

Cosmic Watch - Raport

Anna Brzezińska, Kacper Drabicki, Maciej Weryński,
Krzysztof Wiśniewski

Lipiec 2025

Streszczenie

W raporcie przedstawiono pracę wykonaną w ramach Zespołowego Projektu Studenckiego - Cosmic Watch pod opieką Krzysztofa Doroby oraz Adama Kubieli przez grupę studentów, w której skład wchodził: Anna Brzezińska, Kacper Drabicki, Maciej Weryński i Krzysztof Wiśniewski. Praca obejmowała przygotowanie 4 detektorów Cosmic Watch oraz zintegrowanie osi obrotowej z wcześniej istniejącą ramą. Obrót osi był wykonywany za pomocą silnika krokowego, którym sterowano oprogramowaniem w języku Python.

1 Wstęp

Promieniowanie kosmiczne to strumień cząstek, pochodzących ze Słońca, ale również ze źródeł spoza Układu Słonecznego, lub nawet innych galaktyk. W momencie interakcji promieniowania kosmicznego z atmosferą Ziemi, powstają cząstki wtórne, które są ważnym źródłem informacji w badaniach z zakresu fizyki cząstek. Jednymi z najliczniejszych cząstek wtórnych są miony. Ze względu na swoją dużą energię i czas życia rzędu kilku mikrosekund, miony mogą przebyć nawet kilkaset metrów w materiale stałym, a w atmosferze mogą dotrzeć do powierzchni Ziemi. Ich detekcja umożliwia badanie składu promieniowania kosmicznego.

2 Ogólna zasada działania detektora Cosmic Watch

Cosmic Watch to kompaktowe urządzenie służące do detekcji mionów z promieniowania kosmicznego. Został zaprojektowany w Massachusetts Institute of Technology (MIT) z pomocą Narodowego Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) [1] z myślą o prostocie konstrukcji i szerokich możliwościach edukacyjnych. Urządzenie znajduje zastosowanie zarówno w badaniach z zakresu astrofizyki i fizyki cząstek.

Elementy składowe i działanie

Główne komponenty detektora to: scyntylator plastikowy — materiał, który emituje światło (fotony) pod wpływem przechodzących cząstek naładowanych; SiPM (Silicon Photomultiplier) — fotopowielacz półprzewodnikowy wykrywający pojedyncze fotony emitowane przez scyntylator; układ elektroniczny — wzmacnia i kształtuje sygnał z SiPM; mikrokontroler (Arduino Nano) — steruje pracą detektora, dokonuje pomiaru jego amplitudy i zapisuje dane na kartę microSD lub wysyła je do komputera; ekran OLED — wyświetla podstawowe informacje, takie jak liczba zliczeń i napięcie impulsu. Działanie detektora opiera się na emisji światła podczas przelotu mionów przez scyntylator. Światło to trafia do SiPM-a, gdzie generowany jest prąd elektryczny w formie impulsu. Układ elektroniczny filtruje, wzmacnia i kształtuje impuls tak, by mógł zostać zarejestrowany przez przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC) w mikrokontrolerze jako 10-bitowa wartość. Następnie mikrokontroler przelicza zarejestrowaną wartość ADC amplitudę impulsu SiPM korzystając z wgranych podczas kalibracji parametrów. Oprogramowanie mikrokontrolera podaje obie wartości na wyjściu detektora. Członkowie grupy wprowadzili pewne zmiany w konstrukcji zmontowanych przez siebie detektorów. Pierwszą z nich było nagwintowanie obudów detektorów w celu ułatwienia montażu. Drugą stanowiło zastosowanie nowych scyntylatorów emitujących światło o długości fali dostosowanej do zastosowanych fotopowielaczy krzemowych. Były to scyntylatory EJ200, produkowane przez firmę Eljen Technology, były dostarczone przez firmę Scionix. Na trzecią składała się folia mylarowa o grubości 15 μm , której jedna strona była koloru złotego a druga - srebrnego. W konstrukcji detektora folia pełni rolę izolacji optycznej. Owiniecie czarną taśmą izolacyjną scyntylatora umożliwia odizolowanie go od zewnętrznych źródeł światła, które mogłyby

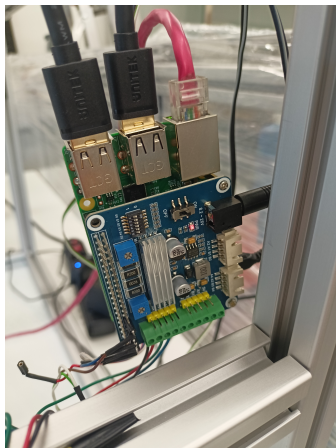
zakłócić pomiary. Wymienione modyfikacje powinny, w opinii członków grupy, usprawnić działanie detektorów. Na podstawie wyników zawartych w dalszej części raportu ocenione zostanie, czy istotnie tak się stało.

Tryb Master/Slave

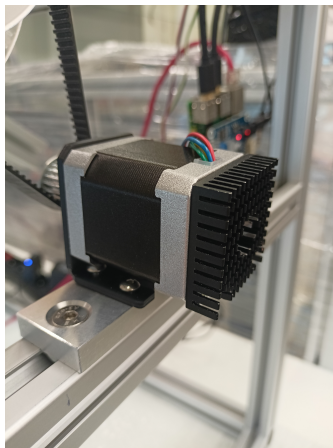
Detektory można ustawić tak, aby pracowały w tak zwanym trybie Master/Slave. Aby detektory działały w trybie Master/Slave, należy za pomocą kabla połączyć ze sobą 2 detektory i zresetować jeden z nich. W konsekwencji zresetowany detektor rozpoczyna pracę w trybie master. Detektor w trybie master zapisuje każde zarejestrowane zliczenie, w przeciwieństwie do pozostałych detektorów, które pracują w trybie slave. Detektor w trybie slave rejestruje jedynie te zliczenia, które jednocześnie zostały odnotowane wcześniej na detektorze master. Praca w trybie Master/Slave umożliwia redukcję szumów, ponieważ głównie miony są w stanie przebić obydwa detektory. Inne składowe promieniowania kosmicznego są zliczane przez detektory z dużo mniejszym prawdopodobieństwem lub nie przedostają się przez detektor.

3 Podgrupa 1 - Kacper Drabicki, Maciej Weryński

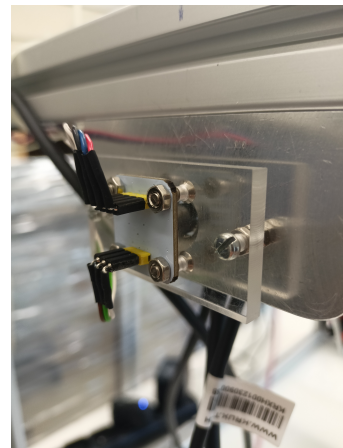
Podczas wykonywania ćwiczenia podgrupa 1 nagwintowała w hali maszyn Wydziału Fizyki UW 25 dwuczęściowych elementów potrzebnych do wykonania obudowy detektorów pod nadzorem Adama Kubiaszczyka. Następnie, w celu umożliwienia badania liczby rejestrowanych mionów w zależności od położenia detektora, zainstalowano oś obrotową, na której umieszczono 8 detektorów. By zautomatyzować obrót układu, wykorzystano minikomputer Raspberry Pi (rysunek 1(a)) w połączeniu z silnikiem krokowym HRB8825 (rysunek 1(b)) oraz zmodyfikowano oprogramowanie detektorów w języku Python o kod wzorowany na gotowym oprogramowaniu dostępnym na stronie internetowej producenta silnika [2], pozwalającym na wprowadzanie kąta rotacji osi oraz długości czasu między kolejnymi obrotami w momencie inicjalizacji układu detektorów. W celu pomiaru rzeczywistego kąta wykonanej rotacji, zainstalowano enkoder magnetyczny AS5600 (rysunek 1(c)), który również podłączono do Raspberry Pi. Zintegrowano część kodu uzyskanego ze strony internetowej producenta enkodera [3] odpowiedzialną za odczyt kąta obrotu z pozostałym oprogramowaniem. Układ zbudowany podczas ćwiczenia ukazany jest na rysunku 2.



(a)

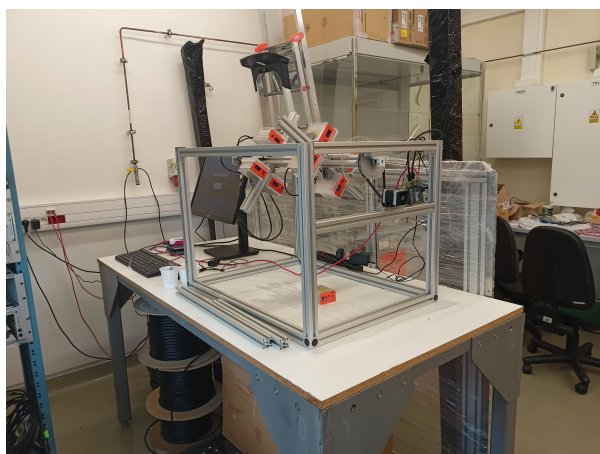


(b)



(c)

Rysunek 1: Zdjęcie (a) ukazuje komputer Raspberry Pi, (b) przedstawia silnik krokowy HRB8825, natomiast (c) to enkoder magnetyczny AS5600.



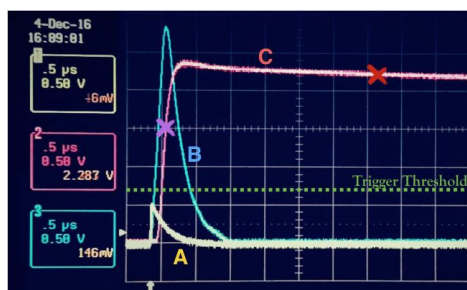
Rysunek 2: Układ detektorów zbudowany podczas ćwiczenia.

4 Podgrupa 2 - Anna Brzezińska, Krzysztof Wiśniewski

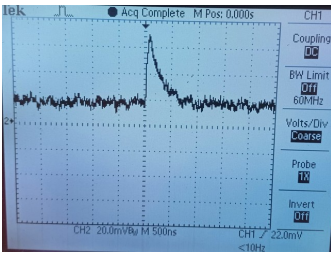
Członkowie drugiej podgrupy zajmowali się detektorami. Ich zadaniem było zmontować 4 detektory Cosmic Watch, sprawdzić ich poprawne działanie i wykonać z ich pomocą testowe pomiary w celu ustalenia, czy pracują poprawnie.

4.1 Montaż detektorów

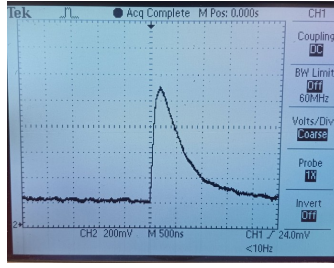
W ramach tej części projektu członkowie podgrupy zbudowali cztery detektory Cosmic Watch. Komponenty wykorzystane w budowie zostały zapewnione przez prowadzących zajęcia z zasobów pracowni. Montaż detektorów rozpoczynano od przylutowania drobnych komponentów (oporników, kondensatorów, cewek itd.) do płytek drukowanych. W trakcie lutowania wykorzystano technikę montażu powierzchniowego. Kolejny etap stanowiło przylutowanie dużych komponentów - włączając fotopowielacz. Dalszą część montażu stanowiło przygotowanie scyntylatora. Owinięty mylarową folią scyntylator umieszczano w plastikowej obudowie tak, by po jej odpowiedniej stronie znajdowała się dziurka w folii, po czym owijano obudowę czarną taśmą izolacyjną w celu zapewnienia światłoszczelności. Następnie nakładano żel optyczny na fotopowielacz i przyklejano do płytki drukowanej izolację z taśmy dwustronnej. Na koniec przymocowywano scyntylator w obudowie do płytki fotopowielacza tak, by dziurka w folii znalazła się naprzeciw fotopowielacza. Ostatni etap montażu polegał na złożeniu wykonanych dotąd dużych części do środka obudowy. Za pomocą oscyloskopu sprawdzano, czy wszystkie cztery w ten sposób wykonane detektory funkcjonują prawidłowo. Prawidłowość pracy detektorów sprawdzano na podstawie porównania obserwowanego na oscyloskopie graficznego profilu sygnałów na trzech wyjściach detektora (oznaczonych w instrukcji jako "Test points") ze zdjęciami zamieszczonymi w suplemencie do instrukcji [4]. Poniżej zamieszczono porównanie profili sygnałów z instrukcji z przykładowymi pomiarami sygnałów zebranych na wyjściach jednego ze zmontowanych detektorów:



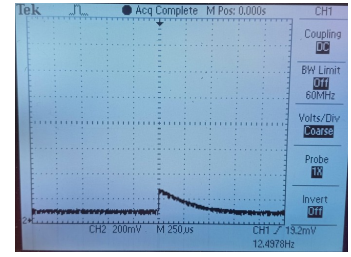
Rysunek 3: Profile sygnałów otrzymanych na wyjściach kontrolnych "Test points", zamieszczone w suplemencie do instrukcji [4]. Profil A odpowiada sygnałowi na wyjściu SiPMa. Profil B odpowiada sygnałowi wzmocnionemu przez PCB, a C odpowiada sygnałowi wydłużonemu przez detektor szczytowy, przekazywanemu do ADC



(a)



(b)



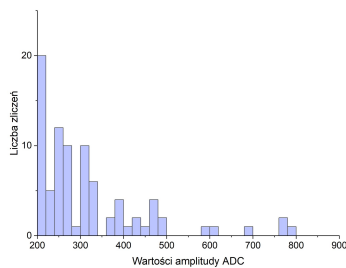
(c)

Rysunek 4: Profile sygnałów na wyjściach "Test points" jednego ze zmontowanych detektorów obserwowane na ekranie oscyloskopu.

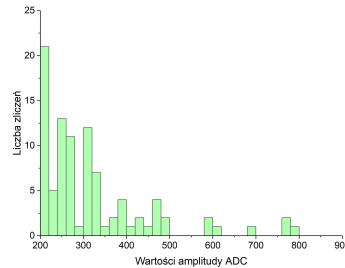
Na rysunku 4(a) widoczny jest krótki szczyt o szerokości ok $1 \mu s$. Bardzo przypomina profil A z rysunku 3. Na rysunku 4(b) widać wzmocnienie (w przybliżeniu dwudziestokrotne) szczytu z rysunku 4(a). Profil sygnału jest istotnie wzmocniony, tak jak profil B z rysunku 3. Na rysunku 4(c) widać znaczne wydłużenie wzmocnionego szczytu z rysunku 4(b). Profil sygnału jest wydłużony, podobnie jak profil sygnału C na rysunku 3. Na podstawie graficznej analizy profili i ze względu na to, że proporcje (wzmocnienia/wydłużenia) profili sygnałów na rysunkach 4(a), 4(b) i 5(a) są bardzo podobne do tych między profilami A, B i C na rysunku 3 można ocenić, że sygnały otrzymane w trakcie sprawdzania pracy detektora przypominają te z instrukcji. Na podstawie pomiarów sygnałów należy zatem przyjąć, że badany detektor funkcjonował prawidłowo. Wszystkie detektory sprawdzono w opisany powyżej sposób i uzyskano takie same wyniki jak te podane powyżej. Można zatem ocenić, że wszystkie zmontowane detektory pracowały prawidłowo.

4.2 Pomiary wykonane detektorami oraz ich analiza

Testowano wybrane detektory, pracujące w funkcji liczników mionów w celu weryfikacji poprawności ich działania. Wykorzystano do tego dwa detektory. Jeden z detektorów, który w raporcie określono jako Seliwan został wykonany przez członków podgrupy. Wykorzystano również detektor referencyjny, wykonany przez osobę z poza grupy projektowej. Detektor ten w raporcie nazwano Gosia. Oba detektory wybrano na podstawie oceny ich jakości i dokładności. Pomiary wykonywano w dwóch konfiguracjach: pojedynczego detektora i dwóch detektorów pracujących w trybie Master/Slave. Pomiary dla pojedynczych detektorów trwały około 2 godzin, przy czym dla jeden detektor wykonywał pomiary 7 minut dłużej, niż drugi. Pomiary w trybie Master/Slave trwały 26 godzin i 36 minut. Mierzono amplitudę strumienia padających mionów w funkcji czasu od początku pomiaru. Ze względu na pominięcie etapu kalibracji detektorów do analizy danych wykorzystano wartości sygnału ADC.



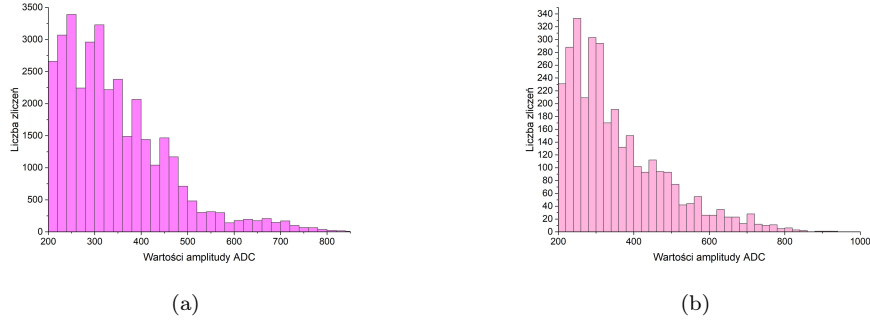
(a)



(b)

Rysunek 5: Porównanie histogramów liczby zliczeń danej wartości amplitudy ADC wykrytej przez detektory pracujące w trybie pojedynczego pomiaru (a) histogram dla detektora Gosia (b) histogram dla detektora Seliwan

Histogramy 5(a) i 5(b) charakteryzują się praktycznie identycznym rozkładem i wysokością słupków. Zauważono również, iż dla tych histogramów wraz ze zwiększaniem się wartości amplitudy sygnału ADC liczba zliczeń spada nieliniowo.



Rysunek 6: Porównanie histogramów liczby zliczeń danej wartości amplitudy ADC wykrytej przez detektory pracujących w trybie Master/Slave (a) histogram dla detektora Gosia (b) histogram dla detektora Seliwan

Histogramy 6(a) i 6(b) poddano analizie i stwierdzono, iż liczba zliczeń zarejestrowanych przez detektor Seliwan pracujący w trybie slave w stosunku do detektora Gosia pracującego w trybie master jest w przybliżeniu 10 razy mniejsza. Dla maksimum zliczeń stosunek zliczeń slave/master wynosi około 0,098. Stosunek zliczeń slave/master obliczono również dla pozostałych par słupków z obu wykresów i uzyskano zbiór wartości bliskich 0,1. Z drugiej strony na podstawie graficznej analizy histogramów stwierdzono, że ich kształt jest bardzo podobny pomimo różnego rzędu wielkości w ilości zliczeń. Porównując otrzymane histogramy 6(a), 6(b) z referencyjnym histogramem zawartym na stronie projektu [5] potwierdzono poprawność działania badanych detektorów. Na referencyjnym wykresie widać, że ilość zliczeń koincydencyjnych jest około dwa razy mniejsza niż całkowita ilość zliczeń. W przypadku detektorów Gosia i Seliwan ilość zliczeń rejestrowanych przez Gosię jest prawie dziesięciokrotnie większa, niż ilość zliczeń rejestrowanych przez Seliwana. Pomimo różnicy w stosunku ilości zliczeń widać, że w obydwu przypadkach stosunek ten jest ustalony. Stałość stosunku w obu przypadkach świadczy o zgodności pomiarów zebranych przez badane detektory z detektorami referencyjnymi. Obserwowalne zmniejszenie liczby zliczeń na detektorze slave w stosunku do detektora master pozwala wnioskować, że tryb Master/Slave znacznie poprawił jakość pozyskanych danych, usuwając szumy. Ilość zliczeń dla detektorów Gosia i Seliwan była wyraźnie mniejsza od ilości zliczeń detektorów wykonanych przed poprzednią grupą projektową, które nie posiadały modyfikacji opisanych we wcześniejszej części raportu. Należy zatem przyjąć, iż wprowadzone modyfikacje poprawiły działanie detektorów.

5 Podsumowanie

W niniejszym raporcie omówiono czynności wykonane przez grupę projektową w trakcie trwania Zespołowego Projektu Studenckiego - Cosmic Watch realizowanego w semestrze letnim roku akademickiego 2024/2025. Raport rozpoczęto od opisanie budowy i zasady działania detektorów i wskazania modyfikacji w budowie zastosowanych przez uczestników. Następnie omówiono czynności wykonane przez podgrupę projektową numer 1: obrobienie części obudów detektorów i zaślepek by ułatwić montaż detektorów oraz instalację i zaprogramowanie silnika krokowego na ramie z detektorami. W dalszej części opisano montaż wykonanych przez podgrupę numer 2 detektorów, zaprezentowano profile sygnałów, które pozwoliły ocenić że wykonane detektory pracują prawidłowo. Na koniec przedstawiono wyniki pomiarów zebranych za pomocą detektorów i stwierdzono, że są one dodatkową wskazówką za poprawnym ich działaniem i za skutecznością wprowadzonych modyfikacji budowy.

Literatura

- [1] S. N. Axani *et al.*, The CosmicWatch Desktop Muon Detector: a self-contained, pocket sized particle detector, Journal of Instrumentation, 2018, <https://arxiv.org/abs/1801.03029>.
- [2] [https://www.waveshare.com/wiki/Stepper_Motor_HAT_\(B\)](https://www.waveshare.com/wiki/Stepper_Motor_HAT_(B)).
- [3] <https://wiki.seeedstudio.com/Grove-12-bit-Magnetic-Rotary-Position-Sensor-AS5600/>.
- [4] <https://github.com/spenceraxani/cosmicwatch-desktop-muon-detector-v2>.
- [5] <http://www.cosmicwatch.lns.mit.edu/detectorexamples>.