



| | |
|--------------|---|
| Title | 宇宙線ミューオンのエネルギー分布の方位角依存性 |
| Author(s) | |
| Citation | 令和6（2024）年度学部学生による自主研究奨励事業研究成果報告書. 2025 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://hdl.handle.net/11094/101267 |
| rights | |
| Note | |

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

令和6年度大阪大学未来基金「学部学生による自主研究奨励事業」研究成果報告書

| | | | | | | |
|---------------------|--|--|----------|-----------------------------|----|----|
| ふりがな 氏名 | あらまき さき 荒牧 咲 | | 学部 学科 | 理学部物理学科 | 学年 | 3年 |
| ふりがな 共同 研究者氏名 | | | 学部 学科 | | 学年 | 年 |
| | | | | | | 年 |
| | | | | | | 年 |
| アドバイザー教員 氏名 | 福田 光順 | | 所属 | 大阪大学スチューデント・ライフサイクルサポートセンター | | |
| 研究課題名 | 宇宙線ミューオンのエネルギー分布の方位角依存性 | | | | | |
| 研究成果の概要 | 研究目的、研究計画、研究方法、研究経過、研究成果等について記述すること。必要に応じて用紙を追加してもよい。(先行する研究を引用する場合は、「阪大生のためのアカデミックライティング入門」に従い、盗作剽窃にならないように引用部分を明示し文末に参考文献リストをつけること。) | | | | | |

1. 宇宙線ミューオンの飛来量の方位角依存性

1.1 目的

宇宙線ミューオンは、陽子を主成分とする1次宇宙線が、大気中の酸素や窒素と相互作用した際に生じる荷電パイオンが崩壊する際に生じる粒子である。陽子が地球の磁場によるローレンツ力をうけて軌道が曲げられるため、地上で観測されるミューオンの飛来量は東から飛来するものよりも西からのものの方が多くなることが知られている。この現象は「東西効果」と呼ばれる。

この東西効果の例からも分かるように、ミューオンは宇宙事象や地磁気、大気の情報を含んだメッセージセンターであるといえる。今回の自主研究では、以下の2点を目標として実験、解析に取り組んだ。

- ① 建物の影響が少ない最上階で、ミューオン飛来量の方位角分布を測定し、地磁気によって宇宙線がどれだけ曲げられるのかを調べる。
- ② ミューオン飛来量の時間変動を調査し、宇宙事象との相関などから1次宇宙線の生成メカニズムの解明に繋げる。

1.2 測定方法

厚さ5mm、一辺50mmのポリエチレンテレフタレート(PET)を6枚重ねたものをシンチレータとして用い、超高感度の光電子増倍管と組み合わせることで宇宙線ミューオン測定した。なお、5つの検出器のうち、中心に設置した検出器だけにはPETではなく、厚さ5mm、一辺20mmのBaF₂を使用した。



図 1 シンチレータ (PET) と検出器

方位磁針は室内では正確ではないため、図 2 のように地図を用いて方位を確認した。



図 2 地図による方位の測定

以前のオナーセミナーでは、検出器を理学部 H 棚の 2 階に設置したことで、ミューオンが建物を通過する際にエネルギーを失い、一部のミューオンは止まってしまっていたと考えられる。その結果、飛来するミューオンの数を正確に測定することができなかった。そこで、今回は建物の影響を最小限に抑えるため、検出器を共通教育実験棟 5 階（最上階）に設置した。以下の写真は、実際に検出器を設置した際の様子を示している。



図 3

検出効率を打ち消すため、解析には検出器を 180° 回転させたものどうしのデータを用いる。以下の図のように検出器を回転させて 8 回測定を行った(図 4)。

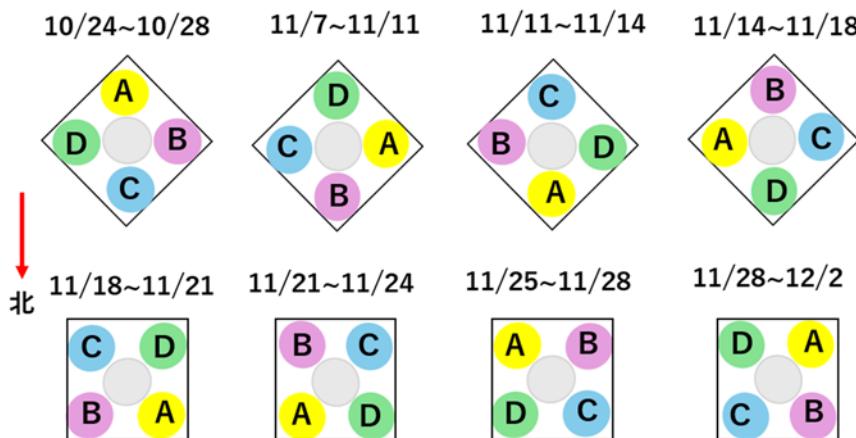


図 4 検出器の方角と測定期間

1.3 結果

測定の結果、南を 1 とした場合のミューオン飛来量の方位角依存性は以下の図のようになつた。

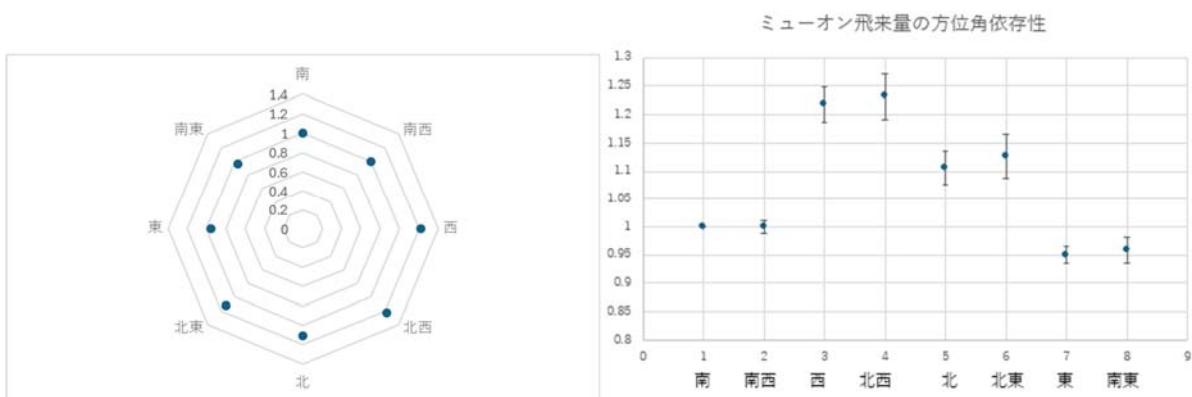


図 5 ミューオン飛来量の方位角依存性 (南を 1 とした場合)

この図を見ると、東西では西からのミューオンの量が東からよりも 25%ほど多く、東西効果を確認することができる。また、南北についても北からの飛来量の方が南からよりも 10%ほど多いことがわかる。

また、2023 年度春夏学期のオナーセミナーにおいて、昼間の方が夜間よりも 3% ミューオンの飛来量が多いという結果が得られたことを踏まえ、今回の測定でも昼と夜のミューオン飛来量を比較することにした。今回は午前 6 時～午後 6 時を昼、午後 6 時～午前 6 時を夜として、昼と夜のミューオン飛来量の比を計算した。結果を図 6 に示す。

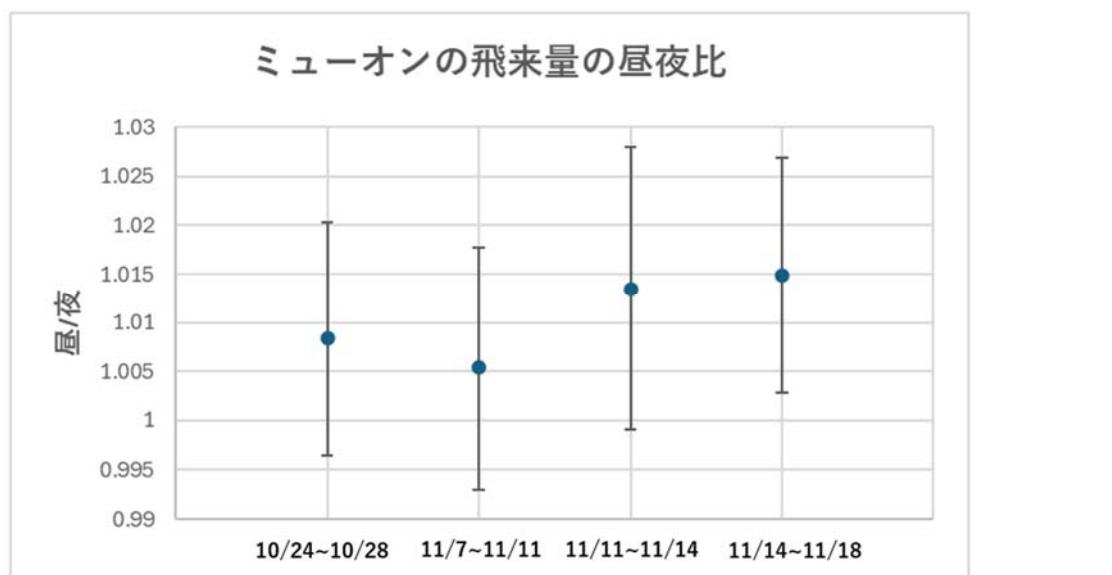


図 6

4回の測定の昼/夜の値の重み付き平均は1.010(6)となり、1%ほど昼間のミューオン飛来量の方が多いという結果が得られた。

1.4 考察

今回の測定では、東からよりも西からのミューオンの方が多いという東西効果を実際に確認することができた。一方、南北で比較すると、南からよりも北からのミューオンの方が多いという結果が出た。実は、東西効果だけでなく、南北効果も知られており、北からの飛来量の方が少ないことが知られている。南北効果と異なる結果が出た理由は不明だが、これから解析を進めていきたい。また、南北効果も東西効果と同じように、1次宇宙線である陽子が地磁気によるローレンツ力を受けて曲げられるために生じると考えられているため、今回の測定結果を他の地点での東西効果、南北効果のデータと合わせることで陽子がどれだけ曲げられるかを推測するのに活用していきたい。

また、昼間の方が夜間よりもミューオンの量が多かったのは、太陽由来の宇宙線が地上で観測されていることが原因ではないかと考えられる。

2 宇宙線ミューオンのエネルギー分布の方位角依存性

2.1 目的

コンパクトなリング・イメージング・チェレンコフ検出器（RICH）を開発し、ミューオンのエネルギーを測定することで、ミューオンのエネルギー分布と方位角依存性を同時に測定することを目指す。

2.2 測定方法

屈折率 n の物質中を通過する荷電粒子の速度 v が

$$v > \frac{c}{n} \quad (1)$$

を満たすとき、チェレンコフ光を放出する。チェレンコフ光は波面の包絡面に対して垂直に角度 θ で進む(図8)。

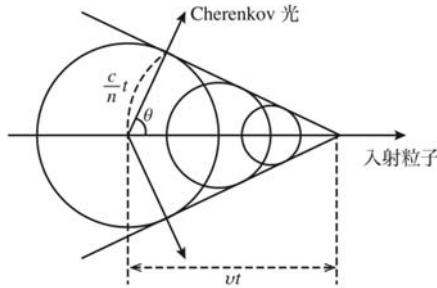


図 7

放射角 θ は

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n(\omega)} \quad (2)$$

という関係式を満たす。このとき、 $\beta = \frac{v}{c}$ であり、 ω はチェレンコフ光の振動数である。本実験では、下の図のように、ミューオンがラジエータを通過する際に発生するチェレンコフ光が作るリングの半径を光検出器 (MPPC) で測定する。リングの半径から放射角 θ を計算することができ、式(2)を用いると β を求めることができる。ミューオンの運動エネルギー T は、

$$T = \gamma m c^2 - m c^2 \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

m : ミューオンの質量

で表されるので、 β が分かればミューオンのエネルギーを計算することができる。

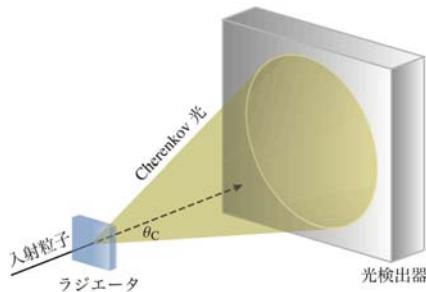


図 8

ラジエータの外界の屈折率を n' とすると、RICH で測定可能な β の範囲は

$$\frac{1}{n} < \beta < \sqrt{\frac{1}{n^2 - n'^2}} \quad (4)$$

となる。

ここで、地上で観測されるミューオンのエネルギーは 1GeV 程度であることが知られている。式(3)を用いて計算すると、1GeV のミューオンでは $\beta \approx 0.93$ であることが分かる。よって、本実験で観測するミューオンは $\beta \approx 0.93$ なので、式(5)から n は 1.08~1.46 の間に収まっていなければならない。式(2)より、この範囲での屈折率 n と放射角 θ の関係は下の図のようになる。

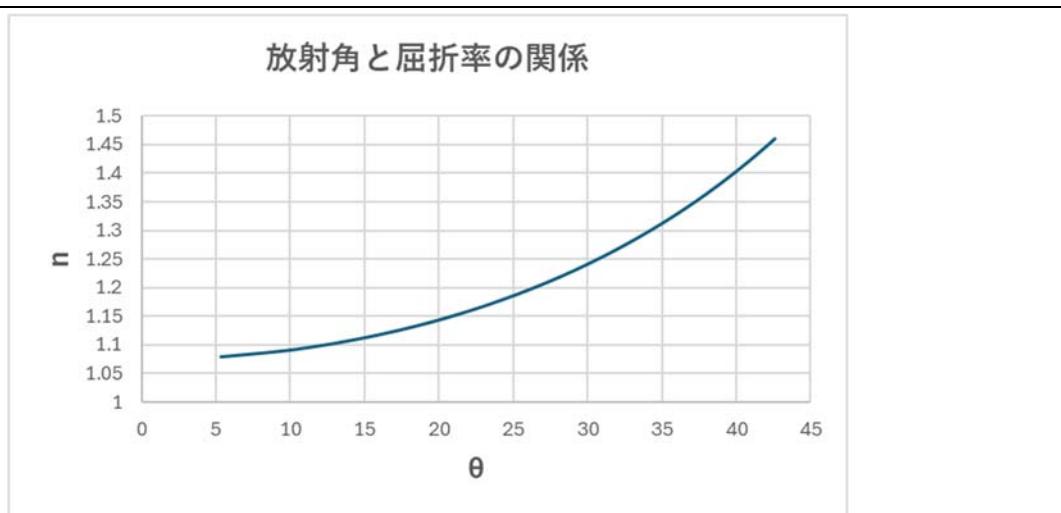


図 9

実験装置で測定可能な放射角を考慮すると、ラジエータとして水($n \approx 1.33$)が最適と考えられる。また、単位長さあたり、単位波長あたりに放出される光子数 N について、

$$\frac{d^2N}{d\lambda dx} = \frac{2\pi\alpha Z^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)}\right) \quad (5)$$

Z: 電気素量 e を単位としたときの入射粒子の電荷

α : 微細構造定数

という式が成り立つ。この式を波長で積分し、水の屈折率を代入すると、単位長さ(mm)あたりに放出される光子の数は 6 個ほどであると計算される。これより、厚さ 10mm の水をミューオンが通過すれば、60 個ほどの光子が放出されることが予測される。それを MPPC で観測してリングを再現できれば、ミューオンのエネルギーを測定することができる。

今後の実験では、厚さ 10mm の分光セルに水を入れ、ミューオンが水を通過する際に発生するチエレンコフ光を観測していく予定である。なお、MPPC での測定はノイズとなる dark current が多く含まれるので、ノイズを極力減らすために、ペルチェ式冷却ユニットを用いて MPPC を冷却しながら実験を行う。また、アクチュエータを用いてラジエータと MPPC との距離を調節する。

2.3 今後の展望

ラジエータの屈折率の見積もりやラジエータとして用いる物質の選定に時間がかかってしまい、残念ながら測定を始めるまでにはいたらなかった。これから検出器を開発し、ミューオンのエネルギー測定を進めていきたい。

参考文献

- [1] 八木 翔一, “重イオンビーム用リング・イメージング・チエレンコフ検出器の開発”, 大阪大学院理学研究科 修士論文, 平成 30 年
- [2] 畑柳竜生, 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”, 京都大学高エネルギー物理学研究室, 平成 16 年