

宇宙線ミュオンの天頂角分布と東西効果の観測

2025 年度後期 課題演習 A1

今岡爽 大森俊輝 キムドンフ 後藤珀斗 土田和将

2026 年 3 月 30 日

概要

本実験では、宇宙線ミュオンの天頂角分布および東西効果を観測することを目的とし、プラスチックシンチレータと MPPC を用いた多層検出器による測定を行った。検出器を通過する宇宙線イベントを取得し、各チャンネルの ADC 信号からヒット位置を二次元座標に変換した。得られたヒット点に対して直線フィッティングを行うことで粒子の飛跡を推定し、入射角を天頂角として統計的に解析した。測定期間中に約 200 万イベントを取得し、閾値条件を満たすイベントを選別して角度分布を求めた。その結果、天頂角分布は理論的に期待される $J(\theta) \propto (\cos \theta)^n$ の形に従い、フィッティングから $n \approx 1.15$ が得られた。また、東西方向のイベント数を比較してパラメータを計算することによって分布の非対称性を調べた。これらの結果は、宇宙線ミュオンの角度分布および地磁気による東西効果の存在を実験的に確認するものである。

目次

1	理論背景	2
1.1	宇宙線ミュオンとは	2
1.2	天頂角分布	2
1.3	東西効果	3
2	実験装置	4
2.1	プラスチックシンチレータ	4
2.2	MPPC	5
2.3	EASIROC モジュール	5
3	実験方法	6
3.1	準備	6
3.2	測定	7
4	データ解析	8
4.1	軌跡の推定	8
4.2	天頂角分布	8
5	結果と考察	9
5.1	天頂角分布の解析結果	9
5.2	天頂角分布の考察	10
5.3	東西効果の検証	11
6	結論	11

1 理論背景

1.1 宇宙線ミュオンとは

宇宙線とは、宇宙空間を飛び交う高エネルギーの粒子のことであり、絶えず地球にも降り注いでいる。この宇宙線は、地球に到来する際に地球大気と反応し、様々な粒子を生成する。地表では、この時に生成された粒子が宇宙線として検出されることになる。このとき、大気に入する前の宇宙由来の宇宙線を一次宇宙線と呼び、大気と反応して生成される中間子やそれが崩壊してできる粒子のことを二次宇宙線と呼ぶ。

一次宇宙線は高エネルギーであるため、大気中に存在する窒素分子や酸素分子の原子核と衝突することで二次宇宙線の中間子を多数生成する。生成された中間子がまた別の原子核と衝突することでさらに多数の中間子を生成し、それらが崩壊することで、ミュオン、ニュートリノ、電子、 γ 線などの二次宇宙線となる。このうち、ミュオンはたくさん生成され、さらに大気中で吸収されにくいいため、地表で観測できる宇宙線の大半をミュオンが占めることになる。今回の実験ではこのミュオンを観測した。

ミュオンは、二次宇宙線の中間子であるパイオンが崩壊して

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2)$$

なる反応を起こすことで生成される。このうち、 μ^- は大気中の原子核に捕獲されやすく、原子核中の陽子 p と

$$\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu \quad (3)$$

と反応して消滅することがある。一方、 μ^+ は原子核と反発するため捕獲されにくい。さらに、もともと一次宇宙線には陽子が多く π^+ が生成されやすいことなどもあり、 μ^+ のほうが μ^- よりも 20%程度多いことが知られている。

1.2 天頂角分布

地面に対する法線と粒子の軌跡がなす角を天頂角という。高度 X で生成されたミュオンが天頂角 θ で地表に到達するとして、その強度 $J(X, \theta)$ の θ 依存性（天頂角分布）を考える。高度 X 、天頂角 θ のミュオンが直線的に進む距離は、高度 $X/\cos\theta$ 、天頂角 $\theta = 0$ の場合と等しいので、

$$J(X, \theta) = J(X/\cos\theta, \theta = 0) \quad (4)$$

と考える。さらに、 $J(X, \theta)$ の X 依存性は指数関数的である、すなわち、平均自由行程を λ として

$$J(X, \theta = 0) = J(0, 0) \exp\left(-\frac{X}{\lambda}\right) \quad (5)$$

が成り立つとする。式 (4) に式 (5) を用いて

$$\begin{aligned} J(X, \theta) &= J(X/\cos\theta, \theta = 0) \\ &= J(X, \theta = 0) \frac{J(X/\cos\theta, \theta = 0)}{J(X, \theta = 0)} \\ &= J(X, \theta = 0) \exp\left[-\left(\frac{1}{\cos\theta} - 1\right) \frac{X}{\lambda}\right] \end{aligned} \quad (6)$$

となる。いま、 $\theta \ll 1$ として $1/\cos\theta - 1 \ll 1$ を考えると、

$$\begin{aligned} \exp\left[-\left(\frac{1}{\cos\theta} - 1\right)\frac{X}{\lambda}\right] &\simeq 1 - \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1\right)\frac{X}{\lambda} \\ &\simeq \left[1 + \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1\right)\right]^{-\frac{X}{\lambda}} \\ &= (\cos\theta)^{\frac{X}{\lambda}} \end{aligned} \quad (7)$$

と近似できることから、天頂角分布が

$$J(X, \theta) = J(X, \theta = 0) (\cos\theta)^{\frac{X}{\lambda}} \quad (8)$$

と求まる。 X/λ の値は粒子によって異なるが、ミューオンの場合は $X/\lambda = 2$ となることが知られている。

1.3 東西効果

宇宙線ミューオンは、到来する強度が東側に比べて西側の方が強いという特徴があり、これを東西効果とよぶ。東西効果の要因としては以下の2点が挙げられる。

1. 地表に到達できる一次宇宙線の最低エネルギーが東西で異なる
2. 二次宇宙線が地表に到達するまでの行路が東西で異なる

まず、エネルギーが大きくない一次宇宙線について考える。一次宇宙線は、地球に入射する際に地磁気によってローレンツ力

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (9)$$

を受ける。ここで、 \mathbf{p} は粒子の運動量、 q は粒子の電荷、 \mathbf{v} は粒子の速度、 \mathbf{B} は地磁気による磁束密度である。一次宇宙線には陽子が多いことから $q > 0$ として、地球の周囲で地磁気が一様だと仮定し、粒子の軌道が曲げられる様子を図1に示した。図1は地球を北からみた図である。

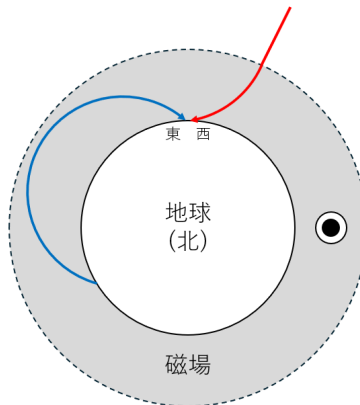


図1: 磁場によって曲げられた一次宇宙線の軌道

赤い軌道は西側から入射する様子を示し、青い軌道は東側から入射する様子を示している。どちらも円運動の半径は同じ、すなわち同じエネルギーにおける様子を考えている。図を見ると、西側の軌道(赤)は無遠慮から粒子が飛んできており物理的に許されるが、東側の軌道(青)は地球と交差することになり、宇宙線が飛んでくる様子としては適さない。つまり、地球に到来するために必要な最低エネルギーは、西側からの方が東側からよりも小さく済むことが分かる。

東側の場合は地球を大きく回り込む必要があるために、西側よりも大きなエネルギーが必要になる。

次に、高エネルギーの一次宇宙線について考える。エネルギーが大きい場合の東西の差は図 1 から説明されるが、高エネルギーの場合はあまり地磁気の影響を受けることなく入射してくると考えられ、東西差を説明できない。この場合は、到来した一次宇宙線が生成する二次宇宙線の行路を考える。図 2 に、正の電荷を持つ二次宇宙線が地表に到達するまでの行路を示す。一次宇宙線と大気との反応で生成された二次宇宙線は、地磁気の影響を受けて軌道を曲げ

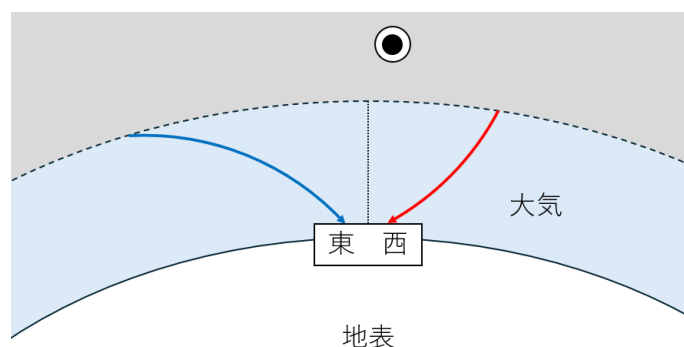


図 2: 二次宇宙線が地表に到達するまでの行路

ながら地表に到達する。このとき、図 2 を見ると分かるように、西側へ到達する粒子 (赤) の方が、東側へ到達する粒子 (青) よりも行路が小さくなる。よって、途中で崩壊するなどして地表へ届かない粒子の割合が西側の方が小さくなり、より多くの粒子が西側から到来することになる。一方、負の電荷を持つ二次宇宙線の場合、これとは逆に東側からの方が行路が短くなる。しかし、1.1 節で述べたように、 μ^+ のほうが μ^- よりも 20% 程度多いため、全体としては西側から到来する粒子の方が多くなると考えられる。

2 実験装置

今回の実験では、以下の装置を用いた。

- プラスチックシンチレータ
- MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)
- EASIROC モジュール

2.1 プラスチックシンチレーター

本実験で使用したシンチレータは、幅 5 cm、長さ 120 cm のプラスチックシンチレータである。これを 8 本並べたものを 1 層とし、その層を 10 cm 間隔で 8 層積み重ねた構造となっている。シンチレータ内で発生した光は、波長変換ファイバを通して MPPC へ伝送される。



図 3: プラスチックシンチレータ

2.2 MPPC

MPPC は半導体型の光検出器であり、シンチレータ内で発生した微弱な光を高感度に検出することができる。MPPC 内部には多数の APD (Avalanche Photodiode) ピクセルが配列されており、各ピクセルはブレイクダウン電圧以上でガイガーモード動作を行う。光子が入射すると電子・正孔対が生成され、アバランシェ増倍が生じることで電気信号が出力される。



図 4: MPPC

2.3 EASIROC モジュール

MPPC から出力されたアナログ信号は、EASIROC モジュールを用いて読み出した。EASIROC は信号の読み出しに加え、信号の増幅およびトリガー処理も行うことができる。本実験では計 64 チャンネルを使用し、各チャンネルは検出器の平面位置と一対一に対応してい

る。信号はその後、データ取得システムによってデジタル化され、各イベントごとにチャンネル別の ADC 値として記録される。

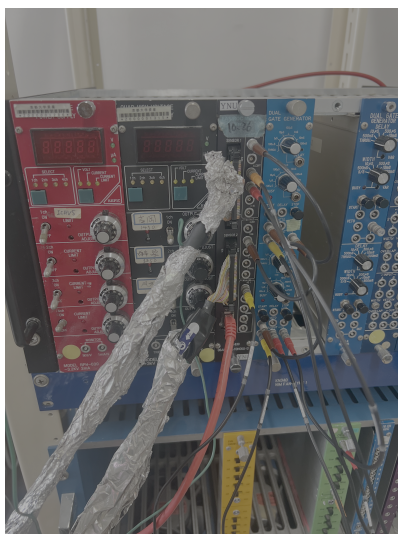


図 5: EASIROC モジュール

3 実験方法

3.1 準備

まず、MPPC が正常に動作していることを確認するため、EASIROC を用いてブレークダウン電圧を印加し、熱電子に起因するダークノイズの波形を観測する。

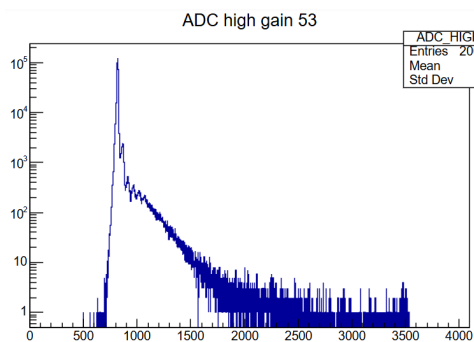


図 6: 正常に動作するチャンネルの例.

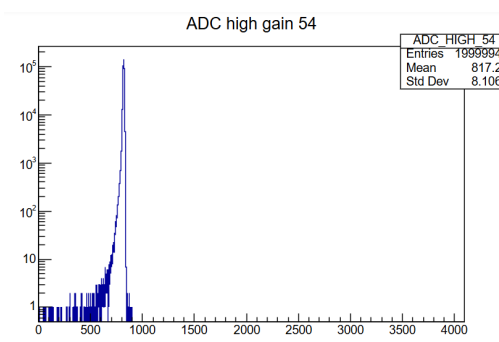


図 7: 正常に動作しないチャンネルの例.

次に、ダークノイズ以外の外来ノイズを減らすため、各種ノイズ対策を行う。MPPC と EASIROC モジュールを接続するケーブルは単線ケーブルであり電磁ノイズの影響を受けやすいため、アルミニウムホイルで被覆することで外部ノイズを遮蔽する。



図 8: ケーブル

さらに、MPPC およびプラスチックシンチレータには外光によるノイズを防ぐため遮光処理を施す。遮光シートおよび遮光テープを用いて光の侵入を防止し、MPPC に動作電圧を印加した状態で信号が飽和（オーバーフロー）しないことを確認する。



図 9: 遮光の様子

3.2 測定

本実験の目的は、宇宙線が検出器を通過する際に生じる信号を利用して、宇宙線の角度分布を推定することである。

データ取得過程では、各イベントについて 64 チャンネルから測定された ADC 値を記録した。宇宙線が検出器を通過すると、複数の隣接チャンネルにおいて同時に信号が発生する。

ノイズと宇宙線信号を区別するため、一定の閾値を設定し、ADC 値がこの閾値を超えたチャンネルのみを hit channel と定義した。

各イベントにおいて閾値を超えたチャンネル数を計数し、3 チャンネル以上が同時に hit したイベントのみを解析対象とした。

測定は 2026 年 2 月 5 日から 2026 年 2 月 12 日まで実施し、約 200 万イベントのデータを取得した。

各チャンネルは検出器平面上の実際の位置と対応しているため、チャンネル番号を二次元座標へ変換した。この対応関係を用いることで、各イベントにおける検出器の反応位置を視覚的に示す二次元 hit map を作成した。

さらに、hit したチャンネルの位置情報から粒子の通過経路を直線的に近似することにより、粒子の入射角を推定した。この解析を多数のイベントに対して繰り返すことで、宇宙線の角度分布を求めた。

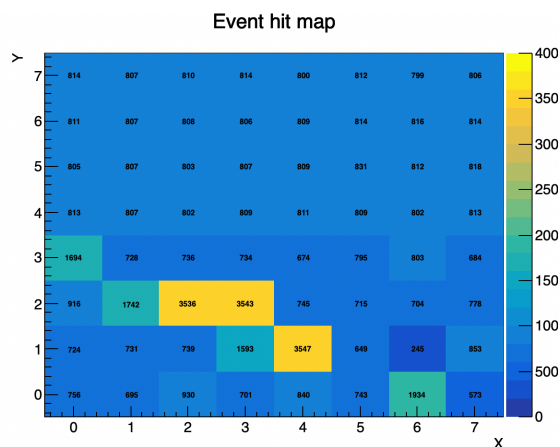


図 10: 検出器の平面位置と ADC の値

4 データ解析

4.1 軌跡の推定

得られたデータに対して、設定した閾値を超えたチャンネルを 2 次元座標にマッピングした。閾値としてはデータ取得のときと同じ 1000 とした。マッピングの際にはシンチレータの位置関係を反映し、水平方向に 5cm、鉛直方向に 10cm 離れた格子点を各チャンネルに対応させた。また、シンチレータの幅を考慮して水平方向に 5cm、鉛直方向に 1cm の誤差を設けた（以下、この補正をシンチレータ補正とよぶ。）。

宇宙線の飛跡を推定するために、マッピングした点に対して一次関数をフィッティングした。

さらに、得られた直線から傾きの角度と χ^2/ndf 値を計算した。 χ^2/ndf 値の大きいものは、ミュオンの飛跡による信号ではない可能性が高い。したがって、後の天頂角分布の解析では χ^2/ndf 値が 5 以上のデータを除く処理を施した（以下、この補正を χ^2 カットとよぶ。）。

4.2 天頂角分布

フィッティング直線の角度をミュオンの天頂角として、ヒストグラムにプロットすることで分布を調べた。

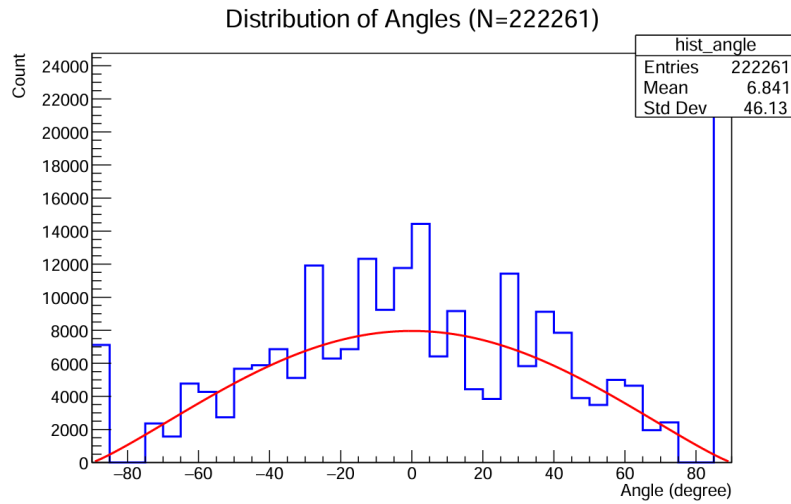


図 11: ミューオンの天頂角分布のヒストグラム (シンチレータ補正, χ^2 カットあり.) 赤線で $p_0(\cos \theta)^{p_2}$ の形でフィッティングした曲線を示した.

図 11 に, ミューオンの天頂角分布をヒストグラムの形でまとめたものを示す. 得られたヒストグラムに対して, 理論から考えられる分布の形 $p_0(\cos \theta)^{p_2}$ をフィッティングした (p_0, p_2 はフィッティングのパラメータであり, p_2 は $\frac{X}{\lambda}$ に対応する).

5 結果と考察

5.1 天頂角分布の解析結果

χ^2 カットとシンチレータ補正について, それぞれを施した/施さなかったすべてのパターンでの p_2 について表 1 に示す.

表 1: 条件ごとの測定結果

条件	p_2
補正なし	1.37
χ^2 カットのみ	3.148 ± 0.007
シンチレータ補正のみ	4.140 ± 0.007
両補正あり	1.152 ± 0.010

シンチレータ補正のみを行った, ミューオンの天頂角分布のヒストグラムを示す.

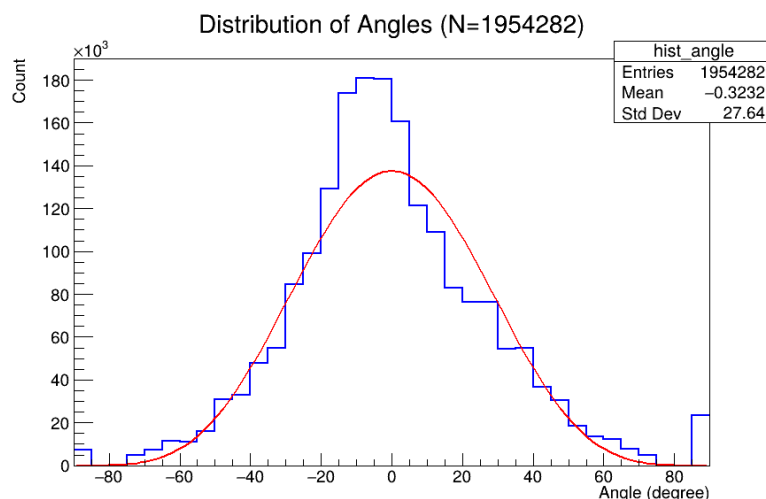


図 12: ミューオンの天頂角分布のヒストグラム (シンチレータ補正のみあり.) 赤線で $p_0(\cos \theta)^{p_2}$ の形でフィッティングした曲線を示した.

5.2 天頂角分布の考察

ミューオンの天頂角分布は, 理論的にも実験的にも, $p_2 \sim 2$ が知られている [3].

2 種類の補正それぞれについて, 片方のみを適用した場合の p_2 値はともに無補正の値から増加したが, 両補正を同時に適用すると値は無補正のものから減少した. 結果的に, p_2 値は, 片方の補正のみを行った場合はより大きな値となり, 無補正または両補正を行った場合はより小さな値となった. χ^2 カットおよびシンチレータ補正がともに正確な処置だった場合, これらを同時に施すことで測定結果はより精密になると予想したが, 既知の値からはむしろずれた. したがって, これらの処理は正確ではなく, 同時に施すことで別の原因によるずれが生じたと考えられる.

図 11, および図 12 はそれぞれシンチレータ補正を施したうえで, χ^2 カットをしたものと, そうでないものである. これらを見ると, 0° 付近に対して, $\pm 90^\circ$ 付近のデータは χ^2 カットにおいてほとんど減っておらず, したがって χ^2 カットによって除かれるデータの数は角度に依存していると思われる. これには測定装置の形状やシンチレータ補正の設定, 解析方法による影響等, 複合的な要因が考えられ, 特定には至らなかった.

また, 実験全般に係る誤差の要因としてはシンチレータ自体の精度や配置, 実験装置の環境が考えられる. まず, シンチレータにはいくらかデッドチャンネルがあった上に, デッドチャンネルでない判定されたチャンネルについても, 反応が著しく鈍いものが多数確認された. さらに, ミューオン飛跡のフィッティングに用いたデータでは, シンチレータの位置に対して誤差が考慮されていないため, フィッティングを適用する点が特定の位置に偏りやすい. 加えて, 実験装置が置かれた部屋はコンクリートによって囲まれており, ミューオンが通過する大気の厚さ X に補正が加わると考えられる. 実際, 先行研究 [3] では, 周囲に遮蔽物のない海上で測定が行われていた.

測定精度の向上のためには, まず測定装置に起因する誤差の除去を目的として, MPPC の配置や配線を改善すること, デッドチャンネルを回復させたうえで観測を行うことなどが必要である. さらに, 測定結果の処理方法を洗練させることも重要である. 本実験では, 高角度のデータほど χ^2 カットによって残りやすいことを確認した. この原因を特定し, 除去するか, 特定ないし除去が難しい場合は角度帯を限定して解析することなどが有効であると考えられる. また, 測定装置の形状に起因した角度分布のずれを正確にシミュレートし, それと測定結果を比較するといっ

た方法も有効である。

5.3 東西効果の検証

東西効果が見られるかどうかを分布から考察するために、 w, e をそれぞれ天頂角が負、もしくは正のイベントの数として

$$A = \frac{w - e}{w + e} \quad (10)$$

というパラメータを定める。実験装置の配置を鑑みると、 w, e はそれぞれ西、もしくは東から入射したミュオンのイベント数に対応する。パラメータ A は東西方向のイベント数の偏りを表す。

パラメータ A の誤差を、 w, e が平均 w, e のポアソン分布にしたがうと考えて計算する。このとき w, e の標準偏差は $\Delta w = \sqrt{w}$, $\Delta e = \sqrt{e}$ で与えられるので、

$$\Delta A = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial w} \Delta w\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial e} \Delta e\right)^2} = \frac{2\sqrt{we}}{(w + e)^{3/2}} \quad (11)$$

と得られる。

本実験では $w = 104743$, $e = 115529$ という結果が得られており、これをもとに計算を行うと

$$A \sim -0.0490 \pm 0.00212 \quad (12)$$

という値が得られた。以上からおおよそ有効数字 3 桁ほどの精度で東西効果が現れていることを確認できたといえるが、予測される方向とは逆の偏りが発生している結果となった。この原因としてはヒストグラム両端に存在するイベント数が影響していると思われる。 $-90^\circ \leq \theta \leq -85^\circ$ の区間には約 7000, $85^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ の区間には約 22000 ほどのデータが含まれており、これらは $p_0(\cos \theta)^{p_2}$ の分布から外れた値を持っている。このようなデータが生じた理由は解析に用いたプログラムの仕様などが考えられる。ヒストグラム両端のビンのデータを除外すると、パラメータは $A \sim 0.022$ ほどの値になった。こちらは西側への偏りを示す理論に整合する結果となっている。

6 結論

今回の実験では、プラスチックシンチレータと MPPC を用いた多層検出器により宇宙線ミュオンの観測を行い、その天頂角分布および東西効果を調べた。約 200 万イベントの測定データに対して閾値条件および直線フィッティングによる軌跡再構成を行い、ミュオンの入射角分布を統計的に解析した。その結果、天頂角分布は $J(\theta) \propto (\cos \theta)^n$ の形のフィッティングにより $n \simeq 1.15$ が得られた。これは理論的に知られている値 $n = 2$ と同程度のオーダーであり、宇宙線ミュオンの角度分布の特徴を実験的に確認することができた。

また、東西方向のイベント数を比較することで東西効果の評価を行い、非対称性パラメータ $A = -0.0490 \pm 0.0021$ を得た。この結果は、西側から到来するミュオンの数が東側よりも多いという宇宙線の東西効果に対して整合しない結果となっているが、データの範囲を狭めることによって西側から飛来するイベントの数が多いという適合的な結果を得た。

以上より、本実験で用いた検出器および解析手法によって、宇宙線ミュオンの天頂角分布と地磁気に起因する東西効果の双方を実験的に観測できたことが確認された。今後は検出器配置の精度向上や dead channel の改善などを行い、解析を精密にすることで、角度分布の指数の精度をさらに向上させることが期待される。

謝辞

今回の実験に際し、わかりやすく丁寧にご説明いただくとともに、多くの有益なご助言を賜りました木河さん、田中さんに深く感謝申し上げます。また、理論ゼミをご担当いただいた橋本さん、杉下さん、実験ゼミをご担当いただいた陳さんにも心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 登翔一郎, 柴田舜, 島本翔平, ソクジュンモ, 竹下颯馬, 馬場琉乃介. 宇宙線ミュオンの天頂角分布と東西効果の測定, April 2 2025.
- [2] 柳竜生, 太田洋輝, 富島佑允, 西尾洋祐, 西辻泰典, 山本新. ミューオンの東西効果, October 4 2004.
- [3] Hariom Sogarwal, Prashant Shukla. Measurement of atmospheric muon angular distribution using a portable setup of liquid scintillator bars, <https://arxiv.org/abs/2202.01445>, 2022