

# 宇宙線ミュオンの観測

2016 年度後期 課題演習 A1

(阿部倫史 小倉将紘 栗林宗一郎 島地哲平 春名純一 山本和樹)

平成 29 年 4 月 25 日

## 概要

今回検出器を用いて、宇宙線ミュオンの検出を行い、それに付随する現象(天頂角分布、東西効果、ミュオン束、電磁シャワー)を観測することを試みた。

ミュオンの天頂角分布について、観測結果と理論に基づいたシミュレーション結果が概ね一致することが確認できた。また、東西効果の存在を確認することはできたが、その程度について量的な考察をすることはできなかった。

ミュオン束と電磁シャワーについて、これらの区別が難しかった。ミュオン束だと推測されるイベントは確認されたが、今回の実験結果と比較可能な先行研究が見つからず、文献値と結果を比較することができなかった。その一方で電磁シャワーと推測されるイベントは存在したものの、はっきりと断言はできなかった。

# 目次

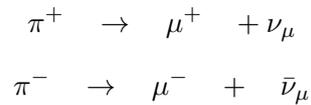
<b>0</b>	<b>はじめに</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>宇宙線の原理</b>	<b>3</b>
1.1	天頂角分布	3
1.2	東西効果	4
1.3	ミューオン束	5
1.4	電磁シャワー	6
<b>2</b>	<b>実験装置</b>	<b>7</b>
2.1	検出器	7
2.2	波長変換ファイバー	8
2.3	Multi Pixel Photon Counter(MPPC)	9
2.4	MPPC用エレキ (EASIROC モジュール)	10
<b>3</b>	<b>測定</b>	<b>10</b>
3.1	予備実験	10
3.1.1	遮光確認	10
3.1.2	MPPCの光量分布	11
3.2	本実験(宇宙線の観測)	11
<b>4</b>	<b>結果・解析</b>	<b>13</b>
4.1	天頂角分布	13
4.1.1	宇宙線のトラックの再構成	13
4.2	シミュレーション	14
4.2.1	系の設定	14
4.2.2	結果	14
4.3	東西効果	15
4.4	ミューオン束	17
4.4.1	解析	17
4.4.2	結果	18
4.5	電磁シャワー	20
<b>5</b>	<b>考察</b>	<b>22</b>
5.1	天頂角分布	22
5.2	東西効果	22
5.3	ミューオン束	23
5.4	電磁シャワー	23
<b>6</b>	<b>結論</b>	<b>24</b>
<b>7</b>	<b>謝辞</b>	<b>24</b>

## 0 はじめに

宇宙空間には、様々な粒子（宇宙線）が存在し、地球に降り注いでいる。我々は、そのうちの一つであるミューオンに注目し、そのフラックスの天頂角分布や、付随する現象である東西効果やミューオン束、電磁シャワーについて調べた。

## 1 宇宙線の原理

宇宙空間から降り注いでいる放射線のことを宇宙線という。宇宙から大気中に入射する放射線が1次宇宙線、大気中での反応によってできる2次粒子からの放射線が2次宇宙線である。2次宇宙線の一つである $\pi$ 中間子は次のような反応を起こす。



ミューオンは大気中であまり吸収されないため地表で観測される2次宇宙線の大半を占めている。今回はこの宇宙線ミューオンを観測した。

### 1.1 天頂角分布

地上から距離  $X$  の地点で天頂角  $\theta$  の方向から飛来する宇宙線の強度（フラックス: 単位面積・単位時間・単位立体角あたりの入射粒子の個数）を考える。宇宙線の強度  $J(X, \theta)$  は  $\theta = 0$  で大気の厚さ  $\frac{X}{\cos \theta}$  を通過したときの強度  $J\left(\frac{X}{\cos \theta}, \theta = 0\right)$  に等しい。つまり、

$$J(X, \theta)d\Omega = J\left(\frac{X}{\cos \theta}, \theta = 0\right) d\Omega.$$

大気を通過する宇宙線の強度は平均自由行程  $\lambda$  で指数関数的に減少するとして  $J(X, \theta) = J_0 \exp\left(-\frac{X}{\lambda}\right)$  とする。

$$\begin{aligned}J(X, \theta)d\Omega &= J\left(\frac{X}{\cos \theta}, \theta = 0\right) d\Omega \\ &= J(X, \theta = 0) \frac{J\left(\frac{X}{\cos \theta}, \theta = 0\right)}{J(X, \theta = 0)} d\Omega \\ &= J(X, \theta = 0) \exp\left(-\frac{X}{\lambda} \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1\right)\right) d\Omega.\end{aligned}$$

$\theta \ll 1$  として  $\exp \theta \sim 1 + \theta$ ,  $(1 + \theta)^n \sim 1 + n\theta$  と近似をすると、

$$\begin{aligned}\exp\left(-\frac{X}{\lambda} \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1\right)\right) &\sim 1 - \frac{X}{\lambda} \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1\right) \\ &\sim \left(1 + \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1\right)\right)^{-\frac{X}{\lambda}} \\ &= (\cos \theta)^{\frac{X}{\lambda}}.\end{aligned}$$

したがって、 $J(X, \theta)$  は次のように近似できる。

$$J(X, \theta)d\Omega = J(X, \theta = 0)(\cos \theta)^{\frac{X}{\lambda}} d\Omega$$

よって宇宙線の天頂角分布は  $\cos \theta$  の  $X/\lambda$  乗に比例すると考えられる。

今の議論はかなり粗い近似だったが、実験的には  $\cos^2 \theta$  に比例することが知られている。また、 $\frac{X}{\lambda}$  を大雑把に見積もることで2乗に比例することを確認することもできる。

地表におけるミューオンのエネルギーは約 1GeV で、エネルギー 1GeV の  $\mu$  粒子の飛程は約  $500\text{g}/\text{cm}^2$  である。また、大気圧下で地上の面積  $1\text{cm}^2$  の上には空気が  $1000\text{g}$  乗っているから  $X/\lambda = 1000/500 = 2$  と求められる。したがってミューオンの天頂角分布は  $\cos^2 \theta$  に比例することが期待される

実験で観測する粒子の個数の天頂角分布は、 $J(X, \theta)$  を  $d\Omega$  で積分したものであるから、実験装置の形状によって複雑な式になり、実験で得られる天頂角分布はもはや  $\cos^2 \theta$  にはならない。今回我々はシミュレーションによって、実験装置から得られる粒子の個数の天頂角分布を計算することも試みた。

## 1.2 東西効果

ミューオンは電荷を帯びた粒子であるので、地表付近を運動する際、地磁気によるローレンツ力を受けて曲げられる。その結果、東西から来るミューオンの観測される数に違いが出る（西側からのミューオンが多く観測される）。これを東西効果という。

まず、ミューオンには正の電荷を帯びた  $\mu^+$  と負の電荷を帯びた  $\mu^-$  とがあるが、以下では  $\mu^+$  に関する説明をする。 $\mu^-$  の場合は東西が反対になるが、 $\mu^+$  のほうが存在比が大きいため、 $\mu^+$  側の効果が現れてくるからである。

簡単のために、地磁気は観測地点から見た南から北への一様磁場で、地表から一定距離離れると0になるものとする。

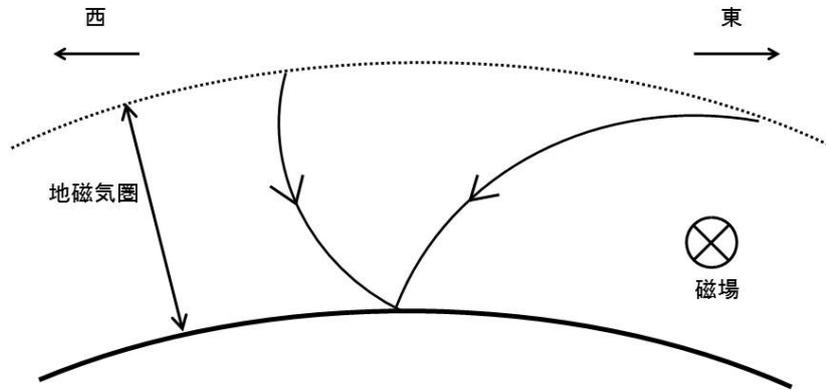


図 1: ミューオンの軌跡

地表の一点にある観測地点へと降り注ぐミューオンの軌跡を等緯度平面に射影すると、図1のように地磁気圏内での軌跡は円弧になる。東からのミューオンは地表に沿うような曲線、西からのミューオンは地表に対して反り返るような曲線になる。

また、この円弧の半径は速度（の南北方向以外の成分）に依存する。よって、宇宙からやってきたミューオンが観測地点に到達するために最低限必要なエネルギーが入射角度ごとに存在し、そのエネルギーは角度が東側真横へ近づくほど大きくなる。

例えば西側真横から入射するミューオンは軌道の直径が地表から地磁気圏外までの距離より長ければよいのに対し、東側真横から入射するミューオンは直径が地球の直径と地表から地磁気圏外までの距離の和より長くなければならない。そのため西側からより多くのミューオンが入射する事になる。

また、東西から同じ速さ、同じ角度で粒子が入射するとき、地磁気圏内での軌跡は東からのほうが長くなるので、大気中の物質と相互作用して崩壊する確率が高くなる。

よって十分高いエネルギーを持ったミューオンであっても、西側から多くのミューオンが入射する。

東西効果を量的に計算するにはモンテカルロシミュレーション等の数値シミュレーションを行う必要があるが、今回はシミュレーションによる計算はできなかった。

### 1.3 ミューオン束

ミューオンの生成過程において同じ方向に向かう複数のミューオンが生成することがある。その結果、地上で1 m以内に平行なミューオンの飛跡が観測できることがある。この

現象をミューオン束という。図2に検出器を通るミューオン束のイメージを示す。

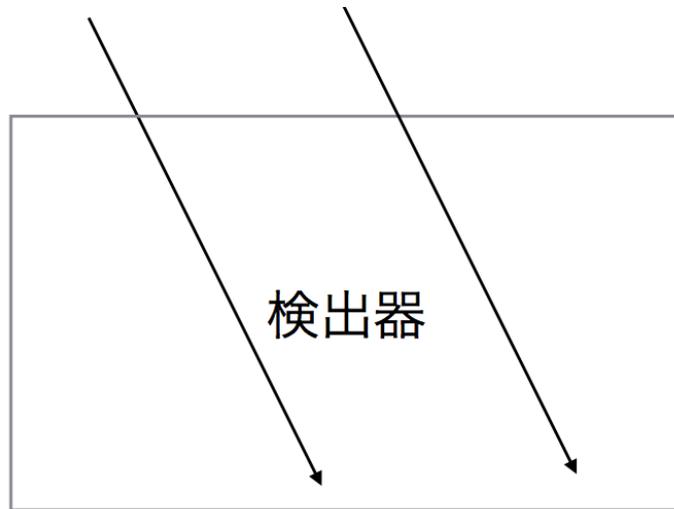


図 2: 検出器を通るミューオン束のイメージ

#### 1.4 電磁シャワー

高エネルギー電子が大気中に入射すると、電子は大気中の原子核と相互作用し光子を放出する。その光子は電子と陽電子を対生成する。またこの電子が光子を放出する。そしてこれが繰り返された結果として、検出器の多数のシンチレータが同時に反応する現象が観測される。この現象を電磁シャワーという。図3に電磁シャワー現象の模式図を示す。

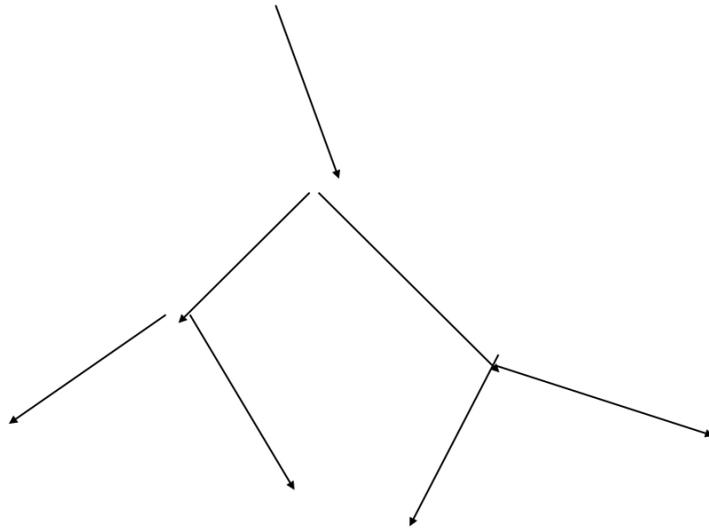


図 3: 電磁シャワーの模式図

## 2 実験装置

使用した実験装置は以下の通りである。

- シンチレーター
- 波長変換ファイバー
- Multi Pixel Photon Counter (MPPC)
- MPPC 用エレキ (EASIROC モジュール)

### 2.1 検出器

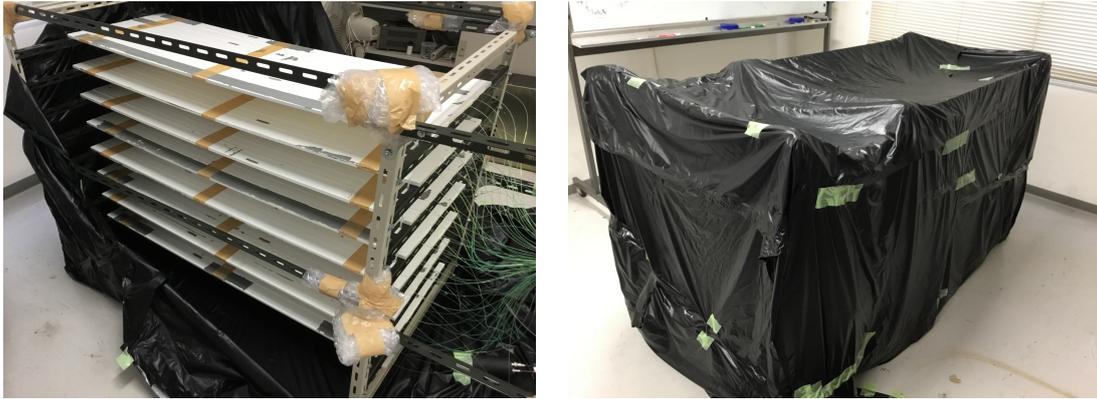


図 4: 今回用いた検出器の外観 (左:遮光前 右: 遮光後)

検出器は、Plastic シンチレーター（幅 5 cm, 厚さ 1 cm, 長さ 120 cm）を 8 個並べたものを 1 層とし、これを 10cm 間隔で計 8 層取り付けたものを用いた。番号は、上図 4 の左の写真の右前 (右の写真の左前) を正面として、左下が ch0、そこから右に順に ch1, …ch7 とし、その上の段は左から ch8, ch9, …とし、一番上の層は左から ch56, ch57, …, ch63 とした。ただし、ch7, 11, 23, 31, 51, 59 は壊れていて読み出すことができない channel (dead channel) であった。

得られたデータは EASIROC を使ってパソコンへ取り込んだ。

## 2.2 波長変換ファイバー

波長変換ファイバーは、コアの部分に波長変換材（ある波長域の光を吸収し、それより長い波長の光を等方的に再発光する物質）を混ぜた光ファイバーである。今回の実験ではシンチレーターと MPPC を繋ぐ役割を果たす。

### 2.3 Multi Pixel Photon Counter(MPPC)



図 5: MPPC

MPPC は半導体光検出器である。MPPC は入射光子によりはじき出された光電子の電荷を記録することができ、光子数の計測が可能である。小型で優れたフォトカウンティング能力を持ち、低バイアス電圧で作動し、また磁場中で使えるため実験で広く使われている。64ch 読み出し可能である。今回の実験では波長変換ファイバーから出てくる光の測定に使われる。

## 2.4 MPPC 用エレキ (EASIROC モジュール)



図 6: EASIROC モジュール

今回は EASIROC モジュールを MPPC の読み出しに用いた。EASIROC モジュールは 2つの ASIC を搭載しており、1つの ASIC モジュールにつき MPPC を同時に 32ch 読み出すことができる。したがって、EASIROC モジュールは MPPC を計 64ch を同時に読み出すことが可能である。

## 3 測定

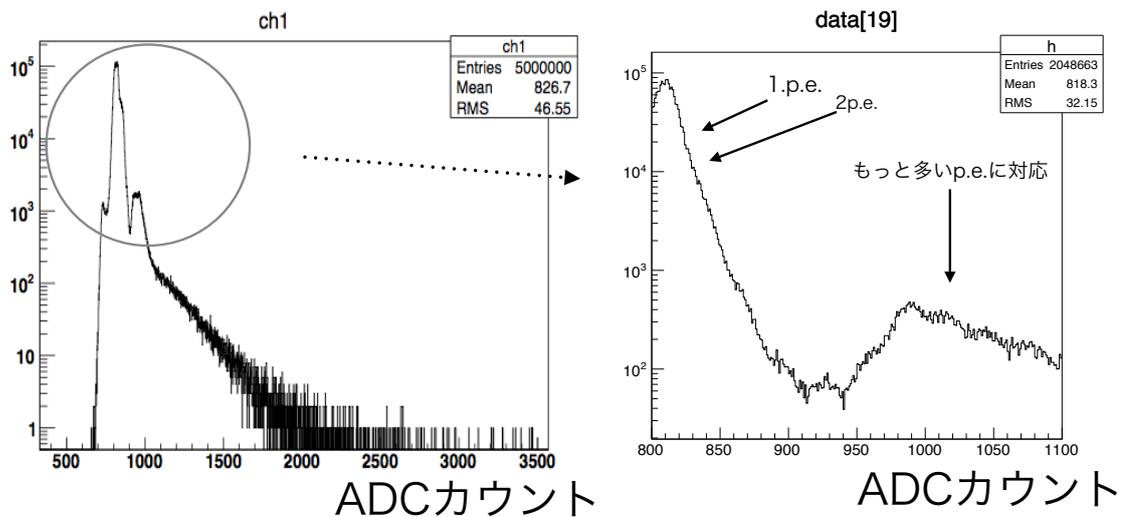
### 3.1 予備実験

#### 3.1.1 遮光確認

まず観測装置を黒いシートで覆い、外部からの光を遮断した。その後、シート内に入れておいた光電子増倍管を使い、オシロスコープで実際に光が外部から入ってきていないことを確認した。

### 3.1.2 MPPC の光量分布

降り注いでくるミューオンのエネルギーに対するエントリー数を測定した。ADC カウントはエネルギーに対応する。次の図7は予備実験としてMPPCの光量分布を観測した際に得られた、ADC カウントに対してエントリー数をプロットしたものである。



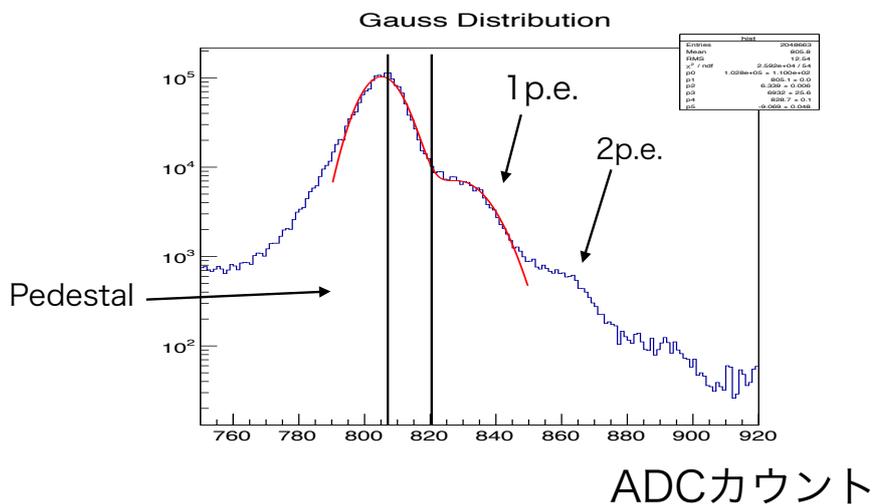
1

図 7: MPPC 光量分布拡大図 (予備実験で MPPC 光量分布を観測したもの)

### 3.2 本実験 (宇宙線の観測)

宇宙線を2月7日から2月27日まで観測した。解析には、作業時間の都合と2日間のデータでイベント数は十分であるという判断から、主に2月14,15日のデータを使用した。エアコンで気温を20℃に保ち、窓を閉め切り、検出器およびEASIROCモジュール、PCは24時間稼働させた。また、数日置きに機械が動いているかを確認した。

次の図8はPedestalと1p.e.の部分をGaussianでfitしたものである。この結果1p.e.はおよそ23ADCカウントに対応することがわかった。



1

図 8: 光量分布の Gauss 関数による Fit (光量分布図を Gaussian で Fit したもの)

本実験のミュオン測定の際シンチレータが3個以上なったものを取り出して計測した。Hit Threshold は、ADC カウントに対するミュオンのエンタリー数の分布図において、最初のピークのあと初めて極小となるところを採用した。(1p.e よりもはるかに後ろでかけていると考えられるため Pedestal の影響はほぼないと考えられる)。次の図9は図7において、Hit Threshold の掛けた位置を加えたものである。

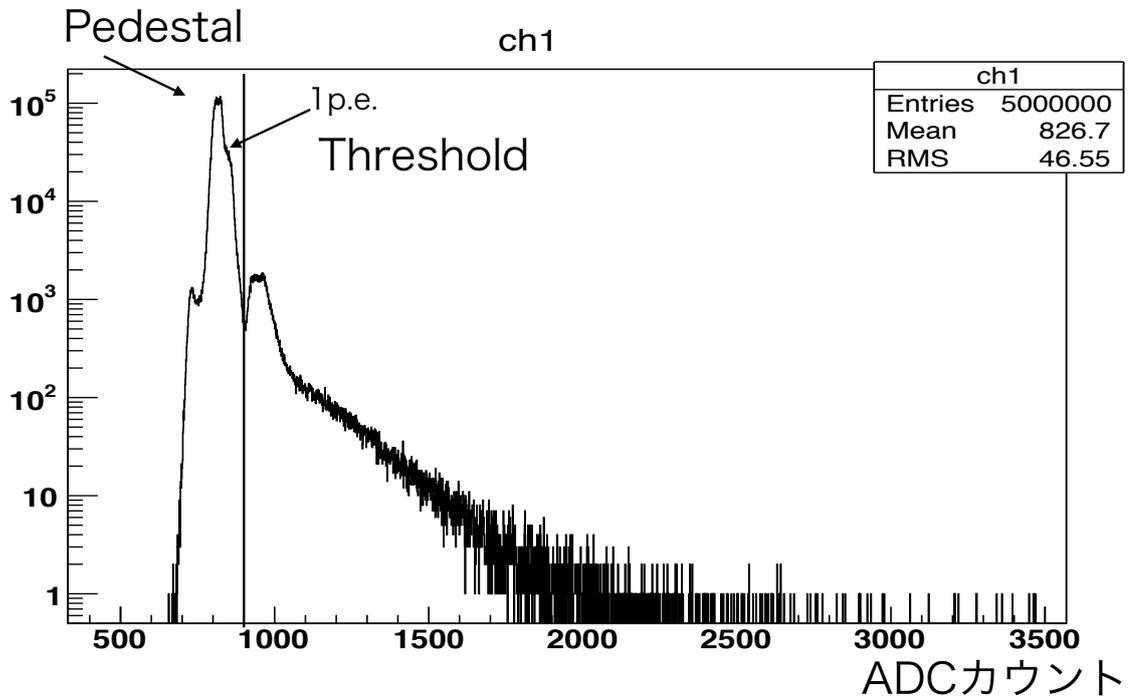


図 9: 宇宙線の観測 (Hit Threshold の掛け方)

## 4 結果・解析

### 4.1 天頂角分布

#### 4.1.1 宇宙線のトラックの再構成

宇宙線イベントにおける、トラックの再構成の方法と天頂角の算出の仕方を述べる。まず、ある宇宙線イベントに対し、検出器中の反応したシンチレータを、ADC カウントに応じて色分けして可視化した図 (イベントディスプレイ) を PC 上に描画する。この図において、各シンチレータを点とみなして直線フィットを行い、初期値を垂直入射とした場合と垂直入射とした場合の直線フィットをそれぞれ行い、2通りのフィットのうち  $\chi^2$  が小さい方を取る。(ただし、ADC カウントの大きさは考慮しない)。このフィット結果の直線と鉛直方向の軸のなす角をそのイベントの天頂角とする。(天頂角は、鉛直方向を 0 とし東向きを正に取る。)

## 4.2 シミュレーション

地表付近におけるミューオンのフラックス  $j(\varphi)$  が

$$j(\varphi) = j(0) \cos^2 \varphi$$

という式で表せる場合のシミュレーションを行った。

### 4.2.1 系の設定

設定は以下の通りである。検出器の大きさは今回用いた検出器の寸法をそのまま用いた。また dead channel についても同様に ch7,11,23,31,51,59 とした。

まず、系を 2 次元とし、座標原点を検出器の 1 層目の両端の中点にとった。系の  $y$  方向の大きさについて、宇宙線は検出器の上空 1 m で生成されるとした。したがって、系の  $y$  方向の範囲は

$$-70 \text{ cm} \leq y \leq 100 \text{ cm}$$

と設定した。

そして、系の  $x$  方向の大きさを、系の右端から検出器に向けて検出限界角度 (1.32 rad) で宇宙線が放出されたときに、7 層目の右端と 8 層目の左端に当たるように決めた。この結果、系の  $x$  座標の範囲は

$$-1900 \text{ cm} \leq x \leq 1900 \text{ cm}$$

と設定した。

シミュレーション手順は以下の通りである。

1. 検出器の上空 1m の直線状の点を 1 点ランダムに選ぶ。
2. 宇宙線の放出角度  $\varphi$  ( $-\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{\pi}{2}$ ) を確率分布  $P(\varphi)$  :

$$P(\varphi) = \cos^2 \varphi$$

に従い選ぶ。(確率分布  $P(\varphi)$  は、最大値が 1 となるように規格化している)。ここで選ばれた放出角度は天頂角に等しい。

3. 検出器にあたるかどうかを調べる。

以上のことを繰り返して、宇宙線の疑似イベントデータおよび天頂角分布を得た。

### 4.2.2 結果

シミュレーション結果から得られた天頂角分布は次の図 10 の通りである

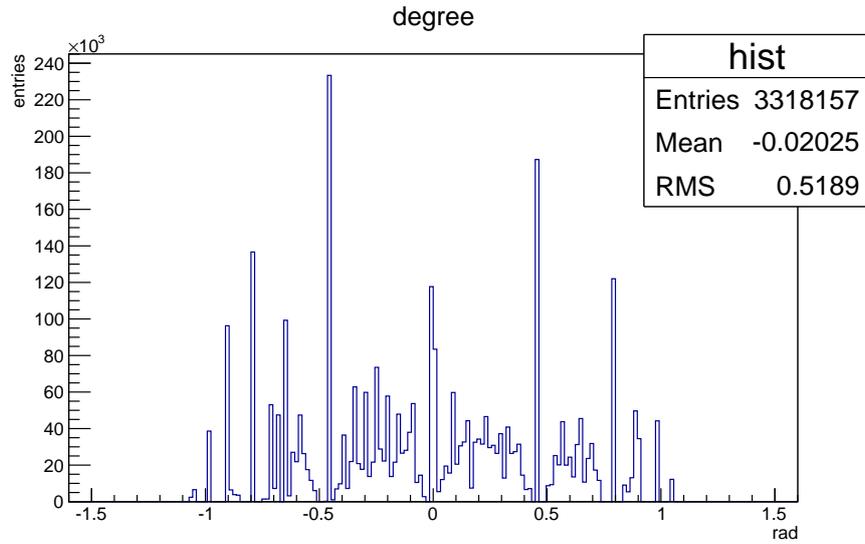


図 10: ミューオンの天頂角分布 (シミュレーション)

観測結果とシミュレーション結果を比較する。観測結果とシミュレーション結果を重ねて描いたものを図 11 に示す。赤で塗りつぶされているヒストグラムが観測結果であり、青線で白抜きになっているヒストグラムがシミュレーション結果である。

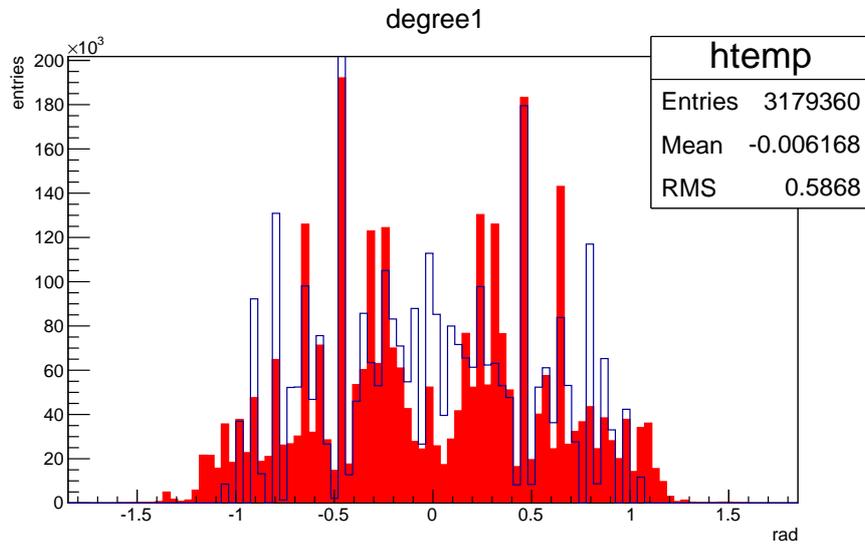


図 11: ミューオンの天頂角分布 (観測&シミュレーション)

### 4.3 東西効果

実験で得られたミューオンの天頂角分布は図 12 のようになった。

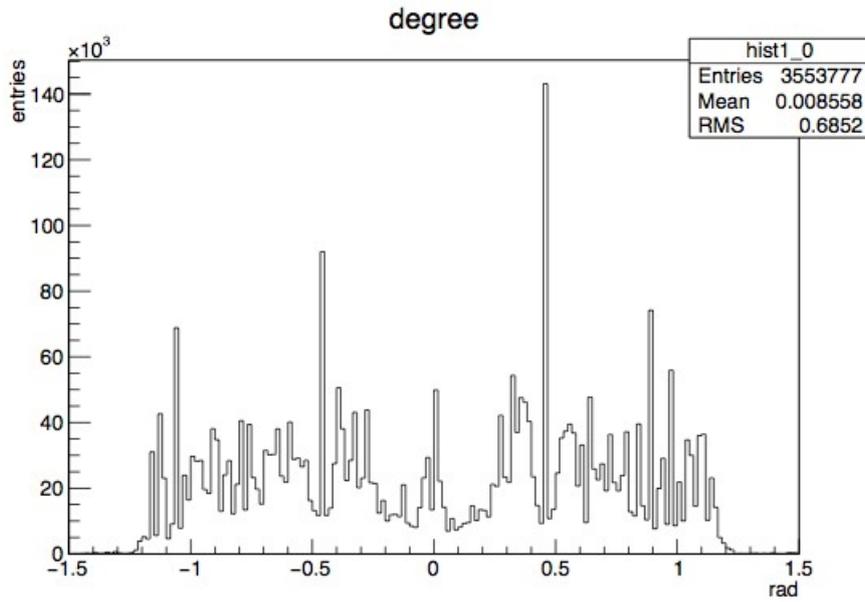


図 12: ミューオンの天頂角分布

この中からよりはっきりとミューオンの角度がわかったものだけを取り出すため、トラックを引いた際の  $\chi^2/Ndf$  が 5 未満のデータだけを用いたヒストグラムは図 13 のようになった。

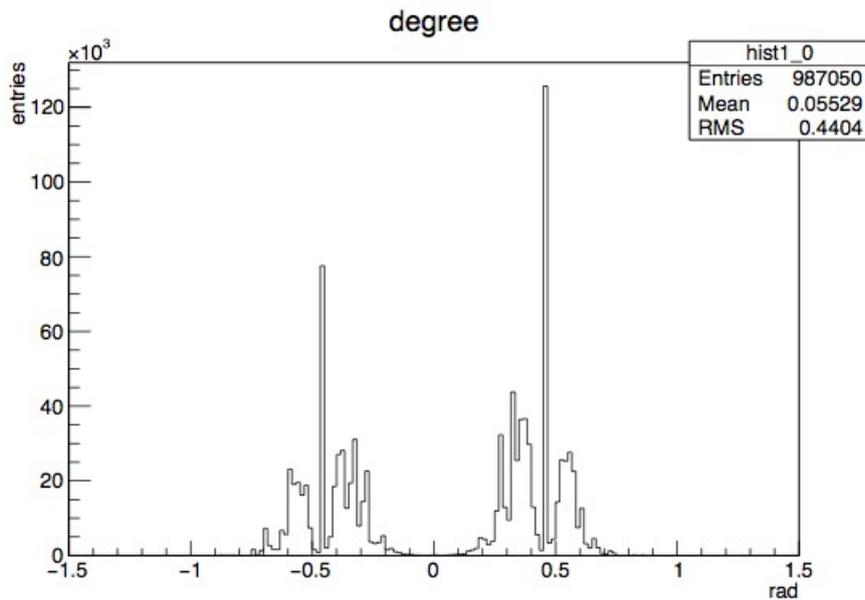


図 13: ミューオンの天頂角分布 ( $\chi^2/Ndf < 5$ )

東からのミューオンの数を  $N_E$ 、西からのミューオンの数を  $N_W$  として、東西の *Asymmetry*

を

$$Asymmetry = \frac{N_W - N_E}{N_W + N_E}$$

で計算したところ、( $\chi^2/Ndf < 5$ ) のデータでは  $Asymmetry = 14.2(\pm 0.1)\%$ 、全データでは  $Asymmetry = 1.7(\pm 0.05)\%$  となった。求めた  $Asymmetry$  についている誤差は、 $N_E, N_W$  の誤差を統計誤差のみとして、それぞれ  $\sqrt{N_E}, \sqrt{N_W}$  として計算したものである。

また、東西効果を考慮に入れていないシミュレーションのデータでも  $Asymmetry$  を計算したところ、 $3.8(\pm 0.07)\%$  となった。

ヒストグラムを見ても  $Asymmetry$  の値を見ても、確かに東西効果はあらわれているといえる。

## 4.4 ミューオン束

### 4.4.1 解析

トラックの再構成の方法でトラックを一本ひいたものから明らかにトラック 1 本引くには不適なものを選ぶために、 $\chi^2/Ndf < 10$  に限り、かつ 2 本引くのに適当と思われるヒット数、 $7 < \text{ヒット数} < 17$  のものに制限した。

さらに各イベントの各行において以下の図 14 のように一個以上空いて検知したマスがある行が 4 行以上あるものに限って、それを左側と右側にわけて、それぞれに対してトラックの再構成の方法で 2 本トラックを引いた。なぜ、4 行以上のものに絞ったのかという点でヒット数 4 以上の正確に 1 本引けたものと比較するためである。

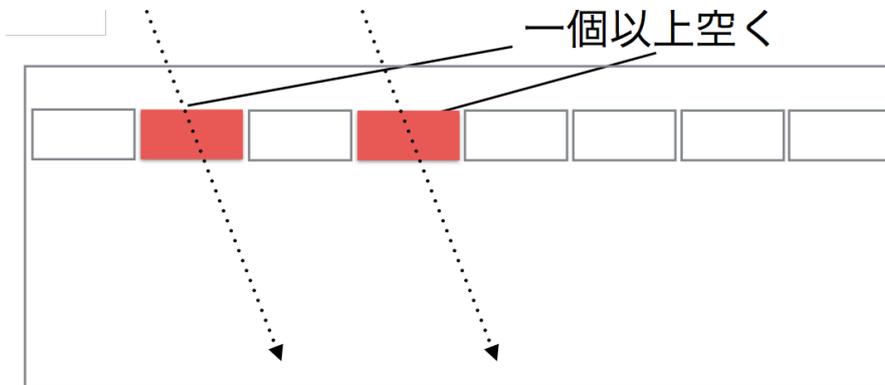


図 14: 検出器のマスをも 1 個以上空いて平行に通るミューオン束

正確に引けたものに絞るためにそれぞれのトラックについて、 $\chi^2/Ndf \leq 1$  となるものに限った。その範囲に制限した理由としては、以下の図 15 のヒストグラムのようにほとんど  $\chi^2/Ndf \leq 1$  のところに数が集中しているからである。図 15 にミューオン束の  $\chi^2/Ndf$  の分布図を示す。

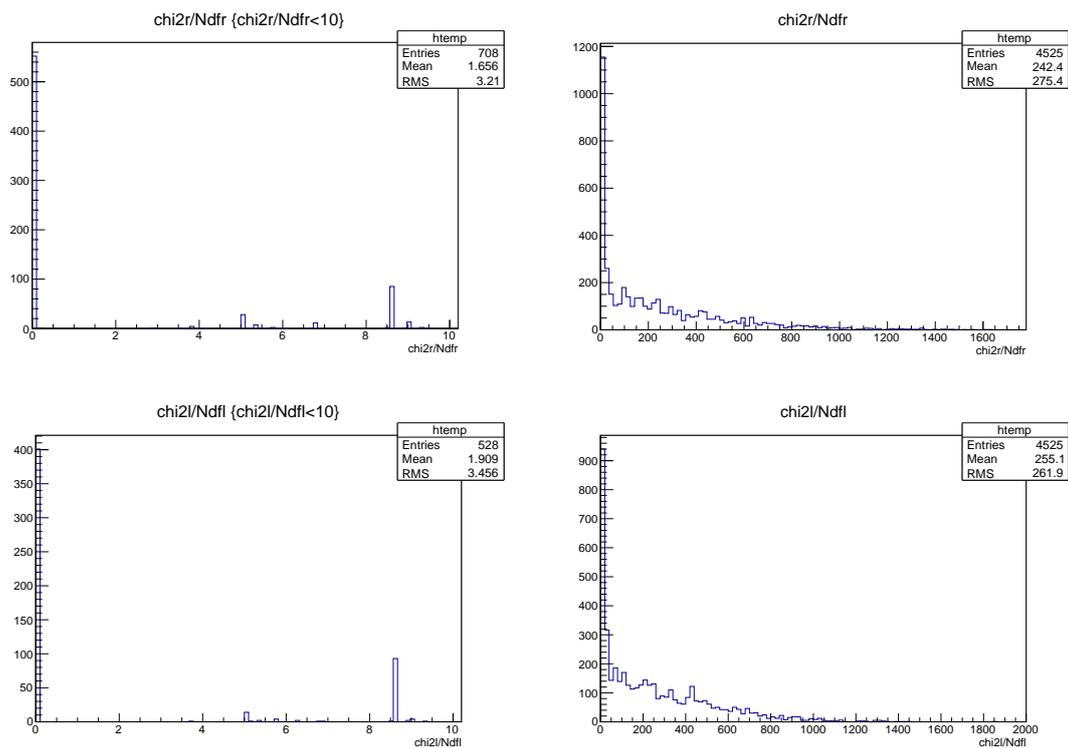


図 15: 右側、左側それぞれの  $\chi^2/N_{df}$  の分布 (上段は右側の分布、下段は左側の分布)

トラック 1 本正確に引けたもの ( $\chi^2/N_{df} \leq 1$  かつヒット数  $\leq 4$ ) と合計の数を比較した。

#### 4.4.2 結果

正確に 1 本のトラックを引くことができたイベント数は 647137 であった。結果、1 本のトラックを引くことができたイベントに対する、2 本のトラックを引くことができたイベントの割合は  $229/239383 = 0.000957 (0.096\%)$  であった。図 16 にミューオン束のイベントディスプレイの例を示す。

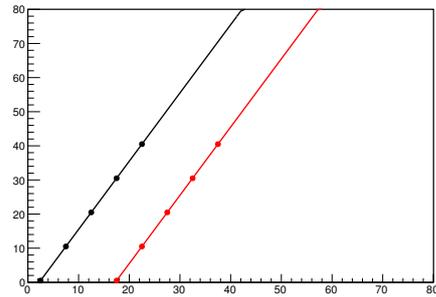
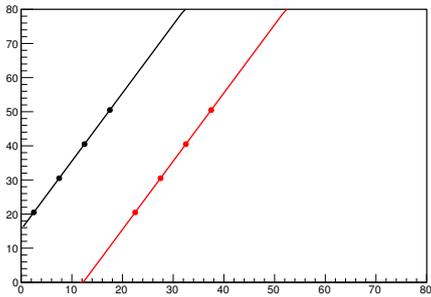
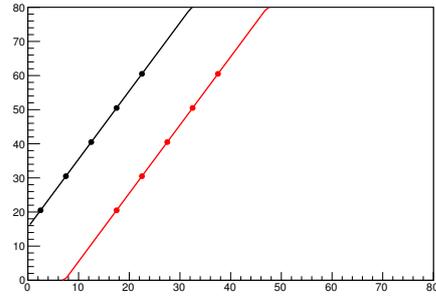
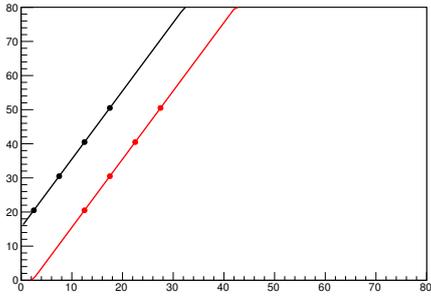
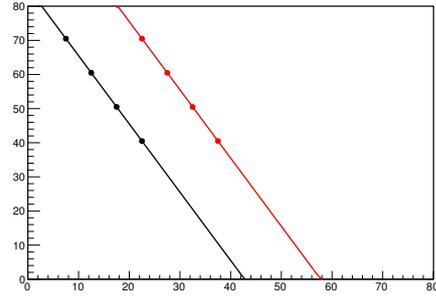
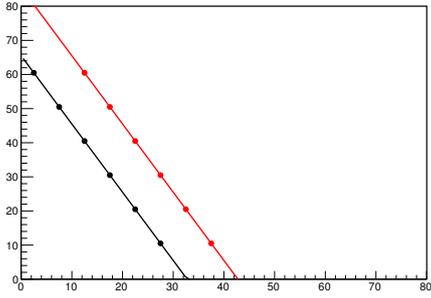


図 16: イベントディスプレイの例 (ミュオン束)

#### 4.5 電磁シャワー

実験データでヒット数 15 以上のもののトラックを調べた。その結果、電磁シャワーらしきものものはいくつか発見できたものの、はっきりと電磁シャワーと断定できるものがなかった。ミューオン束と区別がつかない、などといった問題のためである。図 17 に電磁シャワーと推測されるイベントディスプレイの例を示す。

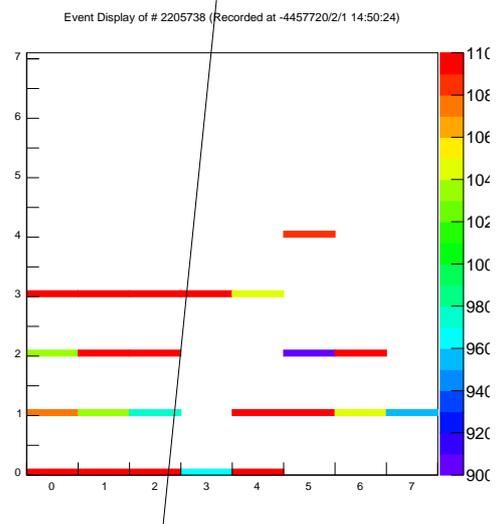
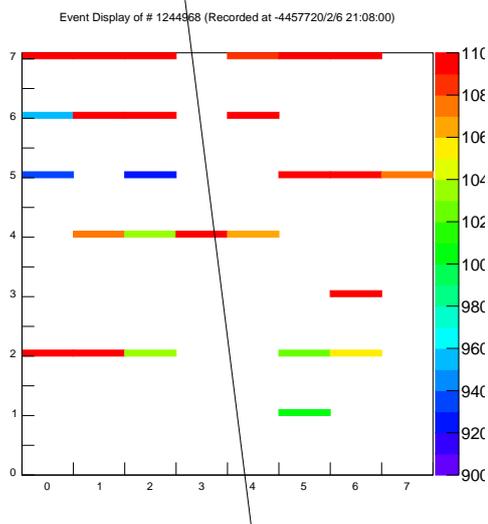
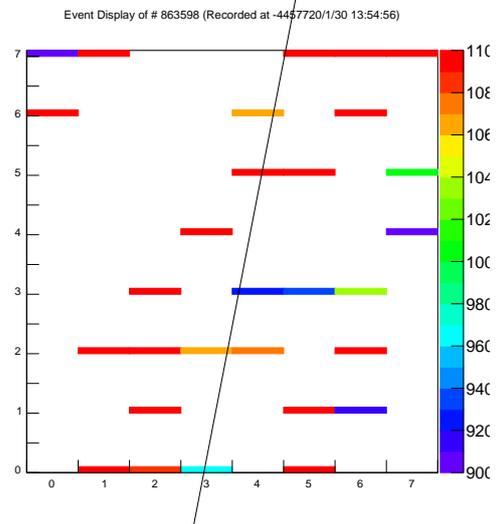
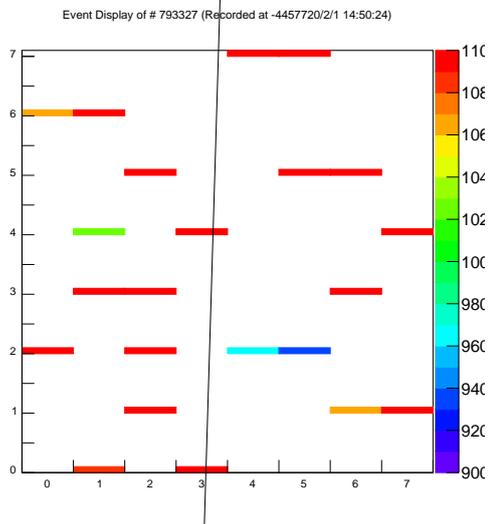
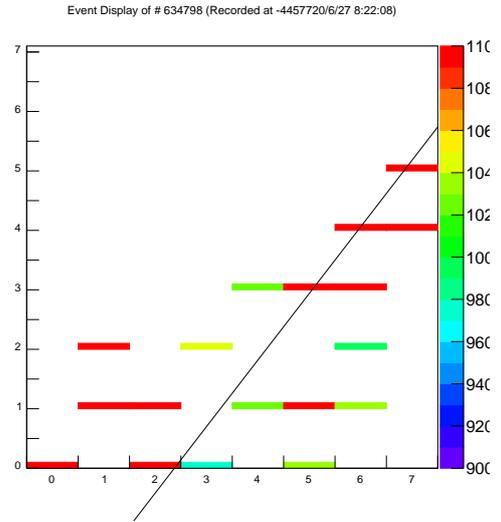
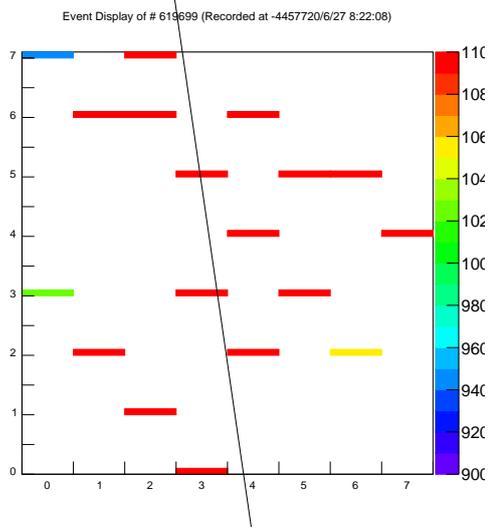


図 17: イベントディスプレイの例 (電磁シャワー)

## 5 考察

### 5.1 天頂角分布

観測結果とシミュレーションの結果を合わせて考察を行う。

- 観測結果とシミュレーション結果は、図 11 を見るに (ピークの位置 (0 rad や  $\pm 0.5$  rad 付近) 等)、概ね一致しているといえる。
- 観測結果には一定数の Background があることについて  
これはノイズや暗電流が原因であると考えられる。
- 観測結果とシミュレーション結果がともに連続的な分布になっていないことについて  
今回解析で用いたトラックを再構成するプログラムでは、シンチレータを点とみなし、最小二乗法を用いて直線でフィッティングしている。したがって、シンチレータの鳴り方 ( $2^{64}$  通り) に応じて、多くとも  $2^{64}$  通りの角度しか算出されない。このことが原因であると考えられる。
- 改善点について

検出器は水平にシンチレータ 8 つ並べた層を、鉛直に 8 層重ねたものを用いたが、シンチレータを 90 度回転し、水平にシンチレータ 32 つ並べた層を、鉛直に 2 層重ねたものを用いて、同様の実験を行えば検出の精度が上がると思われる。

また、トラックの再構成のプログラムを直線でフィッティングして求めるのではなく、シンチレータの厚さを加味して、鳴ったシンチレータ全てを通るように直線を決定することでより高い精度で天頂角分布を求めることができると考えられる。

また、時間があれば、測定で得られたデータ全てを解析することも改善点の 1 つである。

### 5.2 東西効果

- シミュレーションの Asymmetry について  
東西効果を考慮していないシミュレーションにおいて Asymmetry があったのは、検出器内に壊れていて反応しないチャンネルがあったことによるものと思われる。反応しないチャンネルの位置は実際のもを反映しているので、実験結果の Asymmetry に関しても 3.8% 前後は壊れたチャンネルによるものと考えられる。
- 真上付近 (天頂角  $\varphi \sim 0$  rad) の  $\chi^2/Ndf$  について  
観測結果において、 $\chi^2/Ndf$  を制限した時、なぜか 0 rad 付近のミュオンの数があまりに少なくなる。その一方でシミュレーション結果においては、 $\chi^2/Ndf$  を制限した時、0 rad 付近のミュオンの数が観測結果ほど極端には減らない。この一因と

して、天頂角が0 rad 付近と算出されるイベントは、フィット直線の左右に対称的にシンチレータが鳴っているために、 $\chi^2/Ndf$  が大きくなることが考えられる。

実際に観測結果において、同じ  $\chi^2/Ndf$  でも、一層で2つ以上鳴っているものを排除すると、0 rad 付近のミューオンの数が減ることが確認された。

- 建物について

実験を行った部屋は建物の東端付近に位置しており、東側よりも西側に壁や物が多くある。そのため西からのミューオンが比較的多く止められるので、今回の実験では実際よりも東西効果がいくらか小さくなったと思われる。

- 改善点について

検出器を東西に180度回転させて天頂角分布を求めることにより、今回得られた結果がシンチレータの特性による系統誤差ではないことを確認したい。

同時にシミュレーションにより定量的に東西効果の議論を行うことも改善点として挙げられる。(ハミルトニアンが定義できるので、シンプレクティック数値積分法を用いるのが良いと考えられる。)

### 5.3 ミューオン束

- 想定したよりも数が少なかったことについて

原因として1つ以上空いたのものに限ったことと、東西方向のみに分かれたもののみしか見れなかったため、南北方向に平行に分かれたものが見えなかったことがあげられる。電磁シャワー等のヒット数が大きい現象と区別がつきにくい実験でもあったが、トラックを2本引く上ではあまり問題にはならなかったと考えられる。

- 改善点について

より細かく区切ってチャンネル数をふやす必要あると考えられる。また、チャンネル数が増えれば、3本以上のミューオンの飛跡を書くことができるはずである。

### 5.4 電磁シャワー

- 電磁シャワーとミューオン束の区別をつかなかった。

電磁シャワーとミューオン束の区別をつける方法が必要であり、また、どこからが電磁シャワーか、という定義づけをする必要もある。

- 電磁シャワーをより多くとらえる方法を考えるべきである。

電磁シャワーは原理的に地上付近では非常に弱くなっている。そのため、Thresholdの値をもう少し下げるなどといった調整を行う必要がある。

## 6 結論

検出器を用いて、宇宙線ミュオンを検出を行い、それに付随する現象(天頂角分布、東西効果、ミュオン束、電磁シャワー)を観測することを試みた。

ミュオンの天頂角分布について、観測結果と理論に基づいたシミュレーション結果が概ね一致することが確認できた。また、東西効果の存在を確認することはできたが、その程度について量的な考察をすることはできなかった。

ミュオン束と電磁シャワーについて、これらの区別が難しかった。今回の実験で、はっきりと2本同時に平行に通るミュオンの飛跡を観測することができた。しかし、どれだけの頻度で来ているのかを定量的に述べるには電磁シャワー等との区別もつきにくく難しかった。また、今回の実験結果と比較可能な先行研究が見つからず、文献値と結果を比較することができなかった。その一方で電磁シャワーと推測されるイベントは存在したものの、はっきりと断言はできなかった。

## 7 謝辞

半年間、ゼミや実験においてわかりやすく丁寧に指導して下さった、南野さん、関さん、宇野さんには感謝してもし尽くせません。本当にお世話になりました。

## 参考文献

- [1] 小田稔 著:『宇宙線 [改訂版]』, 裳華房,1972
- [2] Multi Pixel Photon Counter の研究開発  
(<http://www.jahep.org/hepnews/2007/Vol26No3-2007.10.11.12yokoyamaouzumi.pdf>)
- [3] MPPC(Multi Pixel Photon Counter)  
浜松ホトニクス (<http://www.hamamatsu.com/jp/ja/4004.html>)