

Kielce, 5 luty 2021 r.

prof. dr hab. Zbigniew Włodarczyk  
Instytut Fizyki  
Uniwersytet Jana Kochanowskiego  
w Kielcach

**Opinia**  
**o pracy doktorskiej mgr Katarzyny Adamczyk**  
**pt. „Optymalizacja metod analizy danych z teleskopów czerenkowskich CTA”**

Tematem rozprawy doktorskiej mgr Katarzyny Adamczyk jest analiza rozwoju i detekcji wielkich pęków atmosferycznych inicjowanych fotonami pierwotnego promieniowania kosmicznego, ukierunkowana na wypracowanie optymalnej metody rekonstrukcji wielkich pęków atmosferycznych rejestrowanych przez teleskopy czerenkowskie w różnych warunkach atmosferycznych.

Badania promieniowania kosmicznego wysokich energii są szczególnie istotne dla wyjaśnienia mechanizmów powstawania, przyspieszania i transportu pierwotnego promieniowania. Od ponad pięćdziesięciu lat, problem kształtu widma energetycznego, składu chemicznego promieni kosmicznych i kierunków przylotu cząstek pierwotnego promieniowania kosmicznego (poszukiwanie źródeł promieniowania kosmicznego) są przedmiotem intensywnych badań zarówno doświadczalnych jak i teoretycznych. Potęgowe widmo energetyczne pierwotnego promieniowania kosmicznego,  $N(>E) \sim E^{-2}$ , daje mały strumień cząstek o wysokich energiach czyli rejestracja takich cząstek wymaga detektora o dużej powierzchni. Takie detektory mogą być eksponowane tylko na powierzchni Ziemi, gdzie rejestrowane są wielkie pęki atmosferyczne. Detekcja promieniowania kosmicznego o wysokich energiach wymaga użycia aparatur o dużej powierzchni i stosowania pośrednich metod analizy. W astrofizyce naziemnej, ukierunkowanej na badania źródeł promieniowania kosmicznego, od wielu lat wykorzystywane są teleskopy czerenkowskie, gdzie podczas analizy danych duże znaczenie mają warunki atmosferyczne. Ilość produkowanego światła Czerenkowa jest zależna od profilu atmosfery (zależność współczynnika załamania od wysokości) oraz absorpcji i rozpraszania światła. Warunki pogodowe znacząco wpływają także na efektywny czas obserwacji, ponieważ obecność chmur zmniejsza ilość promieniowania Czerenkowa docierającą do poziomu obserwacji, co osłabia częstość rejestracji i utrudnia analizę zebranych danych.

Modelowanie rozwoju kaskady ma olbrzymie znaczenie dla interpretacji rejestrowanych pęków atmosferycznych. W eksperymentach rejestrujących wielkie pęki atmosferyczne zasadniczym problemem jest analiza i interpretacja materiału eksperymentalnego. Próby poprawnego odtworzenia rozkładów pęku wymagają precyzyjnych symulacji rozwoju pęków atmosferycznych i ich rejestracji w konkretnej aparaturze pomiarowej. Do symulacji rozwoju pęków używane są

modele procesów produkcji wielorodnej w obszarze energii wykraczającym poza energię dostępne w akceleratorach, wykonując ekstrapolacje dostępnych danych eksperymentalnych. W analizie danych wykorzystuje się wyniki symulacji uwzględniające ekstynkcje atmosfery w rejonie prowadzonych obserwacji (uwzględnienie różnych warunków atmosferycznych w danej lokalizacji jest czasochłonne i wymaga dużych pojemności pamięci).

Proponowana w pracy metoda rekonstrukcji pęków atmosferycznych, nie związana z konkretnymi warunkami atmosferycznymi w danej lokalizacji teleskopów, pozwala odtworzyć poprawne widmo źródeł promieniowania kosmicznego pomimo obserwacji przeprowadzonych w warunkach zachmurzenia. Przedstawiona praca oparta jest na analizie wyników symulacji wielko-pękowych wykonanych przy pomocy programu CORSIKA oraz pakietu `sim_telarray` (używanego do symulacji odpowiedzi układu detektorów) dla modeli procesów produkcji wielorodnej QGSJetII-04 i URQMD. Generowano wielkie pęki inicjowane przez protony i fotony o energiach z zakresu 0.8-450 TeV i 0.3-150 TeV, odpowiednio. Analizowano wpływ chmur o przeźroczystości od 0 do 0.8 na wysokościach 5 km i 7 km na gęstość światła Czerenkowa z wielkich pęków i na detekcję pęków inicjowanych fotonami przez teleskopy czerenkowskie.

W wyniku wykonanej analizy pokazano skuteczność proponowanej metody rekonstrukcji pędu, co umożliwi obserwacje wysokoenergetycznych pęków nawet w obecności całkowicie nieprzeźroczystych chmur. Pokazano, że:

- metoda pozwala poprawnie oszacować bias energetyczny (względna różnica pomiędzy rzeczywistą a zrekonstruowaną energią pędu) dla obserwacji pęków o energii 2-30 TeV, w obecności chmur o przeźroczystości powyżej 0.6
- proponowana metoda umożliwia rekonstrukcję widma źródeł promieniowania gamma o energiach 2-30 TeV z dokładnością 20%
- skuteczność metody determinowana jest rozwojem pędu w warunkach bezchmurnego nieba, wysokością i przeźroczystością chmury oraz funkcją  $F(E,H)$  rozkładu podłużnego produkowanych fotonów (określającą stosunek liczby fotonów wyprodukowanych powyżej wysokości  $H$  w pęku inicjowanego cząstką o energii  $E$  do wszystkich wyprodukowanych fotonów które dotarły do poziomu obserwacji w odległości powyżej 80 m od osi pędu).

Tematyka rozprawy doktorskiej jest opisana w 9 rozdziałach (108 stron) uzupełnionych bibliografią zawierającą 90 pozycji. Przedstawiona praca jest zwięźczeniem wieloletnich badań wielkich pęków inicjowanych fotonami i ich detekcji teleskopami czerenkowskimi. Po obszernym przeglądzie zastosowania promieniowania Czerenkowa w obserwacjach wielkich pęków atmosferycznych, Autorka rozprawy wyczerpująco omawia procesy pochłaniania i rozpraszania światła (z uwzględnieniem propagacji światła w chmurze wodnej i lodowej). Centralną część monografii stanowi szczegółowy opis wpływu chmur na gęstość fotonów czerenkowskich. Przedstawiono metodę analizy danych zebranych w warunkach zachmurzenia. Analiza uwzględnia chmury całkowicie nieprzeźroczyste oraz chmury o różnej przeźroczystości i ich wpływ na dane rejestrowane w układach 2 i 5 teleskopów czerenkowskich. Na zakończenie przedyskutowano skuteczność proponowanej metody dla rekonstrukcji danych eksperymentalnych.

Tematyka rozprawy jest przedstawiona przez Autorkę w sposób wszechstronny i wyczerpujący. Od strony edytorskiej monografia napisana jest starannie. Recenzent zauważył jedynie kilka uchybień w tekście, na przykład: bardzo mała czcionka użyta do opisu osi i oznaczeń wielu rysunków zmniejsza znacząco ich czytelność.

Znaczną część pracy doktorskiej stanowią wyniki będące osobistym wkładem Autorki. Kilkuletnie zaangażowanie mgr Katarzyny Adamczyk w pracach związanych z wykorzystaniem teleskopów czerenkowskich w astrofizyce naziemnej zaowocowało bogatym doświadczeniem i wszechstronną wiedzą, co znalazło odbicie w rozprawie. Obszerną część rozprawy stanowią prace metodyczne polegające na przygotowaniu narzędzi do analizy rozwoju pęku oraz ich przetestowaniu na danych otrzymanych z symulacji komputerowych. Na szczególną uwagę zasługuje opublikowanie uzyskanych rezultatów w renomowanym czasopiśmie naukowym *Astroparticle Physics*.

Przedstawiona praca zawiera rzetelną i wnikliwą analizę możliwości eksperymentalnych technik pomiarowych opartych na rejestracji wielkich pęków atmosferycznych w detektorach naziemnych. Pokazuje ograniczenia i możliwości w badaniach źródeł promieniowania kosmicznego z wykorzystaniem teleskopów czerenkowskich.

Niedostatkami pracy jest brak dyskusji wpływu procedur rekonstrukcyjnych na ostateczne rezultaty fizyczne prowadzonych badań. Dyskusja proponowanej metody na bazie rzeczywistych danych eksperymentalnych byłaby cennym elementem rozprawy. Rozumiejąc argumentacje za analizą efektywności rejestracji pęków inicjowanych pierwotnymi fotonami, celowym byłoby sprawdzenie wpływu obecności chmur na pęki inicjowane protonami. Analiza domieszki pęków protonowych byłaby ciekawym uzupełnieniem prezentowanych wyników. Również dyskusja czułości metod rekonstrukcyjnych na fluktuacje współczynnika załamania (utożsamiane zwykle z turbulencjami atmosfery), byłaby ciekawym elementem prezentowanej pracy. Powyższe uwagi nie umniejszają wartości pracy a stanowią jedynie próbę sformułowania dalszych problemów badawczych.

Wyniki pracy jak i stosowane metody świadczą o dojrzałości i samodzielności Autorki oraz rzetelnej wiedzy w omawianej dziedzinie. Prowadzone badania są mało spektakularne, ale niezmiernie ważne dla poprawnej interpretacji danych doświadczalnych. Mgr Katarzyna Adamczyk wykazała się nie tylko umiejętnościami symulacji komputerowych lecz również może się legitymować pomysłowością przy opracowaniu pomiarów oraz ich interpretacji. W swojej pracy uzyskała interesujące i cenne wyniki naukowe. Forma pracy jest jasna, układ logiczny i zwarty. Praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Oceniając pozytywnie poziom osiągniętych rezultatów naukowych, przedstawiam wniosek o dopuszczenie mgr Katarzynę Adamczyk do publicznej obrony pracy doktorskiej.

Woolarczyk