

宇宙線ミュオンの天頂角分布と東西効果の測定

2024 年度後期 課題演習 A1

賀登翔一郎・柴田舜・島本翔平・ソクジュンモ・竹下颯馬・馬場琉乃介

2025 年 4 月 2 日

概要

本研究では、宇宙線ミュオンの天頂角分布と東西効果の観測を目的として、 8×8 の多層プラスチックシンチレータアレイを用いた測定を行った。検出器は、主にプラスチックシンチレータ、波長変換ファイバー、Multi Pixel Photon Counter (MPPC)、および EASIROC モジュールから構成される。予備実験では、MPPC の動作確認や光漏れ・ノイズの除去を行い、さらに dead ch の特定を通して検出器の性能を評価した。

本実験により得られたデータに対し、ADC 値に基づく閾値設定と一次関数による軌跡フィッティングを通じて天頂角の推定を行った。その結果得られた天頂角分布は、理論的に期待される $\cos^2 \theta$ 分布とは大きく異なり、 $\cos^{1.23} \theta$ に近い急峻な分布を示した。この乖離は、装置の幾何学的制約や dead ch、フィッティング条件 ($\chi^2/\text{ndf} < 5$) といった要因が複雑に影響した結果と考えられる。実験と同条件でのシミュレーションにより、一定の補正は可能であったものの、実測で得られた分布の極端な傾きは依然として定量的に説明できず、未解決の問題として残った。

一方で、東西効果については、ミュオンの入射方向に明確な非対称性が確認された。建物構造による遮蔽を考慮しても、西側からのミュオンが優勢であるという結果は、シミュレーションとの差分を補正した後でも有意に現れ、東西効果を確かに捉えたと結論づけられる。

目次

1	理論	2
1.1	宇宙線について	2
1.2	天頂角分布	2
1.3	東西効果	4
2	実験装置	5
2.1	プラスチックシンチレータ	5
2.2	波長変換ファイバー	7
2.3	Multi Pixel Photon Counter(MPPC)	7
2.4	EASIROC モジュール	7
3	測定	8
3.1	予備実験	8
3.2	本実験	9
4	解析・結果	10
4.1	閾値の決定	10
4.2	軌跡の推定	11
5	考察	11

5.1	天頂角分布	11
5.1.1	シミュレーション	12
5.1.2	X/λ について	13
5.2	東西効果	13
6	まとめ	14
	謝辞	14

1 理論

1.1 宇宙線について

まず、宇宙線についての説明を行う。宇宙線には大きく分けて 2 種類存在し、一つは宇宙から飛来する宇宙線（一次宇宙線）である。この宇宙線は主に陽子によって構成されており、正電荷に帯電している。その後、一次宇宙線は大気と反応し、様々な粒子に変化して地表に到達することになる。この宇宙線を二次宇宙線と呼ぶ。

今回測定したミュオンは二次宇宙線であるパイオンが崩壊し次の反応

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

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

を起こすことで生成されたものである。

μ_- は大気中の原子核に捕縛されやすく、原子核に捕縛された μ_- は原子核の陽子 p と

$$\mu_- + p \rightarrow n + \nu^- \quad (3)$$

と反応し、崩壊する。一方で μ_+ は大気中の原子核との反発であまり原子核に捕縛されないのものでその分崩壊しづらくなっている。そのため、二次宇宙線のミュオンの存在比は μ_+ が 20% 多いことが知られている。

1.2 天頂角分布

次に、ミュオンの天頂角分布の理論的な計算を行う。

平均自由行程を λ とし、ミュオンの鉛直方向の移動距離を X と表す。また、ミュオンは直線的な軌道を描くとし、その入射角度（鉛直した向きから反時計回りに測った角度）を θ とする。

このときミュオンの角度分布 $J(X, \theta)$ は

$$J(X, \theta) = J(0, \theta) \exp\left(-\frac{X}{\lambda}\right) \quad (4)$$

となる。また、角度 θ で入射したミュオンが鉛直方向に X だけ移動した場合、その移動距離は $X/\cos\theta$ となり、対称性から、入射角 0 度で鉛直方向に $X/\cos\theta$ だけ移動した時と同じ強度になるはずである。

従って、

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

が成り立つ。そのため (4) より

$$J(X, \theta) = J(0, 0) \exp\left(-\frac{X}{\lambda \cos\theta}\right) \quad (6)$$

となる。また同様に

$$J(X, 0) = J(0, 0) \exp\left(-\frac{X}{\lambda}\right) \quad (7)$$

なので、

$$J(X, \theta) = J(X, 0) \exp\left(-\frac{X}{\lambda} \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1\right)\right) \quad (8)$$

になる。今、 θ がある程度0に近く、 $\frac{1}{\cos \theta} - 1 \approx 0$ であることを仮定すると、 $e^x \approx 1 + x$ ($x \approx 0$)より

$$J(X, \theta) = J(X, 0) \left(\frac{1}{\cos \theta}\right)^{-\frac{X}{\lambda}} \quad (9)$$

$$J(X, \theta) = J(X, 0) (\cos \theta)^{\frac{X}{\lambda}} \quad (10)$$

となる。つまり、入射角がある程度低い時（鉛直方向に近い時）、ミューオンの角度分布は $\cos \theta^{X/\lambda}$ に比例することを意味する。

さて、他の実験からパラメータ $X/\lambda = 2$ であることが検証されている [Gri01][SS22]。

今回の実験でも同様の結果になることが予想されるが、測定装置は直方体形を成しており球対称でなく、しかも複数のシンチレータを通過しなければ粒子としてカウントされない。そのため、様々な方向から飛来するミューオンを全て検出することはできないうえ、装置が検出できるミューオンの範囲は角度ごとに異なることになる。（立体角が異なる）

簡単に、縦 $a[m]$ 横 $b[m]$ の直方形の検出器を層間距離 $h[m]$ で縦に2枚並べたとき、天頂角 θ 、水平角 ϕ で入射する粒子を観測することを考え、1粒子としてカウントするためには2枚の検出器を通過しなければならないと仮定する。

このとき、検出可能な検出器の領域面積は、上段の検出器を (θ, ϕ) から平行線を当てたときの下段への射影と下段検出器との共通部分の面積になる。（図1～図3）

図1における x, y は簡単な計算から

$$x = -h \tan \theta \cos \phi \quad (11)$$

$$y = -h \tan \theta \sin \phi \quad (12)$$

とわかる。図3より共通部分の面積は

$$(a - |h \tan \theta \sin \phi|) \times (b - |h \tan \theta \cos \phi|) \quad (13)$$

と求められる。これを見込む立体角 $\theta \sim \theta + d\theta, \phi \sim \phi + d\phi$ は

$$(a - |h \tan \theta \sin \phi|)(b - |h \tan \theta \cos \phi|) \sin \theta d\theta d\phi \quad (14)$$

となる。以上より θ に対して検出器がミューオンを検出できる総面積（立体角）は

$$\int_0^{2\pi} (a - |h \tan \theta \sin \phi|)(b - |h \tan \theta \cos \phi|) \sin \theta d\theta d\phi = [2\pi ab - 4h(a+b) \tan \theta + 2h^2 \tan^2 \theta] \sin \theta d\theta \quad (15)$$

となって予想通り θ に依存する。そのため、実測した結果が理論通りの分布に沿った結果になるかは判断できない。

測定された結果が実際に装置の形状によるものかを考えるために、比較としてミューオンの分布が実際に $\cos^2 \theta$ に従っている場合のシミュレーションも行なった。

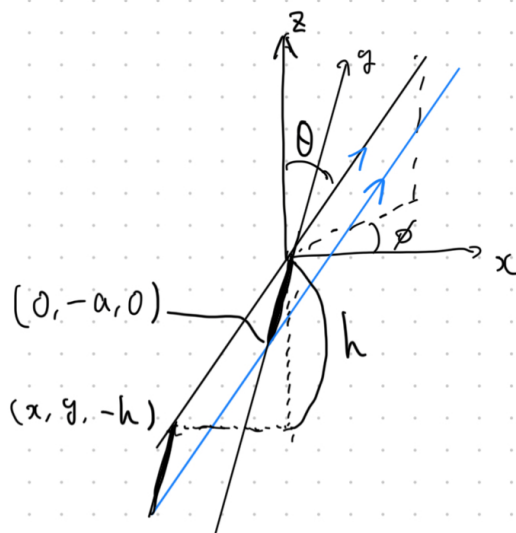


図1 射影された検出器の一边

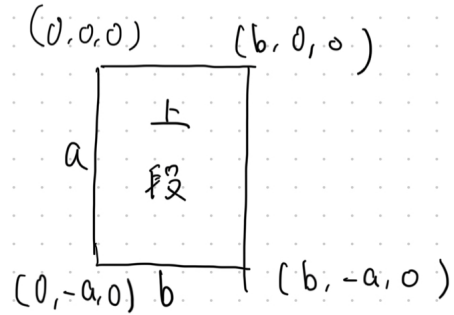


図2 上段の検出器の座標設定

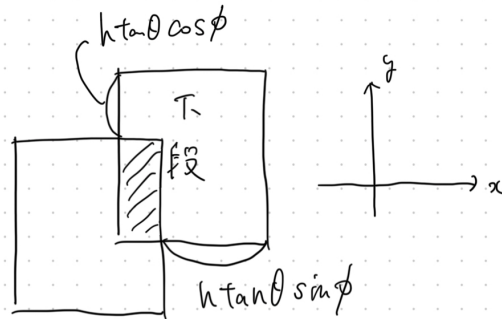


図3 射影領域と下段検出器との共通部分

1.3 東西効果

東西効果とは東側に比べて西側から飛来するミュオン強度の方が強い現象のことである。東西効果の要因としては大きく二つ考えられる。

- 一次宇宙線が地磁気によって大きく曲げられ、地表までの到達に必要なエネルギーの下限が東西で異なる

- 地磁気の影響でミュオンの大気行路が東西で異なる

• 要因 1: 図 4 は地球を北側から見た図である。あまりエネルギーの大きくない一次宇宙線の場合、地磁気によるローレンツ力で軌道が大きく曲げられる。

この時の宇宙線が従う運動方程式は

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = q(E - v \times B) \quad (16)$$

となる。この方程式の解 $x(t)$ が宇宙線のたどる軌道になるが、装置に到達する軌道のみを考えたい場合は装置に到達した時間を t_{fin} として初期条件 $x(t_{\text{fin}}) = a$ (a は装置の座標) で上の方程式を $t \rightarrow -t$ に変えた方程式の解を考えるとわかりやすい。特に宇宙線解に限れば、 $|x(t)| \rightarrow \infty$ ($t \rightarrow \infty$) の解を考える必要がある。

そうして得られる解軌道は定性的には大きな円軌道を描くことがわかるが、エネルギーがある程度小さいと円軌道が地球と二度交差することになり宇宙線解に適さない。図 4 の点線は地

要因1

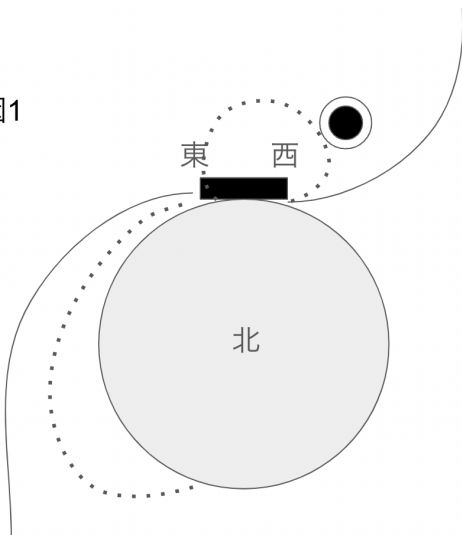


図4 要因1のイメージ図

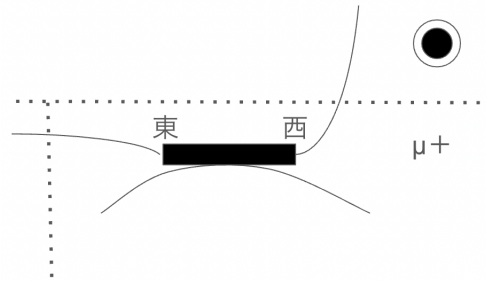


図5 要因2のイメージ

球と二度交差を起こす軌道を示している。

粒子のエネルギーが大きくなれば円軌道の半径が大きくなっていくので、ある段階で二度交差が解消され宇宙線解が得られるようになるが、図4を見てもわかるように解消に必要なエネルギーが東西で異なることがわかる。東側では地球の裏側を回り込む必要がある分大きな半径の円を描かなくてはならない。そのため西から到達するミュオンの方が多いことがわかる。

・要因2: 図5では一次宇宙線が十分大きく、ほぼ直線的に入射する場合を描いている。点線より内側が大気圏になっており、ミュオン (+) がわずかに曲がりながら装置に入射することになる。このとき西から入射したミュオンは大気中を鉛直に進み、東から入射したミュオンは大気中を水平的に進むので、西の方が大気行路が短いことがわかる。

一方でミュオン (-) の場合はミュオン (+) の場合を東西でちょうどひっくり返した形になるので、同様の議論から東の方が大気行路が短いことがわかる。

しかし、1.1で述べたようにミュオン (+) の方が多く存在しているので、総じて西から入射するミュオンの方が多くなることが説明できる。

2 実験装置

今回実験で用いた装置は以下の通りである。

- プラスチックシンチレータ
- 波長変換ファイバー
- Multi Pixel Photon Counter(MPPC)
- EASIROC モジュール

2.1 プラスチックシンチレータ

今回用いたシンチレータは、幅 5cm, 長さ 120cm の細長いプラスチックシンチレータを 8 個並べたものを一層とし、これを 10cm 間隔で 8 層取り付けたものとなっている。



図6 プラスチックシンチレータと波長変換ファイバー



図7 波長変換ファイバーとMPPC

2.2 波長変換ファイバー

シンチレータで発生した光は直接光検出器に送られるのではなく、波長変換ファイバーを通して伝えられる。これは大型のシンチレータ内での光の減衰を防ぐためである。

2.3 Multi Pixel Photon Counter(MPPC)

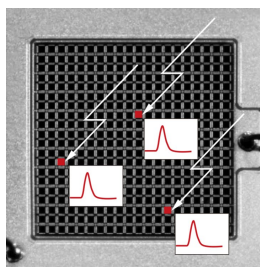


図 8 MPPC を上から見た図

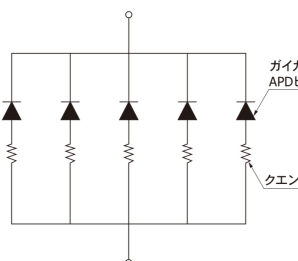


図 9 MPPC の回路図

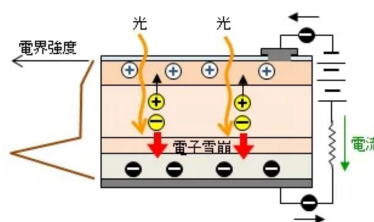


図 10 APD

波長変換ファイバーを伝わった光は半導体光検出器である MPPC に送られ、電気信号に変換される。MPPC を上から見た物が図 5 であるが、各ピクセルには APD(Avalanche PhotoDiode) というダイオードが並列に繋がっている。

各 APD 内では、光子によって弾き出された光電子が半導体原子に衝突して電子、ホールを次々に作り出すという過程を繰り返すことで信号が増幅される。その際、APD は降伏電圧以上の逆電圧がかかっており、外部からの刺激が少しでもあればある一定の電流が流れるようになっている (ガイガーモード)。したがって微弱な光信号に対しても高い感度を有している。また APD には抵抗が直列に繋がっており電流が流れると抵抗にも電圧がかかることで APD にかかる電圧が下がり電流が流れるのを一時的にすることができる。

似たような機能を持つ機器として PMT(光電子増倍管) が挙げられるが、波長変換ファイバーを通した後の光への感度が MPPC の方が高いこと、MPPC の方が安価であることから今回は MPPC を用いた。MPPC は PMT に比べてダークノイズが大きいという短所があるが、それは MPPC の動作確認に利用することができるのでそれほど気にならなかった。

2.4 EASIROC モジュール



図 11 EASIROC モジュール

MPPC によって発生した信号の読み出しには EASIROC モジュールを用いた。この機器の特徴は 1 モジュールに、1 チップで 32ch 同時に読み出せるチップを 2 個搭載されており、計 64ch

同時に信号を読み取れることである。また、この機器によって MPPC への電圧供給、MPPC からの信号の増幅、信号のデジタル化を 64ch 同時に行うことができる。

3 測定

3.1 予備実験

MPPC がうまく作動しているかを確認するためにダークノイズの測定を行った。ダークノイズは半導体の中の熱電子によって光子がなくても検出される信号のことである。その測定を行うために MPPC を遮光テープで巻いて光が入らないようにした。その状態で印加電圧を徐々に上げていきながら、breakdown 電圧を超えるとき MPPC が Geiger モードになり、ダークノイズの波形が現れることをオシロスコープで確認した。その結果、58 V が breakdown 電圧であることがわかり、MPPC は問題なく作動していることがわかった。

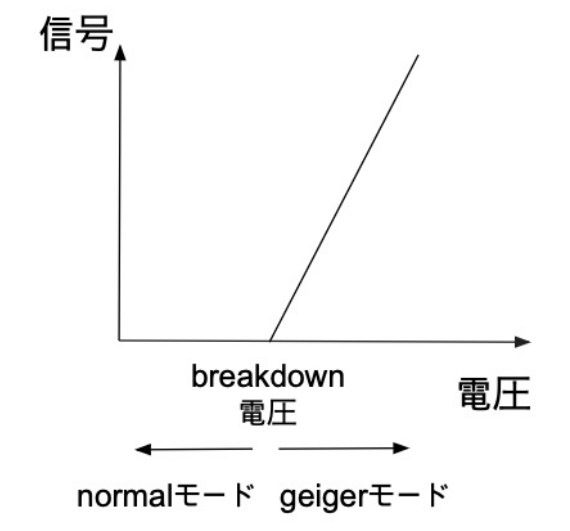


図 12 breakdown 電圧

次に、本実験の前にダークノイズ以外のノイズの排除に取り組んだ。オシロスコープから観測して、明らかなノイズと思われるものを考察した結果、光、ケーブル、物理的なノイズが原因と思われ、その解決に取り組んだ。

まず、光によるノイズは部屋の電気を消した時の波形と付けた時の波形を比較しながら判断し、装置のどの部分の遮光が不十分かを調べた。その結果、MPPC と特定され、遮光テープと布で確実に遮光したらノイズが減少した。

次に、ケーブルによるノイズを考える。今回の実験で用いたケーブルは単線ケーブルであるため、多くのノイズが含まれる。表 1 は単線ケーブルと同軸ケーブルを比較したものである。

	単線ケーブル	同軸ケーブル
構造	信号線が 1 本のみ	信号線 + 絶縁体 + 金属シールド + 外皮
シールド (遮蔽)	なし	あり (銅メッシュやアルミホイルなど)
ノイズ耐性	非常に低い	非常に高い

表 1 単線ケーブルと同軸ケーブルの比較



図 13 光によるノイズ

その解決のためにケーブルをアルミホイルで巻き、モジュール側にグラウンドをつなぐことでノイズを減らした。

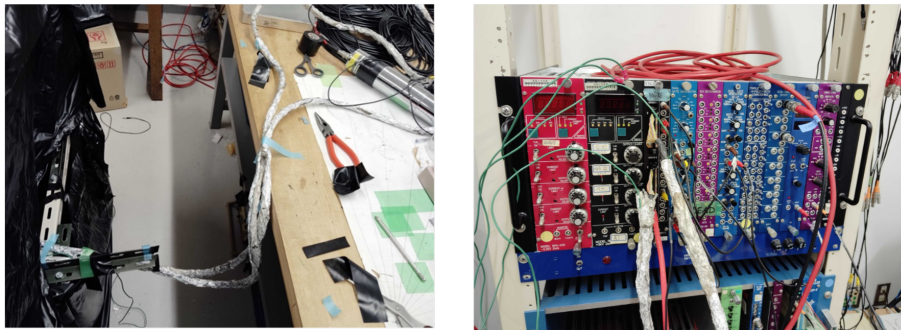


図 14 ケーブルによるノイズ

最後に、単純に MPPC と基盤の連結が弱いことから生じるノイズがあったため、テープで固定し外れないようにした。

3.2 本実験

実験のセットアップは図 15 のようにした。

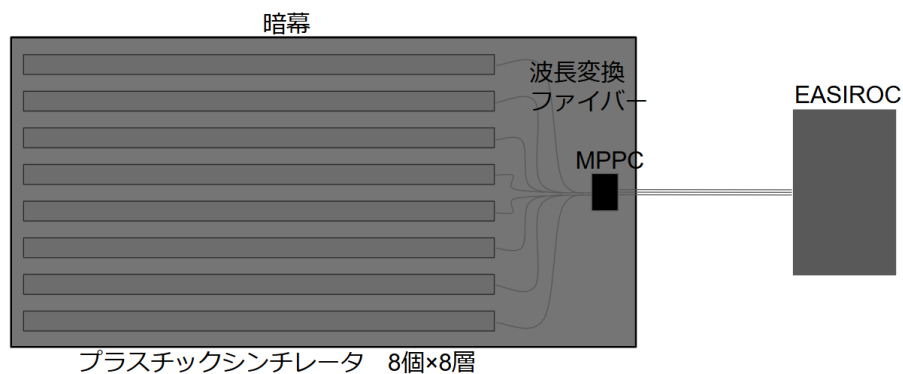


図 15 実験セットアップの模式図

予備実験でも行ったが実際に装置を動かすと光漏れがまだありそうだったので、部屋の電気を点けたり消したりしながら光漏れの場所を探索し、装置の各所を遮光テープでとめた。特に、ケーブルの暗幕の間に隙間が多かったので重点的に遮光した。

次に各チャンネルの結果を見て死んでいるチャンネルを探した。具体的には最初の大きな山 (Pedestal) だけしか見えておらず、その次の山 (1p.e.) すらも見えていないものを死んでいるチャンネルとした。図 16 は生きているチャンネルと死んでいるチャンネルの信号の例である。

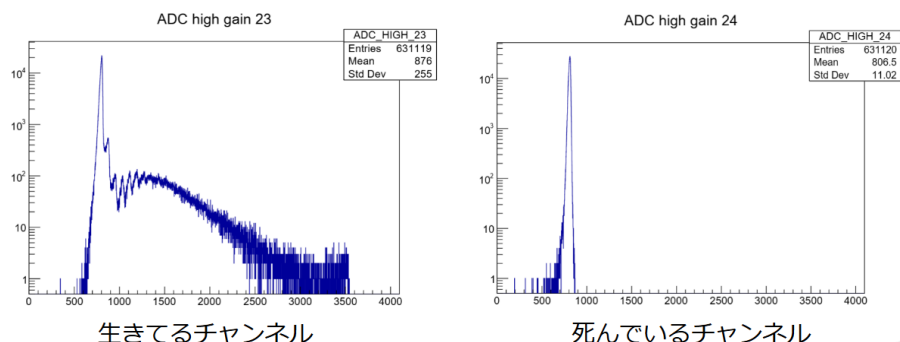


図 16 (左) 生きているチャンネルの信号 (右) 死んでいるチャンネルの信号

その結果、A-1,2, B-1,3, D-1,5,6,7,8, E-1,8 の 11 個で信号を読み出せなかった。図 17 は死んでいるチャンネルの位置である。A が一番下の層、H が一番上の層である。この状態でデータをとると図 18 のようになり、黄色のところは宇宙線の飛跡のように見えている。これはイベントごとのイベントディスプレイであり、色が ADC の値を表していて、8×8 の位置関係は図 17 と同じになっている。

上面

H8	H7	H6	H5	H4	H3	H2	H1
G8	G7	G6	G5	G4	G3	G2	G1
F8	F7	F6	F5	F4	F3	F2	F1
	E7	E6	E5	E4	E3	E2	
				D4	D3	D2	
C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
B8	B7	B6	B5	B4		B2	
A8	A7	A6	A5	A4	A3		

■ : 死んでいるチャンネル

図 17 死んでいるチャンネルの位置

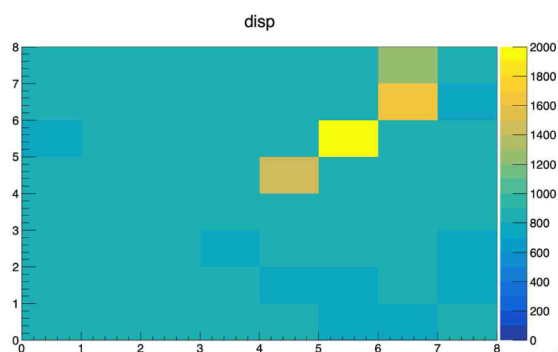


図 18 イベントディスプレイ

宇宙線を観測できていることが確認できたので、2月17日から18日、2月19日から20日にそれぞれ20時間測定を行なった。実験中、部屋は暖房で20°Cになるようにした。解析には宇宙線がより良く見えていそうな2月17日から18日に取得したデータを用いた。

4 解析・結果

4.1 閾値の決定

まずシンチレータに粒子が当たったかどうかを判定するための閾値を決める。図 19 に本実験で得られたデータの 0ch の様子を示す。最も高いピークが Pedestal であり、その後に 1p.e., 2p.e. のピークが続いている。今回の解析では 1p.e. の次の谷 920 Count を閾値として設定し、これを越えたシンチレータでは宇宙線を検出したものとした。

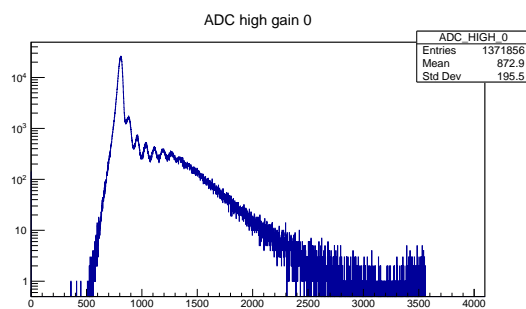


図 19 本実験での 0ch ADC のヒストグラム

4.2 軌跡の推定

軌跡の推定は次の手順によって行った。

1. 閾値を越えた各シンチレータについて対応する点を 2 次元平面上に配置する。具体的には装置を MPPC 側から見て下から i 番目、左から j 番目にあるシンチレータには点 $(5i, 10j)$ を対応させる。
2. 一次関数によるフィッティングを行う。ただし宇宙線は天頂付近から多く飛来することを考慮して、関数形は $x = ay + b$ とした。また、各点に誤差としてシンチレータの寸法を利用して $(\pm 2.5, \pm 0.5)$ を設定した。
3. フィッティングの結果、 χ^2/ndf が 5 未満となったものを推定に成功したとして採用する。

この結果得られた天頂角の分布が図 20 である。ともに記した曲線は $p_0 \cos^{p_2}(\phi)$ によって全体をフィッティングした結果である。パラメータの値は $p_0 \sim 3.2 \times 10^4$, $p_2 \sim 123$ となった。

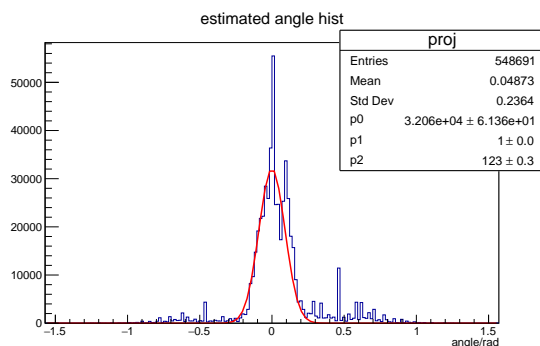


図 20 推定に成功した天頂角の分布。横軸は天頂を 0 とし、西向きを正とする角度/rad。

5 考察

5.1 天頂角分布

実験により得られた天頂角分布は $\cos^{123} \theta$ に比例するもので、理論による予測の $\cos^2 \theta$ から離れ、天頂角 0° 付近に集中した分布となった。この差を生んだ原因として、装置の幾何学的形状や dead ch、解析方法による影響が考えられる。

実験装置は 64ch の有限個のチャンネルしか持たないため、算出される角度も有限個であり、算出角度の幅も数度と、結果に影響を与えうる大きさをもつ。また、 $\chi^2/\text{ndf} < 5$ であるイベントを用いると天頂角分布のフィットは $\cos^{123} \theta$ になり、 χ^2/ndf に制限をかけないと $\cos^{40} \theta$ となる

ことから、天頂角 0° 付近で降ってきた宇宙線は χ^2/ndf が小さく算出され、結果に大きな影響を与えることが考えられる。

以上に代表される原因により、実験で得られた分布が天頂角 0° 付近に極端に集中した可能性を検証するため、宇宙線の天頂角分布が $\cos^2 \theta$ に比例するシミュレーションを行った。

5.1.1 シミュレーション

本シミュレーションでは、宇宙線ミュオンを検出を想定し、シンチレーターアレイを用いた測定を模擬した。

- 8×8 のプラスチックシンチレーターアレイを想定。
- 各シンチレーターの寸法：
 - 幅：5 cm
 - 厚さ：1 cm
 - 層間距離：10 cm
- 検出器は 8 層構造で配置。
- 入射角度の分布は $\cos^2 \theta$ に従う。
- 各ミュオンの飛跡はランダムに設定され、検出器との交差を判定する
- シンチレーターとミュオンの交差を判定し、信号が発生するかを決定。
- 信号が発生した場合、対応する ADC count を記録：
 - ヒット時：ADC count 1300
 - 非ヒット時：ADC count 0
- 一部のシンチレーターにはデッドチャンネルがあり、信号を記録しない領域が存在する
- 100 万回のミュオン入射を模擬し、検出データを取得。

シミュレーションにより模擬データを生成し、本実験で行ったものと同様の解析を行った結果、図 21 が得られた。フィッティングパラメータ p_2 は $p_2 \sim 7$ となった。

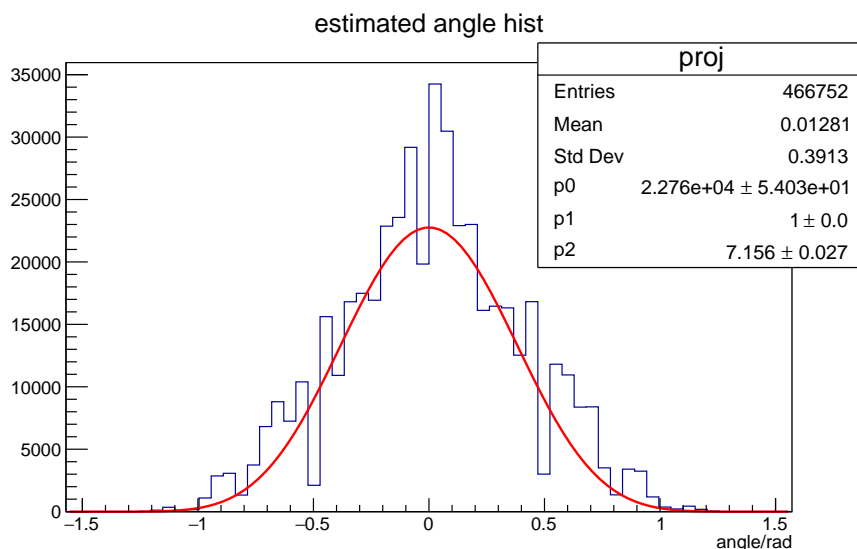


図 21 シミュレーションにより得られた天頂角分布

フィッティングパラメータ p_2 は、理論におけるミュオンの移動距離 X と平均自由行程 λ の比 X/λ に対応する。しかし、シミュレーションにおいて、降らせる天頂角分布を $X/\lambda = 2$ と設定しているのにも関わらず、解析により $p_2 \sim 7$ が得られたことから、本実験において指数が

$p_2 \sim 123$ と大きくなった一因として、装置の幾何学的形状や dead ch、解析方法による影響があることが分かった。

しかし、これだけでは説明ができないほど、本実験の指数は大きい。以下で、その理由の考察を行う。

5.1.2 X/λ について

シミュレーションから、装置や解析方法に由来する p_2 の理論からの増分では本実験の p_2 の値を説明できないことが分かった。そこで、実際の宇宙線の天頂角分布における X/λ が予測である 2 から大きくなっていった可能性が考えられる。

理論における指数 2 は、典型的に 1 GeV 程度のエネルギーを持つ宇宙線ミューオンの飛程 λ が約 500 g/cm² であり、また、大気の厚さ X は 1000 g/cm² となることから $X/\lambda = 2$ と概算される。また、[Gri01] の Table 3.25 によると、海面における 1 GeV のミューオンの天頂角分布の $\cos\theta$ の指数は実際におよそ 2 であることが確かめられている。

しかし、本実験では実験装置は建物内の部屋に設置した。すなわち、周りを主にコンクリートなどの空気とは異なる物質で囲まれていたことで、 X がコンクリートでは増大し、 X/λ が大きくなった可能性がある。

コンクリートの密度は 2.4 g/cm³ であるから、1m のコンクリート壁がある場合、 $X = 1000 \text{ g/cm}^2 + 2.4 \text{ g/cm}^3 \times 100 \text{ cm} = 1240 \text{ g/cm}^2$ となり、20% 程度指数が大きくなることが期待される。しかし、これでは実験の $p_2 \sim 123$ を説明することはできない。

5.2 東西効果

東西効果を見ることができたか検証するため、次に定義される量 A を導入する。

$$A = \frac{w - e}{w + e} \quad (17)$$

ただし、 w, e はそれぞれ西、東から入射したミューオンのイベント数である。また、 w, e はそれぞれ平均 w, e のポアソン分布に従うと仮定すると、それぞれ誤差は $\Delta w = \sqrt{w}, \Delta e = \sqrt{e}$ で与えられる。よって A の誤差は、

$$\Delta A = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial w} \Delta w\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial e} \Delta e\right)^2} \quad (18)$$

$$= \frac{2\sqrt{we}}{(e + w)^{3/2}} \quad (19)$$

と計算できる。

本実験では、

$$w_{\text{exp}} = 383738 \quad (20)$$

$$e_{\text{exp}} = 198060 \quad (21)$$

$$A_{\text{exp}} = 0.319 \pm 0.001 \quad (22)$$

であった。

装置の幾何学的形状や dead ch、解析方法による影響を考慮するために、シミュレーションにおける A の値も検証すると、

$$w_{\text{sim}} = 261631 \quad (23)$$

$$e_{\text{sim}} = 205114 \quad (24)$$

$$A_{\text{sim}} = 0.121 \pm 0.001 \quad (25)$$

であった。

シミュレーションのデータによるシフト補正を行うと、

$$A_{\text{corrected}} = 0.198 \pm 0.01 \quad (26)$$

となる。このことから、東西効果を観測することができたとと言える。

さらに、装置は建物の東側に位置していたため、西側からくるミュオンを多く遮蔽していたと考えられ、東西効果が実際より小さく観測されると予想されるのにも関わらず、 $A_{\text{corrected}} \sim 0.2$ を得たことから、東西効果を観測したとより強く言うことができる。

6 まとめ

本研究では、 8×8 構成のプラスチックシンチレータアレイを用いて、宇宙線ミュオンの天頂角分布および東西効果の測定を行った。検出器は主にプラスチックシンチレータ、波長変換ファイバー、MPPC、EASIROC モジュールの 4 セクションから構成され、ノイズ除去や dead ch の特定などの準備を通して安定したデータ取得を実現した。

得られた天頂角分布は理論的に期待される $\cos^2 \theta$ 分布から大きく逸脱し、 $\cos^{1.23} \theta$ に近い鋭い分布を示した。これは検出器の幾何学的構造、dead ch の影響、フィッティング条件の設定などが複雑に作用した結果と考えられる。シミュレーションを通じて一部の影響は再現できたが、実験で得られた極端な分布の傾きについては定量的な説明がつかず、今後の課題として残った。

一方で、東西効果については、建物の配置や検出器の方向性によるバイアスが存在するにもかかわらず、有意な非対称性が確認された。シミュレーションを基にした補正後も、西側からのミュオンが優勢であることが示され、東西効果の観測に成功したと言える。

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、スライド作成に関する確なご助言を賜りました木河さん、有元さんに深く感謝申し上げます。また、ゼミをご担当いただいた吉岡さん、橋本さん、陳さんにも心より御礼申し上げます。

参考文献

- [Gri01] Peter K. F. Grieder. *Cosmic Rays at Earth: Researcher's Reference Manual and Data Book*. Elsevier, 2001.
- [SS22] Hariom Sogarwal and Prashant Shukla. Measurement of atmospheric muon angular distribution using a portable setup of liquid scintillator bars. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2022(07):011, jul 2022.