

電磁シャワーイメージング検出器の開発

指導教官 宮村 修

広島大学理学部物理学科ハドロン物理学研究室

0772026A

蜂谷 崇

1999年2月10日

Abstract

物質中での3次元での電磁シャワーの発達を調べることは、入射粒子の同定や入射位置を特定するうえで重要なことである。そこで将来の目的として、宇宙線実験や加速器実験において前述の様な使用を念頭においたシンチレーションファイバーを使った新しい検出器を作ることを目的としている。今回そのための足掛かりとして、宇宙線ミュオンの直線的な軌跡やそのミュオンの崩壊によって生じる電子の作る電磁シャワーの軌跡イメージを画像データとして得ることができる検出器を開発した。そしてこの検出器を用いて実験を行ない結果多数のイベントが得られ、その中にミュオンのものと思われる直線的な軌跡が見ることができた。また、電磁シャワーの様な軌跡イメージが見えるものもあった。ここで得られた多くのイベントを選別するために、トリガーに使用しているPMTからの各画像データに対応するエネルギー情報や時間情報を用いる。そして各イベントに選別された画像データがミュオンのイベント、電磁シャワーのイベントであることを確認する。

目次

1	INTRODUCTION	3
1.1	電磁シャワー (カスケードシャワー)	3
1.2	宇宙線	5
1.3	検出器の概要と応答	6
2	検出器の開発	9
2.1	検出器の設計	9
2.2	トリガーカウンターの設計	11
2.3	検出器の作製	12
3	実験方法	14
3.1	データ収集システム	14
3.2	画像の再構成	15
4	実験結果と考察	16
4.1	解析	16
4.1.1	ADC カウントによるカテゴリー分け	16
4.1.2	クラスターによるカテゴリー分け	21
5	まとめ	26
6	謝辞	27

1 INTRODUCTION

将来、宇宙線実験や加速器実験用の検出器として3次元での電磁シャワーの発達を検出できる検出器を作ること、粒子の同定、エネルギーの測定、入射位置の特定において非常に有用なことである。そこで今回前段階としてシンチレーションファイバーとイメージンシファイヤ (I.I.T.) と CCD カメラを組み合わせた2次元読み出しの検出器を開発し、その検出器を用いて宇宙線ミュオンやミュオンが崩壊して生じる電子の電磁シャワーの軌跡を画像データとして検出した。

この章では、本論文の導入として簡単に電磁シャワーの発達と地上での宇宙線の強度分布について説明する。また開発した検出器の概念図やミュオンや電磁シャワーの軌跡がこの検出器でどのように見えるかについて触れる。第2章では検出器やトリガーの設計、開発、第3章で実験方法についてそれぞれ説明する。

第4章では実験結果とその考察を行い、第5章でまとめを行う。

1.1 電磁シャワー (カスケードシャワー)

高エネルギーの電子が物質の中に入射すると電子は物質の原子核との相互作用によって制動を受け光子を放出する (bremsstrahlung)。その光子は電子対生成によって電子と陽電子をつくり出す。またこの電子が制動放射で光子を放出する。このようにして電子と光子とは交互に制動放射と電子対生成を繰り返して増殖する。(参考文献 [1])

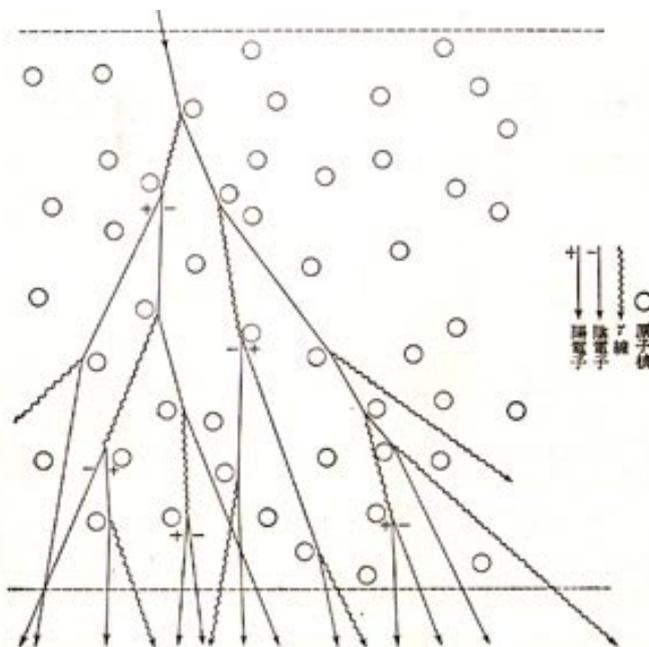


図 1: 電磁シャワーの概念図、電子の制動放射と光子の電子対生成によって電磁シャワーは発達する。○は物質の原子核、 \leftarrow^- は電子、 \leftarrow^+ は陽電子、 \sim は光子を表している。

増殖を繰り返して行くとシャワーの発達は止まり物質に吸収される。これは最初に入射した電子のエネルギーが数多くの粒子に分配され、電子のエネルギーがあるエネルギーより下がると制動による光子を放出できなくなるためである。このエネルギーのことを臨界エネルギー E_c という。このエネルギー E_c は制動放射によるエネルギー損失と電離によるエネルギー損失 (ionization loss) とが等しくなるエネルギーである。 E_c 以下では主なエネルギー損失は電離損失になるためシャワーの発達は止まる。

臨界エネルギー E_c は物質によって異なり、次の近似式によって求めることができる。(参考文献 [2])

$$E_c = \frac{800(\text{MeV})}{(z + 1.2)}$$

Z は原子番号を表している。

また電磁シャワーの大きさを表すのに適した量として放射長 (Radiation Length) X_0 と *Molière* 半径 R_m がある。この放射長 X_0 は高エネルギーの電子が物質を通るとき、制動放射によってそのエネルギーが $1/e$ になるあいだに物質中をすすむ平均の距離である。その具体的な距離は近似的に次の式で書ける。(参考文献 [2])

$$X_0 = \frac{716.4A}{Z(Z + 1)\ln(\frac{287}{\sqrt{Z}})} \text{ [g} \cdot \text{cm}^{-2}\text{]}$$

A は質量数、 Z は原子番号を表している。

また *Molière* 半径 R_m は、各々の物質中における電磁シャワーの横軸方向への広がりを表す量で次の式で表される。(参考文献 [2])

$$R_m = X_0 \frac{E_s}{E_c}$$

X_0 : Radiation Length, E_c : 臨界エネルギー, $E_s = 21\text{MeV}$

この *Molière* 半径 R_m には、電磁シャワーの横軸方向の広がりの約 90 % が入る。また $3.5R_m$ には、電磁シャワーの約 99 % が入る。

1.2 宇宙線

宇宙線には1次宇宙線と2次宇宙線がある。1次宇宙線は銀河系内で発生した粒子と原子核からなり、主に1GeV以上の運動エネルギーを持っている。また、2次宇宙線とは地球にたどり着いた1次宇宙線が地球の大気中の窒素や酸素などの原子核と相互作用によって放射される2次的な粒子である。地球の表面は大体 $1000 \text{ [g} \cdot \text{cm}^{-2}]$ の厚みを持つ大気の層によって遮蔽されている。このため地上では1次宇宙線がそのままの姿で地上まで到達することはほとんどない。地上で観測される宇宙線は次の図2のような強度分布になっている。強度とはその方向を含む単位立体角から入射して、単位面積を単位時間に通過する粒子の数である。この図より地上は横軸 $1000 \text{ [g} \cdot \text{cm}^{-2}]$ 付近なので地上まで届く宇宙線の大部分は電子とミューオンでありその比は約3 : 7である。(参考文献 [1])

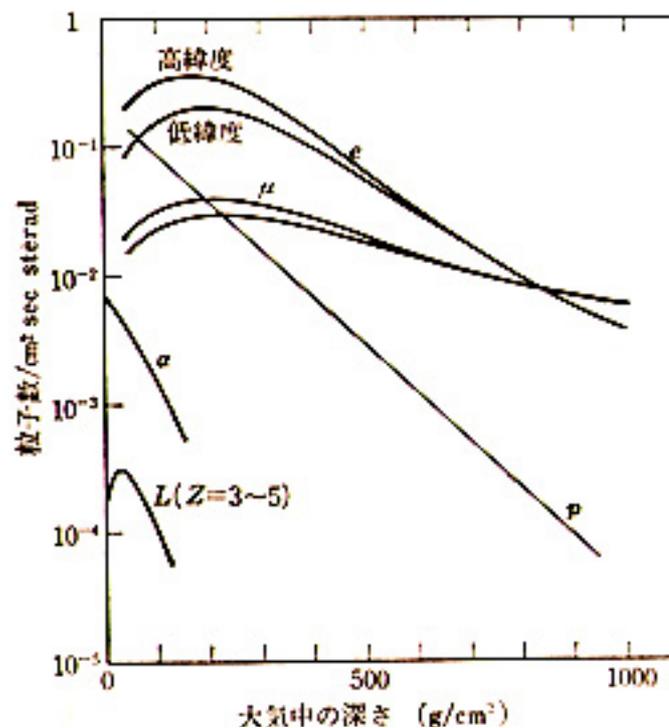


図 2: 高度による宇宙線の成分、縦軸は宇宙線強度 [粒子数 $\cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{srd}^{-1}$]、横軸は大気深さ [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$] を表し、 e は \pm 電子、 μ はミューオン、 p は陽子、 α は α 粒子、 L は Li, Be, B の原子核を表している。

1.3 検出器の概要と応答

今回作製した検出器は次の図3のように、シンチレーションファイバーの間に鉛をサンドイッチ状に挟み層構造にしたものがある。具体的にはシンチレーションファイバーの各層は直径1mmのシンチレーションファイバーを縦に2本、横に160本並べ、板状に整形したのもので5層で1600本のファイバーを使っている。このファイバー層の間には4mmの鉛と2mmの木(spacer)を挟んであり、この鉛によって電磁シャワーの発達を検出器に収まるようにしている。ここでシンチレーションファイバーとは、荷電粒子が通過すると発光する物質(シンチレーター)を使った光ファイバーである。

粒子が検出器を通過すると、通過した部分のシンチレーションファイバーが発光する。この光はそれぞれファイバーを通してイメージインテンシファイヤ(I.I.T.)と呼ばれる微弱画像検出器に到達する。I.I.T.では各ファイバーからの光の座標を保持したまま光をCCDカメラで捕らえられるように一括して増幅し、粒子の軌跡を表す数個の輝点を一枚の画像データとしてCCDカメラで読みだしている。また検出器の上下にトリガーカウンターを置き、粒子がトリガーカウンターを全て通過したとき画像データを取り出すようになっている。また同時に粒子がトリガーカウンターで落としたエネルギーロスの情報もとりだしている。

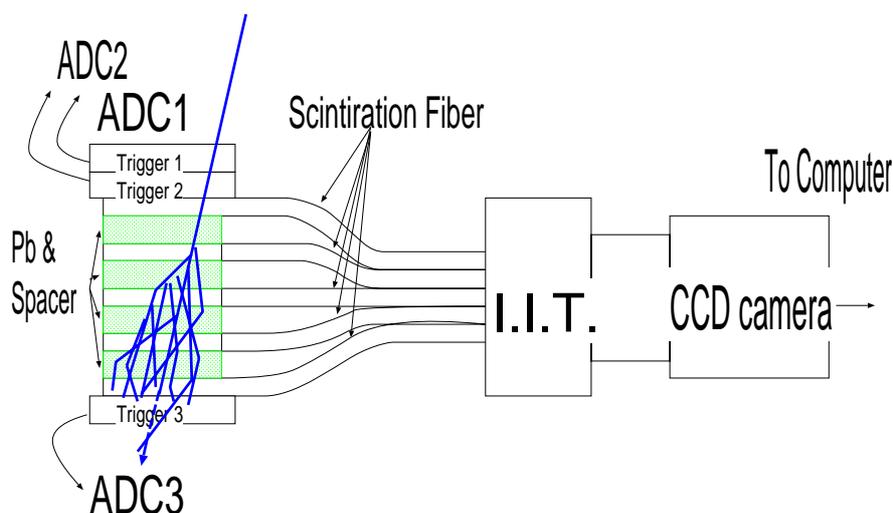


図3: 検出器の概念図,シンチレーションファイバーと鉛をサンドイッチ状に挟んだ検出器の軌跡検出部分と検出器の上下に置かれた粒子通過を調べるトリガーカウンターの配置の概念図。粒子の信号はファイバーを通してI.I.T.に運ばれ増幅されてCCDカメラで画像データとして検出される。I.I.T.は約1600本のファイバーを一括して読み出すことができる。

地上に到達する宇宙線は前述のように主にミュオンと電子であるが今回の実験は屋内実験室で行うため電子は建物にほとんど吸収されてしまう。そのため実験で最も多く観測されるのはミュオンである。ミュオンは質量 $M_\mu = 105.6 \text{ MeV}$, 寿命 2.2×10^{-6} , スピン $\frac{1}{2}$ のフェルミオンである。ミュオンは電子の約 200 倍の質量を持つために電子に比べて物質との相互作用による制動放射を起こしにくく、電磁シャワーに発達しない。そのため建物にほとんど吸収されない。またミュオンが検出器を通過するとその部分のシンチレーションファイバーだけが発光し、その輝点を結ぶと次の図 4 の様に直線的に見えるはずである。

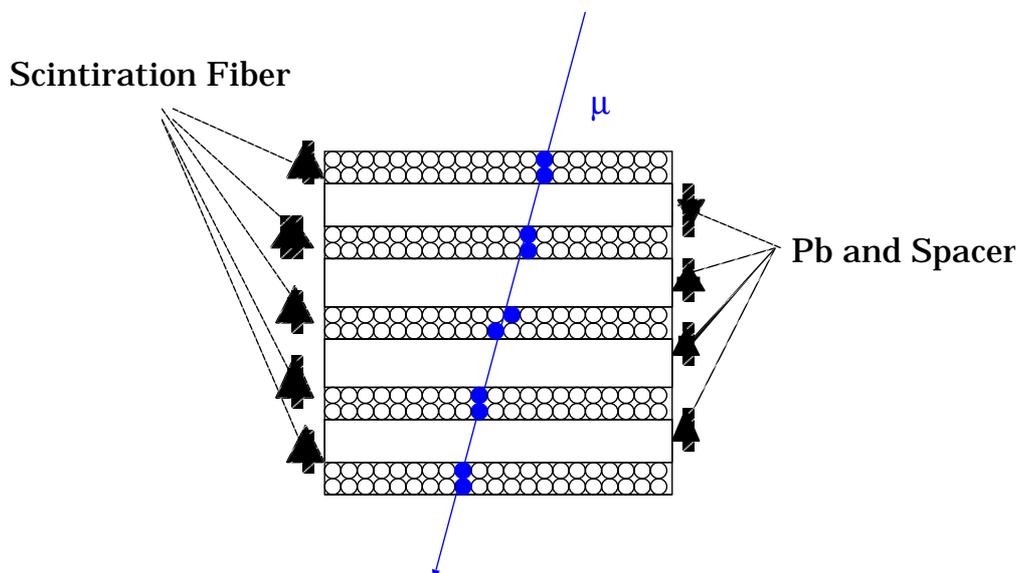
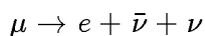


図 4: この検出器でミュオンの軌跡が見えたときの予想図。図の μ の添字のある線は宇宙線ミュオン、 \circ はシンチレーションファイバー、 \bullet は発光したファイバーを表している。またこの図は検出器のシンチレーションファイバーと鉛をサンドイッチ状にした部分の断面図である。ミュオンは電磁シャワーを起こしにくいので、ミュオンが検出器を通過すると通過した部分のシンチレーションファイバーだけが発光し、その輝点を結ぶと直線的に見えるはずである。

また検出器の中で電磁シャワーを起こす電子は、ミューオンが検出器内で偶然次の3体の崩壊をして生じる電子であると考えられる。



検出器内での電磁シャワーは鉛との相互作用によって短かい距離で発達する。そのため電磁シャワーの発達の様子がシンチレーションファイバーによって捕らえられ次の図5の様に下の層になるほど発光したファイバーが広範囲に見えるはずである。

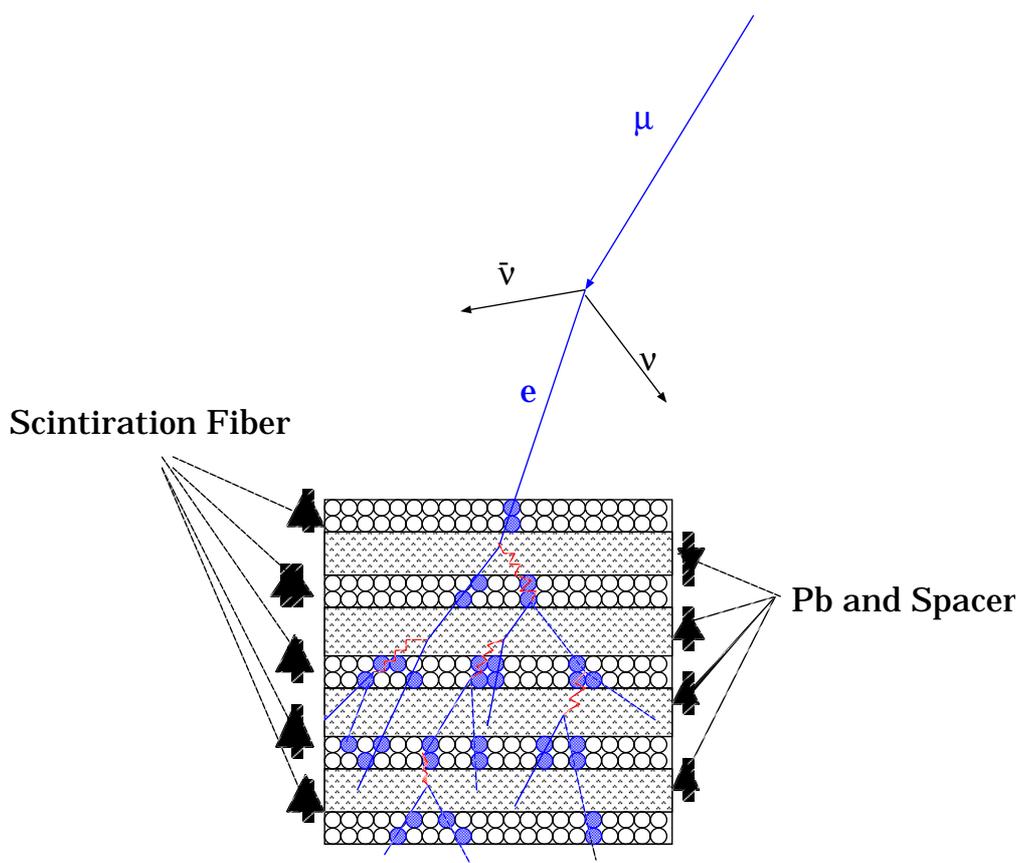


図 5: 検出器で電磁シャワーが見えたときの予想図。線は電子と陽電子、波線は光子、○はシンチレーションファイバー、●は発光したファイバーを表している。またこの図は検出器のシンチレーションファイバーと鉛をサンドイッチ状にした部分の断面図である。ミューオンが電子と2個のニュートリノに崩壊し、その崩壊によって生じた電子の電磁シャワーの発達を捕らえている。電磁シャワーは鉛によって検出器内で短距離で発達するので下層になる程たくさんのファイバーが発光している。

2 検出器の開発

2.1 検出器の設計

検出器の設計には次の2つことを考慮し、これを満たすように設計した。

1. 一日に検出器の中へいくつのミュオンが入射し、その内のいくつが電子に崩壊するか
2. 電磁シャワーの全体像が検出器の中に収まるか

まず検出器の中で崩壊するミュオンが主にどれくらいのエネルギーを持っているかを見積もるために検出器の大きさを実験室で実現可能なある適当な大きさを仮定する。検出器の大きさを $10 \times 10 \times 10(\text{cm}^3)$ と仮定したときに、この大きさの検出器の中で各エネルギーのミュオンが電子に崩壊する数を以下に示すミュオンの強度の式と崩壊の割合の式を使って計算すると図6の様になる。

ミュオンの強度 (積分スペクトル)

$$I = \frac{b}{(E + a)^\gamma} [\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{srd}^{-1}]$$

I : ミュオンの強度, E : ミュオンのエネルギー, $b \approx 0.18$, $\gamma \approx 2$, 地上では: $a \approx 5q$

崩壊の割合

$$N = N_0(1 - \exp(-\frac{t}{\tau}))$$

N : 電子に崩壊するミュオンの数, N_0 : 検出器の中に飛んでくるミュオンの数、
 t : 検出器を通りぬけるのにかかる時間 (s), τ : ミュオンの寿命 (2.2×10^{-6})

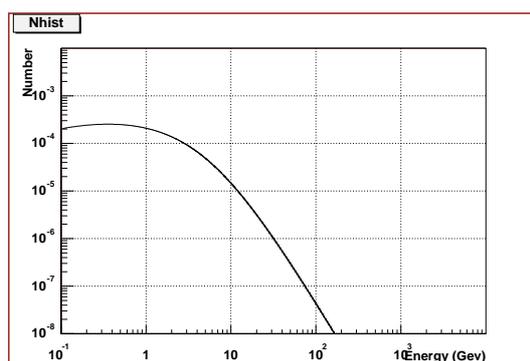


図6: $4 \times 4 \times 5$ 内でミュオンの崩壊によって生まれる電子とエネルギーとの関係、この図よりエネルギー1GeV以下のミュオンが主に崩壊すると分かる。

この図から検出器の中で崩壊するミュオンは主に 1GeV 以下のエネルギーのものであるといえる。ミュオンの崩壊によって得られた電子がどのようなエネルギーを持つかはこの崩壊が 3 体の崩壊なので、常に一定では無いがエネルギー・運動量保存則より 1GeV 以上にはならない。なるべく数多くの電磁シャワーが検出器の中に収まるようにするため、最も悲観的に、エネルギー 1GeV のミュオンが 1GeV の電子に崩壊する場合を仮定して検出器のサイズを決める。

検出器に使う電磁シャワーを任意の大きさで起こさせる target 物質として入手の簡単な鉛 (Pb) とアルミニウム (Al) について、エネルギー 1GeV の電子がどれくらいの大きさのシャワーに発達するか考える。そこで各物質中での Radiation Length X_0 、臨界エネルギー E_c 、Molière 半径 R_m を前述の式を用いて計算すると次の表 1 のようになる。

表 1: Pb、Al での Radiation Length X_0 、臨界エネルギー E_c 、Molière 半径 R_m 。ここで Z は原子番号、 A は質量数、 ρ は密度を表している。

target 物質	X_0 [g · cm ² , (cm)]	E_c [MeV]	R_m [g · cm ² , (cm)]	Z	A	密度 [g · cm ³]
Pb	6.31 ,(0.55)	9.62	13.78 ,(1.2)	82	207.2	11.48
Al	24.3 ,(9.02)	56.34	9.04 ,(3.36)	13	26.98	2.69

検出器を小さくまとめるためにこの表より target 物質として鉛を選ぶ。求めた X_0 を使うと 1 GeV の電子が鉛の中を平均 2.54[cm] 進むと計算できる。これより検出器の中でシャワーの発達を止めるためには鉛が最低 2.54[cm] 以上必要とわかる。このことを考えて検出器の大きさを決めるために検出器の表面積 s [cm²] と高さ d を仮定しその中で 1 日いくつのミュオンが入射し、そのうちいくつのミュオンが崩壊して電子になるかを求めたものが表 2 である。ここで検出器の中を通り抜けるミュオンとは検出器の上面と下面を通ったミュオンのことである。

表 2: 検出器のサイズと電子の関係、 s は検出器の上の面積、 d は高さ、 N は一日に検出器の中で崩壊するミューオンの数、 N_0 は一日に検出器の中に入射してくるミューオンの数。この表より電子に崩壊するミューオンの数は $16 \times 16 \times 5$ が最も多い。

s [cm ²]	d [cm ²]	N [1/day]	N_0 [1/day]
4×4	5	0.89×10^{-3}	6.1×10^3
4×4	10	0.22×10^{-3}	1.5×10^3
8×8	5	0.14	9.7×10^4
8×8	10	0.035	2.4×10^4
12×12	5	0.72	4.9×10^5
12×12	10	0.18	1.2×10^5
16×16	5	2.29	1.5×10^6
16×16	10	0.57	3.9×10^5

この表から表面積と立体角 ($= \frac{s}{d^2}$) を大きくとったほうが多くのミューオンが電子に崩壊するとわかる。これより $16 \times 16 \times 5$ [cm⁻³] を検出器の大きさとする。

電磁シャワーの様子をなるべく細かく観測するために検出器の中にファイバーの層をできるだけ増やしたい。この要求のためにファイバーを5層分入れ、3 cm 分の鉛を4等分して鉛の間に挟む。またこの他に spacer として'木'をいれる。

2.2 トリガーカウンターの設計

粒子が入射したときだけデータを捕るためにトリガーカウンターを用いる。このトリガーカウンターは、センサー部分にシンチレーターを使い、粒子が入射したときの信号を PMT(Photo Multiplier Tube) を使って増幅し、電気信号としてとりだしている。(この粒子が入射してトリガーカウンターが信号を出すことをトリガーが鳴ると呼ぶ。)シンチレーターとは粒子が入射してくると発光する物質のことである。発光の原理は、粒子とシンチレーター物質内の電子との相互作用により励起された電子が下の準位に落ちるときにそのエネルギーに相当する光子を放出するというものである。

検出器の中で崩壊するミューオンの数は前節で見たように非常に少ない。このため検出器の表面積と立体角を減らさないように設計しなければならない。そこでトリガーカウンターのセンサー部分をこの検出器の表面積より大きい $22 \times 22 \times 1$ [cm³] とし、検出器の上に2つ下に1つ、検出器に密着させて置く。上に2つ置くことで PMT のサーマルノイズによる疑似信号を減らすことができる。

2.3 検出器の作製

一層分のファイバーを作るために直径 1 mm のシンチレーションファイバーを 40 本使い図 7 の様に带状にしたものを横に 4 枚並べる。その土台として厚さ 1mm のアクリル板、横ずれを防ぐためファイバーの帯の間に厚さ 3mm のアクリル棒を使い検出器のセンサー部分を固定した。また各層のファイバーを遮光のために黒いケント紙で巻いた。このため各層のサイズが $16 \times 18 \times 0.4 [cm^3]$ になり、またファイバーの帯の間に不感部分が出てしまった。

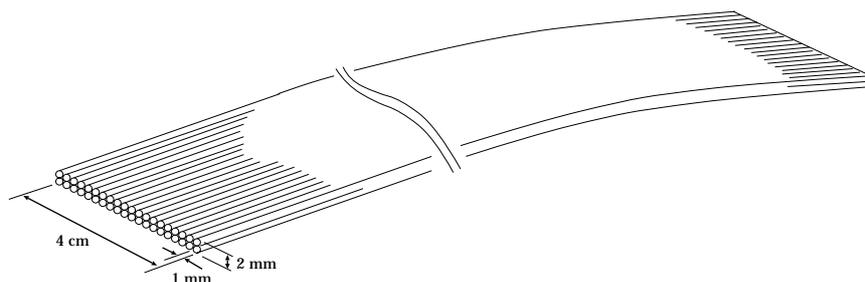


図 7: 一束のシンチレーションファイバーの図

また I.I.T. のセンサー面は直径 5 cm の円状をしている。そのためファイバーの I.I.T. 接地面はを 4 枚の帯を図 8 のように縦に重ねて全てのファイバーが映るようにしなければならない。この様にファイバーを加工したものを一層として五層作り、その間に鉛と木をはさむ。

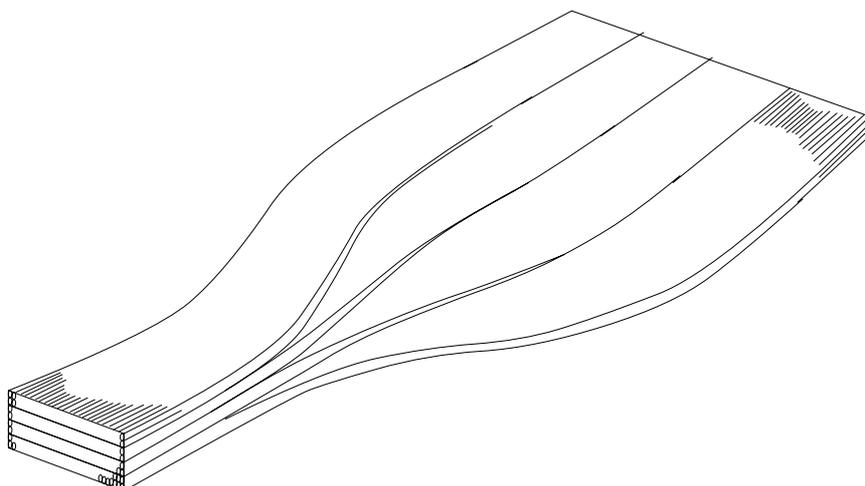
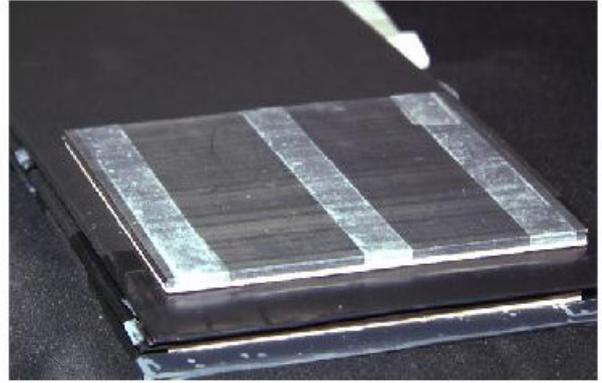


図 8: 一層のシンチレーションファイバーの図

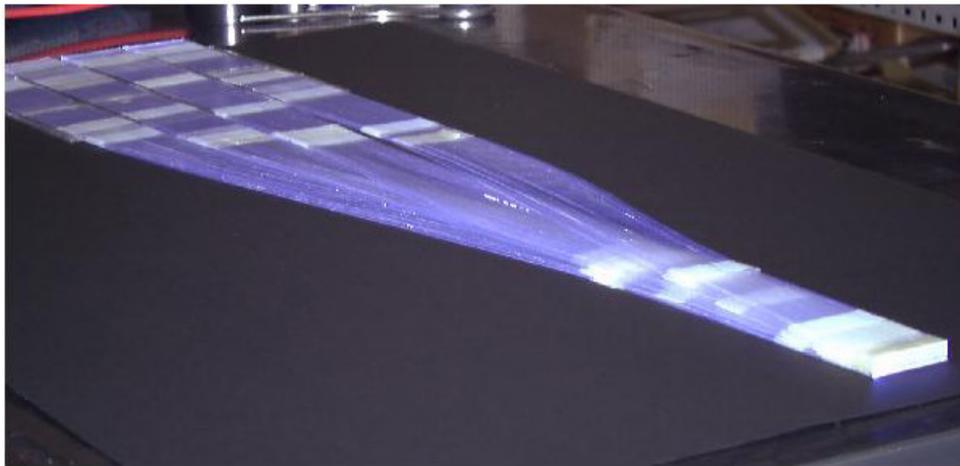
I.I.T. との接地には光学グリスを使い、光が減衰しないようにした。

検出器の写真

ファイバーとI.I.T.の接着面 ファイバーと鉛を挟んだところ



一層のファイバー



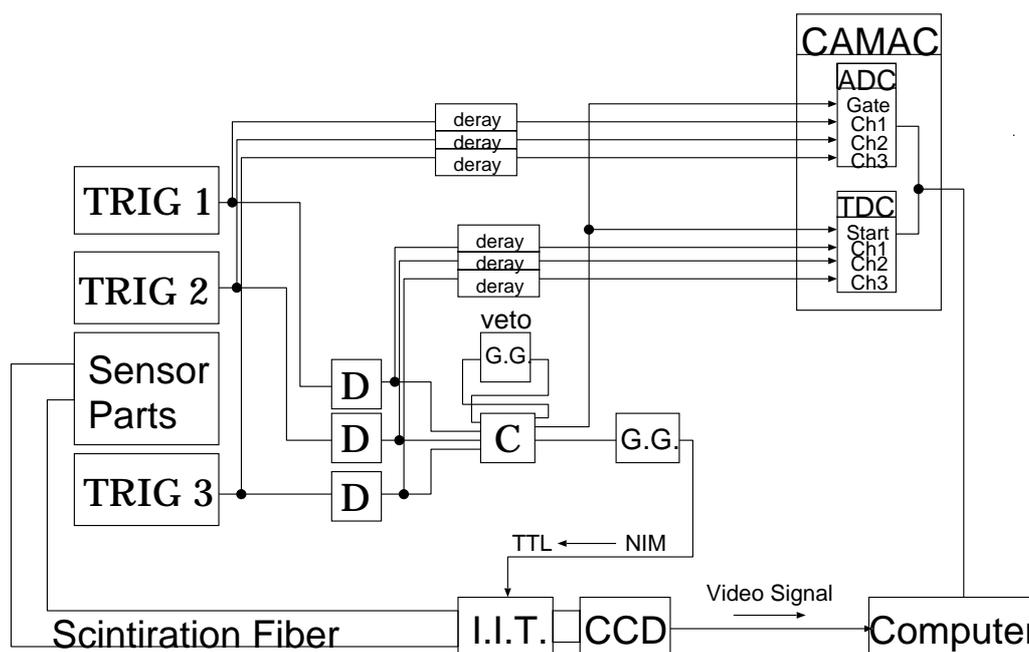
SetUpの様子



3 実験方法

3.1 データ収集システム

前述のように宇宙線が検出器に入射したときイメージ画像データを捕るためにトリガーカウンターを用いる。トリガーカウンターは上から順に Trig1, Trig2, Trig3 と呼ぶことにする。今回の実験で用いた具体的なシステムは次の図 9 のようになっている。



D:discriminator , C:coincidence , G.G: Gate Generator

図 9: データ収集システムの概要

粒子が通過するとトリガーカウンターは鳴る。そのトリガーカウンターからの信号は、粒子の通過時間の情報や粒子のエネルギーロスの情報を持っている。粒子通過の時間情報を TDC(Time to Digital Converter)、エネルギーロスの情報は ADC(Analog to Digital Converter) を使ってデジタル化され、数値として得ることができる。

このシステムは次のような仕組みで動いている。

1. 粒子が Trig1,Trig2,Trig3 を通過し、各トリガーが鳴る。
2. 3 つトリガーカウンターからの信号の Coincidence を調べ、その結果を I.I.T. のゲート、ADC のゲート、TDC のスタートに送る。
3. I.I.T. のゲートが開き、CCD カメラで捕った画像データを Computer へ送る。また ADC、TDC はトリガーからの信号を読み込み LAM、(look at me:ADC,TDC 内で信号の digital 変換が終ったことを表す Flag) を立てる。
4. Computer は送られてきた画像データをメモリに蓄え、同時に ADC、TDC の両方に LAM が立っているかをみる。
5. 両方の LAM が立っていたらメモリに蓄えてある画像データをハードディスクに保存する。
6. ADC、TDC を初期化して次のイベントを待つ。

このシステムと作製した検出器を使って粒子の軌跡を表すいくつかの輝点を持つ画像データが数多く得られた。

3.2 画像の再構成

今回作製した検出器は前述のようにセンサー部分で横に並べてある 4 つのファイバーの帯を I.I.T. 接地面では縦に積み重ねている。このためこの検出器で捕れる生の画像データをそのまま見ることは意味のないことである。

そこで画像の再構成が必要となる。その方法は各層での輝点の座標をその層に保持したまま、各層ごとにセンサー部分と同じ位置関係に並べ直すというものである。

4 実験結果と考察

測定は 1/19 ~ 2/8 までの 20 日間測定した。測定の結果、トリガーカウンターに粒子通過の反応があったにもかかわらず、画像データには何も映っていないものが多く含まれていた。このため、まずは捕れたデータを輝点の映っているものと残っていないものに分ける。その結果、起点の映っているデータを約 26000 イベント得られた。得られたデータの内輝点の映っているデータの割合は約 30%ほどであった。

4.1 解析

画像が残っているデータを 3 つのカテゴリーに分ける。

1. 直線的な軌跡をもつミュオンのイベント
2. 検出器の中で電磁シャワーを起こしたイベント
3. 検出器の上で電磁シャワーを起こし多くの電子や光子が一度に検出器に入射してきたイベント

データを 3 つのカテゴリーに分ける方法として次の 2 通りの方法を試みた。

1. 3 つのトリガーカウンターからの粒子のエネルギーロスの情報である ADC カウントによってカテゴリーに分ける。
2. 画像データに残っているピクセルの情報を視覚的な情報に近い、新しく定義したクラスター (塊) に割り振り、各層ごとのクラスターによってカテゴリーに分ける。

4.1.1 ADC カウントによるカテゴリー分け

1. カテゴリー 1 :ミュオンのイベントは各トリガーカウンターに同程度ずつエネルギーを落とすはずである。
2. カテゴリー 2 :検出器内で電磁シャワーを起こしたイベントは Trig3 に多くの電子や光子が入るので、Trig1,Trig2 にはカテゴリー 1 と同程度エネルギーを落とし、Trig3 にはよりたくさんのエネルギーを落とすはずである。
3. カテゴリー 3 :たくさんの粒子がほぼ同時に入射するので、各トリガーカウンターにカテゴリー 1 の場合よりたくさんのエネルギーを落とすはずである。

カテゴリーに分けるための具体的な数字を決めるために Trig1,Trig2 の相乗平均の ADC カウントと Trig3 の ADC カウントのヒストグラムを見る。

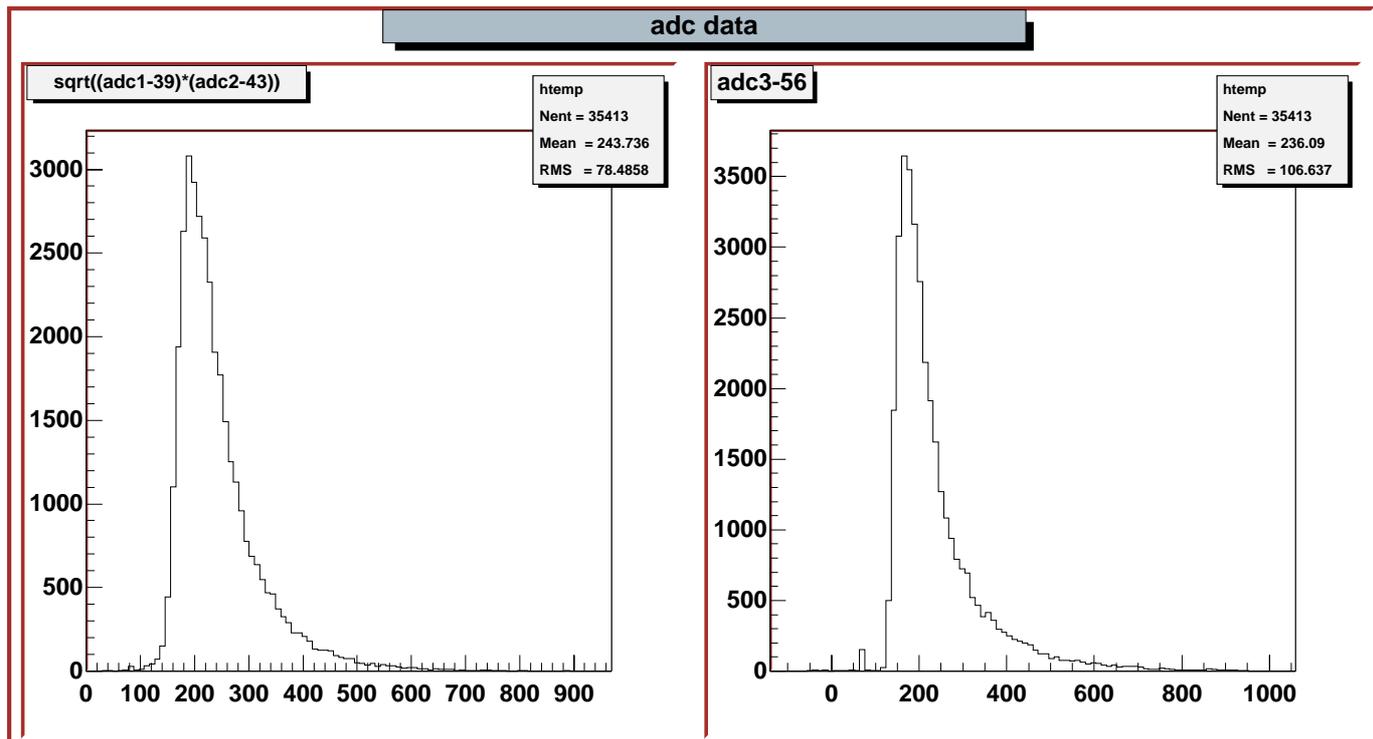


図 10: 左 : 相乗平均、右 : ADC3

この図を見ると 200 カウントぐらいにピークがある。このピークをつくっているのは地上まで到達する量が最も多いミュオンである。

これよりおおまかに見積もって

カテゴリー 1 : $ADC1 < 400, ADC2 < 400, ADC3 < 400$

カテゴリー 2 : $ADC1 < 400, ADC2 < 400, 600 < ADC3$

カテゴリー 3 : $400 < ADC1, 400 < ADC2, 400 < ADC3$

という条件を要求し、この条件によって選ばれた画像をみる。

カテゴリ 1 の選択のデータ

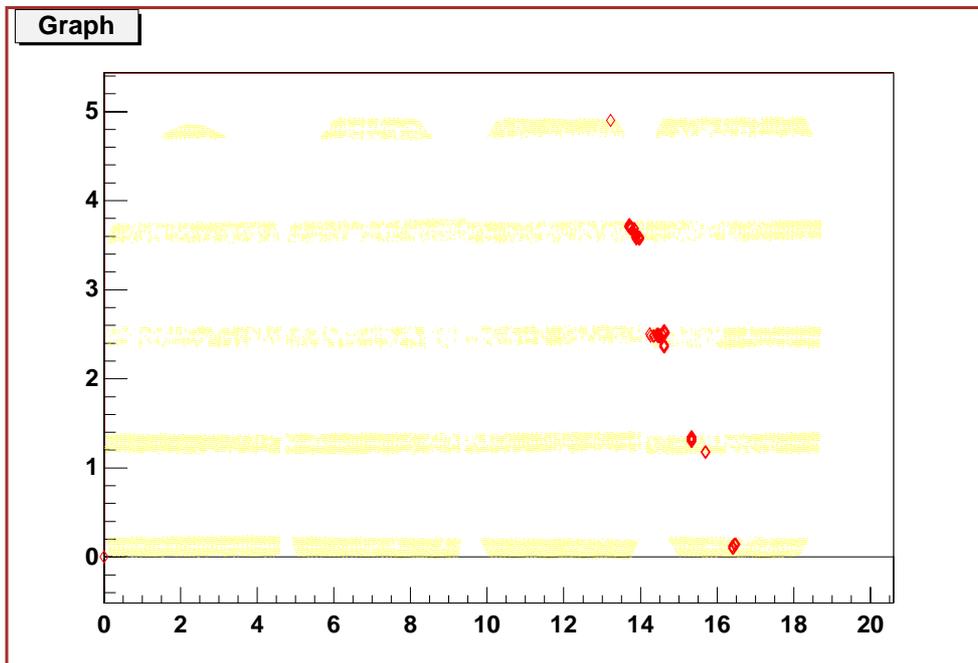


図 11: カテゴリ 1 に選ばれたイベントその 1

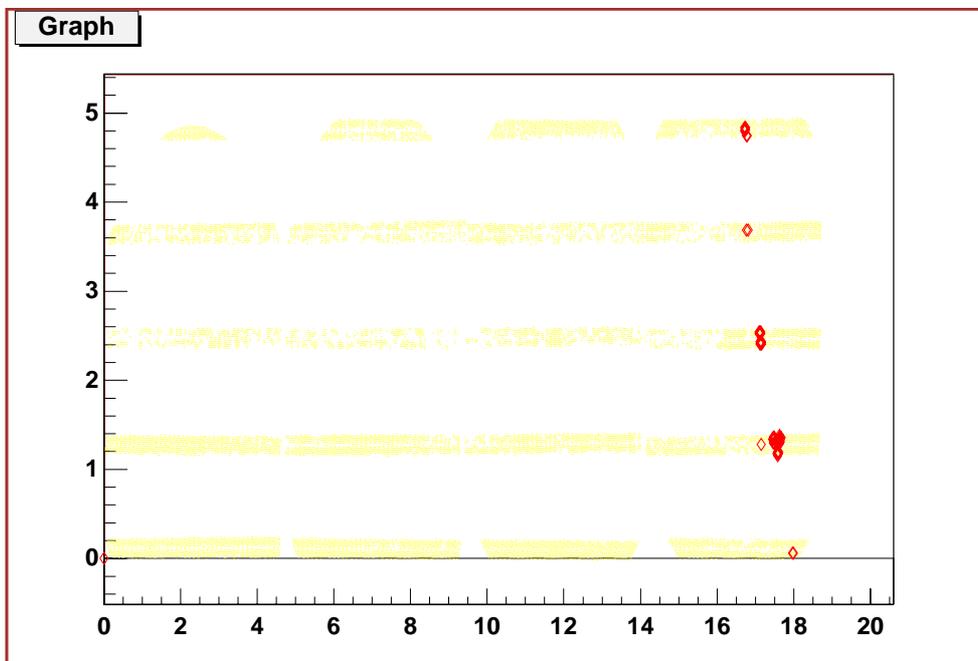


図 12: カテゴリ 1 に選ばれたイベントその 2

カテゴリ 2 の選択のデータ

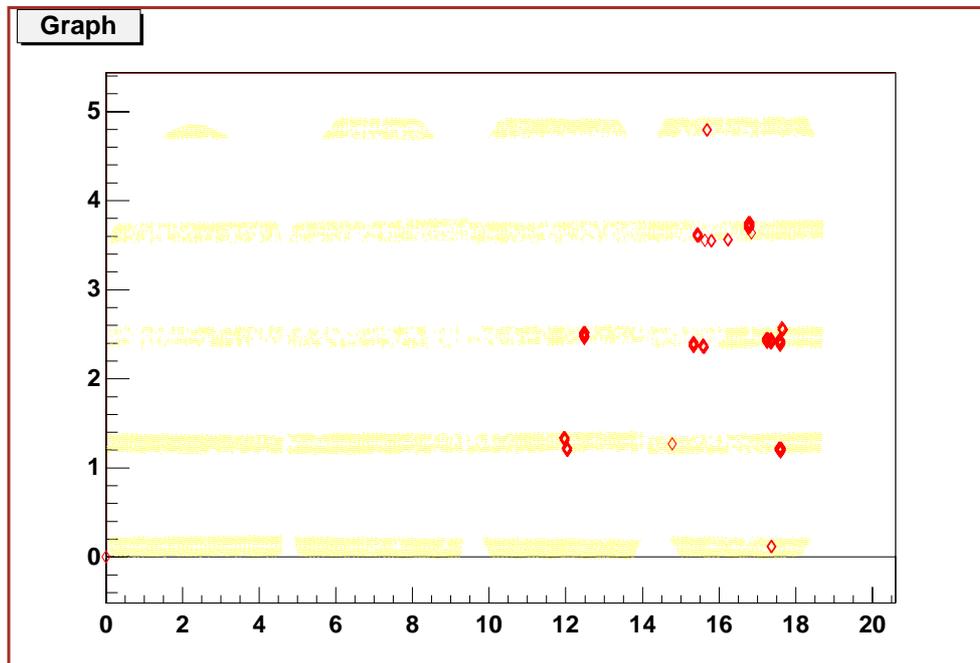


図 13: カテゴリ 2 に選ばれたイベントその 1

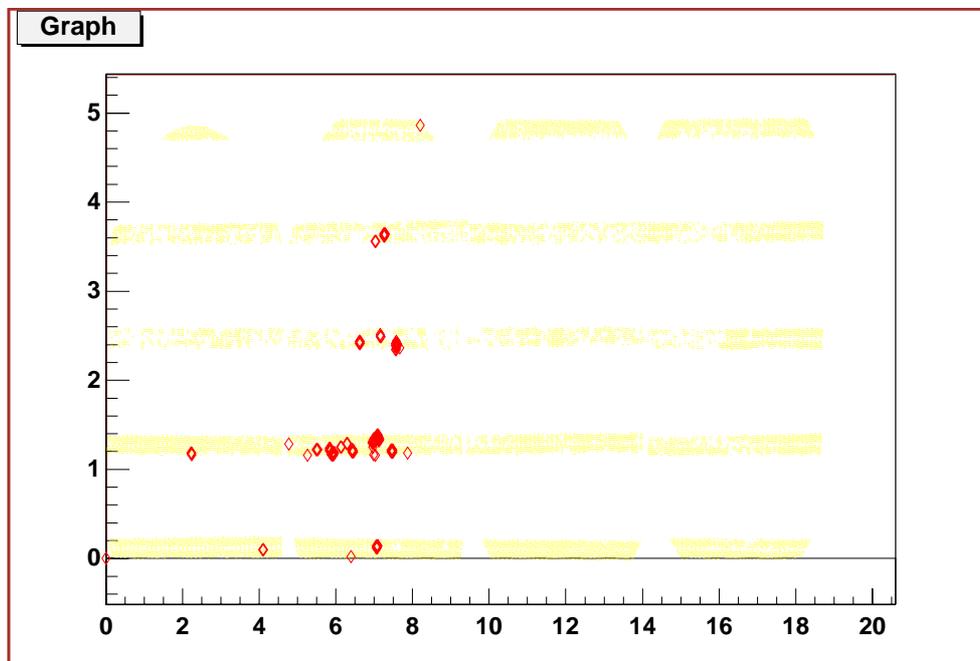


図 14: カテゴリ 2 に選ばれたイベントその 2

カテゴリ 3 の選択データ

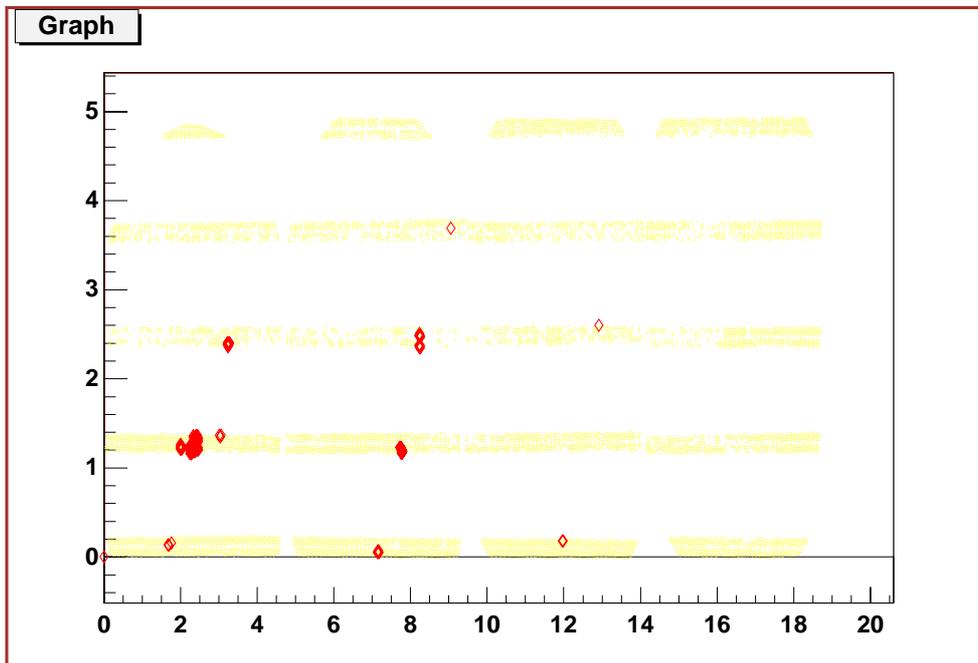


図 15: カテゴリ 3 に選ばれたイベントその 1

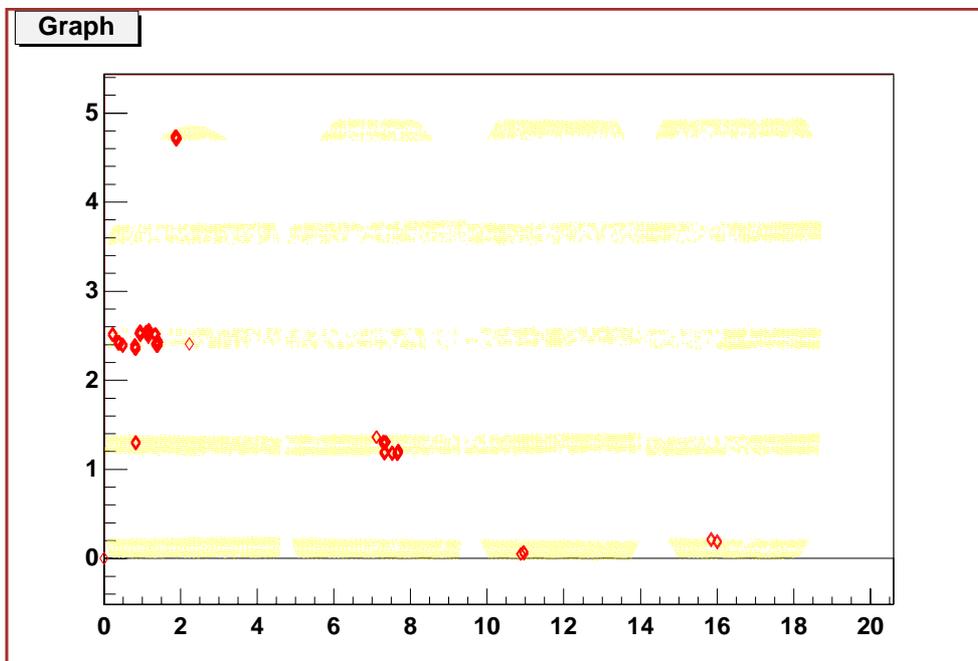


図 16: カテゴリ 3 に選ばれたイベントその 2

このグラフは縦軸は検出器の高さ、横軸は検出器の幅、を表している。単位は cm である。黄色い、色が薄い部分はシンチレーションファイバーの層、赤い、色が濃い部分は粒子の軌跡、白い部分はファイバーの間にある鉛の層を表している。

この方法によって全てのイベントを3つのカテゴリーに分けたときの割合は

カテゴリー 1 (ミュオンイベント)	: 48.6 %
カテゴリー 2 (電磁シャワーイベント)	: 3.5 %
カテゴリー 3 (多くの粒子の軌跡が映っているイベント)	: 3.3 %

となった。この方法によって分けられたイベントを個々に見て行くと確かに意図どおり分かれているイベントもあったが、そうでないイベントもかなりあった。そこで各 ADC カウントと輝点の数の関係を調べると相関関係がはっきりとは現れていなかった。

このことから ADC カウントだけでイベントを選択する方法では確かにシャワーのようなイベントもみられたが、画像データとの対応はそれだけでははっきりとはわからないと言える。

4.1.2 クラスタによるカテゴリー分け

画像データに映っている一つの輝点は、人間の目には一つに見えるがピクセルの単位で見るといくつかのピクセルの集合体である。画像データを直接扱うためにピクセルの集合体を一つの塊として表すためにクラスタを定義する。今回は大まかな分類をするためにクラスタを定義するので、その半径の最大値を 1 cm とした。そのようにしてクラスタを当てはめた画像データに次の条件を課すことによって各カテゴリーに分割する。

1. カテゴリー 1 (ミュオンイベント): 各層にクラスタが 1 個か 0 個存在するイベント
2. カテゴリー 2 (電磁シャワーイベント): 最も上の層に存在するクラスタは 1 個だけで、それより下の層では何個あってもよいイベント
3. カテゴリー 3 (多くの粒子が同時に入射してきたイベント): カテゴリー 1、2 に属さないイベント

分割のための具体的な数字は、目で見た印象をもとにして条件として定めたものである。

カテゴリー 1

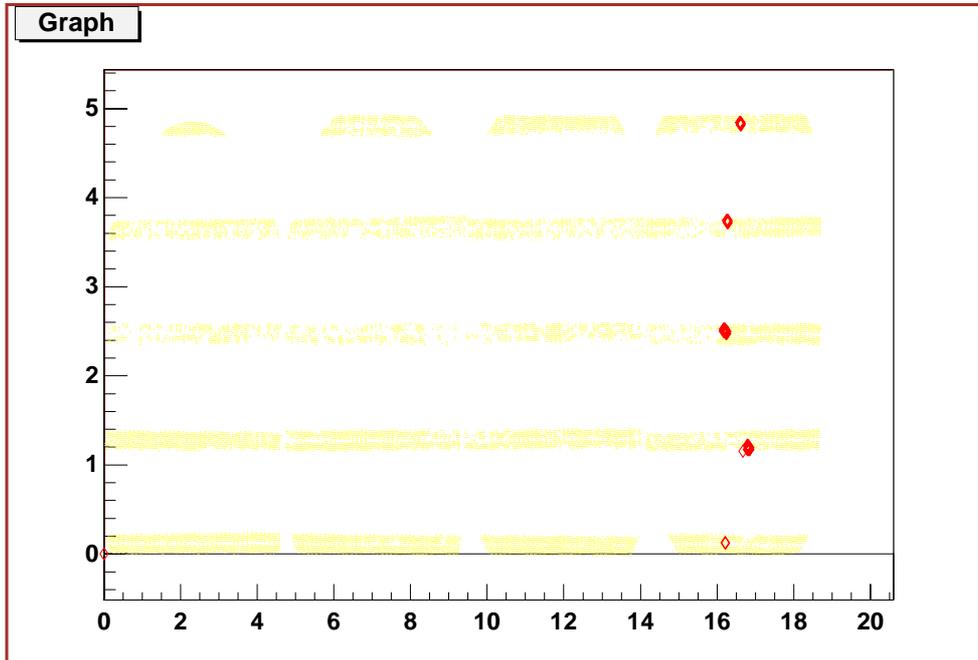


図 17: カテゴリー 1 に選ばれたイベントその 1

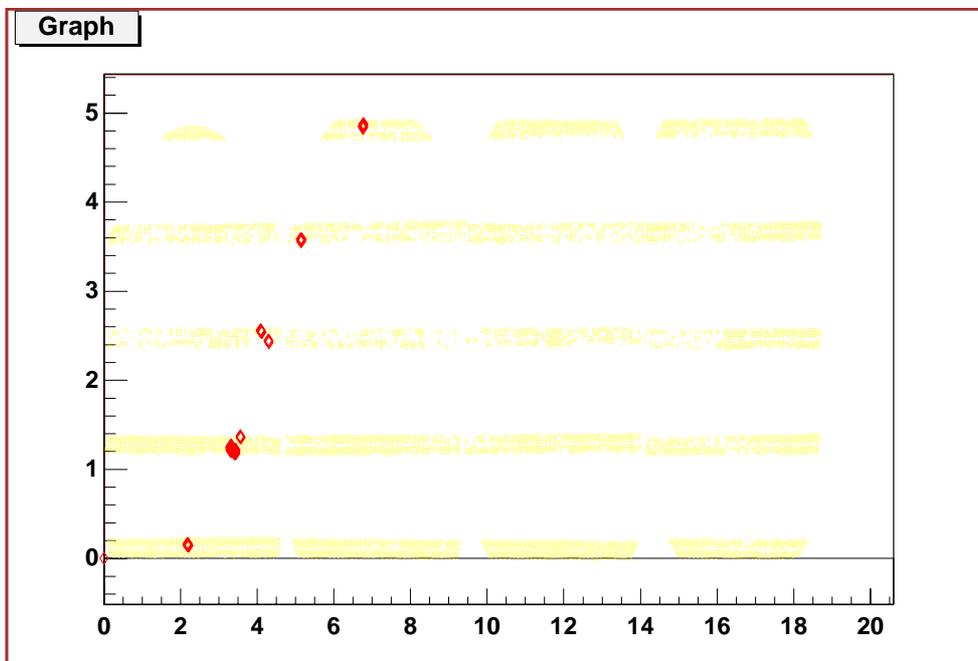


図 18: カテゴリー 1 に選ばれたイベントその 2

カテゴリー 2

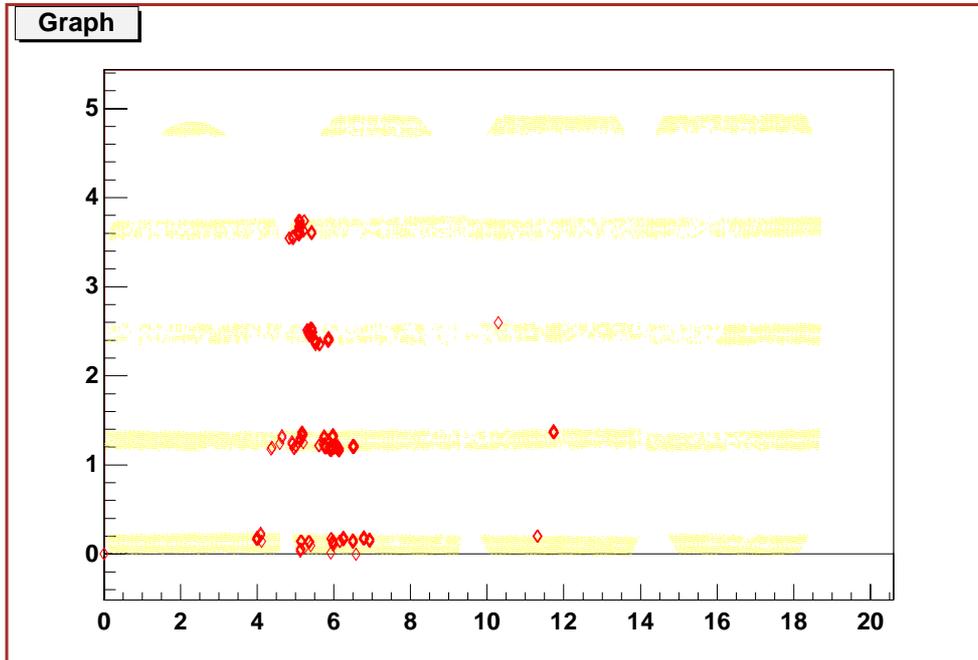


図 19: カテゴリー 2 に選ばれたイベントその 1

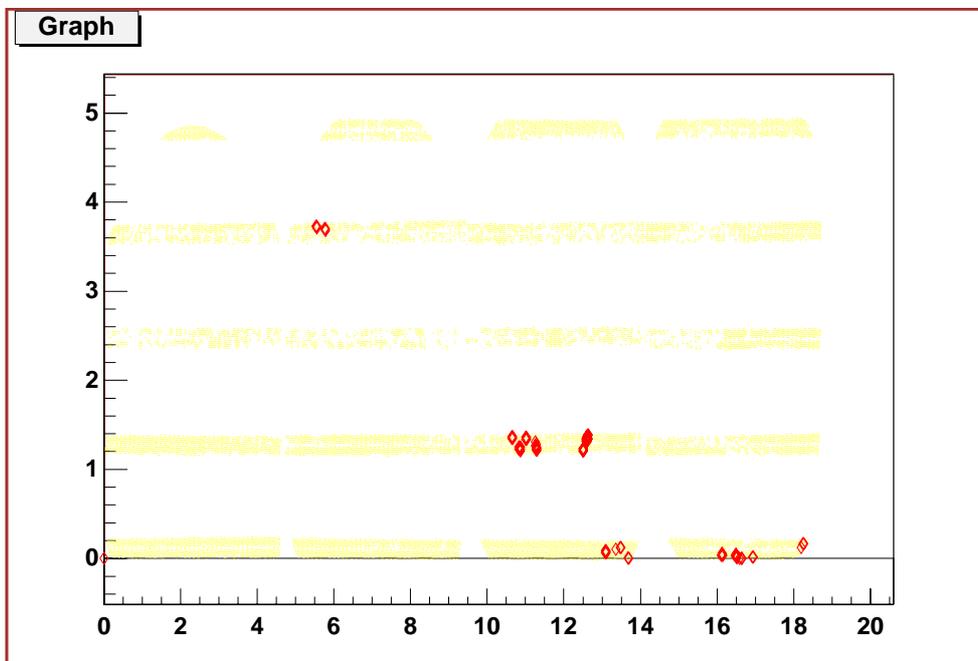


図 20: カテゴリー 2 に選ばれたイベントその 2

カテゴリ-3

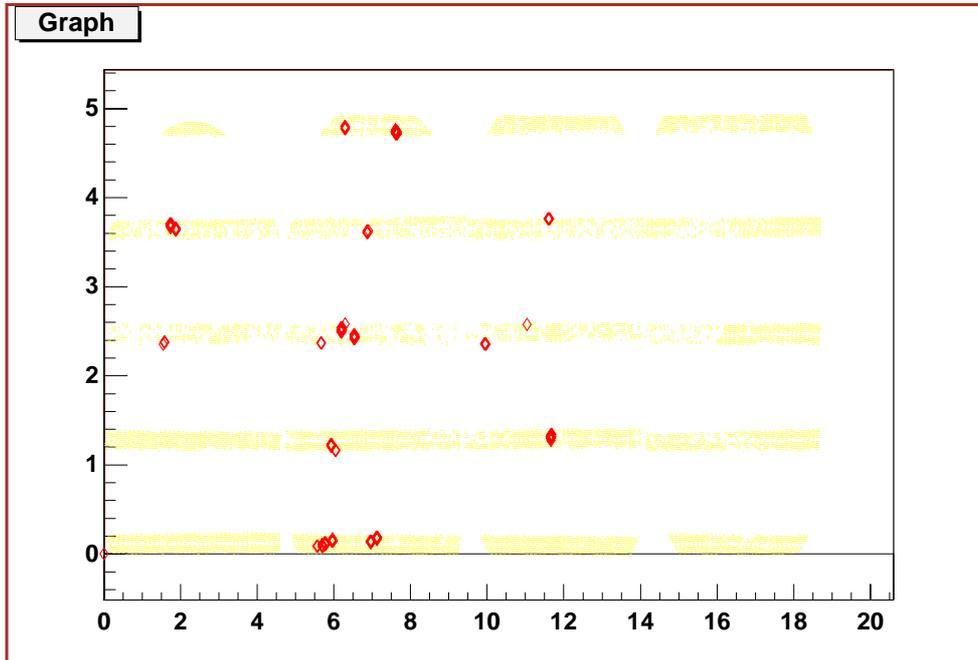


図 21: カテゴリ-3 に選ばれたイベントその 2

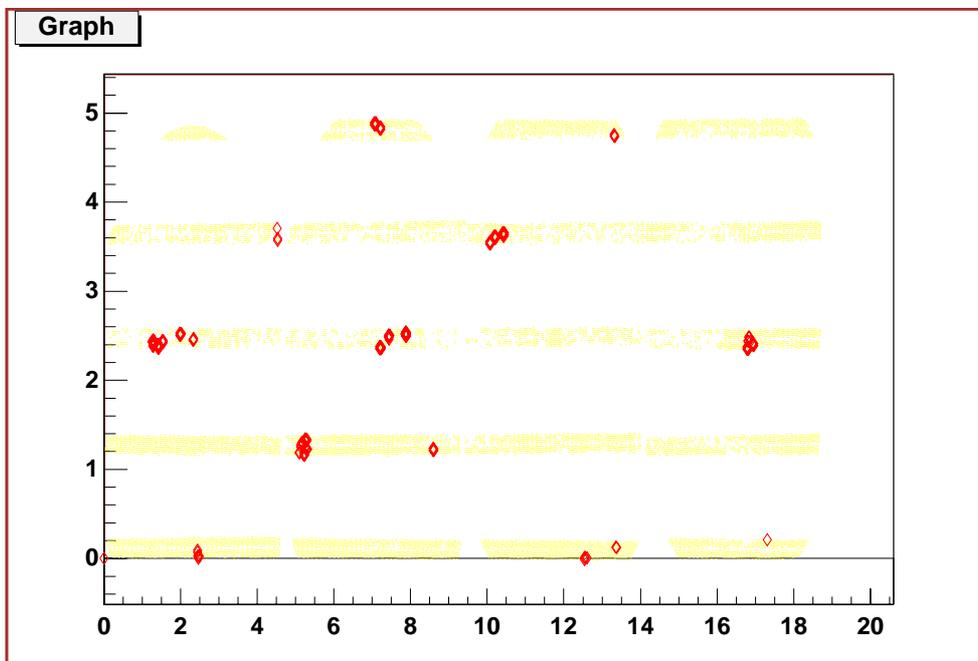


図 22: カテゴリ-3 に選ばれたイベントその 2

全てのイベントを3つのカテゴリーに分けたときの配分は

カテゴリー 1 (ミューオンのイベント)	: 51.4 %
カテゴリー 2 (電磁シャワーのイベント)	: 33.5 %
カテゴリー 3 (複数の軌跡を持つイベント)	: 14.9 %

となった。

クラスターによる方法でカテゴリー 2 に選ばれたイベントを個々に見ていくと、最も上の層にあるクラスターは一つだけなのでうまく選択できているようである。しかしこの条件に当てはまったからといって必ずしもシャワーイベントだけが選択されているわけではない。これは選択の条件があまりにも緩すぎ、またクラスターの最大半径が大きすぎることに原因があると考えられる。

最期に何も映っていない画像データがある理由は、2つ考えられる。1つは、画像をコンピュータに取り込むときに使うビデオキャプチャーカードの問題である。このカードは一般的に静止画像を取り込むために使うもので任意の瞬間的なタイミングを制御することが非常に難しい。2つめには、discriminator の threshold が低すぎて PMT のサーマルノイズによる信号が偶発的に coincidence される場合が多くなっていることが考えられる。この場合は輝点の映っていないデータが多くなるのも理解できる。しかし、2の場合は threshold をサーマルノイズより高く設定したので起こらないはずだが可能性として挙げた。このような理由のために輝点が映っているデータが捕れる割合は約 30% まで落ちてしまう。

5 まとめ

今回の実験ではミュオンの直線的な軌跡や電磁シャワーの軌跡は見えた。この実験の始めの目的である'電磁シャワーの軌跡をイメージ画像データとして取り込む'ための検出器を作るということは達成できたといえる。しかし粒子同定のためのイベントの選択はおおまかにはできたがまだまだ不完全である。

今後の課題はより正確にイベントを分類するために、今回試みた ADC カウントによる選択とクラスターによる選択を組み合わせさらに細かい条件でイベント選択を行うことである。具体的にはクラスター半径をもっと細かくする、ミュオンのイベントを選択するために輝点に直線を Fitting してその χ^2 を条件とする、最初にクラスターによって選択しその上からさらに ADC カウントを使って分類する、などが上げられる。また検出器のシミュレーションを行って粒子に対する応答をあらかじめ知っておくべきであろう。

その後最終目的として 3 次元読みだしの検出器を作製し、加速器ビームによる実験を行って位置とエネルギーに対する反応を調べる必要がある。

6 謝辞

まず本間先生、杉立先生、宮村先生には、多忙であるにもかかわらず時間を割いて、ご指導、お力添えをいただき本当にありがとうございました。

同室の金田さんにはいろいろな助言をいただき、ありがとうございました。またハドロン研究室の皆様にも良くしていただきありがとうございました。最後に平野君、君のおかげでここまでくることができました。本当にほんとにありがとう。

参考文献

[1] 宇宙線 小田 稔 著 裳華房

[2] The European Physical Journal C Volume3.Number1-4.1998.pp1-794

[3] ROOT TUTORIAL