

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Piotra Kalaczyńskiego
z tytułu
**„The Measurement and Modelling of Cosmic Ray Muons at KM3NeT
Detectors”**

Rozprawa doktorska mgr. Piotra Kalaczyńskiego dotyczy badania tak zwanych mionów atmosferycznych, czyli mionów powstających w atmosferze jako rezultat rozpadów cząstek produkowanych w oddziaływaniach promieni kosmicznych z atmosferą. Badania te są prowadzone w ramach eksperymentu KM3NeT poświęconego badaniu neutrin. Astronomia neutrinowa jest dziedziną obecnie intensywnie rozwijaną, a KM3NeT jednym z kilku wielkich przedsięwzięć na świecie poświęconych budowie i eksploatacji sieci detektorów przeznaczonych do detekcji neutrin – tak zwanych teleskopów neutrinowych. Eksperyment KM3NeT na celu badanie wysokoenergetycznych neutrin przy użyciu sieci dwóch podwodnych teleskopów neutrinowych budowanych obecnie w Morzu Śródziemnym. Teleskopy te to ARCA (Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss) budowany u wybrzeży Sycylii oraz ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss) u wybrzeży Francji. Głównym zamierzeniem Autora było zbadanie możliwości detekcji mionów natychmiastowych (czyli powstających w rozpadach krótkożyciowych cząstek), a także weryfikacja wydajności detektorów eksperymentu KM3NeT.

Mgr Piotr Kalaczyński jest aktywnym członkiem zespołu wykonawców eksperymentu KM3NeT, silnie zaangażowanym w prace tego międzynarodowego zespołu. Wniósł on istotny wkład w rozwój oprogramowania eksperymentu, szczególnie „mało widocznych” a niezbędnych programów narzędziowych oraz w dostosowanie pakietu symulacyjnego CORSIKA do potrzeb eksperymentu KM3NeT. Symulacje wykonane przez pana P. Kalaczyńskiego okazały się kluczowe dla wielu analiz wykonywanych przez zespół KM3NeT, a dotychczasowe osiągnięcia autora tej rozprawy już umożliwiły powstanie kilku publikacji współpracy KM3NeT. Mgr P. Kalaczyński wielokrotnie prezentował rezultaty tych analiz w imieniu współpracy KM3NeT na prestiżowych konferencjach międzynarodowych. Wystąpienie na konferencji międzynarodowej w imieniu kolaboracji jest wyróżnieniem, które zawsze jest przyznawane przez kolaboracje międzynarodowe w uznaniu wybitnych zasług w uzyskaniu prezentowanych wyników. Oznacza to, że pan Kalaczyński wypracował sobie już stosunkowo wysokie uznanie w zespole KM3NeT.

Recenzowana rozprawa jest napisana w języku angielskim. Praca obejmuje łącznie 214 stron i jest podzielona na osiem rozdziałów, uzupełnionych o spis treści, obszerny Dodatek (58 stron), spis literatury (224 pozycje) oraz spis używanych skrótów, a także wymagane streszczenia w językach angielskim i polskim. W rozdziale 1 przedstawiona jest struktura rozprawy, rozdział 2 stanowi krótkie wprowadzenie do fizyki mionów, neutrin i promieni kosmicznych, a struktura teleskopów neutrinowych KM3NeT jest krótko opisana w rozdziale 3. Następne rozdziały zawierają wyniki otrzymane przez Autora.

Opis łańcucha programów używanych do symulacji produkcji mionów w atmosferze i ich propagacji do detektorów KM3NeT jest zawarty w rozdziale 4. Autor wniósł istotny wkład w rozwój tych programów, a nawet jest odpowiedzialny za utrzymanie niektórych z nich. Rozdział 5 jest poświęcony rekonstrukcji pakietów mionów (ang. *muon bundles*) przy użyciu metod uczenia maszynowego. Autor stosuje wiele programów uczenia maszynowego (zwanych modelami) do analizy symulowanych danych, a następnie wybiera najlepszy z nich na podstawie zgodności z danymi symulowanymi. Otrzymuje w ten sposób znaczną poprawę rekonstrukcji energii pakietów mionów w stosunku do standardowego programu KM3NeT. Rekonstrukcja krotności mionów w pakiecie metodą uczenia maszynowego okazuje się bardzo dobra, najlepsza oczywiście dla pełnej, docelowej konfiguracji detektora.

Rozdział 6 jest poświęcony analizie pierwszych danych eksperymentalnych z działających już części detektorów (oznaczane jako ARCA6 i ORCA6, zawierające po 6 spośród docelowych 115 jednostek detekcyjnych). Porównanie rozkładów zrekonstruowanych kierunków i energii pęków mionów z symulacjami wypada dobrze, zarówno dla rekonstrukcji przy użyciu standardowego programu MUPAGE, jak przy użyciu modelu sieci neuronowych w programie LightGBM. Również rekonstrukcja krotności pakietów mionów wypada dobrze, szczególnie w zakresie niewielkich krotności. Nasuwa się tu pewna uwaga: Autor, mówiąc o rekonstrukcji kierunku, zajmuje się wyłącznie rekonstrukcją kąta zenitalnego, o kącie azymutalnym nawet nie wspominając. Można się wprawdzie domyślać, że pełna rekonstrukcja kierunku będzie w przyszłości, ale choćby krótki komentarz byłby przydatny. Niejasne są powody pokazywania na rysunku 6.3.3 zdarzeń o bardzo krótkim czasie trwania, nawet poniżej 1 nanosekundy. Ponieważ 1 ns odpowiada drodze zaledwie 30 cm, muszą to być sygnały z pojedynczego modułu, a więc prawdopodobnie tło. Nie rozumiem też celowości zamieszczenia w rozprawie sekcji 6.4.1.1, 6.4.2.1 i 6.4.2.2, poświęconych danym ARCA2, ORCA2 i ORCA4, skoro pokazane są również pełniejsze dane ARCA6 i ORCA6. Sekcje te niewiele wnoszą do rozprawy, która i tak jest już przeładowana szczegółami.

W rozdziale 7 znajdujemy główną analizę fizyczną w tej rozprawie, czyli analizę perspektyw identyfikacji składowej natychmiastowej (ang. *prompt*) strumienia mionów atmosferycznych, to znaczy mionów powstałych w rozpadach krótkożyciowych cząstek produkowanych w atmosferze. Składowa ta nie została dotąd zidentyfikowana, więc jej identyfikacja byłaby ważkim rezultatem naukowym. Autor bada możliwość odrzucenia hipotezy zerowej o braku składowej natychmiastowej. Wynik tej analizy wskazuje, że kompletne detektory KM3NeT w ciągu kilku lat umożliwią odrzucenie hipotezy zerowej na poziomie 5σ , co będzie oznaczało stwierdzenie istnienia składowej natychmiastowej.

Rozdział 8 zawiera podsumowanie wyników oraz perspektywy kontynuacji i ulepszeń analiz przedstawionych w rozprawie.

Przechodząc do oceny rozprawy mgr. Piotra Kalaczyńskiego muszę stwierdzić, że pod względem naukowym zasługuje ona na duże uznanie. Praca ta stanowi duży indywidualny wkład Autora do zbiorowego wysiłku współpracy KM3NeT. Wykonanie badań, których rezultaty są przedstawione w rozprawie, wymagało ogromnego nakładu pracy. Autor znakomicie poradził sobie ze skomplikowanymi i czasochłonnymi symulacjami. Wykazał się też dużą biegłością w prowadzeniu analizy danych, a wyznaczenie krotności mionów w pakiecie jest pierwszym takim dokonaniem w eksperymentach z użyciem podwodnych teleskopów neutrinowych.

Należy podkreślić też międzynarodowy aspekt badań prowadzonych przez pana P. Kalaczyńskiego. Wszystkie badania omówione w jego rozprawie doktorskiej zostały wykonane w kontekście i na użytek współpracy KM3NeT. Zostały one docenione przez kolaborację, o czym wspominałem powyżej, a mgr P. Kalaczyński pełni ważne funkcje usługowe w kolaboracji, będąc odpowiedzialny za utrzymanie i rozwój niektórych części wspólnego oprogramowania kolaboracji. Stąd wniosek, że pan Kalaczyński znakomicie radzi sobie w dużym międzynarodowym zespole badawczym.

Obowiązek recenzenta wymaga także oceny sposobu prezentacji wykonanych badań w rozprawie doktorskiej. Rozprawa mgr. P. Kalaczyńskiego jest napisana poprawną, ładną angielszczyzną. Szczególnie zwraca uwagę prawie bezbłędne użycie angielskich przedimków (może z wyjątkiem tytułu pracy), co nieczęsto zdarza się w rozprawach doktorskich polskich autorów. Zauważyłem niewiele błędów typograficznych i jedynie nieliczne, drobne potknięcia stylistyczne takie jak: „top-down models assume...” (str. 29), „neutrino telescopes study charged particles...” (str. 39), lub „it would be more optimal” (str. 98).

Rozprawa zawiera dużo szczegółów prowadzonych analiz, co można uznać za jej zaletę. Jednak trudno oprzeć się wrażeniu, że rozprawa ta ma bardziej charakter szczegółowego raportu z wykonanych prac, adresowanego do współpracowników z kolaboracji KM3NeT, niż charakter rozprawy doktorskiej, od której zwykle oczekujemy, że będzie stanowiła dobre wprowadzenie do tematyki której dotyczy. Paradoksalnie, duży stopień szczegółowości rozprawy stanowi nie tylko jej zaletę, ale również istotną wadę. Mnóstwo szczegółów przytoczonych w tekście sprawia, że praca jest czytelna i łatwo zrozumiała raczej dla ekspertów, niż dla młodych adeptów nauki – jest niezbyt przyjazna czytelnikowi, który musi samodzielnie przedzierać się przez gąszcz szczegółów aby zorientować się, które są najbardziej istotne. Wiele z tych szczegółów warto byłoby jakoś wyróżnić jako istotne, a wiele innych można by w rozprawie pominąć bez szkody dla jej kompletności. Wprawdzie Autor przeniósł już wiele szczegółów do obszernego Dodatku, ale problem ciągle pozostaje. Co gorsza, Autor w wielu miejscach używa lakonicznego, wręcz urzędniczego stylu wypowiedzi, pozostawiając wiele niejasności. Przytoczę tu tylko jeden z wielu przykładów takich wypowiedzi (str. 132): „*However, a reliable measurement will require further work on improving the simulations to accurately describe the data in the insensitive region of the phase space*”. Autor nawet nie próbuje wyjaśnić, dlaczego warto

ulepszać symulacje w nieczyłym regionie przestrzeni fazowej. W wielu miejscach Autor jedynie odsyła czytelnika do literatury, zamiast w kilku słowach zdefiniować i wyjaśnić używane wielkości. Takim przykładem jest „*cluster distance threshold*” na str. 67 i następnych (Fig. 5.2.2, A.5.4, A.5.5, A.5.6). Niezrozumiałe są motywy zamieszczenia w rozprawie macierzy korelacji w zupełnie nieczytelnej postaci (Fig. 5.2.1, A.5.1, A.5.2, A.5.3). Wszystkie te niedociągnięcia w znacznym stopniu ograniczają wartość dydaktyczną rozprawy.

Rysunki zamieszczone w rozprawie w większości są odpowiedniej wielkości, wyraźne i czytelne, opatrzone precyzyjnymi i zrozumiałymi podpisami. Od tej reguły są jednak wyjątki. Oprócz wspomnianych powyżej, zauważyłem brak jednostek w opisach osi (Fig. 6.4.2 i 6.4.7) i trudno czytelne opisy osi (Fig. A.1.4, A.1.10). Lista nazw *features* pokazanych na Fig. 5.3.7 i A.5.7-A.5.12 nie została nigdzie wyjaśniona, więc pozostaje niepewność co do tego, jakie wnioski należy wysnuć z tych rysunków. I jeszcze drobiazg: na początku rozdziału 3 jest informacja, że na Fig. 3.1.1 pokazane są instytucje uczestniczące w eksperymencie (nie są pokazane – słusznie). Na koniec jeszcze jedna uwaga: moim zdaniem wielostopniowa numeracja rysunków wcale nie ułatwia lektury. Dla przykładu, wygodniej jest mówić o Fig.17, niż o Fig. 3.2.5.

Chciałbym wyraźnie stwierdzić, że przytoczone powyżej uwagi krytyczne nie zmieniają mojej jednoznacznie pozytywnej opinii o rozprawie. Zalety merytoryczne i wartość naukowa rozprawy dalece przewyższają jej niedostatki edycyjne. Podsumowując mogę z przyjemnością stwierdzić, że rozprawa doktorska mgr. Piotra Kalaczyńskiego spełnia zarówno wszystkie wymogi obowiązującej ustawy o stopniach naukowych, jak i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim. Wnioskuje zatem o dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania mu stopnia doktora.



Henryk Wilczyński