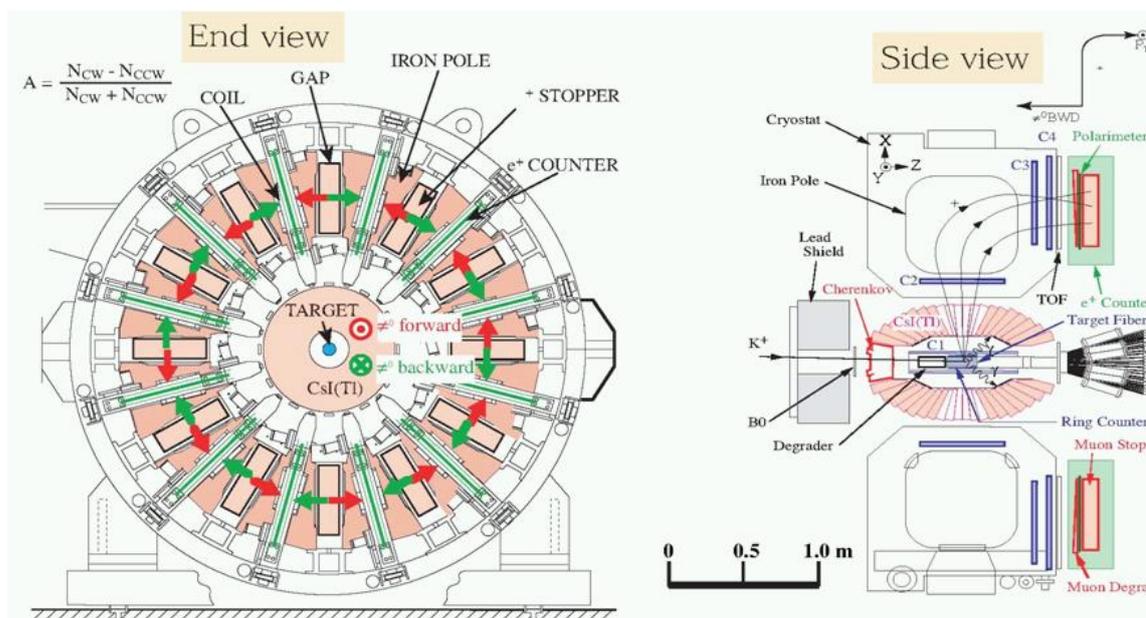


図 1.2 E246 検出器の概略図[8]

崩壊により π^0 がビーム軸方向に放出された際、 P_T の方向がポラリメーター内において右回りもしくは左回りの円周方向であることに着目し、 π^0 がビーム軸前方に飛び出した場合と後方に飛び出す場合を比較し、そこから P_T の測定を行った。

その結果として 2000 年までに測定を終了したデータ収集により E246 実験では、

$$P_T = -0.0017 \pm 0.0023(\text{stat}) \pm 0.0011(\text{syst}) \quad (2)$$

という値を得た。

これは $P_T=0$ とは矛盾しない値であり、それはすなわち E246 実験では時間反転不変性の破れを見出せなかったということを意味していた。

1.3 E06 実験 : E36 実験の歴史的背景

E246 の最終結果は実験精度が 10^{-3} であったが、更に高精度化して 10^{-4} を目指す実験として E06 が提案された。E06 はこれまで実験を行ってきた KEK ではなく、J-PARC の高強度 K^+ ビームを用いることを前提としている。実験方法は(1)静止 K^+ 方法を採用すること、(2) π^0 が前方・後方イベントを抜き出し偏極方法を反転させる、という基本方針は変わらず、実験装置に若干の変更を加えることで臨む。しかし、実際においては J-PARC での K^+ ビーム強度は初期の段階において十分に強いものでないことが分かってきた。そのため、加速器の出力が向上を待たず、本研究テーマである E36 実験を行うことにした。

1.4 E36 実験：レプトンフレーバー普遍性の破れ

E246 実験に対し、本研究のテーマである E36 実験では、 $K^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ (Ke2) と $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ ($K\mu 2$) へ崩壊する分岐比 (R_K) [5] を精密に測定し、レプトンフレーバー普遍性の破れを探索することを目的としている。フレーバーとはクォークやレプトンの種類を分類する量子数であり、量子力学上において基本的な相互作用の法則を記述する標準模型の範囲内では保存量であることが知られている。それと同時に標準模型上において質量 0 とされているニュートリノが実際は僅かながらに質量を持つことが観測されているため、それによって標準模型を拡張するとレプトンフレーバーの普遍性が破られるという示唆もされている。

本実験では、標準模型における崩壊分岐比 R_K が

$$R_K^{\text{SM}} = \frac{\Gamma(K^+ \rightarrow e^+ \nu)}{\Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu)} \quad (3)$$

$$\Gamma(K_{l2}) = g_l^2 \frac{G^2}{8\pi} f_K^2 m_K m_l^2 \left(1 - \frac{m_l^2}{m_K^2}\right)^2 \quad (4)$$

より、

$$R_K^{\text{SM}} = \frac{m_e^2}{m_\mu^2} \left(\frac{m_K^2 - m_e^2}{m_K^2 - m_\mu^2} \right) (1 + \delta_\gamma) = (2.477 \pm 0.001) \times 10^{-5} \quad (5)$$

と書けることから、 K^+ および e^+ 、 μ^+ の質量から精密に算出できることに着目し、実際に実験を通じて得られた R_K との差異を高い精度で見出すことで、標準模型とは異なる新しい物理模型を示していく。

K^+ 崩壊モードの中から Ke2 と $K\mu 2$ を選別し、測定する同様の実験はこれまでも行われてきた (図 1.3)。それらの実験では飛行中の K^+ を崩壊させ、そこから発生粒子を検出するインフライト崩壊によって測定をおこなっていたものの、その方法では理論誤差よりも実験誤差が大きくなってしまい、標準模型を確定したり覆したりするには至らない結果となった。そこで E36 実験ではこれまでの実験で行われてきたインフライト崩壊に対し、E246 実験と同様に静止 K^+ 法を採用した。これによりターゲット内の明確な発生点から放出された崩壊粒子を超伝導トロイダル磁石による磁気分析に掛けることで、軌跡の曲がり具合から運動量を測定する。また、 e^+ 、 μ^+ チャンネルの分岐比は 10^{-5} であり、粒子識別は極めて重要である。これを実現するために、飛行時間測定、エアロゲルチェレンコフ検出器、鉛ガラスチェレンコフ検出器を同時に稼働させることで高い精度での粒子識別を行う。

本実験では実験誤差 $\Delta R_K/R_K = 2.5 \times 10^{-3}$ という、これまで行われてきた実験の中で最も高い $\Delta R_K/R_K = 4.0 \times 10^{-3}$ よりも高い精度での測定を目指す。

- KLOE @ DAΦNE (in-flight decay) (2009)
 $R_K = (2.493 \pm 0.025 \pm 0.019) \times 10^{-5}$
- NA62 @ CERN-SPS (in-flight decay) (2013)
 $R_K = (2.488 \pm 0.007 \pm 0.007) \times 10^{-5}$
- World average (2013)
 $R_K = (2.488 \pm 0.009) \times 10^{-5}$, $\delta R_K/R_K=0.4\%$
 These experiments: in-flight decay

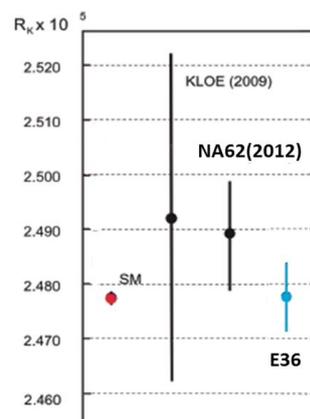


図 1.3 過去に行われてきた R_K の測定結果[6][7]

第 2 章

E36 実験のための検出器

2.1 J-PARC におけるハドロン実験施設

茨城県那珂郡東海村にある大強度陽子加速器施設 (J-PARC) は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究開発機構 (JAEA) が共同で設立した加速器およびその研究施設群である (図 2.1)。



図 2.1 大強度陽子加速器施設 (J-PARC)

J-PARC における陽子加速はおおまかに大別して線型加速器である LINAC および 3GeV シンクロトロンの RCS、そして最大 50GeV までの加速が可能である MR シンクロトロンの 3 つによって構成されている。加速の対象となる陽子は、まずフィラメントを用いたアーク放電に

より生成された水素プラズマの中から負水素イオン (H^-) を引き出し、電場の方で粒子加速を担う高周波加速空洞を直線状に並べた LINAC によって初段加速を行っていく。そしてその加速した負水素イオンビームの 400MeV に達した際、RCS の入射部に設置された荷電変換用炭素被膜を通じて負水素イオンから電子2つを分離、陽子 (H^+) に変換したビームを RCS へと送る。約 20ms の間に周長 300m のシンクロトロンを 15000 回程度周回させ、3GeV まで加速していき、エネルギーの値が 3GeV になったビームを MR へと導いていく。その後、周長 1500 の MR シンクロトロン内を約 2 秒かけて 32 万回ほど周回させ、3Gev から 50GeV まで加速させる。

E36 実験を行うハドロン実験施設では、MR シンクロトロンで加速された陽子ビームを、遅い取り出し方法を用いることで 1 次ビームとして標的に衝突させる。これにより、K 中間子や π 中間子、ハイペロン、ニュートリノ、ミューオンなどの 2 次ビームを発生させて様々な実験へと活用している。

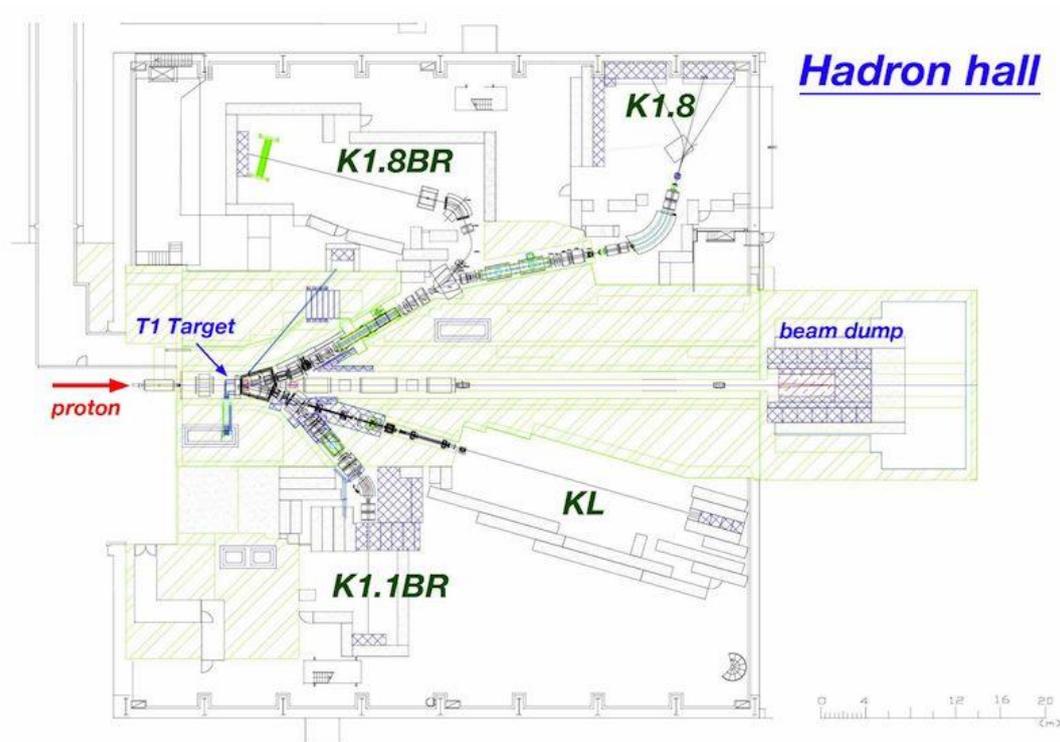


図 2.2 ハドロン実験施設

ハドロン実験施設内には現在、K1.8、K1.8BR、K1.1BR、KL の計 4 つのビームラインが存在しており (図 2.2)、本実験ではそのうちの K1.1BR ビームラインを使用している。

K1.1BR は、プロダクションターゲットで生成された K^+ 中間子を効率的に K1.1BR エリアに輸送するビームラインである。このビームラインは、D1-D3 までの Bending 磁石、Q1-Q8 の収束用 4 重極電磁石、高次項の補正のための 6 重極、8 重極電磁石、 π/K 分離用の静電

セパレータ、各種スリット(IFX、 IFY、 MS、 HFOC)によって構成される。静電セパレータは電場と磁場を同時にかけることで通過する粒子の質量を選び出す装置である(電場は600kV /8cmが印加されている)。また、全長が20.3mで、他のビームラインとはK1.8BRとは8mほど短く、輸送中に崩壊するK⁺の量を少なくなり、ビーム強度が大きくなる。更に、静電セパレータの前後の縦方向のフォーカスが存在することを挙げる事が出来る。これはKEK-PS 実験には無かった新しいアイデアで、ビームハローを第1フォーカスで切り取り、セパレータ通過後の第2フォーカスで π を除去する。 π の生成量はKの200倍程度あるので、セパレータによるK⁺を選び出すことが極めて重要であり、実験の成否にかかわる問題であるといえる。E36 実験グループは、K1.1BR エリア建設直後からビームラインの最適化を行う役割を果たしてきていて、各種電磁石やスリット幅の最適化、静電セパレータのオペレーション、実際にエリアにやってくるK⁺測定などを行った。

E36 の具体的なビーム条件であるが、ビームの運動量はD1, D2, D3によって決定され、760-800 MeV/c が使用された。K⁺の量はスパイルあたり 1.2×10^6 個(6秒サイクルで、K⁺は2秒の間K1.1BRにやってくる)、K/ π の比率は約1であった。

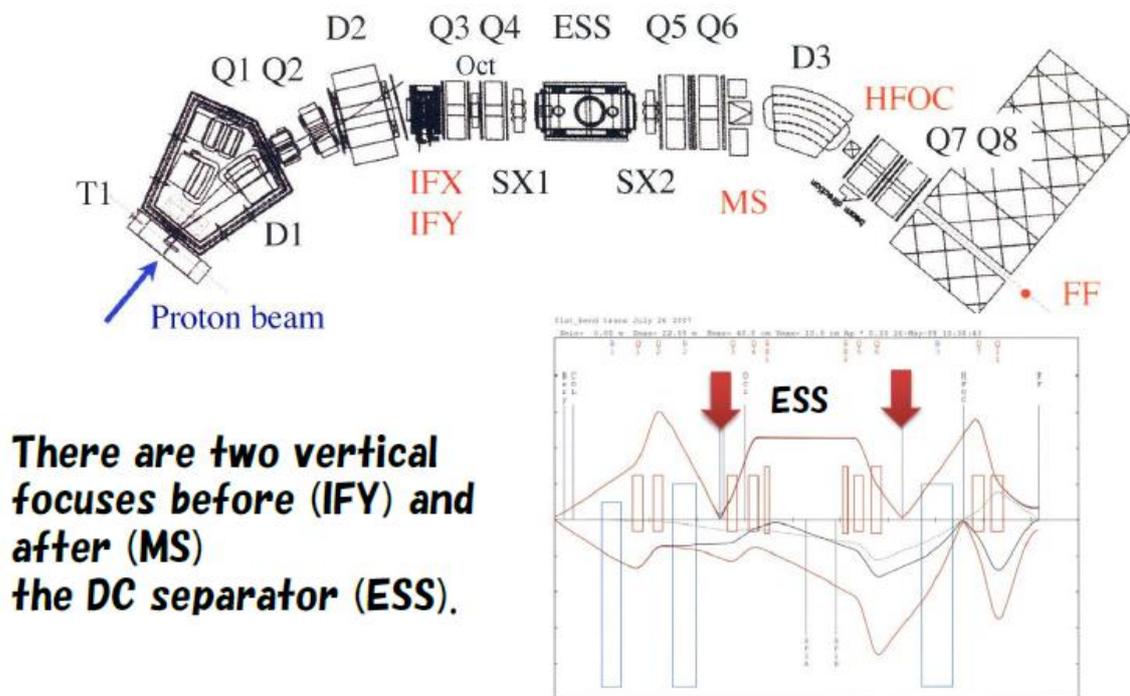


図 2.3 K1.1BR ビームライン

2.2 E36 検出器：E246 検出器からの再利用および改良

E36 検出器 (図 2.4) はハドロン実験施設内の K1.1BR エリアに設置されており(図 3.5)、

E246 検出器と同様、検出器本体中央にあるファイバーターゲットにビームラインより抽出されてきた 0.8GeV の K^+ ビームを衝突させ、減速停止後放出されてくる崩壊粒子を周囲に配置された検出器によって測定する構造となっている。

K^+ の崩壊分岐比を精度よく得るにあたり、検出器には以下の性能が求められた。

1. $K^+ \rightarrow e^+ \nu \gamma$ ($K^{IB}e2\gamma$) や $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$ ($K^{IB}\mu 2\gamma$) など、 $K\mu 2$ および $Ke2$ 以外の崩壊モードを検出し除去する。
2. 標準模型での計算結果より 4 万倍の頻度で発生する $K\mu 2$ の μ^+ に紛れた中から粒子識別によって $Ke2$ の e^+ を効率よく選び取る。

以上を満たすため、E36 検出器には数多くの検出器が用いられている。

その中には E246 実験において使われた検出器を再利用しているものも含まれている。具体的に挙げていけば、この後説明する K^+ の崩壊後に放出されてくる荷電粒子を曲げる磁場を発生するための超伝導トロイダル磁石や K^+ ビームの標的となるシンチレーションファイバーターゲットのほか、トラッキング系を担うマルチワイヤープロポーショナルチェンバー (MWPC)、ガンマ線測定のための CsI(Tl) カロリメーターなどがあり、E246 実験から引き継ぐ形で E36 検出器にも使用していく。

しかし当然のことながら、それらの検出器全てをそのままの形で再利用することはできなかった。実験目的の違いや求められる検出器の性能の違いを考慮に入れなければならない。E246 実験では K^+ より発生した $K\mu 3$ を 100 分の 1 程度の精度で粒子識別を行えば十分であったのに対し、E36 実験では $K\mu 2$ の 4 万分の 1 程度の頻度で起きる $Ke2$ をさらに 100 分の 1 の精度、すなわち 400 万分の 1 以上の精度で e^+ と μ^+ の粒子識別を行う必要があるためである。このため粒子識別の向上を目的として検出器の一部に改良を加える必要があると同時に、また新たに検出器を新設する必要が生じてきた。新設する検出器の中には、千葉大学の粒子線物理学研究室が中心となって作成したシリカエアロゲルチェレンコフカウンター (AC) をはじめ、本実験で初めて使用され、そして本修士論文にてその性能評価を論じていくこととなるスパイラルファイバートラッカー (SFT) が存在している。ターゲットを含む SFT や AC そして CsI を 1 つの容器に収め、我々はこれを便宜上セントラルディテクターと呼ぶこととしている。

本章では E36 検出器に用いられている個々の検出器についておおまかに説明し、E36 実験における粒子識別の方法および運動量測定の方法を解説していこう。

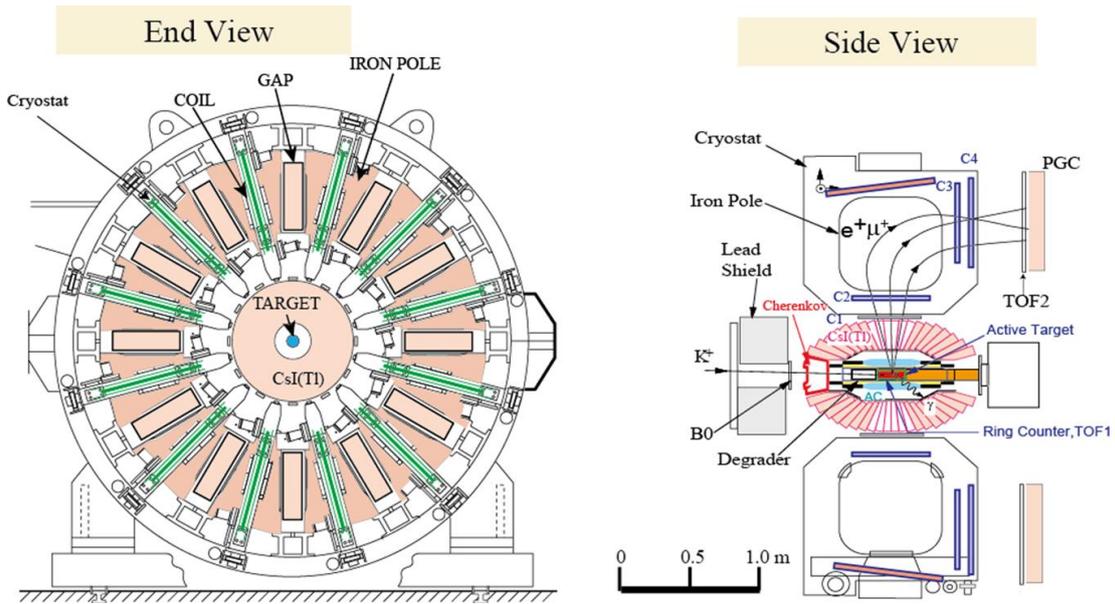


図 2.4 E36 検出器の概要正面図および側面断面図



図 2.5 K1.1BR エリアに置かれた E36 検出器

2.3 E36 実験における粒子識別および運動量測定

E36 実験において重要となるのは、静止崩壊した K^+ から放出されてくる荷電粒子を検出し、その中から Ke_2 による e^+ と $K\mu_2$ による μ^+ を明確に識別して計測を行うことである。

る。特に実際に実験を行うにあたって、トリガー段階での粒子識別は極めて重要な事柄だった。標準模型の範囲内で語るだけでも $K\mu 2$ による μ^+ の発生頻度は $Ke2$ による e^+ の発生頻度を大きく上回り、その大きさはおよそ 4 万倍に達してしまう。仮に e^+ と μ^+ を全て測定してしまった場合、有意なデータである e^+ のデータ量に比べて μ^+ のデータ量のはるかに大きく、6 秒サイクルの 1 スピルごとに 1~2 個来る e^+ のデータに対し μ^+ のデータの量は 1 スピルあたり 10^5 となってしまう。これは現行の読み出しシステムの性能を上回り、デットタイムの存在により数え落としが生じる。そのためトリガー段階での粒子識別を行うことで測定データへと入る μ^+ のデータ量の 99% を削ぎ落とし、1 スピルあたりのデータ量を 10^3 程度抑えなければならない。本実験ではその 4 万倍の多さを持つ μ^+ の中からの確に e^+ を選び出し、これを精度よく粒子識別する必要があった。

そこで本実験における粒子識別を行うにあたり、以下の 4 つの方法を組み合わせる。

1. シリカエアロゲルチェレンコフカウンター (AC) による粒子速度測定
2. 鉛ガラスチェレンコフカウンター (PGC) による電磁シャワー光量測定
3. MWPC と SFT による粒子運動量の精密測定
4. TOF による速度測定

1 と 2 はオンラインでの粒子識別、3 と 4 はオフラインでの粒子識別である。

1 つ目の AC による粒子速度測定とは、荷電粒子が物質中を通過した際、粒子がその物質の屈折率に応じた値以上の速度を持つときに光を放つチェレンコフ放射に注目し、 μ^+ よりも速度が速い e^+ を閾值的に検出する方法である。本実験では E246 実験において存在しなかった AC を新たに増設。屈折率 1.08 のシリカエアロゲルを用意し、これを用いた AC をセントラルディテクター内のターゲットの周辺、TOF1 の外側に設置した。

次に 2 つ目の PGC による電磁シャワー光量測定とは、 e^+ が PGC 内へ入射しときに発生する電子シャワーと呼ばれる現象を利用し、増大した光量を測定することで粒子識別を行う方法である。本実験ではより効率よく電磁シャワーが発生しやすいよう、PGC のビーム上流側の面にテフロン製のディグレーダーを追加する改良を施したうえで、PGC を TOF2 と共に検出器本体から 2m ほど離れたビーム下流側に設置した。

3 つ目の粒子運動量の精密測定とは、 $Ke2$ による e^+ と $K\mu 2$ による μ^+ が共に 2 体崩壊によって発生する粒子であることから、運動量がそれぞれ単色かつ大きさが異なる点に着目し (図 2.6)、両者の運動量を測定してその大きさの違いから粒子識別を行う方法である。

最後に 4 つ目は、3 より得られた粒子の飛跡距離と 2 つの TOF の時間測定の差より得

られた粒子の飛行時間から、粒子速度を算出することによって粒子識別を行う方法である。

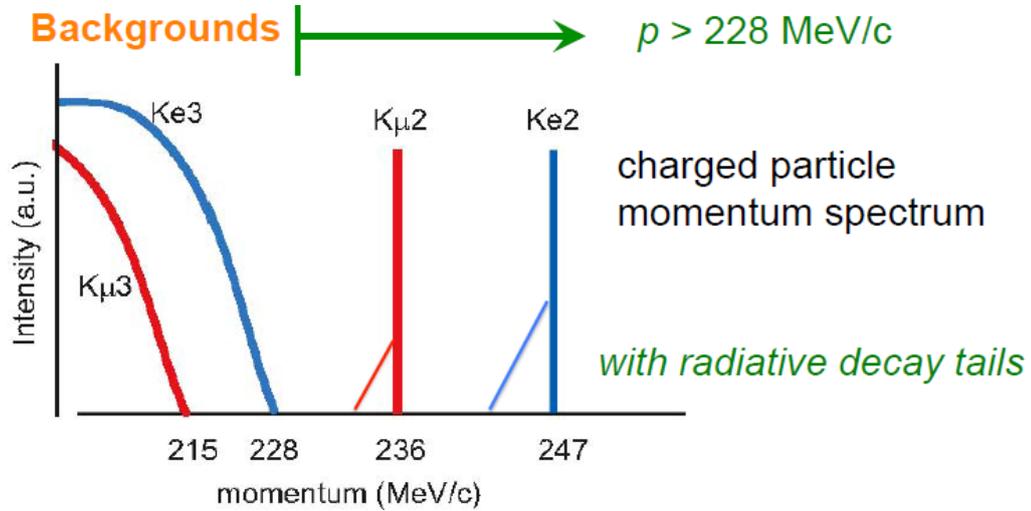


図 2.6 K^+ 崩壊モードによる e^+ と μ^+ の運動量

粒子の運動量を測定するにあたり、本実験では超伝導トロイダル磁石によって発生させた磁場によって荷電粒子の軌道を曲げ、その曲がり具合から粒子の運動量を算出する方法を採用している。それを行うための検出器としてトロイダル磁石を通過する粒子の軌道上の前後に、粒子の通過時間の測定を行う 2 つのタイムオブフライトカウンター (TOF1 および TOF2) と、E246 実験からの再利用品である 3 つの MWPC (C2, C3, C4) を配置した (図 2.7)。本実験でも E246 実験と同様に MWPC による荷電粒子の通過位置測定を行うことで粒子の飛跡を再構築し、粒子の運動量を求めていく。

しかし、E36 実験の場合では 3 か所の MWPC による測定だけでは、十分な精度での測定が困難となる事情が生じてきた。 μ^+ の平均寿命は 2.2×10^{-6} 秒であるためトロイダル磁石が発生させる磁場を通過する際、その途中一定の割合で μ^+ が e^+ と ν_e と $\bar{\nu}_\mu$ に崩壊するインフライト崩壊を引き起こしてしまうのだ。 μ^+ がインフライト崩壊してしまった場合、3 か所の位置測定のみでは、途中で折れ曲がった形の軌道を描く粒子の運動量を本来とは異なる値の運動量として検出してしまうことがある。そのため本来であれば切り捨てられるはずの μ^+ のデータを有意な e^+ のデータとして認識してしまう危険性があった。E246 実験に求められる測定精度であれば 3 か所の位置測定で十分であったが、4 万倍の大きさを持つ膨大な $K \mu 2$ の中から $Ke2$ を見出さなければならない E36 実験においては無視できない数になってしまう。それを防ぐため E36 実験では 3 点によるトラッキング検出ではなく、より精度の高い 4 点によるトラッキング検出を行うこととなった。これにより μ^+ のインフライト崩壊を e^+ のデータとして誤認識する危険性は薄まり、より高い精度での測定が可能となる。3 か所の MWPC の他に、4 番目の検出器として新たに設置したのが、本研究の中心となるスパイラ

ルファイバートラッカー (SFT) である。

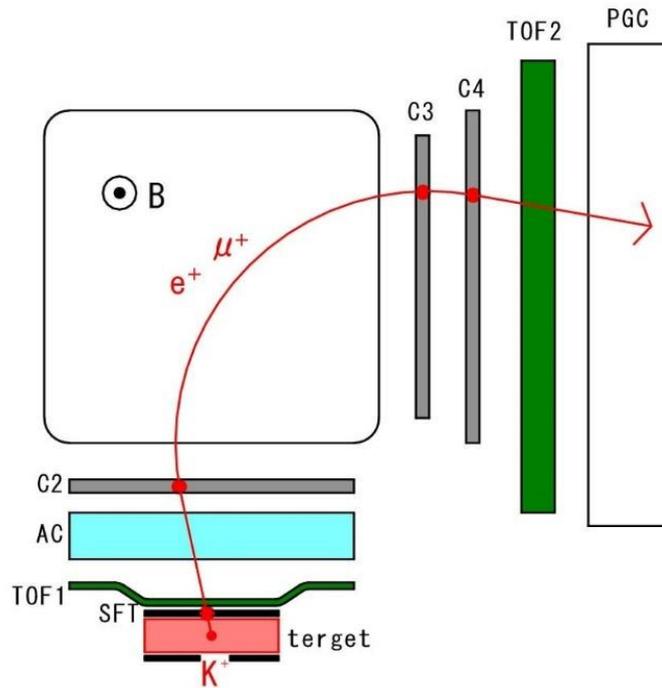


図 2.7 崩壊粒子の飛跡と検出器の概略図

また、これらの粒子識別において μ^+ を e^+ と誤認してしまうミス・アイデンティフィケーションの確率がそれぞれ、TOF による速度測定の場合では 7×10^{-4} 、AC による粒子速度測定では 3%、PGC による光量測定では 4% であることから、全体のミス・アイデンティフィケーションが 8×10^{-7} となる試算結果を得た。

3.4 E36 検出器を構成する各検出器

E36 検出器は E246 実験の時と同様に、 K^+ 粒子ビームを衝突させるシンチレーションファイバータラックを中心とした超伝導トロイダル磁石を母体としている。超伝導トロイダル磁石は非常に良い 12 回対称性を持つ 12 のセクターによって構成されており、分けられたセクターの 1 つ 1 つを Gap と呼称し、ビーム下流側から見て時計回りに Gap1、Gap2、…、Gap12 と呼んで区別した。セントラルディテクターより飛び出してきた荷電粒子は、超伝導トロイダル磁石によって Gap ごとに発生させられた最大 1.8T の磁場によって軌道を曲げられ、各検出器によって粒子識別や運動量の測定が行われていく。

ここで E36 検出器を構成する個々の検出器について解説を行う。

1. Fhich 型チェレンコフカウンター (FC)

ビームラインより入射して来たビームは運動量の等しい ($0.8\text{GeV}/c$) K^+ と π^+ が混在しているため、このままで正しい実験結果を得られなくなってしまう。FC は最初にその選別を行うための検出器であり、厚さ 40mm のアクリル材と反射板、28 個の光電子増倍管 (PMT) によって構成されている。図 2.8 の左側より入射してきた K^+ と π^+ が斜線で描かれたアクリル材を通過したときチェレンコフ放射が発生する。アクリルの屈折率は約 1.5 であることから、その発生角度が K^+ の場合は 38.3° 、 π^+ の場合は 49.2° である。アクリルと空気の境界における全反射臨界角が 41.8° であることから、 K^+ によるチェレンコフ光は全反射を起こさず通過し、 π^+ によるチェレンコフ光は全反射を起こす。そのためアクリル内で発生したチェレンコフ光は K^+ の場合と π^+ の場合でそれぞれアクリル内での経路に違いが生じる。FC はその経路の違いに着目して予めアクリル材と反射板の形状を最適化しておくことにより、 π^+ からのチェレンコフ光と K^+ からのチェレンコフ光を分断し、それぞれ π 用と K 用に用意した PMT で検出できるようにしている。FC はこれにより K^+ と π^+ の粒子識別を行い、重複度 $N > 7$ と閾値を設定して 99% 以上のトリガー効率を得た。

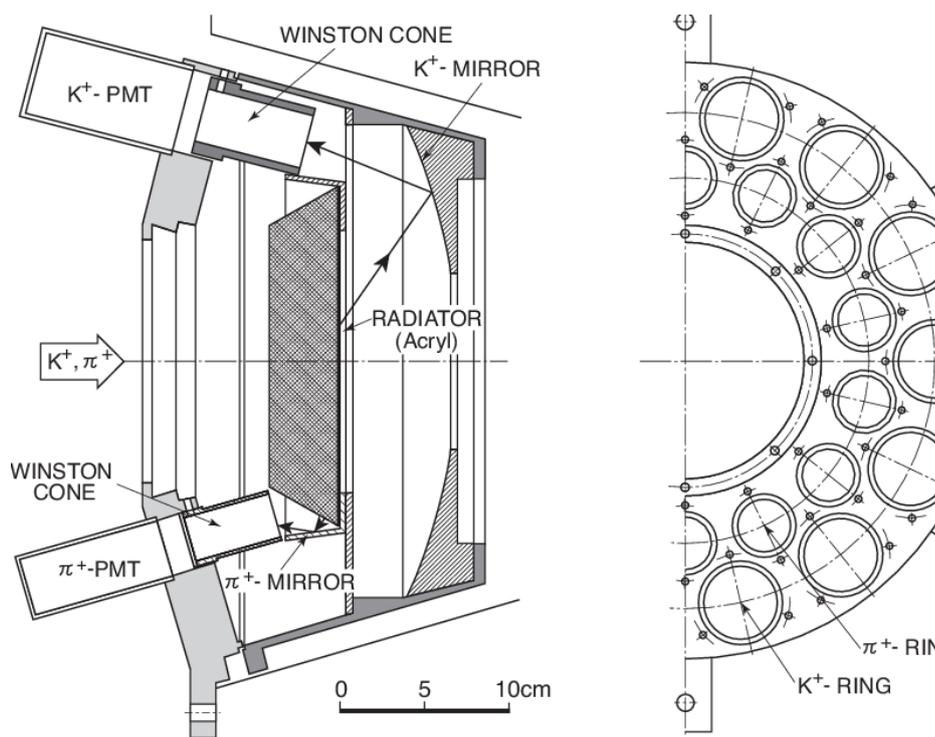


図 2.8 Fhich 型チェレンコフカウンター

2. シンチレーションファイバーターゲット

E36 実験では飛来してきた K^+ をインフライト崩壊させるのではなく、いったん減速停止させてから崩壊させる静止 K^+ 法を採用している。シンチレーションファイバーターゲットはディグレーダーによって減速した粒子を停止させる役割を担っており、なおかつターゲットのファイバー1本1本に接続された検出器によって K^+ の崩壊位置の X (水平) 方向と Y (垂直) 方向の情報を検出する機能も有している。ターゲットは直径 65mm の円柱状に束ねた 256 本の 3mm×3mm×200mm 矩形シンチレーションファイバーによって構成されており (図 2.9)、ターゲットのファイバーに接続したウェーブレングスシフティングファイバー (WLSF) で持ち出した信号を検出器下流側に設置したダークボックス (DB) 内に収めた半導体検出器の1種であるピクセレイティッドフォトンディテクター (PPD) を使用して読み出していく。

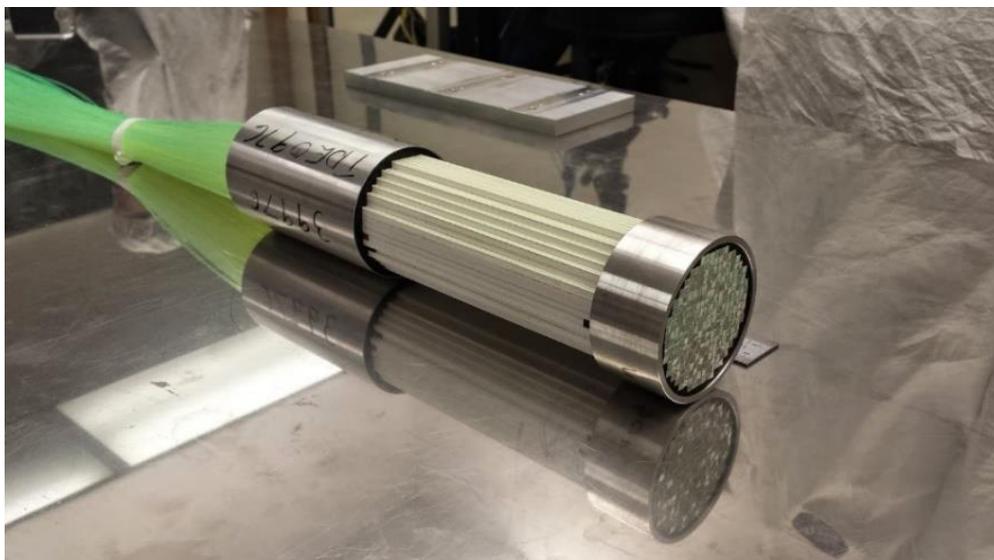


図 2.9 シンチレーションファイバーターゲット

3. スパイラルファイバートラッカー (SFT)

前述した通り、4点でのトラッキング測定を行うために新たに用意した第4の位置検出器。帯状に束ねたシンチレーションファイバーをターゲットまわりの側面に4層巻き付けた構造をしている。上2層と下2層で異なる方向に巻くことでファイバー同士を交差させ、信号を発した際にその交点を辿ることで粒子の通過位置を特定する。

高エネルギー加速器実験における位置検出器としてシンチレーションファイバーを用いた世界的に見て極めて画期的な検出器であり、詳しい構造や特徴に関しては第4章にて解説する。

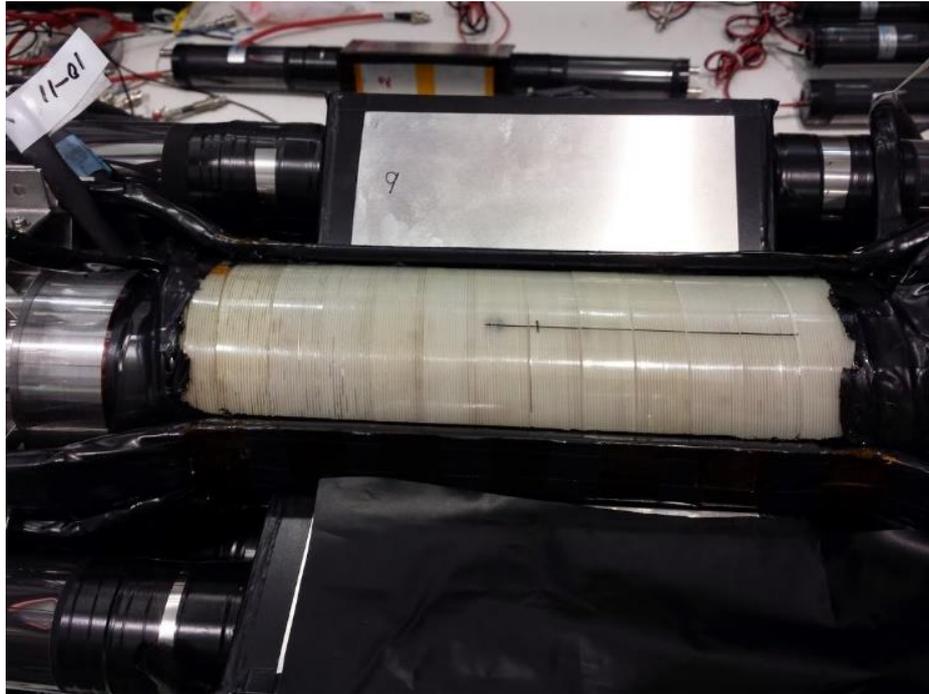


図 2.10 製作中の SFT

4. TOF (Time of Flight) カウンター

崩壊により発生した荷電粒子の通過時間を測定する検出器。本実験では Gap ごとにセントラルディテクター内に設置した TOF1 と検出器ビーム下流側の離れた位置に設置した TOF2 の 2 か所に用意した。TOF は TOF1 と TOF2 で大きさや形状は異なるが、板状のプラスチックシンチレータの両端にアクリル製のライトガイドを接続し PMT を取り付けている構造は共通している。TOF1 と TOF2 はそれぞれ荷電粒子の通過時間を測定し、その差から粒子の飛程時間を導き出す。TOF によって得られた粒子の飛程時間は SFT および MWPC により導き出された粒子の運動量と合わせることで、粒子速度と粒子質量を算出し、それにより粒子識別を行う。

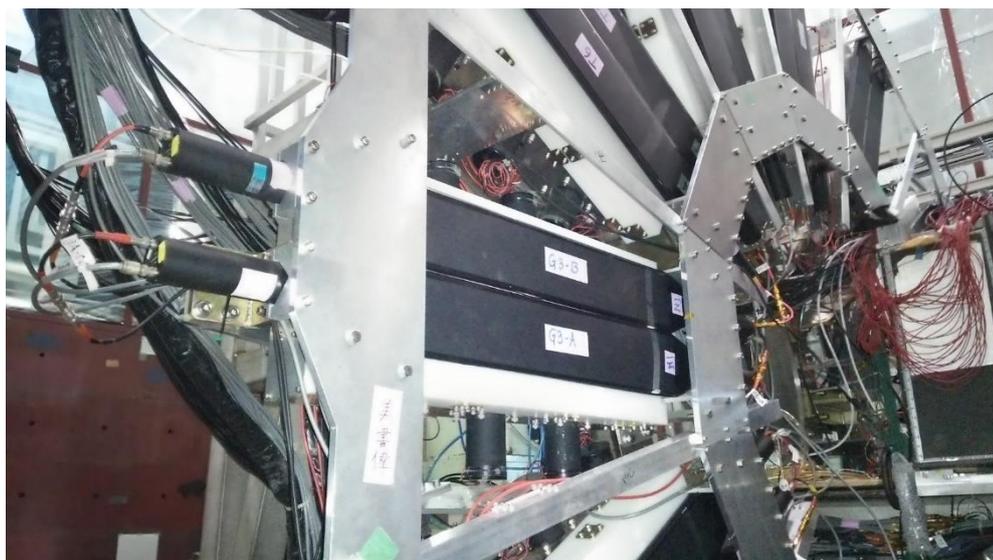


図 2.11 TOF2 カウンター

5. シリカエアロゲルチェレンコフカウンター (AC)

シリカエアロゲルは二酸化ケイ素の骨格と空気によって構成された物質であり、固体の中でも特に低い密度や断熱性、高い透明度、低い屈折率などの特性を持っている。ACはこのシリカエアロゲルの低い屈折率を持つという性質を利用し、粒子速度を閾值的に観測できるチェレンコフカウンターとして活用したものだ。本実験に使用したシリカエアロゲルの屈折率は1.08であり、これにより粒子速度が $\beta > 0.9259\dots$ の粒子（本実験の場合では e^+ ）を検出することが可能である。本実験ではACをセントラルディテクター内にあるSFTやTOF1の外側に配置し、両端にPMTを備えることで信号の読み出しを行った。

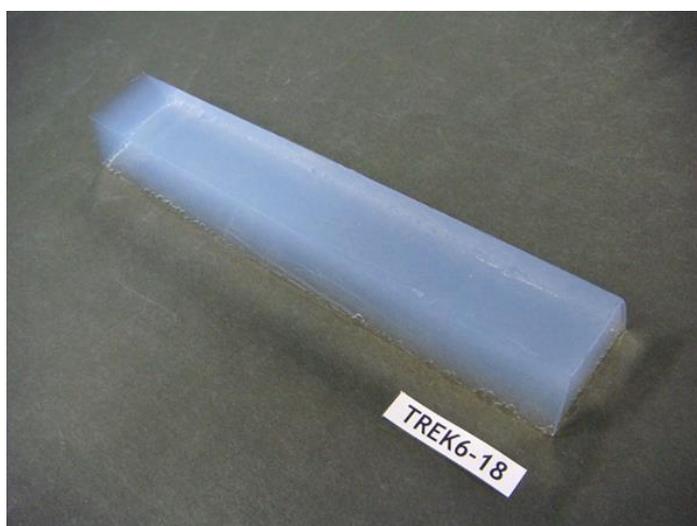


図 2.12 シリカエアロゲル

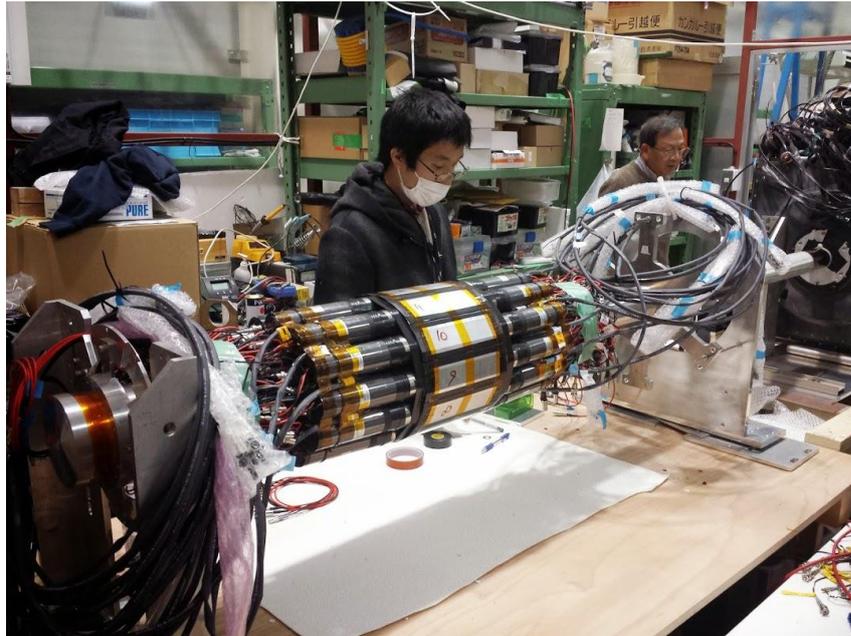


図 2.13 AC

6. CsI(Tl)カロリメーター

セントラルディテクター内に納められた計 768 個に及ぶヨウ化セシウム(CsI(Tl))結晶を使用した光子検出器。CsI 結晶に光子や電子が入射した際に電磁シャワーという現象を起こすのを利用し、その光量を電気信号に変換して読み出すことにより光子や電子のエネルギー値を測定する。本実験で使用するカロリメーターには超伝導トロイダル磁石の各 Gap に相当する方向に窓が開けられており、全体の立体角の 75%を押しえている。 $K^{IB} e2\gamma$ や $K^{IB} \mu 2\gamma$ といった崩壊モードより放出される γ 線を検出する役割を担っている。



図 2.14 CsI(Tl)カロリメーター

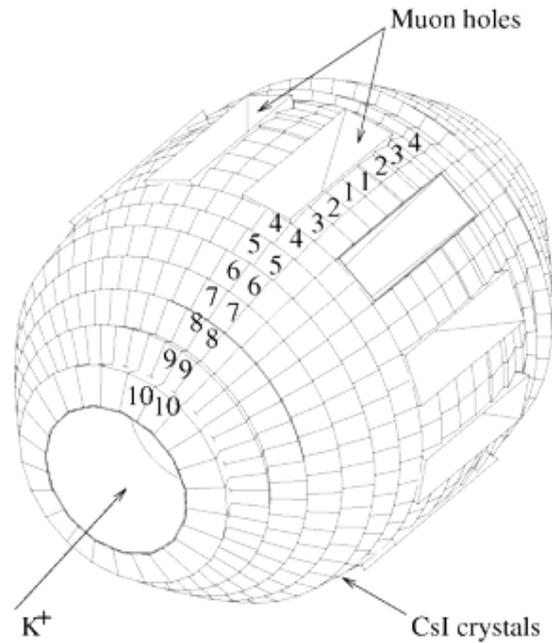


図 2.15 CsI カロリメーターの概略図

7. マルチワイヤプロポーションナルチェンバー (MWPC)

前述の SFT とともに通過粒子の通過点を検出し、磁場に対する曲がり具合から粒子の運動量を算出する。本実験で使用する MWPC はカソード読み出し式の MWPC であり、直径が $20\ \mu\text{m}$ の金メッキタングステン線を 2mm 間隔に 100 本張ったアノード面、カプトン基膜上 Cu ストライプをチェンバーの長辺方向に $9\text{mm}\times 720\text{mm}$ で 20 本と短辺方向に $9\text{mm}\times 200\text{mm}$ で 72 本にそれぞれ 1mm 間隔で張ったカソード面によって構成されている。荷電粒子が通過した際、MWPC 内部に密閉された気体が電離し、その時生ずる電子がアノードワイヤー方へ移動していく。その後ワイヤー周辺に発生している電場によって加速された電子は電子雪崩を引き起こす。このアノードでの電子雪崩の影響で誘起された電荷をカソード面で読むことで、荷電粒子がどのワイヤーの付近を通過したのかをアノードワイヤーの間隔よりも精密な位置分解能で判別することが可能である。E36 実験では MWPC 内部を満たす気体としてアルゴンとエタンを使用した。E36 実験では E246 での MWPC を踏襲し、超伝導トロイダル磁石の磁極間の入り口前に 1 か所 (C2)、磁極間出口側に 2 か所 (C3、C4) の 3 か所、全 12Gap で計 36 か所設置した。そしてより精度の良い測定を行うために 4 か所目の位置検出器である SFT を追加したほか、C3 と C4 間の固定間隔を E246 の時よりも 41.5mm 増やし、そのために必要な Al 製の金具を新たに制作した。



図 2.16 MWPC



図 2.17 MWPC 内部

8. 鉛ガラスチェレンコフカウンター (PGC)

検出器のもっとも下流側に配置された 12 枚におよぶ厚さ 100mm、屈折率 1.8~1.9 の鉛ガラスを用いたチェレンコフカウンター。 e^+ が鉛ガラスに入射した際、電磁シャワーと呼ばれる現象を引き起こして光量を増大させることを利用し、鉛ガラス内で発生した光の光量を PMT で測定することで μ^+ と e^+ を識別する。鉛ガラス本体は E246 実験のものを再利用しているが、より効率よく e^+ による電磁シャワーを測定するためにテフロン製

のディグレーダーを装着した。PGCの前にディグレーダーを通すことで、重い μ^+ の運動量が減ってPGC内でのチェレンコフ光の光量が減り、対して軽い e^+ の場合は放射光を発生して対生成を繰り返しエネルギー値は減るものの、その総数がネズミ算式に増えていくためPGCでの光量そのものに変化はない。このことを活用しより改良前よりも精度の高い粒子識別を行う。

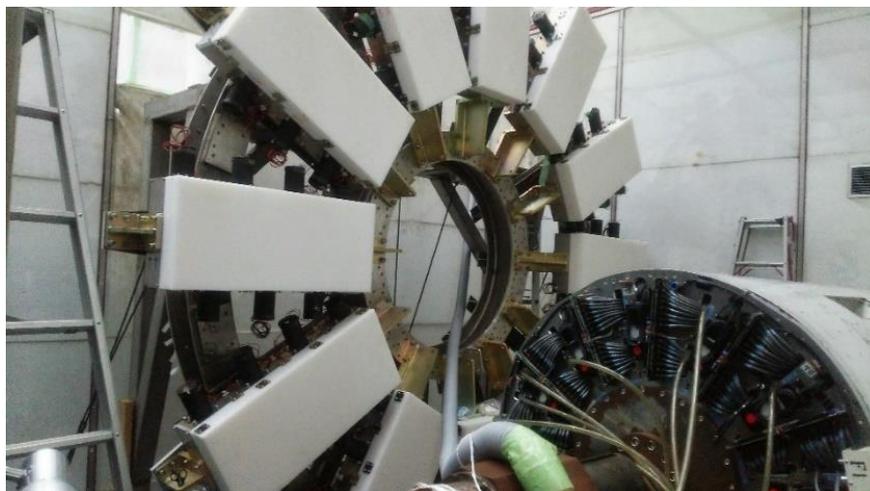


図 2.18 PGC

第 3 章

検出器の改良および設置

3.1 検出器の準備および改良

第 2 章で述べたように E36 実験で使用する検出器の多くは元々つくばの KEK で行われていた E246 実験で使用したものを再利用する方法を採用している。しかし E246 と E36 では測定対象や求められる精度に違いが生じているため、全ての検出器をそのままに再活用することはできず、既存の検出器の整備または改良等の準備作業を行わなければならなかった。またそれと同時に新たに設置する検出器の準備も並行して行う必要であり、ここではそれらについていくつか例を挙げて簡単に紹介していく。

- TOF1 および TOF2 の組み立ておよび PMT の接着

E36 実験で使用する TOF1 および TOF2 カウンターは E246 で使用していた TOF カウンターとは取り付け位置や形状が異なるため、プラスチックシンチレータおよびアクリル製ライトガイドの制作を新たに行うこととなった。

TOF1 および TOF2 は共に薄い直方体のプラスチックシンチレータの両端にアクリル製のライトガイドを通じて PMT を接続する構造は共通していて、荷電粒子が通過した際に発せられるシンチレーション光を PMT による読み出しを行っていく。

PMT とライトガイドとの接続には硬化時に無色透明で屈折率が 1.57 となるエポキシ系接着剤を用いた。今回の実験で用いる TOF1 は 12 本であり、TOF2 は 24 本である。TOF1 は全て同じ形状であるが、TOF2 は設置位置と床面の関係上、直線型と直角型の 2 種類が存在し、直線型を 18 本、直角型を 6 本用意する必要がある点に注意しなければならない。

TOF1 および TOF2 の直線型は 2 つある PMT が 3 次元的に一直線上に並ぶことに注意しつつ、接着時のガイド用にアルミ製チャンネル材を使うことで両側からゴムの伸縮による圧力をかけて固定する方法を採用した(図 3.1)。



図 3.1 接着中の TOF2(直線型)

また TOF2 の直角型の組み立てには 2 つの PMT が一直線上に並ばないためチャンネル材の使用はせず、シンチレータ部を水平に保った卓上に静置し、それに対しライトガイドおよび PMT を垂直に固定した状態で接着を行う方法を採用した(図 3. 2)。

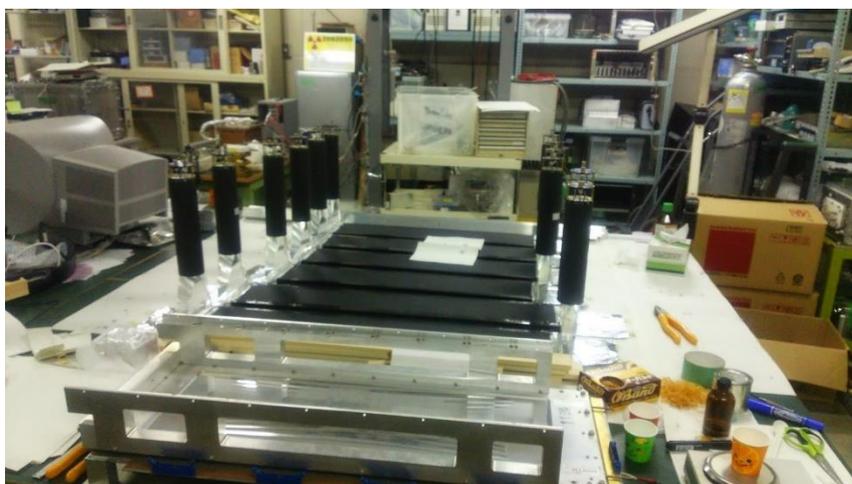


図 3.2 接着中の TOF2(直角型)

硬化後光漏れ対策のための遮光を施し、これを東海の J-PARC に運び込んで E36 検出器本体への設置を行った。

・ MWPC 固定金具

E36 実験では荷電粒子の通過位置検出を行うための MWPC を GAP ごとに存在するトロイダル磁石の磁極面の前後に計 3 か所設置しており、ターゲットに近い方から経路順に C2、C3、

C4 と呼んでいる。MWPC は E246 実験の時に準じた位置に設置したが、より粒子が通過した軌道を再構築する際の精度を少しでも上げるため、C3 および C4 の距離を E346 時と比較して 41.5mm 広げることとなった。その為に必要となるアルミ製の治具を設計し、これを元からある支柱に追加した。

3.2 実験エリアへの設置

つくばでの各検出器の準備を終えた後、実際に実験を行うためにそれらの検出器を東海村の J-PARC へと輸送し、ハドロン実験施設内にある K1.1BR エリア内の所定の位置に設置していかなければならない。

本格的に J-PARC への移設が始まったのは 2014 年 10 月の末のことである。予め精密に野書きしておいた K1.1BR エリア内に超伝導トロイダル磁石を運び込み (図 3.3)、その後冷却器やセントラルディテクター、PGC および TOF2 の設置台を周囲に配置していき (図 3.4-図 3.6)、同年の 11 月にまでに完了した。



図 3.3 エリア内に設置された超伝導トロイダル磁石



図 3.4 冷却システムの設置



図 3.5 セントラルディテクターの設置



図 3.6 PGC および TOF2 設置台の搬入

・各検出器の設置

超伝導トロイダル磁石や冷却システム、PGCおよびTOF2設置台をエリア内に設置した後、つくばで用意してきたSFT、AC、TOF1、TOF2、MWPCなどの各検出器をE36検出器本体に入れ込んでいった。

まずターゲットおよびSFT、AC、TOF1をひとまとめにした状態で予め設置されていたCsI(Tl)カロリメータ内の空間へと挿入した(図3.7)。この際、特にSFTから外部へと延びるファイバーに無理な力を掛けてしまうと容易く折れてしまうため、その取扱いには細心の注意を払わなければならなかった。

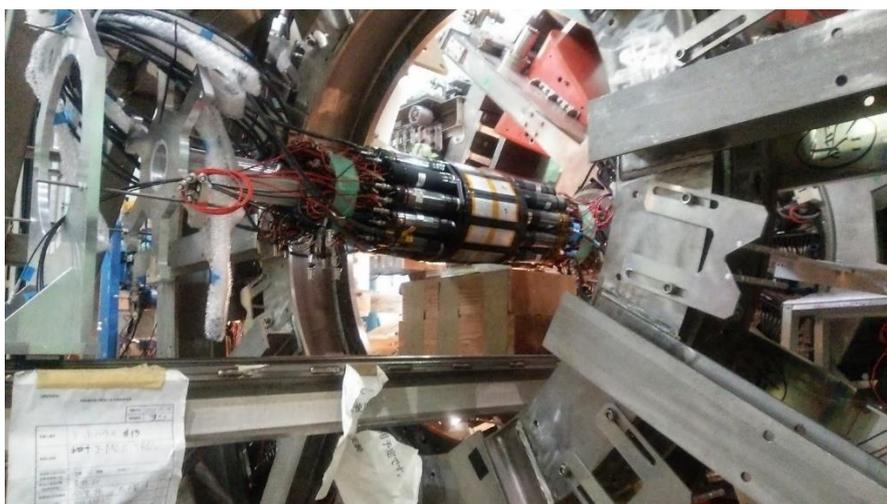


図 3.7 CsI 内に挿入されるターゲット周辺部

ターゲット周辺部の入れ込みを終えた後はTOF2およびMWPCの設置に着手した。

TOF2の設置は予め作成しておいたアルミ製の固定金具をPGCの設置台に装着し、TOF2をGaPごとに2つずつ取り付けていく(図3.8)。

それに対し位置検出を行うMWPCはその取り付け位置をある程度正確に把握する必要があったため、トロイダル磁石の磁極面や位置出し用の穴を頼りに固定ベースとなる金具を設置し(図3.9)、C2およびC3およびC4の固定をそれぞれに行った(図3.10)。

これらの検出器の設置は、2014年の12月までには基礎となる部分が全て完了した。



図 3.8 設置中の TOF2



図 3.9 トロイダル磁石に設置された C3 および C4 の固定ベース金具

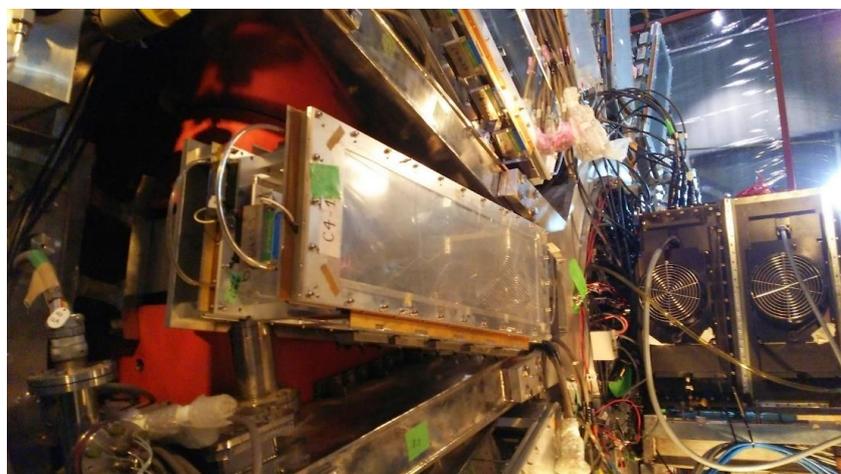


図 3.10 設置後の MWPC

・信号、HV ケーブルの設置

今回の実験に限らず粒子を測定するための検出器は基本的に信号を読み出すための信号ケーブルと検出器を作動させるための電圧をもたらす HV ケーブルが必要である。E36 実験が行われる K1.1BR エリアにおいて、検出器本体は周囲を高さ 3m に積まれたコンクリートブロックで囲まれており、各検出器の電圧の供給元となる電源や信号の読み出しを行う回路類はコンクリートブロックの壁を越えた先にあるため、検出器より引いてきたケーブルは全てエリア外へと出していく形で設置しなければならない。今回の実験で使用するケーブルの必要数は表 3.1 で示した通りである。

信号および HV ケーブルの設置は 2015 年 1 月より本格に始まり、翌月の 2 月には合計 712 本全ての設置を完了した。

	Signal cables	HV cables
MWPC	192(40pin flat)	36
TOF1/TOF2	24/48(同軸)	24/48
CsI(TL)	48(40pin flat)	
AC	24(同軸)	24
PGC	82(同軸)	82
FC	28(同軸)	28
Gap veto	12(同軸)	12

表 3.1 信号および HV ケーブルの必要数

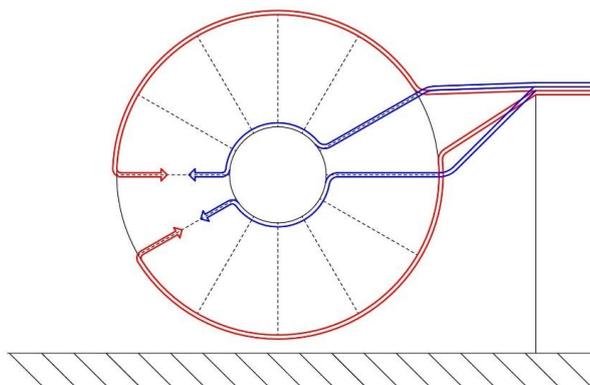


図 3.11 ケーブル設置例



図 3.12 ケーブル設置完了後の様子

• MWPC ガス供給システム

MWPC はその仕組み上、荷電粒子が通過した際に電離現象を引き起こすための気体をその内部に満たさなければならない。E36 実験では荷電粒子により電離を起こす第 1 ガスとしてアルゴンを、電離時に発生する X 線を吸収し電離化した第 1 ガスのイオンに電子を供給することで元の分子の状態に戻す第 2 ガスとしてエタンを使用し、体積比で 1:1 の割合で混合した。その際、ガスボンベより供給されてくるアルゴンとエタンを混合し、12 系統ある Gap 全てに対して均等に分配し、最後に排出を行う装置として図 3.7 で示した Distributor と呼ばれる装置を用いた(図 3.13)。



図 3.13 Distributor

MWPCにおけるガス供給システムの概要は図 3.14 で示す。Distributor で混合された気体はウレタン樹脂製のシンフレックスチューブによって実験エリア内にある MWPC (C2) へ送られ(図 3.15)、2 つある供給口に対応するため真鍮製 T ジョイントに接続する。T ジョイントと C2 の接続および C2 と C3 の接続および C3 と C4 の接続、そして再び排出側のシンフレックスチューブにつなぐための T ジョイントと C4 の接続 (図 3.16) にはポリオレフィン製のタイゴンチューブを使用した。排出用のシンフレックスチューブによって Distributor に戻ってきた混合気体は、可燃性のエタンを含むため規定によりハドロン実験施設外の大気中へと排出しなければならなかった。そのためエタンが施設内の空間に漏れることを極力注意しながら、Distributor からの排出チューブを排気システムにより伸びてきたホース内に 3m ほど入れ込んだ状態で吸引させることにより、混合気体のハドロン実験施設外への排出を行った(図 3.17)。

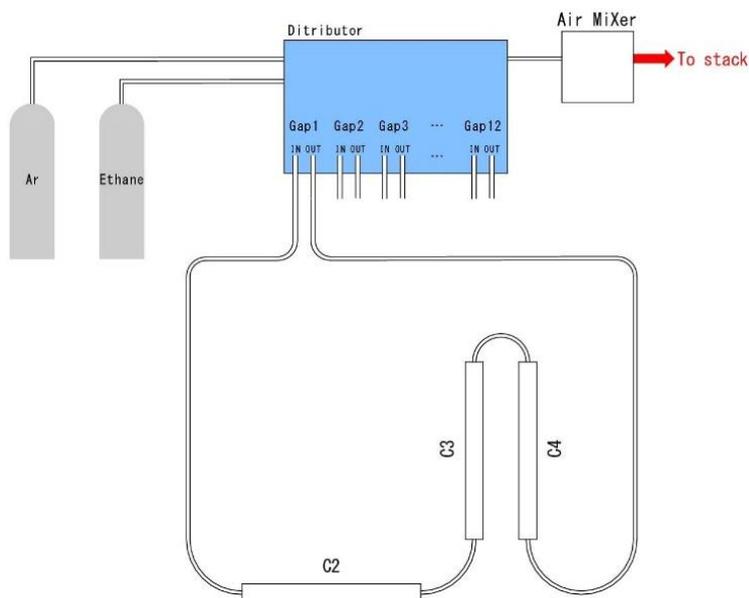


図 3.14 MWPC ガスシステム概要図



図 3.15 エリア内と Distributor をつなぐシンフレックスチューブ

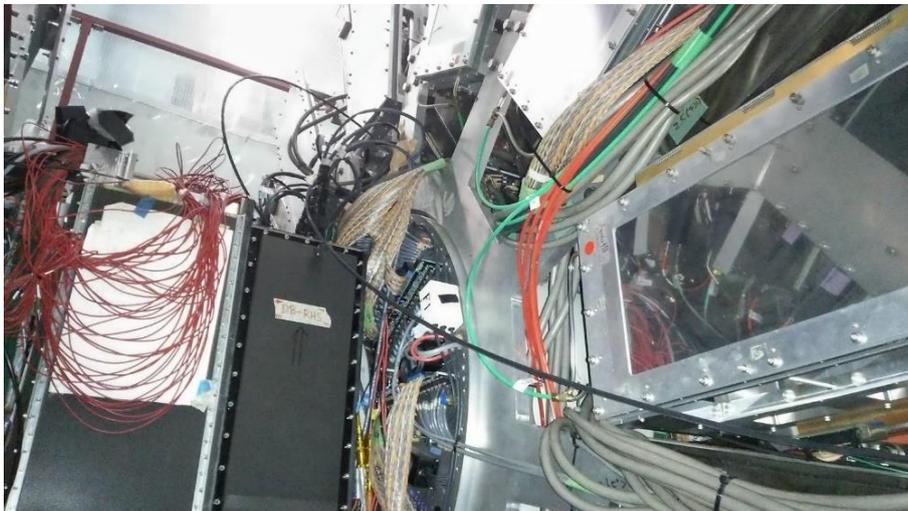


図 3.16 C4、排出側の接続



図 3.17 吸引による混合気体の排出

第4章

スパイラルファイバートラッカー (SFT)

4.1 SFTの特徴と基本構造

スパイラルファイバートラッカー (SFT) は、第2章で述べた通りシンチレーションファイバーによって作成された位置検出器である。粒子の通過位置測定を行う検出器としてシンチレーションファイバーを用いるのは世界的に見て極めて画期的なことであり、それを高エネルギー加速器実験で実際に使用するの今回の E36 実験が世界初の試みである。

これまでも MWPC をはじめとするガス検出器や半導体検出器など荷電粒子の通過位置を測定する検出器は数多く存在してきた。しかしガス検出器は触媒となる気体を密閉しなければならないためある程度の大きさの必要性や形状の制限があり、また半導体検出器は素材の価格から十分な大きさや位置分解能を得るためには高価なものとなっていた。それらと比較して SFT は、素材に安価で取り扱いやすいシンチレーションファイバーを用いているため、省スペース化や任意の形状を取ることが望め、また製作に必要な費用を非常に安くできる。だが一般的に考えて単にファイバーを直交させる形で縦に1列、横に1列と並べてしまうと、広面積での位置検出の行おうとした場合にファイバーの本数の増大を招いてしまい、それは必然的に読み出しシステムの肥大化を招いてしまう。そのため、使用するファイバーの本数や信号の読み出し方に工夫を凝らし、いかに効率よく信号を読み出せるシステムを構築できるかが重要となってくる。

本実験において SFT は、セントラルディテクター内におけるターゲットと TOF1 の間に生じていた隙間に設置された。SFT 本体の形状はターゲットに合わせて円筒形をしており、帯状に接着した直径 1mm シンチレーションファイバー (図 4.1) を隙間なく巻き付けた構造をしている。SFT のスパイラルの名は、このファイバーを巻き付けた状態に由来する。そしてこの時、ファイバーの帯を円筒に巻くにあたって帯を隙間なく巻くことによる生じる層を合計で4つ設けた。そしてさらにそのうちの下2層 (Layar1,2) と上2層 (Layar3,4) でファイバーを巻く方向が左巻きと右巻きで異なるようにした (図 4.2)。これにより下2層のファイバーと上2層のファイバーが斜めに交差する構造を生み出し、荷電粒子が SFT を貫いた際には上層と下層でそれぞれ1本以上のファイバーが信号を発する状況が生まれる。

実際の測定ではそれらのファイバーの道筋を辿ることによって多数解により複数存在する交点候補を選び出し、ターゲットと MWPC より得た X-Y 方向のトラッキング情報と照らし合わせることで荷電粒子の正確な通過位置を特定する。これが SFT の基本原理である。

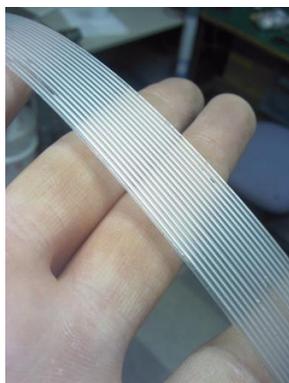


図 4.1 帯状に接着したシンチレーションファイバー

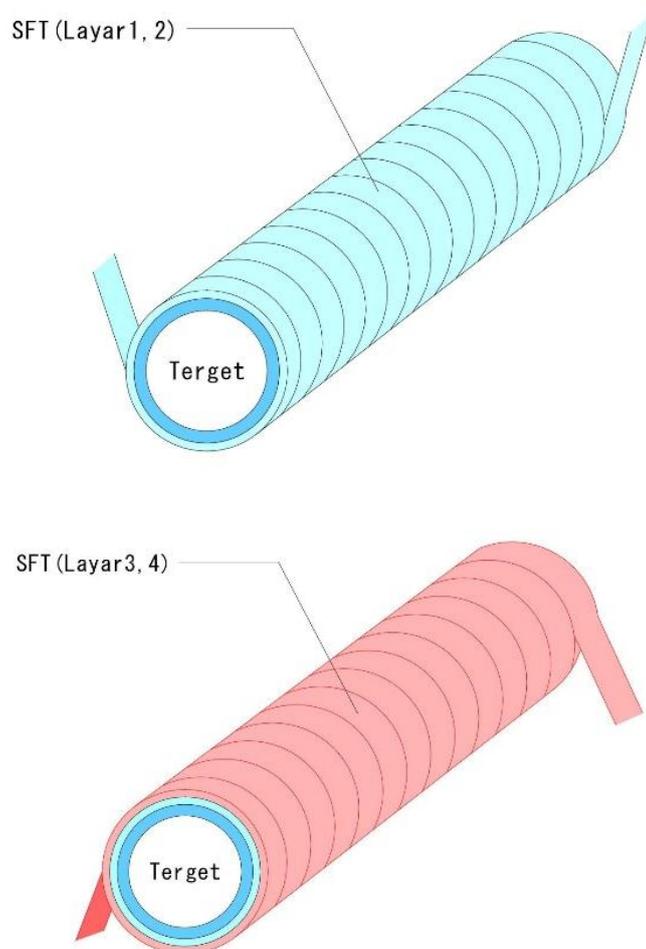


図 4.2 SFT 概略図 (上 : Layer 1, 2 下 : Layer 3, 4)

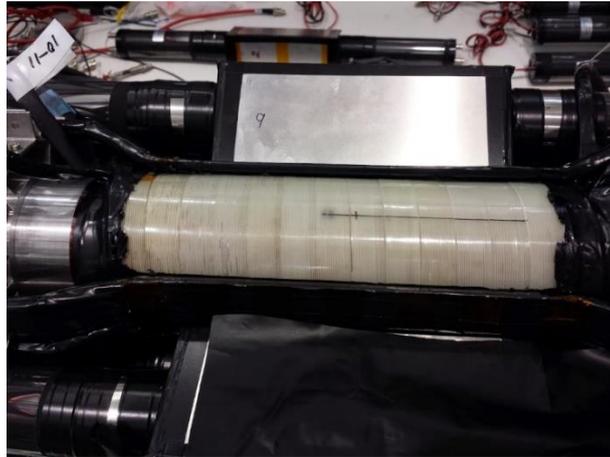


図 4.3 製作中の SFT

ファイバーを螺旋状に巻いたことによって SFT は、同じ面積で縦と横にファイバーを直交させたものと比較して Z 方向の位置分解能を落とさずに、ファイバーの本数を減らすことが可能である。単純に比較してみても 250mm×200mm の直交型検出器を作成した場合にはファイバーが 900 本必要なのに対し、直径 80mm×200mm の螺旋構造を持つ SFT の場合は 64 本だけで済んでしまう。

だが、ここで注意しなければならないのは、SFT を形作る際に下 2 層と上 2 層でファイバーの巻く方向が異なるだけでなく、帯を構成するファイバーの本数がそれぞれ異なるようにしなければならない点である。本実験で使用する SFT の場合では、ファイバーの本数が下 2 層用に 15 本、上 2 層用に 17 本の帯を用意した (表 4.1)。これは荷電粒子が SFT を通過して信号を得た時、ターゲットや MWPC から得た X-Y 方向の情報により複数個存在する交点候補を全て正しい粒子の通過点として同一視するのを防ぐための処置である。

	巻直径 (mm)	ファイバーの本数	帯幅	ステレオ角 (deg)	1 巻あたりに進む Z 方向 (mm)	基本巻き数
Layar1	80.5	15	15.75	3.57	15.8	17
Layar2	82.2	15	15.75	3.50	15.8	17
Layar3	84.5	17	17.85	3.87	17.9	14
Layar4	85.9	17	17.85	3.79	17.9	14

表 4.1 各層ごとにおけるファイバーの本数

もし仮に帯を構成するファイバーの本数が、全ての層で同一である場合と上層下層で異なる場合でどのような違いが生じるか。両方の場合に分けて比較する。

1. ファイバーの本数が全て同一の場合

上層下層全ての帯のファイバーの本数が同一である場合、上層の帯と下層の帯の中からそれぞれ1本ずつ選んだファイバーの道筋を辿っていくと、1巻ごとに生じるファイバー同士の交点が全てZ軸方向に1列に並んでしまい、これをSFTの断面から見ると交点候補が全て1点に集中して重なっていることがわかる(図5.4)。この状態ではターゲットとMWPCより得た崩壊粒子のX-Y方向のトラッキング情報と照らし合わせただけでは、一直線に並んだ交点候補の内のどれが正しい通過点であるのかを見定めることが難しくなってしまう。もしこの状態での測定を行うにはファイバー両端による“AND”読み出しを付け加えなければならぬため、システムの複雑化を招いてしまうのは明白である。

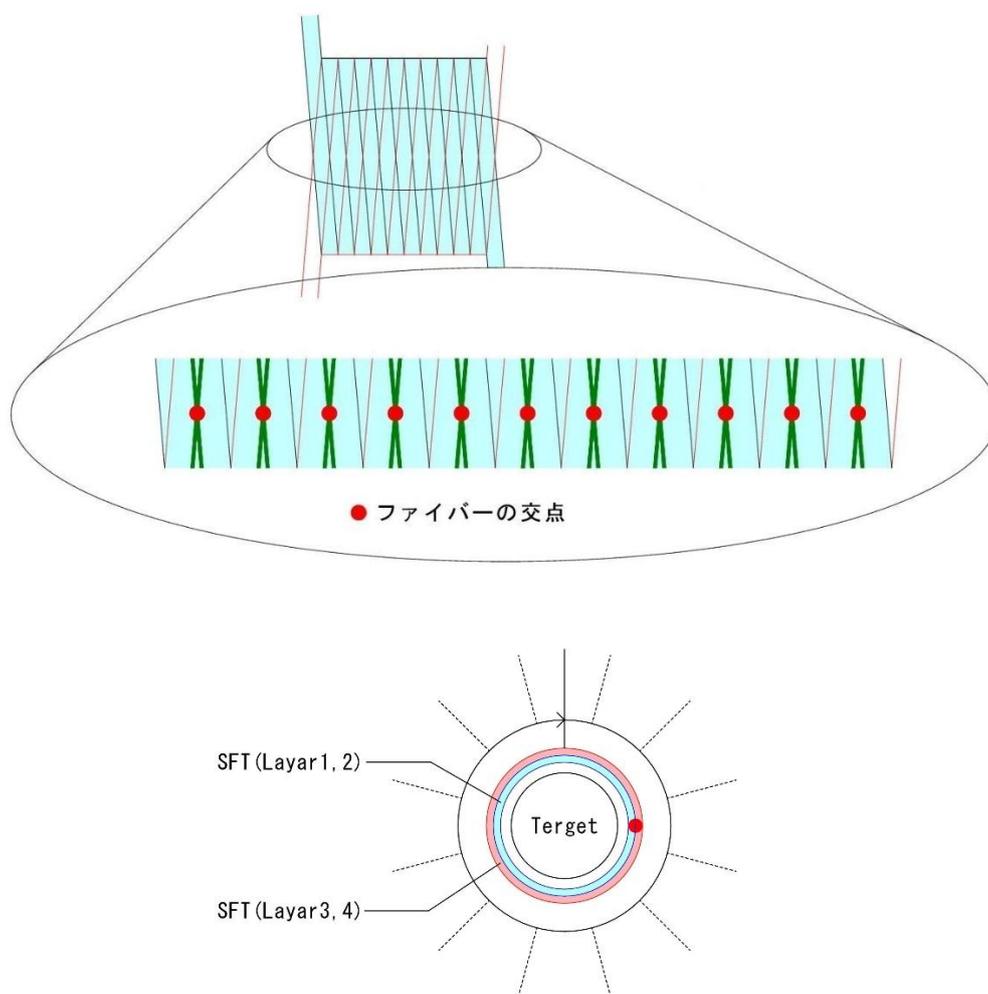


図 5.4 ファイバーの本数が同一の場合

2. ファイバーの本数が異なる場合

それに対して上層と下層でファイバー本数が異なる場合を考えると、幅が違う帯を巻くことにより1巻ごとに進む距離がそれぞれ異なる状況が生まれる。これにより上層と下層のファイバーが織りなす交点の位置がZ方向に並ばなくなり、円筒の側面に沿った方向へ約 22.5° ずれていく。これはSFTの断面から見た場合でも交点候補の位置が1点に集中せず、一定の角度を挟みながら分散していることが見て取れる(図5.5)。この状態ならばTOF1とMWPCによるX-Y方向のトラッキング情報と照らし合わせた際、交点候補の中から正しい粒子の通過点を選び出すことがファイバー両端の“OR”読み出しだけで十分となる。これは同時に、システムの複雑化を回避できるということを指し示している。

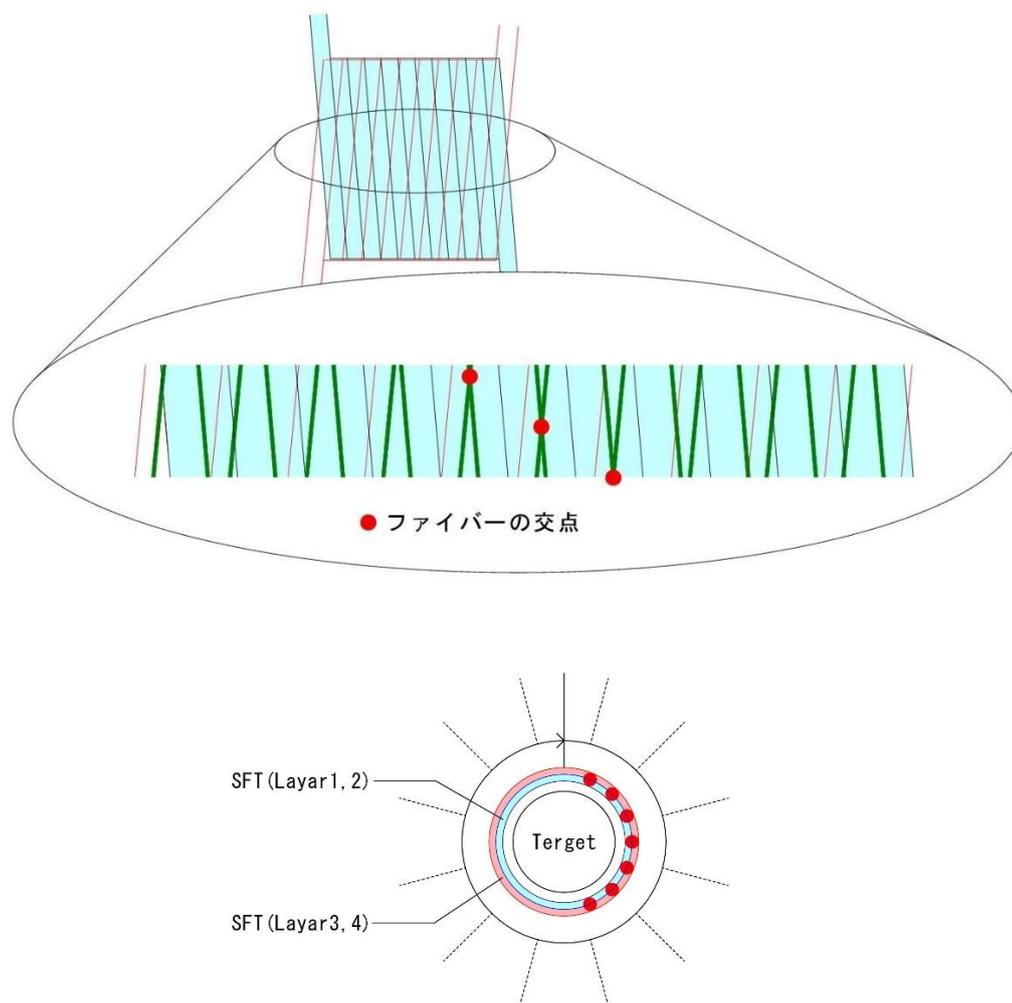


図 5.5 ファイバーの本数が異なる場合

以上の点を踏まえ、SFTを製作するにあたって上2層と下2層でファイバーの本数が異なる帯を2種類用意することとなった。

4.2 ファイバーの交点位置の導出

E36実験で使用するSFTのため、直径1mmのファイバーが15本の帯と17本の帯を用意した。この場合もし15本の内の f 番目のファイバーと17本の内の f' 番目のファイバーが信号を発したならば、粒子の通過位置の Z 軸方向の値 Z と Z' は、基準点に対する各巻き方向の角度をそれぞれ θ と θ' ($0 \leq \theta, \theta' < 2\pi$)、1巻あたりに進む Z 方向の距離を L と L' 、ファイバーの巻き数を n と n' とすると、

$$Z = (\theta + 2\pi n) \frac{L}{2\pi} + \frac{L}{15} f + \frac{L}{30} \quad (6)$$

$$Z' = (\theta' + 2\pi n') \frac{L'}{2\pi} + \frac{L'}{17} f' + \frac{L'}{34} \quad (7)$$

となる。ここで2本のファイバーの交点となる条件は、

$$Z = Z' \quad (8)$$

$$\theta + \theta' = 2\pi \quad (9)$$

であるため、ファイバーの交点での θ の値は、

$$\theta = \frac{2\pi}{L+L'} \left(\left(n' + 1 + \frac{j}{17} + \frac{1}{34} \right) L' - \left(n + \frac{i}{15} + \frac{1}{30} \right) L \right) \quad (10)$$

となる。これにより $L=15\text{mm}$ 、 $L'=17\text{mm}$ とすると、交点の θ の値はファイバー巻き数が1つ増えるごとに約 22.5° 変化していくため、ターゲットやMWPCから得られたX-Y方向のトラッキング情報と照らし合わせれば十分位置特定が可能であることがわかる。

4.3 SFT の実装

1. シンチレーションファイバー

SFT に使用するシンチレーションファイバーは、クラレ社が供給する SCSF-78MJ[10] (直径 1mm、マルチクラッド、standard-core-type) を採用した。これらのファイバーを 15 本および 17 本を帯状に接着することで各層の帯が形成される (M ライン社が製作) [14]。ファイバー 1 本の長さは約 5m となる。発生するシンチレーション光のピーク波長は 450nm である。先に述べた 4 層の帯は、アルミニウムで作られた直径 79mm (長さは約 200mm) 筒の周りに順番に巻きつけることで SFT のファイバー帯が実装された。波長 254nm でのファイバー内の減衰長は 4m 以上であることから、80mm の筒に巻きつけられた場合の光のロスは最大で約 70% と見積もられている。シンチレーションファイバーの両端には約 4m (上流) と 2m (下流) のクリアファイバーが接着され、光検出器である MPPC まで光を輸送する。

荷電粒子が直径 1mm シンチレーションファイバーを通過したとき、およそ 1800 個の光子が飛び出し、その内の 5% がファイバー内で全反射を起こして伝搬していく。ファイバーの片端からもう片端に至るまでの間に光子数が 30 程度にまで減衰し、クリアファイバーとの結合部で 40% のロスを受けた後、最終的に MPPC のある位置での光子数が 1 回の信号ごとに 20 程度であると予想される。

このことから高い位置分解能が得られる利点がありながらも最終的に光検出器が受け取る光量の強度が乏しい直径 0.2mm のシンチレーションファイバーの使用は避け、位置分解能は劣るが光量は確保できる直径 1mm のファイバーを本実験の SFT に採用した。

2. MPPC

MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) [9] は、Si-PM (Silicon Photomultiplier) と呼ばれるデバイス的一种で、ガイガーモード APD (アバランシェ・フォトダイオード) をマルチピクセル化した光子計測デバイスである。光半導体素子でありながら、優れたフォトンカウンティング能力をもち、フォトンカウンティングレベルの微弱光を検出する様々な用途に利用される。MPPC は低電圧で動作し、高い増倍率、高い検出効率、高速応答、優れた時間分解能、広い感度波長範囲といった特長があり、フォトンカウンティングにおいて必要とされる性能を高いレベルで実現している。さらに、磁場の影響を受けない、衝撃などに強い、入射光の飽和による焼き付きがないという固体素子ならではの優位性もある。E36 実験では受光面 1mm×1mm、ピクセル数が 400 の multi-pixel MPPC (S10362-11-050C, 浜松ホトニクス社) を採用した。

今回利用した MPPC は約 72V 程度のバイアス電圧によってガイガーモードで動作するため、

外部からこれらの電圧を与える必要がある。E36 実験では、KIKUSUI 電気製の PAN110[12]を利用した(図 4.6、図 4.7)。PAN110 の出力を電圧分配器で 128 本に並列に分岐させ、SFT からの光読み出し MPPC に直接電圧を供給している。また、MPPC はガイガーモードにおいて大きく電流が流れるようになるため、電流の測定も重要になる。この電流測定には Keithley 社の 2001 multimeter[13]を使用した(図 4.8)。E36 システムでは全体の電流量が 500-1000 μ A 程度流れるのが正常であり、電流値を観測しながら電圧を調整した。

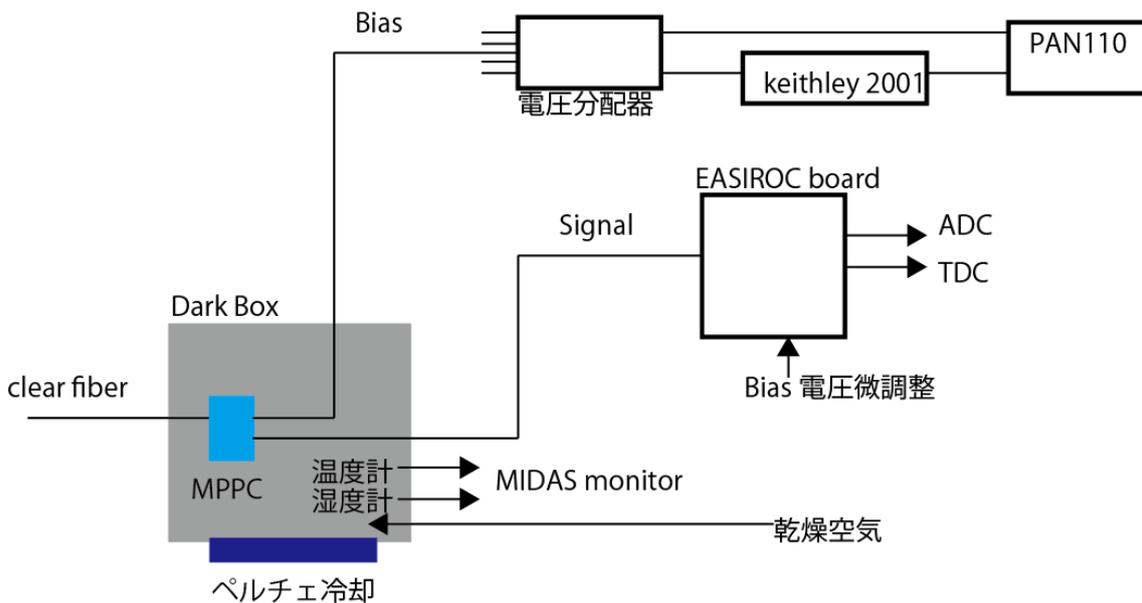


図 4.6 MPPC バイアス電圧

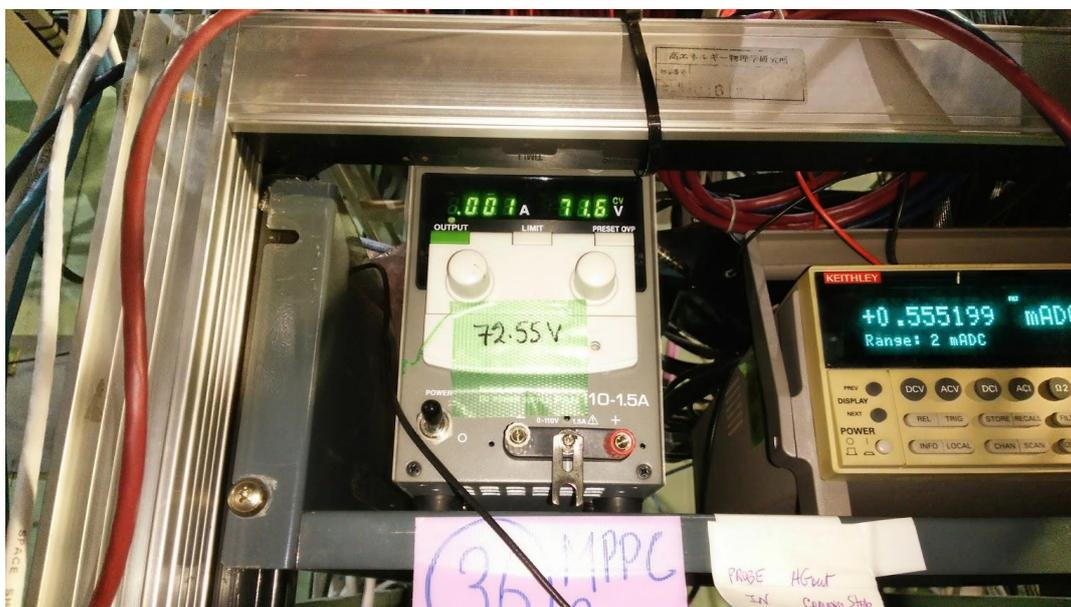


図 4.7 PAN110

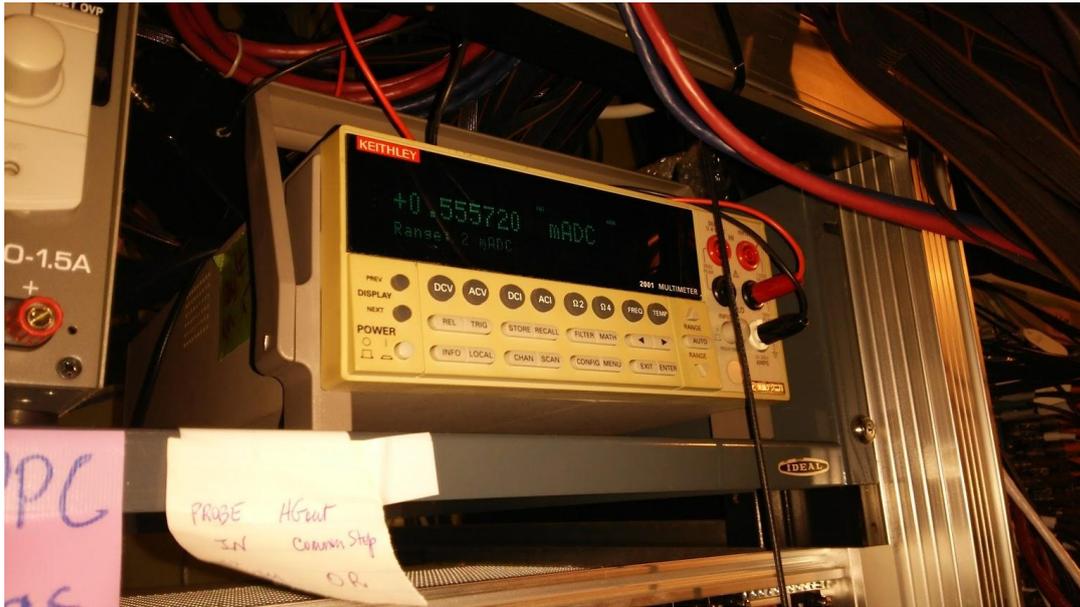


図 4.8 2001 multimeter

3. ダークボックス (DB)

MPPC は温度が低ければ、ゲインが高く、ノイズが少なくなるという実験にとって有利となる性質を持つ。そのため E36 実験では、MPPC の遮光と温度管理をするために、MPPC をダークボックス (DB) と呼ばれる箱の中に設置し、箱全体を温度コントロールする方法を採用している。シンチレーションファイバー端に接続されたクリアファイバーは、光が入ることの無いように DB に挿入し、1 つ 1 つを 128 個の MPPC に接続している。DB 全体はペルチエクーラーによって冷却され、実験中は約 5°C に保たれた。温度を冷却すると DB 内が結露する恐れがあるため、外部から乾燥空気を送り込むことで湿度を調整した。DB 内の温度と湿度は MIDAS [15] と呼ばれる slow control monitor にて監視され、トラブル等があった場合は即座に対処できるように準備されている。

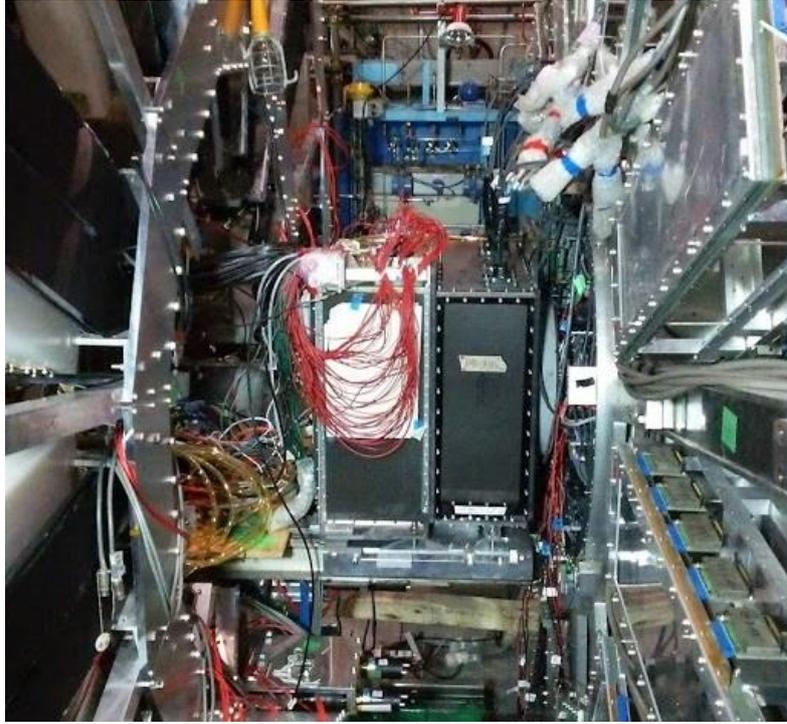


図 4.9 ダークボックス (DB)

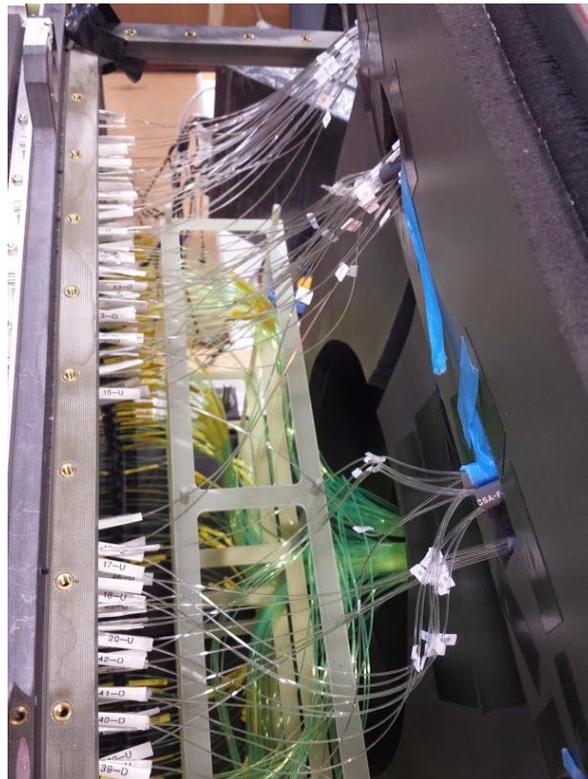


図 4.10 ダークボックス内部

4. ESIROC

MPPC の読み出しには、東北大学グループ（本多、塩崎、三輪）によって開発された 64ch インプットの EASIROC ボードと呼ばれるシステムを利用している[11]。EASIROC とは LAL で開発された SiPM 用のフロントエンド ASIC であり、2 種類のゲインを持つ増幅器、slow shape 増幅器、電圧ホルダーを備えている。出力のデータは 12 bit ADC と 0.7 nsec の FPGA をベースにした TDC である。この EASIROC ボードは KEK-VME 上に設置され、J0 TAG によってその他のシステムと同期を取ることが出来る。

MPPC のバイアス電圧調整は非常に繊細であり、ガイガーモードに突入すると、0.1V 程度の変化でも大幅にゲインやノイズが変化する。そこで EASIROC ボードには、外部からバイアス電圧をチャンネルごとに調整する機能が備わっている。もちろんメインのバイアス電圧は PAN110 で行うが、MPPC ボード内に 1V の電圧調整をメインバイアスに対して更に印加することが出来る。具体的には、ボード全体のチャンネルごとにバイアス電圧の微調整のための数値を送り、ADC データを見ながら調整していく。



図 4.11 EASIROC

第 5 章

宇宙線による SFT の性能評価実験

5.1 宇宙線データを用いた SFT の較正

SFT は E36 実験で使用される前に、その性能を把握し、解析の方法を確立しておく必要があった。詳細な較正は E36 実験の本番で K^+ 粒子を用いて行うが、E36 実験の前に宇宙線を用いた SFT の較正は実験を成功させるための重要な鍵となる。この章では、宇宙線を用いた SFT の較正と SFT の性能評価を報告する。

SFT を用いて荷電粒子の通過位置を調べるためには、第 4 章で一般論を記述したように (1) 信号を發したファイバーを選ぶことで (多数解となる) 交点の候補、(2) ターゲットと MWPC より得られた X-Y 方向のトラッキング情報から交点の位置を選び出すことが必要となる。ただし、実際にはファイバーバンドルの巻き始める位置が 4 つの層によって異なるため、初期の位相を導入しなければならない。これらの初期位相は宇宙線データを用いて決定することが可能であり、それらを決定すると SFT の位置分解能が評価することが出来る。

5.2 ファイバー交点への初期位相の導入

初期位相の導入には以下の 2 種類の方法が考えられる。まずは、ビーム方向に対して常に同じ位置から巻き始めるとし、巻き始めの角度が 4 層で異なっているとする方法である。またもう 1 つは、巻き始めの角度は常に共通であるとして、巻き始めの位置が違っているとする方法である。基本的にこの 2 種類の方法は同値であり互いに変換できるが、本研究ではこれまでの経緯等を踏まえて後者を採用することにする。4 章においては SFT 解析の概念を簡単に説明したが、ここでは初期位相を導入し、更に解析に必要なパラメータを加えた詳しい式を以下のように記述する。 w_{12} と w_{34} が帯の幅、 d_{12} と d_{34} が巻き直径、 Z^0_{12} と Z^0_{34} が理想的な値からのずれを意味し、宇宙線データを用いて決定することとなる。

$$Z_{12} = (\theta_{12} + 2\pi n_{12}) \cdot l_{12}/2\pi + \frac{f_{12} - 0.5}{15} \cdot l_{12} - 10 - Z_{12}^0 \text{ (cm)} \quad (11)$$

$$Z_{34} = (\theta_{34} + 2\pi n_{34}) \cdot l_{34}/2\pi + \frac{f_{34} - 0.5}{17} \cdot l_{34} - 10 - Z_{34}^0 \text{ (cm)} \quad (12)$$

$$l_{12} = \frac{w_{12}}{\cos\phi_{12}} \quad (13)$$

$$l_{34} = \frac{w_{34}}{\cos\phi_{34}} \quad (14)$$

$$\sin\phi_{12} = \frac{w_{12}}{\pi d_{12}} \quad (15)$$

$$\sin\phi_{12} = \frac{w_{12}}{\pi d_{12}} \quad (16)$$

この式では、第1層と第2層、第3層と第4層をまとめて取り扱い、右回りと左回りが1層ずつあると簡略化している。 $Z_{12}=Z_{34}$ かつ $\theta_{12} + \theta_{34} = 2\pi$ を用いて

$$\theta_{SFT} \left(\frac{l_{12} + l_{34}}{2\pi} \right) = n_{12}l_{12} - n_{34}l_{34} - \frac{f_{12} - 0.5}{15} \cdot l_{12} + \frac{f_{34} - 0.5}{17} \cdot l_{34} - Z_{12}^0 + Z_{34}^0 + l_{12} \quad (17)$$

となり、かつこの θ_{SFT} を代入することで Z_{12} と Z_{34} が求まる。つまり、初期位相が決まっているとして、データから決まる f_{12} 、 f_{34} を用いると、 θ と Z が n の関数としてユニークに定まる。

5.3 宇宙線データ測定

SFT の性能を評価するために、SFT 以外の検出器の情報を用いて宇宙線の軌道を求め、その軌道と SFT 信号との比較を行う (図 5.1)。具体的には、上方と下方に置かれた MWPC を用いて宇宙線の通過位置を求め、ターゲットの情報と組み合わせることで θ 方向を測定す

る。更にZ方向の通過位置とファイバーの交点を比較することで、上述の初期位相を決定し、SFTで求めた荷電粒子通過位置の位置分解能をもとめる。ただし、宇宙線データはE36におけるK⁺崩壊とは決定的に違い、宇宙線は上方と下方で2回SFTを通過することになる。K⁺崩壊の場合は1箇所の通過となり、実際のところ宇宙線を用いた解析のほうが難解であると言える。宇宙線データは、図5.2のトリガー回路を用いて収集された。

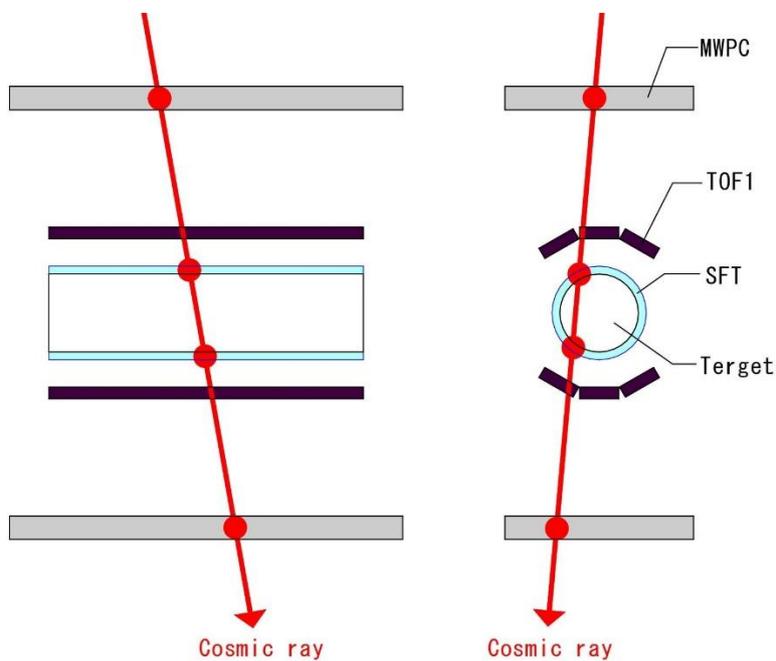


図 5.1 宇宙線データの測定

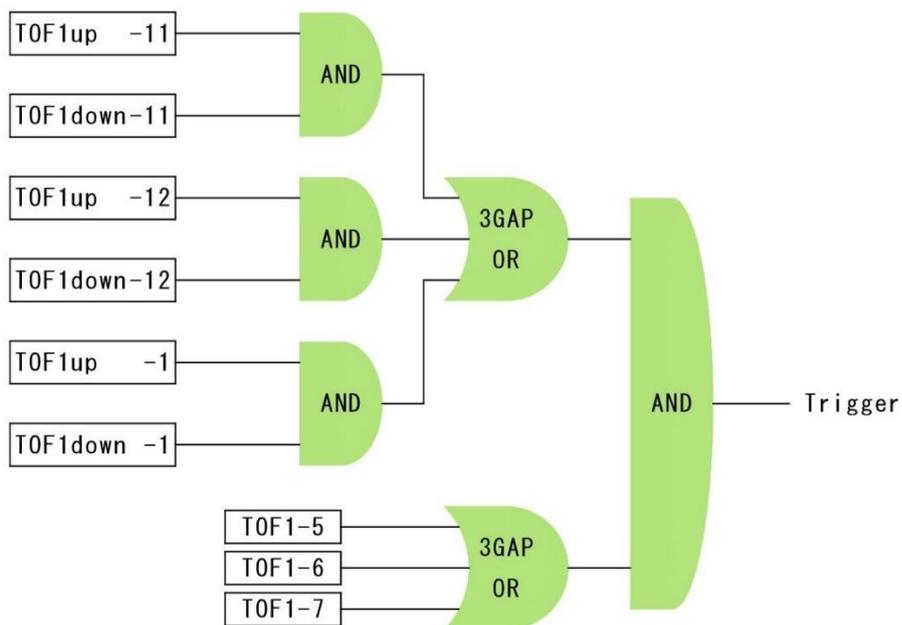


図 5.2 トリガー回路

これらのトリガーの発生によって、SFT、MWPC、ターゲット、TOF1 のデータが disk に記録される。トリガー発生の係数率は 0.5Hz 程度であり、E36 実験が始まる前の 3 月 18 日に、約半日間かけて宇宙線測定が行われた。

5.4 SFT データ解析

5.4.1 SFT raw data

図 5.2 に典型的な SFT の ADC と TDC 分布を示す。TOF1 の信号によって TDC の開始を ADC のゲートが作られており、粒子の通過によって生成されたシンチレーション光が観測できていることが分かる。図中に線で示された領域にデータがある場合にファイバーで光が発生したとし、式の f_{12} , f_{34} が決定される。

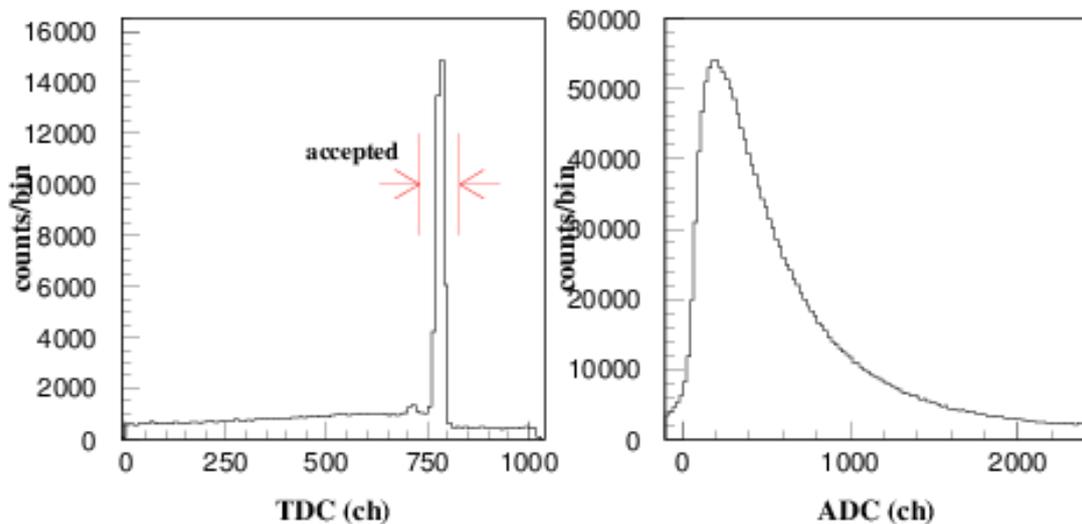


図 5.3 典型的な SFT の ADC、TDC 分布

5.4.2 MWPC とターゲットの解析

本研究では MWPC とターゲットの解析については貢献していない。そのため、簡単に原理だけを述べるに止める。第 2 章にも簡単に書かれているが、E36 MWPC はアノードワイヤーで発生した電子雪崩電荷のカソードへの誘導電荷を測定している。直径 $20 \mu\text{m}$ のアノードワイヤーが 2mm 間隔で張られていて、カソード面は 9mm 幅、1mm 間隔であり、カソードとア

ノードの距離は6mmである。このMWPCがSFTの上方と下方に1台ずつ設置されていて、荷電粒子のSFT通過位置が測定できる。典型的な位置分解能はZ方向に対して1mm、Y方向には2mm程度である。ターゲットはSFTと同じくセントラルディテクターを構成する要素の1つであり、K⁺ビームを静止させる役割を持つ。ターゲット直径は65mmであり、円柱状に束ねた256本の3mm角のシンチレーションファイバーからなる。MWPCと同様に宇宙線の通過によってシンチレーション光が発生し、光っているファイバー群を並べることで粒子の軌跡が求まる。このMWPCとターゲットの情報を利用することで、(SFTとは関係なく)宇宙線の3次元的な軌道が求まるので、SFTの通過位置をZ方向とY方向の両方を求めることが可能となる。この情報とSFT自身の信号を比較することで、上述の初期位相と位置分解能を導いていく。

5.4.3 初期位相の決定

宇宙線の測定では上方と下方の2箇所ですFTにヒットがあるため Z_{12} 、 Z_{34} とも2つのデータ点を持つことになる(即ち2個の f_{12} と f_{34} が存在する)。この場合、考えられる交点の組み合わせは1つではなく4つあることになる。また、 n_{12} と n_{34} を決めることによって各(f_{12} 、 f_{34})の組み合わせによって、2箇所の θ (θ_a 、 θ_b)方向と Z (Z_a 、 Z_b)方向の宇宙線のSFT通過位置が決まる。これらはevent-by-eventで決めるべきパラメータであるのに対して、初期位相はすべてのデータで共通である。

以上の情報をすべて組み合わせることによって初期位相を帰納的に求める。

- (1) まずは適当に Z_0 の値を決める。
- (2) 実測したMWPCとTarget情報から、正しい θ (θ_a 、 θ_b)と Z (Z_a 、 Z_b)を求める。
- (3) f_{12} と f_{34} を決める。ただしこれは4種類の選択が発生する。

$$\text{devi} = r^2(\theta_{SFT}^a - \theta_{TRA}^a)^2 + r^2(\theta_{SFT}^b - \theta_{TRA}^b)^2 + (z_{SFT}^a - z_{TRA}^a)^2 + (z_{SFT}^b - z_{TRA}^b)^2 \quad (18)$$

r はSFTの半径である。deviを最も小さくする n_{12} 、 n_{34} の組み合わせを決める。これが出来たら(3)に戻り、異なる(f_{12} 、 f_{34})組み合わせを用いて4つの組み合わせの中からdeviを最小(devi_min)にする(f_{12} 、 f_{34})を見つける

- (4) (1)に戻り Z_0 を変化させて、(2)-(4)までを繰り返す、 Z_0 の関数としてdevi_minをプロットする。

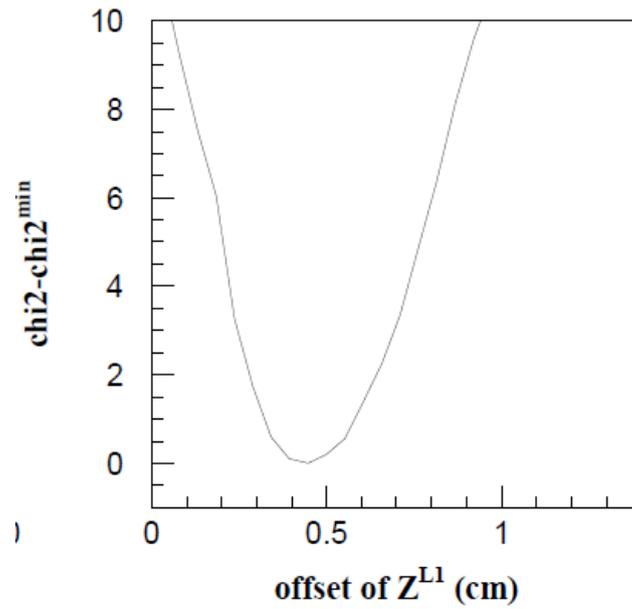


図 5.4 Z_0 に対する devi_min の分布

図 5.4 は Z_{12}^0 を変化させたときの devi_min 分布を示している、明らかに最小点が存在していることが分かる。これにより、宇宙線を用いて初期位相 Z_0 が完了したことになる。以後の解析では、この数字を用いて SFT の位置分解能を求める。

5.4.4 SFT 位置分解能

初期位相を固定し MWP とターゲットから求めた粒子軌道と SFT 解析で得られる位置を比較することで SFT の性能評価を行う。図 5.5 に devi_min 分布、SFT の Z ヒット位置分布、MWPC とターゲットから求めた粒子軌道と SFT で求めた Z と θ の残差分布を示す。以上から、 Z 方向への SFT 位置分解能は $\sigma=4\text{mm}$ となった。ただし MWPC の位置分解能による効果は差し引いていない。MWPC の位置分解能と比較して、SFT は E36 実験において十分な位置分解能を持つことが確認された。

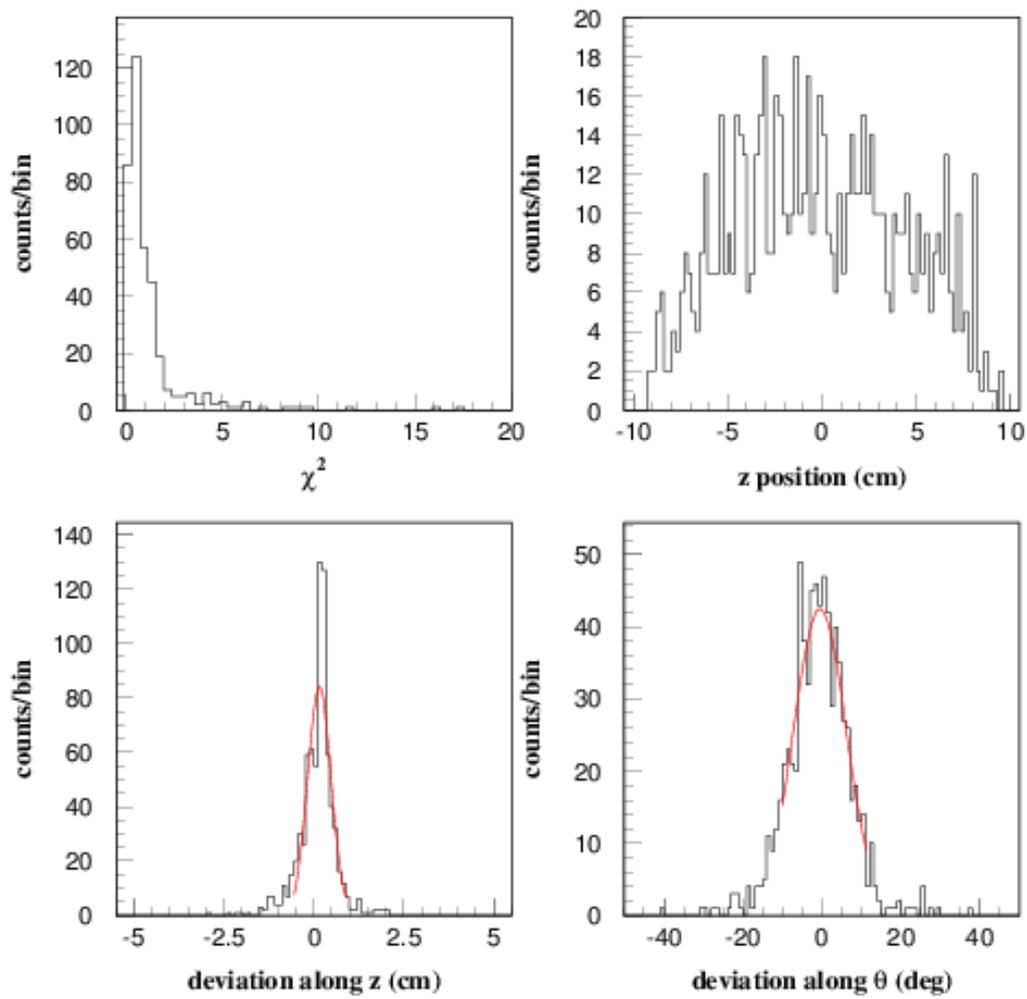


図 5.5 SFT の位置分解能

第 6 章

結論

本研究では J-PARC の E36 実験において荷電粒子の通過位置測定を行う SFT に対し、(1) 解析時に必要な初期位相の決定および(2)位置分解能を得るため、宇宙線データによる評価測定実験を実施した。帯状に接着したシンチレーションファイバーを 4 層にわたって隙間無く円筒形に巻き付けた SFT は、ターゲットと MWPC から得た情報と照らし合わせることで、荷電粒子の通過位置測定を可能とする。

今回の宇宙線データによる性能評価実験では、ファイバーの巻き始めの位置として導入した初期位相の決定に成功し、 $\sigma = 4\text{mm}$ という位置分解能が得ることが出来た。これにより SFT は、本番の E36 実験が行われる前の第 1 段階として十分と言える位置分解能を達成し、E36 実験の使用条件を満たすことが確認された。今後は実際の K^+ ビームでの測定によって得られたデータから較正を行い、より精度の高い解析と測定を目指していく。また実験終了後に SFT と検出器本体から取り外した後、改めて SFT 本体が持つ位置分解能を調べていく予定である。

そして 2015 年 7 月現在、J-PARC のハドロン実験施設内にある K1.1BR ビームラインで行われている E36 実験は、4 月から 6 月までの間に行われていたエンジニアリング・ランによる調整およびデータ収集を終え、一区切りつける段階となった。今後 TREK 実験グループ全体では、J-PARC でのビームスケジュール次第な部分もあるが、今年の 10 月から 12 月にかけて更なるデータ収集を行っていき、その後 E36 実験の次に控えた TREK グループが時間反転対称性の破れの探索を目的としている E06 実験に向けて検出器の解体および保管を 2016 年の 1 月から 6 月までの半年間で行っていく予定である。また、それらと並行して収集したデータの解析も進めていく予定であり、E36 実験に使われている検出器の多くはかつて 1996 年から 2000 年までにデータ収集が行われた E246 実験の検出器を再利用しているため、解析行うプログラムもまた E246 実験のものを現在のフォーマットに合わせ E36 実験仕様に改良する必要がある。2017 年の初めまでにプレ発表を行って 2018 年の初めには最終結果の発表を目指し、E-06 実験へと継続させていく。E-06 実験でもファイバートラッカーの使用は十分に考えられるため、その開発と性能評価に付随してシンチレーションファイバー位置検出器の更なる研究を進めていく予定である。

付記

スパイラルファイバートラッカーの位置分解能

スパイラルファイバートラッカーの位置分解能について考えるにあたり、シンチレーションファイバーには不感領域が存在することに着目しなければならない。光ファイバーの構造として中心部のコアとその外周を覆うクラッドがある（図 1）。シンチレーションファイバーの場合、コア部はシンチレーターによって構成されているため荷電粒子が通過したときにシンチレーション光を発するが、クラッド部にはシンチレーターが使用されていないため通過粒子に対しての不感領域となる。

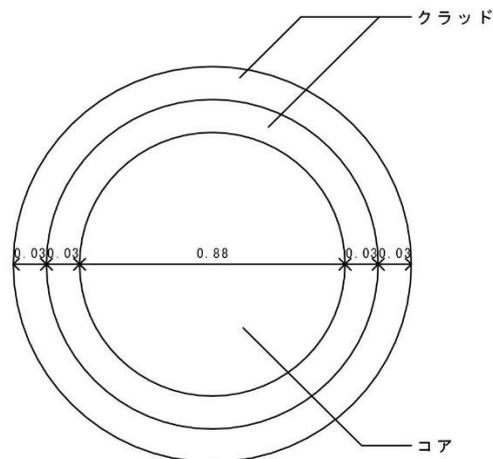


図 1 シンチレーションファイバーの構造断面図（直径 1mm）

本実験で使用する SFT のシンチレーションファイバーは直径 1mm のファイバーであり、直径の 88%がコアで残りの 12%がクラッドである。帯状に束ねたものによって検出を行うのであるが、帯 1 層だけでは不感領域による隙間が生じてしまうため、それを埋めるように 2 層重ねでの使用を行う。これによりこの 2 層のファイバー帯に荷電粒子が通過したとき、信号を発するファイバーが上層下層いずれかの 1 層のみの場合と 2 層両方の場合の 2 通りと

なる状況が現れる (図 2)。

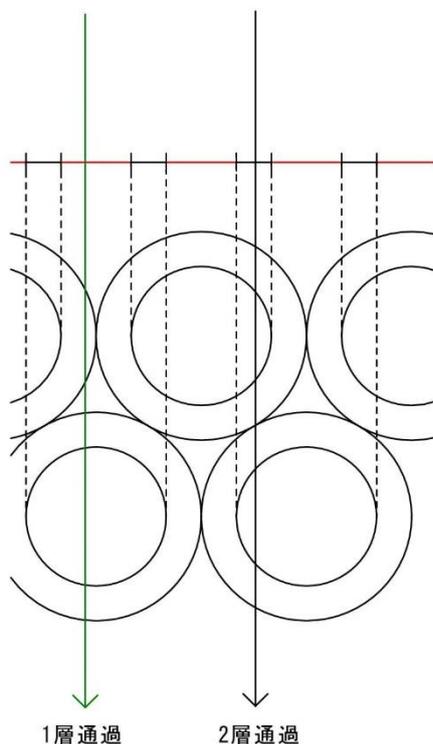


図 2 2層構造のファイバーを通過する粒子

ここで粒子がファイバーを 1 層通過する場合と 2 層通過する場合を信号の読出しシステム上で区別できるようにすると、ファイバーの直径よりも小さい値での位置分解能を得ることが出来る。

その値は半値幅 (FWHM) を計算することにより、

$$FWHM = \frac{1}{2}((0.12)^2 + (0.38)^2) \sim 320\mu\text{m} \quad (19)$$

$$\sigma = \frac{FMHW}{2.35} \quad (20)$$

$$\sigma = 135\mu\text{m} \quad (21)$$

を得る。

このことにより直径 1mm のファイバーを用いることでそれよりも小さいに $135\mu\text{m}$ での位置分解能を発揮することが分かった。

また、本実験で使用したファイバーの直径は 1mm であるが、原理的にさらに細いファイバーでの SFT の作成が可能であるため、より高い位置分解能を持つ SFT を望むことができる。直径 0.2mm のファイバーを用いれば $\sigma = 30\mu\text{m}$ 以下の位置分解能を発揮できる。

しかしこれはあくまで理想的な状況であり、実際の SFT でファイバーの帯を巻き付けた際に上述のような分解能を得ることは非常に困難である。ここでは参考程度に留める。

参考文献

- [1] J-PARC E36 proposal, <http://trek.kek.jp/e36/publication.html>
- [2] E246 実験, M. Abe et al., Phys. Rev. D73 (2006) 072005 1-34
- [3] E246 実験副産物実験, M.A.Aliev et al., Eur. Phys. J. C46 (2006) 61-67; S. Shimizu et al., Phys. Lett. B633 (2006) 190-194; S. Shimizu et al., Phys. Rev. D70 (2004) 037101-1-4; V.V.Anisimovsky et al., Phys. Lett. B562 (2003) 166-172; M.A.Aliev et al., Phys. Lett. B554 (2003) 7-14; S. Shimizu et al., Physics Letters B495(2001), 33~41; K. Horie et al, Physics Letters B 495(2001), 311~318
- [4] 大強度陽子加速器施設 J-PARC、<http://jparc.jp/>
- [5] RK 理論、A.Masiero et al., Phys. Rev. D74 (2006) 011701(R).
- [6] NA62 実験結果、H. Lacker and A. Menzel, JHEP 07 (2010) 006; A. Abada et al., arXiv:1202.4906 (Nov. 2012).
- [7] KLOE 実験結果、C. Lazzeroni et al., Phys. Lett. B698 (2011) 105-114.
- [8] E246 測定器 : J.A. Macdonald et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. Sect. A506 (2003) 166
- [9] MPPC、浜松ホトニクス、<http://www.hamamatsu.com/jp/ja/index.html>
- [10] シンチレーションファイバー、株式会社クラレ、<http://www.kuraray.co.jp/>
- [11] イージーロック (EASIROC)、 KEK 製、<http://openit.kek.jp/project/mppc-readout-sitcp> , PoS(PhotoDet 2012)031 pdf, R. Honda
- [12] PAN シリーズ, キクスイ電気、<https://www.kikusui.co.jp/catalog/?model=pan-a>
- [13] 2001multimeter, ケースレー、
<https://www.keithley.jp/products/dcac/dmm/highper/?mn=2001>
- [14] 株式会社エムライン社製、<http://www.moderation-line.co.jp/>
- [15] データ監視システム MIDAS,
https://midas.triumf.ca/MidasWiki/index.php/Main_Page

謝辞

本研究を行うにあたり多くの方々に御協力、そして御指導を頂きました。河合秀幸准教授には本研究の機会を与えて頂き、御指導頂いたことを深く感謝しております。

J-PARC TREK グループの共同研究者である高エネルギー加速器研究機構の今里純名誉教授、五十嵐洋一教授、大阪大学の清水俊助教には本研究についてのご指導、高エネルギー物理学全般に渡り貴重な議論や助言を頂き深く感謝しております。

同じく J-PARC TREK グループの共同研究者である千葉大学の田端誠氏、立教大学の坂元祐子氏、羽取 美令氏、樋口陽平氏、吉田立氏、研究や日常生活において御助言、御協力頂きありがとうございました。

また、去る今年の6月に若くして命を落とした立教大学の田沼良介氏に対し、同じ実験の研究に携われたことへの感謝とご冥福をお祈りいたします。

千葉大学の飯島周太郎氏、伊藤博士氏、大和久耕平氏、雲越大輔、韓樹林氏には大学の研究室でお世話になりました。

最後に大学院での研究を快諾し、支えてくれた家族に心からの感謝を送ります。