

## チェレンコフ光検出の最適条件

## How best to detect Cherenkov lights

久世 優果<sup>1</sup>, 久保田 佳歩<sup>1</sup>, 小林 南奈<sup>2,4</sup>, 田中 香津生<sup>3,4</sup>Yuka KUZE<sup>1</sup>, Kaho KUBOTA<sup>1</sup>, Nana KOBAYASHI<sup>2,4</sup>, Kazuo TANAKA<sup>3,4</sup>豊島岡女子学園高等学校<sup>1</sup>, 東京電機大学<sup>2</sup>, 早稲田大学理工学術院総合研究所<sup>3</sup>, 加速キッチン合同会社<sup>4</sup>Toshimagaoka Joshigakuen Senior High School, Tokyo Denki University<sup>2</sup>,Waseda Research Institute for Science and Engineering<sup>3</sup>, Accel Kitchen LLC<sup>4</sup>Corresponding Author's e-mail: [info@accel-kitchen.com](mailto:info@accel-kitchen.com)

(Received: 5 October 2023; Accepted: 26 October 2023; Released: 29 January 2023)

## [要約]

小型で簡易なチェレンコフ検出器を製作するため、プラスチックシンチレータを用いた放射線検出器のシンチレータをアクリルブロックに置き換えることで宇宙線のミュオン由来のチェレンコフ光の測定及びアクリルブロックの最適化を行った。本チェレンコフ検出器とシンチレータを用いた検出器を同時に通過した宇宙線を測定することで宇宙線の検出効率を評価し、天頂角度依存性測定から宇宙線が測定できていることを確かめた。さらに、アクリルブロックの高さを 10 cm、20 cm、30 cm 変更したところ、宇宙線の検出効率は 10 cm の場合がもっとも高いことを確かめた。本チェレンコフ検出器は 2 万円程度で製作可能で PC からの USB 電源供給駆動で動作し、中高生でも扱える最も手軽な検出器であるといえる。

[キーワード] チェレンコフ光、宇宙線

Cherenkov light, cosmic ray

## 1. 背景

チェレンコフ光は荷電粒子が媒質中を通過する際に荷電粒子の速度が媒質中の光速度を超える際に光が放出される現象である。カミオカンデのニュートリノ測定ではニュートリノと相互作用して水中の電子のチェレンコフ光を測定することで、間接的にニュートリノの観測を行っており、チェレンコフ光観測は素粒子観測における重要な要素である[1]。

近年プラスチックシンチレータ等を用いた汎用の検出器が普及しつつあるが、これらは環境由来のベータ線・ガンマ線も同様に検出され、これは宇宙線測定に置いてバックグラウンド事象となる。一方、チェレンコフ光は宇宙線のような高速に近い粒子によって生じるため、バックグラウンドフリーの宇宙線測定の手法として有効ではないかと考えた。

しかし、微小なチェレンコフ光の発光観測は難しく中高生でも自宅で測定可能なものがない。大学での卒業研究テーマとして行われているチェレンコフ検出器の製作[2]や 2020 年に加速キッチンの活動として早稲田大学本庄高等学院の高校生である塩野によって、アクリルブロックを光電子増倍管に接着することでチェレンコフ光由来の信号観測が行われているが[3]、光電子増倍管は 1000 V を超える高電圧を必要とし、自宅での測定には向かない。

そこで、図 1、図 2 に示したような加速キッチン[4]から提供されたプラスチックシンチレータと SiPM (シリコン光電子増倍管) を用いた簡易検出器である Cosmic Watch[5]のシンチレータをアクリルブロックに置き換えることで、手軽に宇宙

線等がアクリル中を通過する際に発生するチェレンコフ光を検出する検出器を製作した。

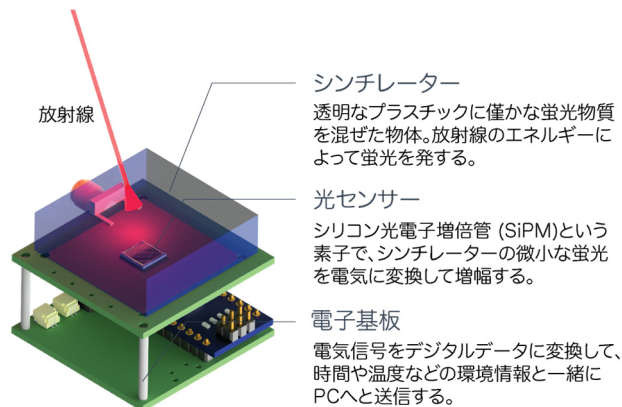


図 1. ベースとして用いた宇宙線検出器 Cosmic Watch の観測の仕組み。宇宙線によってシンチレータで発せられた蛍光を SiPM で観測し、電子基板上で増幅・アナログ・デジタル変換する。

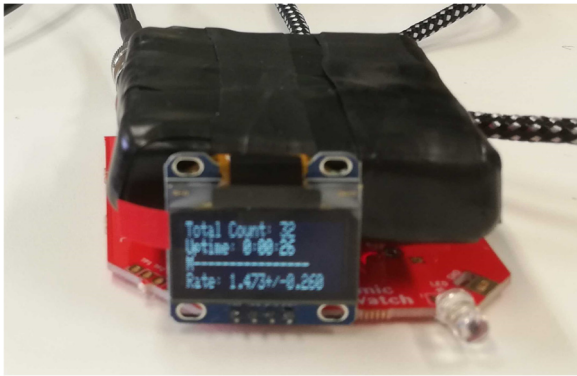


図2. Cosmic Watch の写真

## 2. チェレンコフ検出器の製作

チェレンコフ検出器のベースとして図1, 2に示した簡易宇宙線検出器 Cosmic Watch を用いた。宇宙線通過時にプラスチックシンチレータ (50 mm \* 50 mm \* 10 mm) から発生した蛍光を SiPM (Sensl, MICROFC-60035) によって測定を行っており、得られた電気信号はオペアンプによって増幅及びピークホールドを行った後 Arduino Nano というマイコンによってアナログ・デジタル変換を行い、時間情報や温度情報とともに記録される。

この宇宙線検出器のシンチレータをアクリルブロック (50 mm \* 50 mm \* 200 mm) に置き換えることで、図3に示したようなアクリルブロック中を宇宙線が通過した際に生じたチェレンコフ光を測定できる検出器を製作した。環境光が入らないようにアクリルブロックはアルミホイルにて覆い、その上から黒の自己粘着テープで十分に遮光を行った (図4)。アクリルブロックと SiPM の間は光反射を防ぐために光学ゲルを塗布して接着した。

通常購入可能なアクリルブロックは UV カット加工が施されており、主に紫外領域の波長が想定される本測定でのチェレンコフ光観測に適していないため、加工業者から直接 UV カット加工を行う前のアクリルブロックを取り寄せ利用した。予め UV カット加工を行っている場合と比較したところ、単位時間あたりの宇宙線の検出数がおおよそ 8 倍程度異なることを確かめている。

チェレンコフ光はプラスチックシンチレータで発せられる蛍光に対して微小なため、Arduino のアナログ・デジタル変換で観測することが難しい。そこで、簡易 FPGA ボード Red Pitaya125-10 を用いてデータ収集を行った。繋げて PC に計測データを保存できるようにしている。

また、チェレンコフ光の観測が宇宙線由来である確度を高めるため、チェレンコフ検出器上部に通常のシンチレータを用いた宇宙線検出器を設置し同時に通過したイベントのみを記録するようにした (図3, 4, 5)。

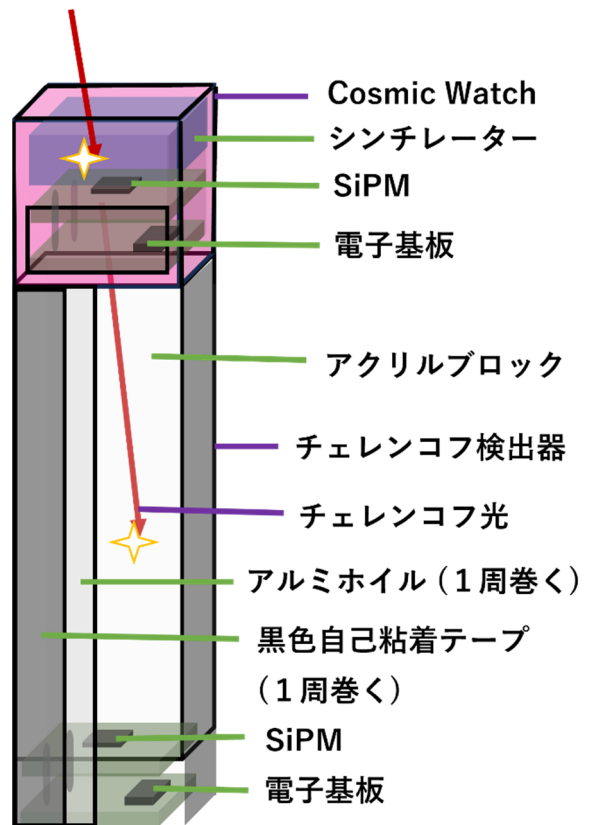


図3. 測定のセットアップ。チェレンコフ検出器の上部にシンチレータ検出器を置き、同時に通過した宇宙線を測定した。

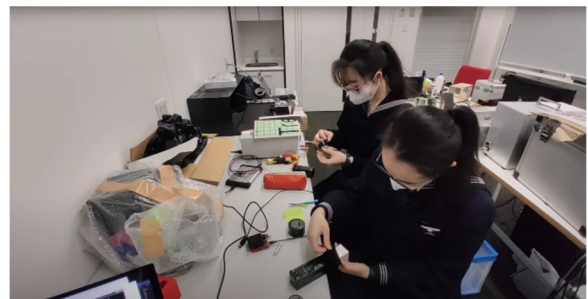


図4. アクリルブロックの遮光の様子

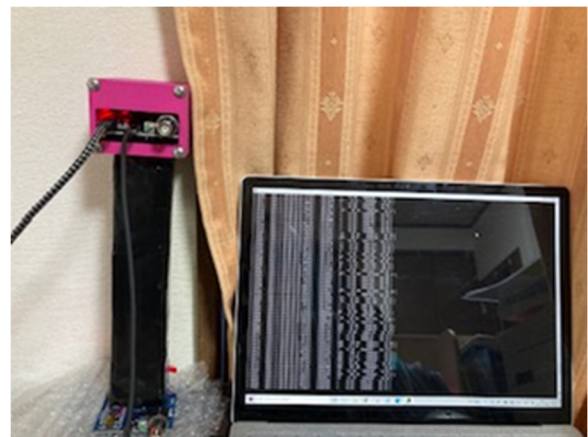


図5. 計測の様子。ピンクの箱がシンチレータ検出器でその下の黒いブロックが遮光されたアクリルブロック。

それぞれの検出器のアナログ信号を Red Pitaya にそれぞれ入力し、Red Pitaya 内で制御用 Python コードを実行することで、それぞれのアナログ信号が任意の閾値を超えている場合のみ、信号のピーク値を出力信号として記録した。図 6 はそれぞれ一定の閾値を超えた典型的な信号波形を表している。

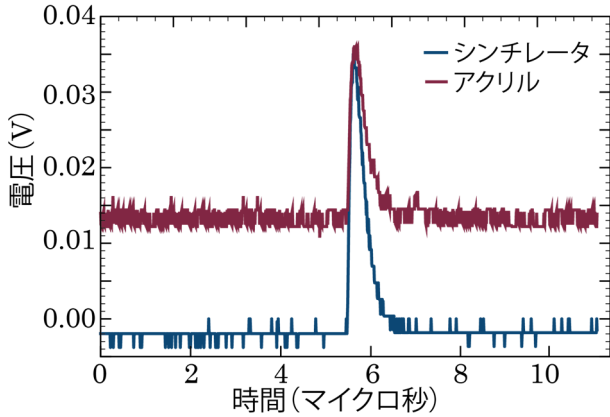


図 6. 典型的な宇宙線由来の信号波形。赤線がチェレンコフ検出器、青線がシンチレータ検出器のもので、同期して測定されていることがわかる。

図 7 は宇宙線を測定した際の各検出器の出力電圧のヒストグラムである。チェレンコフ検出器は信号が微小なため、増幅回路でおよそ 22 倍増幅を行った上で得られた信号を用いた。そのため、出力信号はほぼ同等であるが、実際はチェレンコフ光の発光量はシンチレータに比べて 20 倍程度小さいということになる。

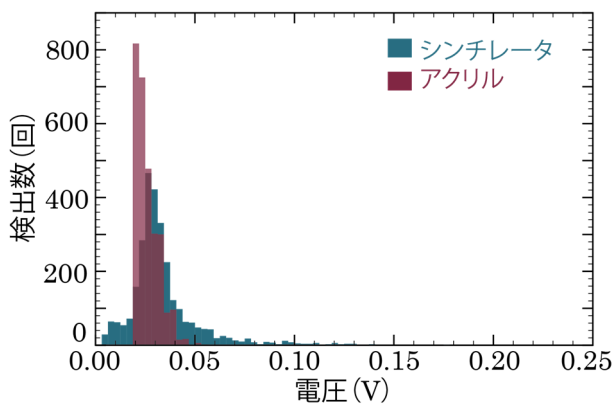


図 7. 宇宙線の測定から得られた各検出器の出力電圧のヒストグラム。測定時間は 65572 s。

### 3. 宇宙線の天頂角分布の測定

製作したチェレンコフ検出器が宇宙線を検出できているかの性能評価として、宇宙線の天頂角分布の測定を行った。宇宙線は大気によって減衰するため、およそ天頂角  $\theta$  に対して到来頻度は  $\cos^2 \theta$  に比例して変化する[3]。

図 8 にチェレンコフ検出器で測定した宇宙線到来頻度の

天頂角依存性を示す。\*はコントロールとしてシンチレータ検出器とチェレンコフ検出器を離して設置して測定した。測定点の箇所が少ないためフィッティングによって  $\cos^2 \theta$  に比例しているかを確認することはできないが、確度によって宇宙線の到来頻度が減少していることがわかり、先行研究と矛盾がない。

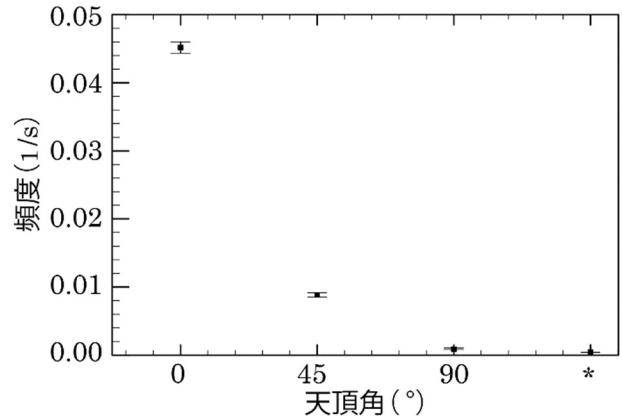


図 8. チェレンコフ検出器で測定した宇宙線到来頻度の天頂角依存性。\*はコントロールとしてシンチレータ検出器とチェレンコフ検出器を離して設置して測定した。エラーバーは統計的不確かさを表現している。測定時間はそれぞれ 0 度は 65572 s、45 度は 81277 s、90 度は 79635 s、\*は 568042 s。

### 4. アクリルブロックの高さの最適化

長さが 10, 20, 30 cm のアクリルブロックを用いて、高さによる宇宙線の検出効率の比較を行った。

図 9 はそれぞれのアクリルブロックによる出力電圧のヒストグラムになる。10 cm, 20 cm のブロックに比べて、30 cm の場合は有意に出力電圧分布が大きくなっている。宇宙線はアクリルブロックでほとんどエネルギーを落とさず、通過距離に比例した発光量のチェレンコフ光が放出されると推察できるため、平均通過距離が長くなる長いブロックにおいて、有意な発光量の増加がみられたと考えられる。

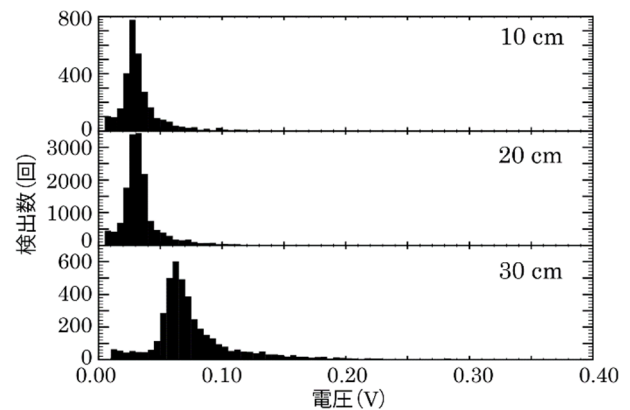


図 9. アクリルブロックの高さ（上から順番に 10, 20, 30 cm）による出力電圧の頻度分布。測定時間はそれぞれ 10 cm は 65572 s、10 cm は 521942 s、10 cm は 422061 s。

図 10 は長さが 10, 20, 30 cm のアクリルブロックでの宇宙線到来頻度の違いで、長さが長いほど到来頻度が低くなっていることがわかる。

本実験では同時計測を行うシンチレーション検出器がチェレンコフ検出器の上に置く配置となっているため、2 検出器間の距離がアクリルブロックの長さによって変化する。そのため、アクリルブロックが長いと 2 検出器を同時に通過する宇宙線の有効検出立体角が小さくなるため到来頻度が下がると考えられる。

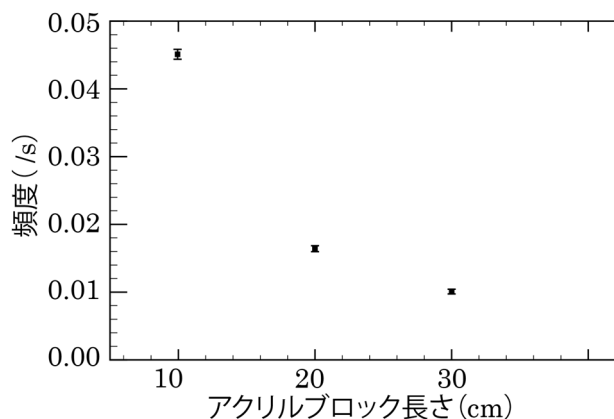


図 10. アクリルブロックの長さによる宇宙線の到来頻度の比較。エラーバーは統計的不確かさを表現している。

## 6. 結論・展望

簡易宇宙線検出器をベースにしてアクリルブロックを用いたチェレンコフ検出器を製作した。USB から供給される 5 V 電源で駆動し高圧を必要としないため、中高生でも簡便に測定に用いることができる。アクリルブロックは 5 cm \* 5 cm \* 10 cm で十分な発光量が得られることがわかり、世界でも類のない小型なチェレンコフ検出器といえる。

本検出器を用いて宇宙線の天頂角依存性測定を行い、十分宇宙線の測定が行えることを確かめた。近年、市民向け検出器として、シンチレータと SiPM を用いたものが普及しつつあるが、宇宙線だけでなく環境由来のガンマ・ベータ線も検出される。また、プラスチックシンチレータは十分なエネルギー分解能を有しないため、宇宙線に絞った測定を行うためには複数の検出器で動悸するなどの工夫が必要で、中高生が簡便に行うことは難しい。土壌の放射性同位体から発せられるガンマ線由来のコンプトン散乱された電子やベータ線は十分なチェレンコフ光を発する速度をもたないため、本チェレンコフ検出器では検出されず、宇宙線のみ絞った測定を簡易的に行うことができるといえる。

本論文ではアクリルブロックの長さによる発光量の比較を行い、長さが長いほど発光量が多いという結果が得られた。また、長さによる検出頻度の比較も行ったが、同時測定を行うチェレンコフ検出器とシンチレーション検出器の距離が異なり有効立体角の条件が異なる測定となったため、シンチレーション検出器をチェレンコフ検出器の下に設置して、長さ

に依存しない測定を行うことで、検出効率の比較も今後行っていくことができると考えられる。

また、長さだけでなく幅、形状、材質といった多要素の最適化を行うことで、より検出効率の高い条件を調べられると考えられる。

さらに、本実験では Red Pitaya を用いた測定系を用いたが、増幅回路の増幅率を上げることで、Arduino Nano を用いたデータ収集も可能であると考えられ、より小型化・汎用化も見込まれる。

## 謝辞

本研究にあたり、ご指導いただいた豊島岡女子学園高等学校 吉田 宗広 先生、増田 雅子 先生に感謝申し上げます。

## 引用及び参考文献

- [1] S. Fukuda et al. (Super-Kamiokande Collaboration) Phys. Rev. Lett. **86**, 5656 (2001)
- [2] 城戸証他, *Cherenkov 光の測定*, 京都大学卒業論文(2002)
- [3] 塩野 紗彩, *宇宙線によるチェレンコフ光の検出*, 早稲田大学本庄高等学院卒業論文(2020)
- [4] K.S. Tanaka et al., Japanese Journal of Science Communication **29**, 37 (2021)
- [5] S.N. Axani, et al., Journal of Instrumentation **13**, P03019 (2018)