

# Globalna rejestracja cząstek z kosmosu, projekt CREDO (cz. II)

## Global registration of particles from space, CREDO project (p. II)

**prof. nzw. dr hab. Robert Kamiński**

Instytut Fizyki Jądrowej PAN im. Henryka Niewodniczańskiego,  
projekt CREDO, ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

**mgr inż. Michał Niedźwiecki**

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, projekt CREDO,  
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono opracowany w Instytucie Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie projekt CREDO. Omówiono metodę oraz znaczenie rejestracji i analizy promieniowania kosmicznego i radioaktywnego za pomocą małych detektorów znajdujących się np. w popularnych smartfonach. Rejestracja ta ma służyć wielkoskalowemu badaniu, m.in. różnorodnego promieniowania dochodzącego nieprzerwanie z kosmosu do Ziemi. Ma ono ogromne znaczenie naukowe i wywiera wpływ np. na życie biologiczne na Ziemi i na funkcjonowanie nowoczesnego sprzętu elektronicznego. Dla astrofizyków rejestracja ta może być nieocenionym źródłem informacji o mało znanym wysokoenergetycznym widmie promieniowania kosmicznego i przez to dostarczyć niezbędnych informacji do rozwiązania największych zagadek współczesnej kosmologii, jak np. ciemnej materii i energii. Zaproponowana metoda, ze względu na jej formę tzw. nauki obywatelskiej (popularna *citizen science*), ma także duże znaczenie socjologiczne i może obejmować wszystkich mieszkańców Ziemi.

**Słowa kluczowe:** promieniowanie kosmiczne, detektory światła, światłoczułe matryce, smartfony, szum elektromagnetyczny, piksele, citizen science

**Abstract:** The article presents the CREDO project developed at the Institute of Nuclear Physics of the Polish Academy of Sciences in Krakow. The method and meaning of registration and analysis of cosmic rays and radioactive radiation using small detectors located, for example, in the popular smartphones are discussed. This registration is to serve a large-scale study, among others, of various radiation reaching the Earth continuously from space and having great scientific significance and exerting influence on eg. biological life on Earth and on the functioning of modern electronic equipment. For astrophysicists, this registration can be an invaluable source of information about the little-known high-energy spectrum of the cosmic rays and thus provide the necessary information to solve the greatest mysteries of modern cosmology such as dark matter and dark energy. The proposed method, due to its form of citizen science is also of great sociological importance and can include all the inhabitants of the Earth

**Keywords:** cosmic radiation, light detectors, photosensitive matrices, smartphones, electromagnetic noise, pixels, citizen science

### IMPLEMENTACJA OPROGRAMOWANIA

Użycie telefonu komórkowego oraz systemu operacyjnego Android daje szereg możliwości, ale stawia też pewne wymagania. Aplikacja musi uwzględniać wymagania naukowe, techniczne i użytkowe projektu Citizen Science,

### WYMAGANIA NAUKOWE

Z punktu widzenia naukowego najbardziej pożądanym trybem pracy kamery jest tryb, w którym obraz jest dostarczany w formie surowym, czyli jest pozbawiony jakiegokolwiek obróbki poprawiającej jakość obrazu, a w szczególności automatycznego usuwania szumu oraz pozbawiony kompresji stratnej. Ponadto sygnał powinien być zbierany ze wszystkich czujników na matrycy w sposób ciągły, czyli nie powinno być przerw w naświetlaniu kliszy cyfrowej, ponieważ tylko taki tryb pracy

gwarantuje zarejestrowanie wszystkich uderzeń cząstek promieniowania kosmicznego.

Dodatkową wartość naukową dostarcza odczyt z czujników akcelerometru, GPS, kompasu cyfrowego i zegara systemowego, który jest automatycznie synchronizowany przez system operacyjny.

### WYMAGANIA TECHNICZNE

System Android daje dostęp do niewielu ustawień pracy kamery. Kamera może pracować w trybie nagrywania i trybie podglądu. W trybie nagrywania, obraz jest zapisywany do pliku przy użyciu kompresji stratnej i wszystkich algorytmów poprawiających jakość obrazu oraz usuwających szum. Z tego powodu ten tryb pracy kamery jest nieprzydatny naukowo. Ten tryb pracy byłby też trudny do realizacji z powodów technicznych, gdyż taki plik

trzeba by składować w pamięci telefonu do czasu przetworzenia go przez algorytm detekcji i później kasować, a pamięć telefonu ma ograniczoną liczbę cykli zapisu.

W trybie podglądu, aplikacja otrzymuje zawartość binarną klatek obrazu w czasie rzeczywistym. Dodatkowo, w celu oszczędzania energii, klatki obrazu dla podglądu nie są poddawane obróbce przez system operacyjny, ale niestety mogą być poddawane obróbce algorytmami zainstalowanymi bezpośrednio w kamerze, a obecnymi zwłaszcza w modelach high-end produkowanych od roku 2016. Dzięki temu, zwłaszcza w starszych modelach z niższej półki cenowej, możliwe jest wykorzystanie tego trybu pracy kamery do detekcji cząstek promieniowania kosmicznego. W większości modeli telefonów, kamera w trybie podglądu dostarcza klatki obrazu z częstotliwością 30 klatek na sekundę. Nie ma jednak informacji przez jaki czas klatka obrazu była faktycznie naświetlana i czy w związku z tym wystąpiły przedziały czasu, w których czujnik kamery mógł nie zbierać informacji o zderzeniach z cząstkami promieniowania kosmicznego. Jednak, jeżeli kamera została przez użytkownika szczelnie zakryta przed światłem zewnętrznym, można mieć pewność, że te przedziały czasu będą najkrótsze z możliwych dla danego modelu telefonu. Kamera w trybie podglądu nie pracuje z pełną rozdzielczością. Zazwyczaj system operacyjny umożliwia pracę z maksymalną rozdzielczością HD (1280x720) lub FullHD (1920x1080) podczas gdy kamera umożliwia nagrywanie lub robienie zdjęć w rozdzielczości 4K. Wstępne badania pokazały jednak, że nie stanowi to problemu. Przekątna typowego czujnika matrycy kamery wynosi około 5-6mm i ma proporcje 4:3. Dzięki temu, że uderzenie cząstki powoduje rozbłysk pokrywający kilka sąsiadujących ze sobą pikseli, zastosowanie tylko 1/4 pełnej rozdzielczości kamery nie powoduje pogorszenia dokładności detektora, a jednocześnie znacząco zmniejsza ilość danych do przetworzenia. Jest to tym bardziej istotne, że kamera umieszcza zawartość binarną klatek obrazu w odpowiednich buforach, które muszą zostać zwolnione po ich przetworzeniu przez aplikację. Jeżeli bufor nie zostanie zwolniony przed zarejestrowaniem kolejnej klatki, jej zawartość jest tracona.

Smartfon nie posiada aktywnego chłodzenia. Dlatego nawet, jeżeli jest zasilany z ładowarki, to oszczędzanie energii jest konieczne aby nie doszło do przegrzania. Przegrzanie telefonu nie powinno spowodować jego uszkodzenia ponieważ posiada on szereg systemowych mechanizmów zapobiegających temu. Jednym z nich jest spowolnienie pracy procesora głównego, innym automatyczne wyłączenie urządzeń (np. kamery) lub całego telefonu. Przegrzanie telefonu powoduje też szybsze zużycie baterii. W tym celu aplikacja, w miarę możliwości technicznych, korzysta z rozdzielczości stanowiącej 1/4 pełnej rozdzielczości kamery. Dodatkowo, aplikacja wykorzystuje pewną funkcję systemu Android, która pozwala na pracę kamery po wyłączeniu ekranu. Funkcja ta polega na tym, że najpierw tworzone jest okno wyświetlane nad oknami pozostałych aplikacji (ang. top most). Następnie pod to okno przekierowany zostaje podgląd z kamery. Dzięki temu, kamera pracuje nadal pomimo przełączenia na inną aplikację lub wyłączenia ekranu. Wyłączony ekran to dodatkowa oszczędność energii.

W celu jak największego zoptymalizowania procesu obróbki klatki obrazu, odbywa się ona w osobnych wątkach, dzięki czemu

wykorzystywane są wszystkie rdzenie procesora. Ponadto aplikacja posiada szereg mechanizmów zabezpieczających przed przegrzaniem i rozładowaniem baterii. Jeżeli telefon posiada termometr wewnętrzny, detekcja zostanie wstrzymana jeżeli telefon osiągnie próg zbyt wysokiej temperatury oraz zostanie wznowiona gdy temperatura spadnie poniżej odpowiedniego progu.

Pomimo podłączenia telefonu do ładowarki, bateria może być i tak rozładowywana ponieważ moc ładowarki może nie pokrywać zapotrzebowania telefonu na energię. Dlatego, jeżeli poziom naładowania spadnie poniżej progu niskiej wartości, detekcja zostanie wstrzymana do czasu, kiedy poziom naładowania energii nie osiągnie odpowiednio wysokiego progu. Progi temperatury i poziomu naładowania baterii można ustalać z poziomu ustawień aplikacji.

Z wykorzystaniem telefonów komórkowych wiążą się następujące problemy techniczne, które prowadzą do pewnych wniosków lub do użycia opracowanych sposobów radzenia sobie z nimi.

1. Problem: uczestnicy nie zawsze dopilnowują by prawidłowo zakryć kamerę.

Metoda: zastosowanie progów jasności i autokalibracji tych progów. Jeżeli kamera nie jest prawidłowo zakryta, użytkownik jest o tym informowany w wyraźny sposób.

1. Problem: nowsze i droższe modele telefonów posiadają lepsze, sprzętowe mechanizmy usuwania szumów, które mogą skutecznie eliminować rozbłyski z klatki obrazu. Wniosek: Nowe i drogie telefony, z dobrym mechanizmem usuwania szumów, niestety nie nadają się do detekcji.

2. Problem: działanie kamery i algorytmu przetwarzającego obraz powoduje znaczne zużycie energii, co może prowadzić do szybkiego rozładowania baterii i nagrzewania się telefonu.

Metoda: zaleca się podłączać telefon do ładowarki podczas trwania detekcji. Ponadto aplikacja sama wstrzymuje detekcję, jeżeli temperatura telefonu osiągnęła wartość wyższą niż ustawiona, lub poziom naładowania baterii spadł poniżej ustawionej wartości. W systemach Android do wersji 9.0 możliwa jest praca kamery pomimo wyłączenia ekranu. To pozwala znacząco zmniejszyć nagrzewanie się telefonu.

Pomimo opisanych trudności technicznych, przedstawiony detektor jest w stanie dostarczać dane wartościowe naukowo. Zegar telefonu jest automatycznie synchronizowany, dzięki czemu podaje on czas z dokładnością do sekundy. Rozbłysk na obrazie często ma kształt podłużny i jeżeli telefon jest wyposażony w kompas, można określić kierunek z którego nadleciała cząstka. Te dwie wielkości: czas i kierunek wystarczają aby dana obserwacja mogła mieć poważne znaczenie naukowe.

## WYMAGANIA CITIZEN SCIENCE

Citizen Science to ogólnoswiatowa społeczność wolontariuszy, która chce brać udział w prowadzeniu badań naukowych. Społeczność składa się z osób w różnym wieku, o różnym poziomie i kierunku wykształcenia oraz mówiących w różnych językach. Aby maksymalnie wykorzystać potencjał uczestników, aplikacja musi być jak najbardziej prosta i tania w instalacji i użytkowaniu

oraz jak najszerzej dostępna. To gwarantuje, że uczestnik będzie potrafił prawidłowo zainstalować, włączyć i używać aplikacji na swoim urządzeniu.

Aplikacja została napisana na system Android, ponieważ jest to najpopularniejszy system operacyjny na smartfony, zwłaszcza smartfony tanie, których kamery nie posiadają zaawansowanych mechanizmów usuwania szumów. Instalacja aplikacji jest możliwie bezproblemowa. Wystarczy zainstalować aplikację z ogólnego sklepu Google Play. Używanie konta Google Play wymaga jednak zalogowania się na konto Google, a nie każdy użytkownik chce go zakładać i używać. Dlatego aplikację można też pobrać bezpośrednio ze strony internetowej projektu CREDO ([credo.science](http://credo.science)) i zainstalować samemu.

Interfejs aplikacji został uproszczony do minimum. Przy pierwszym uruchomieniu, aplikacja prosi o zalogowanie się lub rejestrację nowego konta uczestnika projektu CREDO. Po pomyślnym zalogowaniu się, aplikacja wyświetla ekran z krótkim opisem projektu i z jednym przyciskiem po kliknięciu którego aplikacja przechodzi do ekranu detektora. Ekran detektora zawiera jeden przycisk, którego naciśnięcie powoduje włączenie detekcji. Jeżeli detekcja została wyłączona, a użytkownik nie zasłonił poprawnie kamery, to aplikacja wyświetli duży wyraźny napis z informacją o tym. Takie podejście zastosowano aby jak największa grupa uczestników powinna poradzić sobie z prawidłowym uruchomieniem detekcji.

W czasie działania detekcji, aplikacja wyświetla podstawowe statystyki: czas działania detektora oraz liczby wykryć sygnałów. Bardziej zaawansowani użytkownicy mogą kliknąć w przycisk "statystyki dla nerdów". Powoduje to wyświetlenie tabeli, która zawiera dodatkowe informacje jak średnia jasność klatki obrazu czy średnia jasność najjaśniejszego piksela.

Uczestnicy Citizen Science chcą znać swój wkład w eksperyment naukowy. Dlatego aplikacja po rozwinięciu menu daje dostęp do zaawansowanych funkcji. Jedną z tych funkcji jest przegląd wykryć. Ekran przeglądu zawiera wycinek obrazu zawierający rozbłysk wraz z pozostałymi informacjami zebranymi w czasie wystąpienia zdarzenia i wysłanymi na serwer projektu.

Uczestnicy często interesują się w jaki sposób działa ich narzędzie badawcze i chcą się aktywnie angażować w jego udoskonalanie. Dlatego kod źródłowy aplikacji został udostępniony publicznie na licencji MIT (Massachusetts Institute of Technology). Każdy uczestnik, który potrafi programować, może ściągnąć kod źródłowy z serwisu GitHub [7], dokonać w nim zmian i wysłać poprawki do autorów aplikacji.

## TESTOWANIE SMARTFONÓW DO BADAŃ NAUKOWYCH

W celu potwierdzenia, że dane uzyskane w eksperymencie mają wartość naukową, zbudowano stanowisko badawcze składające się z kilkunastu smartfonów. Następnie zebrano wyniki detekcji i poddano je analizie statystycznej metodą QGP (Quantum Gravity Previewer) [8]. Celem badania jest potwierdzenie, że uzyskane wyniki nie są losowe.

## PRZYGOTOWANIE DO BADANIA

Pierwsze, testowe uruchomienie systemu odbyło się już w 2017 roku, a w połowie roku 2018 dopracowano aplikację na smartfony oraz sposób gromadzenia danych. Informacje o projekcie zostały szeroko opublikowane w mediach, co zaowocowało pozyskaniem ponad 1000 aktywnych nowych uczestników. Na podstawie danych zbieranych do października 2018 roku wybrano kilka modeli smartfonów, które okazały się najlepsze do detekcji promieniowania kosmicznego. Kryterium oceny modelu smartfona były:

- •stabilność działania - długi i ciągły czas pracy detektora oceniany na podstawie cyklicznie wysyłanych do serwera komunikatów „ping”, które zawierają informacje na temat czasu działania detekcji i liczby przetworzonych klatek obrazu,
- •liczby zarejestrowanych sygnałów (po usunięciu hot-pixeli i fałszywych detekcji wynikających z nieprawidłowego zakrycia kamery lub innych uszkodzeń aparatu) w stosunku do czasu pracy detektora,
- •mała liczba lub brak hot-pixeli oraz innych artefaktów wynikających z uszkodzeń aparatu,
- •cena i dostępność danego modelu na Polskim rynku telefonów nowych lub używanych.

Na podstawie tych kryteriów oraz danych zebranych od uczestników wybrano i zakupiono 3 modele smartfonów na rynku telefonów używanych:

- •Samsung SM-350G (4 szt.),
- •Huawei Y560-L01 (4 szt.),
- •Samsung S3 Mini i8190N (2 szt.).

Telefony ułożono obok siebie w tym samym pomieszczeniu i uruchomiono na nich aplikację do detekcji. Działanie smartfonów w warunkach laboratoryjnych pozwoliło uniknąć przekłamań wynikających z błędów użytkowników i różnicy środowisk w jakich pracują.

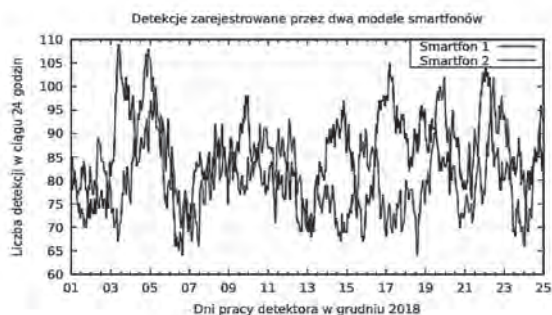
## PRZEBIEG EKSPERYMENTU

Dołożono wszelkich starań, aby smartfony działały w identycznych warunkach. Między innymi zostały ułożone w tym samym pomieszczeniu w odległości ok. 5cm od siebie. Zostały podłączone do ładowania do tej samej stacji ładującej za pomocą nowych kabli USB tej samej marki. W ostatnim tygodniu listopada 2018 roku została włączona detekcja. W niniejszym artykule przedstawiono wstępne wyniki detekcji prowadzonych do końca 2018 roku. Na rysunku 3 zaprezentowane są liczby zliczeń dwóch niezależnych smartfonów. Miejsca, w których widać jednoczesny wzrost notowań obu detektorów wskazują na możliwą rejestrację nie pojedynczej cząstki ale promieniowania wtórnego z pęku powstałego na jeden ze sposobów przedstawionych na Rys. 1. Brak takiego jednoczesnego wzrostu znaczy, że zarejestrowane zdarzenia w obu smartfonach nie były powiązane ze sobą (uderzenia pojedynczych niezależnych cząstek).

## ANALIZA WYNIKÓW

W pierwszej kolejności sprawdzono wizualnie obrazy zarejestrowanych sygnałów na obecność artefaktów lub hot-pixeli (czyli fałszywych danych) i nie stwierdzono ich występowania.

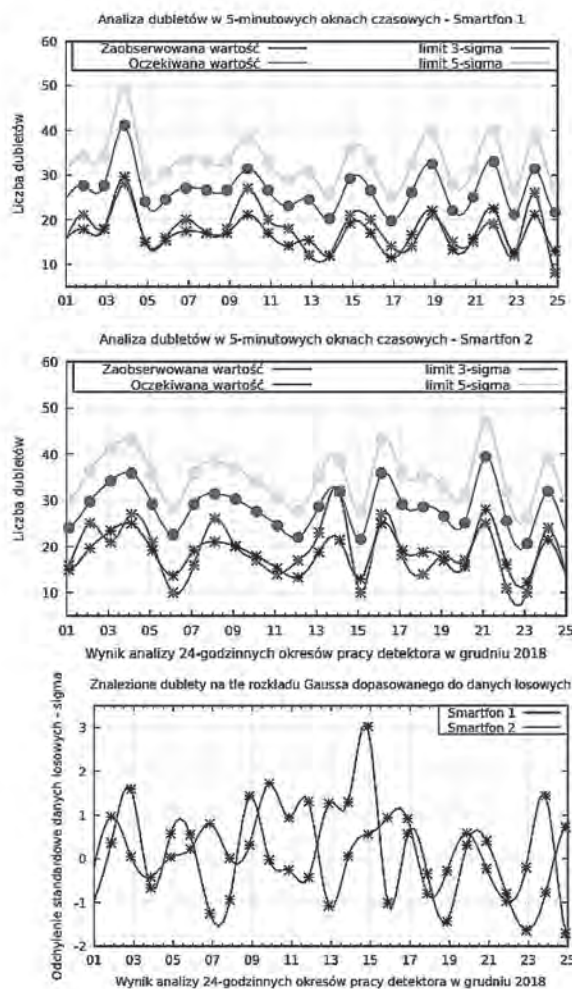
*Ciąg dalszy na str. 18*



Rys. 3. Liczba detekcji zarejestrowanych przez dwa niezależne modele Samsung G350.39

Następnie wykonano na nich analizę statystyczną algorytmem QGP, która polega na zliczeniu dubletów rejestracji w 5-minutowych oknach dla 24-godzinnych okresów pomiarowych.

Na rysunku 4 otrzymane rezultaty (czerwona linia) porównano z wynikami analizy teoretycznej (niebieska linia) dla takiej samej liczby detekcji wygenerowanych w okresie 24-godzinny w losowych odstępach czasu. Te losowania i analizy powtórzo 10000 razy, a dla wybranych danych dopasowano rozkład Gaussa. Jeśli występuje znacznie wyższa wartość wskazywana przez linię czerwoną w stosunku do niebieskiej to oznacza, że



Rys 4. Wynik analizy QGP dla smartfonów z rys. 3

zaobserwowano więcej dubletów niż w średniej ich liczbie dla danych losowych czyli, że być może zaobserwowany został pęk wtórnego promieniowania kosmicznego. Czarne linie na dolnych wykresach dla każdego smartfona przedstawiają wartości tych różnic w jednostkach odchyień standardowych liczby pomiarów.

## POZOSTAŁE BADANIA

Od połowy roku 2018 prowadzone są prace nad algorytmami automatycznej klasyfikacji detekcji zderzeń na podstawie ich obrazu (Rys. 5). Zderzenia są klasyfikowane wg czterech rodzajów.



Rys. 5. Przykładowe ślady rozbłysków na matrycy kamery smartfona, od lewej do prawej: track, spot, worm, multiples

Obrazy track to ślady mionów o energii rzędu GeV (gigaelektronowolty), które są wtórnym promieniowaniem kosmicznym. Według [9] obrazy spot są efektem pochłonięcia niskoenergetycznego (o energii rzędu MeV [megaelektronowolty]) elektronu, więc powinny być odrzucone. Podobny ślad może jednak wyprodukować też mion z wtórnego promieniowania kosmicznego padającego w przybliżeniu prostopadle do powierzchni matrycy. Poprawne interpretowanie tych śladów wymaga dalszych analiz prowadzonych zarówno przez doświadczonych pracowników naukowych jak i przez, zachęanych do tej pracy wolontariuszy. Obrazy worm powstają w wyniku pochłonięcia elektronu o energii rzędu MeV pochodzącego z rozpadu radioaktywnego atomu, który znajdował się niedaleko matrycy aparatu. Obrazy multiple są wynikiem bardzo ciekawym bo mogą być np. śladem złożonych oddziaływań cząstki kosmicznej z matrycą, śladem jednoczesnego uderzenia kilku takich cząstek w matrycę lub też wynikiem niedoskonałości obecnego algorytmu, który wykrywa rozbłyski i wycina je z pewnym marginesem pikseli. W projekcie CREDO możliwości te są intensywnie badane pod kątem identyfikacji ich źródła oraz interpretacji możliwych scenariuszy promieniowania kosmicznego. W ramach citizen science zapraszani są do tego również wolontariusze.

## PODSUMOWANIE I PLANY NA PRZYSZŁOŚĆ

Przedstawiony projekt rozproszonego detektora spełnia warunki techniczne do rejestracji danych, narzędzia naukowego (platformy naukowej) i warunki Citizen Science. Może on dostarczać dane wartościowe naukowo, a do jego zbudowania uczestnik projektu potrzebuje smartfon, który zapewne posiada lub może posiąść niskim dla niego kosztem. Musi na nim zainstalować odpowiednią aplikację, co nie jest operacją trudną. Musi też zadbać o to by telefon miał dostęp do internetu (np. przez skonfigurowanie sieci WiFi). Użycie detektora sprowadza

się do włączenia aplikacji i zakrycia kamery telefonu. Rejestracja sygnałów odbywa się wtedy już automatycznie.

Od maja 2018, kiedy projekt CREDO oficjalnie rozpoczął zbieranie rejestrowanych cząstek z kosmosu za pomocą smartfonów (Festiwal Nauki i Sztuki w Krakowie 2018, link w [3]), do końca tego roku dokonano około 10,000 instalacji aplikacji do detekcji. Spośród nich jest lub było ponad 6000 aktywnych użytkowników, ponad 2000 zarejestrowanych drużyn i prawie 2 miliony wykryć (kandydatury na ślady cząstek). Daje to w sumie około 100 lat łącznego czasu pracy wszystkich urzędów.

Analiza wyników zebranych na serwerze projektu CREDO wykonywana jest przez grupę doświadczonych, pracą w dużych obserwatoriach astrofizycznych np. Pierre Auger, naukowców w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie. Gwarantuje to rzetelną analizę i możliwość publikacji wyników w renomowanych czasopismach naukowych. Zgodnie z przesłaniem Citizen Science, każdy uczestnik projektu CREDO, którego detektor (np. smartfon) bierze udział w rejestracji promieniowania kosmicznego ma pełne prawo do bycia współautorem opublikowanych wyników. Może też brać czynny udział w ich opracowywaniu i udoskonalaniu używanego oprogramowania.

Oprócz opisanych wyżej smartfonów z małymi matrycami – detektorami, planowane jest w ramach projektu CREDO budowanie i rozpowszechnianie (np. w szkołach) stacji większych detektorów składających się z jednego lub więcej niewielkich scyntylatorów (powierzchnia ok. 25 cm<sup>2</sup>). Będzie to wykonywane np. wg otwartego projektu Cosmic Watch rozwijanego w MIT oraz NCBJ (Narodowe Centrum Badań Jądrowych) lub według projektu CosmicPi z CERNu. Detektory scyntylacyjne będą mogły działać nieprzerwanie przez 24 godziny na dobę rejestrując czasy przylotu wtórnego promieniowania kosmicznego ze znacznie większą częstotliwością niż matryce smartfonów (powierzchnia ok. 0.2 cm<sup>2</sup>), jednak bez możliwości rejestracji śladów cząstek. Zarejestrowane dane, podobnie jak w przypadku smartfonów, będą przesyłane do centralnej bazy danych, obecnie utrzymanej i rozwijanej przez ACK Cyfronet AGH.

W pierwszej kilkumiesięcznej fazie tego zadania planowane jest rozmieszczenie tak skonstruowanych stacji detektorów w kilkudziesięciu szkołach w Polsce i przetestowanie ich działania w sieci CREDO. W następnej fazie stacje mają zostać udostępnione wszystkim zainteresowanym szkołom i mają umożliwić nieprzerwany dostęp uczniom do rejestrowanych wyników z danego detektora i wszystkich innych. Wspomagane będzie to ciągłym kontaktem członków projektu CREDO z zainteresowanymi uczniami

i nauczycielami w formie wymiany naukowej, dostarczania materiałów o najciekawszych nowych i starszych wynikach z astrofizyki i fizyki. Kolejnym etapem jest rozpowszechnienie tych stacji detektorów w całej Europie, a następnie na całym świecie. Utworzy to globalną sieć detektorów ze współpracującymi ze sobą wolontariuszami i pracownikami naukowymi.

#### Podziękowania

*Autorzy artykułu dziękują twórcy projektu CREDO Piotrowi Homoli z IFJ PAN w Krakowie za pomoc w napisaniu tekstu i cenne uwagi merytoryczne.*

#### LITERATURA

- [1] The Pierre Auger Collaboration, A. Aab et al, Nucl. Instr. Meth. A 798 (2015) 172-213; DOI: 10.1016/j.nima.2015.06.058, „The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory”; <https://www.auger.org/>
- [2] M.G. Aartsen et al., JINST 12 P03012 (2017), DOI:10.1088/1748-0221/12/03/P03012, "The IceCube Neutrino Observatory: instrumentation and online systems"; <https://icecube.wisc.edu/>
- [3] <https://credo.science/>
- [4] A. L. Morozova, et al., Phys. Chem. Earth A 25, 321 (2000); A. J. Foppiano, Geofis. Int. 47, 179 (2008); P. L'Huissier, Proc. AGU Fall Meeting, NH41A-1582. (2012); N. V. Romanova, Geomagn. Aeronomy 55, 219 (2015); <https://www.dropbox.com/s/m6o7ihmwylqdxdt/201810.pdf?dl=0>
- [5] E. Korzeniowska-Rejmer. 2008. „Radon w gruncie i techniki redukcji jego stężenia w obiektach budowlanych”. Czasopismo Techniczne Politechniki Krakowskiej 1. <https://suw.biblos.pk.edu.pl/downloadResource&mId=144028>, Kozak K., J. Mazur, M. Majka. 2018. „Radon – naturalny czynnik rakotwórczy na stanowiskach pracy”. Atest 6. Nauka i Technika. <https://radon.ifj.edu.pl/>
- [6] Murawski K. 1997. „Zjawiska fizyczne w atmosferze Słońca I” Urania 5:130
- [7] <https://github.com/credo-science/credo-detector-android>
- [8] Quantum Gravity Previewer, <https://press.ifj.edu.pl/news/2018/10/04/>
- [9] J. Vandenbroucke et al., Journal of Instrumentation, Volume 11, Issue 04, pp. P04019 (2016), DOI: 10.1088/1748-0221/11/04/P04019, Measurement of camera image sensor depletion thickness with cosmic rays