

宇宙線観測用画像データ収集システムの開発

指導教官 宮村 修 教授

広島大学理学部物理学科
ハドロン物理学研究室

0772028G 平野 勝也

平成11年 3月 15日

Abstract

地球には高いエネルギーを持つ宇宙線が降り注いでいる。このうち地上に到達する宇宙線の主成分であるミューオンは、電子とニュートリノに崩壊する。電子は物質中を通過する際に制動放射によって光子を放出し、光子は電子対生成によって電子と陽電子を発生させる。エネルギーが非常に高ければ、電子と光子は互いにこれらの現象を繰り返し、電子及び光子が次々に増殖していくシャワー現象が起こる。シャワーの物質中での成長のしかたを知ることは、粒子の同定や入射位置の特定などを行うために重要である。そこで、宇宙線が引き起こすシャワー現象を観測するため、シンチレーションファイバーと CCD カメラを用いて宇宙線の飛跡を検出できる装置を作製し、これにより得られる画像データをコンピュータで解析して飛跡を観測するシステムを構築した。この装置を使って宇宙線の飛跡の観測を行い解析したところ、飛跡が一直線のイベントやシャワーのように見えるイベントが多数得られた。さらにこれらの様々なイベントを分類し、直線のものやシャワーイベントなどの特定のイベントを選別する方法について考察した。

目次

1	序論	3
2	宇宙線とシャワー	4
2.1	宇宙線	4
2.2	カスケードシャワー	5
2.3	シャワーの発達	5
3	検出器の製作	7
3.1	シンチレーションファイバー	7
3.2	設計	7
3.3	製作	9
4	データ収集システム	12
4.1	トリガー	12
4.2	ビデオキャプチャ	13
4.3	画像の再構成	15
5	実験方法と結果	16
6	データの解析	20
6.1	ADCによる分類	20
6.2	クラスタリング	21
7	考察	27

1 序論

高エネルギーの電子や光子が引き起こすカスケードシャワー現象は多数の粒子をつくり出すため扱いがやっかいである。特に宇宙線によって引き起こされるシャワー現象となると、いつどこで発生するのも分からないため、さらに扱いにくい。しかしシャワーの発達の様子を詳しく観測し、粒子の位置を正確に知ることができる装置があれば、粒子の同定やエネルギーの決定などの研究に有用である。

本研究では宇宙線をとらえその飛跡を観測できる検出器を作製し、データの自動収集と得られる画像を処理して飛跡の再構成を行うシステムの開発を行った。そしてこの装置を駆動して実際に得られたデータを解析し、宇宙線が透過した跡やシャワーらしき事象を得られることを確認した。さらに観測データから手に入れた事象を選別するための方法について考察した。

本論文では、2章で宇宙線とシャワー現象について触れ、3章で検出器の設計、4章・5章でそれぞれデータの収集方法と画像処理について、6章でデータの分類と選別について述べた。

2 宇宙線とシャワー

2.1 宇宙線

宇宙空間から地球に降り注ぐ宇宙線は、宇宙から直接飛来する宇宙線 (一次宇宙線) と、大気中の原子核と一次宇宙線が相互作用してできる二次宇宙線とに分けられる。地球は厚い大気層に覆われているため、一次宇宙線がそのままの姿で地上に到達することはほとんどない。また二次宇宙線の多くは、地上に到達する前に大気中で吸収されてしまう。

一次宇宙線は空気の原子核と衝突して原子核を構成している核子をたたき出し、パイオン (π) 及びケイオン (K) をつくりだす。パイオンは中性のものと電荷を持つものがあるが、中性パイオンはただちに崩壊して γ 線 (光子) になる。荷電パイオンはミューオン (μ) とニュートリノ (ν) に崩壊する。ミューオンは原子核とほとんど相互作用しないので、大気中の長い距離を空気を電離しながら走り、その大部分が吸収されずに地上に到達する。

ミューオンは、質量 $m_\mu = 106$ [MeV]、寿命 $\tau_\mu = 2.2 \times 10^{-6}$ [sec]、スピン $1/2$ のフェルミオンで、崩壊すると電子 e とニュートリノ ν 、反ニュートリノ $\bar{\nu}$ になる。

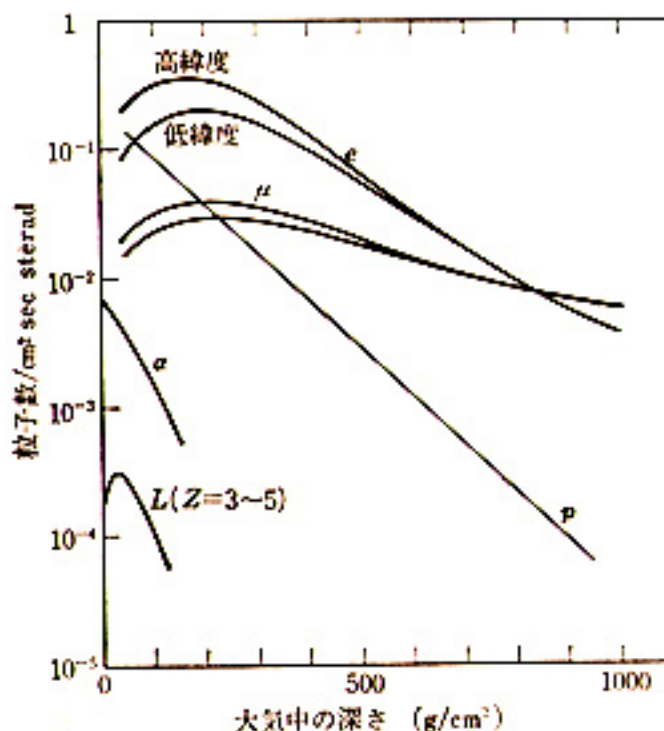
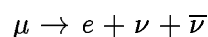


図 1: 宇宙線の主な成分。横軸の大気の高さというのは、単位面積あたりの大気頂上からの空気の質量、つまり大気圧である。約 1000g/cm^2 が 1 気圧すなわち地上である。

2.2 カスケードシャワー

電子が高速度で走っているとき、原子核の近くを通ると散乱によって進路が急激に曲げられ、電子のまわりの電磁場がふり落されて光子が放射される。これを制動放射という。電子が原子核から原子半径より大きいところを通ったとすると、原子核の電荷は軌道電子によって打ち消されているので制動放射は起こらない。よって、制動放射がおこるのは、電子が原子核から原子半径以内、つまり原子の軌道電子よりも内側を通過したときである。

光子は光電効果やコンプトン散乱によりエネルギーを失っていくが、エネルギーが電子の静止エネルギー mc^2 の2倍を越えると、電子と陽電子の1対を生成する電子対生成を起こすことができる。

このように、電子が制動放射で光子を出し光子が電子対生成で電子を生む、という過程を繰り返すことによって電子と光子の数が急激に増加してゆくカスケードシャワーが起こる。

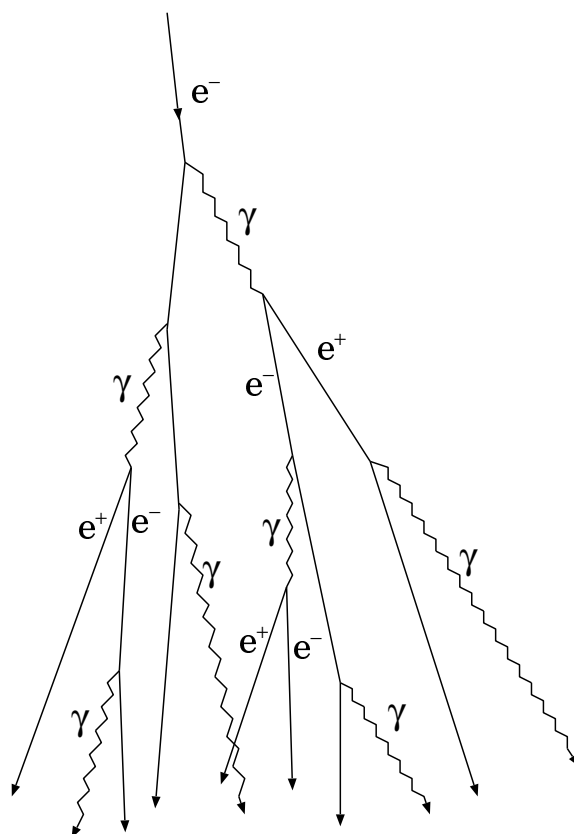


図 2: カスケードシャワー

2.3 シャワーの発達

物質中でのシャワーの発達の程度を知るのに有効な量として radiation length(輻射長) X_0 がある。これは、電子が X_0 だけ走ると制動放射によってエネルギーが $1/e$ になるという

距離である。つまり電子がその物質中を X_0 進むと、光子をいくつか放出することによってエネルギーが $1/e$ になるわけである。 X_0 は、近似的に次の式で与えられる。

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

ただし、 A は物質の質量数、 Z は原子量である。

また電子は制動放射だけでエネルギーを失うわけではなく、物質をイオン化することによってもエネルギーを失う。制動放射によってエネルギーを失う割合と、イオン化によってエネルギーを失う割合が等しくなるエネルギーを **critical energy**(臨界エネルギー) E_c と呼ぶ。エネルギーが E_c 以下になると制動放射を起こしにくくなるので、光子をそれ以上放出しなくなり、シャワーの発達が始まる。 E_c の近似式は、

$$E_c = \frac{800}{Z+1.2} \text{ [MeV]}$$

である。

シャワーの横方向の発達を記述する量として、Moliere 半径 R_M があり、

$$R_M = \frac{E_s}{E_c} \times X_0 \text{ [g/cm}^2\text{]}$$

と表される。ここで E_s は **scale energy** とよばれ、 $E_s \approx 21.2$ [MeV] である。シャワーの広がり、シャワーの元になった電子(または光子)を軸としてそこから半径 R_M 以内に約 90% 収まることが知られている。

これらの式より得られる値を、鉛とアルミニウムについて表 1 に示す。

表 1: 鉛とアルミニウムの X_0 、 E_c 、 R_M の値

物質	密度 [g/cm ³]	X_0 [g/cm ²]	E_c [MeV]	R_M [g/cm ²]
Pb (Z=82, A=207)	11.5	6.31 (0.54cm)	9.6	13.6 (1.19cm)
Al (Z=13, A=27)	2.69	24.3 (9.03cm)	56	9.04 (3.36cm)

3 検出器の製作

3.1 シンチレーションファイバー

荷電粒子の検出には、シンチレーターがよく使われる。シンチレーターとは、物質中の原子または分子が荷電粒子の通過によって励起し、この励起準位より低いエネルギー準位に落ちるときに光を放出する(シンチレーション)物質である。

今回製作する検出器には、直径1 mmの細長い円柱状をしたプラスチックシンチレーター(ファイバー)を並べて固定し、板状にしたシンチレーションファイバー(図3)を用いることにした。

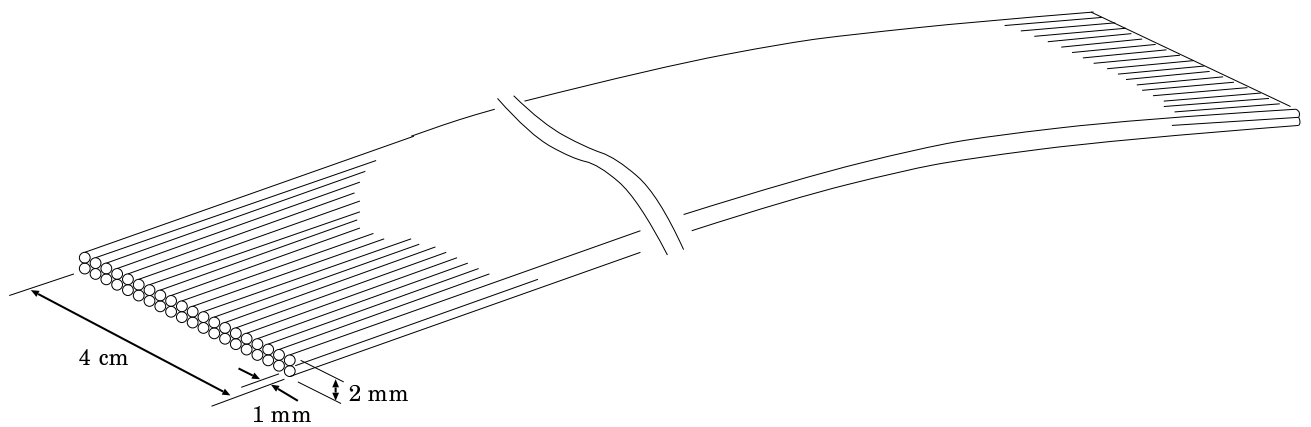


図3: シンチレーションファイバー。直径1 mmのファイバーが横に40本、縦に2本並んで板状になったものがシンチレーションファイバーの一層を構成している。

一本のファイバーに荷電粒子が飛び込んでくると、その部分から光が放射され、全反射によってそのファイバーの端の部分まで光が伝達される。だからファイバーをたくさん並べておいても、粒子が通過したファイバーだけが光るのである。よって、端の断面の部分でどのファイバーが光ったかを見ていれば、粒子がどこを通ったか分かる。その観測のためにはCCDカメラを使う。だがそのままではファイバーの光は弱すぎるので、CCDカメラのレンズの部分にイメージインテンシファイアー(I.I.T.)を取り付けたものを使った。I.I.T.とは、入射してくる映像を、座標を保ったままその光を増幅するものである。I.I.T.のレンズ面にシンチレーションファイバーの断面を密着させてCCDからの映像を見れば、宇宙線がファイバーを通ったとき、宇宙線が通ったところに輝点が見えるはずである。このシンチレーションファイバーをたくさん積み重ねれば宇宙線の飛跡を追うことができるだろう。

3.2 設計

今回製作する検出器は、宇宙線のミュオンが検出器内で偶然崩壊して電子になり、その電子がシャワーを作るところを観測できることを目標とした。そのため、地上に降って

くるミューオンの強度の式を用いて検出器内で崩壊するミューオンの数を見積もった。

ある方向からくる宇宙線粒子の強度は、その方向の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数で定義される。ミューオンの強度 I は、エネルギーを T とすると、経験則として

$$I = \frac{b}{(T+a)^2} \quad (1)$$

で与えられる。ただし a 、 b は定数で、 $a = 5$ 、 $b = 0.18[\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}\text{sterad}^{-1}]$ である。また式 (1) は積分スペクトルである。つまり T 以上のエネルギーを持つミューオンの強度を示す。

この式を用いて、検出器内で崩壊をおこすミューオンの数が計算できる。まず観測時間 t [sec] 内に検出器に入射するミューオンの数 N_0 は、強度 I [$\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}\text{sterad}^{-1}$] に検出器の表面積 S [cm^2] と観測時間 t 、検出器の底面から表面を見上げる立体角 Ω [sterad] をかければよい。ここで、立体角は検出器の高さを d [cm] とすれば $\Omega \approx S/d^2$ と書けるので、 N_0 は表面積の二乗に比例し、高さの二乗に反比例する。

次に、検出器内で崩壊するミューオンの数 N は、

$$N = N_0(1 - e^{-t/\tau}) \quad (2)$$

で与えられる。 τ はミューオンの重心系での寿命なので、 $\tau = \gamma\tau_\mu$ である。

γ は

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (3)$$

である。またここでの t はミューオンが検出器内を通過する時間のことなので、ミューオンの速度を v [m/s] とすれば $t \approx d/v$ である。よって v が分かればある検出器の大きさに対する N の値が分かる。

v を決めるために、静止系でのミューオンの全エネルギー E と走っているミューオンの系での全エネルギー E' を考える。ミューオンの運動エネルギーを T 、質量を m_μ とすると、

$$E = T + m_\mu c^2 \quad (4)$$

$$E' = m'c^2 \quad \text{ただし、} m' = \gamma m_\mu \quad (5)$$

となる。 $E = E'$ だから、

$$\gamma = 1 + \frac{T}{m_\mu c^2} \quad (6)$$

よって、式 (3)、(6) より

$$v = \beta c = c \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{T}{m_\mu c^2}\right)^2}} \quad (7)$$

が得られる。

図 4 は、式 2 を用いて、1 日あたりに表面積 $16\text{cm} \times 16\text{cm}$ 、高さ 5cm の体積内で崩壊するミューオンの数を計算しミューオンのエネルギーに対してプロットしたものである。

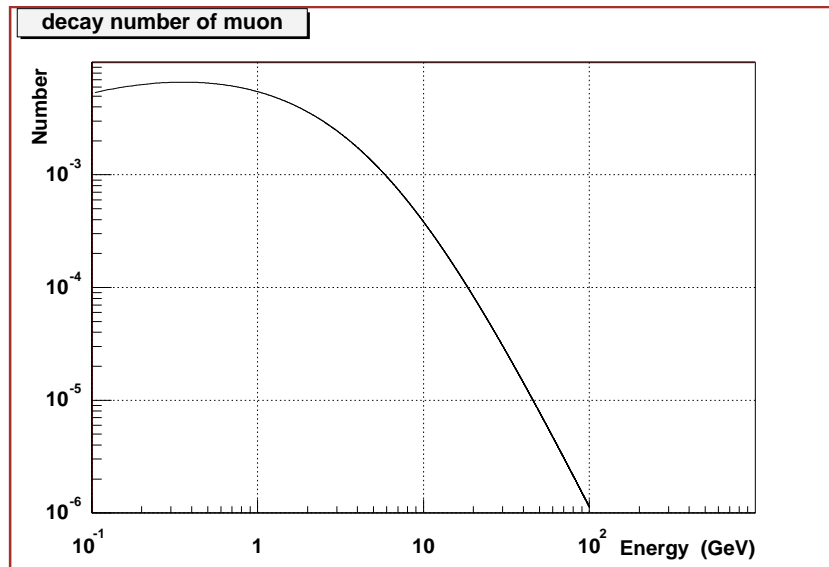


図 4: 検出器内で崩壊するミューオンの数

これより、 $16\text{cm} \times 16\text{cm} \times 5\text{cm}$ の検出器内に $100\text{MeV} \sim 100\text{GeV}$ のミューオンが 1 日あたり約 2 個崩壊する、という結果になった。

また、検出器内でシャワーが発達してほしいので、シンチレーションファイバー各層の間に厚さ 4 mm (約 $0.7X_0$) の鉛板をはさむことにした。

3.3 製作

実際に製作した検出器の形状は、横から見ると図 5 のようになる。宇宙線をとらえるセンサー部分は、面積が $16\text{cm} \times 16\text{cm}$ 、高さ 5 cm にした。だが CCD で観測する部分がセンサー部と同じ大きさのままだと、全ファイバーを一つのカメラのレンズの大きさに納めることができないので、シンチレーションファイバーの一層は図 6 のような形をしている。センサー部分はファイバーを横に 4 枚並べ、ファイバーの光を観測するほうの断面は、I.I.T. のレンズに収まるように縦に積み重ねてある。

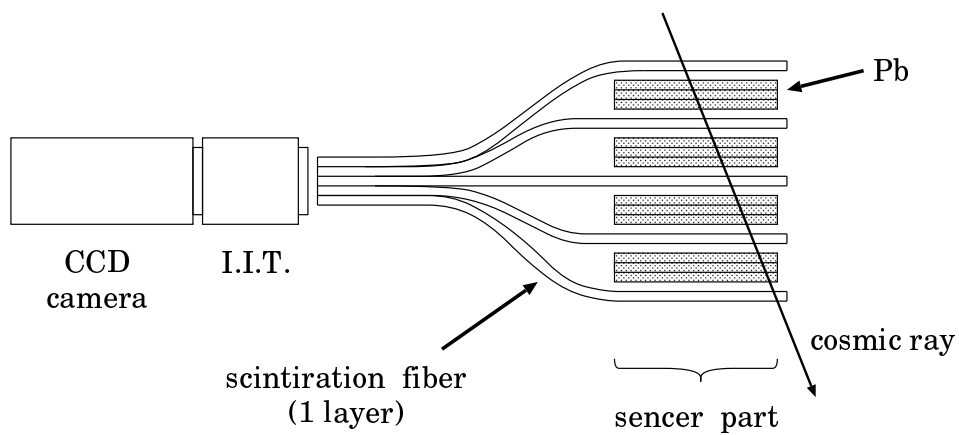


図 5: 検出器の概念図 (横から見た図)

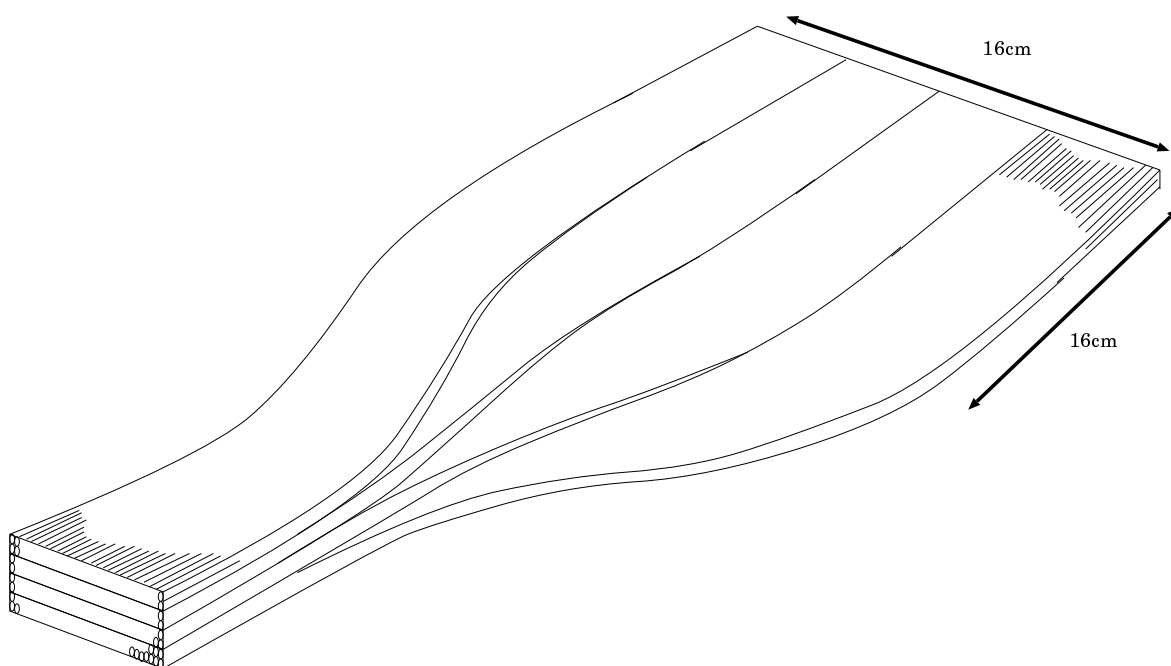


図 6: シンチレーションファイバー一層

これと同じものが5層あり、これらを図7のように重ねてある。観測面はファイバーをまとめて CCD カメラの (正確には I.I.T. の) レンズに密着させる¹。

¹接着面には光学グリスを塗る。

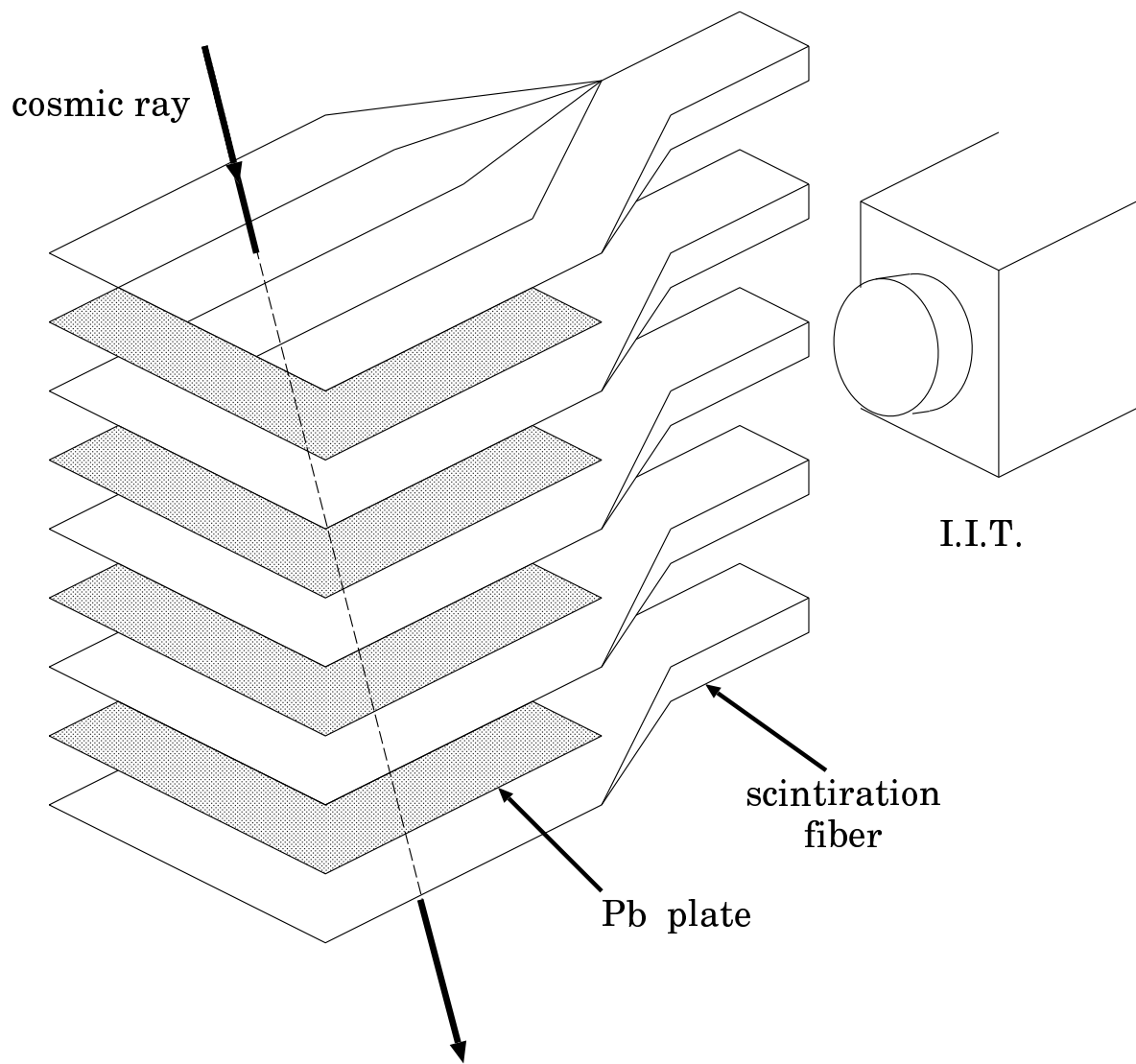


図 7: 検出器の概念図

4 データ収集システム

前節で述べた検出器を用いて宇宙線の観測を行うシステムを構築するために、コンピュータ²と、エレクトロニクス機器のCAMAC(Computer Automated Measurement and Controlの略)を使用した。

4.1 トリガー

宇宙線が検出器を通ったときだけ画像をとりたいので、シンチレーションカウンターを用いてトリガーをかけることにした。検出器の上に2つ、下に1つのシンチレーションカウンターを置いて、上からトリガー1、2、3と名前をつける。これらのトリガーカウンターに宇宙線が入射すると、トリガーカウンターはそのエネルギーに応じた信号を出す。トリガー1、2、3がほぼ同時に反応したときこそまさに宇宙線が検出器を通過したときであると考えられる。今の場合、3つのトリガーカウンターからの信号の論理ANDをとり(Coincidence回路を用いる)、その結果が真になればこの条件を満たしたことになる。

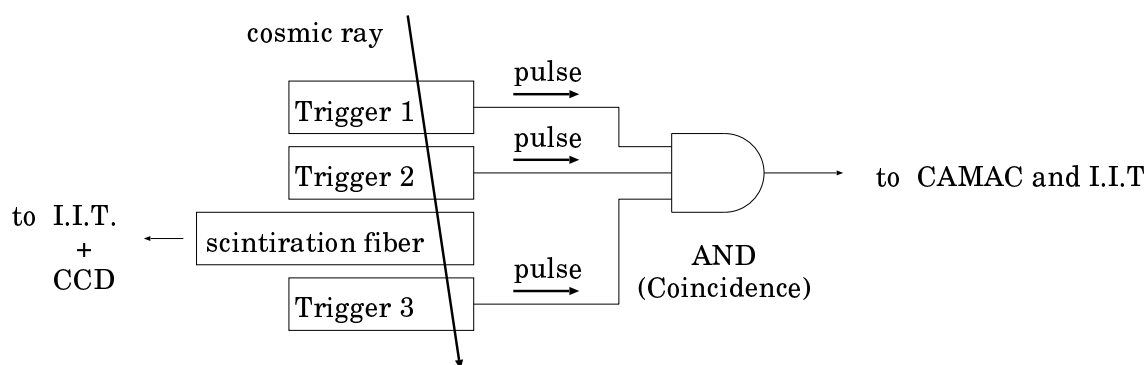


図 8: トリガーシステム

これらトリガーカウンターからの情報を扱うために、計測機器としてCAMACモジュールを利用した。CAMACとはオンライン計算機を用いて測定と制御を自動化するためのエレクトロニクス機器の規格である。CAMACのためのソフトウェアを作れば、個々のモジュールをコンピュータ上で制御できるので、データ収集を自動化することができる。CAMACモジュールのADC(Analog to Digital Converter)を使えばトリガーを通過した宇宙線のエネルギー情報が得られ、TDC(Time to Digital Converter)を使って時間情報を得ることができる。これらは本物の宇宙線事象かノイズ³かの判別に使える。たとえば、もしトリガーをかけてとれたデータのトリガー1と2を通った時間の差があまりにも大きければ、本物の宇宙線が通ったイベントだとは言えないだろう。

²OSにはLinuxを採用した。

³I.I.T.やトリガーカウンターに使われている光電子増倍管のサーマルノイズなどが考えられる。

また CAMAC モジュールは、入力信号があるとそのことを知らせる信号が発生する。これは LAM(Look At Me) と呼ばれ、LAM が発生することを LAM が立つと言う。LAM はコンピュータからクリアー命令が送られるまで立ちっぱなしである。この LAM を利用してコンピュータに宇宙線が通ったことを知らせることができる。そのためには、3つのトリガーの論理積が真だったとき CAMAC モジュールに信号を送って LAM を立たせればよい。コンピュータは CAMAC モジュールの LAM の状態を調べに行き、LAM が立っていればトリガーにかかったイベントであると判断できる。その後 LAM をクリアーすれば、次回も LAM を利用できる。

LAM を利用すればコンピュータや計測機器が内部処理をしている間はデータをとらない、といったことも可能で、それには interrupt register を使えばよい。だが今回は interrupt register が使用できなかったので、トリガーがかかった瞬間から 0.1 秒間はデータをとらないような設定にした。これは、次のような仕組みである。まず Coincidence 回路からの出力信号の 1 つを GateGenerator(G.G.) へ送り、G.G. は入力信号があった瞬間から 0.1 秒間信号を出す。この信号を Coincidence 回路の Veto 入力に入れ、トリガー 1～3 と Veto との AND をとるようにする。Veto 入力は、入力信号があったときに偽、ないときは真になる。つまり、Coincidence 回路は、3つのトリガーからの信号を同時に受けた瞬間は真になり出力信号を出す。その出力信号が G.G. を経由して Veto に入ってきた瞬間、偽になり出力を出さなくなる。こうして 3つのトリガーが反応してから 0.1 秒の間は、たとえトリガーにかかったイベントが発生しても出力信号が出ず、データをとらない (図 9)。

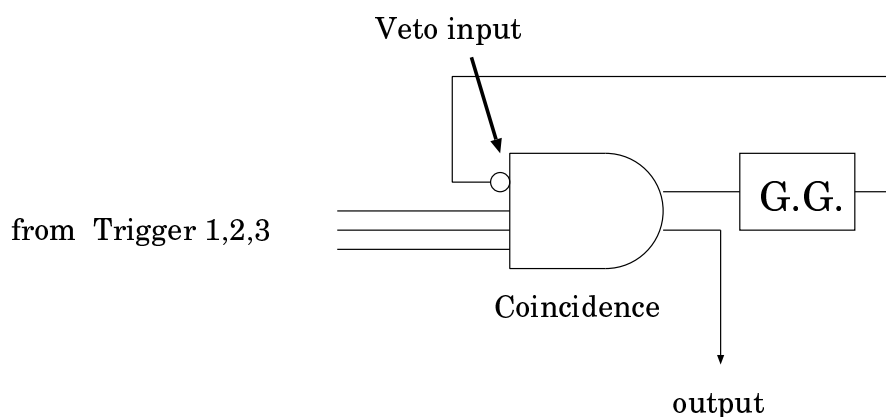


図 9: Veto を使った回路

4.2 ビデオキャプチャ

CCD カメラから流れてくる画像データはビデオ信号なので、これをそのままビデオデッキへ入力すればテープに録画することができる。しかしデータが大量にあるときなど全て目で見ていくわけにはいかない。データをコンピュータで処理することにする。

画像データをパソコンに取り込むために、ビデオキャプチャカード (I・O DATA 社製

GV-VCP/PCI)⁴を使った。ビデオキャプチャカードとは、アナログのビデオ信号をデジタル化してパソコンに取り込むためのものである。

ビデオキャプチャで取り込んだ画像データはビットマップ形式で保存される⁵。これは各画素 (ピクセル) の明るさを数字で表現する形式である。ここでは色の情報は無いので、とれる画像は光が強いところほど白く見える⁶。また画像の大きさは 320×240 ピクセルである。

図 11は検出器をセットし、ファイバーにβ線をあててファイバー全体を光らせ、映像の中のファイバーの位置を示したものである。

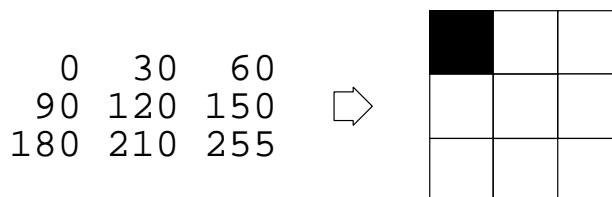


図 10: pgm フォーマットの画像の例。1つの数字が1ピクセルに対応する。

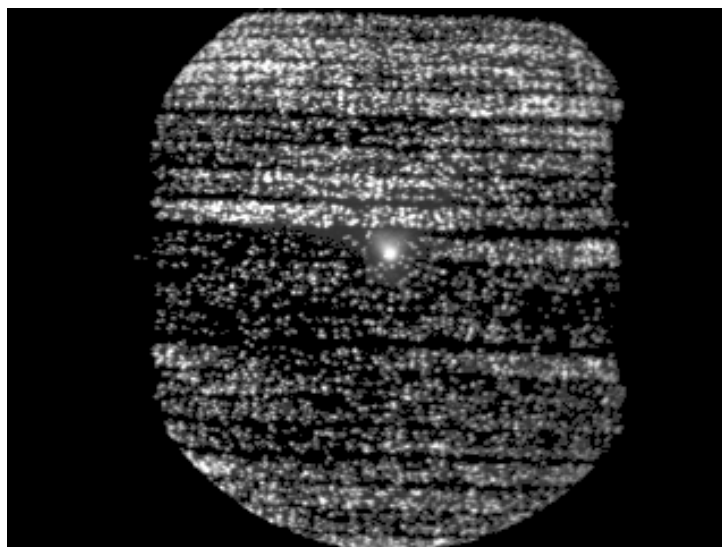


図 11: CCD から得られる画像の中でのファイバーの位置を示す絵。中央の明るい点は I.I.T. の特性によるもので、トリガーをかけて使用すれば現れない。

⁴Brooktree 社の Bt848 チップを使用しており、Bttv というドライバを用いて Linux で制御することができる。

⁵他の形式でも保存可能。

⁶これはグレースケールとよばれ、各画素について 256 段階の明るさの情報 (黒 0 ~ 255 白) だけをもつ (pgm フォーマット)。図 10を参照。

4.3 画像の再構成

この装置で得られる画像は、ファイバーの並び方から分かるように (図 6)、センサー部分の位置関係を保持していない。飛跡を見るためには画像を再構成する作業が必要である。そのため次のような考え方でプログラムを作った。

1. ファイバー全体が光っている画像 (図 11) とファイバーの断面の写真をてらし合わせ、画像上のファイバーの位置を特定する。
2. 各層の両端にあるファイバーの中心の座標を調べる。
3. ある層に着目する。横一列に並んだ各ファイバーの中心が両端のファイバーを結ぶ直線上にあると仮定し、その間をファイバーの本数分に等分して各々のファイバーの中心座標とする。これを繰り返して全てのファイバーの中心の座標を決める。
4. とれた画像から光った点 (輝点) の座標を調べ、それをファイバーの中心座標と比べる。あるファイバーの中心座標から一定の範囲内に輝点があれば、そのファイバーが光ったものとする。
5. 光ったファイバーが第何層目のものか調べ、何層目かに応じて輝点の座標を平行移動して元の位置関係を再現する。

この方法ではどのファイバーにも属さず変換できない輝点が出てくる。そのような輝点は、一番近いファイバーに属するとしてむりやり変換することもできるが、間違った位置に変換される可能性が高いので変換を行わなかった。

5 実験方法と結果

前節までに述べた装置と考え方でデータの収集を行った。装置全体の概念図を図 12に示す。

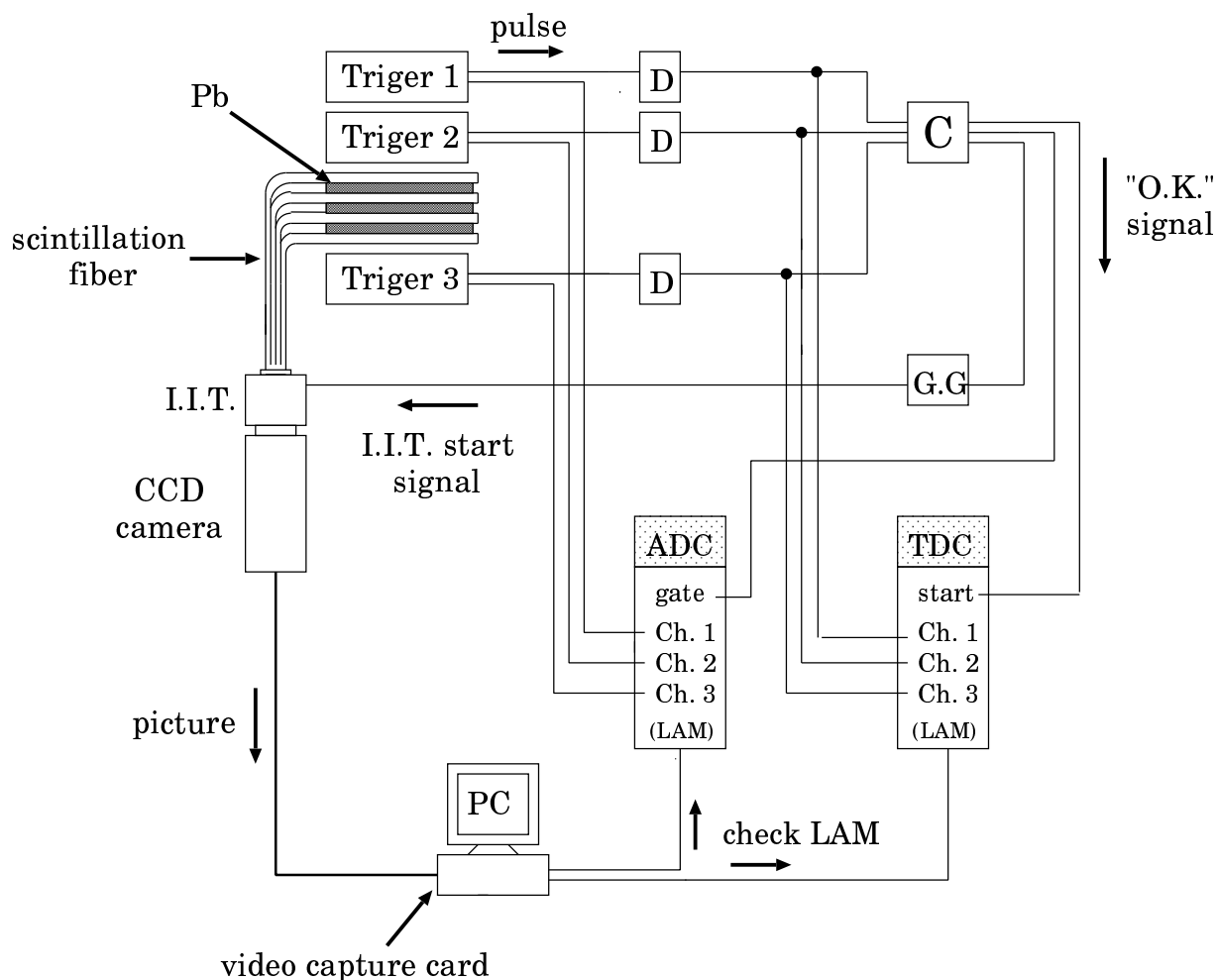


図 12: 装置全体の概念図。D は discriminator、C は coincidence、G.G は gate generator を示す。

データ収集はコンピュータと CAMAC によって自動化されており、その流れはトリガー側とコンピュータ側に分かれる。

まずトリガー側の流れを示す：

1. 宇宙線がトリガーカウンターを通り、トリガーが信号を出す。
2. 3つのトリガーの論理積 (coincidence) をとり、真だったら coincidence 回路が信号を出す。

3. coincidence 回路からの信号が Gate Generator を経由して I.I.T. に到着する。
4. I.I.T. が動作してシンチレーションファイバーの光を増幅し、画像が CCD からコンピュータに送られる。

次にコンピュータ側は：

1. コンピュータが CCD から流れてくる画像を拾う (メモリに格納する)。
2. ADC、TDC の LAM を見に行き、LAM が立っていたら拾った画像を保存する。
3. ADC count、TDC count を読み、ADC と TDC をクリアーする。
4. 保存した画像が何も映っていない、またはほとんど映っていないものだったらそれを消去する。

この手順をひたすら繰り返す。ここで、画像が「何も映っていない」ということの定義は、その画像ファイルの個々のピクセルの値が 50 を超えるものが 1 つもなかった、ということである。50 というしきい値は、実際にとれた画像の各ピクセルの値の大きさに関してヒストグラムをつくり、それをもとにして決定した。(図 13)

図 14 に何も加工していない生データの例を、図 15 に図 14 の輝点の座標とファイバーの位置を示す図を、図 16 に座標の変換を行って検出器のセンサー部分での飛跡を再現した図を示す。薄く影がかかっている部分がシンチレーションファイバー層が存在する場所で、その他の部分は鉛板などがある不感部分である。

20 日間にわたる測定の結果、約 26000 枚の画像が得られた。またトリガーにかかった全イベントのうち何らかの光が映っていた画像の割合、すなわち検出効率は約 30% だった。変換後の画像の中で、輝点が存在するファイバー層の数は 1 枚あたり平均 3.6 個、各ファイバー層ごとの輝点が存在する確率は下の層から 56%、85%、89%、83%、48% という結果になった。

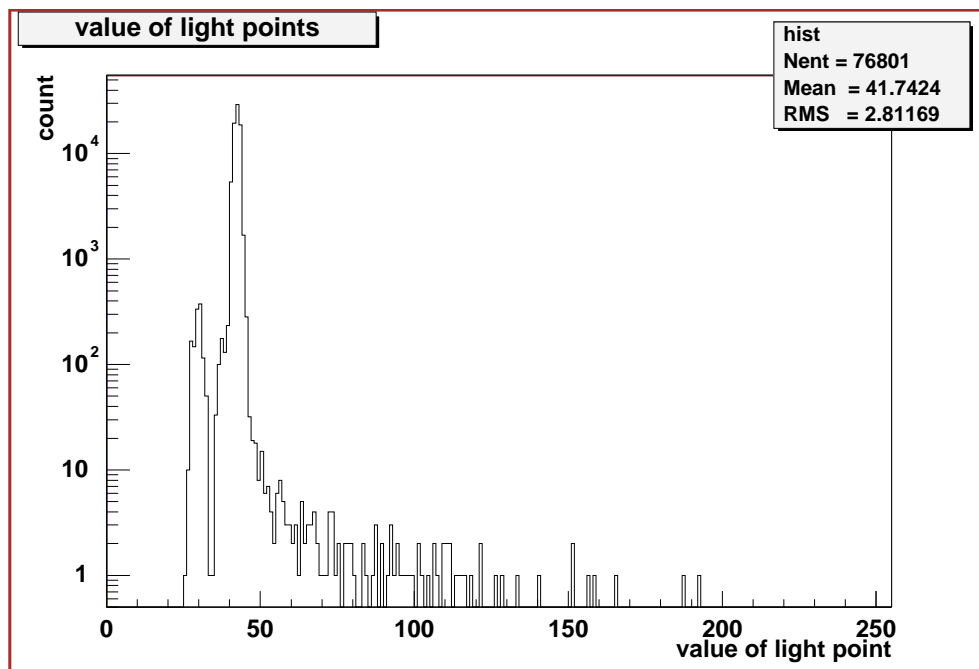


図 13: 輝点の値の度数分布。値が 50 以下のところに 2 つのピークがあるが、40 付近のピークは画像の大部分を占める暗い部分である。また生データの左右両端は他よりも暗くなっている、これが 20 ~ 30 付近のピークになっている。



図 14: 生データ。実際の位置と上下が反転している。

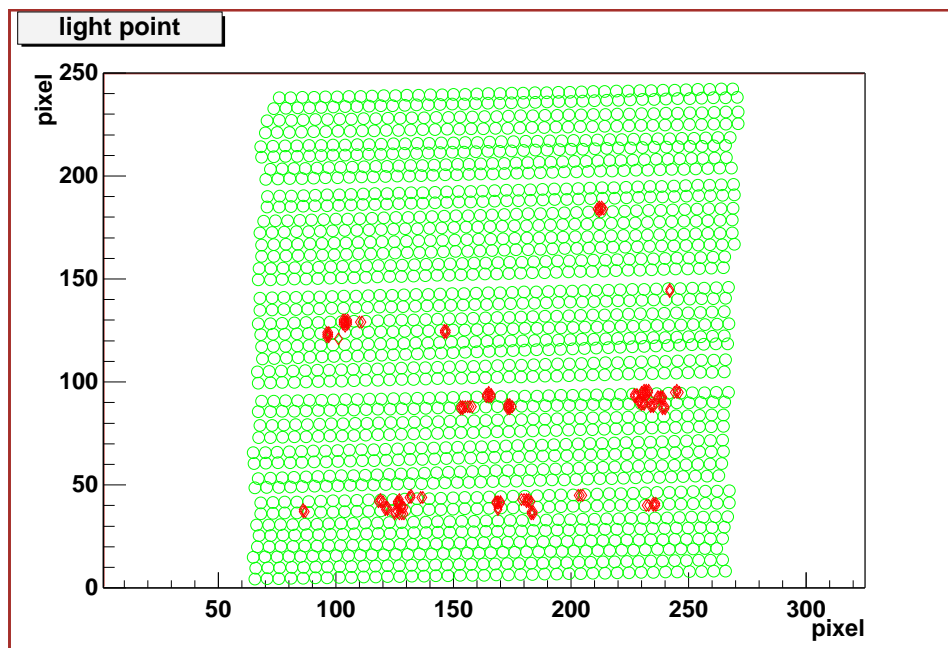


図 15: ファイバーの位置と輝点の位置を示す絵。1 pixel は約 0.2mm で、うすい丸印がファイバーの位置を、黒い印が輝点を表す。

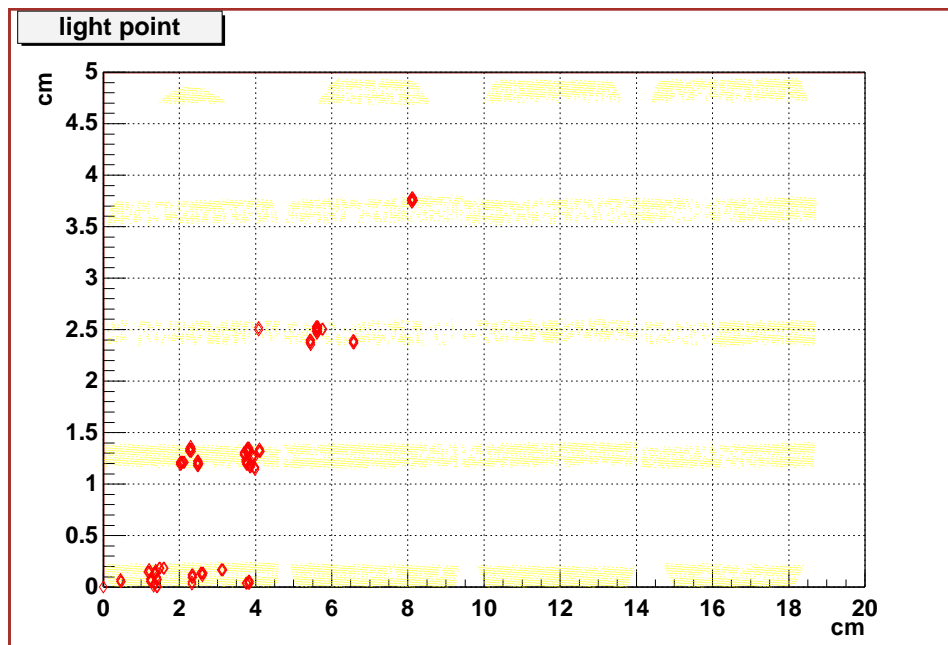


図 16: 変換後の画像。薄く影がかかっている部分はファイバーが存在する場所である。

6 データの解析

得られた大量のデータを全て目で見てチェックすることは難しい。そこでデータを大まかに分類するプログラムを作り、ストレートイベント(飛跡が一直線のイベント)とシャワーイベントを選別することを試みた。

6.1 ADC による分類

トリガー1、2、3のADCカウンットの分布を図17に示す。

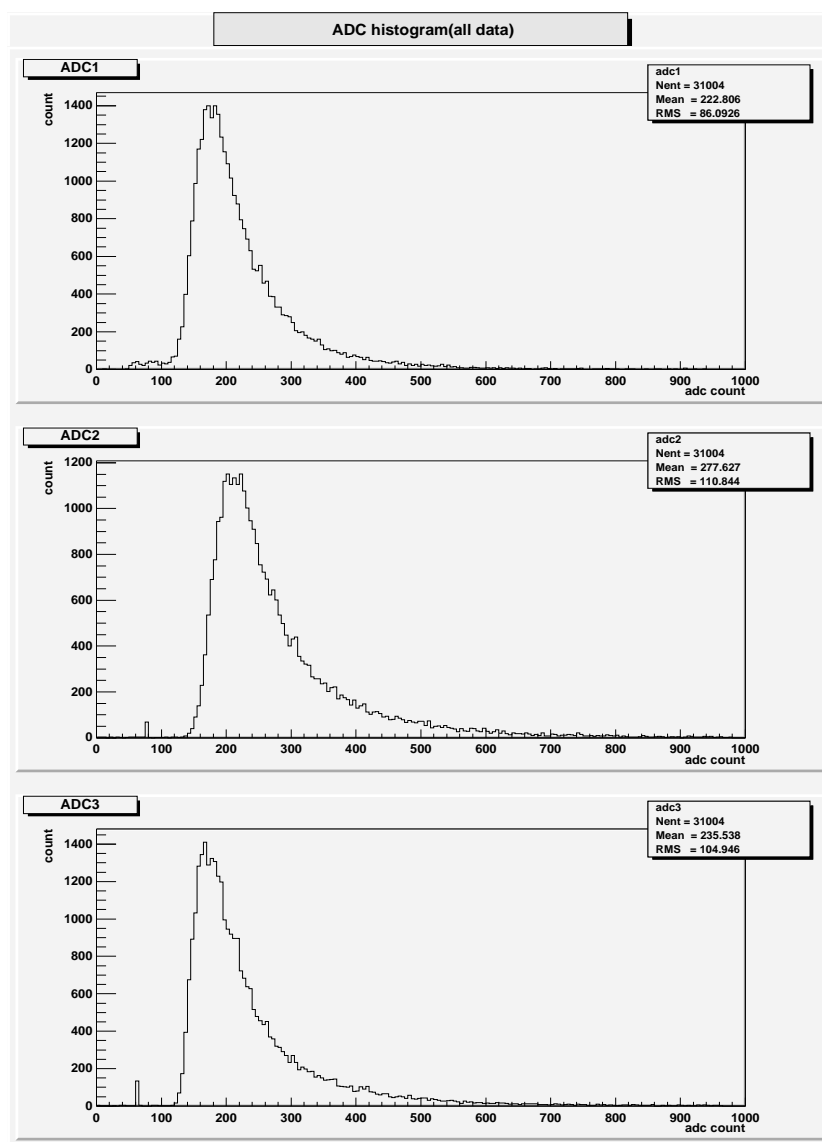


図 17: ADC カウンットのヒストグラム

この ADC 情報をもとに、データを、ストレートイベント、シャワーイベント、一度にたくさんの粒子が入射するイベント、の 3 種類に分類することを試みた。

まずストレートイベントだが、相対論的に扱える ($\beta = v/c$ として $1/\beta^2 \approx 1$ になる) ミューオンが ADC に落とすエネルギーは常に同じくらいなので、このケースでは各 ADC の値は同じくらいでかつヒストグラムのピークを占めると思われる。すなわち図 17 で ADC の値 (横軸) が 100 から 300 くらいにあるものだろう。シャワーイベントは、入射してくるのは一粒子で出て行くときはたくさんの粒子になっているものと思われるから、ADC 1、2 はストレートイベントと同様の値で ADC 3 は大きな値を持つだろう。多数の入射粒子があるイベントは、全てのトリガーカウンターで大きなエネルギーを落とすと考える。

このような考え方によって、次のような分類をした：

1. ADC 1、2、3 のカウントがいずれもピーク (100 ~ 300) の中にあるイベント
2. ADC 1、2 はピークにあるが ADC 3 は大きな値 (600 以上) を持つイベント
3. ADC 1、2、3 がいずれも大きな値 (600 以上) を持つイベント

このように分類をして、それぞれのケースについていくつか画像を見てみるとかなり期待どおりの結果がえられたが、ケース 1 に分類された画像であるにもかかわらず全くシングルイベントに見えない、というようなものもあった。したがって ADC による分類では望みのイベントをある程度までしぼることはできるが、完全に選別するまでには至らなかった。

6.2 クラスタリング

データを見てみると、複数の輝点がかたまっていることが多い。例えば、図 16 を見ると、下から 2 つ目の層の輝点が完全に 2 か所に分かれているように見える。目で見てイベントを判断するときには、このようなかたまりを考えることがよくある。この直観的な考え方でデータを分類することを考えた。そのために、各層ごとに輝点を輝点のかたまり (クラスター) に区分するクラスタリングを行った (図 18)。

クラスタリングの方法は次の通りである。まず 1 つのファイバー層の中で最も明るい輝点を探し、その輝点から半径 1 cm 以内を 1 つのクラスターとして、この範囲内にある輝点は全てこのクラスターに属するとする。この 1 cm という値はデータをいくつか実際に見て決めた。そしてその層の中で次に明るい輝点を見つけて 1 cm 以内を 2 つめのクラスターにする。このようにして輝点をクラスターに分けてゆき、ある程度以上の明るい点が無くなったら分類を終了する。

こうすることにより、例えば 1 つの宇宙線が検出器を透過したというストレートイベントならば、全ての層でクラスターは 1 つ以下であると予想される。このような考えのもとでデータを次の 3 種類に分類することを考えた。

1. 宇宙線粒子 1 個が通過したシングルイベント
2. 粒子 1 個が入射してきてその後複数個になったイベント、つまりシャワーイベント

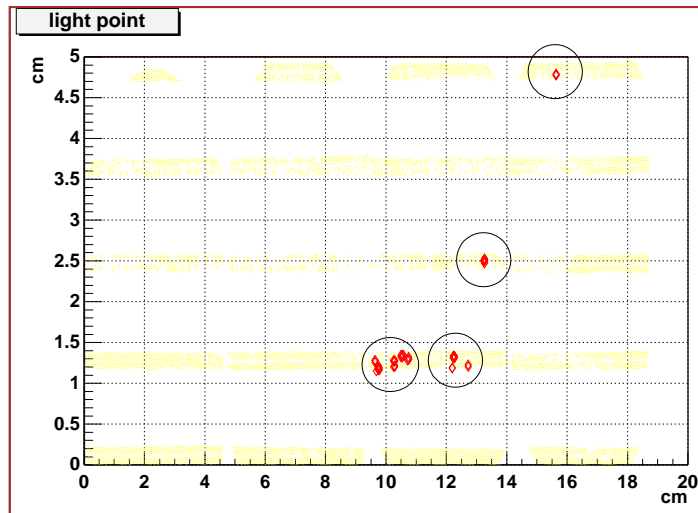


図 18: クラスタリングの例

3. 複数の粒子が入射してきたイベント

まず分類 1 には各層のクラスターの数が 1 つ以下、2 は輝点が存在する層のうち最も上の層のクラスターの数 が 1 つでそれ以下の層はクラスターが 2 つ以上、3 はその他、という条件を課してみたところ、

分類 1 : 51.4 %

分類 2 : 33.5 %

分類 3 : 14.9 %

という割合になった。ただし粒子は上方から入射するものと仮定している。

さらに条件を厳しくして、分類 1 には各層のクラスターの数 が 1 つ以下でかつその画像内の全クラスターの数 が 3 個以上という条件、2 は最も上の層のクラスターの数 が 1 つで、それ以下の層には、1 つ上の層と同じ数のクラスターがあるかそれよりもたくさんのクラスターがある (つまり下の層に行くにしたがってだんだんクラスターが増える) という条件、3 はすべての層に必ず 2 個以上のクラスターがあるという条件を課した。その結果、次のような割合になった。

分類 1 : 48.0 %

分類 2 : 0.81 %

分類 3 : 0.68 %

この分類で分けたデータをいくつか抜き出してみた。(図 19 から図 24)

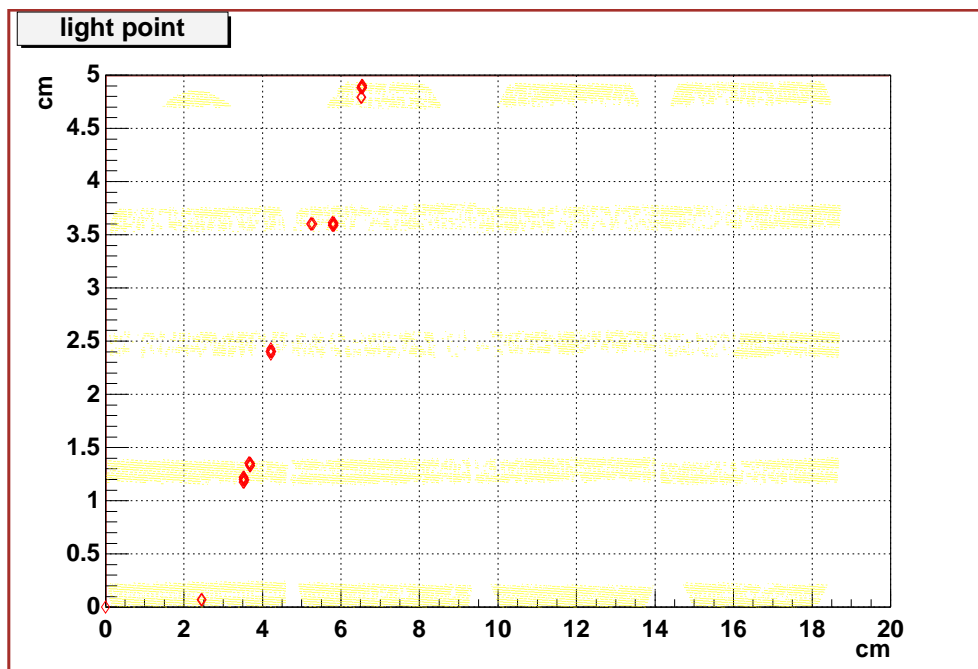


図 19: 分類 1 のイベント その 1

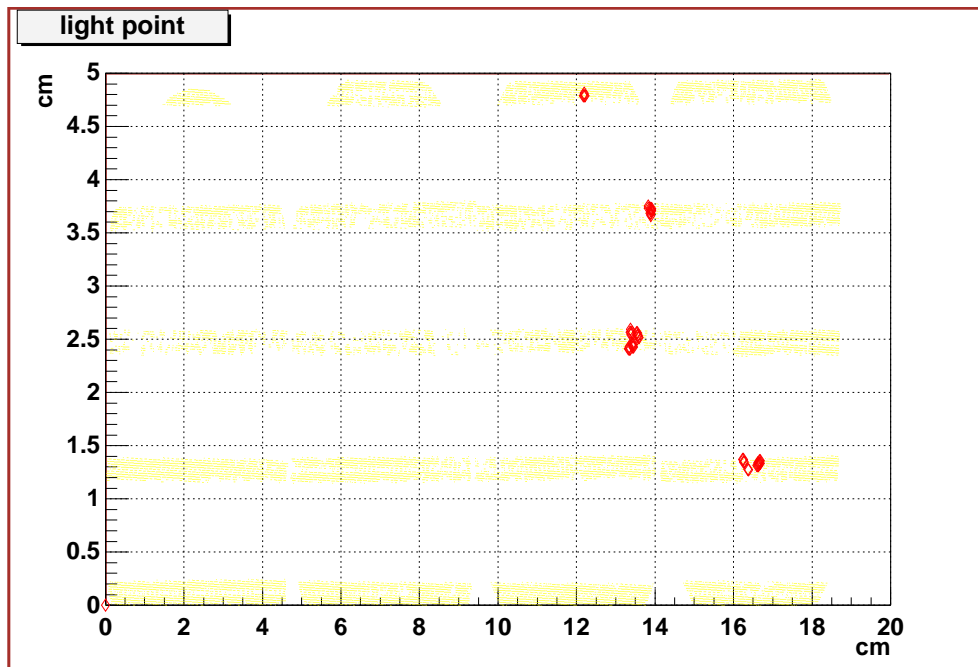


図 20: 分類 1 のイベント その 2

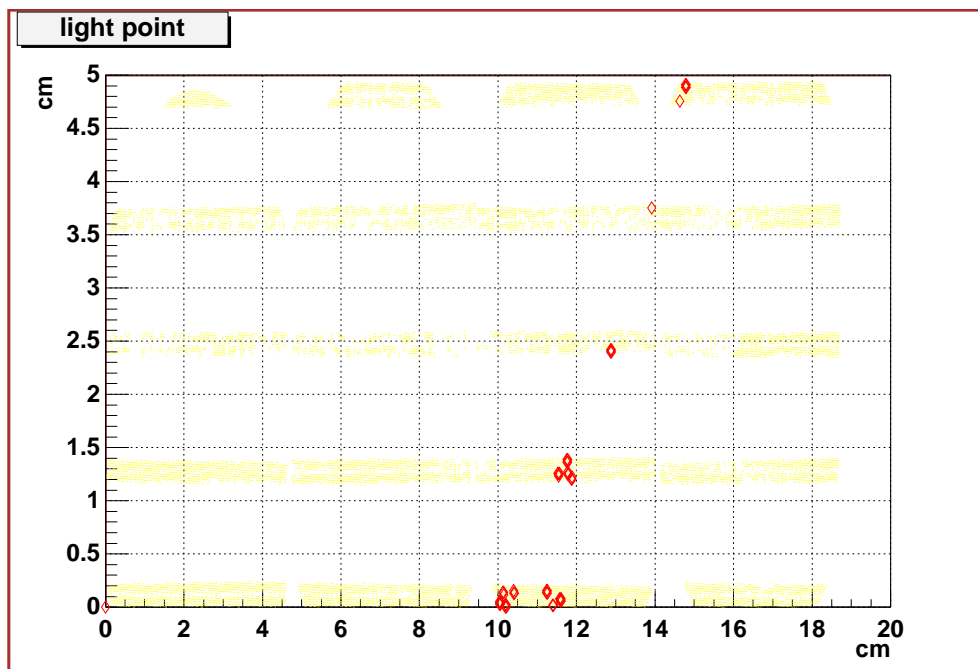


図 21: 分類 2 のイベント その 1

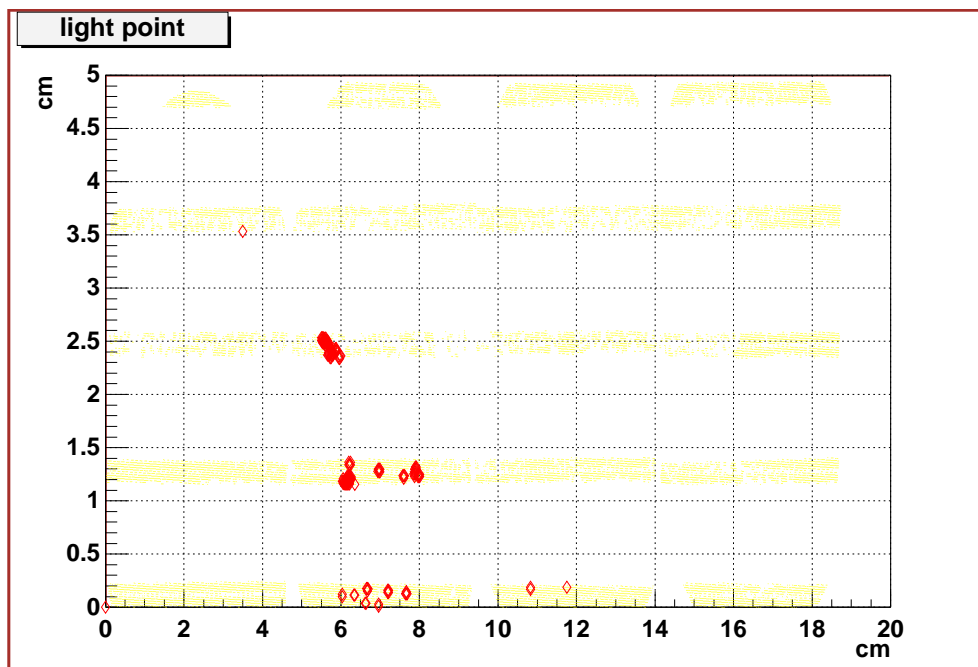


図 22: 分類 2 のイベント その 2

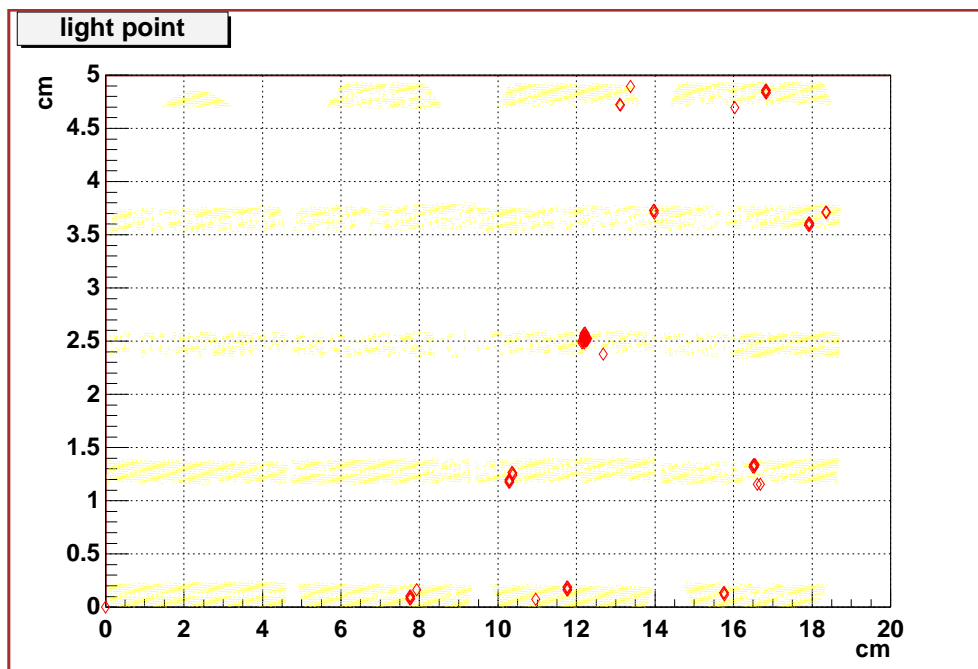


図 23: 分類 3 のイベント その 1

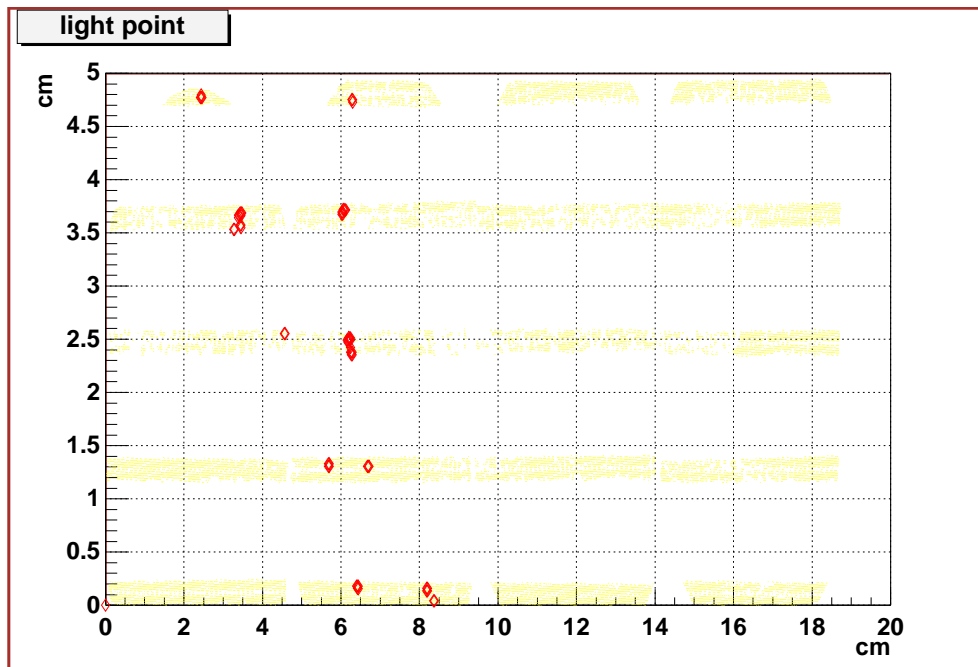


図 24: 分類 3 のイベント その 2

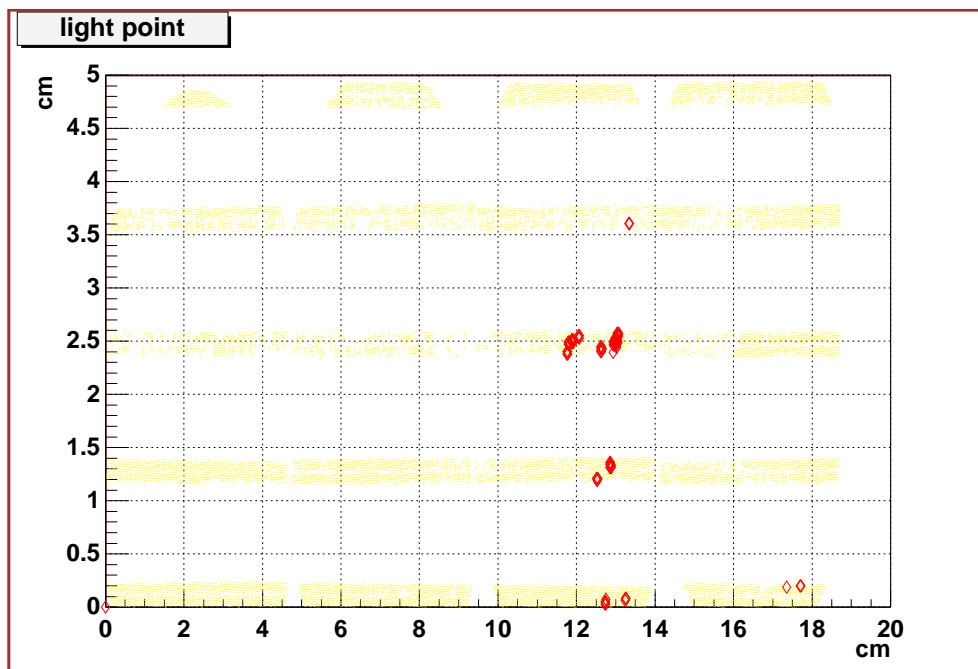


図 25: その他のイベント その 1

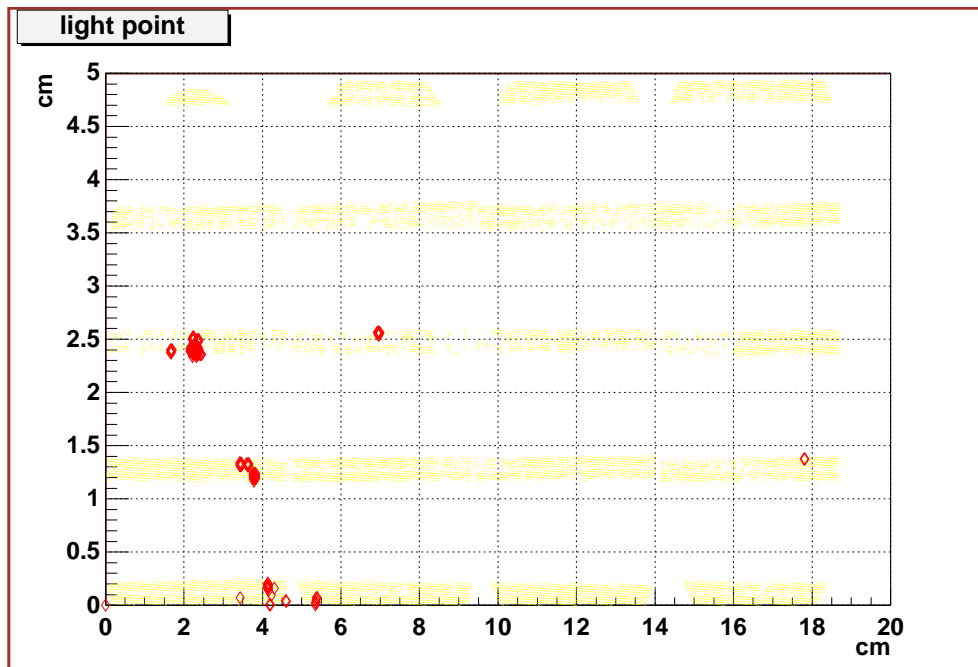


図 26: その他のイベント その 2

7 考察

今回作製した検出器で、見事に宇宙線をとらえることができた。そしてトリガーをかけてデータを自動的に収集するシステムを構築し、得られる画像から宇宙線の飛跡を再現することができた。

だがこの検出器では、宇宙線の飛跡が二次元でしかわからない。そこで、今後の発展として、三次元で位置を読み出すことが挙げられる。そのためには、検出器のセンサー部分に新たなファイバーを今のファイバーに垂直に重ねて置けばよい。しかしこれ以上ファイバーを増やすと I.I.T. のレンズ面に収まらなくなるので、検出器のデザインを検討しなおさなければならないだろう。

画像の変換については、正しく変換されているかどうか調べるため、直線や単純な図形を描いた絵を変換して、できた絵が期待通りのものとなることを確認した。だが、まれに誤変換がある。これは上下に並んだファイバー層のちょうど境目付近にある輝点が、まわりの輝点とはなれて1つだけ違う層に変換されてしまった、というものである。この誤変換は各層のファイバーが一直線に並んでいると仮定しているために起こる。これを修正するには、1本1本のファイバーの位置を微調節するしかない。

ADCによる分類は、シャワーイベントだけが見たいというような場合にはある程度までしぼり込むにとどまった。頭の中で思い描いているとおりのイベントを探すにはクラスタリングのほうが有効である。また ADC データと画像との対応がとれていない可能性もあるが、これが本当だったら分類に関係なくあらゆるタイプのイベントが見つかるはずなので、全く対応していないわけではなく、対応しているものも対応していないものもあるということだと思われる。

クラスタリングによる分類については、別途出力した各層のクラスタの数などの情報と比較して正しく分類されていることを確認した。最初にやった分類では、分類1 (一直線のイベント) はかなり有効で、ほとんどが輝点が直線状に並んでいるイベントであった。だが確かに各層に1クラスタずつなのだが直線状になっていないというイベントもあった。これを除くには直線のフィッティングをしてそのずれぐあいをみるなどといった作業が必要だろう。

次に行った分類は、分類2 (シャワーイベント) のデータをいくつか見たところ、シャワーのように見えるものばかりで、シャワーイベントの選別はかなりうまくいった。だがこれに分類されたものを全てシャワーイベントだとすると、一日あたり20個程のシャワーがあったことになり、1日に2個程度という計算と全く異なっている。これは、計算して求めた1日あたり2個という値が、ミュオンが崩壊してできた電子だけを対象にしているからだと思われる。実際に検出器に降ってくる粒子はミュオン以外は全くないわけではなく、電子そのものも降ってくる。だが観測は実験室内で行ったので、検出器の上空にはたくさんのコンクリートがあり、電子はほとんど吸収されてしまうだろう。そのかわり、コンクリート内でシャワーを起こして、たくさんの電子が降ってくることも考えられるので、これらも考慮に入れなければ実際に一体いくつの電子が降ってくるのか分からない。本当にミュオンだけを見ようと思ったら、電子の影響をなくすため検出器の上に十分鉛を積んでおけばよいだろう。

クラスタリング自体はうまくいっているので、さらにエネルギーの情報も取り入れるため ADC による分類と組み合わせる必要がある。

今回作った観測システムの性能を見てみると、まず検出効率が悪かった。すなわち、トリガーにかかった事象の画像が全てとれるわけではなく、得られた画像データの中には何も映っていないものが多数あった。その理由として、画像をキャプチャするタイミングが考えられる。CCD からキャプチャカードに欲しい画像が送られてきたちょうどそのときにコンピュータが画像を拾ってくれなければならないのだが、そのタイミングが合わないとうまく画像がとれないようである。少しでも効率をあげるため、1 回に 2 フレーム (2 画面分) 画像をとるようにしているが、根本的な解決にはなっていない。この問題を解決するには、キャプチャカードの特性とプログラムの作り方、データが到着するタイミングなどを詳しく調べなければならないだろう。検出効率が悪すぎるのは検出器としては致命的なので、何とか改善しなければならない。

謝辞

この実験全般に渡って非常に熱心にご指導をくださった本間先生、杉立先生に、心より御礼を申し上げます。貴重な助言を下された宮村先生、鷺見先生、ありがとうございます。そしてお世話になったハドロン研究室のみなさんに大変感謝致しております。最後に、共同研究としてファイバーの並び替えから ROOT の使用まで何でもこなしてくれた蜂谷 崇君に心の底から感謝します。ありがとう！

参考文献

- [1] 小田 稔, 宇宙線, 裳華房, 1960
- [2] 山本祐靖, 高エネルギー物理学, 培風館, 1973
- [3] The European Physical Journal C Volume3 · Number1-4, 1998