

角度・方位による宇宙線到来頻度の差の測定

物理班:久田 芽生、船田 津季、新島 藍、糀矢 美月、姜 穎里佳、徳山 未来

Abstract

In this study, the relationship between the frequency of cosmic rays and the zenith angle was investigated. In a previous study, it was found by calculation that the arrival frequency of cosmic rays is proportional to $\cos^2\alpha$ when the zenith angle is α . In this study, we confirmed this result by actually measuring cosmic rays using the Cosmic Watch cosmic ray detector and creating a graph from the obtained data.

要約

本研究では、宇宙線の到来頻度と天頂角の関係について調べた。先行研究で、天頂角(垂直線と、天体への視線との間に形成される角度)を α とすると宇宙線の到来頻度は $\cos^2\alpha$ に比例することが理論的に明らかになっている。今回、私達は宇宙線検出器「Cosmic Watch」を用いて測定を行った。測定で得たデータから、角度と到来頻度の関係を示すグラフを作成したところ、実際に到来頻度は $\cos^2\alpha$ に比例することが分かった。

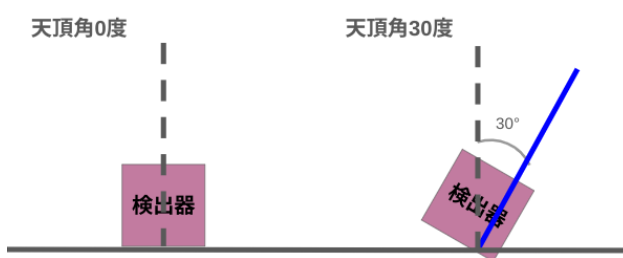


図1.天頂角

1. 研究背景

1.1. 宇宙線とは

宇宙線とは、放射線の一種である。そもそも放射線とは、物質を通り抜けたり、物質と反応したりするほどの高いエネルギーをもつ粒子や波のことで、具体的には α 線や β 線のことを指す。また、発生源によって宇宙線以外の環境放射線と人工放射線に区別できる。その中でも宇宙線は宇宙から発生するので、宇宙線以外の環境放射線に分類される。また宇宙線は他の放射線と比べてはるかに高いエネルギーをもっている。宇宙線は地球の大気を通り、地表へ降り注ぐ。大気に入るまでの宇宙線を一次宇宙線といい、一次宇宙線は、大気分子の原子核と衝突するときに相互作用を起こし、二次粒子を発生させながら減衰していく。この二次粒子が二次宇宙線である。また、この現象を空気シャワーという。

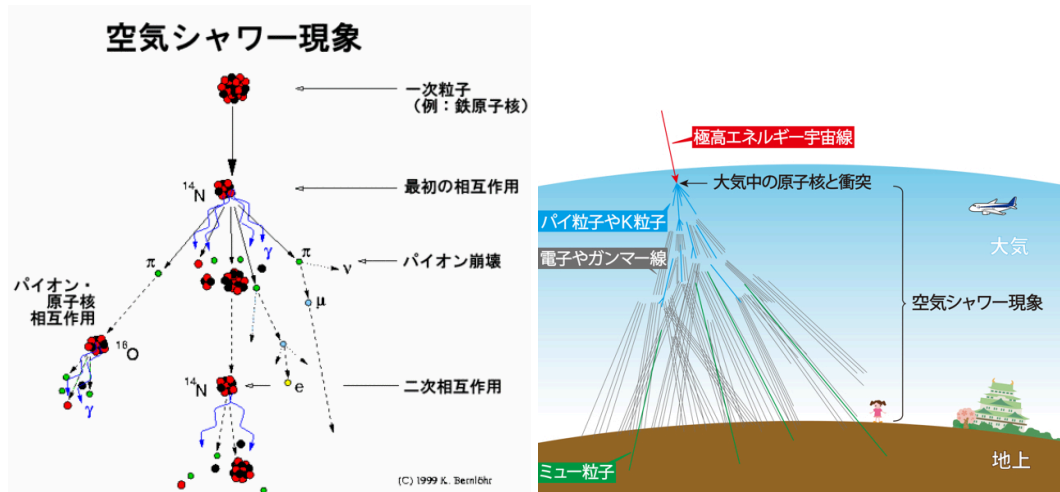


図2,3 空気シャワーについて

このとき、二次宇宙線の発生に反比例して、宇宙線の持つエネルギーは徐々に減弱する。二次宇宙線は、地表には手のひらに1秒に1つ程度の頻度で降り注いでいる。地表に到達する宇宙線の多くはミューオンという粒子で、透過力が高い。本研究では主にこのミューオンを検出している。

1.2. 先行研究

《先行研究①》仙台第3高校『分割シンチレータを用いた放射線検出器の開発と放射線種の特
定』仙台第3高校,2023

天頂角を大きくすると、宇宙線が大気を通る距離が長くなる。天頂角が小さく、大気を通る距離が短いときと比べて、大気を長い間通ると、より多くの宇宙線が減衰、消滅する。これにより、天頂角を大きくすると、宇宙線の到来頻度は小さくなることがわかっている。

《先行研究②》小芝ら『宇宙線ミューオンの観測』,2017

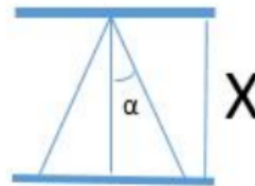
天頂角分布とは、宇宙線が飛来してくる方向の天頂角 α に対する頻度分布、つまり天頂角 α に対する強度のことを指す。強度を $J(X, \alpha)$ とおき、変数を減らすために $J(X/\cos \alpha, 0)$ とする。また、平均自由行程(宇宙線が大気分子と衝突し次に大気分子と衝突するまでの距離)を λ とする。強度の X (距離)依存性が指数関数的に減衰するとすると

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

となり、角度 α に依存する部分を求めると

$$J(X, \alpha) = J\left(\frac{X}{\cos \alpha}, 0\right) = J(X, 0) \frac{J\left(\frac{X}{\cos \alpha}, 0\right)}{J(X, 0)}$$

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



$J(X, \alpha)$ が $(\cos \alpha)$ の X/λ 乗に比例することが導かれる。地表に到達する宇宙線の多くを占めるミューオンにおいては X/λ は2といわれているので $J(X, \alpha)$ は $\cos^2 \alpha$ に比例する。よって宇宙線の到来頻度は、 $\cos^2 \alpha$ に比例する。

本研究では、垂直線と、検出器の天面までの角度とする。

1.3. 研究目的

宇宙線には宇宙についての情報、例えば惑星の起源などを調べる際の手がかりとなる情報などが大量に詰まっており、ロマンを感じた。そこで、Cosmic Watchから得られる情報を用いて簡単に調べられる条件である角度と測定時間、宇宙線の検出回数を利用し、宇宙線の到来頻度と、到来角度の関係について調べることにした。

2. 研究手法

2.1. 研究方法

《先行研究②》で求められた、宇宙線の到来頻度が $\cos^2 \alpha$ に比例するという計算結果が、実際に計測しても成り立つかどうかを検証する。本研究では、天頂角を θ とする。本研究では、Cosmic Watchという放射線検出器を使用した。この検出器は、次のような仕組みで作動する。(図3)シンチレータと呼ばれる部分に通った宇宙線のもつエネルギーを、半導体などで電気信号に変換することで、宇宙線が通過した時間や気温、検出器に与えたエネルギーといった情報を記録することができる。

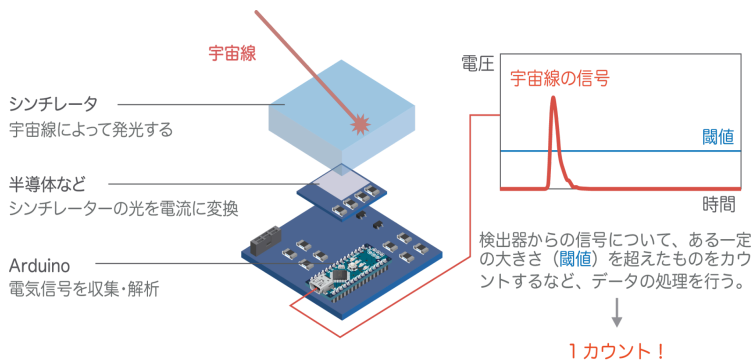


図3.検出器の仕組み

出典:加速キッチン



図4.Cosmic Watchの写真

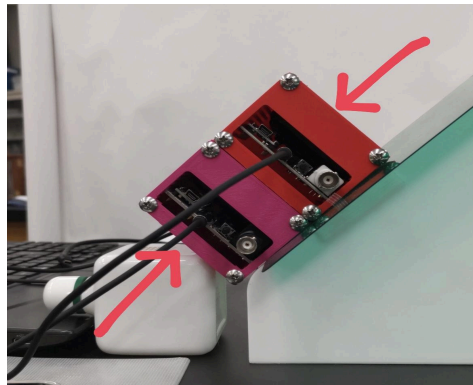


図5.2台測定の様子

今回はCosmic Watchの2台測定モードを用いる。

2台測定モードとは、検出器を2台とも通過した放射線のみ測定するモードのことである。2台測定モードにすることで、角度を限定して測定することができる。図4では赤矢印の方向から来た宇宙線のみを検出している。また宇宙線以外の放射線はエネルギーが低く、一台のシンチレータを通過して減衰・消滅してしまい、一台のシンチレータしか通れない。一方で宇宙線はエネルギーが高いため、2台の検出器を通ることができる。図6,7を見ると、2台測定のグラフのほうが、ADC値(放射線のエネルギーの大きさを整数値で表したものが)低い200以下である放射線の到来数が少なくなっている。そのため、2台測定モードを用いることで、宇宙線のみを計測することができる。

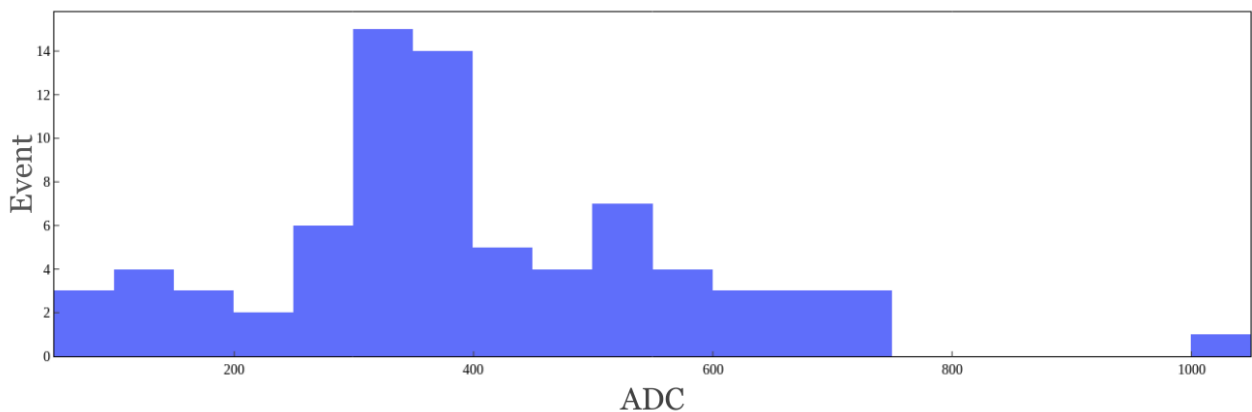


図6.2台測定のADC分布

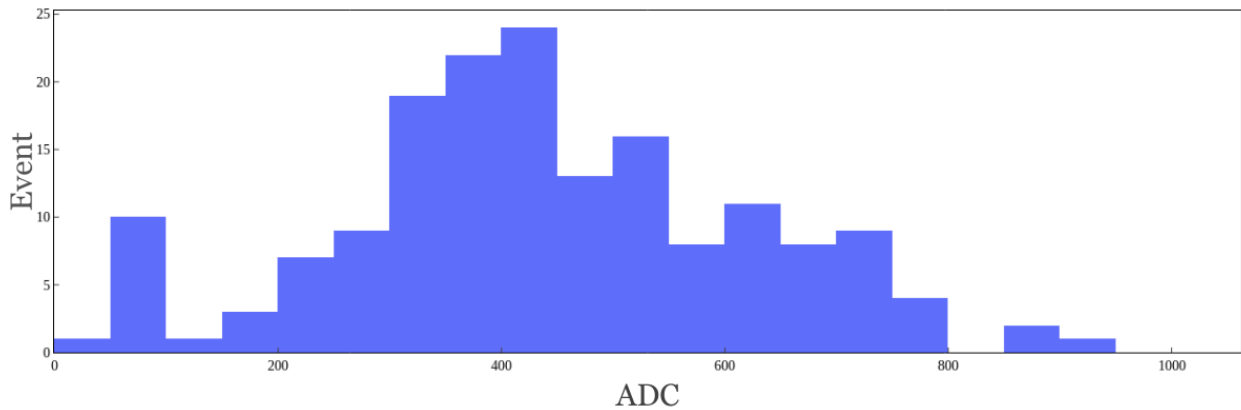


図7.1台測定のADC分布

2.2. 実験方法

①検出器を天頂角0,15,30,45,60,75,90度にして、それぞれ15分ずつ測定を行う。

検出器の天面の向きは、全て北向きとする。

《北向きに固定した理由》

宇宙線は宇宙から来るので、測定する方位を決める際には、宇宙にある太陽の影響を受ける可能性を考慮した。まず、南と北では、太陽の影響を受けにくい北のほうが良いと考えた。次に、東西どちらかにすると、時間帯で太陽の当たり方に差が出てしまい、実験できる時間帯が限られてしまうことから、東と西は候補から外した。このように考えて、本研究では北向きを採用した。

②宇宙線の検出回数をそれぞれ測定時間(15分)で割った分単位の検出回数を、到来頻度として求め、横軸を天頂角、縦軸を到来頻度として、Google Colaboratoryを使用してグラフを作成した。その際、到来頻度のルートをとった値をエラーバーとして表示する。

③直線近似, $\cos \theta$, $\cos^2 \theta$, $\cos^3 \theta$, $\cos^4 \theta$, $\cos^5 \theta$, $\cos^{10} \theta$ のグラフを、Google Colaboratoryを使用して作成する。

《グラフの種類理由》

先行研究より $\cos^2 \theta$ 近似を行った。値のポイントの見かけが直線に近似するようにも感じられたので、直線近似も行い、グラフを作成した。また、 $\cos \theta$, $\cos^3 \theta$, $\cos^4 \theta$, $\cos^5 \theta$, $\cos^{10} \theta$ 近似のグラフも作成し、 $\cos^2 \theta$ に最も近似することを確認した。

④実験値と予測値(線上の値)の差を二乗したものの和を、実験値それぞれの、実験値の平均との差を二乗したものの和で割ったものを1から引く(最小二乗法)ことで、それぞれのグラフについて決定係数(モデルが予測した値が計測値と比べて、どのくらいの精度を示しているのか)を求める。

3. 結果

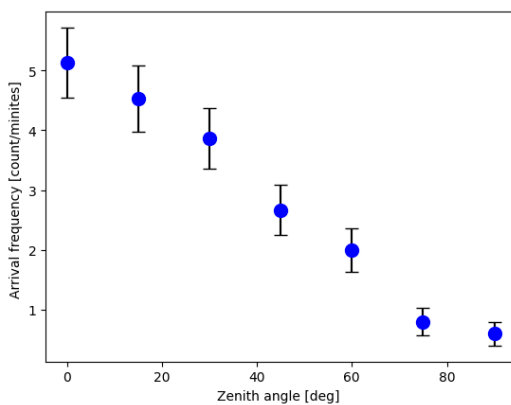


図8.打点のみ

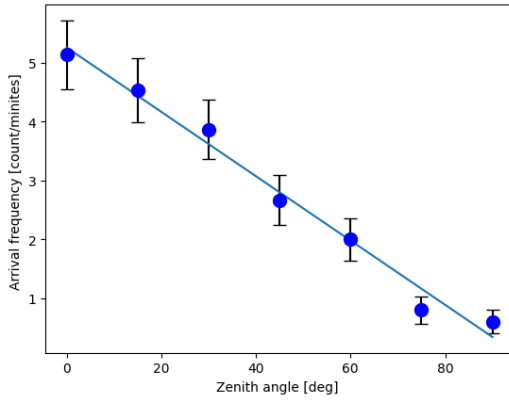


図9.直線近似 決定係数:0.984
 $y = -0.0546 \theta + 5.26$

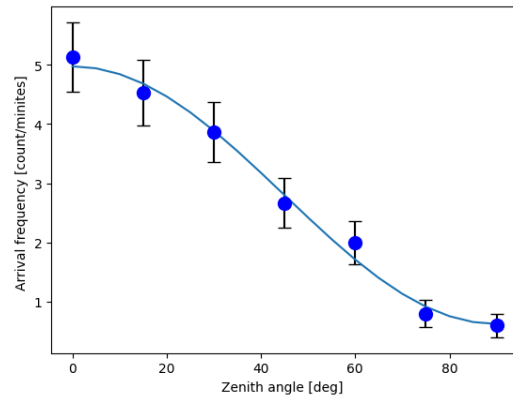


図10. $\cos^2 \theta$ 近似 決定係数:0.991
 $y = 4.35 \cos^2(\theta / 360 * 2 \pi) + 0.625$

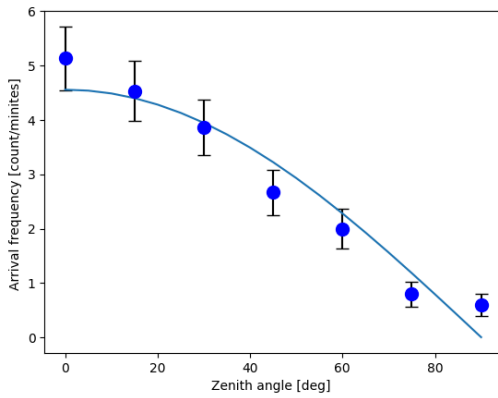


図11. $\cos \theta$ 近似 決定係数:0.935
 $y = 4.55 \cos(\theta / 360 * 2 \pi) + 0.00561$

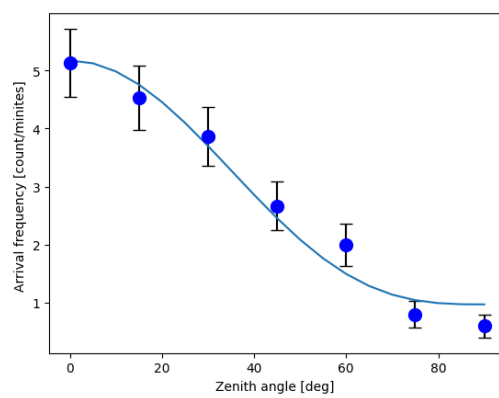


図12. $\cos^3 \theta$ 近似 決定係数:0.970
 $y = 4.20 \cos^3(\theta / 360 * 2 \pi) + 0.972$

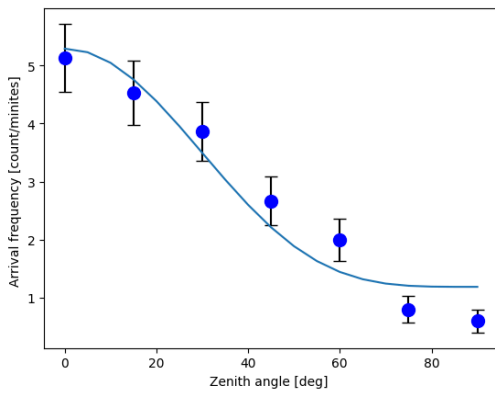


図13. $\cos^4 \theta$ 近似 決定係数:0.935

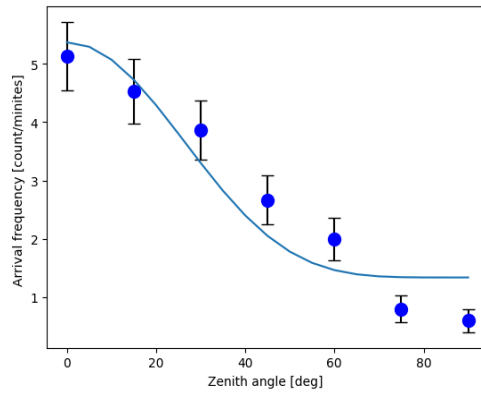


図14. $\cos^5 \theta$ 近似 決定係数:0.899

$$y=4.10\cos^3(\theta / 360*2 \pi)+1.19$$

$$y=4.03\cos^3(\theta / 360*2 \pi)+1.34$$

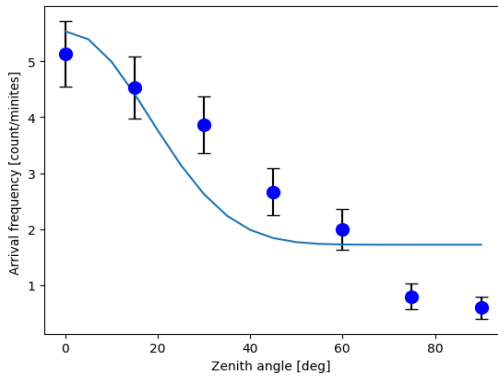


図15. $\cos^{10} \theta$ 近似 決定係数:0.760

$$y=3.81\cos^3(\theta / 360*2 \pi)+1.72$$

4. 考察

それぞれのグラフの決定係数を求めると、 $\cos^2 \theta$ 近似では0.991となり、決定係数が最も1に近い。天頂角を θ としたとき、宇宙線の到来頻度と天頂角の関係を示すグラフは $\cos^2 \theta$ に近似するとわかる。このことから、先行研究での計算結果と本研究での実験結果が一致したといえる。

5. 結論

5.1. 結果

実験から、宇宙線の到来頻度は、 $\cos^2 \theta$ に比例するとわかった。《先行研究②》での、宇宙線の到来頻度は $\cos^2 \alpha$ に比例するという結果は実際の実験結果と一致した。よって、宇宙線の到来頻度は $\cos^2 \theta$ に比例する。

5.2. 課題

《課題①》測定時間や測定回数を増やす。測定時間を増やすことでデータ1つ1つの誤差が小さくなる。また、測定を行う角度を増やすことで、グラフ内の打点の数を増やすことができる。
 《課題②》角度とADC値の相関を調べる。天頂角が大きくなった時、ADC値が小さくなっていれば、大気を通過する距離が長くなればなるほど宇宙線が減衰することの裏付けになる。

6. 参考文献ならびに参考Webページ

小柴ら『宇宙線ミュオンおよび電磁シャワーの観測について』,2017

<https://astro-dic.jp/air-shower/>

仙台第三高等学校,小山田ら『分割シンチレータを用いた放射線検出器の開発と放射線種の特
定』,2023

<https://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/blog/2014/07/22/563/>