

チェレンコフ光検出の最適条件

久世 優果¹、久保田 佳歩¹、小林南奈³、田中香津生^{4,5}

¹豊島岡女子学園高等学校2年、東京都

³東京電気大学未来科学部1年、東京都

⁴加速キッチン合同会社、宮城県

⁵早稲田大学理工学術院総合研究所、東京都

チェレンコフ光の観測がカミオカンデ等の巨大な実験装置において行われていることを知り、チェレンコフ光をもっと手軽に検出するための最適な条件をさがりたいと考えた。

小型宇宙線検出器を用いてチェレンコフ光の検出を行う。昨年度はUVカットありアクリル柱、UVカットなしアクリル柱、塩化ビニル柱を媒質として用いた。今年度は媒質として水を用いたり、アクリル柱の長さを変えたりすることで検出効率を比較した。

UVカットなしアクリル柱、UVカットありアクリル柱、塩化ビニル柱の順で検出効率が高かった。発光媒体に水を用いた場合、アクリル柱の長さを長くした場合、アクリル柱の長さを短くした場合は一度も検出されなかった。発光媒体周囲に黒いナイロン製バッグを被せて計測を行い、一度も検出されなかった。お菓子ケースの中に水を入れたものを媒質にした時と300 mmのUVカットなしアクリル柱を媒質にした時、チェレンコフ光は観測されなかった。遮光の有無による計測結果の違いは現時点では分からない。これらについて詳しく考察を行った。

それぞれの実験に関して、約1年間同一の電子盤を使い続けていることから、電子盤の接続に問題があることがわかった。電子盤の不具合を解消し、実験を再開する予定である。

1. 背景

1.1.チェレンコフ光とは

チェレンコフ光とは、荷電粒子と呼ばれる、電荷を持つ素粒子が媒質中の光の速さより速く移動する時に発生する光のことである。ここでいう、光の速さは位相速度を表す。位相速度とは、光は電磁波の一種であるが、その電磁波の同じ位置での移動速度のことである。図2の緑点が進む速さ v_p が位相速度である。ちなみに、図中の v_g は図中の点線の移動する速度で、群速度といい、約30万km/sである。

今回私たちは、ミュオンという種類の荷電粒子から発生するチェレンコフ光を研究対象とした。本研究では後述する小型宇宙線検出

器を用いているため、今回研究対象としたミュオンは宇宙線に含まれているものである。宇宙線とは宇宙から降り注ぐ素粒子のことである。その仕組みは図1の通りで、陽子やヘリウムなどの粒子が一次宇宙線として降り注いだものが大気中の原子核と衝突してミュオンや電子などがシャワー状に二次宇宙線として降り注ぎ、この二次宇宙線を研究で用いる。二次宇宙線に含まれる荷電粒子のほとんどがミュオンであるため、本研究で計測できるチェレンコフ光はミュオンから発生したとみなす。

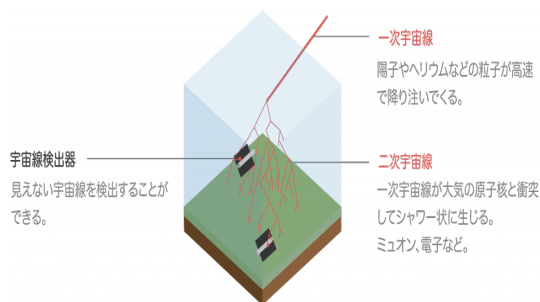


図1 宇宙線 仕組み

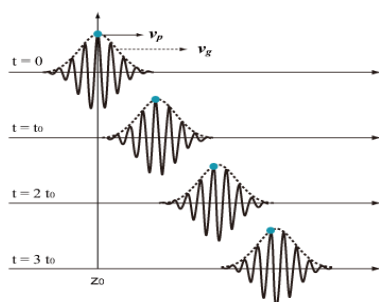


図2 位相速度と群速度

1.2. 研究背景

日本にスーパーカミオカンデやハイパーカミオカンデというチェレンコフ光を用いて素粒子の研究を行っている巨大施設があることを知り、チェレンコフ光に興味を持った。また、日本では世界が認める最先端の素粒子研究を行っていることを知った。そこで、高校生にも出来るような身近で且つ簡単にチェレンコフ光の計測を可能にし、高校生がチェレンコフ光を用いた研究を行えるようにしたいと思い、研究を始めた。

1.3. 先行研究

塩野紗彩「宇宙線によるチェレンコフ光の検出」(2020)では、宇宙線に含まれるミュオンから発生するチェレンコフ光をアクリルや水を媒質としてチェレンコフ光検出器を用いて計測を行ったという研究である。

この研究から、3点参考にした。1つ目は、媒質としてアクリルや水を用いて計測を行うことを参考にした。2つ目は、先行研究ではアクリルにおいて長さを50 mm、100 mm、150 mm と変えて比較をしていたので、媒質の高さによる違いを比較することも参考にした。3つ目は、検出器を2つ同時に用いて計測を行い、ノイズを検出する確率を減らすことも参考にした。

一方、異なる点は2点ある。1つ目は、先行研究ではチェレンコフ光検出器を用いたのに対し、私たちは宇宙線に含まれるミュオンを検出できる、小型宇宙線検出器を用いた。2つ目は、媒質としてアクリルや水だけでなく塩化ビニルも用いた。

1.4. 研究目的

小型宇宙線検出器を用いてチェレンコフ光の検出を可能にすることと、媒質の種類や寸法を変えて最も効率の良いチェレンコフ光の検出条件を見つけることを目的とした。小型で簡単に効率良くチェレンコフ光を検出できる条件を見つけることで、より身近で精度の高い素粒子研究を行えるようになる。

2. 方法と結果

2.1. 宇宙線小型検出器

宇宙線に含まれるミュオンの計測を行うことができる。大きさは、縦75 mm、横62 mm、高さ52 mm である。外観は図3の通りである。

内部構造は図4の通りで、宇宙線が通ると、蛍光物質の含まれているプラスチック製のシンチレータが発光する。すると、光を検知し電気信号に変えるSiPMというセンサーが反応し、その電気信号をArduinoという装置でデータとして保存する。

保存データは図5の通りで、SiPMから送られた電気信号のうち、ある値以下はミュオンとは関係のないノイズとみなされてデータを保存されないようになっている。この値はThresholdと呼ぶられ、ADC値で表す。ADC

値とは、検出されたものの電圧の大きさを0～



1023の値で表したものである。

図3 宇宙線小型検出器 外観

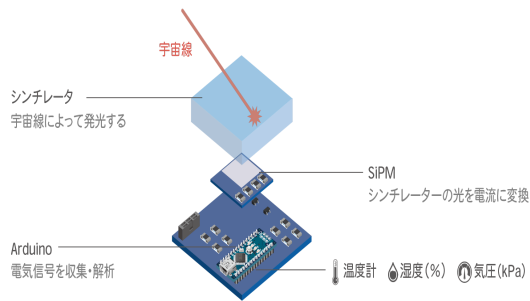


図4 宇宙線小型検出器 内部構造

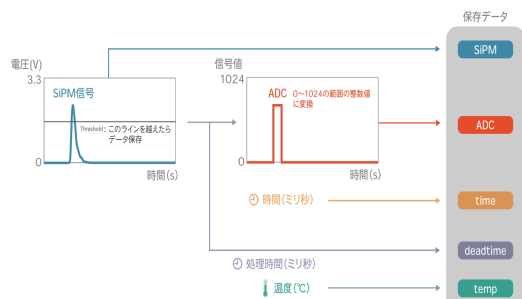


図5 宇宙線小型検出器 保存データ

2.2.装置

装置の外観は図6の通りである。内部構造は図7の通りで、上から宇宙線小型検出器、周りにアルミホイル、黒ビニルテープの順に二重に巻いた媒質、媒質の上の物とは別の宇宙線小型検出器内から取り出したSiPMとArduino(以下、電子盤と表現する)の順に設置した。パソコンにデータを収集するために、宇宙線小型検出器と電子盤にオーディオ

ケーブルとUSBケーブルを用いてPCと繋いだ。

媒質には蛍光物質が入っておらず、自ら光る物質でないと電子盤のSiPMは検知しないため、チェレンコフ光の計測が出来るのではないかとみた。また、上に宇宙線小型検出器を設置することで、宇宙線小型検出器を通ったミュオンのうち、自ら光るもののみが媒質を通過して電子盤で計測されるので、電子盤がノイズを計測する可能性を低くすることができる。

解析には、cosmic-watch-measurement.exeとgoogle colaboratoryを用いた。



図6 装置 外観

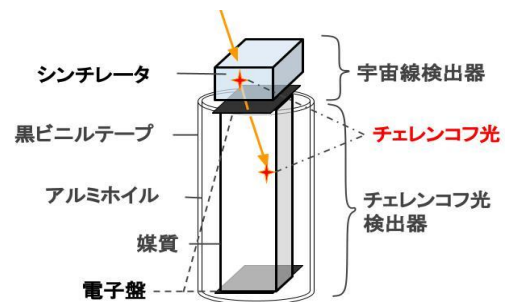


図7 装置 内部構造

2.3.昨年度の研究

2.3.1.実験

全ての実験において、一日5:40-17:40を数日計測した。以下のグラフは、その条件で計測した全ての日のデータを繋げたものである。

1.媒質を設置せずに計測

[目的]

用いている宇宙線検出器が、基盤が振動することによるノイズを検出しないということを確認すること。

[実験装置の構造]

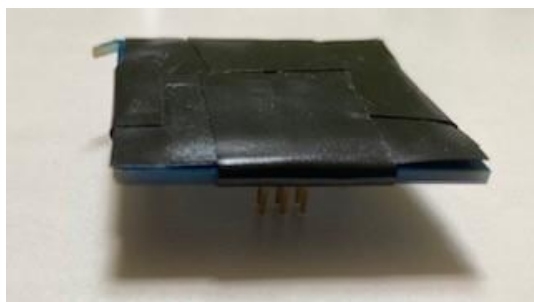


図8 媒質が何もない状態

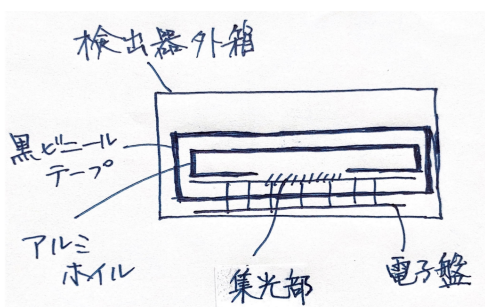


図9 「なにもなし」の全体構造

[結果]

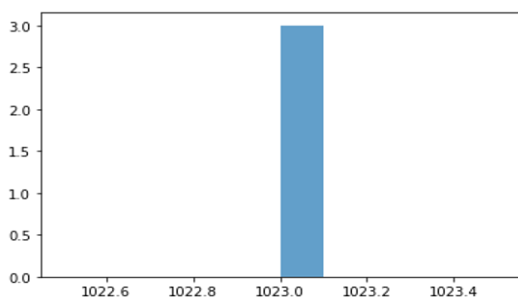


図10 ADC値ごとの検出回数
縦軸:一日当たりの平均検出回数(回)
横軸:ADC値

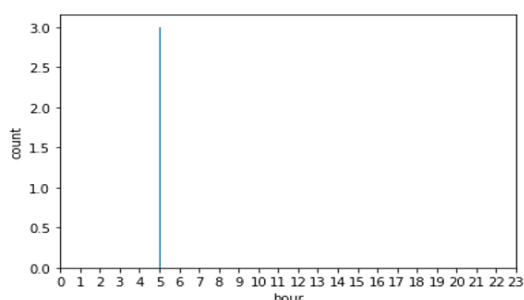


図11 時間帯ごとの検出回数
縦軸:検出回数(回)
横軸:時刻(時)

非常に大きなADC値の検出データが3回得られた。どれも計測を始めてまもなくの検出だった。検出器起動時の振動ではないかと考えられる。

[考察]

媒質の無い検出器では、チェレンコフ光の発生する条件が整っておらず、いかなる光も検出されないと考えられる。これと結果から、計測しているのはノイズではないとわかる。

2,3.UVカットありアクリル柱200 mm

2.媒質に200 mm のUVカットありのアクリル柱を用いて検出器2台を縦向きに重ねて計測を行う。

3.媒質に200 mm のUVカットありのアクリル柱を用いて検出器2台を横向きに重ねて計測を行う。

[実験2,3での目的]

用いている宇宙線検出器が、宇宙線によるチェレンコフ光を観測しているということを確認すること。この検証方法は、宇宙線は上空から到来するため、水平方向からの到来は垂直方向からの到来に比べて極めて少ないという性質を用いている。

[結果]

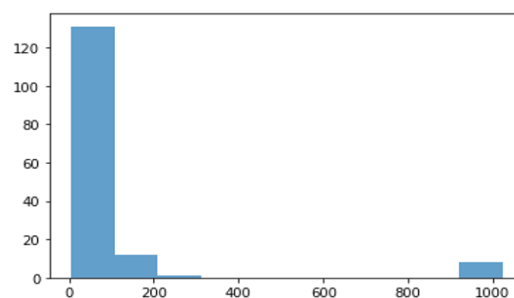


図12 実験2 ADC値ごとの検出回数

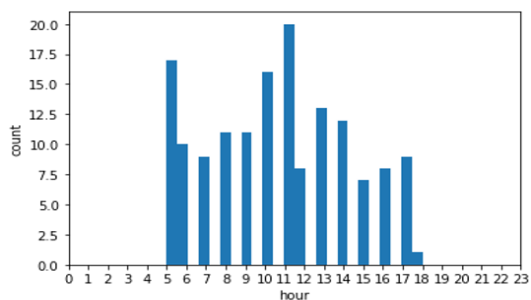


図13 実験2 1時間ごとの検出回数

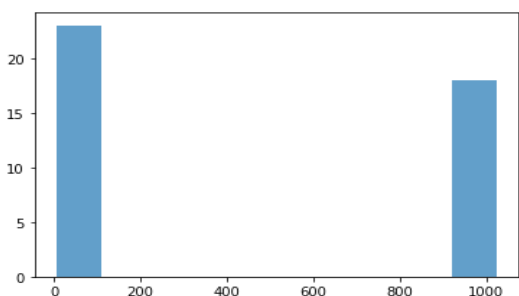


図14 実験3 ADC値あたりの検出回数

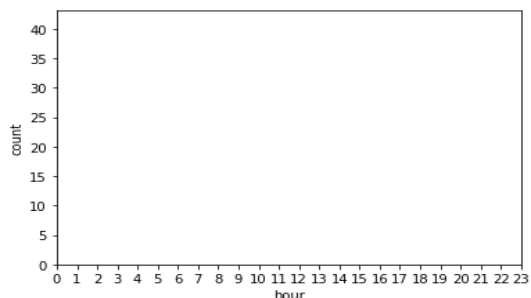


図15 実験3 1時間あたりの検出回数

UVカット加工のあるアクリル柱を縦向きに置いた実験2の1日の平均検出回数は17.4回、横向きに置いた実験3の1日の平均検出回数は4.2回だった。

[考察]

縦向きに検出器を並べて検出され、横向きに検出器を並べて検出されないものを計測していると考えられる。これと宇宙線の「水平方向から到来することはない」という性質から、チェレンコフ光を検出することができる。とわかる。

4.5.UVカットなしアクリル柱200 mm

4.媒質に200 mm のUVカットなしのアクリル柱を用いて検出器2台を縦向きに重ねて計測を行う。

5.媒質に200 mm のUVカットなしのアクリル柱を用いて検出器2台を横向きに重ねて計測を行う。

縦向き、横向き双方での計測を行うのは、実験2,3の対称性を保つためである。

[実験4,5での目的]

実験2,3の一時間当たりの検出回数の平均を比較することでUVカット加工によりチェレンコフ光の検出効率に影響が出るのかということを探ること。

[結果]

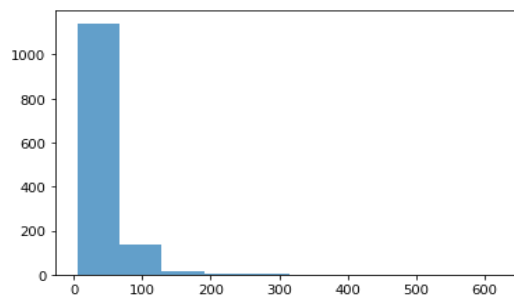


図16 実験4 ADC値あたりの検出回数

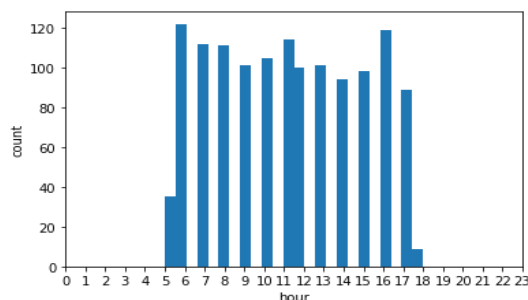


図17 実験4 1時間あたりの検出回数

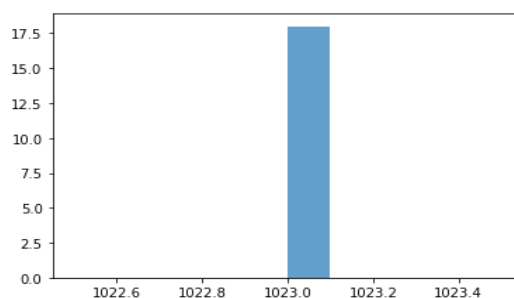


図18 実験5 ADC値あたりの検出回数

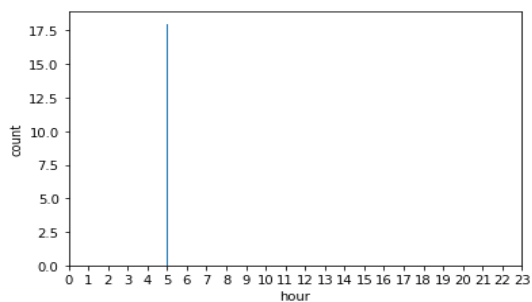


図19 実験5 1時間あたりの検出回数

UVカット加工の無いアクリル柱を縦向きに置いた実験4の1日の平均検出回数は131回、横向きに置いた実験5の1日の平均検出回数は1.96回だった。

[考察]

実験2の結果と実験4の結果をみると、実験4の1日の平均検出回数が実験2の1日の平均検出回数の約8倍であるため、媒質のUVカット加工はチェレンコフ光の検出を減少させるといえる。

6.7.塩化ビニル柱200 mm

6.媒質に200 mm の塩化ビニル柱を用いて検出器2台を縦向きに重ねて計測を行う。

7.媒質に200 mm の塩化ビニル柱を用いて検出器2台を横向きに重ねて計測を行う。

初期状態で計測を行ったとき検出回数が極めて少なく、電気信号として記録する電気信号のADC値を下げた。これにより、検出しているのがノイズである可能性が出てくる。

[目的]

媒質に塩化ビニル柱とアクリル柱を用いたときではどちらが検出効率が良いのかを調べること。

[結果]

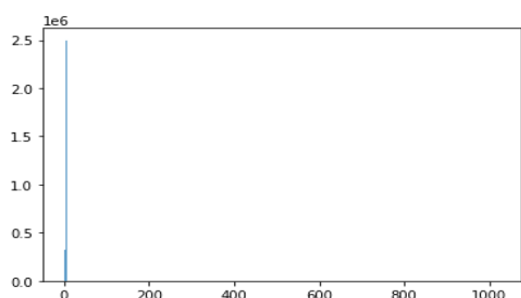


図20 実験6 ADC値あたりの検出回数

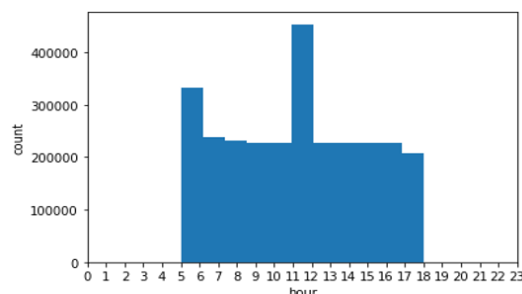


図21 実験6 1時間あたりの検出回数

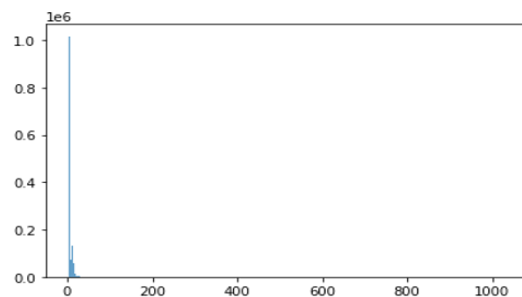


図22 実験7 ADC値あたりの検出回数

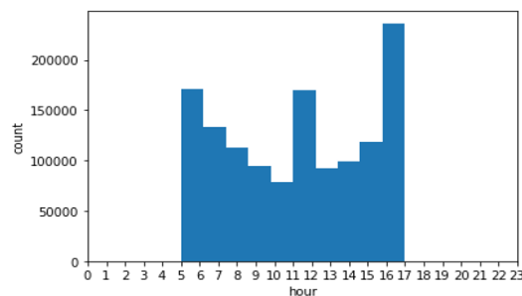


図23 実験7 1時間あたりの検出回数

塩化ビニル柱を縦向きに置いた実験6の1日の平均検出回数は363,267回、横向きに置いた実験7の1日の平均検出回数は482,500回だった。

2.3.2.昨年度の研究の結論

これらの結果・考察より全体の考察として、目的①について、小型宇宙線検出器でチェレ

ンコフ光の検出は可能であることが確かめられたと言える。また、目的②について、この時点で媒質に適した素材について「UVカット加工はチェレンコフ光の検出効率を下げる」ということと「アクリル柱と塩化ビニル柱を比較すると、前者の方がチェレンコフ光の検出効率が高くチェレンコフ光検出の媒質として適している」ということが言える。

2.4.今年度の研究

2.4.1.実験

今年度行った実験全てにおいて、1日5:40～17:40の12時間を5日間計測し、1日の平均検出回数を算出し、昨年度の実験で最も多く計測できた、UVカットの無い、高さ200 mm のアクリル柱の平均検出回数と比較した。

1.お菓子ケース+水

[条件]

素材の種類によるチェレンコフ光の検出効率を比較するために、水を媒質として用いた実験を行った。水を入れる容器として、身近に研究を行なえるようにするという本研究の目的に合わせるため、お菓子容器を用いた。用いたお菓子容器は、株式会社 新保哲也アトリエのR・L waffle cake コロコロワッフルの容器で、半径30 mm、高さ180 mm のプラスチック製円柱容器である。プラスチック製であるので水を入れられることと、透明であることと、容器に蓋がついていることを理由にこの容器にした。この容器の写真は図13の通りである。



図24 お菓子ケース(横向きにしてある)

[仮説]

お菓子ケースと水を用いた実験において、屈折率を基に仮説を立てた。屈折率は空気中の光の速さを媒質中の光の速さで割った値である。この時の光の速さは位相速度である。空気中の屈折率は1.00となるので、屈折率が1.00より大きい値になると、その媒質中の光の速さは空気中の光の速さより遅く、屈折率が大きい程その媒質中の光の速さは遅くなるとわかる。

チェレンコフ光は荷電粒子が媒質中の光の速さを超える速さの時に発生するため、媒質中の光の速さが遅いほど、チェレンコフ光の発生する最低速度が遅くなり、チェレンコフ光の発生確率が高くなると考えた。すなわち、屈折率が大きいほどチェレンコフ光の発生頻度が多くなる。

アクリルの屈折率は1.492で、昨年度の研究よりUVカットの無い、高さ200 mm のアクリル柱での1日の平均検出回数が131回である。お菓子ケースは厚さが薄いので屈折率を考えないとすると、水の屈折率は1.333であることとこのアクリル柱とお菓子ケースの大きさは大きく変わらないことから、1日の平均検出回数は133回よりは低くなると予想する。

[結果・考察]

1度も検出されなかった。原因としてはお菓子ケースについて2点ある。1つ目は、この容器は実験用ではなくあくまでお菓子ケースなので、今まで用いてきた媒質よりも精度が低いと考えられる。2つ目は、お菓子ケースが柔らかかったため、周りをアルミホイルや黒ビニルテープを巻いたときに多少の歪みが生じてチェレンコフ光が通る妨げをしたのではないかと考えられる。

2.アクリル柱

[条件]

素材の長さによるチェレンコフ光の検出効率を比較するために、UVカットの無いアクリル柱の、底面は昨年度と同様40 mm ×40 mm

で高さは300 mm、100 mm と変えて実験を行った。

これらの実験において、外からの光によるチェレンコフ光検出の影響を調べるために、黒色のナイロン製バッグを装置全体に被せて遮光を行った時と被せなかった時のチェレンコフ光の検出効率も比較した。ミュオンが媒質中の光の速さを超えて移動しチェレンコフ光を発生するためには、ある程度大きいエネルギーを持っている必要があるため、検出されるべきチェレンコフ光がナイロン製バックを通して消滅することは無いと考えた。

[仮説]

アクリルの長さによる比較実験においては、先行研究で長さ50 mm、100 mm、150 mm のアクリルを用いた時に長ければ長いほど検出回数が増えたという記載があったので、高さ100 mm、200 mm、300 mm の順に検出回数が増えると予想する。しかし、高さが長すぎるとチェレンコフ光が下の電子盤に到達する前に消滅する可能性があるため、検出回数が急激に減少する直前の高さがアクリル柱での最もチェレンコフ光を検出できる高さといえる。また、先行研究で長さ50 mm のアクリルでは1度も検出されず、その原因がアクリル柱の長さが短すぎることによって媒質中でミュオンが媒質中の光の速さより速い速さに加速しきれず、チェレンコフ光が発生しないことが考えられた。よって、高さが低くても検出されない長さがありうる。

[結果・考察]

①高さ300 mmのアクリル柱

1度も検出されなかった。

2つの小型宇宙線検出器を用いており、媒質の真上からきたものでないと検出できないため、チェレンコフ光が検出されにくいと考えた。そのため、図25のように宇宙線小型検出器と、媒質と電子盤の位置を入れ替えて計測を行った。こうすることで、真上から来ていないチェレンコフ光でも、媒質と電子盤を通ることが出来れば必然的に宇宙線小型検出器も通り、検出される。その結果、1日の平均検

出回数が約50,550回だった。図26は1時間ごとの検出回数を表すグラフで、横軸が時間、縦軸が検出回数である。このグラフは計測した5日分のデータを結合している。

また、ノイズの検出を減らすために2つの小型宇宙線検出器を用いていることで、上の小型宇宙線検出器でチェレンコフ光やこれからチェレンコフ光になるミュオンを検出できていない可能性があると考えた。そのため、図27のように媒質と電子盤のみで計測を行った。その結果、1度も検出されなかった。

以上のことから、1度も検出されなかった計測の原因は、アクリル柱の高さが長すぎてチェレンコフ光が媒質中で消滅したことか電子盤に何らかの問題が発生したことが考えられる。入れ替えて行った計測で、著しく多く検出されたのは、検出器の操作ミスと考えられる。



図25 位置を入れ替えて行った実験 外観

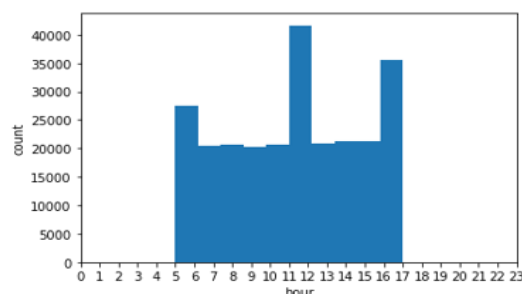


図26 位置を入れ替えて行った実験 グラフ

子ケースを用いたことではないかと考えている。

300 mm のUVカットなしアクリル柱を媒質に用いた実験もチェレンコフ光は観測されなかった。これについては、アクリル柱の長さが長すぎるによりチェレンコフ光が基盤の集光部まで到達しなかったことまたは電子盤の性能が低下していることが原因だと考えられる。

遮光の有無による計測結果の違いは現時点では分からない。



図27 媒質と電子盤のみ用いた実験

3. 考察・結論

宇宙線小型検出器を用いてチェレンコフ光の計測を行うことが出来ることが分かった。

また、媒質のUVカット加工は、チェレンコフ光の検出数を減少させることも分かったので、媒質はUVカット加工のないものを選ぶべきである。

媒質として、UVカット加工のあるアクリル柱 高さ200 mm、UVカット加工の無いアクリル柱 高さ100 mm、200 mm、300 mm、塩化ビニル柱 高さ200 mm、水 高さ180 mm で比較を行ったが、現時点でUVカット加工の無いアクリル柱 高さ200 mm が最も検出効率がよかった。

4. 展望

Red Pitayaという高性能検出器を用いて、UVカットなしアクリル柱200 mm、300 mm、100 mmの条件で実験を行ない、チェレンコフ光が計測できるようにする。全て縦向きでの計測である。

Red Pitayaを用いた計測が成功したら、UVカットなしアクリル柱400 mm、200 mm×200 mm×600 mmのガラス水槽に入れた水を媒質として計測し、1日の平均検出回数を他条件と比較する。

5. 参考文献

[1][位相速度と群速度 | オプティペディア - Produced by 光響 \(optipedia.info\)](#)

②高さ100mmのアクリル柱

1度も検出されなかった。現時点で宇宙線小型検出器と、媒質と電子盤を入れ替えた計測や媒質と電子盤のみの計測を行えていないので確実ではないが、原因としては、アクリル柱の高さが短すぎて媒質中でチェレンコフ光が発生できなかったことか電子盤の問題が考えられる。

③ナイロン製バッグによる遮光の有無

今年度の計測では、1度も検出されなかったことが多く遮光の有無による違いはわからなかった。5.3.2.の位置を入れ替えて行った計測においても、違いがわからなかった。

2.4.2.今年度の研究の結論

お菓子ケースの中に水を入れた媒質でのチェレンコフ光は観測されなかった。原因はお菓

[2][スーパーカミオカンデ 公式ホームページ | スーパーカミオカンデ 公式ホームページ](#)
(u-tokyo.ac.jp)

[3][ハイパーカミオカンデ ホームページ | ハイパーカミオカンデ \(u-tokyo.ac.jp\)](#)

[4]塩野紗彩「宇宙線によるチェレンコフ光の検出」
(2020)

[5][中高生の宇宙・素粒子探究 – 加速キッチン](#)
(accel-kitchen.com)

[6][無題ドキュメント \(tohoku.ac.jp\)](#)

[7][ポリカーボネート: 光学用途への展開 | 三菱エンジニアリングプラスチックス | エンプラネット](#)
(enplanet.com)

[8][google colaboratory cosmic-watch-analysis](#)

最終閲覧日2022年10月4日