

平成 29 年度 卒業論文
ミュオンラジオグラフィーに向けた
宇宙線ミュオン検出器の開発

神戸大学 理学部 物理学科
粒子物理研究室
植田 晴樹 網本 圭輔
徳丸 皓亮 山下 和輝

2018 年 3 月 27 日

目次

第 1 章	ミュオンラジオグラフィー実験	1
1.1	序論	1
1.2	透過の原理	2
1.3	目標	3
第 2 章	実験装置	4
2.1	装置のセットアップ	4
2.2	検出装置	5
第 3 章	読み出し装置	10
3.1	MPPC	10
3.2	EASIROC モジュール	13
3.3	ストリップ 8 本の光量測定	14
3.4	ストリップ 3 2 本による試作プレートでの光量測定	18
第 4 章	解析	20
4.1	検出効率の見積もり	20
4.2	平均光子数	22
4.3	検出効率の見積もりの改善点	24
4.4	解析結果	25
第 5 章	シミュレーション	26
5.1	CRY を用いた宇宙線分布シミュレーション	26
5.2	宇宙線ミュオンの分布	27
5.3	検出器を通過しない宇宙線の除外	28
5.4	角度分解能の見積もり	29
5.5	検出レートの見積もり	29
参考文献		32
第 6 章	まとめ	33

第 1 章

ミュオンラジオグラフィー実験

1.1 序論

医療現場などさまざまな場面で使用されている X 線撮影技術は、物質を破壊せずに内部を撮影することができる。しかし、X 線は厚さ数 cm 金属や火山やピラミッドなど大きな構造物などの X 線に対して“厚い”物質の内部は透過できないため内部を撮影することはできない。ミュオンラジオグラフィーでは、宇宙線に含まれる μ 粒子 (ミュオン) を用いることで X 線撮影の欠点を克服することが出来る。

宇宙線とは宇宙から絶えずに地球に降り注いでいる原子核や素粒子のことである。その中で、地球大気に飛び込む前の宇宙線を「一次宇宙線」、大気に飛び込み変化することで生まれるものを「二次宇宙線」と言う。様々な種類の宇宙線がある中で μ 粒子を用いる理由としては、宇宙線の中で地上に多く降り注いでいること。また、宇宙線由来ためエネルギーが高く (数～数十 [TeV]) 透過力が高いことなどがあげられる。

表 1.1 μ 粒子の生成過程

崩壊前		崩壊後
π^+	\rightarrow	$\mu^+ + \nu_\mu$
π^-	\rightarrow	$\mu^- + \bar{\nu}_\mu$
K^+	\rightarrow	$\mu^+ + \nu_\mu$
K^-	\rightarrow	$\mu^- + \bar{\nu}_\mu$

表 1.1 は、本実験で用いる μ 粒子の生成過程を示している。一次宇宙線である π 粒子、 K 粒子から μ 粒子が生成されていることが分かる。 μ 粒子が一定の方向から飛来するわけではない。そのため、ミュオンラジオグラフィーを行う前段階として到来方向の測定が必要である。本実験ではその到来方向の測定を行う。

1.2 透過の原理

μ 粒子は物質を通過する際に物質内の電子と衝突することでエネルギーを失う。失うエネルギーの大きさは通過した物質の質量厚さ (密度の積分値) によって異なる。そして、失うエネルギーが大きければ通過する μ 粒子の数が大きく減少し、失うエネルギーが小さければ通過する μ 粒子の数の減少が小さい。そのため、検出される μ 粒子の数の分布から大きな構造物などの物質の内部構造を知ることができる。

今回の実験で対象とする宇宙線 μ 粒子では電離損失は図 1.1 の Bethe-Bloch の式 (1.2.1) に従う範囲に当てはまる。

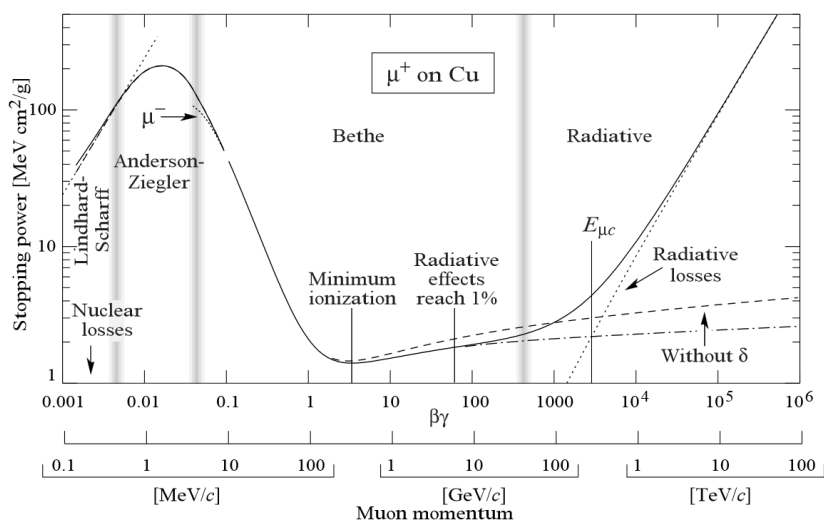


図 1.1 μ 粒子の運動量に対する電離損失

$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{2\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\beta\gamma}{2} \right) \right] \quad (1.2.1)$$

Bethe-Bloch の式 (1.2.1) に従う範囲を見ると電離損失は速度が大きくなるにつれ最初は急激に減少し、ある速度からは増加に転じるが、増加量は非常に緩やかになり一定とみなせる。このほぼ一定とみなせる電離損失を最小電離損失 (MIP: minimum ionizing particle) といい、多くの宇宙線の電離損失はこの値となる。宇宙線 μ 粒子の場合 MIP は $1\text{g}/\text{cm}^2$ の物質で約 $1.0 \sim 2.0\text{MeV}$ である。

μ 粒子のような荷電粒子が通過した際に、その失ったエネルギーを使って発光するシンチレータと呼ばれる検出器を用いてミュオンの到来が検出できる。しかし、このままでは到来方向を知ることができない。そのため、まずシンチレータを図 1.2 のように縦、横に複数並べてプレート上の検出器を作成する。そしてプレート状のシンチレータを二層重ね合わせることで三次元方向の到来方向を検出できるようにする。

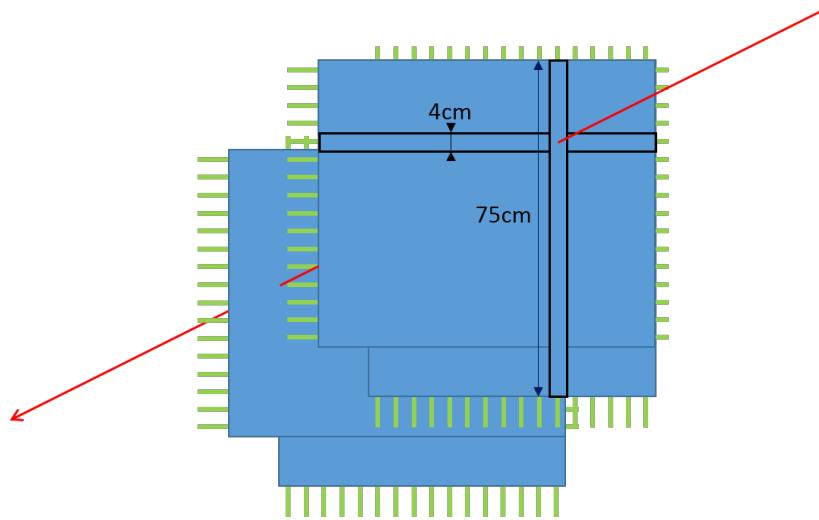


図 1.2 到来方向の読み出し

1.3 目標

本実験の目標を以下に示す。

- シミュレーションを用いた要件定義
二層のプレート状のシンチレータの距離をシミュレーションを用いて十分な角度分解能とイベント数などを考慮し決定する。
- 検出装置、読み出し装置の開発
実際に作成する上でどのような組み方で作成するか、また効率的にデータを取得するための読み出し装置の作成。
- データ解析
取得したデータから μ 粒子の検出効率や光子数等の見積もり。

ミュオンラジオグラフィーを用いて実験室周囲の構造物の観測するための装置を作成することが本実験の目標である。実験装置を作成するにあたって、プレート状のシンチレータの間の距離を定めなければならないがそれはシミュレーションを用いて十分な角度分解能とイベント数などを考慮し決定する。

第 2 章

実験装置

2.1 装置のセットアップ

2.1.1 μ 粒子を観測する装置

本実験では μ 粒子の到来方向を測定するために、プレート上に並べたシンチレータを 2 層作成し図 2.1 のように構築する。実際の写真は図 2.7 のように作成した。

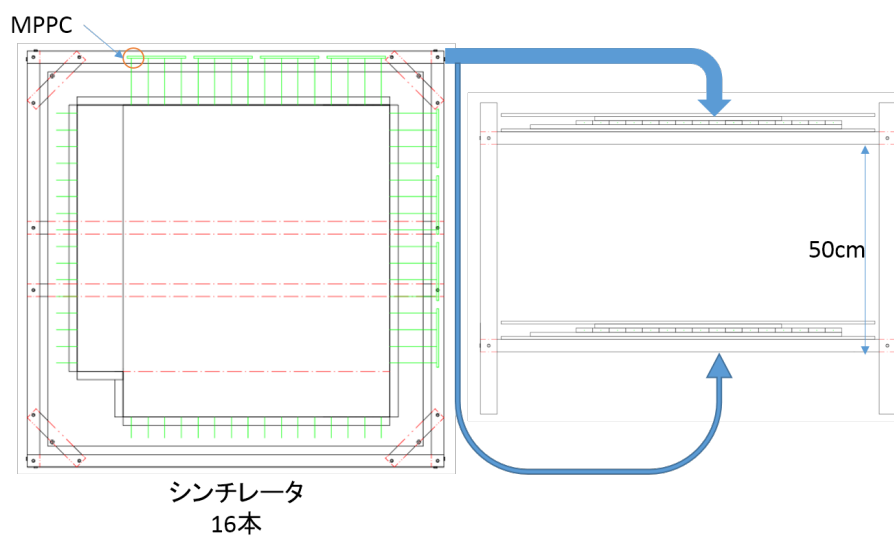


図 2.1 装置の概要図

データを取得するためのモジュールは図 2.2 のように配線した。

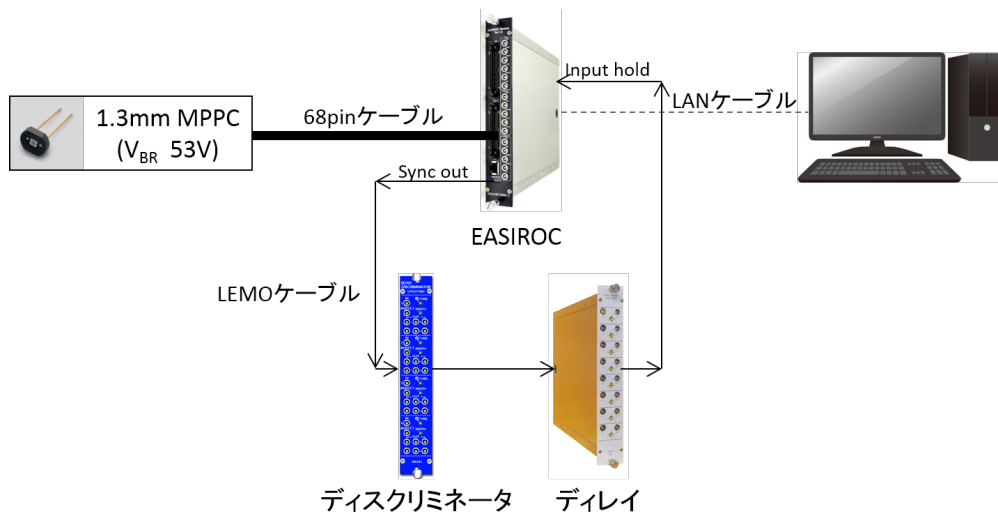


図 2.2 モジュールの接続図

データを取得するためのモジュールや実験で使用したものを表 2.1 に示している。なお“ディレイ”のモジュールは黄色になっているが実際に使用したものは青色の物を用いた。MPPC や EASIROC 等の詳しい説明は第三章で説明する。

表 2.1 実験装置に使用したもの

検出器	型番	メーカー
押出形プラスチックシンチレータ		株式会社シーアイ工業
波長変換ファイバー	Y-11(200)MS	株式会社クラレ
MPPC	S13360-1375CS	浜松ホトニクス株式会社
モジュール		
EASIROC		浜松ホトニクス株式会社
ディレイ	N022	株式会社豊伸電子
ディスクリミネータ	KN241	株式会社カイズワークス

2.2 検出装置

2.2.1 押出形プラスチックシンチレータ

押出形プラスチックシンチレータは、押出によって整形されたプラスチックシンチレータである。従来のプラスチックシンチレータに比べて光学特性が劣る代わりに安価に作成できるという利点がある。実験の際に使用したものは真中部分に穴の空いた短冊状のシンチレータ (厚み 1cm × 幅 4cm × 長さ 75cm) である。



図 2.3 押出型プラスチックシンチレータ

図 2.3 については 3m のものをノコギリ等を用いて 4 本に切断して使用しているため一本の長さは約 75cm になっている。その後に端面を平らになるようにヤスリを掛けた。また、光漏れを防ぐためにプラスチックシンチレータと屈折率がほぼ同等なオプティカルグリスを用いてシンチレータの端面と反射材を接着した。そのシンチレータを合計で 64 本作成をした。2.2.2 章で説明する波長変換ファイバーを通すので端面に貼った反射材に穴を開けることになる。先に穴を開けずにファイバーで突き破る形で穴を開けた。その理由は大きく穴を開けてしまい光漏れが起きる可能性があるためである。

2.2.2 波長変換ファイバー

波長変換ファイバーは、外部からの特定の波長の光を吸収し、波長変換材により長い波長の光を再発光するプラスチックファイバーである。図 2.4 に波長変換ファイバーの原理についての概念的な図を示す。なお、使用したファイバーの直径は 1.5mm である。

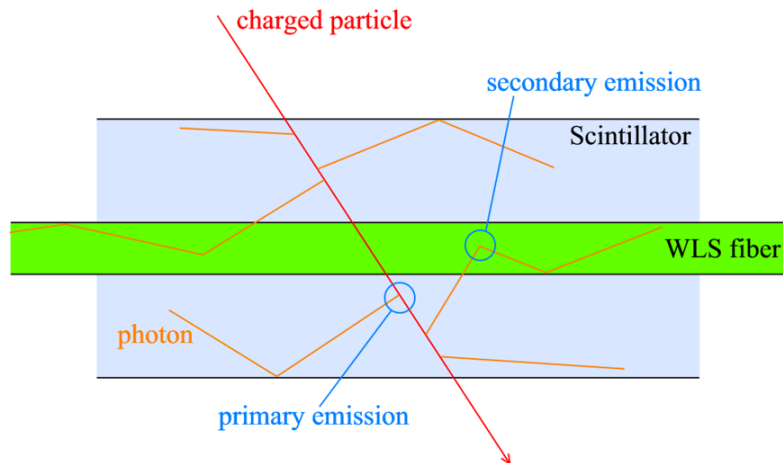


図 2.4 波長変換ファイバー [3]

一般的な光ファイバーでは側面からの光がファイバー内の全反射条件を満たさないために、ファイバー内に捕獲してファイバー内を伝達させることはできない。しかし、波長変換ファイバーではファイバー内で再発光した光で全反射条件をみたすものであればファイバー内を伝達できるという違いがある。 μ 粒子の通過することで発生するシンチレーション光は、シンチレータの減衰長が短いためシンチレータ内部ですぐに減衰してしまう。波長変換ファイバーの減衰長はシンチレータ

(約 75cm) に比べて長い (3.5m 以上) ため、シンチレーション光を波長変換ファイバーで受け取ることで減衰を防ぐ。そして、ファイバー内を通った光を MPPC で受け取る。

表 2.2 には波長変換ファイバーの特性を、図 2.5 では波長変換ファイバー Y-11(200)MS の吸収・発光スペクトルを示した。僅かに重なってはいるが図 2.5 から、短い波長の光を長い波長の光に変換していることがわかる。

表 2.2 使用した波長変換ファイバーの特性 [?]

型番	発光色	発光ピーク	吸収ピーク	減衰長
Y-11(200)MS	緑	476nm	430nm	3.5m 以上

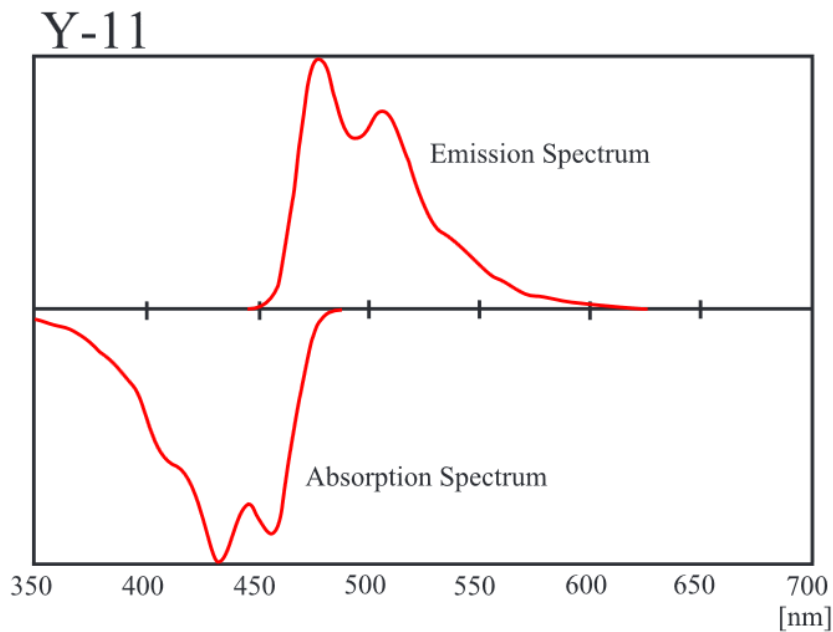


図 2.5 波長変換ファイバー Y-11(200)MS の吸収・発光スペクトル [?]

2.2.3 シンチレータのプレート

シンチレータを縦に 16 本並べ、その上に、横に 16 本並べている。シンチレータの有効検出面積 (重なっている部分) は 1 辺が幅 4cm × 16 本 のため 64cm × 64cm である。シンチレータの長さが 75cm あるのではみ出す 11cm の部分を切り落とすことで有効面積を変えずに検出器を取り回しのよいものに改良できる余地がある。プレート状にする際にシンチレータからの光漏れ対策とは別に、MPPC の読み出しと反対側にあるファイバーの端面にミラースプレーを塗布した。

図 2.6 の黒で囲まれた部分が短冊状のシンチレータ一本、赤丸部分は MPPC の読み出し側、黄色の丸はミラースプレーが塗布された読み出しの反対側をそれぞれ示している。

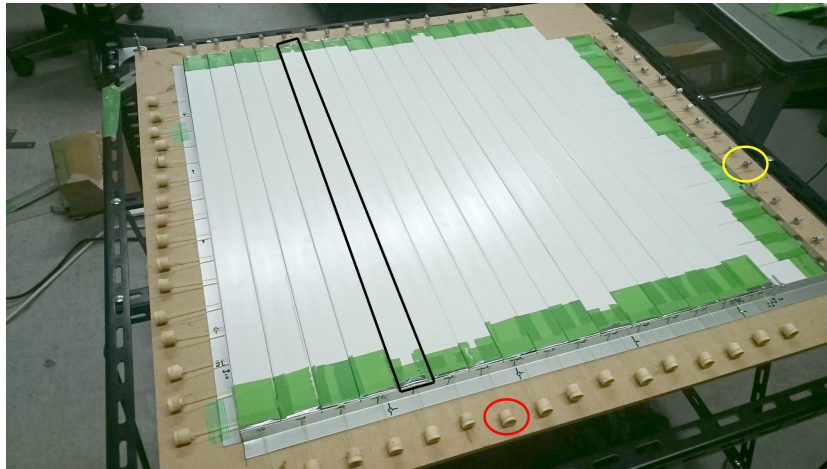


図 2.6 シンチレータのプレート

実験の際には図 2.7 のように天板として木板を用いて上下を挟んでサンドイッチのようにすることで一枚のプレートとした。真ん中に見えるのは読み出される信号からノイズ除去のために使用したアルミ板である。



図 2.7 装置の写真

図 2.6 の赤丸部分での断面の模式図を図 2.2.3 に示す。

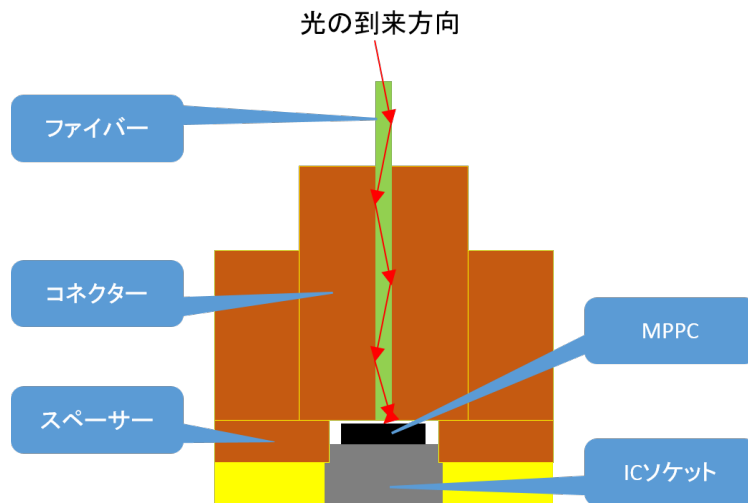


図 2.8 読み出し側のコネクタの模式図

図 2.2.3 の上方向からファイバー内を通った光を MPPC の受光面に誘導するために作成した。その際以下の点に注意した。

- ファイバーが MPPC の受光面に対して垂直にすること
- ファイバーの中心と MPPC 受光面の中心が揃っていること
- ファイバーが MPPC に直接触れないようにすること

しかし、手作業で作成したため均一に仕上がってるとは言い難い。そのことに起因して検出結果に影響が出ている可能性がある。そのためより均一な作成方法等を模索する必要がある。

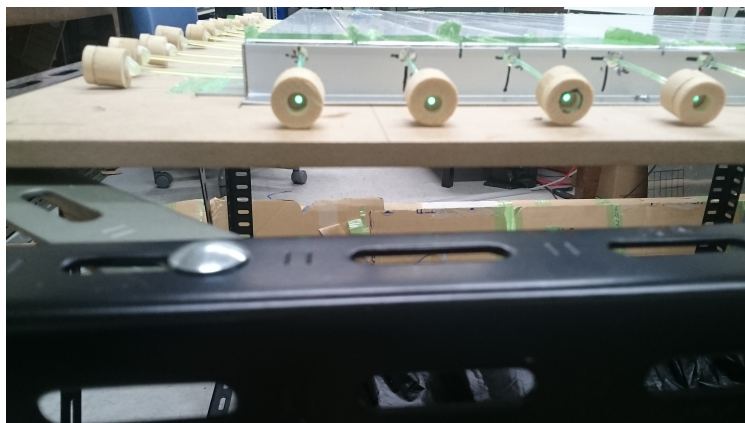


図 2.9 読み出し側のコネクタの写真

図 2.9 は図の下方向からの写真である。この写真では奥から手前に光が到来し、緑色に光って見える部分に MPPC の受光面をはめ込んで使用した。

第 3 章

読み出し装置

荷電粒子がシンチレータを通過して発するシンチレーション光は、波長変換ファイバーで吸収、再発光させ、ガイガーモード APD を用いた光検出器 MPPC に導く。MPPC の多チャンネル同時読み出しには ASIC (EASIROC) と FPGA (Artix-7) を用いた EASIROC モジュールを用いる。

3.1 MPPC

MPPC は受光面に APD (Avalanche Photo Diode) を多数配列させた光子計測デバイスである。APD は P 型半導体と N 型半導体を接合 (PN 接合) したフォトダイオードである。フォトダイオードにバンドギャップ以上のエネルギーをもつ光が入射すると、その光エネルギーにより電子-正孔対を生じる。PN 接合に逆電圧を印加すると、キャリア密度の低い空乏層内部で生じた電子-正孔対のうち電子を N^+ 側、正孔を P^- に、それぞれ電場によってドリフトする。大きなエネルギーをもった電子が結晶格子に衝突、イオン化し、イオン化が連鎖的に発生する。これがアバランシェ倍増である。(図 3.1)

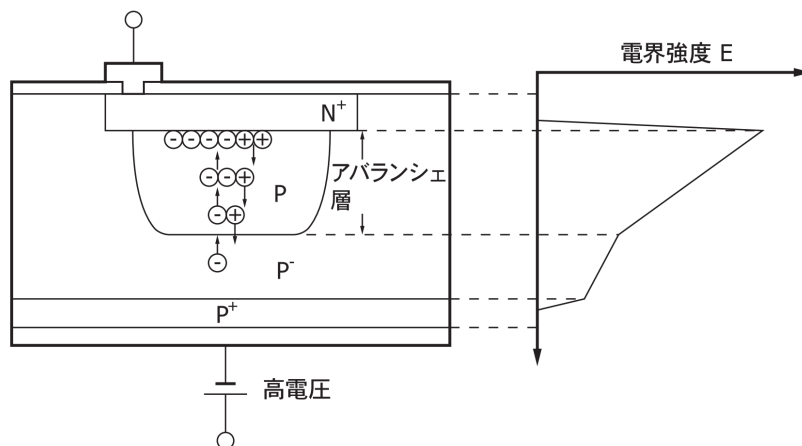


図 3.1 APD の内部構造 [1]

APDの増倍率はイオン化率によって決まり、イオン化率は空乏層にかかる電場強度に依存する(図3.2)。増倍率は印加した逆電圧の高さに従って増加し、やがてある高電圧以上では、直列抵抗成分による電圧降下によって逆電圧が低下し増倍率が減少するブレイクダウンに至る。逆電圧の適正範囲内である電圧以上を印加すると、光電流の増加に従い素子内の直列抵抗と負荷抵抗を流れる電流による電圧降下が起こり、出力光電流が入射光量に比例しないガイガーモードになる。APDがガイガーモードになる電圧を降伏電圧と言う。

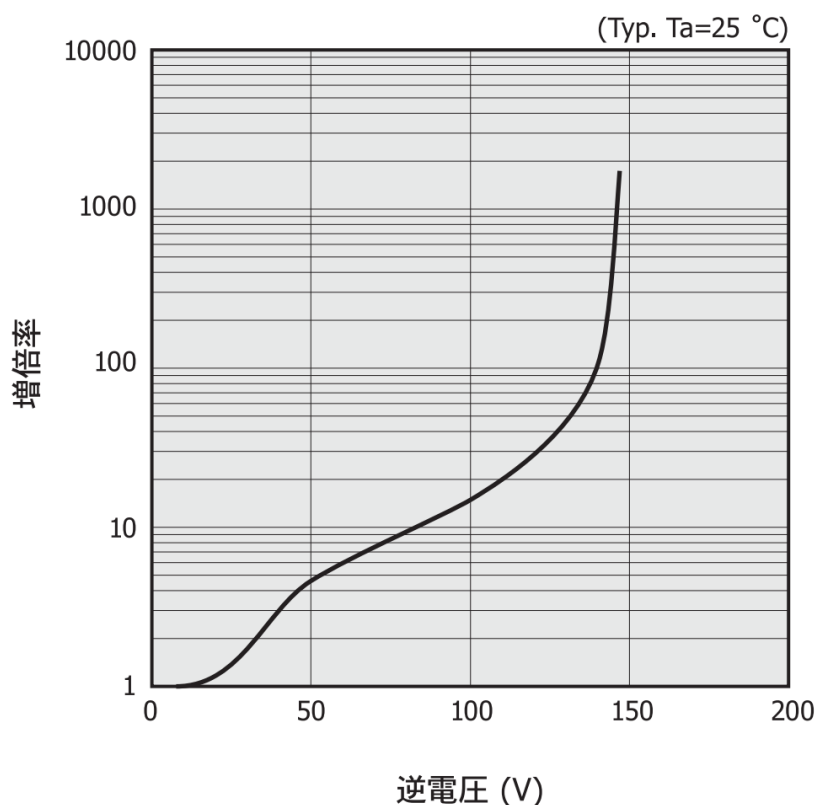


図 3.2 APD 増倍率の印加電圧依存 [1]

MPPCはAPDをガイガーモードで動作させる。並列接続で配列したAPDのうち、光子を検出したAPDそれぞれから一定の出力電流を得るため、MPPCは光子を検出したAPD数に応じた電流を出力し、その出力電荷測定によって光子計測を行う。1つのAPDの1光子の検出において、ガイガーモードでの放電(ガイガー放電)は素子内の電場が保たれるあいだ継続する。ガイガー放電を止めて次の光子を検出するためには、APDに動作電圧を下げる外部回路が必要である。今回用いたMPPCでは、各APDにクエンチング抵抗を直列に接続(図3.3)し、クエンチング抵抗に電流が流れる際の電圧降下によって動作電圧を低下させ、アバランシェ増倍を短時間で停止させる。

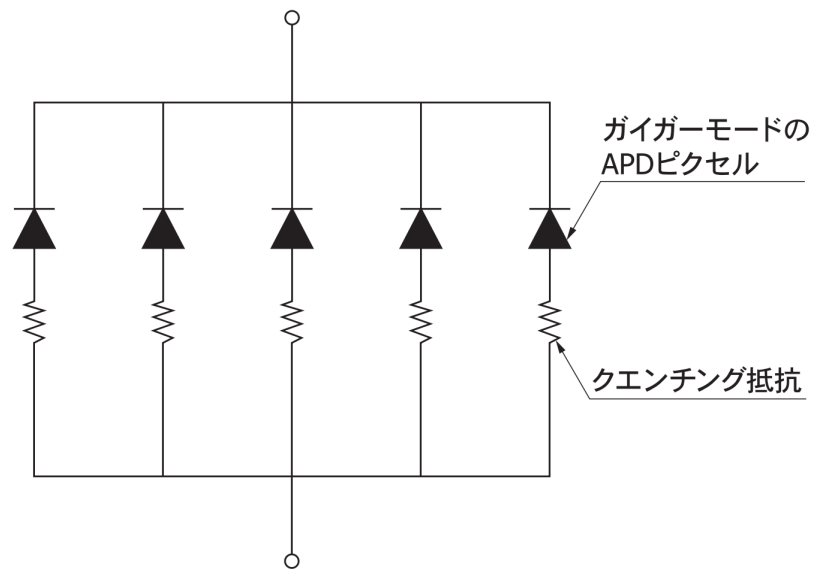


図 3.3 クエンチング抵抗と APD による MPPC の構成 [1]

浜松ホトニクス社のリニアアンプを用いたパルス波形の観測を図 3.4 に示す。ガイガー放電による波形の立上りは鋭く、クエンチング抵抗による立ち下がりはややなだらかになっている。

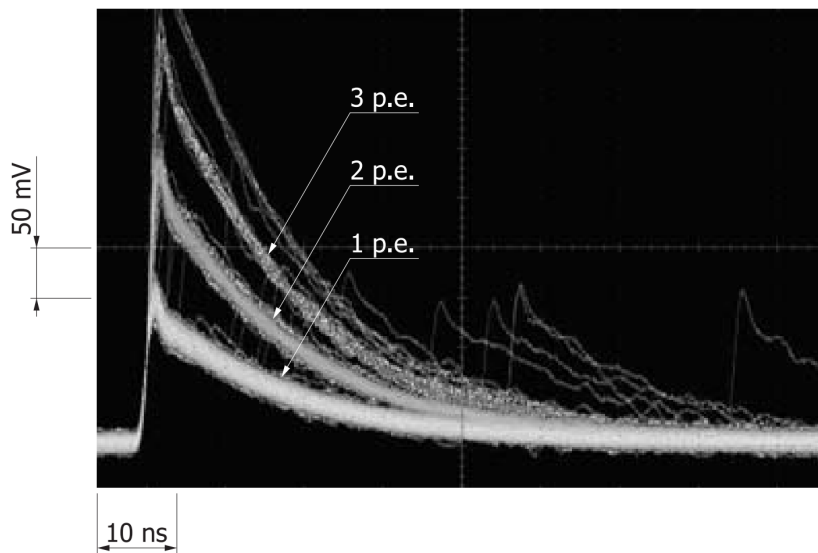


図 3.4 リニアアンプによる MPPC 出力波形 [1]

わせて Delay 回路を組み、Hold-Input に入力すると、Slow-Shaper 波形の peak で電圧を Hold し、読み出す。Slow-Shaper の立上り時間は 25ns から 175ns まで 25ns ごとに変更可能である。Trigger 及び Hold の時間分解能を高くするため、Fast-Shaper の立上り時間 25ns（固定）に対して Slow-Shaper の立上り時間は最長の 175ns を選んだ。Delay 回路は EASIROC モジュールの外に、Delay モジュールと LEMO ケーブルを用い、5ns(1m) ごとに調節した。

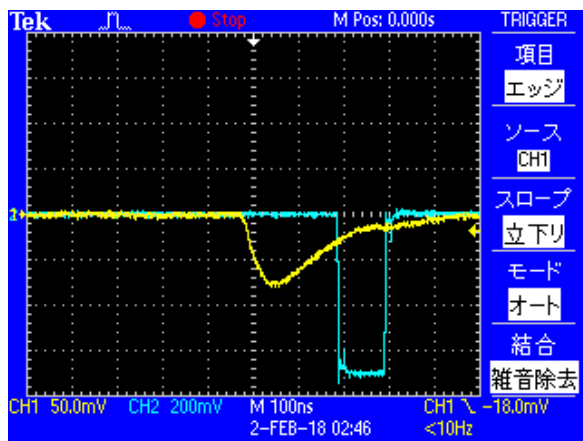


図 3.6 Pre-Amp 出力波形

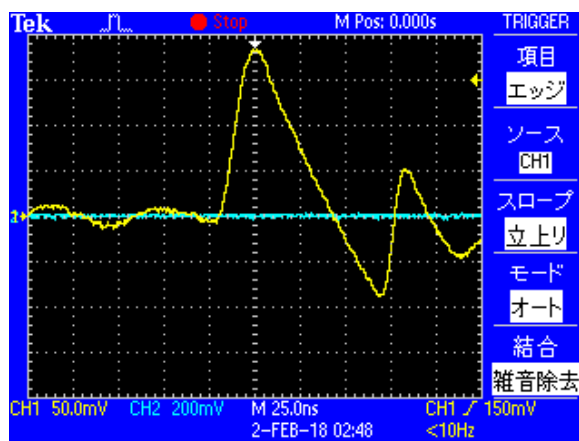


図 3.7 Fast-Shaper 出力波形

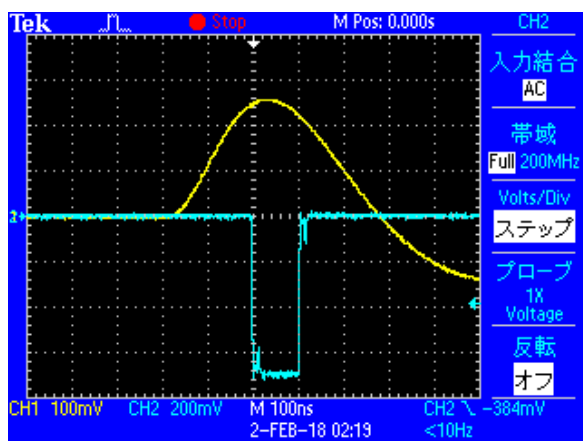


図 3.8 Slow-Shaper 出力波形

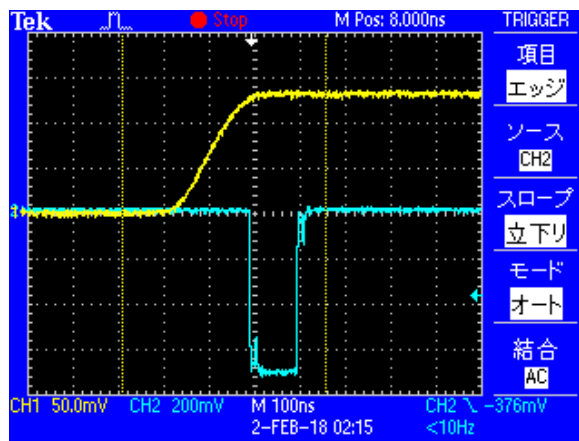


図 3.9 Hold した Slow-Shaper 出力波形

3.3 ストリップ8本の光量測定

ストリップ及び MPPC、EASIROC を用いた宇宙線検出における光読み出し装置として、安定して高効率の宇宙線検出を行うためには、宇宙線通過時における MPPC 受光面への入射光量を安定して確保する必要がある。MPPC の出力には、入射光子による信号ではないノイズが含まれる。アバランシェモードでは、ノイズのほとんどは熱的に発生したキャリアによる APD の熱雑音であ

り、各 APD からの熱雑音は、そのときの増倍率に従って 1p.e. 分の出力電流になる。検出効率を高めるためには、ノイズと信号を正しく区別するため、MPPC の熱雑音に比べて十分な入射光量を確認し、熱雑音による出力を排除できるような Threshold を設定しなければならない。

シンチレータと波長変換ファイバーのストリップを宇宙線が通過したときの、MPPC の出力電圧を ADC でデジタルに変換した ADC 値、検出光子数、熱雑音と信号の分布を調べるため、図 3.10 のセットアップで動作試験を行った。上下に 4 本ずつ並ぶチャンネルの MPPC からの出力が EASIROC チップ内の Discriminator の Threshold を超えると、上下それぞれで論理和をとり、その後、上下の論理積をとって Trigger とする。

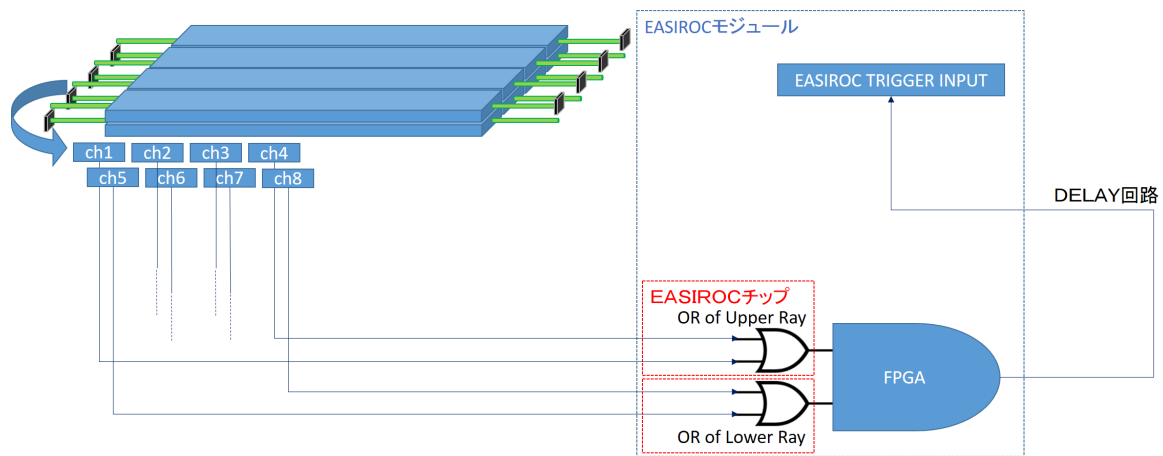


図 3.10 ストリップを 8 本用いた光量測定のセットアップ

1 本のストリップに接続した MPPC 1 つから得られる ADC 分布を図 3.11 に示す。MPPC に熱雑音も入射光子もないときのベデスタル ADC 値が約 830、EASIROC チップ内の Discriminator の Threshold は約 900 である。1000 以上の ADC 値領域のそれぞれのピークをガウス分布で Fit し、その期待値を光子数に対応させる。ベデスタル付近のイベントは、主に他のチャンネルで Trigger したときの ADC 値である。このとき使用した MPPC の降伏電圧は、浜松ホトニクス出荷時のラベル表示で 50.87V~50.98V であり、入力電圧は一様に 52.4V に設定した。後述するが、ADC 値と相当する光子数の関係は全チャンネル一様で、全チャンネルにおいて Discriminator の Threshold は 1p.e.~2p.e. の間に設定されている。このとき、Threshold を下げるとレートが急増するため、1p.e. 程度の熱雑音はとても多いと思われる。宇宙線ミュオンで Trigger できているときのレートは、長さ 75cm、幅 4cm のストリップ 4 本で 1200cm^2 に対して、20Hz 以下であることが期待される。

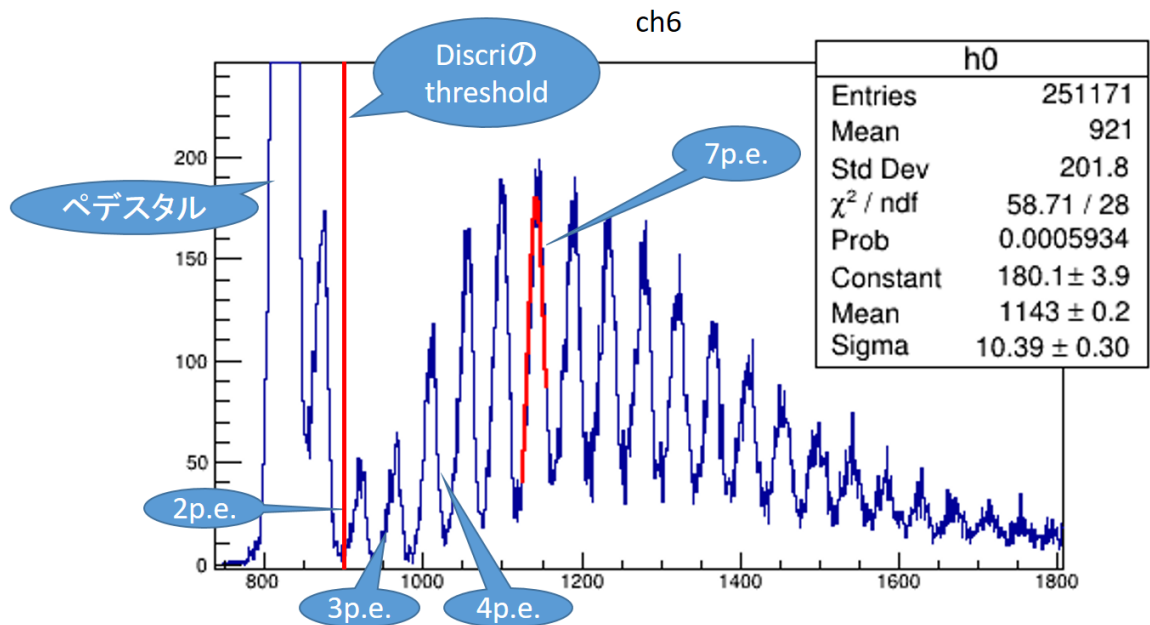


図 3.11 1本のストリップから得られる ADC 分布

ADC 値の相当光子数への変換は 1 次関数で Fit する (図 3.12)。

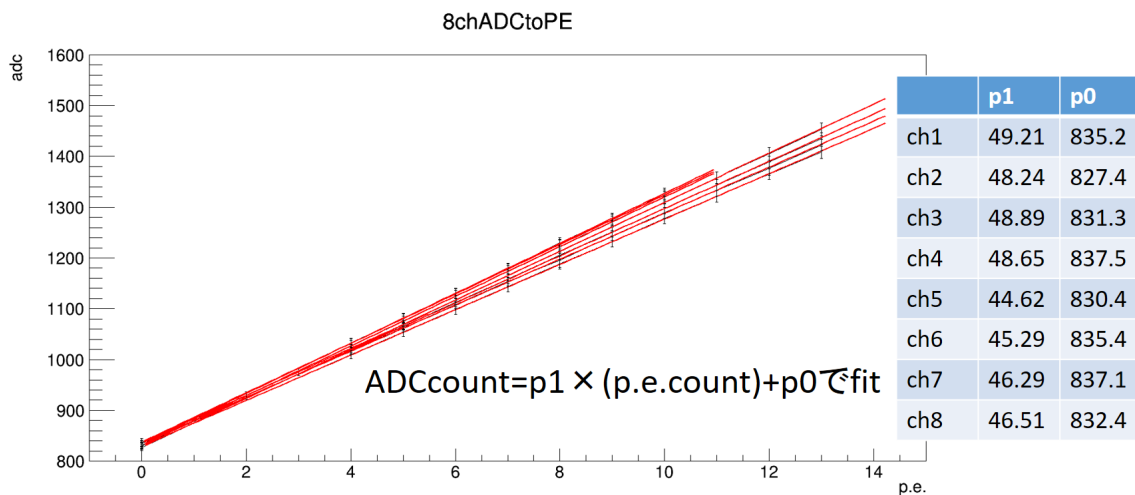


図 3.12 ADC 値の相当光子数への変換

ADC 値を相当光子数に変換した分布は図 3.13 のようになる。赤の分布は、対象のチャンネルの真下 (または真上) のチャンネルが 2.5p.e. 以上、対象列以外のチャンネルは 0.5p.e. 以下を要求し、真上から来たミュオンで Trigger したときの対象チャンネルの光子数の分布になっている。図 3.14 における青の飛跡の宇宙線によって Trigger されたイベントは棄却し、赤の飛跡の宇宙線が

通過したときのイベントのみを選択している。ペDESTALと 1p.e. 程度だった熱雑音を排し、3p.e. 以上ではイベント数をほとんど失っていない。正しくミュオンを検出できていると評価できる。

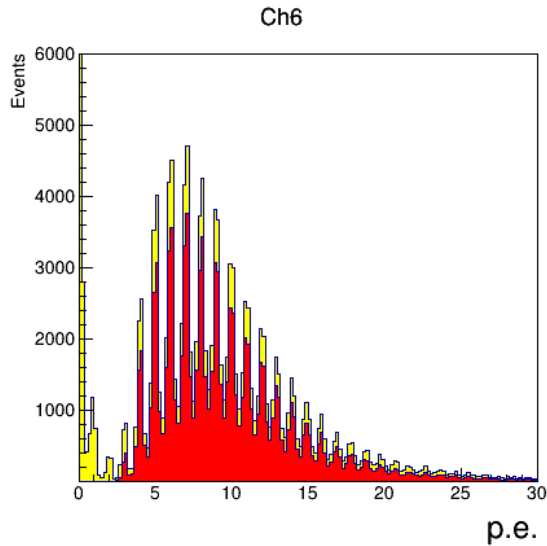


図 3.13 1本のストリップから得られる相当光子数分布

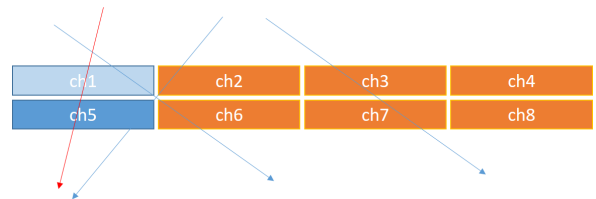


図 3.14 Event Selection のイメージ

全チャンネルの相当光子数分布を図 3.15 に示す。縦 3つの列では、上下のペアがミュオンを検出するのに十分な光子数を得ている。ch7 は光子数が小さく、ミュオンを検出するのに十分ではないため、上の ch3 の赤の分布は極端にイベント数を失っている。ミュオンが ch3 を通っていることを要求したときの ch7 の赤の分布は、3p.e. 以上で正しくミュオンを検出している。

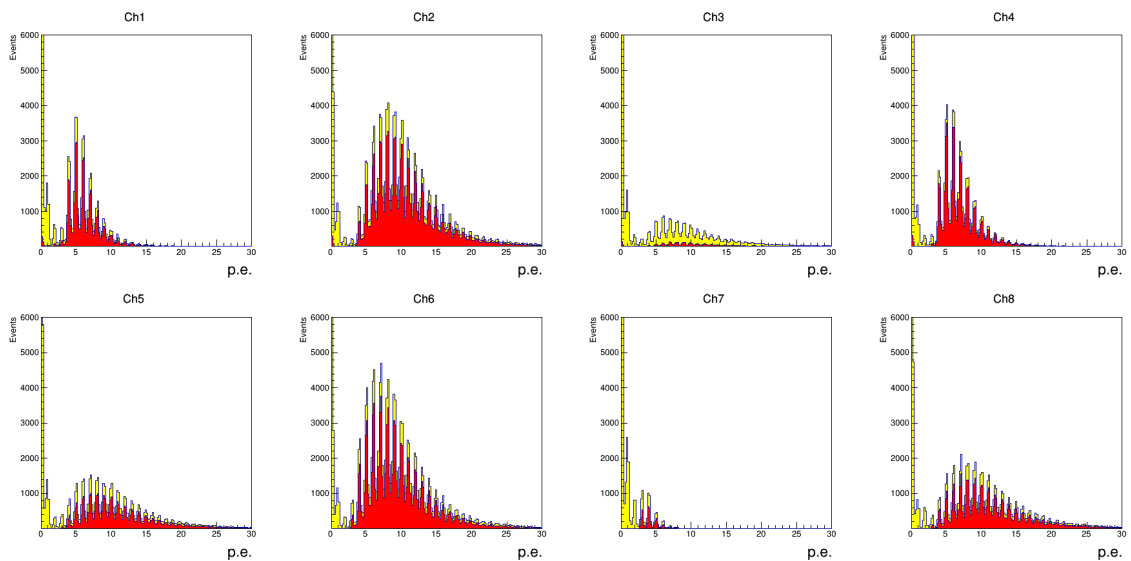


図 3.15 全チャンネルの相当光子数分布

Event Selection を行ったあとの各チャンネルの平均光子数を図 3.16 に示す。平均光子数は 10 以上が望ましい。

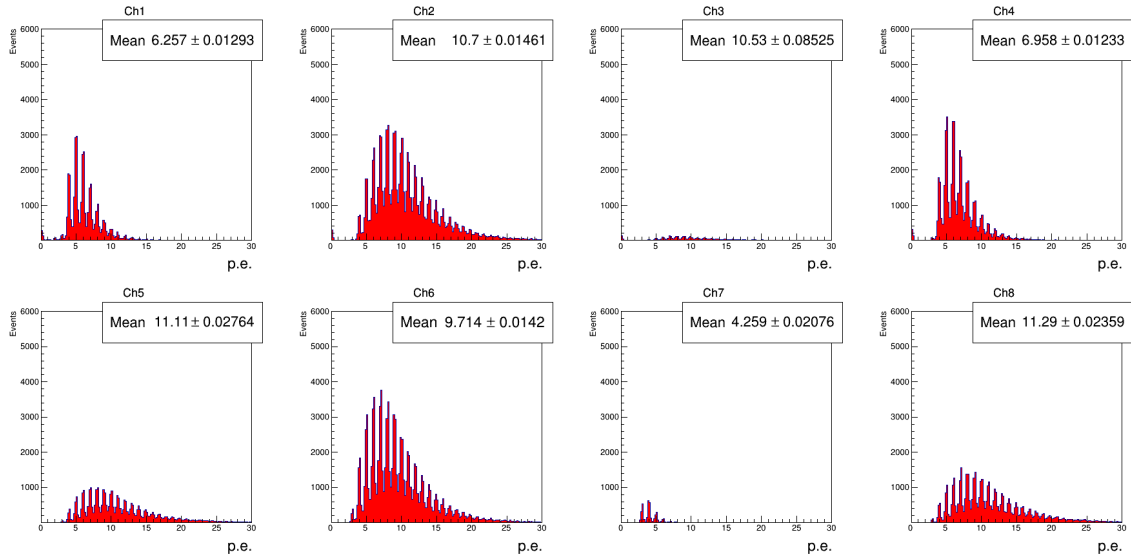


図 3.16 Event Selection 後の平均光子数

3.4 ストリップ 3 2 本による試作プレートでの光量測定

ストリップ 3 2 本を用いて、16 本ずつで x、または y 軸それぞれの読み出しをするプレートを用意し、x、y 軸両方を通った宇宙線ミューオンで Trigger するようなセットアップを図 3.17 のように組んだ。

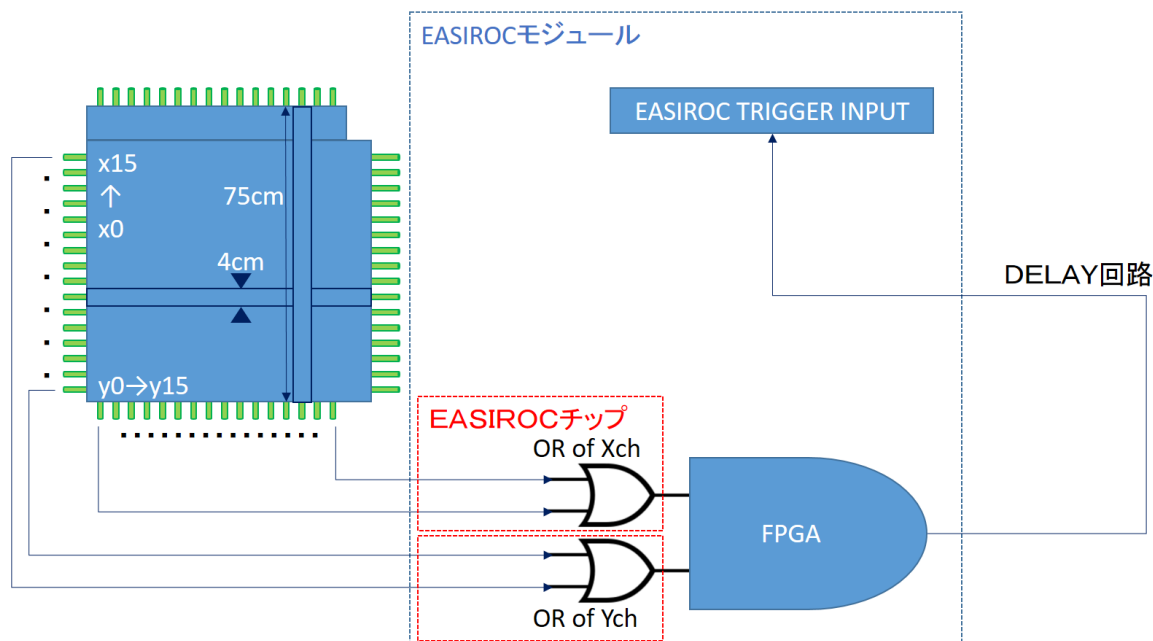


図 3.17 試作プレートでの光量測定セットアップ

8本での光量測定と同様に、ADC値と相当光子数の相関を調べたところ、図3.18のようにチャンネルによってばらつきがあった。ストリップが8本しかなかったときには、各チャンネルの降伏電圧がそれほど変らなかったため、それほど問題にはならなかったが、ばらつきが大きいと、EASIROCチップのDiscriminatorのThresholdが全チャンネル共通であるため、そのThresholdを熱雑音相当のADC値（またはMPPC出力電荷）が大きいものに合わせて設定することになり、そのとき、相当光子数におけるADC値が低いチャンネルに関しては、検出効率を削ぐことになる。そのため、浜松ホトニクス社出荷時記載の降伏電圧に合わせて印加電圧を調節し、ADC値と相当光子数の相関を全チャンネルでほぼ同じになるように合わせた（図3.19）。1チャンネルだけ（ch14）、EASIROCモジュールの不調により、印加電圧を調節できなかった。

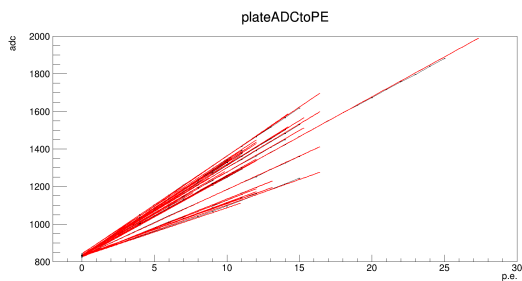


図 3.18 印加電圧調節前の ADC 値と相当光子数の相関

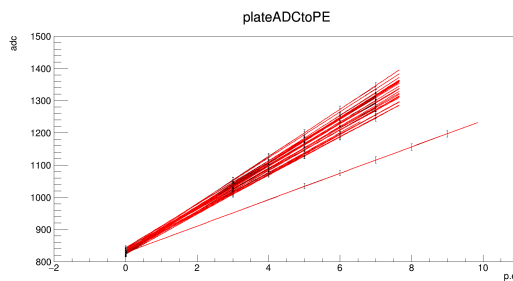


図 3.19 印加電圧調節後の ADC 値と相当光子数の相関

第 4 章

解析

4.1 検出効率の見積もり

ミュオンラジオグラフィーを行う際に重要となるのは到来方向ごとのミュオンの検出数である。これは、検出数から到来方向のミュオンが通過した物質の質量厚さを見積もるためである。そのため、正確な測定のためには各チャンネルの検出効率がより 100% に近く、誤差が小さい必要がある。また、各チャンネルの正確な検出効率から各チャンネルの性能差によらないミュオンの入射数を見積もることができる。

ミュオンの入射位置と MPPC による読み出し位置の間の距離が大きくなると、ファイバー内で減衰して検出できない恐れがある。その場合読み出し側から遠い部分での検出効率は低くなるため、今回の測定では長さ方向に対する検出効率の変化を見る。長さ方向に対する検出効率を求めるため、今実験では各ボックスの検出効率を求める。手順としては

1. ノイズを充分カットできミュオンが通過したイベントといえるスレッシュホールドの設定
2. 注目しているボックスをミュオンが通過したと考えられるイベントセレクション

詳細は以下で説明する。

4.1.1 スレッシュホールドの設定

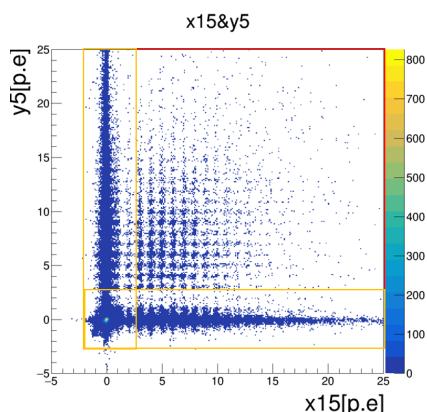


図 4.1 ボックス (15,5) の p.e 分布

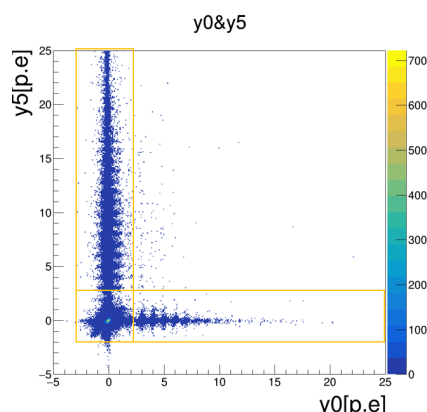


図 4.2 平行な y0 と y5 の p.e 分布

図 4.1 は 1 例としてボックス (15,5) の p.e 分布を表している。この分布にはボックス (15,5) を宇宙線ミュオンが通過したイベントの他、他のボックスを通過してトリガされたイベント、熱雑音等のノイズでトリガされたイベント等が含まれる。このイベントの中からボックス (15,5) を宇宙線ミュオンが通過したイベントを選び出せる妥当なスレッシュホールドを設定する。そのために宇宙線ミュオンが通過したイベント以外のイベントの分布を確認する。

図 4.2 は 1 例として平行なチャンネル y0 と y5 の p.e 分布を表している。この 2 つのチャンネルを同一ミュオンが通過することはないため、この分布は他のボックスを通過してトリガされたイベントやノイズでトリガされたイベント等の分布であると考えられる。よって、図 4.1, 図 4.2 から橙枠で囲まれたイベントを含まないようなスレッシュホールドを設定し、赤枠で囲まれたイベントをボックス (15,5) を宇宙線ミュオンが通過したイベントであるとした。具体的にはスレッシュホールドは 2.5p.e と設定した。

4.1.2 イベントセレクション

検出効率を見積もるために 2 種類のイベントセレクションを行う。1 つは宇宙線ミュオンがボックスを通過したと思われるイベントセレクション。もう 1 つは宇宙線ミュオンがボックスを通過し、注目しているチャンネルにシグナルが観測されたイベントセレクションである。

MPPC の検出光量を LY として、 $LY > 2.5p.e$ の時、つまり宇宙線ミュオンが通過したと思われるとき $LY \circ$, $LY < 2.5p.e$ の時、つまり宇宙線ミュオンが通過していないと思われるとき $LY \times$ と表記する。各チャンネルの検出光量は例としてチャンネル y10 の検出光量の場合、 LY_{10}^y と表記することにする。するとボックス (0,0) のチャンネル x0 に注目したイベントセレクションは

1. $(LY_0^y \circ) \& (LY_0^x \sim LY_{15}^x \times) \& (LY_0^y \sim LY_{15}^y \times)$: 宇宙線ミュオンがボックス (0,0) を通過し

と思われるイベント

2. $(LY_0^y \circ) \& (LY_0^x \sim LY_{15}^x \times) \& (LY_0^y \sim LY_{15}^y \times) \& (LY_0^x \circ)$: 宇宙線ミュオンがボックス (0,0) を通過し、チャンネル x0 にシグナルが観測されたイベント

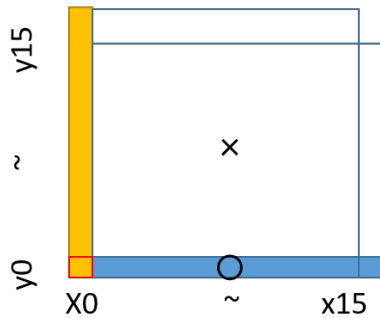


図 4.3 ボックス (0,0) のイベントセレクション模式図

ボックス (0,0) のチャンネル x0 の検出効率 $\varepsilon_{(0,0)}^x$ は

$$\varepsilon_{(0,0)}^x = \frac{N_1}{N_0} \quad (4.1.1)$$

で求める。ここで、

- N_0 : 宇宙線ミュオンがボックス (0,0) を通過したと思われるイベントの検出数
- N_1 : 宇宙線ミュオンがボックス (0,0) を通過し、チャンネル x0 にシグナルが観測されたイベントの検出数

である。同様のイベントセレクションを全ボックスに対して行い、全ボックスで検出効率を求める。

4.2 平均光子数

4.2.1 平均光子数と検出効率の関係

光子数が低いイベントは MPPC で検出されない、スレッシュホールドを超えない等の原因のため、検出効率が出る原因の 1 つとして平均光子数が低いことが考えられる。よって平均光子数を見ることで検出効率をある程度予想することができる。

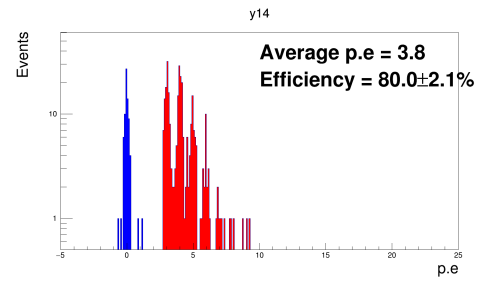
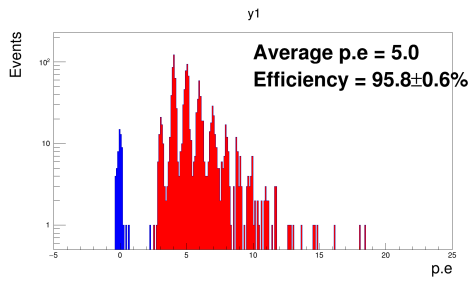


図 4.4 ボックス (8,1) のチャンネル y1 の p.e 分布 図 4.5 ボックス (9,14) のチャンネル y14 の p.e 分布

図 4.4, 図 4.5 はそれぞれボックス (8,1),(9,14) の p.e 分布を表している。青塗りの部分はイベントセレクション 1 にかかりイベントセレクション 2 にかからなかったイベントであり、赤塗りの部分はイベントセレクション 2 にかかったイベントである。この 2 つの図より、平均光子数が少なくなると検出効率も低くなることが予想される。なお、今回平均光子数は全イベントの光子数の平均をとることで求めた。

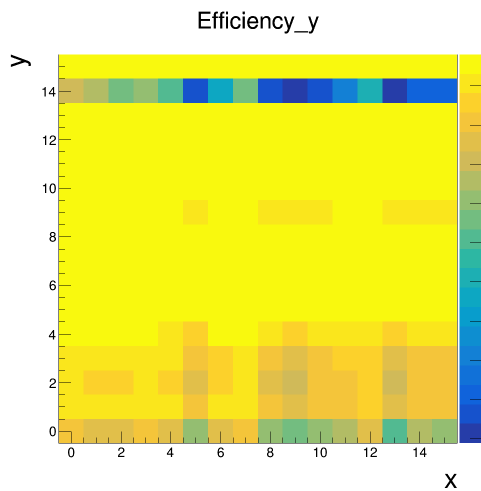


図 4.6 全ボックスの検出効率分布

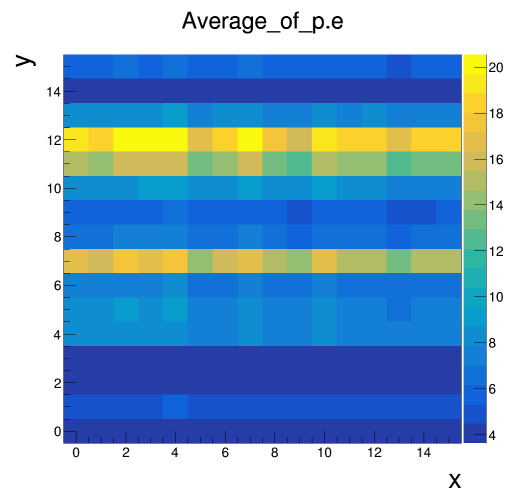


図 4.7 全ボックスの平均光子数分布

図 4.6, 図 4.7 は全ボックスの y チャンネルの検出効率の分布と平均光子数の分布である。これらの図より、チャンネル y0~y3,y14 のような平均光子数が少ないチャンネルは検出効率も小さくなっていることが予想されるため、これらを x 軸、y 軸に射影してボックスに対して和を取り詳細にみていく。



図 4.8 y 軸に射影した検出効率分布

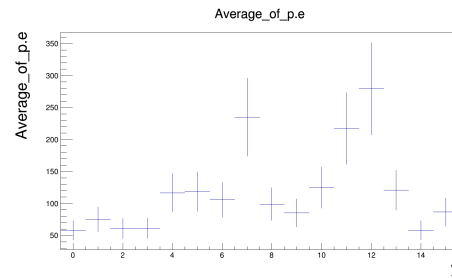


図 4.9 y 軸に射影した平均光子数分布

図 4.8, 図 4.9 は図 4.6, 図 4.7 を y 軸に射影したものであり、これは各 y チャンネルの検出効率と平均光子数の和を表す。これらの図より、チャンネル y0~y3,y14 のように平均光子数を射影した値が約 50 を下回ると検出効率は低下し、それ以上では検出効率は 100 に近い値が出ることがわかる。この光子数はボックスに対して平均をとると約 4 であり、平均光子数が 4 を下回ると検出効率が低下することがわかる。

4.2.2 平均光子数と検出効率の長さ依存性

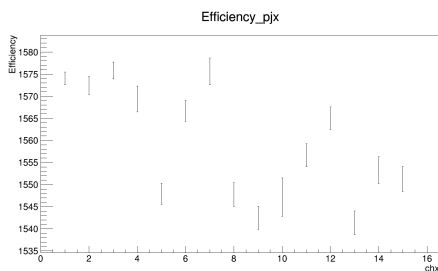


図 4.10 x 軸に射影した検出効率分布

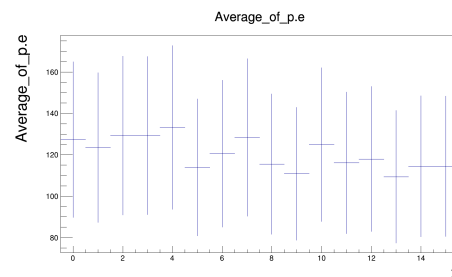


図 4.11 x 軸に射影した平均光子数分布

図 4.10, 図 4.11 は図 4.6, 図 4.7 を x 軸に射影したものであり、これは長さ方向に対する検出効率と平均光子数の和を表す。これらより、検出効率と平均光子数は長さ方向に対して多少のばらつきはあるものの誤差の範囲に収まっており、検出効率と平均光子数が長さ方向に対して依存性を持たないことがわかる。この結果は波長変換ファイバーの減衰長がシンチレータに対して十分長く、読み出し側から遠いボックスでも測定を行えることを示しており、波長変換ファイバーの減衰長の公称値と矛盾しない。

4.3 検出効率の見積もりの改善点

本実験で行った検出効率の見積もりには 2 つの改善点がある。1 つはイベントセレクションの正確性である。イベントセレクションにより各ボックスを通過したと思われるイベントを選択した

が、実際にはプラスチックシンチレータは 75cm のものを使用しており、11cm 分はボックスを構成していない。よってその部分を通過してトリガされた場合確実にそのボックスを通過したといえず、より確実にそのボックスを通過したと思われるイベントセレクションのためには 3 層目が必要である。

もう 1 つはスレッシュホールドの問題である。本実験の測定では測定したいチャンネルにもオンラインのスレッシュホールドがかかっている。オンラインのスレッシュホールドは約 1.5p.e でかけているため、ボックスを宇宙線ミューオンが通過した場合でも約 1.5p.e を下回るイベントは検出されない。これにより今回測定した検出効率はオフラインで 2.5p.e のスレッシュホールドをかけ、オンラインで約 1.5p.e のスレッシュホールドをかけた場合の検出効率となっている。この場合平均光子数が低くなりオフラインとオンラインのスレッシュホールドの間のイベントが多くなると、検出効率は低下する。よりバイアスの小さい検出効率を求めるためには、3 層構造にし、検出効率を測定したいチャンネルにオンラインでスレッシュホールドをかけないことでおこなえると思われる。

4.4 解析結果

解析の結果から各チャンネルには検出効率のばらつきがあり、それには各チャンネルの平均光子数の影響が影響していると思われる。これには MPPC とファイバー間のコネクタが手作りである寄与が大きく、その個体差からファイバーの端面と MPPC の受光面との距離にばらつきがあるためだと思われる。よって、コネクタ周りの設計を見直し個体差が生まれにくい設計をすることで各チャンネルの検出効率が同じような値になり、よりよい測定がおこなえる。

第 5 章

シミュレーション

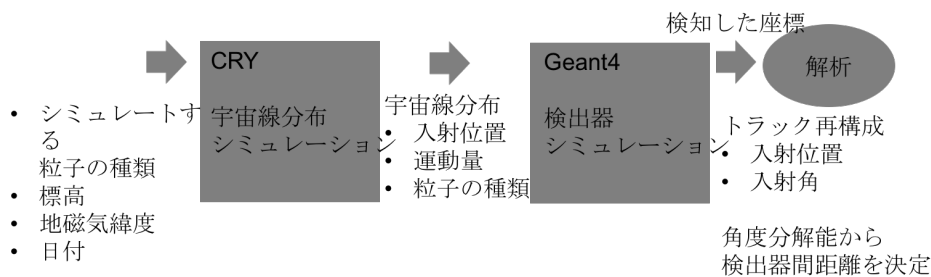


図 5.1 シミュレーションの行程

図 5.1 に示したとおりに、CRY と Geant4 を用いて宇宙線ミューオンの到来方向精度を見積もる環境を構築し、角度分解能と 1 日の検出率を見積もった。検出率と角度分解能の結果から、検出器間の距離を 50cm に決定した。

5.1 CRY を用いた宇宙線分布シミュレーション

CRY(Cosmic-ray Shower Library) とは、MCNPX(Monte Carlo N-Particle eXtended) に基づく、宇宙線の 1GeV~100TeV の一次粒子と 1MeV~100TeV の二次粒子のシミュレーションにより事前に算出されたデータから、宇宙線分布を生成する、大気中のプロトン励起宇宙線シャワーのモンテカルロシミュレーションのパッケージである。

大気モデルは、大気を 42 列の均一な密度の層として、近接する層で密度を 10% ずつ変化させ、シミュレートする大気の最上部の高度は海拔 31km に位置付けられている。

大気中の宇宙線粒子のフラックスは、主に銀河系宇宙線の陽子によるものであり、アルファ線と重原子核からの寄与は小さい。そのため、現在、CRY は一次陽子の効果のみをシミュレートすることに専念している。フラックスの表現は

$$J(E) = A(E + B)^\alpha E^\beta \text{ protons/m}^2/\text{steradian/second/GeV} \quad (5.1.1)$$

が用いられている [4] [5]。ここで E は核子あたりの運動エネルギーである。磁化した太陽プラズ

表 5.1 Papini による一次宇宙線の陽子のフラックスの変数

	A	B(GeV)	α	β
Solar minimum	18000	0.92	-4.00	1.25
Solar maximum	18000	1.61	-3.83	1.08

マが惑星間を占めるにつれて、低いエネルギーの陽子が地球からそれていくため、低いエネルギーの宇宙線粒子のフラックスは太陽風と反相関する。ある特定の日の陽子のフラックスは、太陽活動の極大のときと極小の時のフラックスに重み付けされ、

$$J(E)_{date} = (1 - x)J_{smin}(E) + xJ_{smax}(E) \quad (5.1.2)$$

で表される [4]。ここで、 $x = |\sin(\pi\Delta T/T_{cycle})|$ 、 T_{cycle} は太陽の活動周期、 ΔT は周期の開始からの時間である。

CRY ではシミュレートする高度を海拔 0m、2100m、11300m から選ぶことができる。今回の宇宙線分布シミュレーションは自然科学棟 3 号館に近い条件で行った。シミュレート結果を集計する粒子は電荷をもつ粒子、つまり陽子、電子、ミューオン、パイ中間子とそれらの反粒子のみを選び、標高は 0m、地磁気緯度は 25.99 度、日付は 2017 年 10 月 11 日、シミュレートする範囲は一辺 5m の正方形とした。

5.2 宇宙線ミューオンの分布

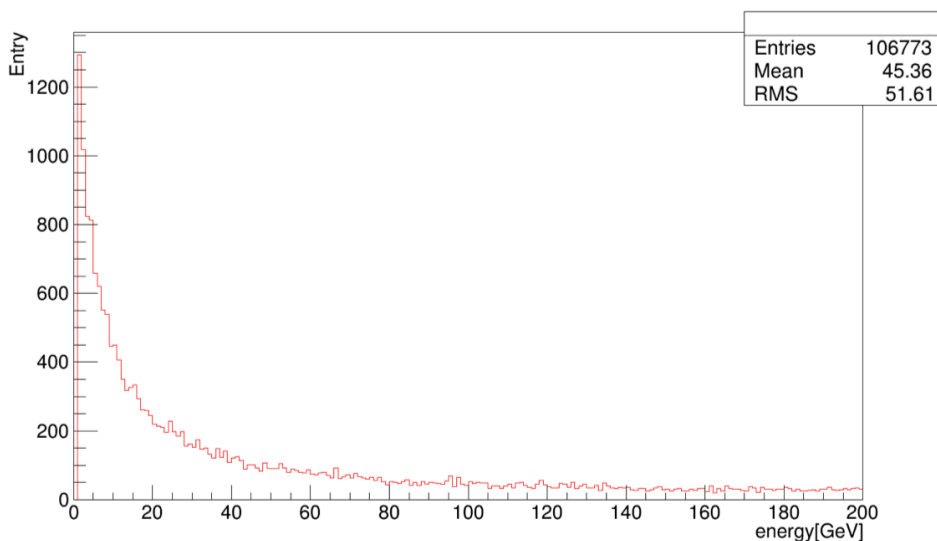


図 5.2 宇宙線ミューオンのエネルギー分布

CRY の宇宙線シミュレーションから、宇宙線ミュオンは 0~50GeV に多く分布していることがわかった (図 5.2)。そのためこのエネルギー領域のミュオンのみを取り扱う。

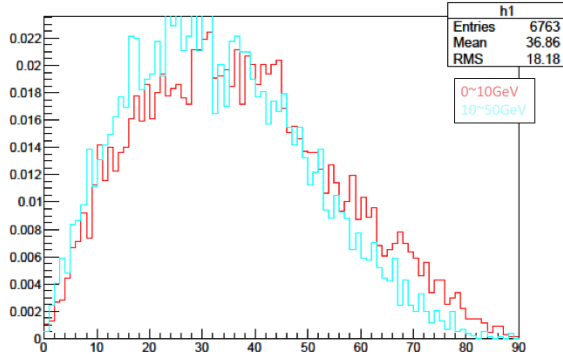


図 5.3 エネルギー毎の宇宙線ミュオンの天頂角分布

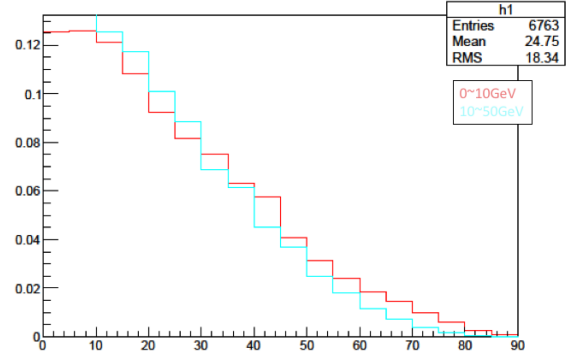


図 5.4 エネルギー毎の宇宙線ミュオンの天頂角分布 (極座標の面積素で規格化)

宇宙線ミュオンの角度分布を 100 万イベントでシミュレーションを実行した。0~10GeV と 10~50GeV に分けて、入射角ごとの宇宙線ミュオン数を、ヒストグラムの面積を 1 に規格化して表示した (図 5.3)。20~40 度付近にピークがあることがわかった。

補足として、上のヒストグラムを極座標の面積素で割って規格化すると、0 度にピークをもつことがわかる (図 5.4)。ミュオンの天頂角分布は、天頂角によってミュオンが通過する大気の厚さが変化することに関係する。通過する大気の厚さ x で μ の鉛直強度を、

$$I(x, 0) \approx Ax^{-n} \quad (5.2.1)$$

と近似する。通過する大気の厚さ x で天頂角 θ 方向の強度 $I(x, \theta)$ は $I(x, 0)$ に比べて大気の厚さが $x/\cos\theta$ 変化するから、

$$\begin{aligned} I(x, \theta) &\approx I\left(\frac{x}{\cos\theta}, 0\right) \\ &= Ax^{-n} \cos^n \theta \\ &= I(x, 0) \cos^n \theta \end{aligned} \quad (5.2.2)$$

と表される [6]。地上付近のミュオンでは $n \approx 2$ と考えられている。

5.3 検出器を通過しない宇宙線の除外

検出器を明らかに通過しない宇宙線まで Geant4 で CRY でのシミュレーションの段階で検出器の中心の高さの一辺 1m の正方形を通過しない宇宙線を除外して、Geant4 の計算量を減らした (図 5.5)。

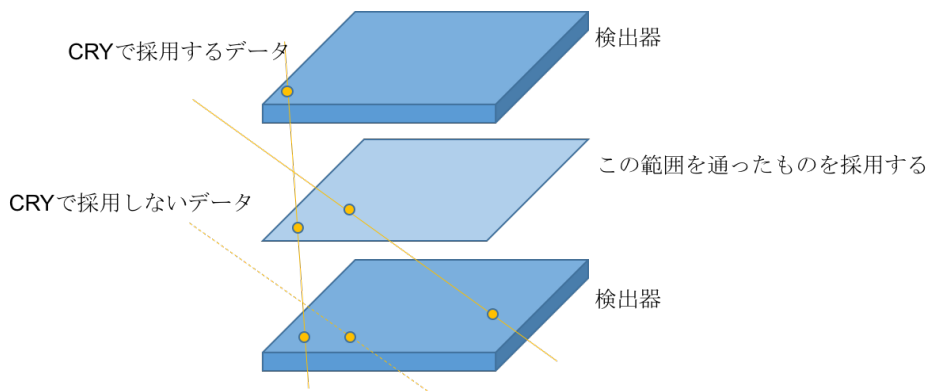


図 5.5 検出器を通過しない宇宙線の除外

5.4 角度分解能の見積もり

5.4.1 Geant4 を用いた検出器シミュレーション

CRY のシミュレーションを元に、Geant4 でミューオンが検出器を通過した座標を求めた。その座標からトラック再構成を行い角度分解能を求める。

5.4.2 宇宙線トラックの再構成

Geant4 で求めた、宇宙船が上下の検出器を通る座標から宇宙線を再構成し、xz 面上の入射角を θ_x 、yz 面上の入射角を θ_y とする。宇宙線トラックの再構成では、シンチレータの太さによりずれが生じる。そのため、シミュレートした宇宙線トラックと再構成した宇宙線トラックの xz 面上の入射角 θ_x のずれを求め、本実験での角度分解能を見た。

5.4.3 角度分解能

図 5.6 はシミュレートした宇宙線トラックと再構成した宇宙線トラックの入射角の差を表している。検出器間距離が離れるほど差が小さくなっていることがわかった。図 5.7 は検出器間距離と角度分解能の関係を表している。検出器間距離が 50cm のとき、角度分解能は 1.6 度 (27.6mrad) であった。50cm でも十分な分解能を得られることがわかった。

5.5 検出レートの見積もり

宇宙線が 1cm^2 あたり 1 分間に 1 つ入射すると仮定して概算し、1 日で測定されるイベント数と検出器間距離の関係を調べた (図 5.8)。その結果、検出器間距離 50cm で 84 万個程度で、十分に検出できることがわかった。検出器間距離が短いほどよい検出レートが得られるので、検出レート

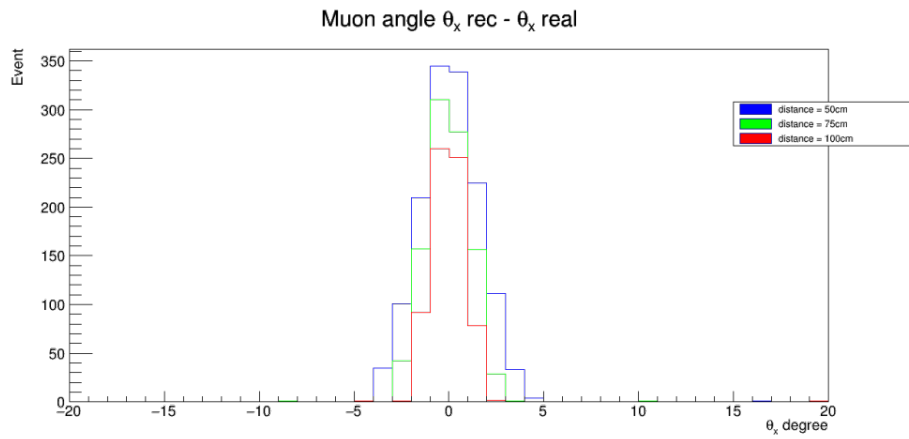


図 5.6 シミュレートした宇宙線トラックと再構成した宇宙線トラックの入射角の差

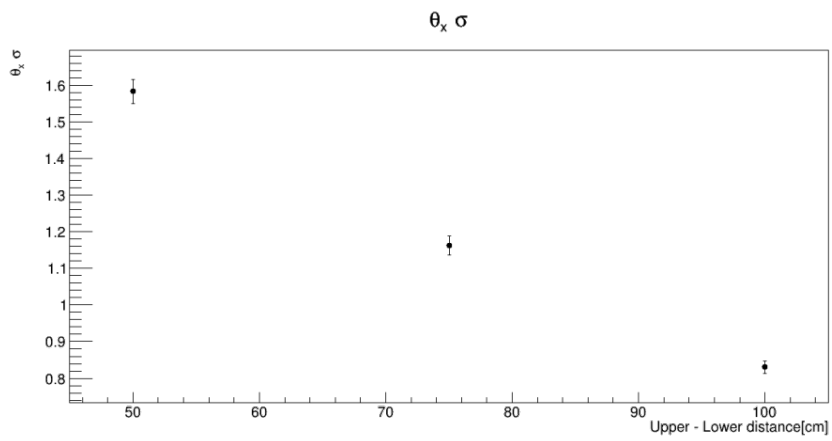


図 5.7 検出器間距離と角度分解能の関係

の性能を重視し、また構造的な制約を考慮して、検出器間距離を 50cm に決定した。

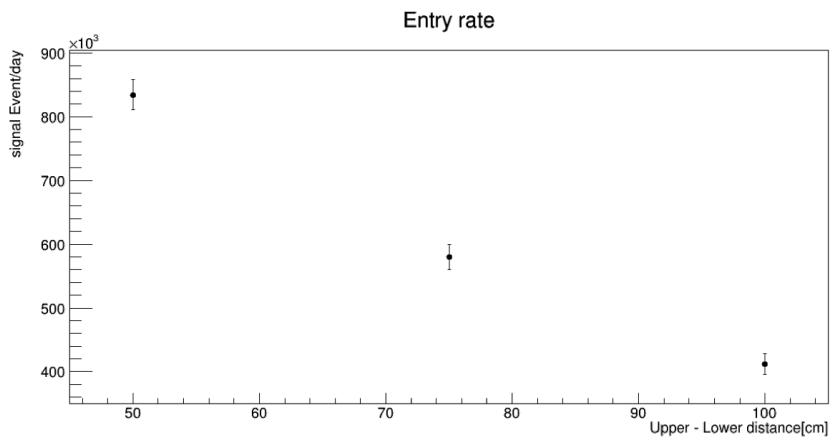


図 5.8 検出レート

第6章

まとめ

今実験ではミュオンラジオグラフィーを行うためのミュオン到来方向実験に向けたプレートを作成し、宇宙線ミュオンが通過した時の光読み出し装置を設計して光量測定を行い MPPC の Gain 調整を行い、検出器の検出効率を見積もった。

Geant4 を用いたシミュレーションを行い、検出器の角度分解能と 1 日の検出レートを見積もった。

検出器の平均光子数と検出効率を全ボックスに対して測定した。全ボックスの平均光子数は約 6p.e であったが、平均光子数はチャンネルごとにばらつきがあり、チャンネル y14 等のように平均光子数が 4p.e を下回るようなチャンネルも見受けられた。検出器の光量の長さ方向への依存性は認められなかった。

コネクタの個体差が検出効率に影響していることがわかり、コネクタの設計を見直す必要があることがわかった。また、現在の設計から直すべき問題点が何点かあるためそこを修正する必要がある。1 点目は MPPC の基盤部分が L アングルに固定されているが、この設計では取り回しが悪く遮光もしづらいためプレートに基盤を取り付けるように作り直す。2 点目はシンチレータの長さのうち、有効面積ではない部分がトリガに影響している可能性があるため、その部分をカットする。3 点目はファイバーとコネクタを固定する部分にグルーガンを用いていたが、熱による組成変性の可能性があるため、別の止め方を考える必要がある。

今後の展望としては上記の設計の問題点を改善し、プレートを 2 セット制作しミュオンラジオグラフィーをおこなえる装置を完成させ、これを用いて実験室の天井等をミュオンラジオグラフィーを行い、質量厚さを求めることである。

謝辞

本実験をすすめるにあたり、ご指導いただいた指導教員の山祐司教授、前田順平講師に厚く御礼申し上げます。また、議論を通じて多くのご指導や示唆を頂いた神戸大学粒子物理研究室の皆様にご場をお借りして謝意を示します。

参考文献

- [1] https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/03_handbook.pdf
- [2] 石島 直樹,[EASIROC MODULE User Guide],(2014)
- [3] 前田 順平、修士論文『原子炉ニュートリノ振動実験のための宇宙線飛跡検出器の開発』
- [4] Chris Hagemann, David Lange, Doug Wright, "Monte Carlo Simulation of Proton-induced Cosmic-ray Cascades in the Atmosphere,"Lawrence Livermore National Laboratory,February 12, 2012.
- [5] P. Papini, C. Grimani,and S.A. Stephens, Nuovo Cim C 19 , 367 (1996).
- [6] 小田 稔, 『宇宙線』 (1975).