



UNIWERSYTET ŚLĄSKI, Instytut Fizyki  
ul. 75 Pułku Piechoty 1, 41-500 Chorzów  
e-mail: Jan.Kisiel@us.edu.pl

Chorzów, 06.11.2023r.

## **Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr Piotra Kalaczyńskiego pt. *The Measurement and Modelling of Cosmic Ray Muons at KM3NeT Detectors.***

Pomimo tego że, promieniowani kosmiczne zostało odkryte ponad 100 lat temu, jego natura nie została do końca poznana. Zwyczajowo przyjęto podział promieniowania kosmicznego na pierwotne (pochodzące bezpośrednio z Kosmosu – głównie protony, cząstki alfa i jądra atomowe lekkich pierwiastków) i wtórne (cząstki – głównie piony – powstałe w wyniku oddziaływania promieniowania pierwotnego z atomami atmosfery Ziemi). Własności obu składowych są obecnie dobrze znane, w tym własności neutrin produkowanych w rozpadach pionów naładowanych. Zagadką pozostaje istnienie tzw. natychmiastowego strumienia mionów (*prompt muon flux*). Uważa się, że miony natychmiastowe są produkowane w wyniku rozpadu krótkożyciowych, ciężkich hadronów zawierających kwarki powabne i dziwne. Ewentualny pomiar mionów natychmiastowych nastrocza wiele trudności, w tym konieczność pomiaru mionów o energiach rzędu PeV. Sieć detektorów neutrinowych KM3NeT, w skład której wchodzi detektory promieniowania Czerenkowa zanurzone w wodach Morza Śródziemnego, może stanowić obiecujące miejsce dla ewidencji natychmiastowego strumienia mionów. Jest to bardzo ambitne zadanie, wymagające m. in. oszacowania możliwości obserwacji natychmiastowego strumienia mionów w eksperymencie KM3NeT, a tym oszacowania wydajności detektorów. Zadanie to zostało podjęte w przedstawionej do recenzji rozprawie doktorskiej Pana mgr Piotra Kalaczyńskiego. Rozprawa została przygotowana pod kierunkiem Pani Prof. E. Rondio (Pani promotor) i dr P. Mijakowskiego (promotor pomocniczy) w Narodowym Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) w Świerku. Warto podkreślić wieloletnie zaangażowanie fizyków z NCBJ w realizację eksperymentu KM3NeT, a rozprawa doktorska Pana P. Kalaczyńskiego jest tego potwierdzeniem.

Rozprawa doktorska Pana mgr P. Kalaczyńskiego składa się z ośmiu rozdziałów, wliczając w to wstęp i podsumowanie, oraz sześciu dodatków, bardzo obszernej bibliografii liczącej 224 pozycje, wykazu użytych skrótów i streszczeń w języki polskim i angielskim . We wstępie autor przedstawia m. in. motywację podjęcia tematu rozprawy a także obszernie zapowiada zawartości poszczególnych rozdziałów rozprawy. Należy także odnotować szczegółowe omówienie wkładu autora w prace współpracy fizyków KM3NeT, koncentrujące się na symulacjach mionów, m. in. z wykorzystaniem pakietu CORSIKA. Omówienie własności neutrin, mionów i promieniowania kosmicznego jest treścią rozdziału drugiego, a przedstawienie eksperymentu KM3NeT znajdziemy w rozdziale trzecim. Symulacje mionów atmosferycznych w eksperymencie KM3NeT są opisane w rozdziale czwartym, przy czym CORSIKA jest głównym programem symulacyjnym wykorzystywanym przez autora rozprawy. Obszerny rozdział piąty zawiera krótkie wprowadzenie do uczenia maszynowego i szczegółowy opis metod rekonstrukcji energii pęków mionów (*muon bundle*) i krotności mionów. Istotnym aspektem pracy doktorskiej Pana P. Kalaczyńskiego jest porównanie symulacji Monte Carlo z danymi zebranymi przez KM3NeT/ARCA i KM3NeT/ORCA, które znajduje się w rozdziale szóstym. Ważne wyniki uzyskane przez autora rozprawy zostały omówione w rozdziale siódmym. Zawiera on oszacowanie czułości detektorów KM3NeT na pomiar mionów natychmiastowych, otrzymane z wykorzystaniem opracowanej przez mgr P. Kalaczyńskiego metody wyznaczenia udziału mionów natychmiastowych w strumieniu mionów atmosferycznych. Podsumowanie jest ostatnim rozdziałem rozprawy, po którym autor zamieścił aż 6 dodatków, spis literatury oraz wykaz używanych skrótów. Uważam, że umieszczenie wielu szczegółów *technicznych* przeprowadzonych symulacji i metod rekonstrukcji pęków mionów w dodatkach za bardzo udany zabieg, który znakomicie ułatwia czytanie i tak dość obszernej rozprawy – 134 strony bez dodatków.

Do najważniejszych osiągnięć Pana mgr P. Kalaczyńskiego przedstawionych w rozprawie doktorskiej zaliczam:

1. Zbadanie możliwości rejestracji mionów natychmiastowych przez detektory KM3NeT. Autor rozprawy zdefiniował: (1) sygnał (SIG) i tło (BGD) korzystając z wyników symulacji programem CORSIKA, a także (2) hipotezy – zerową (brak mionów natychmiastowych w strumieniu mionów atmosferycznych) i alternatywną (obecność mionów natychmiastowych w strumieniu mionów atmosferycznych). Wydzielenie ewentualnego, znikomego udziału mionów natychmiastowych w strumieniu mionów rejestrowanych przez KM3NeT wymagało zdefiniowania obserwabli, które są mierzone w detektorach. Pan mgr P. Kalaczyński wybrał 3 takie obserwable i dokonał krytycznej oceny ich

przydatności (Figures 7.5.1-3) eliminując jedną z nich (kąt zenitalny) ograniczając się do dwóch pozostałych (minimalne – energia i krotność pęku mionów). Wyniki zostały przedstawione dla kilku konfiguracji detektorów ARCA i ORCA i wskazują na dominujący udział niepewności systematycznej w wyznaczeniu czułości, przy czym niepewność ta będzie prawdopodobnie zmniejszana w miarę dochodzenia do docelowych rozmiarów tych detektorów.

2. Przygotowanie narzędzi do rekonstrukcji pęków mionów z wykorzystaniem uczenia maszynowego (ML – *Machine Learning*). Autor rozprawy wybrał trzy charakterystyki pęku mionów: jego energię, krotność oraz  $E_{prim} \cdot A$  - całkowitą energię pierwotną pomnożoną przez liczbę nukleonów. Wyniki rekonstrukcji energii pęku mionu uzyskane w rozprawie z wykorzystaniem ML są bardzo zachęcające, a ich porównanie (rys. 5.3.3, str. 71, wyniki symulacji CORISCA vs przewidywania JMuon i LightGMB *Light Gradient-Boosting Machine*) z wynikami z programu JMuon (pakiet do rekonstrukcji używany przez KM3NeT) wypada na korzyść ML, przy czym należy zauważyć, że JMuon został zaprojektowany do rekonstrukcji pojedynczych mionów. Pojawia się zatem pytanie: jak wiarygodne jest takie porównanie? Ponadto w trakcie obrony chciałbym zapytać skąd pomysł wyboru trzeciej charakterystyki pęku mionów, czyli  $E_{prim} \cdot A$ ?
3. Wykonanie symulacji mionów produkowanych w oddziaływaniach promieniowania kosmicznego dla detektorów KM3NeT. Autor rozprawy korzystał głównie z pakietu CORSIKA umożliwiającego śledzenie historii cząstek, oraz z pakietu MUPAGE, który działa dużo szybciej niż CORSIKA kosztem dużo mniejszej ilości dostępnych opcji i informacji o cząstkach. Na niektórych wykresach w rozdziale szóstym (wykres 6.3.1 i kolejne) znajdziemy porównanie przewidywań CORSIKA i MUPAGE z danymi detektorów ARCA i ORCA. Jednakże po przeczytaniu rozprawy nie były dla mnie jasne przyczyny/korzyści użycia tych dwóch programów do symulacji promieniowania kosmicznego. Oczekuję, że w trakcie publicznej obrony rozprawy Pan mgr P. Kalaczyński uzasadni konieczność użycia obu programów. Należy zaznaczyć, że dostosowanie dostępnych pakietów symulacyjnych do specyfiki współczesnego, dużego eksperymentu z fizyki cząstek jest zajęciem niezwykle pracochłonnym, wymagającym zaawansowanej wiedzy zarówno z fizyki jak i informatyki.

Rozprawa doktorska Pana mgr P. Kalaczyńskiego jest napisana w języku angielskim, w sposób prosty i zrozumiały. Rysunki i tabele są czytelne i dobrze uzupełniają tekst. Praca została niezwykle starannie zredagowana. Nie mam

uwag do strony językowej, ale nie jestem osobą w pełni kompetentną do oceny rozprawy pod tym względem.

Podsumowując, uważam, że zawarte w rozprawie doktorskiej Pana mgr P. Kalaczyńskiego wyniki są oryginalne, wartościowe i interesujące. Doktorant wykazał, że w bardzo dobrym stopniu opanował ważne etapy eksperymentu w fizyce wysokich energii, takie jak metody rekonstrukcji przypadków czy symulacje komputerowe z wykorzystaniem złożonego pakietu jakim jest CORSIKA. Niezwykle wysoko oceniam wkład doktoranta w eksperyment KM3NeT.

Na podstawie przedłożonej do recenzji pracy doktorskiej Pana mgr Piotra Kalaczyńskiego pt. *The Measurement and Modelling of Cosmic Ray Muons at KM3NeT Detectors* stwierdzam, że rozprawa spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr Piotra Kalaczyńskiego pt. *The Measurement and Modelling of Cosmic Ray Muons at KM3NeT Detectors* za:

**oszacowanie czułości eksperymentu KM3NeT na pomiar mionów natychmiastowych, dla różnych konfiguracji detektorów ARCA i ORCA otrzymane z wykorzystaniem opracowanej przez siebie metody wyznaczenia udziału mionów natychmiastowych w strumieniu mionów atmosferycznych.**

Prof. Jan Kisiel