

Kraków, 16 grudnia 2022 rok.



UNIwersytet  
JAGIELLOŃSKI  
W KRAKOWIE

Prof. dr hab. Jerzy Smyrski  
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej  
Uniwersytet Jagielloński

Instytut Fizyki

im.

Mariana Smoluchowskiego

## RECENZJA

**pracy doktorskiej mgr. inż. Pawła Kopciewicza**

**pt. „Design and implementation of the monitoring and analysis software platform for upgraded LHCb VELO detector and search for a new fitting method based on computational intelligence approach for B->Dh decays”**

Przedstawiona do recenzji praca doktorska pana mgr. Pawła Kopciewicza związana jest z eksperymentem LHCb na zderzacz LHC w CERN. Głównym celem tego eksperymentu są badania łamania symetrii CP oraz poszukiwania sygnatur Nowej Fizyki spoza Modelu Standardowego. Pomiar prowadzone w pierwszych ośmiu latach eksperymentu (2010-2018) doprowadziły do wielu ważnych odkryć, m.in. obserwacji nowego rodzaju hadronów składających się z pięciu kwarków (pentakwarków) oraz obserwacji łamania symetrii CP w rozpadach mezonów powabnych. Rozpoczęta w 2018 roku modernizacja detektora LHCb miała na celu przystosowanie go do pracy przy wyższych świetlnościach i osiągnięcie wyższej czułości w poszukiwaniach zjawisk fizycznych spoza Modelu Standardowego. Przebudowany został m.in. detektor wierzchołka VELO. Stosowane w nim wcześniej sensory paskowe zastąpiono pikselowymi, a do ich odczytu opracowano nowy układ typu ASIC o nazwie VeloPix.

Celem pracy doktorskiej pana mgr. Pawła Kopciewicza było przygotowanie oprogramowania do monitorowania i kalibracji zmodernizowanego detektora wierzchołka VELO oraz poszukiwaniom nowych metod analizy widma masy wykorzystujących najnowsze techniki uczenia maszynowego. Promotorem pana mgr. Kopciewicza jest prof. Tomasz Szumlak z Katedry Oddziaływań i Detekcji Cząstek na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH

ul. St. Łojasiewicza 11

PL 30-348 Kraków

tel. +48(12) 664-47-03

fax +48(12) 664-49-06

e-mail: fizyka@uj.edu.pl

Grupa fizyków z tej katedry jest zaangażowana w eksperyment LHCb i wnosi znaczący wkład zarówno w część sprzętową eksperymentu i oprogramowanie, jak i analizę danych fizycznych.

Wkład Doktoranta w przedstawione w rozprawie badania jest w niej jasno zaznaczony. Doktorant zaprojektował przedstawiony w pracy system kalibracji i monitorowania detektora VELO. Opracował metody badań detektora pikselowego. Brał udział w testach detektora prowadzonych z wiązką akceleratora SPS. Wspólnie z Promotorem zaproponował szereg koncepcji zastosowania uczenia maszynowego do analizy widm masy.

O wiodącym udziale Doktoranta w przedstawionych badaniach świadczą także prezentujące je publikacje, łącznie 6, w których jest pierwszym autorem lub autorem korespondencyjnym. Wyniki swoich prac przedstawił także w formie referatów lub plakatów na siedmiu międzynarodowych konferencjach naukowych. Był również kierownikiem projektu PRELUDIUM o tematyce ściśle związanej z zakresem pracy doktorskiej.

Rozprawa podzielona jest na siedem rozdziałów, pierwszy jest wstępem, a ostatni podsumowaniem.

Rozdział 2 zawiera przegląd najbardziej znaczących metod uczenia maszynowego, m.in. drzew decyzyjnych, głębokich sieci neuronowych, algorytmów genetycznych i generatywnych sieci współzawodniczących (sieci typu GAN). Uwzględniono najnowsze kierunki badań w tej dziedzinie. Bibliografia do rozdziału zawiera ponad 200 pozycji z których znaczna część pochodzi z ostatnich kilku lat w tym dwie prace autora opublikowane w czasopiśmie informatycznym; jedna dotycząca sieci GAN, a druga – tzw. algorytmu zapylania kwiatów.

W rozdziale 3 opisano spektrometr LHCb i zastosowane w nim detektory śladowe, detektory służące do identyfikacji cząstek oraz kalorymetry. Przedstawiono przeprowadzoną w ostatnich latach modernizację spektrometru określaną jako „Upgrade I”. Jej celem jest przystosowanie spektrometru do planowanych pomiarów przy wyższych świetlnościach. Modernizacja objęła zarówno systemy detekcyjne, jak i system wyzwalania odczytu detektorów, w którym wyeliminowano sprzętowy trygger i wprowadzono selekcję zdarzeń wyłącznie na poziomie oprogramowania („software trigger”). Gruntownie zmieniono system detektorów śladowych wprowadzając nowe typy detektorów mogące pracować w większych strumieniach cząstek. W szczególności, w detektorze VELO, krzemowe sensory paskowe zastąpiono sensorami pikselowymi. Do odczytu sensorów zastosowano układ typu ASIC o nazwie VeloPix wytworzony w technologii CMOS 130 nm. VELO ma długość ok. 1 m i

składa się z dwóch połówek, z których każda zawiera 21 modułów ułożonych jeden za drugim w pobliżu wiązki LHC, prostopadle do niej. Jeden moduł zawiera cztery sensory z których każdy składa się z trzech macierzy 256x256 pikseli o rozmiarach 55x55  $\mu\text{m}^2$ . Każdy piksel jest podłączony do indywidualnego kanału odczytu w układzie VeloPix zawierającego w części analogowej przedwzmacniacz ładunkowy i dyskryminator. Zastosowany globalny próg dyskryminacji może być skorygowany dla poszczególnych kanałów o dodatkowy poziom napięcia generowany przez 4-bitowy DAC – tzw. Trim DAC. W części cyfrowej układu zastosowano maskę bramkującą, dzięki której można wyeliminować z odczytu szumiące piksele. Wyznaczany jest także czas nad progiem sygnałów wykorzystywany do eliminowania sygnałów trwających zbyt krótko. Dla odczytu danych macierz 256x256 pikseli podzielona jest na grupy 2x4 pikseli nazywane superpikselami. Pakiet danych z jednego superpiksela zawiera adres superpiksela, znacznik czasu oraz mapę pikseli które wyprodukowały sygnał. Dla testów i skanowania pikseli możliwy jest także odczyt czasu nad progiem dla poszczególnych pikseli. Łączna liczba elektronicznych kanałów odczytu w detektorze VELO wynosi ponad 41 milionów, a całkowity strumień danych z całego detektora może osiągnąć 12.1 Tb/s.

W rozdziale 4 przedstawiono oprogramowanie przygotowane do dekodowania danych z detektora VELO, do jego kalibracji, monitorowania jak również do emulacji danych. Szczegółowo opisano zastosowaną procedurę kalibracyjną mającą na celu wyrównanie efektywnych progów dyskryminacji dla wszystkich kanałów w układzie VeloPix. Wykorzystuje ona pomiar rozkładu liczby zliczeń sygnałów szumu w funkcji położenia wspólnego dla wszystkich kanałów progu dyskryminacji. Pomiar ten jest wykonywany dla minimalnej i maksymalnej wartości Trim DAC. Następnie, dla każdego kanału, wyznaczane są środki obu rozkładów i brana jest ich średnia, która jest korygowana o odpowiednią wartość Trim DAC. Zmierzone rozkłady zliczeń szumu ze skorygowanymi wartościami wspólnego progu są znacznie węższe niż rozkłady bez korekty, co pokazano na rysunku 4.6. Nie podano liczbowej wartości szerokości rozkładu i jej porównania z rozdzielczością Trim DAC. Stwierdzono, że te dwie wielkości są skorelowane.

Przygotowane oprogramowanie wykorzystane zostało do badań prototypów detektora VELO. Wyniki tych badań przedstawiono w rozdziale 5. Część eksperymentalną badań przeprowadzono w CERNie z wiązką akceleratora SPS, która naświetlała sensor odczytywany przez układ VeloPix. Zebrane dane posłużyły do wyznaczenia widm czasu nad progiem dla różnych zastosowanych wartości prądu rozładowującego przedwzmacniacz w układzie VeloPix. Czas nad progiem zależy od zarejestrowanego na wejściu przedwzmacniacza ładunku i jest miarą energii zdeponowanej przez cząstkę. W przypadku, gdy sygnał od cząstki zostanie zarejestrowany w kilku sąsiednich pikselach sensora tworzących klaster, wyznaczone czasy nad progiem są sumowane. W rozkładach czasu nad progiem, oprócz dominującego piku od pojedynczych śladów cząstek, widoczny jest także pik od dwóch

śladów. Otrzymano dobry opis tych rozkładów z wykorzystaniem splotu funkcji Gaussa odpowiadającej odpowiedzi detektora i rozkładu Landaua dla straty energii cząstki.

Przeprowadzono także testy układu VeloPix z wykorzystaniem impulsów testowych podawanych na jego wejście. Wykonano pomiary amplitudy impulsów po przedwzmacniaczu w zależności od ładunku impulsu testowego. Amplitudę mierzono poprzez wyznaczenie liczby zliczeń z dyskryminatora w funkcji wysokości progu dyskryminacji (pomiar tzw. krzywej S). Przeprowadzono także pomiary czasu nad progiem w funkcji ładunku impulsów testowych. Otrzymana zależność jest liniowa w szerokim zakresie wartości ładunku testowego z wyjątkiem obszaru szumu. Zmierzoną zależność sparametryzowano funkcją zawierającą sumę funkcji liniowej i funkcji homograficznej.

Pomiary z impulsami testowymi zastosowane zostały także do wyznaczenia wartości stosunku sygnału do szumu w funkcji wybranych, najbardziej istotnych napięć i prądów zasilania analogowej części układu VeloPix. Stwierdzono, że istotny spadek mocy pobieranej przez układ oraz spadek jego temperatury bez znaczącego pogorszenia stosunku sygnału do szumu występuje przy obniżeniu napięcia zasilającego dla źródła prądu przedwzmacniacza. Obniżenie temperatury może okazać się korzystne dla utrzymania dobrego stosunku sygnału do szumu w przypadku wystąpienia uszkodzeń radiacyjnych i wzrostu prądów upływu w detektorze.

Rozdział 6 zawiera prezentację zaproponowanych przez autora koncepcji zastosowania uczenia maszynowego w analizie danych fizycznych. Pokazano, że algorytm ewolucji różnicowej, nadaje się do dopasowania krzywej Gaussa do punktów ułożonych na krzywej Gaussa, rozmytych szumem o rozkładzie normalnym. Nie jest jasne, dlaczego takie punkty pokazane na rysunku 6.3 przyjmują jedynie dodatnie wartości na lewym i prawym ogonie rozkładu Gaussa, pomimo, że przy rozkładzie normalnym szumów można spodziewać się także wartości ujemnych. Nie jest również jasne stwierdzenie na stronie 99: „...the ratio of true and reconstructed sigma was  $5.6 \times 10^{-4}$  .”, gdyż z tabeli 6.1 wynika, że stosunek ten dla algorytmu ewolucji różnicowej był bliski 1.

Przetestowane zostało także zastosowanie głębokiej sieci neuronowej do dopasowania dwóch funkcji Gaussa do punktów eksperymentalnych. Sieć zbudowano z wykorzystaniem środowiska PyTorch. Osiągnięto dobrą precyzję estymacji parametrów dopasowywanych funkcji, także w przypadku ich częściowego pokrywania się. Wadą testowanej metody jest brak oszacowania niepewności estymowanych parametrów.

Kolejna przedstawiona koncepcja dotyczy zastosowania głębokiej sieci neuronowej do opisu kształtu rozkładów eksperymentalnych przy pomocy wybranego zestawu fundamentalnych funkcji składowych. Na wyjściu sieci neuronowej zastosowano warstwę typu softmax,

pozwalającą na interpretację sygnałów wyjściowych sieci jako prawdopodobieństw. Uczenie i testy sieci przeprowadzono na siedmiu różnych typach rozkładów będących sumą maksymalnie trzech funkcji Gaussa o losowo wybranych wartościach średniej i wariancji oraz maksymalnie jednej funkcji eksponencjalnej. Sieć odgadywała zestaw funkcji składowych w testowanych rozkładach z dokładnością powyżej 93%.

Ostatnia koncepcja zaprezentowana w pracy przez Autora dotyczy wykorzystania modeli generatywnych GAN do symulacji zdarzeń fizycznych. Do zbadania tej koncepcji posłużono się procesem rozpadu mezonów  $B^0$  na parę mezonów  $D_s^- \pi^+$ . Do uczenia modelu zastosowano dane generowane dla tego rozpadu przez program RapidSim, stosowany do szybkich symulacji uwzględniających geometrię detektora LHCb. Wytrenowany model GAN dobrze odtwarza rozkłady składowych pędu produktów rozpadu, nie jest jednak w stanie odtworzyć masy mezonu  $B^0$ . Zaproponowane przez autora rozwiązanie tego problemu, które okazało się skuteczne, polegało na dodaniu do generatora węzłów wejściowych, które pobierałyby obliczoną niezmienniczą masę z rzeczywistych wartości nadanych innym węzłom w tej samej próbie.

Oceniając rozprawę stwierdzam jej wysoki poziom, zarówno w jej części dotyczącej detektora VELO, jak i w części poświęconej metodom uczenia maszynowego. Prezentowane prace i analizy przeprowadzone zostały wnikliwie i starannie. Widoczna jest ekspercka wiedza Doktoranta zarówno, jeśli chodzi o oprogramowanie do odczytu detektora VELO, jak i metody uczenia maszynowego. Opracowany został w pełni funkcjonalny system do kalibracji i monitorowania detektora VELO. Przeprowadzono i dokonano interpretacji szeregu kluczowych charakterystyk detektora VELO. Zaproponowano niezwykle ciekawe zastosowania uczenia maszynowego w analizie danych fizycznych. Zademonstrowano ich skuteczność z wykorzystaniem prostych danych symulacyjnych i wskazano kierunki dalszych badań.

Praca napisana jest jasnym, precyzyjnym językiem. Opis przeprowadzonych badań jest wystarczająco szczegółowy i kompletny. Praca jest starannie zredagowana. Pewien niedosyt wzbudził we mnie jedynie rozdział 7 będący krótkim podsumowaniem rozprawy. Jego zawartość niewiele odbiega od streszczenia podanego na początku pracy. Zabrakło mi w nim podania najważniejszych wniosków z przeprowadzonych badań, m.in. z testów detektora oraz z ewaluacji zaproponowanych metod analizy danych opartych na algorytmach uczenia maszynowego. Wnioski takie zawarte są w różnych rozdziałach pracy, a zebranie najważniejszych z nich w podsumowaniu byłoby użyteczne szczególnie w przypadku, gdy czytelnik zaczyna czytanie pracy od streszczenia i podsumowania lub ogranicza się do zapoznania się jedynie z tymi dwoma fragmentami pracy.



Układ pracy nie jest moim zdaniem optymalny, gdyż rozdział 2, będący wprowadzeniem do metod sztucznej inteligencji, poprzedza część pracy poświęconą detektorowi VELO zawartą w rozdziałach 3, 4, 5, a powinien znaleźć się przed rozdziałem 6 poświęconym propozycjom zastosowania metod uczenia maszynowego w analizie widma masy. Dzięki temu praca składałaby się z dwóch spójnych części: pierwszej dotyczącej detektora VELO i drugiej poświęconej uczeniu maszynowemu.

Powyższe usterki nie wpływają istotnie na wartość pracy, którą oceniam jako bardzo dobrą.

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska pana mgr inż. Pawła Kopciwicza stanowi istotny wkład w dziedzinie detektorów cząstek oraz w obszarze zastosowań uczenia maszynowego w analizie danych fizycznych i w pełni spełnia warunki rozprawy na stopień doktora nauk fizycznych. W związku z tym stawiam wniosek o dopuszczenie pana mgr. Pawła Kopciwicza do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Janusz', is centered on the page.