

シリコン検出器を用いた宇宙線  
ミューオンの電荷比測定

大阪大学理学部物理学専攻  
山中卓研究室 4年  
荒井泰貴 家城齊 北村遼

平成25年4月25日

## 概要

我々の実験目的は、宇宙線ミュオン電荷の非対称性について調べることである。地表では宇宙線ミュオンは正電荷のものが負電荷のものよりも約1.27倍多いことが知られており、本実験ではこの比の測定を行った。ミュオン電荷を判別するためには磁場中での飛跡を測定することが必要であり、本実験ではATLAS実験でも使用されているシリコンストリップ検出器を用いてミュオン飛跡を測定した。シリコン検出器からの信号を読み出すには測定システムの開発が必要であり、その開発は本実験の重要な一部となっている。我々はSEABASと呼ばれる汎用DAQ基板を中心としたデータ収集システムを構築し、シリコン検出器を用いて宇宙線ミュオンを捕えることに成功した。その結果、正電荷のミュオンを646イベント、負電荷のミュオンを636イベント検出し、ミュオン電荷比は $1.02 \pm 0.06$ という結果を得た。

# 目次

<b>第 1 章 序論</b>	<b>6</b>
1.1 はじめに	6
1.2 測定原理	6
<b>第 2 章 シリコン検出器</b>	<b>8</b>
2.1 シリコン検出器	8
2.2 チップ	10
2.2.1 レジスタ	10
2.2.2 Pipeline	10
2.2.3 チップのモード	10
2.2.4 コマンド	11
<b>第 3 章 読み出しシステムの開発</b>	<b>13</b>
3.1 読み出しシステム	13
3.2 読み出し用ファームウェア	14
3.3 読み出し用ソフトウェア	15
3.4 DAQ の流れ	15
<b>第 4 章 シリコン検出器の動作確認</b>	<b>16</b>
4.1 シリコン検出器の設定の初期化	16
4.2 閾値の設定	16
4.3 タイミング調整	18
4.4 センサーの動作確認	18
4.4.1 検出器 1 台での動作確認	18
4.4.2 検出器複数台での動作確認	18
<b>第 5 章 本測定とセットアップ</b>	<b>22</b>
5.1 セットアップの方針	22
5.2 シミュレーション	26
5.2.1 分解能	26
5.2.2 統計量	26

<b>第 6 章 解析</b>	<b>29</b>
6.1 測定条件 . . . . .	29
6.2 事象選別 . . . . .	29
6.3 シリコン検出器位置の較正 . . . . .	31
6.4 シリコン検出器の回転ずれの補正 . . . . .	33
6.5 電荷比導出のための補正 . . . . .	36
6.6 電荷比の導出 . . . . .	37
<b>第 7 章 結論及び課題</b>	<b>41</b>
7.1 結論と考察 . . . . .	41
7.2 課題 . . . . .	41
<b>付 録 A Appendix</b>	<b>43</b>
A.1 センサーの Efficiency . . . . .	43

# 目 次

1.1	測定の概念図	7
2.1	シリコン検出器	8
2.2	検出器の概念図	9
3.1	読み出しシステム	13
3.2	データ受信の流れ	14
4.1	ノイズの閾値依存性	17
4.2	シリコン検出器のヒット位置。単位は mm、図中の長方形はセンサーの大きさを表す。	19
4.3	シリコン検出器3台を重ねて設置したときのヒットパターン。青:表面、赤:裏面	20
5.1	実験のセットアップ	22
5.2	セットアップのため作成したアルミフレーム	23
5.3	実験に使用した磁石を設置してあるラック：中央部に四角に穴が開いており向かい合う形で磁石 (0.4T) が固定されてある	24
5.4	磁石：ラックを上から見た写真で左右に磁石が取り付けられている	24
5.5	磁場がない場合のシリコン検出器の配置：検出器を通るミュオンは磁場に入らない	25
5.6	磁場がある場合のシリコン検出器の配置：アルミフレームを挿入して検出器で磁場を挟むようにする	25
5.7	宇宙線ミュオンの運動量分布。縦軸:強度、横軸:運動量。それぞれ A:海拔 3200 m、B:海面、C:海面、入射角 $68^\circ$	27
5.8	磁場がある場合と無い場合での、シリコン検出器3へのミュオンの入射位置の差 $\Delta$ [mm]	28
5.9	$\mu^-$ 成分の $\Delta$	28
5.10	$\mu^+$ 成分の $\Delta$	28
6.1	クラスターの模式図。入射位置と角度によりヒットするストリップの数は変わる。	30
6.2	事象選別前	31

6.3	各センサー面に対して1クラスターを要求した場合 . . . . .	31
6.4	センサーの配置模式図 . . . . .	32
6.5	磁場なし $\Delta$ . . . . .	34
6.6	理想的な測定における $\Delta$ : $\Delta$ は磁場によるミュオンのヒット位置のずれを表している . . . . .	35
6.7	磁場あり $\Delta$ . . . . .	36
6.8	座標系 . . . . .	37
6.9	回転軸 . . . . .	38
6.10	シリコン検出器の固定 . . . . .	39
6.11	磁場なし、ありそれぞれのずれ $\Delta$ (規格化前)。赤が磁場なし、青が磁場ありのヒストグラム . . . . .	39
6.12	磁場なし、ありそれぞれの $\Delta$ (規格化後)。赤が磁場なし、青が磁場ありのヒストグラム . . . . .	40
6.13	$\pm 500 \sim 3000 \mu\text{m}$ での差分ヒストグラム . . . . .	40

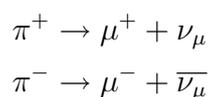
# 表 目 次

2.1	commands . . . . .	12
2.2	Control Commands . . . . .	12
4.1	シリコン検出器に設定した閾値電圧 . . . . .	17
6.1	測定期間と事象数 . . . . .	29
6.2	フィッティング関数の各パラメータ . . . . .	33
6.3	磁場なしと磁場ありでのピーク位置 . . . . .	37
A.1	各センサー面の Efficiency . . . . .	43

# 第1章 序論

## 1.1 はじめに

宇宙空間には高エネルギーで飛び交う粒子が存在する。これを一次宇宙線という。一次宇宙線の約90%は陽子である。一次宇宙線が大気圏に入射すると大気中の原子核と核反応を起こし、 $\pi$ 中間子、ミューオン、電子、 $\gamma$ 線など様々な二次宇宙線が発生する。地表付近に到達する粒子のほとんどはミューオンであり、ミューオンは次のように $\pi$ 中間子の崩壊によって生成される。



我々は、このミューオンについて調べることにした。本実験ではミューオンを磁石を使って曲げ、その飛跡を測ることによって電荷の判別を行い、ミューオンの電荷比を測定した。

## 1.2 測定原理

ミューオンの電荷を判別する測定原理について説明する。本実験では3台のシリコン検出器と0.4Tの磁石を使用した。検出器と磁場の位置関係の模式図を図1.1に示す。ミューオンが図1.1に示すように入射してくると、荷電粒子であるために磁場によってその軌道が曲がる。図1.1の場合、正電荷の粒子は磁場がなかったときの入射方向より右へ、負電荷の粒子は左へと曲げられる。我々は磁場領域の上に2台の検出器を置くことにより粒子の入射方向を測定し、さらに磁場領域の下に検出器を1台置くことで粒子が曲げられた方向を調べ、電荷の判別を行った。

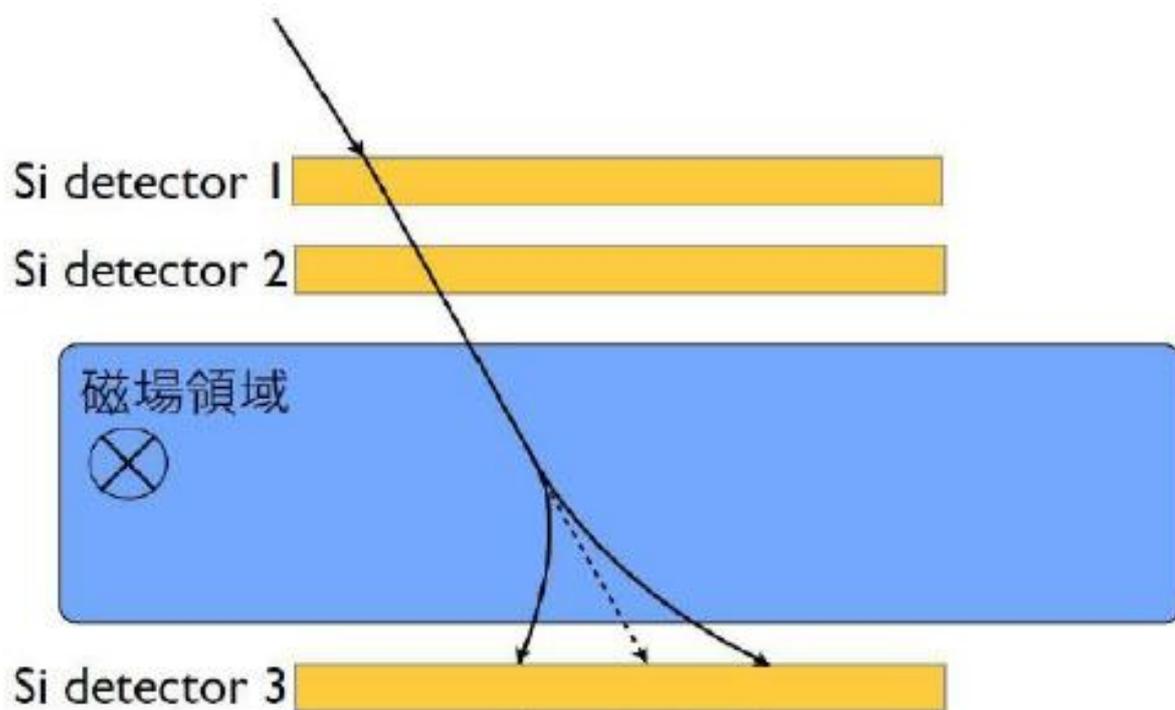


図 1.1: 測定概念図

## 第2章 シリコン検出器

### 2.1 シリコン検出器

宇宙線ミュオンが降り注いだ位置を精度よく知ることができれば、わずかな軌道変化でもミュオンの電荷を判別することができる。本実験では高い位置分解能を持つという観点からシリコンストリップ検出器を使用した。今回使用した ATLAS 実験で用いられているシリコン検出器は、2枚のセンサーと信号読み出し用の IC チップ 12 個から 1 つのユニット (モジュール) を構成している。1枚のセンサーには 768 本のストリップがあり、6 個の IC がその信号を読み出す。2枚のセンサーを背中合わせに 40 mrad の角度をつけて貼り合わせることで、粒子の位置の 2 次元情報を得ることができる。

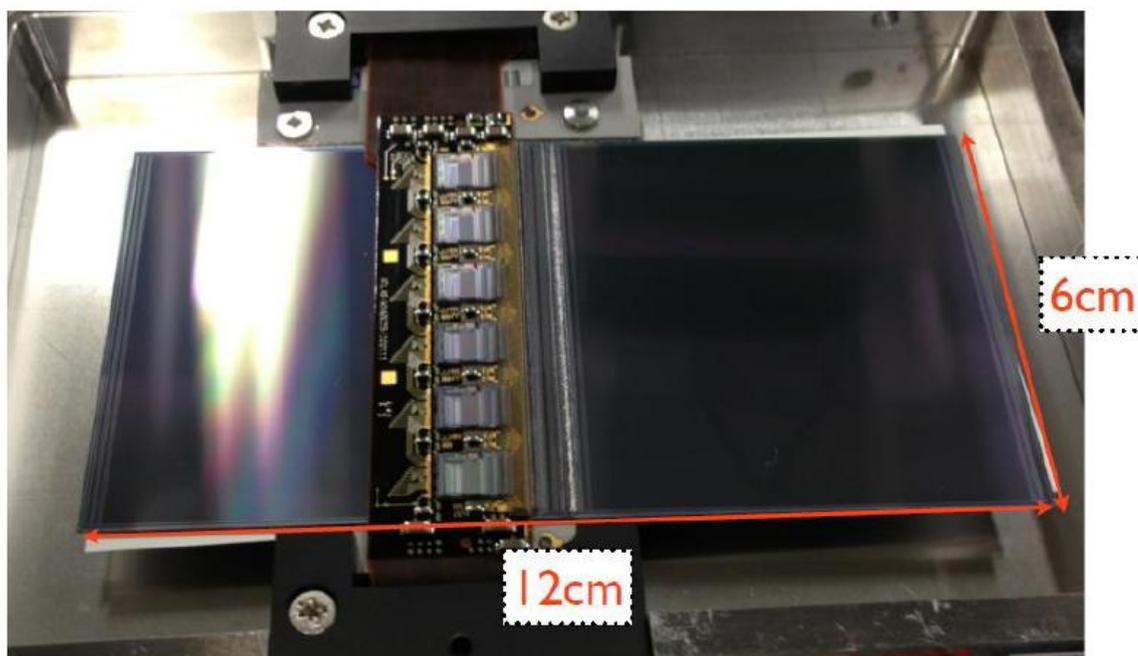


図 2.1: シリコン検出器

ストリップは  $80\ \mu\text{m}$  間隔で並んでおり、ストリップに垂直な方向では  $23\ \mu\text{m}$  と高

い位置分解能を持つことが特徴である。

$$Resolution = \frac{80}{\sqrt{12}} \approx 23\mu\text{m} \quad (2.1)$$

次に、荷電粒子の位置検出原理を説明する。検出器の構造は図 2.2 のようになっている。

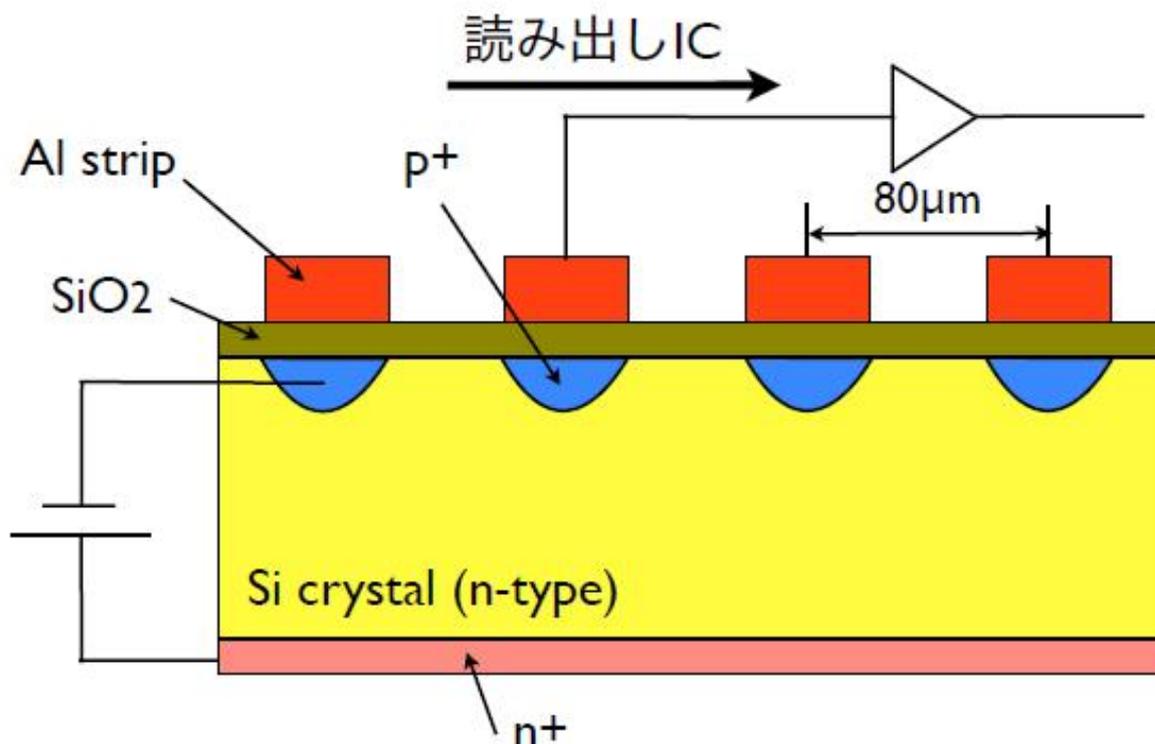


図 2.2: 検出器の概念図

図 2.2 のように逆バイアスを印加することで、シリコン結晶中の空乏層を拡げる。荷電粒子により生成された電子と正イオンは、空乏層中では再結合することがないため、電場によって電子は n+ へ、正孔は p+ へと引きつけられる。p+ に移動してきた電荷は AC 結合している Al 電極を經由して電気信号となる。Al strip は信号読み出し IC につながっており、得られた信号はアンプで増幅された後、comparator へ送られる。そこで信号が設定された閾値を越えていればそのストリップはヒットとなる。我々が得ることのできる情報は、ストリップにヒットがあるのか (すなわち 1) ないのか (すなわち 0) ということだけである。

## 2.2 チップ

今回我々が使用したシリコン検出器には1台につき12個のチップ（ABCD3Tチップ）が使用されている。先に述べたように、このチップ1つでストリップ128本のヒット情報を読み出すことができる。本実験で使用したチップには閾値などを設定するレジスタや、データを保持するための Pipeline などが内蔵されており、実際に読み出しをするためにはこれらの設定を決めなければならない。以下ではまずチップの設定について説明し、さらにこれらの設定を行う手段であるコマンドについて説明する。

### 2.2.1 レジスタ

チップにはいくつかのレジスタが内蔵されており、様々な設定値を書き込むことができる。測定を行うためには、レジスタに適切な値を設定する必要がある。本実験で使用した主なレジスタについて説明する。

- configuration register  
チップの初期値を書き込むためのレジスタ。
- threshold register  
チップの閾値を設定するためのレジスタ。閾値は2.5 mV刻みで0 mVから640 mVまでの範囲で設定することができる。
- mask register  
設定したストリップからのヒット情報を常に読まないようにする。これによってノイズの多いストリップを無視することができる。

### 2.2.2 Pipeline

Pipeline には25 ns毎に各ストリップにヒットがあったかどうか記録されている。Pipeline の深さは132bitであるので、 $132 \times 25 \text{ ns} = 3.3 \mu\text{s}$ の間だけここにデータを保持することができる。チップがLevel 1コマンドを受け取ると、コマンドを受け取った時刻から3.3  $\mu\text{s}$ 前の時点のヒットデータが返される。

### 2.2.3 チップのモード

チップには2つのモードが存在する。

- Send\_ID mode  
電源を入れた直後や configuration register に値を書き込んだ後はこのモードになる。このモードでは、チップは Level 1 コマンドを受け取ると configuration register の値を返す。初期値を設定する際にこのモードを使う。
- data taking mode  
Enable Data taking Mode というコマンドを送るとこのモードになる。このモードでは、チップは Level 1 コマンドを受け取ると、センサーからのヒットデータを返す。実際に測定を行うときはこのモードにする。

## 2.2.4 コマンド

コマンドを送ることによってチップを制御する。コマンドは Level 1 Trigger Commands と Control Commands に大別される。さらに、Control Commands は Fast Control Commands と Slow Control Commands の2つのタイプに分けられる。Level 1 Trigger Command と Fast Control Commands はデータ収集の際に使用する。コマンドの一覧を表 2.1 および表 2.2 に示す。

- Level 1 Trigger Command  
このコマンドを送ると、チップはチップのモードに応じた値を返す。
- Fast Control Command  
このコマンドは Soft reset や BC reset を行う際に使用する。
- Slow Control Commands  
このコマンドは、レジスタに値を書き込んでチップの初期化や閾値の設定をしたり、チップのモードを変更する際に使用する。

表 2.1: commands

Type	Field1	Field2	Field3	Description
Level 1	110	—	—	Level 1 Trigger
Fast	101	0100 or 0010		Soft Reset BC Reset
Slow	101	0111	Command	Slow Control Command see Table 2.2

表 2.2: Control Commands

Field3	Field4	Field5	Field6	Description
0001,1100	aaaaaa	000 000	dddd,dddd,dddd,dddd	Write to Configuration Register
1000,1100	aaaaaa	001 000	d—,—,—,—d	Write to Mask Register
0001,1100	aaaaaa	010 000	dddd,dddd,dddd,dddd	Write to Strobe Delay Register
0001,1100	aaaaaa	011 000	dddd,dddd,dddd,dddd	Write to Threshold Register
0000,1100	aaaaaa	100 000	—————	Pulse Input_Reg
0000,1100	aaaaaa	101 000	—————	Enable Data taking Mode
0000,1100	aaaaaa	110 000	—————	Issue Calibration Pulse
0001,1100	aaaaaa	111 000	dddd,dddd,dddd,dddd	Load Bias DAC
0001,1100	aaaaaa	000 100	dddd,dddd,dddd,dddd	Load TrimDAC

Field3 : 後に続く bit の長さ

Field4 : チップのアドレス

Field5 : 書き込むレジスタ

Field6 : レジスタに書き込む値

Level 1 Trigger Command と Fast Control Command に対してはすべてのチップが反応する。一方、Slow Control Commands に対しては Field4 で指定されたチップのみが反応する。ただし、Field4 が Global Address "111111" である場合はすべてのチップが反応する。

## 第3章 読み出しシステムの開発

チップからの信号を読み出すためには、チップにコマンドを送り、さらに返ってくるデータを受け取る必要がある。本実験ではそのためのデータ収集システムを構築した。以下ではそのシステムについて説明する。

### 3.1 読み出しシステム

システムの全体像を図 3.1 に示す。

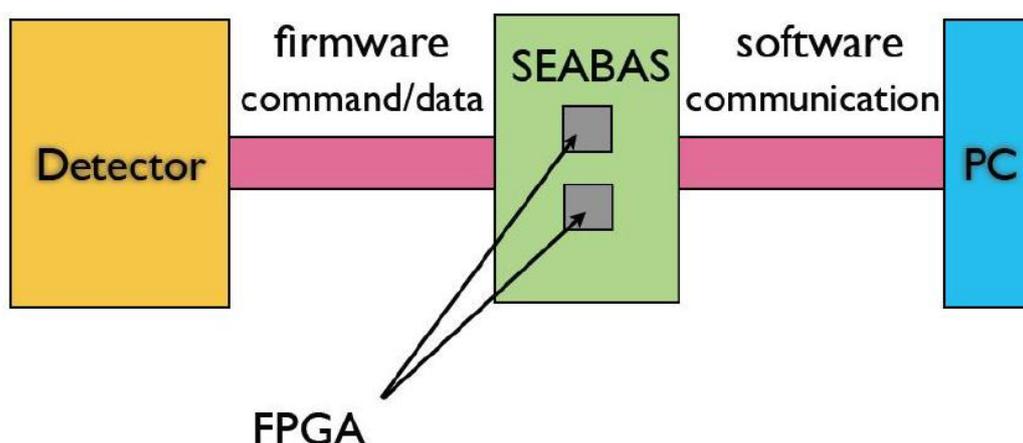


図 3.1: 読み出しシステム

本実験ではチップの読み出しのために SEABAS という汎用読み出しボードを用いた。SEABAS には、User FPGA と SiTCP FPGA という 2 つの FPGA が搭載されている。User FPGA は信号読み出しをする IC の制御用で、SiTCP FPGA は SEABAS と PC 間のデータ送受信用である。我々は、チップを制御するためのファームウェアを開発し、この User FPGA に実装した。また、SEABAS と PC の間でコマンドとデータの送受信を行うためのソフトウェアを開発し、PC に実装した。なお、SiTCP 上のファームウェアは KEK 内田智久氏が開発したものをそのまま使用した。

## 3.2 読み出し用ファームウェア

読み出し用ファームウェアの役割は2つある。

1つ目はチップを制御するためのコマンドを送ることである。PCからチップに送るコマンドが指定されたときに、その通りのコマンドを作ってチップへ送信するのである。これによってチップの設定を行うことができる。送るコマンドがLevel 1コマンドだった場合については、これを送るタイミングの調整が必要であり、このタイミング調整もファームウェア上で行った。

2つ目はチップから返ってくるデータを受け取り、PCへ送信することである。本実験では3台の検出器の読み出しを行う必要があった。つまり、3台に同時にLevel 1コマンドを送り、一斉に返ってくるデータを受け取って、順序よくPCへ送信しなければならない。このために、各検出器に対して1つずつFIFOを用意し、チップからのデータをまずFIFOに詰め、各FIFOのデータを順々にSiTCPに詰めてからPCに送った。(図3.2)

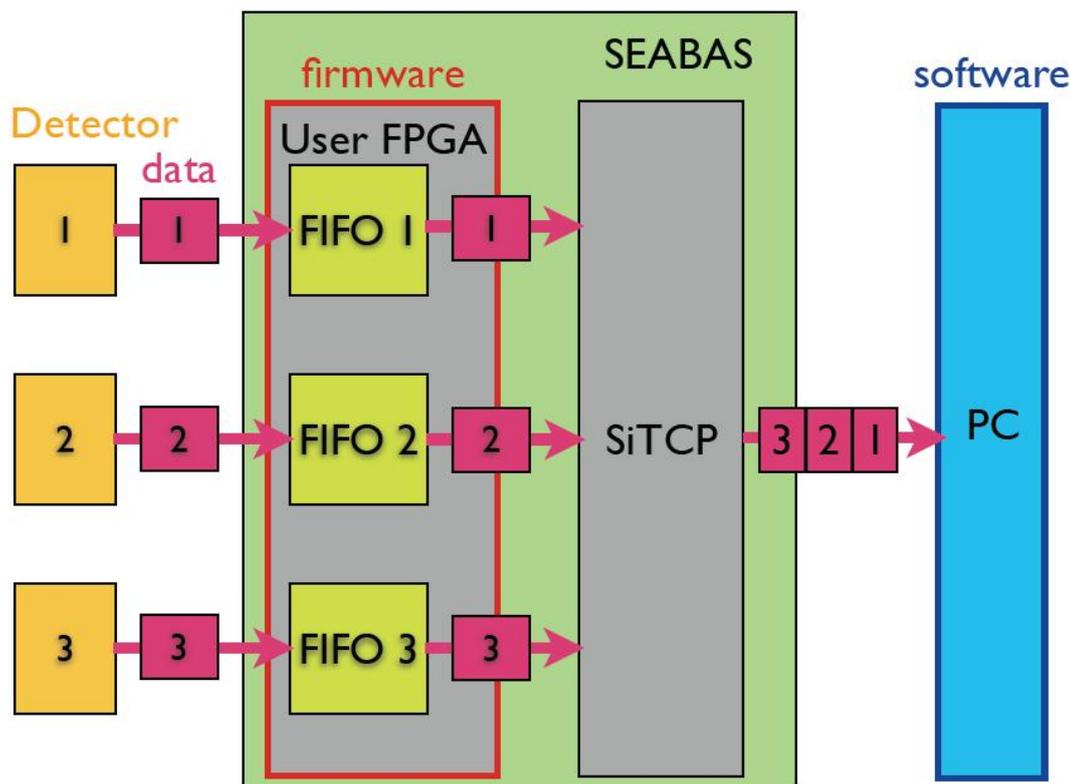


図 3.2: データ受信の流れ

### 3.3 読み出し用ソフトウェア

読み出し用ソフトウェアの役割は、次の2つである。

1つ目は、PCとSEABASのコミュニケーションを確立して、チップへ送るコマンドの指示を出すことである。本実験では、3台の検出器に個別にコマンドを送ったり、3台に同時にコマンドを送ったりする必要があった。これを可能にし、かつ検出器の台数に汎用性をもたせることを意識して開発を行った。

2つ目は、SEABASから返ってきたデータを受信し、そのデータをデコードして、解析をするためのroot fileをつくることである。

### 3.4 DAQの流れ

DAQの流れは次のようになっている。

1. PCとSEABASの接続を確立する。
2. 各レジスタの初期値をPCからSEABASに送信する。SEABASは送られた値からチップに送るコマンドを組み立てて保持する。
3. チップに送るコマンドをPCで指定する。SEABASは指定されたコマンドをチップへ送る。ここでチップをdata taking modeにする。
4. PCからSEABASにDAQ開始信号を送る。SEABASはデータ収集を行うDAQ状態になる。
5. SEABASがLevel 1トリガーを受け取ると、SEABASはチップにLevel 1コマンドを送る。
6. Level 1コマンドを受け取ったチップはデータをSEABASへ送る。
7. データはSEABAS上のFIFOに保持され、順次PCへ送信される。PCはデータを受信し保存する。
8. 5～7を繰り返す。
9. PCとSEABASの接続を切る。

## 第4章 シリコン検出器の動作確認

次に、実装したソフトウェア、ファームウェアを用いてシリコン検出器の動作確認を行った。

### 4.1 シリコン検出器の設定の初期化

シリコン検出器からデータの読み出しを行うためにまず、シリコン検出器の設定の初期化を行う。初期化をするためのコマンドには、シリコン検出器に設定したい値を表すビットパターンが含まれている。シリコン検出器は Send\_ID モードのときにトリガーを受け取ると、現在の設定を表すビットパターンを返すので、これを PC 上で確認し、初期化が正しく行われているかを確認した。

### 4.2 閾値の設定

次に、シリコン検出器の閾値電圧の設定と動作確認を行った。

シリコン検出器がある閾値に設定されているときに、ランダムにトリガーを 100 回送りノイズが閾値を超える回数を計測する。これを閾値を 0 mV から 2.5 mV ずつ 150 mV まで上げながら繰り返し行った。その結果をプロットしたのが図 4.1 である。図 4.1 で、左半分が検出器表面のチャンネル、右半分が裏面のチャンネルに対応している。なお、読み出し方法の都合上、裏面の端のチップを一つ読み出せない設定になっているので対応するチャンネル部分は空白になっている。

図 4.1 を見ると、閾値が高くなるにつれノイズが少なくなっている。このことから、閾値が正しく設定できていて、また正しく機能していることが確認できた。また、使用するシリコンセンサーに Minimum Ionizing Particle(MIP) が入射したとき、約 4 fC の電荷量が生じることがわかっており、これは信号の電圧 200 mV に相当する。これらの結果から、3 台のシリコン検出器それぞれに実際に宇宙線を測定する際の閾値を表 4.1 のように決定した。

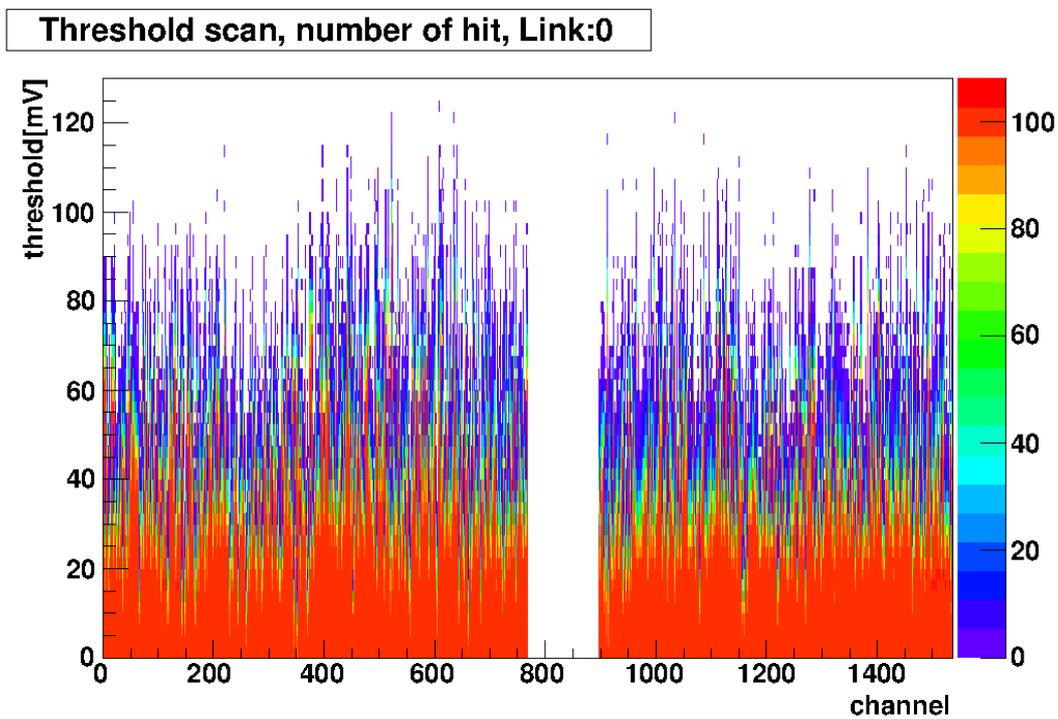


図 4.1: ノイズの閾値依存性

表 4.1: シリコン検出器に設定した閾値電圧

	検出器 1	検出器 2	検出器 3
閾値電圧 [mV]	140	115	115

## 4.3 タイミング調整

シリコン検出器からのヒットデータを読み出すためには、トリガーのタイミングを調整しなければならない。節 2.2.2 で述べたように、シリコン検出器はヒットデータを Pipeline に保持し、トリガーを受け取るとそこから  $3.3\ \mu\text{s}$  だけ前の時間のヒットデータを返す。粒子がシリコン検出器に入射してから  $3.3\ \mu\text{s}$  後にトリガーを送るように、ファームウェアと、ケーブルによる遅延でタイミングを調整した。

## 4.4 センサーの動作確認

最後に、シリコン検出器のセンサーの動作確認を行った。

### 4.4.1 検出器 1 台での動作確認

まず、シリコン検出器 1 台のみでの動作確認を行った。センサーに  $+150\ \text{V}$  の電圧をかけ、シリコン検出器の上下に置いた 2 台のシンチレーション検出器によるコインシデンスをトリガーとして宇宙線を測定した。図 4.2 は、裏表のストリップセンサーによる 2 次元のヒット位置をプロットしたものである。

図 4.2 から、シリコン検出器全体に一樣にヒットがあることがわかり、センサーが正しく動作していることを確認できた。

### 4.4.2 検出器複数台での動作確認

1 台ずつすべてのシリコン検出器について同様の測定を行い、正常に動作していることを確認した後、3 台を同時に読み出すことにより宇宙線の飛跡を求めた。1 台のときと同様に 2 台のシンチレーション検出器でトリガー信号を作った。シリコン検出器は 3 台重ねて設置した。

それぞれのシリコン検出器の 1 次元のヒット位置を実際の検出器の配置を再現してプロットしたものの一つを図 4.3 に示す。ヒットが一直線上にあり、宇宙線を観測できていることがわかる。

以上から、シリコン検出器の読み出しが正しく行えていることがわかった。

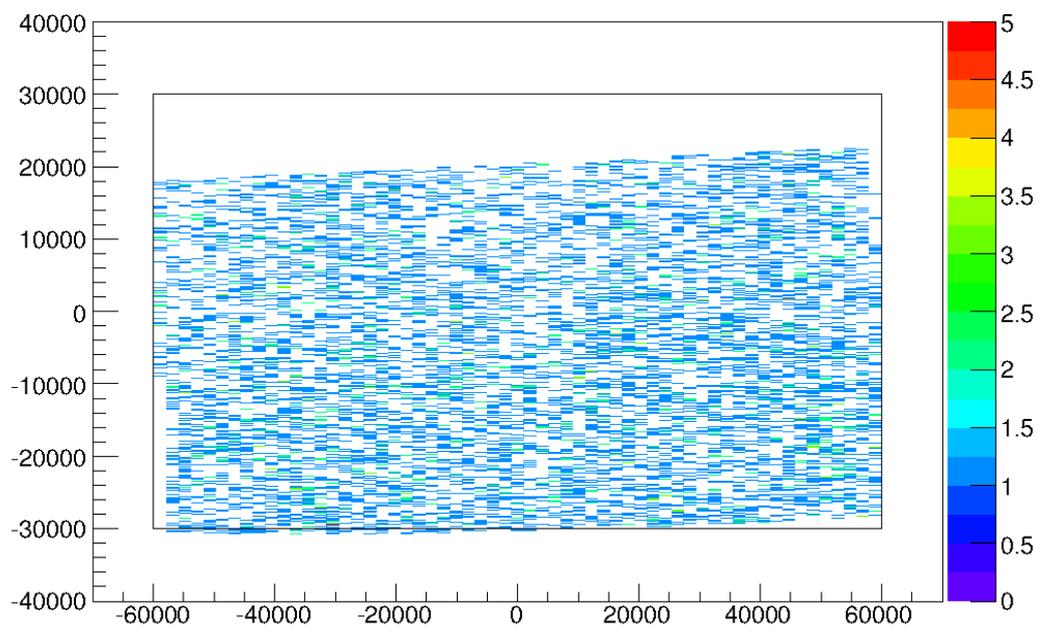


図 4.2: シリコン検出器のヒット位置。単位は mm、図中の長方形はセンサーの大きさを表す。

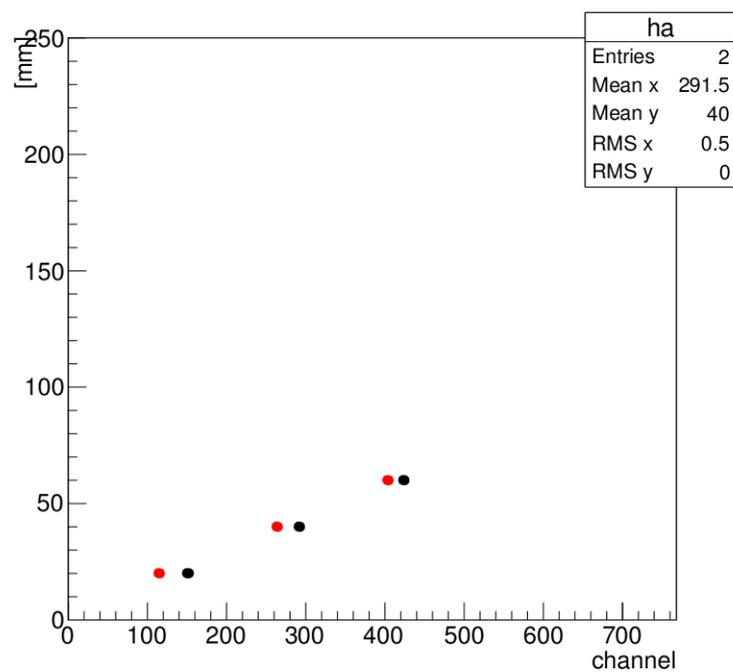


図 4.3: シリコン検出器 3 台を重ねて設置したときのヒットパターン。青:表面、赤:裏面



# 第5章 本測定とセットアップ

## 5.1 セットアップの方針

今回の測定のセットアップの概略図を図 5.1 に示す。磁場上部の2つのシリコン検

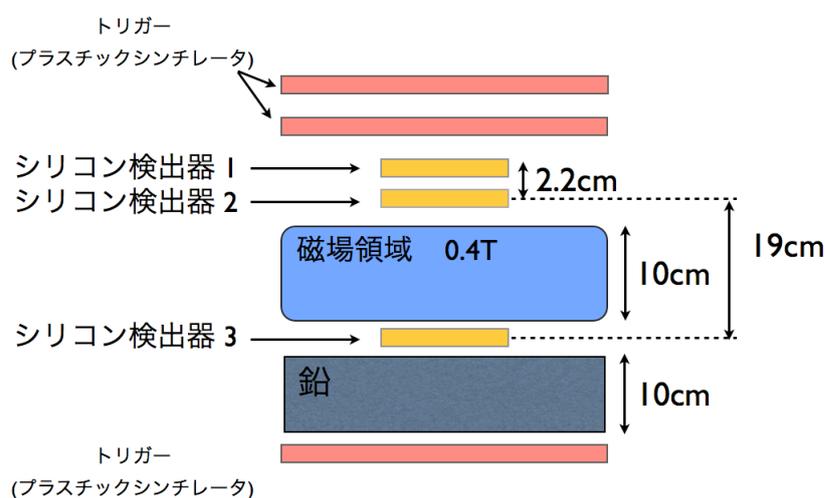


図 5.1: 実験のセットアップ

出器でミュオンの飛跡を決定し、3台目のシリコン検出器のヒット位置と上の2つのシリコン検出器から求めた3台目で予想されるヒット位置との差分  $\Delta$  を求める。差分  $\Delta$  は本実験では数 mm 程度になる。このため3台のシリコン検出器の相対的な位置の精度、すなわち検出器が互いに水平にかつ鉛直線上に揃っているかどうかは極めて重要となる。

シリコン検出器は水準器、定規を用いて注意深く設置したが手作業のため数百  $\mu\text{m}$  の精度しか達成できない。そこで、磁場をかけて本測定をする前にシリコン検出器が

完全に揃った状態からどの程度ずれているのかをあらかじめ知っておく必要がある。本実験においては、このシリコン検出器の位置のずれを評価するためにまず磁場をかけないで差分 $\Delta$ を考える。この状態での差分 $\Delta$ の意味するものはミュオンが最初に通過する2つのシリコン検出器から見たときの3番目のシリコン検出器の相対的な位置のずれである。よって、磁場がない状態で測定を行いシリコン検出器の位置のずれを把握しておき、その情報をもとに磁場のある状態でのデータに対してシリコン検出器のずれを補正すれば正確なミュオン電荷比を測定できるはずである。

ただし、この方法の問題点は、ミュオンが初めに通過する2つのシリコン検出器間の相対的な位置のずれを特定できないことである。さらに、磁場をかける前とかけた後の測定で3台のシリコン検出器の位置は変わらないようにしなければならない。この問題を解決するために本実験ではシリコン検出器を固定するためのアルミ



図 5.2: セットアップのため作成したアルミフレーム

フレーム (図 5.2) を作成しそこにシリコン検出器を固定してしまうことにした。磁場をかけるために用いる磁石 (0.4 T:図 5.3、5.4) が磁石を固定するラックから動かせない状態にあったため、シリコン検出器を設置・固定したアルミフレームを磁石の上下で左右にスライドさせることで磁場の有無を制御出来るようにした (図 5.5、5.6)。

また磁場上の2台のシリコン検出器は、間に空冷用の隙間 (5 mm) を開けた上で固定した。この様な配置にすると理想的には磁石上の2台のシリコン検出器の相対的なずれは、離れた3台目のシリコン検出器に比べて非常に小さくなる。こうした状



図 5.3: 実験に使用した磁石を設置してあるラック：中央部に四角に穴が開いており向かい合う形で磁石 (0.4T) が固定されてある

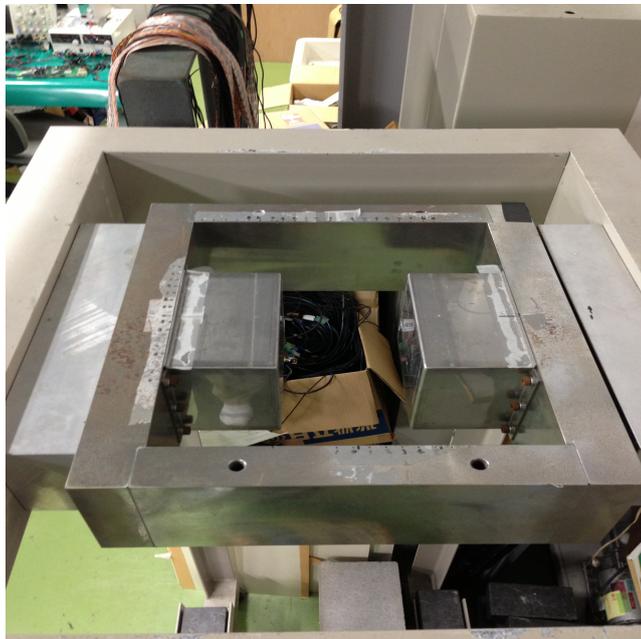


図 5.4: 磁石：ラックを上から見た写真で左右に磁石が取り付けられている

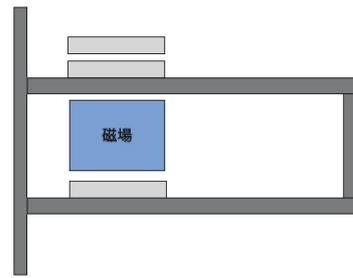
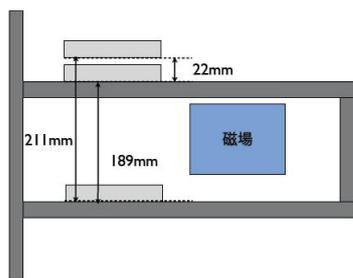


図 5.5: 磁場がない場合のシリコン検出器の配置: 検出器を通るミュオンは磁場に入らない  
 図 5.6: 磁場がある場合のシリコン検出器の配置: アルミフレームを挿入して検出器で磁場を挟むようにする

態にシリコン検出器を配置出来た場合は、1、2台目と3台目のシリコン検出器のずれについて考慮すれば電荷比を求めることが出来る。

## 5.2 シミュレーション

本測定での検出器のセットアップに対し、宇宙線ミュオン軌道の曲率が磁場によってどの程度曲がるかのシミュレーションを行った。

### 5.2.1 分解能

まず、本測定でのセットアップでの位置分解能について考察する。式 (2.1) より、シリコン検出器 1 台の位置分解能は  $23\ \mu\text{m}$  である。

荷電粒子は磁場中でローレンツ力を受け円運動をする。荷電粒子の運動量を  $p$  [GeV]、磁場の強さを  $B$  [T]、曲率半径を  $R$  [m] とすると

$$p = 0.3BR \quad (5.1)$$

という関係がある。この式から、ある運動量をもったミュオンが磁場中でどのくらい曲がるかを求め、磁場がある場合のミュオンの検出器に対するヒット位置を決定する。

宇宙線ミュオンの天頂角分布は  $\cos^2\theta$  に比例することが知られている。そこでシミュレーションにおいては、ミュオンの入射角は  $\cos^2\theta$  に比例する分布とした。

さらに宇宙線ミュオンは、あらゆる運動量のものが一様に降ってくるのではなく、図 5.7 のような運動量分布になっている。

ミュオンが磁場により曲げられ一番下のシリコン検出器 3 に入射する位置と、磁場が無い場合に入射する位置との差を  $\Delta$  とし、上記天頂角分布、運動量分布を仮定したときの  $\Delta$  を計算しプロットしたものが図 5.8 である。ここではミュオンの電荷比は  $\mu^+ : \mu^- = 1 : 1$  としている。

図 5.8 のうち、 $\mu^-$  の成分が図 5.9 で、 $\mu^+$  の成分が図 5.10 である。図 5.9、5.10 の分布の広がりシリコン検出器の位置分解能よりも大きいことから、 $\Delta$  の測定により電荷比を測定できることがわかる。

### 5.2.2 統計量

10 cm の鉛を置くことで運動量がおおよそ 300 MeV 以上のミュオンがトリガーされる。300 MeV 以上のミュオンの運動量分布と、測定用セットアップでの立体角などを考慮して、1 日あたりに期待できるミュオンの数は、約 20,000 と見積もった。

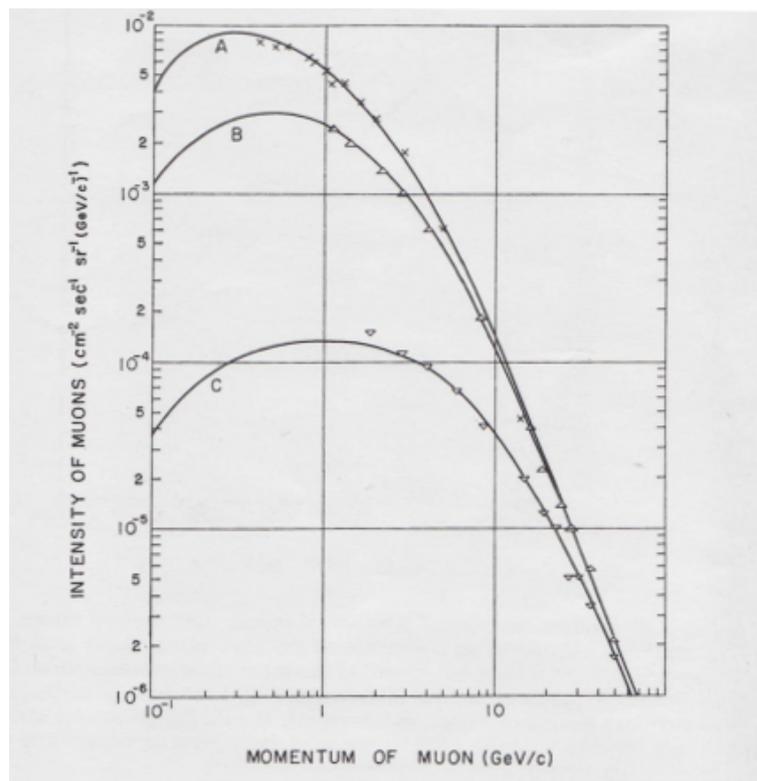


図 5.7: 宇宙線ミュオンの運動量分布。縦軸:強度、横軸:運動量。それぞれ A:海拔 3200 m、B:海面、C:海面、入射角  $68^\circ$

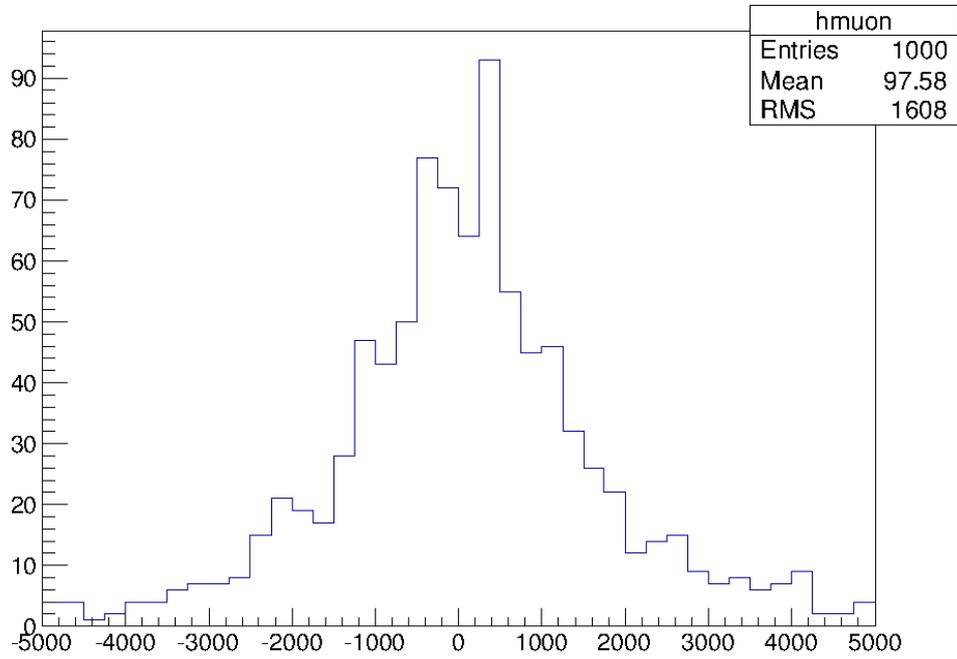


図 5.8: 磁場がある場合と無い場合での、シリコン検出器 3 へのミュオンの入射位置の差  $\Delta$  [mm]

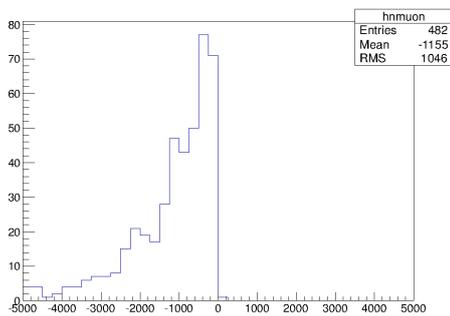


図 5.9:  $\mu^-$  成分の  $\Delta$

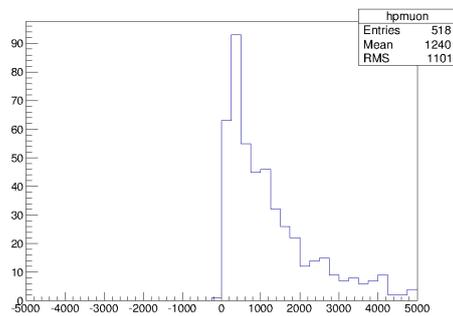


図 5.10:  $\mu^+$  成分の  $\Delta$

## 第6章 解析

今回の実験結果についての解析を以下で述べる。

### 6.1 測定条件

図 5.1 のように、飛跡検出用のシリコン検出器を磁石の上に 2 台、磁石の下に 1 台と合計 3 台設置した。さらにそれらを挟むようにトリガーとしてプラスチックシンチレータをシリコン検出器の上下に設置し、そのコインシデンスをトリガーとした。また、実験装置のある地表部分において検出される粒子は、文献を参照するとほぼミューオンであると考えられるが、念のため下のシンチレータのすぐ上に厚さ 10 cm の鉛を設置した。宇宙線と物質との相互作用で生じる電子はこの鉛の層を通過できないので、鉛を通過する荷電粒子の多くはミューオンである。本実験では寿命測定を行っていないので、ミューオン以外の荷電粒子、主には電子を削除するために、鉛を通過させることで間接的にミューオンの同定を行った。今回の測定では先に述べたようにシリコン検出器同士の位置を精密に決定する必要がある。そこでシリコン検出器の位置決定のために磁場のない状態であらかじめ測定を行い、その後磁場のある状態で測定を行った。測定は 2 月 9 日の 2013 年 2 月 9 日から 3 月 18 日にかけて断続的に行った (表 6.1)。実験した場所は大阪大学理学部 H 棟地下 1 階の実験室である。

表 6.1: 測定期間と事象数

磁場の有無	測定期間	事象数
磁場なし測定	2 日半	80379
磁場あり測定	14 日	315665

### 6.2 事象選別

データの選別方法について説明する。センサー面は 80  $\mu\text{m}$  間隔で並ぶストリップ 768 本から構成されている。1 つのセンサー面において最大 3 つまでの連続したヒッ

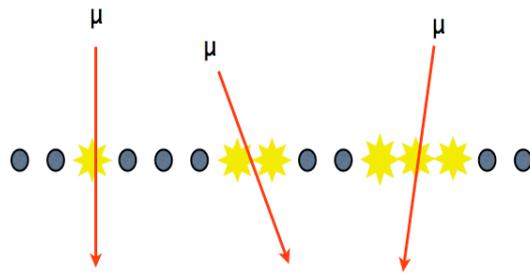


図 6.1: クラスターの模式図。入射位置と角度によりヒットするストリップの数は変わる。

トを1クラスター(図6.1)として定義する。こうして定義したクラスターを考えると、複数のミュオンが1つのセンサーに同時に入射することはまれなので、各センサー面に対して1クラスターを要求した。図6.2がこの要求前、図6.3が要求後で、多くのノイズを落としていることがわかる。1本のセンサーは長さが12cmあり、表裏のセンサーが角度40mradでずらして設置されている。そこで、図6.4を参照し、ミュオンがセンサーに入射した場合、表と裏でのヒットストリップの位置の違いは30本相当以内なので、

$$|(\text{表面のヒット位置}) - (\text{裏面のヒット位置})| = 30 \times 80 \mu\text{m}$$

という条件を課すことで、ノイズによるヒットをさらに減らす。

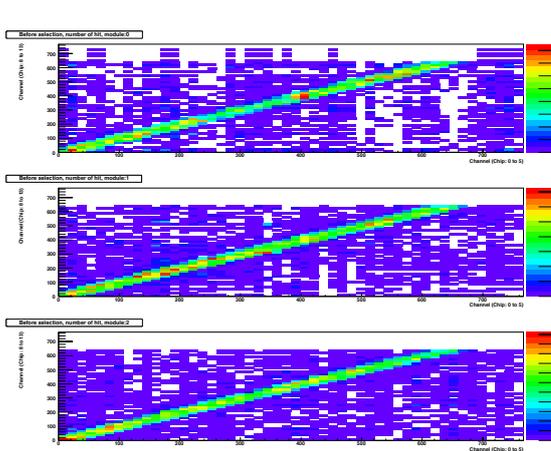


図 6.2: 事象選別前

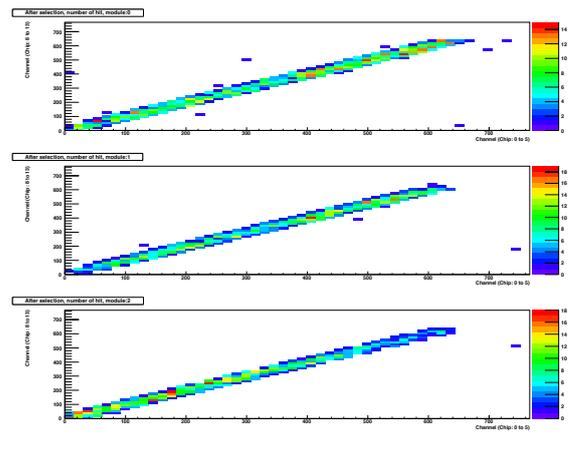


図 6.3: 各センサー面に対して1クラスターを要求した場合

### 6.3 シリコン検出器位置の較正

磁場がないときのずれ $\Delta$ の導出は次のように行った。まずシリコン検出器1、2についてクラスターの重心をミュオンの入射位置とする。センサー1と2での入射位置を元にミュオンの飛跡を求め、それを外挿しセンサー3での予想される入射位置を

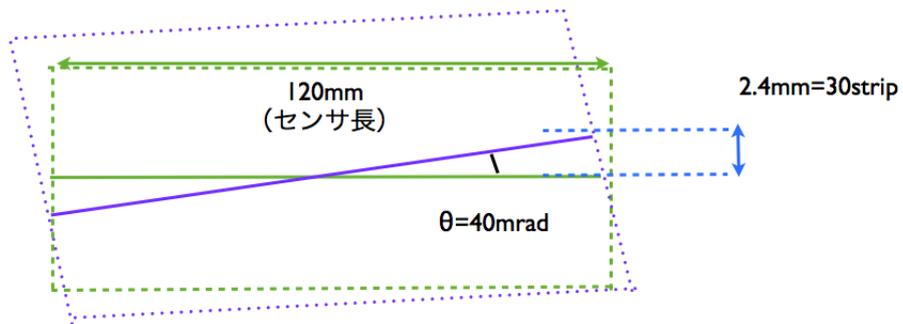


図 6.4: センサーの配置模式図

$x_{3ex}$ 、センサー3で測定した入射位置を  $x_{3tr}$  と定義すると、ずれ  $\Delta$  は  $\Delta \equiv x_{3tr} - x_{3ex}$  と定義できる。このようにして導出したずれ  $\Delta$  をヒストグラムにしたものを図 6.5 に示す。図の変数については表 6.2 にまとめておく。ミュオンのヒットと、ノイズ

表 6.2: フィッティング関数の各パラメータ

Entry	エントリー数
Mean	ヒストグラムの平均値
RMS	二乗平均平方根
Underflow	ヒストグラム右側に表示しきれなかった事象数
Overflow	ヒストグラム左側に表示しきれなかった事象数
Integral	表示された事象でのヒストグラムの積分値
$X^2/\text{ndf}$	$X^2$ を自由度で割った値
Peak	フィッティング結果のピーク値
Centre	ピークにおける 1次元方向の座標
Sigma	フィッティング関数の $\sigma$

によるヒットがあると考え、ずれ  $\Delta$  をダブルガウシアンでフィットした。幅の狭い方のガウシアンピークの位置からシリコン検出器のずれを読み取ると、シリコン検出器 1、2 とシリコン検出器 3 の相対的なずれは 200  $\mu\text{m}$  程度であることがわかる。

磁場があるときは、図 6.6 に示すようにずれ  $\Delta$  は

$$\Delta \equiv x_{tr} - x_{ex} = R \cos \theta - \sqrt{R^2 - (R \sin \theta + L)^2} - L \tan \theta \quad (6.1)$$

となる。なお本実験においては、磁場の向きとセンサーの配置を考慮してずれ  $\Delta$  が正なら電荷も正、ずれ  $\Delta$  が負なら電荷も負となるようにセットアップした。磁場のある状態でのずれ  $\Delta$  の分布図を図 6.7 に示す。磁場でミュオンが曲げられているので、磁場なしのときに比べて  $\sigma$  が大きくなっている。

## 6.4 シリコン検出器の回転ずれの補正

図 6.5 から、 $\sigma$  が 519.1  $\mu\text{m}$  と本来のシリコン検出器の分解能に比べてずいぶん大きな値を取っていることがわかる。この原因として、各検出器がお互いに回転していることが考えられる。一方、 $\Delta$  を計算するにあたってはシリコン検出器が平行に並んでいることを仮定しているため、シリコン検出器が回転していることで  $\sigma$  の値が大きくなった可能性がある。 $\sigma$  の値が大きいと、後述するように、電荷比を求めるために使えるミュオンの運動量領域を狭めてしまう。これを解決するために、シ

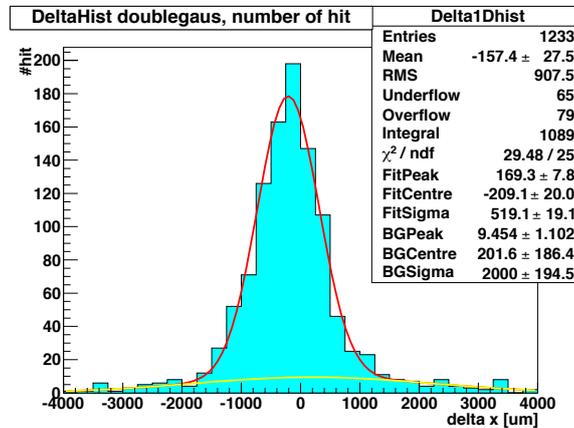


図 6.5: 磁場なし  $\Delta$

リコン検出器の回転を考慮する補正を行った。シリコン検出器が回転している場合、補正した後のシリコン検出器の位置関係が平行に近づくほど  $\sigma$  の値は小さくなることを利用して、以下のように補正を行った。

図 6.8 のように直交座標を定義する。考えられる補正は  $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸に平行な軸を中心とする 3 方向の回転と 3 つの軸方向の平行移動である。6 つの自由度があるが、これらすべてを考慮することが難しかったので、セットアップを考慮して 5 つの軸を考え (図 6.9)、軸まわりの回転のみを考慮した。特に  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $y_1$ 、 $y_2$  のように回転軸を取ったのはシリコン検出器を図 6.10 のように設置したためであり、この 4 つの軸に対しては矢印の向きの回転のみを扱った。補正は以下の手順で行った。

1. 1 台のシリコン検出器に対し 1 つの軸の回転を仮定し、 $\sigma$  が最小となる回転角を求めた (3 台  $\times$  5 軸)
2.  $\sigma$  の値が大きく変化した回転を 2 つ組み合わせて、さらに  $\sigma$  が小さくならないか調べた

3 台のシリコン検出器各々について 5 つの軸の回転を考慮した結果、

シリコン検出器 1 を  $y_1$  軸まわりに  $5.88 \text{ mrad} (= 0.34^\circ)$  回転した場合  
 $\rightarrow \sigma = 371.2 \mu\text{m}$

シリコン検出器 3 を  $x_2$  軸まわりに  $74.2 \text{ mrad} (= 4.3^\circ)$  回転した場合  
 $\rightarrow \sigma = 457 \mu\text{m}$

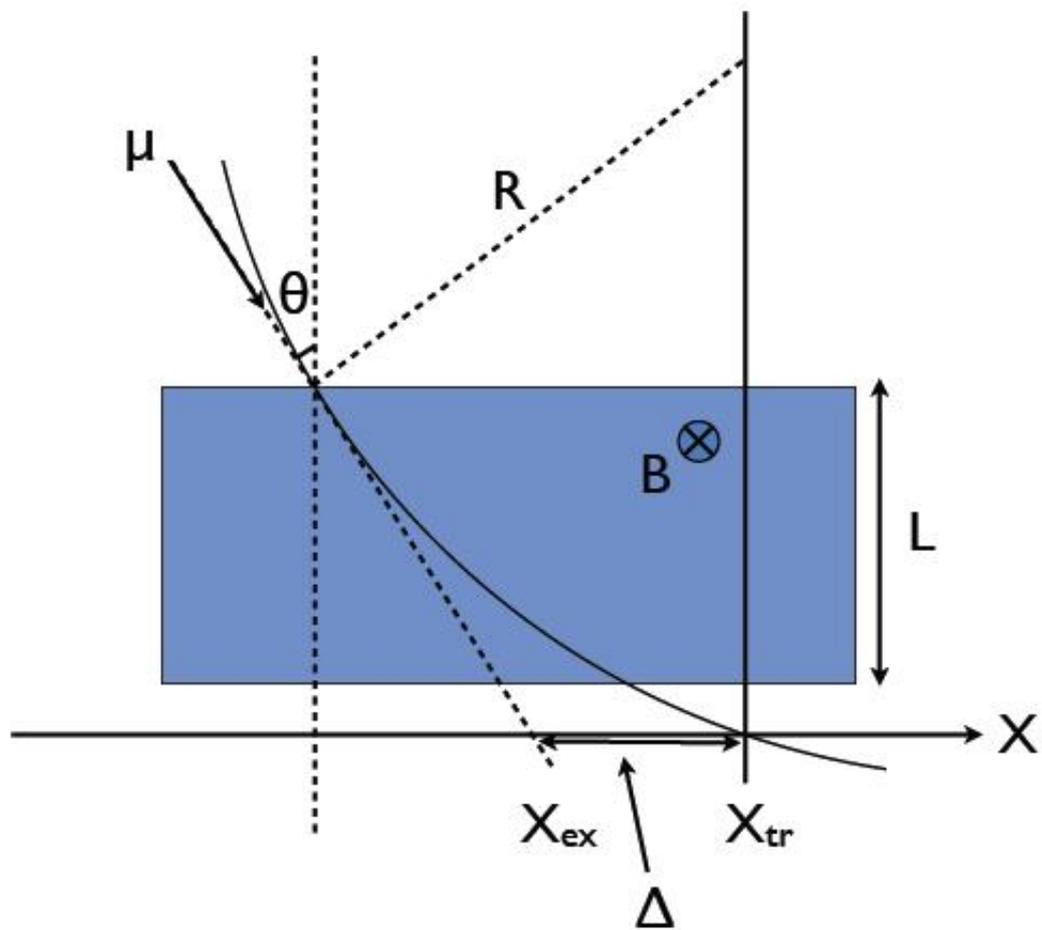


図 6.6: 理想的な測定における  $\Delta$ : $\Delta$  は磁場によるミュオンのヒット位置のずれを表している

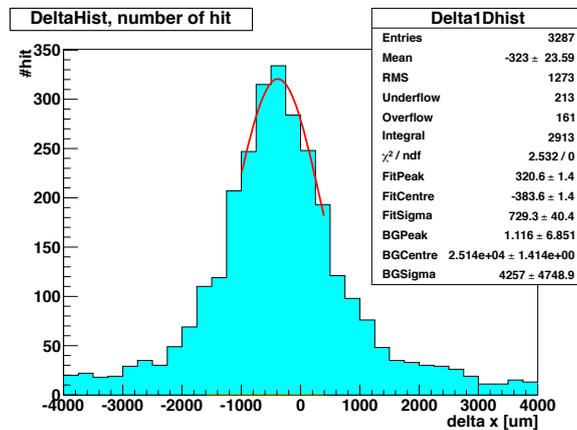


図 6.7: 磁場あり  $\Delta$

となり、 $\sigma$ の値が小さくなった。回転角を見てもおおよそ妥当と思える値をとっている。しかし、 $z$ 軸方向の回転が $\sigma$ の値に1番大きく寄与するだろうと予想したが、実際のところ $\sigma$ は $z$ 軸回転ではあまり小さくならなかった。これはシリコン検出器の固定の仕方から(図 6.10 参照)、 $z$ 軸方向の回転を抑えることができたためではないかと考える。

さらにこの2つの回転を組み合わせたところ、 $\sigma = 396.5 \mu\text{m}$ という結果を得た。図 6.5では $\sigma = 519.1 \mu\text{m}$ だったので、回転の補正によって $\sigma$ を $122.6 \mu\text{m}$ だけ小さくすることができ、まだ本来の位置分解能にはおよばないものの、扱えるミュオンの運動量領域が狭まるのを少し抑えることができた。

## 6.5 電荷比導出のための補正

$\Delta$ 分布のピークの位置の意味するところについて考察する。ピークの部分のミュオンはずれ $\Delta$ が小さいので、ミュオンは磁場による飛跡の変化がない、つまり運動量大きいミュオンであると考えられる。よってピーク位置は磁場のある状態でも、シリコン検出器3のシリコン検出器1,2に対する相対的なずれの位置を表すと考えられる。フィッティング結果を見ると、ピークの位置は磁場なしの状態とずれている。これは、磁場なし測定から磁場あり測定に移行する際に、何らかの影響でシリコン検出器が動いたことを意味する。そこで、シリコン検出器のずれ補正として、

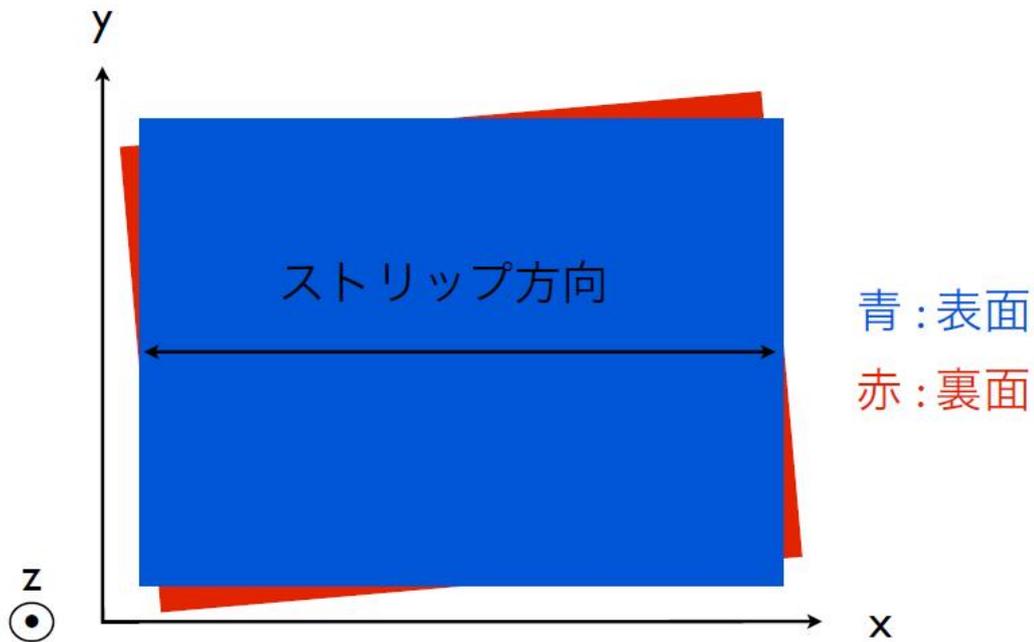


図 6.8: 座標系

表 6.3: 磁場なしと磁場ありでのピーク位置

磁場の有無	フィッティングによるピークの位置
磁場なし測定	$-99.82 \pm 14.31\mu\text{m}$
磁場あり測定	$-383.6 \pm 1.4\mu\text{m}$

磁場ありと磁場なしそれぞれのヒストグラムのピークを原点へ平行移動するという操作を行った。その補正を行った結果が図 6.11 で赤が磁場なし、青が磁場ありのヒストグラムになる。

## 6.6 電荷比の導出

図 6.11 の段階ではまだ統計量の補正が完了しておらず、電荷比を比較することはできない。今回の実験においては統計量の規格化の指標としてシリコン検出器 1、2 を通ったミュオン数を使った。なおここでのミュオン数とは、シリコン検出器 1、2 の表裏計 4 枚のセンサーに対してそれぞれ 1 クラスターのみが存在するという条件を課した場合の事象数である。今回の実験ではシリコン検出器読み出しの

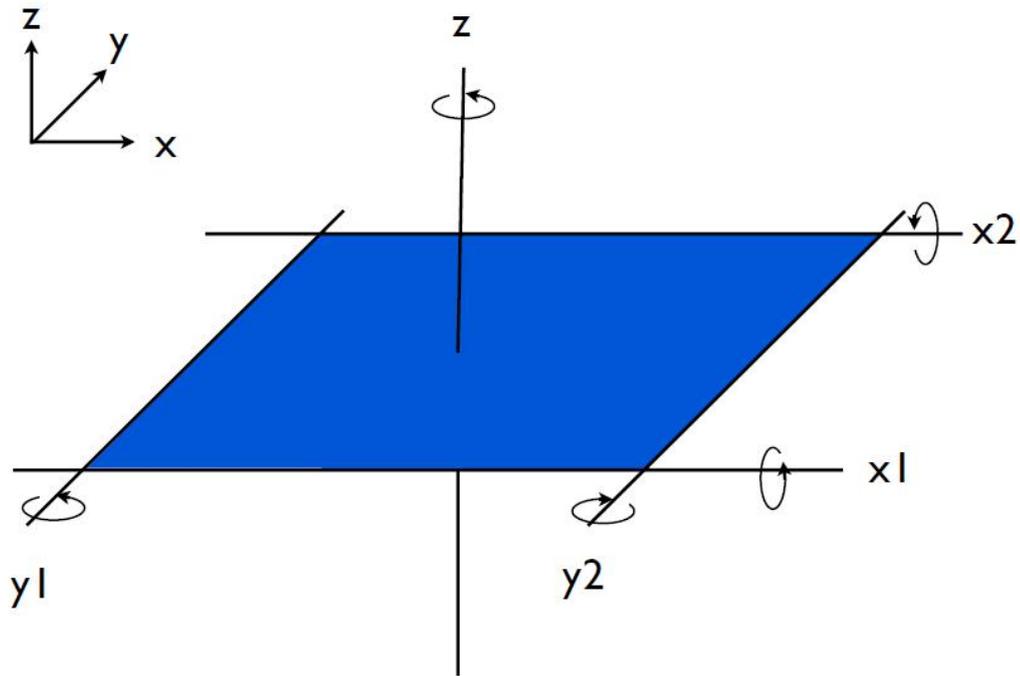


図 6.9: 回転軸

都合上一部のセンサーのヒット情報が読み出せなくなっており、この影響により磁場ありの測定では電荷の正負を均一に捉えるためセンサーの有効面積が磁場なし測定に比べて小さくなっている。そこで、磁場の有無に関与しないシリコン検出器 1、2 を通ったミュオンの数を規格化因子とした。ミュオンの数で規格化を行ったヒストグラムが図 6.12 である。

今回のセットアップでは運動量が 300 MeV 以上のミュオンを観測している。さらに磁場なしのときに得られたヒストグラムの分解能を踏まえると、 $\Delta$  に換算して  $\pm 500 \sim 3000 \mu\text{m}$  の領域がミュオン電荷の比較に適切な領域であると考えた。この運動量領域について取り出して磁場ありの時となしの時との差分を描画したものが図 6.13 である。この領域においてそのような条件を満たす事象を数えると、ミュオン電荷比は

$$\mu^+ : \mu^- = 646 : 636$$

となる。よって電荷比は

$$\mu^+ / \mu^- = 1.02 \pm 0.06$$

となる。

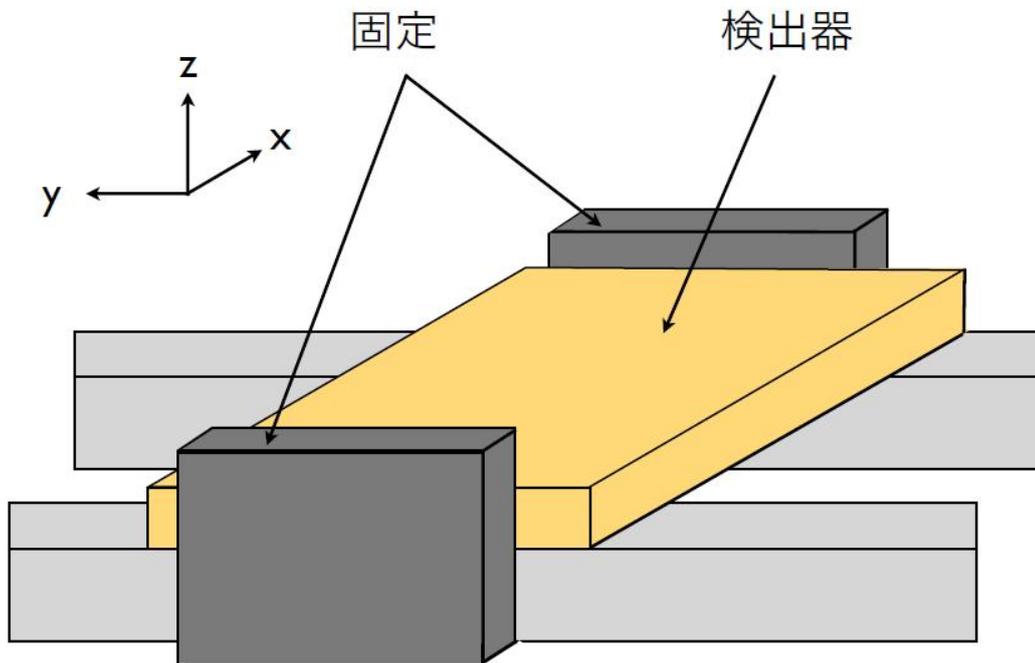


図 6.10: シリコン検出器の固定

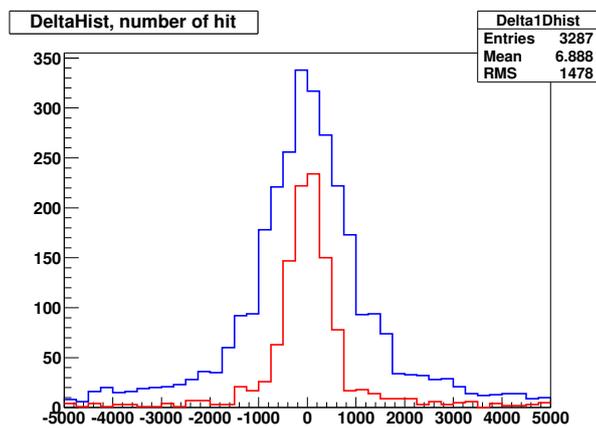


図 6.11: 磁場なし、ありそれぞれのずれ $\Delta$ (規格化前)。赤が磁場なし、青が磁場ありのヒストグラム

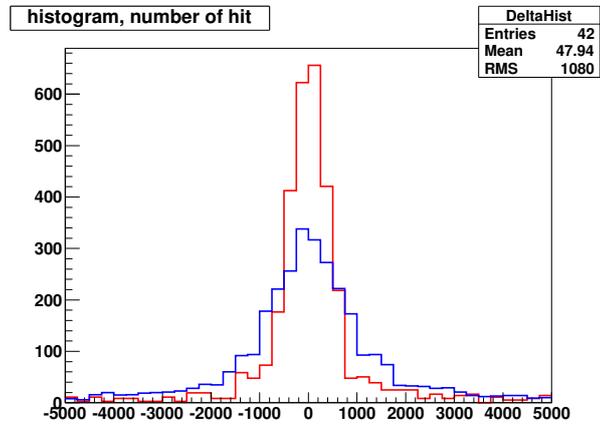


図 6.12: 磁場なし、ありそれぞれの  $\Delta$ (規格化後)。赤が磁場なし、青が磁場ありのヒストグラム

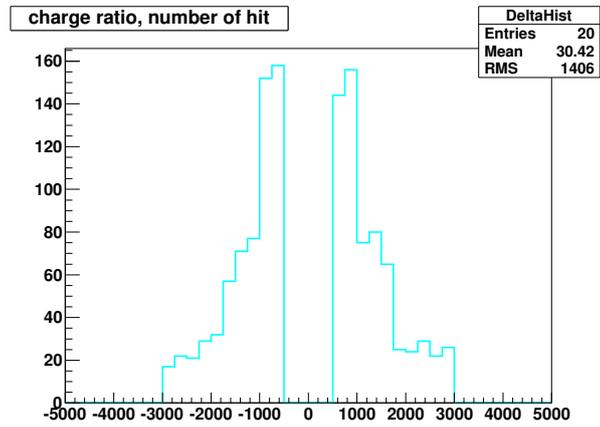


図 6.13:  $\pm 500 \sim 3000 \mu\text{m}$  での差分ヒストグラム

# 第7章 結論及び課題

## 7.1 結論と考察

今回の実験では、宇宙線ミュオン電荷比測定のためのシリコンストリップ検出器複数台の読み出しシステムの開発に成功した。実際にこの読み出しシステムで宇宙線ミュオンを捉えることができた。さらに磁場をかけた状態で測定を行い宇宙線ミュオン電荷比を

$$\mu^+/\mu^- = 1.02 \pm 0.06$$

と決定した。しかしシリコン検出器の性能から見込まれる分解能 200  $\mu\text{m}$  を達成できなかった。ずれ $\Delta$ の分布では、各検出器の相対的な回転のずれ補正を行っているが、検出器側の精度に比べて各検出器でのずれが十分に補正しきれなかったことが原因であると考えられる。また統計量が十分でないため電荷比を決定するために設定した運動量領域が適正であったのか評価ができなかった。十分な統計量があれば運動量領域を分割して各運動量領域に対して電荷比を求めることで運動量領域採用の妥当性の評価をできるはずである。

さらに今回は3台のシリコン検出器で飛跡を決定したが、開発した読み出しシステムはシリコン検出器の数をさらに増やしても運用可能である。4台以上のシリコン検出器を用いて観測することにより、精度よく飛跡を決定でき電荷比の精度向上につながる。

## 7.2 課題

今回の実験では、シリコン検出器を水平かつずれがないように設置することができなかったことにより、シリコン検出器の性能を充分発揮させることができなかった。この問題を改善するためには、セットアップの改善が必要である。今回はシリコン検出器を磁場中に挿入するという方法をとったが、磁場なしから磁場ありへの移行の際にシリコン検出器が振動によりずれてしまった可能性が高い。またシリコン検出器の分解能が $\mu\text{m}$ 単位であるため手作業で注意深く行ってもずれが生じてしまう可能性が高い。ずれの補正解析を厳密に行い、検証することが測定精度の向上につながると思われる。またシリコン検出器を固定し、測定中も動くことがないようにす

るためには、シリコン検出器の固定台には触れず磁石の方を可動式にするべきである。こうした措置を講じることでシリコン検出器の位置のずれによる測定精度の影響を減らすことができるはずである。

# 付録A Appendix

## A.1 センサーの Efficiency

センサーのミュオン感受効率について、次のように Efficiency という指標を定めて計算した。Efficiency は1つのセンサー面に対して定義され、6.2節において定義した条件1、2を用いて考える。

注目したセンサー面にヒットがなく、かつ注目したセンサー面を持つシリコン検出器のもう一方のセンサー面に1クラスターが存在し、なおかつそれ以外のシリコン検出器では条件1、2を満たすイベント数を  $\alpha$  とする。また、すべてのシリコン検出器において条件1、2を満たすイベント数を  $\beta$  とする。

これより、Efficiency は

$$Efficiency \equiv \frac{\beta}{\alpha + \beta} \times 100\% \quad (A.1)$$

と定義した。これよりシリコン検出器1、2、3の各センサー面を上から順に、センサー1、2、3、4、5、6と名付けると、Efficiency は表A.1のように計算できた。

表 A.1: 各センサー面の Efficiency

センサー面	Efficiency[%]
センサー1	76.7
センサー2	68.7
センサー3	89.4
センサー4	88.9
センサー5	94.1
センサー6	88.0

# 謝辞

この卒業研究を通して、研究の楽しさや難しさ、研究に対する姿勢など、多くのことを学ぶことができました。この機会を与えてくださった山中卓教授に感謝いたします。また、1年間素粒子に関する知識だけでなく、もののみかたや考え方など、研究をしていく上で大切なことを教えて頂きました。本当にありがとうございました。

花垣和則准教授には、素粒子実験の基礎的な知識や実験装置の使い方、解析の仕方などをいつもわかりやすく教えて頂きました。1年間私たちの研究をご指導いただき、ありがとうございました。

最後に、日頃から親切に接していただき、わからない事があればなんでも快く教えてくださった山中卓研究室の皆様、この研究に力を貸していただいたすべての方に感謝いたします。本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] W.R.Leo, [Springer-Verlag], Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, (1994).
- [2] 小田稔, [裳華房], 宇宙線 -高エネルギー粒子の物理学- (1960).
- [3] 河股秀典 廣瀬穰 吉元寛貴, muon の質量測定 (2007).