

宇宙線ミュオンおよび電磁シャワーの観測について

小柴 鷹介 小橋 亮介 菅島 文悟 山下 達也 吉中 智弘

2017年10月4日

目次

1	はじめに	2
2	実験装置	2
2.1	シンチレータ	2
2.2	光ファイバー+ MPPC	3
2.3	Easiroc モジュール	4
3	設定	4
3.1	光量漏れチェック	4
3.2	エネルギー	4
3.3	個数に対する threshold	5
3.4	Angle について	7
4	天頂角分布	8
4.1	理論	8
4.2	検出器の幾何	9
4.3	方針	9
4.4	結果	10
4.5	解析	10
4.6	解析 1-積分	10
4.7	解析 2-シミュレーション	11
5	東西効果	13
5.1	理論	13
5.2	実験データ	14
5.3	解析	17
5.4	考察	18
6	ミュオンと電磁シャワー	18
6.1	原理	18

6.2	解析	19
6.3	結果	20
6.4	考察	20
6.5	改善点	21
7	速度分布	21
7.1	説明	21
7.2	予想	21
7.3	0731_13 の結果	22
7.4	追加実験	24
7.5	考察	26
7.6	改善案	27
8	謝辞	27
9	参考文献	27

1 はじめに

宇宙線とは宇宙を高エネルギーで飛び回っている粒子のことであり、地球に大量に降り注いでいる。地球大気に飛び込む前の宇宙線を一次宇宙線といい、大気に飛び込んだのち新たに生まれた宇宙線を二次宇宙線という。

二次宇宙線として、ミューオン、ニュートリノ、電子、 γ 線などがあるがここでは特にミューオン。電磁シャワーについて扱う。

2 実験装置

使用した実験器具は以下の通りである。

- シンチレータ
- 光ファイバー
- Multi Pixel Photon Counter (MPPC)
- Easiroc Module

2.1 シンチレータ

ミューオンおよび電子という粒子が通過すると発光するシンチレータ板を用意した
 奥行方向に長いシンチレータの板を 8×8 マス上に並べた形で骨組みを渡して検出器とする

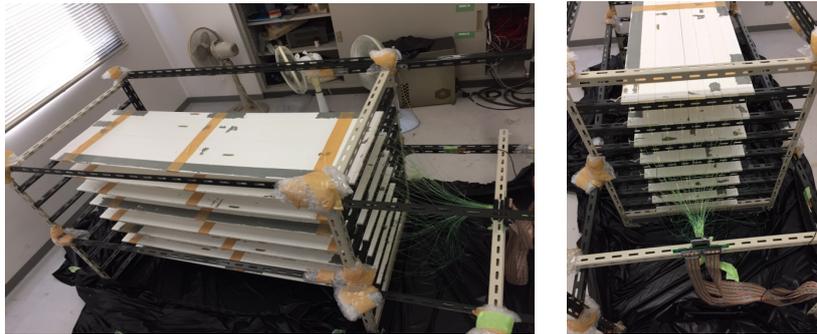


図1 シンチレータ (左:全体、右:正面上から)



図2 シンチレータ (左:正面から、右:真上から)

2.2 光ファイバー+ MPPC

各シンチレータのシンチレーション光は光ファイバーを通じて MPPC まで誘導した。MPPC は、入射光によりはじき出された光電子の電荷を計測することで光子数をカウントすることができる。これを 64ch 分並べた。

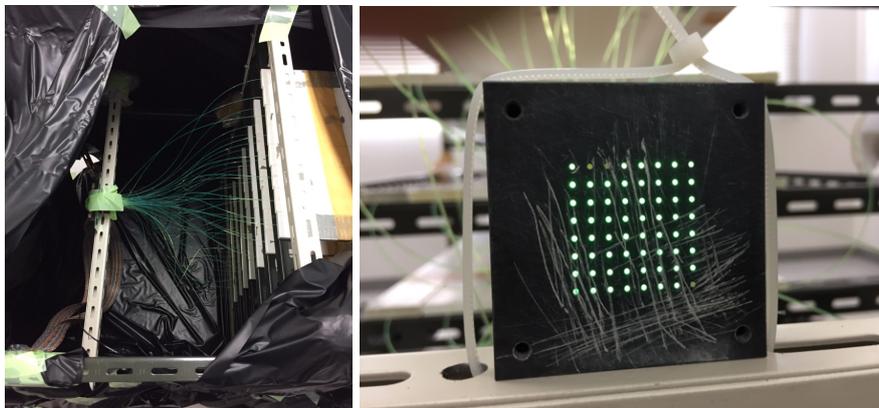


図3 左:光ファイバー、右:MPPC 正面

2.3 Easiroc モジュール

EASIROC を MPPC の読み出しに用いた。



図4 EasirocModule(左:ケーブル、中:High Voltage、右:MPPC と接続されるケーブル)

3 設定

3.1 光量漏れチェック

シンチレータ板からなる検出器に暗幕をかぶせて室内の光が入らないようにした (我々の対象とする 1 電子レベルのエネルギーの反応も検出できる精度まで高めた)



図5 光量漏れチェック

3.2 エネルギー

下の図は ADC カウント (エネルギーに対応) に対するミュオンのエントリー数の分布図である。縦軸はエントリー数を横軸は ADC カウントを表している。最初のピークは pedestal、二番目のピークはミュオンによるものだと考えられる。pedestal の寄与を取り除くために ADC カウント 1 2 0 0 で threshold をかけた。

この図でははじめの極小となる ADC カウントで threshold をかけた。

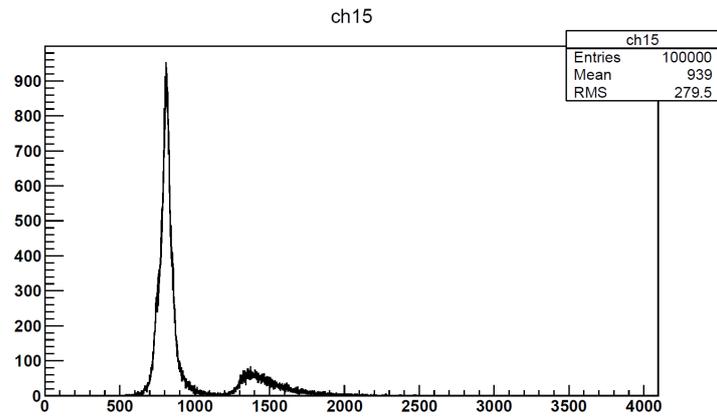


図6 0710-1 ch15

3.3 個数に対する threshold

64ch シンチレーターのうち、ある ch 数以上反応した場合のデータだけをとるために threshold をかけた。本実験では threshold4,10,15 の三つの設定で測定した。threshold4 はミュオン一本以上のデータをとるために、threshold10 はミュオン二本のデータをとるために、threshold 15 は電磁シャワーのデータをとるために設定した。下に各々の典型的な軌跡の図を載せた。

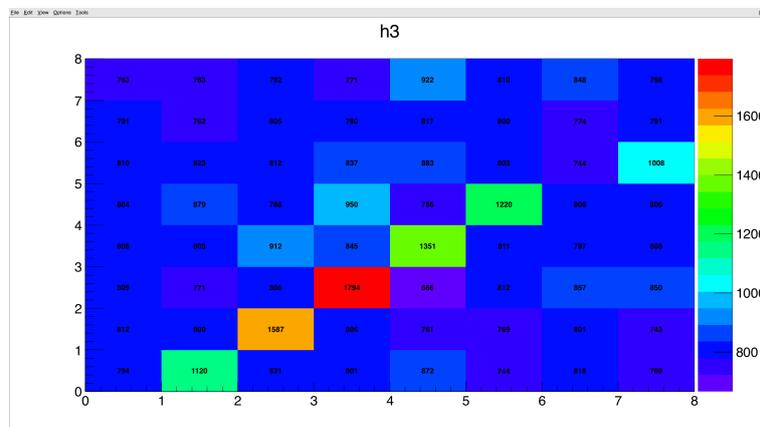


図7 ミュオン一本

これは threshold 4 での典型的なミュオン一本の軌跡の図である

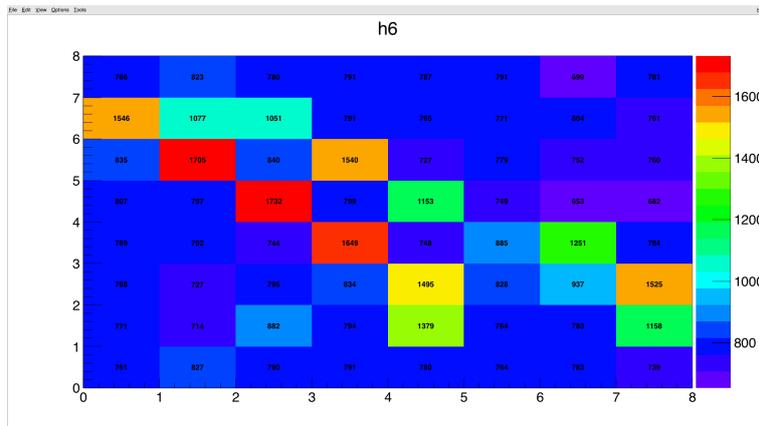


図8 ミューオン二本

これは threshold 10での典型的なミューオン二本の軌跡の図である

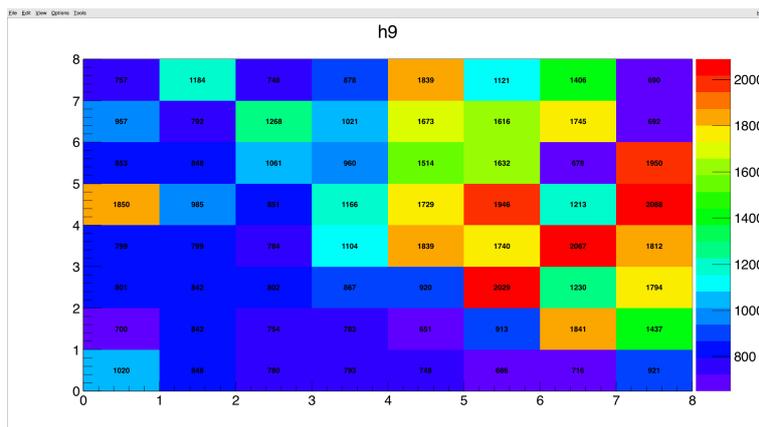


図9 電磁シャワー

これは threshold15での典型的な電磁シャワーの図である

3.4 Angle について

粒子の軌跡の角度分布を解析するために angle を導入した。シンチレータ 64 ch のうちエネルギー 1200 以上のデータの点を最小二乗法で評価し、その直線の角度をヒストグラムにしたものが angle である。下に図を載せた。

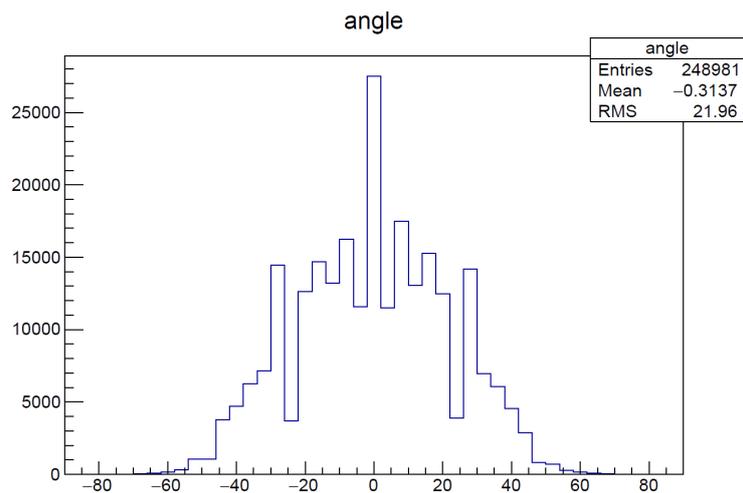


図 10 0731-13(bin4)

エントリー数 250000、個数 threshold4 のデータにおける angle である。bin 幅は 4 である。

角度 0° 以外にも ± 26° に特徴的なピークがみられる。これはシンチレータの幾何学的な構造によるものである。これは ± 26° 付近に入射した粒子が ± 26° としてカウントされやすいため起こるものである。

4 天頂角分布

宇宙線ミュオンが飛来してくる方向に対する依存性を調べたい。この際角度としては天頂角、つまり地面に対する法線と粒子の軌跡のなす角度を採用する。天頂角を α とおく。天頂角分布とは、宇宙線が飛来してくる方向の天頂角 α に対する頻度分布、つまり天頂角 α に対する強度の flux のことを指す。

ここでは宇宙線ミュオンの天頂角分布の関数形が $\cos\alpha$ の累乗に比例することを導出した上でその指数を決定する方針を取る。

4.1 理論

宇宙線が地上から高さ X の上空で生成し角度 α で飛来してくるとして文字をおくと、地上で $\alpha = const.$ をみたく宇宙線の軌跡 (群) は、天頂角を α とするような円錐面である。(図 11 参照) この条件を満たす宇宙線の強度 flux を $J(X, \alpha)$ とする。

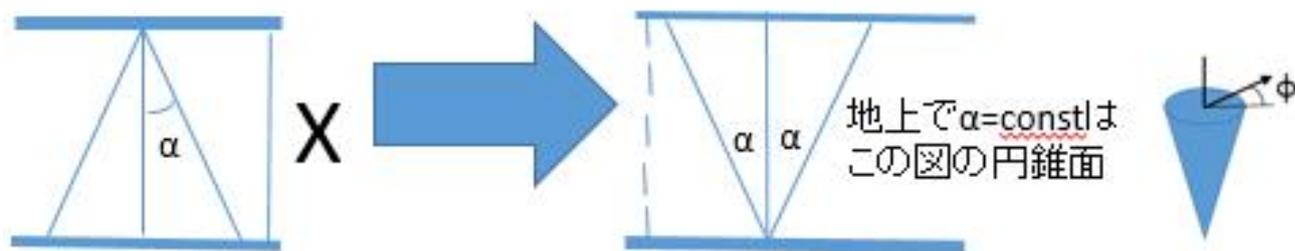


図 11 $J(X, \alpha)$ について α の一定面が円錐面であること

このとき、角度 α の宇宙線の強度は、これが宇宙線が実質進む大気の厚さ $X / \cos\alpha$ による強度と等しいとする：

$$J(X, \alpha) = J(X / \cos\alpha, 0) \quad (1)$$

また、強度の X 依存性が指数関数的に減衰するものとし、平均自由行程を λ とする、つまり $\exp(-X/\lambda)$ に比例するので以下の式を得る。

$$J(X, \alpha) \propto e^{-\frac{X}{\lambda}} \quad (J(X, 0) = J_0 e^{-\frac{X}{\lambda}}, J_0 = const.) \quad (2)$$

以上の仮定から $J(X, \alpha)$ において角度 α に依存する部分を求める。(ただし $\alpha \ll 1$ とする。) \exp の部分を小さい量 $\frac{1}{\cos\alpha} - 1$ で展開すると、

$$\begin{aligned} J(X, \alpha) &= J\left(\frac{X}{\cos\alpha}, 0\right) = J(X, 0) \frac{J\left(\frac{X}{\cos\alpha}, 0\right)}{J(X, 0)} \\ \frac{J\left(\frac{X}{\cos\alpha}, 0\right)}{J(X, 0)} &= \exp\left(-\frac{X}{\lambda} \left(\frac{1}{\cos\alpha} - 1\right)\right) = \exp\left(\frac{1}{\cos\alpha} - 1\right)^{-\frac{X}{\lambda}} \\ &\simeq \left\{1 + \left(\frac{1}{\cos\alpha} - 1\right)\right\}^{-\frac{X}{\lambda}} = (\cos\alpha)^{\frac{X}{\lambda}} \end{aligned}$$

より、 $J(X, \alpha)$ が $(\cos \alpha)$ の X/λ 乗に比例することが導かれる。以下の実験では観測によってこの指数を確認する方針をとる。

理論的には、この指数は、宇宙線ミュオンに対しては \cos の 2 乗に比例することが予想される。というのも、地表における宇宙線ミュオンは 1 GeV 程度であり、エネルギー 1 GeV のミュオンの飛程 $\simeq \lambda$ は約 500 g/cm^2 である。また、大気の厚さ X は (距離 \times 密度) の単位で表すと、地上の面積 1 cm^2 の上に合計して 1000 g 分の大気が乗っていることから、大気の深さは 1000 g/cm^2 となる。

4.2 検出器の幾何

ここで、天頂角 α は用いた検出器では直接測ることができない。観測で見ることができるのは α とは別の量 θ である。奥行きに長い長方形を使った検出では角度 θ は α を (x, z) 平面に射影した角度として観測される。

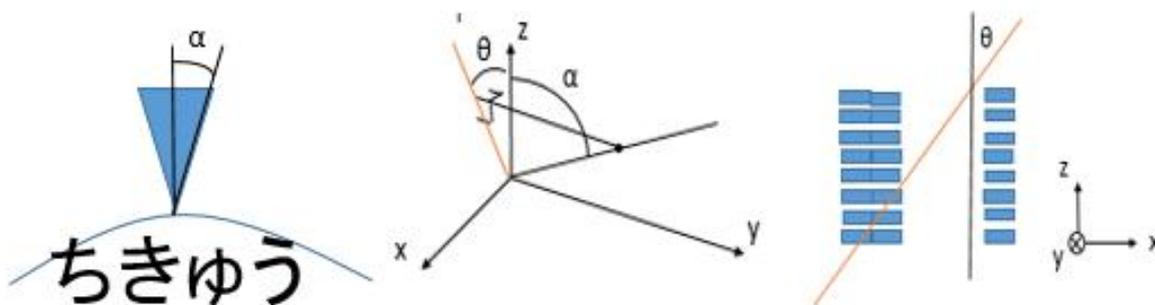


図 12 天頂角の考え方と装置を横 (x, z) 平面) から見た図

4.3 方針

エネルギーが閾値を超えたシンチレータの位置から、最小二乗法で直線を引き軌跡を再構成して、その傾きから宇宙線が飛来してきた方角を求めた。その角度を記録していった、角度 θ ごとの頻度分布、天頂角分布を調べた。理論で求めたように \cos の累乗であることを前提にしてこの指数を求める方針をとる。ピークのあるグラフは、測定の精度が検出器の精度を上回ることの原因があるので検出器の精度に近い bin 幅 4° とすることにした。

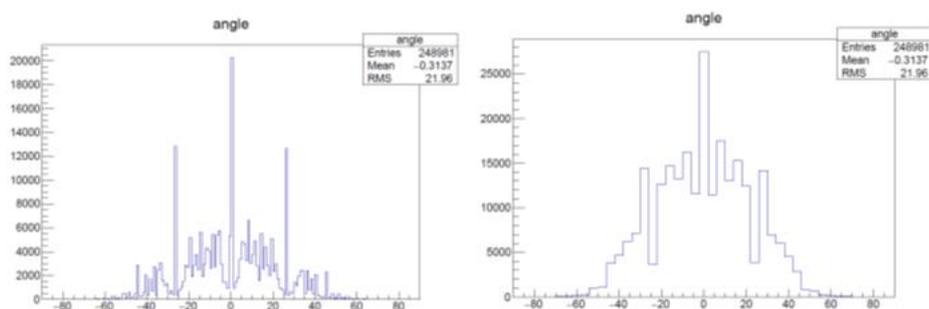


図 13 bin 幅が 1° (左) と 4° (右) の図 ($\theta \in [-90^\circ, 90^\circ]$)

4.4 結果

$(p0) * \cos^2(p1)$ として、 $\theta \in [-62^\circ, 62^\circ]$ の範囲で ROOT の fitting の機能を用いると \cos の累乗の指数がほぼ 6 であることが導かれた (bin 幅 4°)。fitting の範囲はグラフの値がほぼ 0 になる θ の絶対値 60° 付近までとることを考えた (範囲を「絶対値が 90° 以下」に広げても数%ほどしか差がなかった)。目視で形がよく似ているので、イベント数の最も多かったイベント数 248981 のデータ (図 14) を用いて解析した。

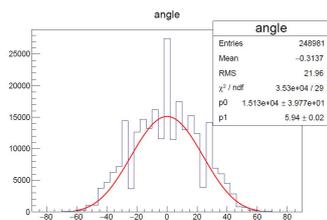


図 14 イベント数 248981 のデータおよび fitting の結果 ($\theta \in [-90^\circ, 90^\circ]$)

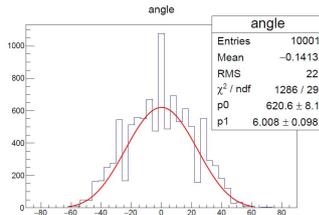


図 15 イベント数 10001 のデータおよび fitting の結果

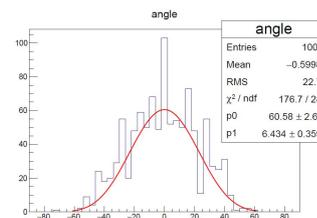


図 16 イベント数 1001 のデータおよび fitting の結果

4.5 解析

前述の通り理論で用いた天頂角 α と観測に使う θ は別の量である、つまり、理論で用いた角度を観測することは実質できない。むしろ奥行き y 方向に対して (正確には ϕ について) 足しあげた (つまり (x,z) 平面に射影した) 角度を観測では用いているので情報が減っている。

このことから、工夫して α と θ のギャップを埋める必要があり、そのために 2 種類の方法を用いる。一つ目は α を θ として読み込むときに消えた奥行きを考慮するため方位角 ϕ を考えて (図 11 右参照) ϕ に対して一様に降ってくると仮定して積分する方法。もう一つは一様に降ってくる考えは同じで \cos の累乗で粒子を降らせるシミュレーションである。

(いずれにせよ実質積分しているのは α で表される flux を θ による実測値 (これは flux に立体角のかかったような値) に直すためとも考えられる。)

4.6 解析 1-積分

4.6.1 導出

ϕ について一様であることを仮定すると、 θ での強度の式 $I(\theta)$ は α, ϕ で表される式 $J(\alpha, \phi)$ を ϕ で積分すればもとめられる。

$$I(\theta) = 2 \int_0^{\pi/2} J(\alpha, \phi), d\phi \quad (3)$$

$d\phi$ を $d\alpha$ に変換する式

$$d\phi = -d\alpha \frac{\tan \phi}{\tan \alpha (\cos \alpha)^2} \quad ((5) \text{より}) \quad (4)$$

と、さらに $(\alpha, \phi), \theta$ の間に成り立つ関係式

$$\tan \theta = \tan \alpha \sin \phi (= y/z) \quad (x = \sin \alpha \cos \phi, y = \sin \alpha \sin \phi, z = \cos \alpha) \quad (5)$$

を用いると

$$I(\theta) = 2 \int_{\theta}^{\pi/2} \frac{\tan \theta G(\alpha)}{(\sin \alpha)^2 \sqrt{1 - \left(\frac{\tan \theta}{\tan \alpha}\right)^2}} d\alpha \quad (6)$$

と式変形できる。

4.6.2 結果

この計算を $G(\alpha)$ の形に直すのは難解なので $G(\alpha)$ が \cos の累乗に比例する仮定のもと、代入して左辺が測定結果に近いものを選ぶ。

$G(\alpha)$ として $\cos \alpha$ の n 乗 ($n=2,3,4,5,6$) で降らせたときの $I(\theta)$ を $\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$ にわたって刻み幅 4° で表示したものを考えた。 ϕ の積分に関しては ϕ の刻み幅を 1° としてステップ数 180 だけ被積分関数を足しあげた和として計算した。ただし、図 17 に示した値はそれぞれ個数ではなくて、足しあげたステップ数 180 で割った値 (=確率, 頻度) をさらに $\theta = 0^\circ$ での値を実測値と合わせるために 5 で割った値である。

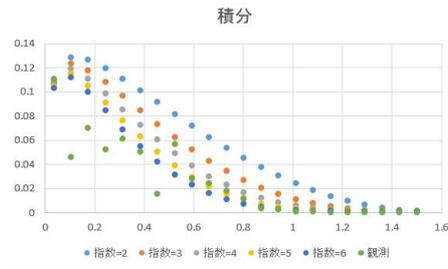


図 17 実測値と、 $G(\alpha)$ の \cos の累乗の指数を 2,3,4,5,6 とした $I(\theta)$ の図

4.6.3 結果に対する考察

結果としては、指数が 5 辺りで実測値と近くなることが分かった。

この方針では検出器の大きさを一切考えずに検出器を点と見なして、その上で角度のみ考慮している。つまり、実際には装置全体が直方体の形をしていて角度に対して偏りがあるということを考えていない。定性的には、鉛直下向きの宇宙線が入りやすい格好になっているはずである。というのも、検出器の面が上を向いているので面積が大きく取れる垂直向きが一番効率がよいためその意味でも指数が 5 辺りなのは定性的には納得できる結果である。

4.7 解析 2-シミュレーション

つぎに見るシミュレーションでは、奥行き方向について足しあげているのはもちろん、検出器の大きさもある程度考慮に入れている。

4.7.1 設定

天頂角分布が $(\cos \alpha)^n$ に比例する場合のシミュレーションを行った。以下の順を $N=5000000$ 回繰り返した (250000 に角度依存性 180 ステップをかけた)。

1. 検出器の中点を通り検出器に平行な面上で (\approx 地上で) ランダムに 1 点選ぶ (ただし検出できる限界の

角度からその半径は 150cm とした (問題点と改善案で後述)

2. 宇宙線の放出される角度を $(\cos \alpha)^n$ の確率分布に従い設定する

3. 検出器でカウントされるか

→実際は 64ch シンチレータを並べて Threshold:4 を満たすものだが

今回は 2 枚用意して天面に当たる or 底面に当たるとカウント

4.7.2 結果

図 18 は各ヒット数を全体の N で割った値である。cos の累乗の指数を 1,2,3,4,5 としたシミュレーションを実行した。

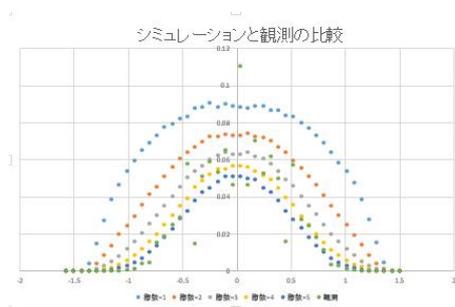


図 18 実測値と、 $G(\alpha)$ の cos の累乗の指数を 1,2,3,4,5 とした図 ($\theta \in [-90^\circ, 90^\circ]$)

4.7.3 結果に対する考察

指数が 4,5 のものが実測データに近い。今回は板を 2 枚用意して上面に当たる or 下面に当たるとカウントするという簡易なタイプで実験を行ってしまった。本来は 8×8 枚ある検出器を 4 枚以上高エネルギー落としたかというところを簡易にしてしまったことは実際の実験のデータから離れてしまった要因とも考えられる。

この要因によると角度が浅い時にカウントしていないものがある計算なので今のシミュレーションから裾が上がるので今回のデータのずれを定性的には正しく説明できる。

4.7.4 問題点と改善案

まず一つ目は前の節で挙げた再現性である。このことの改善策としては、Threshold:4 の飛跡を抽出することができなくても、近いものとして検出器内で飛跡が長いものを抽出しカウントするシミュレーションは書くことが考えられる。

問題点はもうひとつあって宇宙線生成の範囲の問題もある。半径は 150 cm までとしていたのは装置の底面の 10 cm 下で対角線方向に上 4 枚と (上 4 段と) 反応するものが検出限界角度ではなくとも (現実にはないが $\theta = 90^\circ$ では限界角度に合わせると半径無限大) 目安になると考え、かつ底面 10 cm 下でなく中点を通る面となればむしろそれで十分と考えたためである。ところが、試しに 2 倍の 300 cm まで拡大すると裾の値はほぼ変わらず $\theta = 0^\circ$ の値が 3 分の 1 ほどになったため θ の絶対値が大きいときの値がかなり増えていることが見て取れる (図 19 参照)。つまり、関数形は半径の大きさにも大きく依存していた。今後の解決案として実際に近づけるために、宇宙線を生成する地点の高さを調べてその高さからふるせることが考えられる。

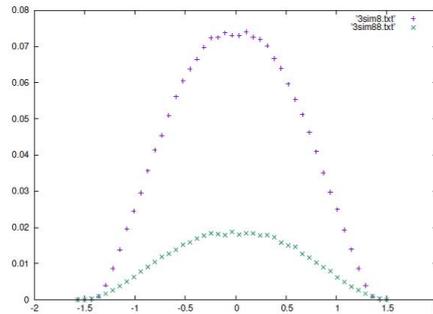


図 19 $G(\alpha)$ の \cos の累乗の指数は 2 として半径の上限を 150 cm(従来, 紫色) と 300 cm(緑色) とした図 ($\theta \in [-90^\circ, 90^\circ]$)

5 東西効果

5.1 理論

ミューオンは電荷を帯びているので、地磁気によるローレンツ力を受けて軌道が曲げられる。その影響により、飛来してくるミューオンの数が、東と西で差が生じる。これを東西効果と呼ぶ。

東西効果の主な原因は、次のようである。 μ^+ は μ^- より多く存在している。そのためこれ以降、 μ^+ の場合を考えると、2 次宇宙線 (μ^+) はローレンツ力を受けて、軌道が曲げられ、東からのミューオンの方が、地表までの走る距離が長くなり、崩壊の可能性が高まる。また、東からのミューオンの方が、走る距離が長いので、地表にたどり着くためのエネルギーが高くないといけない。そのため 1 次宇宙線は、入射可能な粒子の最低エネルギーに差が生じ、東側の 1 次宇宙線の最低エネルギーのほうが高くなる。

図 20 は μ^+ の場合で、北極から見た図である。

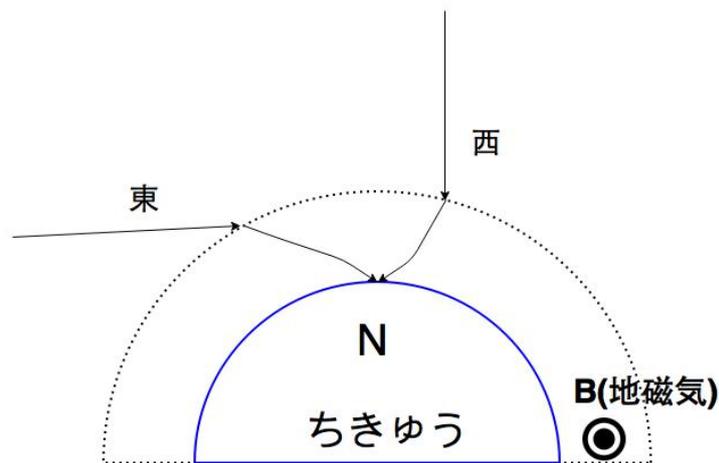


図 20

以上の理由で、ミューオンは東からよりも西からのほうが多く観測されるのである。

5.2 実験データ

ミュオンの数を測定し、ヒストグラムを得る。今回の実験装置のジオメトリーにより、以下の図 21 のように、東から入ってきたミュオンが正の角度、西から入ってきたミュオンが負の角度となっている。

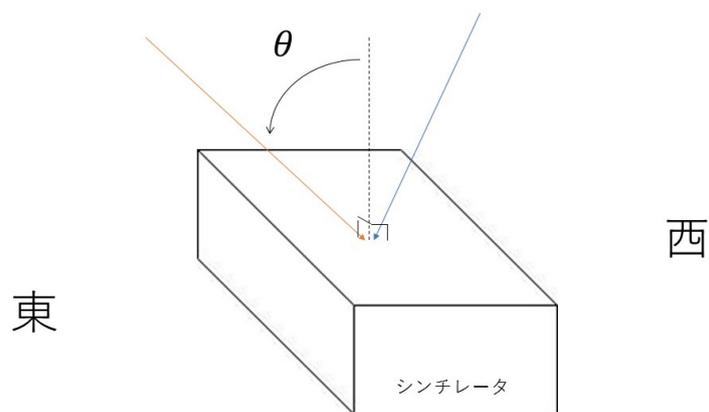


図 21

イベント数を変えて、取り扱う 3 つのデータを図 22-図 27 に示す。

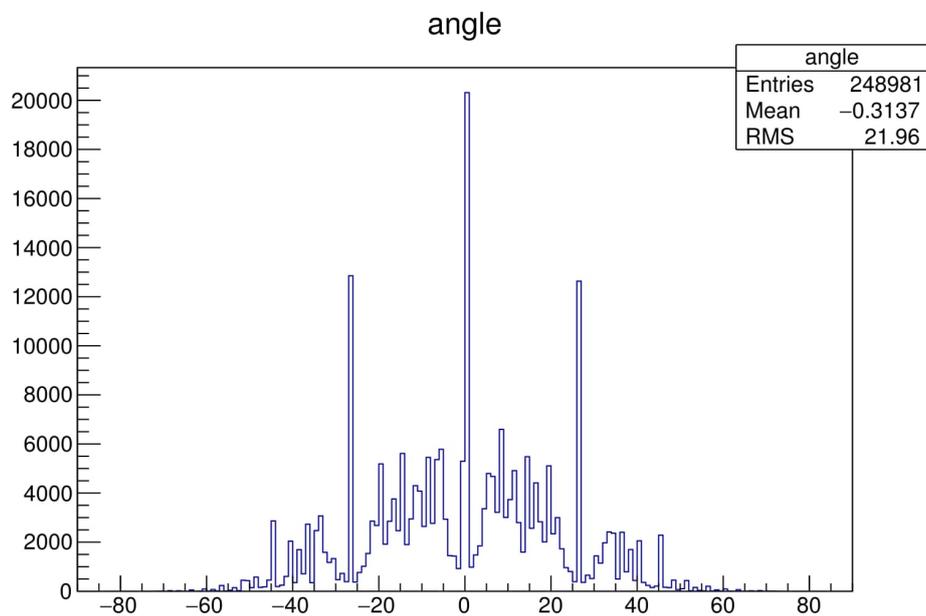


図 22 イベント数 248981 bin 幅 0.1 7 月 31 日

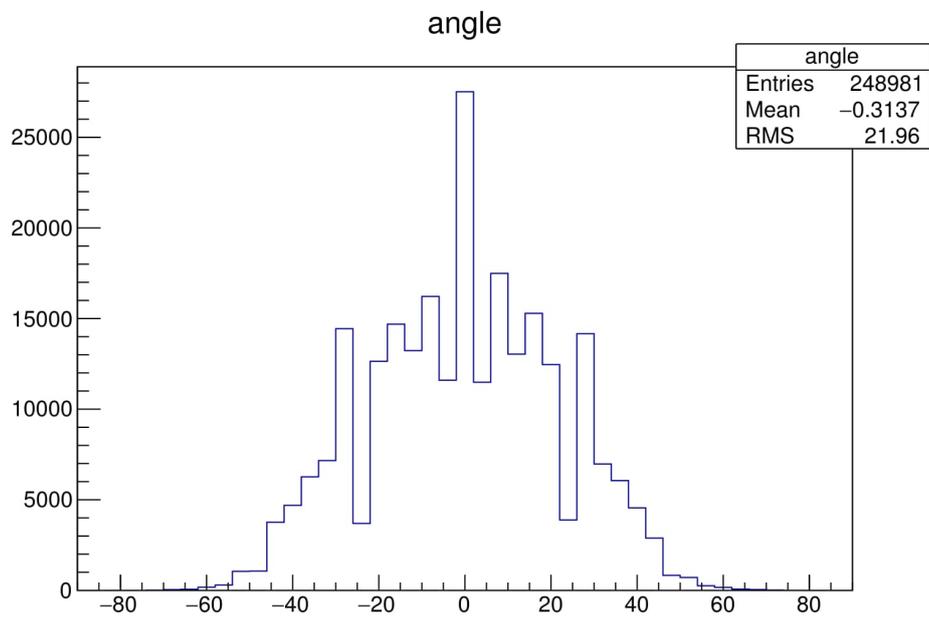


図 23 イベント数 248981 bin 幅 4 7 月 31 日

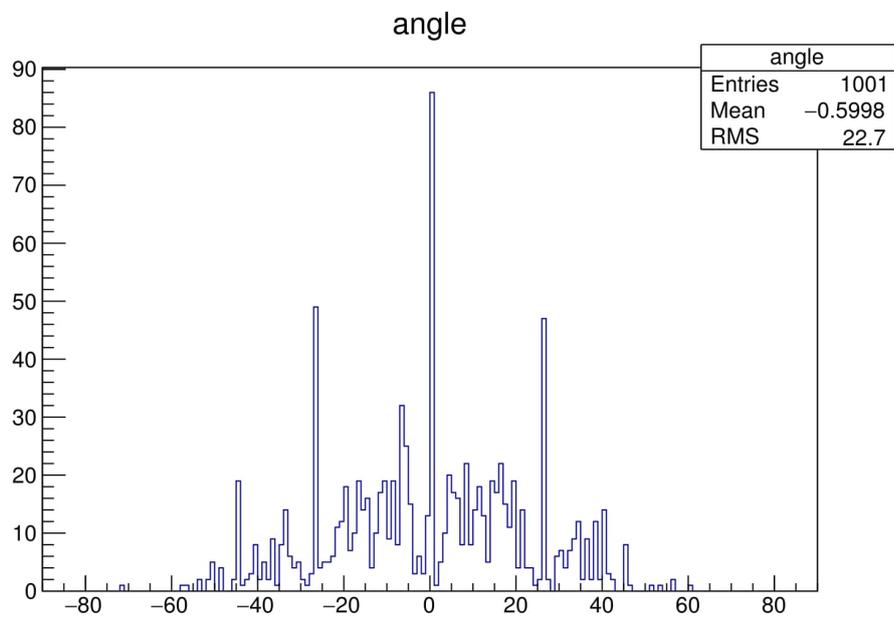


図 24 イベント数 1001 bin 幅 0.1 7 月 31 日

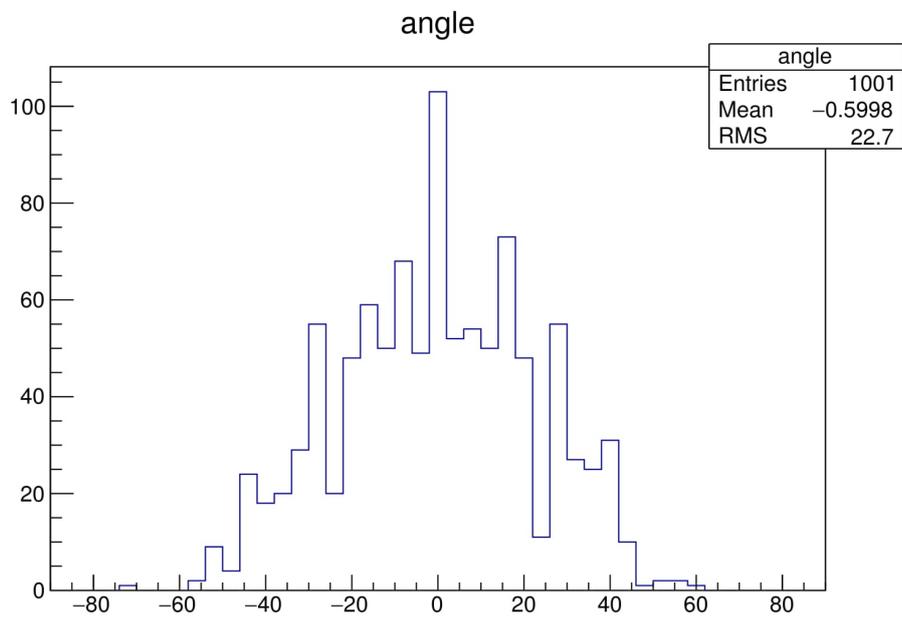


図 25 イベント数 1001 bin 幅 4 7 月 31 日

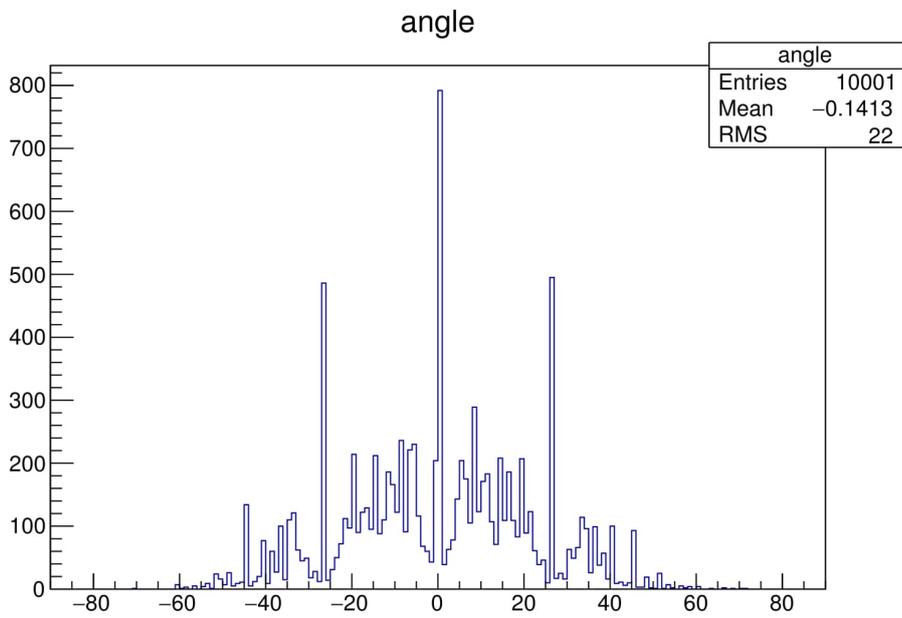


図 26 イベント数 10001 bin 幅 0.1 8 月 21 日

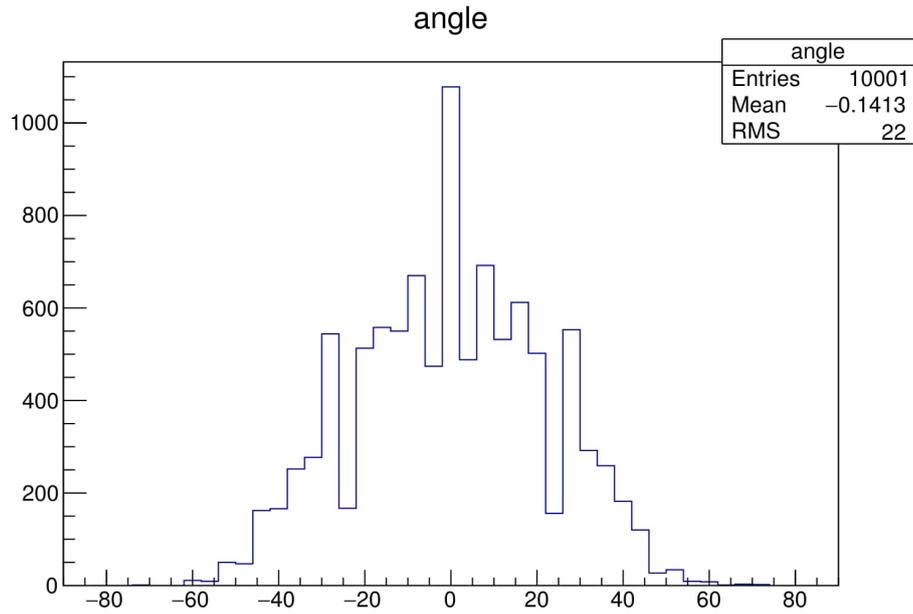


図 27 イベント数 10001 bin 幅 4 8 月 21 日

5.3 解析

西からのイベント数を w 、東からのイベント数を e とする。このとき *Asymmetry* は次式で表わされる。

$$Asymmetry = \frac{w - e}{w + e} \quad (7)$$

今回は w と e はそれぞれ、 -4° 以下、 $+4^\circ$ 以上を積分したものとする。

また、*Asymmetry* の誤差は、 w と e の誤差をそれぞれ \sqrt{w} 、 \sqrt{e} として、誤差の伝播により導き出すと以下ようになった。

$$Asymmetry \text{ の誤差} = 2\sqrt{\frac{we}{(w + e)^2}} \quad (8)$$

ここで、以下の表 1 に 3 つの実験データの日付、イベント数、 e と w の値、*Asymmetry*(\pm 誤差) を示す。

表 1

日付	イベント数	w と e の値	<i>Asymmetry</i> (\pm 誤差)%
7/31	248981	$1.111 \times 10^5, 1.104 \times 10^5$	0.316(± 0.213)
7/31	1001	456,442	1.22(± 3.33)
8/21	10001	4451,4472	-0.235(± 1.06)

5.4 考察

イベント数 10001 の場合、Asymmetry が負であるが、誤差で正に振れるので、誤差の範囲内である。しかし、ヒストグラムと Asymmetry の値からは、東西効果がはっきり表れていたとは言えなかった。

イベント数が多ければ多いほど、比較的わかりやすい結果が得られる。

6 ミューオンと電磁シャワー

6.1 原理

6.1.1 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、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。今回は特に 2 本の場合について調べる。

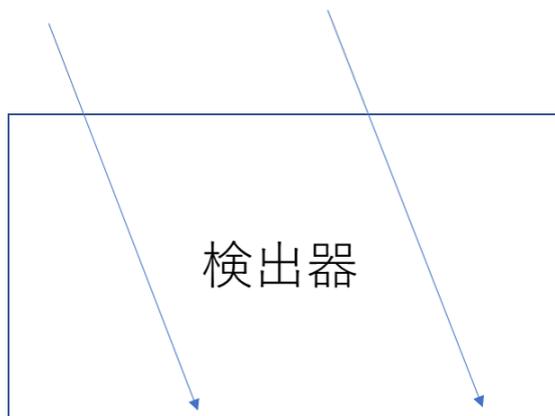


図 28 ミューオン束

6.1.2 電磁シャワー

宇宙からやってきた高エネルギー電子、光子が大気中の原子の原子核に当たった時に電子-陽電子対生成が起きる。このとき生成した電子-陽電子は原子核によるクーロン力によって加速され制動放射で光子 (γ 線) を放出する。この反応が連鎖することでシャワーが起きる。このようにして増殖を繰り返していくとシャワーの発達にとまり、物質に吸収される。これは最初に入射した電子のエネルギーが数多くの粒子に分配され、電子のエネルギーがあるエネルギーより下がると制動による光子を放出できなくなるためである。そして、このエネルギーのことを臨界エネルギーという、臨界エネルギーは制動放射によるエネルギー損失と電離によるエネルギー損失とが等しくなるエネルギーである。臨界エネルギー以下では主なエネルギー損失は電離による損失になるためシャワーの発達は止まる。これは、地表では電磁シャワーの影響が減衰していき、小さくなる、ということである。

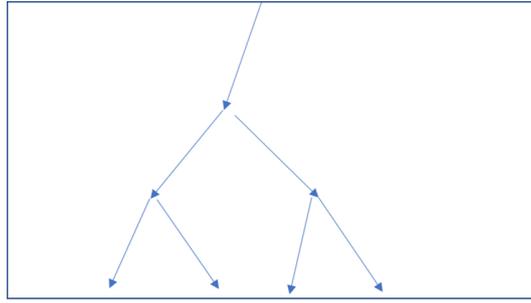


図 29 電磁シャワー

6.2 解析

今回の実験では、電磁シャワーとミューオン束がどのくらいの割合できているか調べた。なお、これらを発見しやすいように threshold の値を 10,15 にして各々 200event ずつ測定した。ただし、10 はミューオン束、15 は電磁シャワーのためである。

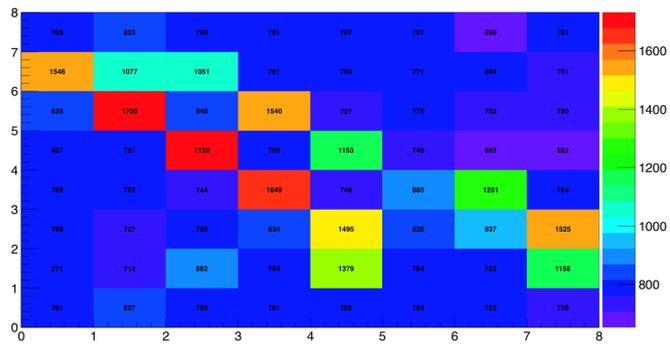


図 30 ミューオン 2 本の例

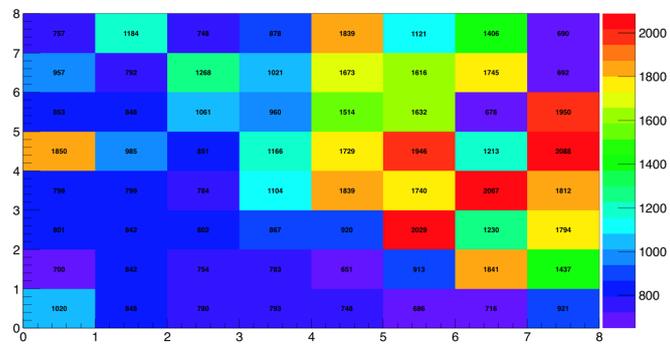


図 31 電磁シャワーの例

6.3 結果

- 1 0821-2 Threshold 10 event 200 time 2275sec
- 2 0821-3 Threshold 15 event 100 time 1545sec
- 3 0830-1 Threshold 15 event 100 time 1482sec

この測定によって得られた各 event を 2 人がかりの目視によって、ミューオン 2 本、電磁シャワー、その他でそれぞれ分類した。結果、以下の表のようになった。

	ミューオン 2 本	電磁シャワー	その他
1	98	19	83
2+3	56+42=98	17+21=38	27+37=64

6.4 考察

6.4.1 ミューオン束・電磁シャワーの割合

参考にするデータを

Daq 300 Threshold 4 event 250000 time 7400sec

とする。これはミューオン 1 本以上を見るためのものである。

これより、ミューオン 2 本以上の割合は

$$\frac{74 \times 10^2}{25 \times 10^4} \times \frac{98}{2280} \times 100 = 0.127\%$$

電磁シャワーの割合は

$$\frac{74 \times 10^2}{25 \times 10^4} \times \frac{38}{3000} \times 100 = 0.0375\%$$

となった。

電磁シャワーとミューオン束とを見分けるのは非常に困難であった。

また、視認によって分析しているため精度は高くない。

割合はオーダー程度で見積もるのが良いと思われる。

6.4.2 ミューオン束の偶然性

ミューオンが二本が入ってくるとき、偶然異なる二点から入射したのか、それとも同じ点で発生したものが入射したのかを考察する。ミューオン 1 本以上を見るためのデータはエントリー数 250000, 測定時間 7400sec であったから一秒間にミューオンは約 34 本入射していることになる。ミューオンがシンチレータを通り抜けるのにかかる時間は 3n sec 程度であるが、シンチレータは 300n sec 以内に入射した粒子は同じ event とするので偶然二本はいることは十分考えられる。N を 300×10^{-9} の逆数とする。一秒間に 34 個のミューオンが入射しているとしたので、一秒を N 分割した時二つ同じ個所に入る確率 P は

$$P = \frac{{}^N C_{34-1} \times (34-1)}{{}^N C_{34}} \times 2 = 6.73 \times 10^{-4}$$

P は一秒間に偶然二本入射する確率であるから、7400 秒間では 4.98event 偶然二本入射することが分かる。前の解析より 250000event ではミューオン二本が入射したのは 317.5event であったからその割合は

$$\frac{4.98}{317.5} \simeq 1.6 \times 10^{-2} \quad (9)$$

となり約 1 % ほどである。

6.5 改善点

軌跡より、ミューオン束と電磁シャワーとを区別するのは難しそうである。

よって、電子とミューオンの質量の違いなどから、判断できるような装置を考えるのが良いと考えられる。例としては、磁場をかけてその曲がり具合の違いによって二つを区別するような装置が考えられる。

7 速度分布

7.1 説明

最初のチャンネルに信号が入ってから各チャンネルの信号が閾値を超えるまでの時間データ (ns 単位) から、宇宙線の速度を計算することを試みる。この時間データであるが、回路としては、

- まず各チャンネルの値が閾値を超えると反応したとする (T0)。
- 閾値を超えたチャンネルの数が threshold 以上になると、信号をいくらか遅らせて (今回の実験では約 3600ns) T STOP に入れる。
- T0 から T STOP までの時間を得る。

となっている。よって時間の素のデータは通常 3500 ~ 3600ns ほどの値をとり、この値自体には意味がない (遅らせて T STOP に入れるまでの時間がでたらめであるため) が、差は時間を表しているため今後は専ら差によって議論する。

0731.13 から、ひとまず各縦列の最上段と最下段がともに反応したデータ、つまり東西方向に傾きのない宇宙線によるものと少数ながら異なる要因により偶然同列の 2 端がほぼ同時に反応したものを抜き出し、2 端での時間差を計算する。

ただし左から数え 2 列目、3 列目は最上段の光ファイバーの破損の可能性より 2 段目と最下段、最右列は最下段の光ファイバーの破損の可能性より最上段と 7 段目で比較する。

7.2 予想

光ファイバーの長さなど各チャンネルごとに決まらずれでは全データの時間差が同じ値だけ変わるはずであり、結果の幅には影響が出ないはずである。対して宇宙線の南北の傾きによって今回の実験装置で観測される見かけの速度に影響が出るはずであり、光がシンチレーター内を進むにも時間がかかるためシンチレーター内でも MPPC 側で反応した場合早く、反対側で反応した場合遅く見積もられるはずであるが、MPPC からの遠近に関しては結果に幅が生まれるのみで中心値には影響が出ないはずである。なぜなら宇宙線が南北に対

称に降り注いでいると仮定すると、最上段が早く見積もられたものと最下段が早く見積もられたものが同数出現するはずであり、平均すると平面に射影した速度が正しく計算されることとなるからである。

異なる要因により偶然2つがほぼ同時に反応したものについては、ほぼ無視できるであろう。ミューオン束と電磁シャワーの項での計算によると、今回の検証で主に用いると思われる数 ns ~ 数十 ns の範囲で異なるミューオンが2つ以上入射する確率は十分低いと思われる。

装置には上下方向に 70cm の広がりがあり、光に近い速さの宇宙線なら約 2ns で通過する。実際には南北に傾いて入射してくるが、上下 70cm、南北 120cm の装置では最上段最下段を共に通過するとき約 60° が限界であるため、2 ~ 4ns ほどの位置にピークができると考えられる。

7.3 0731_13 の結果

0731_13 のデータから3桁以上のデータが取れたのは2列目、3列目、5列目のみであった。

横軸に時間（最上段が最下段に比べて何 ns 早かったか）、縦軸にカウント数をとって bin 幅 1ns でヒストグラムに表す。ヒストグラムに対して正規分布でフィッティングするが、その範囲は最も大きな山をすべて含むように、つまり最も大きな山から数十 ns 以上の空白をもって独立したデータは無視し山の両端を範囲としたものを採用した。この範囲を多少動かしても正規分布の mean が誤差の内から出ないことは確認した。（以降のフィッティングも同様に行うこととする。）

フィッティングの結果 mean は、

2列目で $-0.265 \pm 0.399ns(407entries)$ 、

3列目で $-1.73 \pm 0.195ns(1803entries)$ 、

5列目で $+1.41 \pm 0.598ns(249entries)$

であった。特にマイナス値は下から上へ突き上げたという結果であり、是正の必要がある。

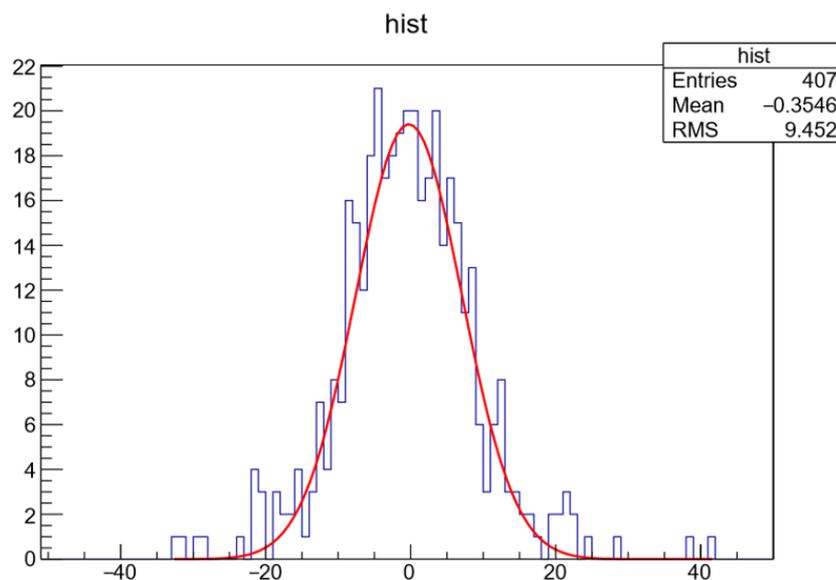


図 32 0731_13, 2 列目

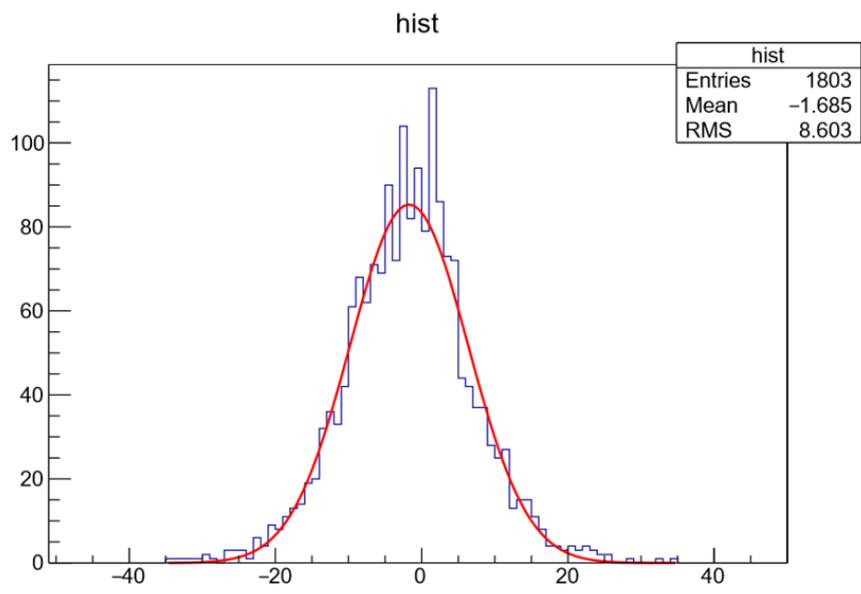


图 33 0731_13, 3 列目

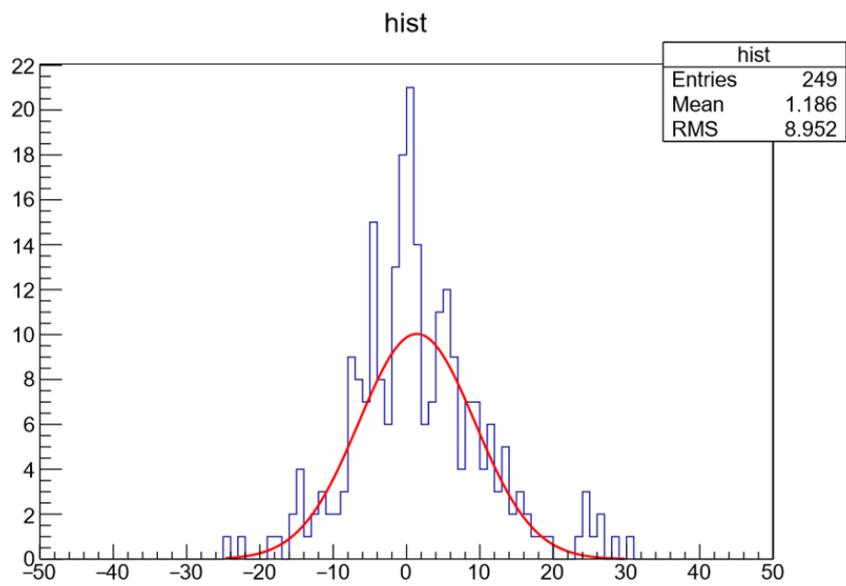


图 34 0731_13, 5 列目

7.4 追加実験

そのままのデータでは是正の必要があった。ここからは、各チャンネルがどの程度ずれているのかを測定したい。

暗幕内に LED が設置されている。この LED の位置は最右列シンチレーターの右、最上段シンチレーターの底から 36cm 下の所であった。仮に最右列に重なっていたとしても最上段シンチレーターの中心から 36.5cm 、最下段シンチレーターの中心から 33.5cm となり、差は 3cm で、光速では 0.1ns にあたる。実際には右にずれていて、かつ 8×8 の平面からも外れているため、差はさらに小さくなる。よって LED の光は最上段、最下段に同時に届くと考えられるであろう。

今回はこの LED をひからせ、各チャンネルが反応した時間差を求める。LED にかける電圧はパルス波で、*high* 0V , *low* -1.6V , 1kHz , *duty* 99.980% とした。DAC code 200, *threshold* 50 で計測したところでデータの取れる頻度が 1kHz に近くなったことから、この設定で 44200 回のデータをとった。(9月15日実験。データ名 0915_7)

2 列目、3 列目、5 列目の最上段、最下段を比較すると以下のグラフようになった。

mean は

2 列目で $+7.98 \pm 0.0489\text{ns}$ (44200entries)、

3 列目で $-4.75 \pm 0.0582\text{ns}$ (44195entries)、

5 列目で $+13.98 \pm 0.0626\text{ns}$ (44199entries)

となった。

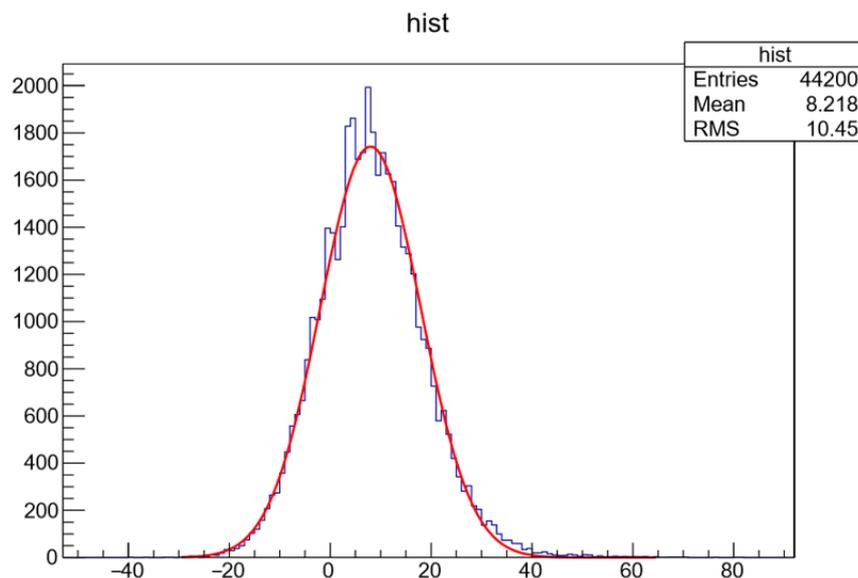


図 35 0915_7, 2 列目

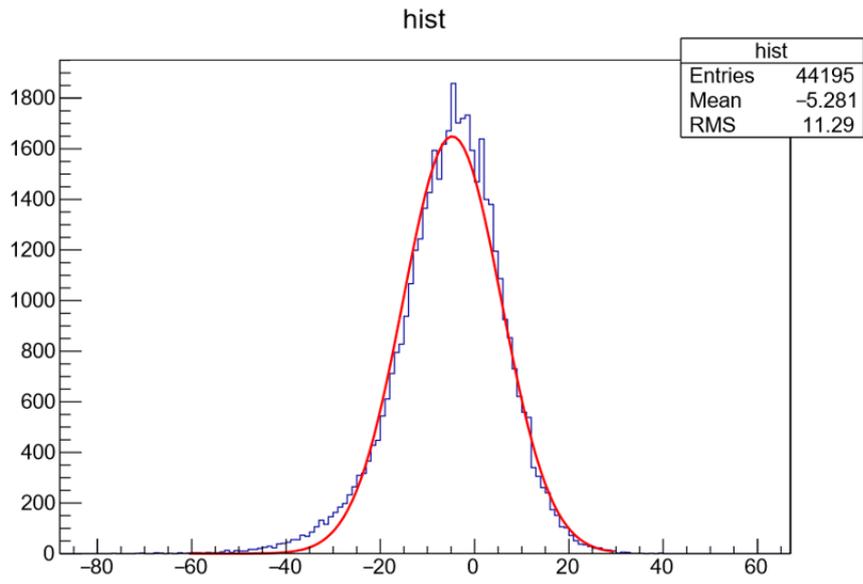


图 36 0915.7, 3 列目

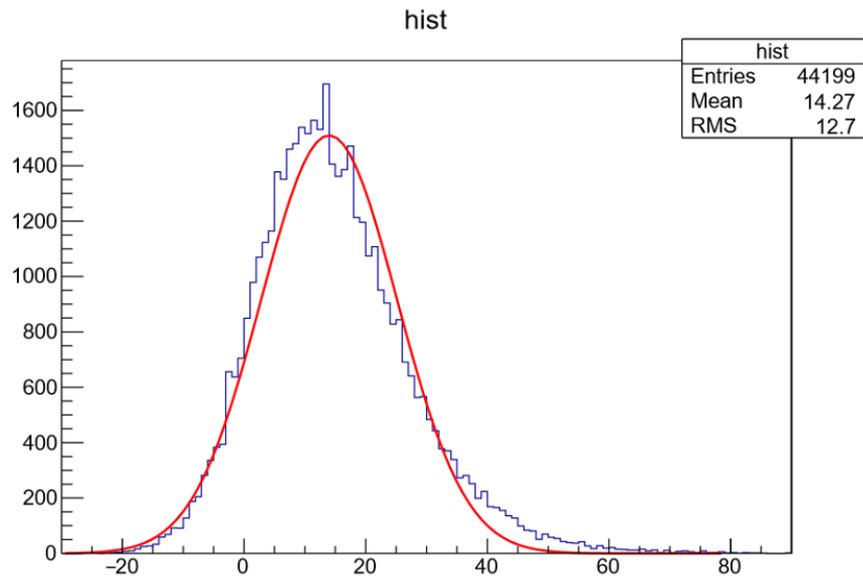


图 37 0915.7, 5 列目

この補正を含めると各列を宇宙線が通過した時間は、
 2列目で $-8.2 \pm 0.4ns$ 、
 3列目で $+3.0 \pm 0.3ns$ 、
 5列目で $-12.6 \pm 0.7ns$
 と求められる。

依然として説明がつかず、他の要因があると思われる。そこで最下段左の隣り合った二つの時間差（最下段最左列が最下段二列目よりどれだけ早かったか）をとると、以下のグラフのようになった。

mean は $+4.70 \pm 0.061ns$ であり、一定のずれが出ている。

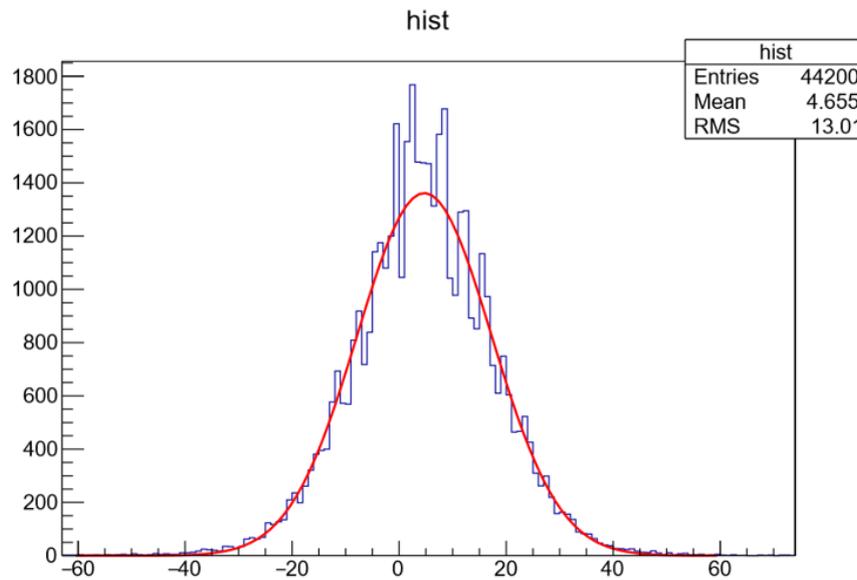


図 38 最下段左 2 つの差

7.5 考察

今回の実験では速度分布を求めることができなかった。原因を考えていきたい。

LED を光らせたデータから隣り合った二つの時間差をとったが一定の差が生じていることより、LED 発光の角度依存性、例えば上側への光と下側への光でタイミングがずれているなどというのが主原因であるとは考えにくくなった。（もちろん原因の一つとなっている可能性は否定しきれていないが、より大きな原因はあるだろう。）

もし光ファイバーの長さの差でここまでの時間差が出たとすると、1m 以上の差があったことになる。これは考えられないのではないだろうか。

もし LED 光が、光ファイバーの MPPC への接続部（シンチレーターからはみ出た部分）から侵入していたなら、もはやシンチレーターの位置によらないことになり追加実験は全く無意味だったこととなるが、それならば光ファイバーの長さの影響を受けなくなるため差は益々小さくなるはずである。にもかかわらず一定の差が現れたことは、より大きな原因があることを示していると思われるであろう。

考えられる要因は、宇宙線が入射してからシンチレーター光のエネルギーが最低限に達するまでのタイムラグである。宇宙線が高いエネルギーを落とせば瞬間的にトリガーがかかり、低いエネルギーなら少し時間をかけることとなる。この違いが結果に影響したのではないだろうか。

この補正のためには遅れる時間を、宇宙線の落としたエネルギー（シンチレーター光の強さ）の関数として測定する必要がある。そのうえ、受けた光と発する電気信号の強さの関係が MPPC のチャンネルごとに異なっている可能性があり、トリガーは MPPC の発する電気信号に対して定めるしかないという実験の性質上、これを全 64ch それぞれに対して調べる必要がある。

7.6 改善案

実は一つのチャンネルのみにトリガーをかけてそのチャンネル自体の「遅れ」を計測するなどの取り組みも行ったが、少なくとも 1 万データ規模では安定した結果が出せなかった。おおもとの本実験から 3, 4 ケタしか抜き出せなかったこの実験では安易に追加実験のデータ数だけを増やしても不相当だと思われるためこの記述にとどめるが、データ数を大きくすればこれらの取り組みからも信用に足る結果が出せた可能性もある。これもふまえて改善策を考えたい。

正確な速度分布を計算するためには全てのチャンネルについてエネルギーと時間の関係を調べる必要があり難しいと思われるが、以下のようにすれば比較的容易になる可能性がある。

- ・本実験のデータ数を増やす。
- ・今回は「一定以上の電気信号が出たもの」をデータとして使ったが、「一定以上一定以下」のように絞ってやれば各チャンネルで一定に近い値が出るのではないか。

8 謝辞

最後に今回の実験に際して指導をいただいた中家さん、TA の田中さん、國吉さんにこの場を借りてお礼を申し上げます。半年間お世話になり、本当にありがとうございました。

9 参考文献

参考文献

- [1] 『2016 年度後期 A1 レポート』
<https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/A1/reports/a1report16b.pdf>
- [2] 宇宙線を目で見よう「スパークチェンバーの製作」
2009 年 高エネルギー加速器研究機構サマーチャレンジ演習課題 2
https://www2.kek.jp/ksc/3rd_2009/2_kumita.pdf
- [3] 電磁シャワーイメージング検出器の開発
<http://www.hepl.hiroshima-u.ac.jp/thesis/bachelor/98hachiya.pdf>