

Kraków, 2 września 2025 r.



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. Salihy Bashir

pt. „Impact of models for multiparton interactions in proton-proton collisions at LHC energies for the prediction of radiation damage of LHCb silicon trackers”

Przedstawiona do recenzji praca doktorska pani mgr. Salihy Bashir związana jest z eksperymentem LHCb na zderzaczach LHC w CERN. Głównym celem tego eksperymentu są pomiary łamania symetrii CP oraz poszukiwania sygnatur Nowej Fizyki spoza Modelu Standardowego. Przeprowadzone dotąd przez LHCb badania 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. Dokonana w latach 2019, 2020 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. VELO jest kluczowym podukładem eksperymentu LHCb, ale też najbardziej narażonym na uszkodzenia radiacyjne ze względu na bezpośrednie sąsiedztwo punktu oddziaływania wiązek. Celem pracy doktorskiej pani Salihy Bashir było zbadanie możliwości wykorzystania danych zbieranych w eksperymencie do wyznaczania fluencji cząstek, co jest ważne dla przewidywania powstających w detektorze VELO uszkodzeń radiacyjnych.

Promotorem pani mgr. Bashir jest prof. Agnieszka Obłąkowska-Mucha z Katedry Oddziaływań i Detekcji Cząstek na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. 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 eksperymentalnych.

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

Wkład Doktorantki w badania przedstawione w rozprawie jest w niej szczegółowo opisany i świadczy o jej wiodącej roli w prezentowanych w pracy symulacjach i analizach danych. O wiodącym udziale Doktorantki w przedstawionych badaniach świadczą także jej liczne referaty na konferencjach międzynarodowych i na spotkaniach zespołu LHCb, a także prezentujące je publikacje pokonferencyjne, łącznie 4, w których jest pierwszym autorem.

Rozprawa składa się z siedmiu rozdziałów opatrzonych streszczeniem oraz uzupełnionych dodatkiem zawierającym część wykresów z przeprowadzonych badań i spisem literatury.

Pierwszy rozdział, jest ogólnym wstępem do badań prowadzonych na LHC i przedstawia podstawy Modelu Standardowego cząstek. W rozdziale tym opisano najistotniejsze własności cząstek elementarnych – kwarków i leptonów, jak również fundamentalnych oddziaływań między nimi. Przedstawiono podstawy formalizmu teoretycznego opisującego te oddziaływania na bazie kwantowej teorii pola i przyjętych symetrii cechowania. Wskazano także na ograniczenia/zagadki Modelu Standardowego stanowiące motywację do dalszych badań.

W rozdziale 2 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”. Opisano system wyzwalania eksperymentu i procedury rekonstrukcji śladów. Wprowadzono także podstawowe pojęcia i wielkości opisujące uszkodzenia radiacyjne w detektorach półprzewodnikowych.

W rozdziale 3 przedstawiono generatory zdarzeń PYTHIA i HERWIG, które w dalszej części pracy zostały wykorzystane w symulacjach zderzeń protonów z protonami celem wyznaczenia fluencji cząstek. Omówiono podstawowe procesy fizyczne uwzględnione w tych generatorach w modelowaniu zderzeń i produkcji cząstek. Porównano, uzyskane w symulacjach z wykorzystaniem PYTHIA i HERWIGA, rozkłady pędu poprzecznego, pseudopospieszności oraz krotności naładowanych hadronów dla zderzeń p-p przy energii w układzie środka masy 7 i 13 TeV. Stosunkowo duże rozbieżności zauważono pomiędzy rozkładami krotności hadronów. Wykazano dużą czułość wyników symulacji na ustawienia podstawowych parametrów wykorzystywanych generatorów zdarzeń. Porównano produkcję neutronów, mających duży wpływ na uszkodzenia radiacyjne detektorów krzemowych, z produkcją protonów zauważając, że rozkłady energii i rozkłady kątowe są do siebie zbliżone i że przyczynki do fluencji od neutronów są bliskie tym od protonów.

W rozdziale 4 opisano próby dostrojenia kluczowych parametrów generatora PYTHIA 8 celem poprawy opisu dostępnych danych eksperymentalnych dla produkcji hadronów w zderzeniach proton-proton przy energii 7 i 13 TeV pochodzących z eksperymentów LHCb, ATLAS i CMS. Jako narzędzia w dostrajaniu parametrów wykorzystano pakiety oprogramowania RIVET i PROFESSOR. Poczyniono wiele istotnych obserwacji dotyczących

poprawy opisu rozkładów różnych wielkości charakteryzujących produkcję hadronów przy dostrajaniu parametrów i zmianach opcji modeli fizycznych zastosowanych w generatorze.

Rozdział 5 przedstawia analizę danych zebranych przez LHCb w 2018 roku dla wyznaczenia fluencji cząstek i zademonstrowania w ten sposób, że zbierane dane można wykorzystać do oszacowania zniszczeń radiacyjnych w detektorze VELO. Przeprowadzono selekcję zdarzeń, rekonstrukcję śladów i identyfikację naładowanych pionów, kaonów i protonów. Tą samą procedurę analizy zastosowano dla zdarzeń symulacyjnych wygenerowanych z użyciem PYTHII. Wyznaczono rozkłady różnych kluczowych zmiennych kinematycznych produkowanych naładowanych cząstek i otrzymano dobrą, w mojej ocenie, zgodność pomiędzy danymi eksperymentalnymi, a symulacjami. Znając energie cząstek wyznaczono fluencję równoważną neutronom w funkcji energii dla różnych przedziałów pseudopospiesznosci. Wyznaczono też wartości fluencji dla czterech sensorów detektora VELO ustawionych w różnych odległościach od miejsca interakcji. Wartości te obarczone są niepewnościami rzędu 30 %. W pracy nie wyjaśniono jak niepewności te zostały oszacowane. Szkoda także, że brak jest informacji, czy wyznaczone wartości fluencji są skorelowane ze zniszczeniami radiacyjnymi sensorów monitorowanymi w eksperymencie m.in. przez pomiar prądu upływu.

W rozdziale 6 przedstawiono mapy fluencji dla nowego, pikselowego detektora VELO wyznaczone z wykorzystaniem danych zebranych w okresie trzech miesięcy w roku 2024 przy energii 13.6 TeV. Porównano je z wynikami symulacji bazujących na generatorze zdarzeń PYTHIA 8. Przedstawiono, m.in. dla jednego z modułów detektora VELO, eksperymentalne gęstości zliczeń (hit density) w funkcji odległości od osi wiązki, osobno dla każdego z trzech miesięcy pomiaru (rysunek 6.10 (a)). Stwierdzono, że rozkład zliczeń dla pierwszego miesiąca zgadza się z wynikiem symulacji. W rzeczywistości zgodność występuje jedynie dla odległości radialnej r poniżej ok. 10 mm, natomiast dla większych wartości r symulacje lepiej zgadzają się z rozkładami dla drugiego i trzeciego miesiąca pomiaru. Zasugerowano również, że niższe zliczenia w drugim i trzecim miesiącu pomiaru mogą być wynikiem uszkodzeń radiacyjnych. Jeśli tak, to nie jest jasne, dlaczego nie obserwuje się dalszego spadku gęstości zliczeń pomiędzy drugim a trzecim miesiącem pomiaru, pomimo że w drugim miesiącu świetlność była wyższa niż w pierwszym.

Eksperymentalne rozkłady fluencji, wyznaczone w funkcji odległości od osi wiązki dla różnych pozycji wzdłuż osi wiązki, mają kształt zbliżony do tych uzyskanych w symulacjach. Nie jest jednak jasne, czy zgodność występuje także jeśli chodzi o wartości bezwzględne. Np. na rysunku 6.12 (a) przedstawiono radialne rozkłady fluencji wyznaczone dla danych eksperymentalnych i przeskalowane do świetlności 1 fb^{-1} . Dla analogicznych rozkładów uzyskanych w symulacjach, które pokazano na rysunku 6.11 (b), nie podano jednak informacji do jakiej świetlności zostały unormowane. Jeśli również do 1 fb^{-1} , to rozbieżność pomiędzy eksperymentem a symulacjami, jeśli chodzi o bezwzględną skalę, byłaby większa niż dwa rzędy wielkości.

Rozdział 7, ostatni, jest podsumowaniem pracy.

Oceniając rozprawę stwierdzam jej wysoki poziom merytoryczny. Widoczna jest szeroka wiedza Doktorantki zarówno, jeśli chodzi o stronę fizyczną analizowanych procesów produkcji hadronów, jak i szczegóły techniczne wykonywania symulacji eksperymentu i analizy danych. Praca stanowi istotny wkład do badań prowadzonych przez zespół LHCb. Przeprowadzono dostrojenie parametrów generatora zdarzeń PYTHIA celem lepszego opisu danych eksperymentalnych. Dokonano porównania wyników symulacji z wykorzystaniem PYTHII i HERWIGA z danymi eksperymentalnymi LHCb. Stwierdzono, że PYTHIA lepiej niż HERWIG opisuje dane dla krotności i gęstości naładowanych hadronów i ją wskazano jako bardziej odpowiedni generator zdarzeń dla LHCb. Przeprowadzono analizę danych eksperymentalnych zebranych przez LHCb celem wyznaczania fluencji i wykazano możliwość wykorzystania ich do przewidywania uszkodzeń radiacyjnych detektora VELO.

Znaczny zakres wykonanych analiz, ich kompetentny opis i krytyczna interpretacja uzyskanych wyników wykazują umiejętność doktorantki samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W rozprawie znalazłem pewną liczbę drobnych usterek:

strona 18, linia 2 – kwarki d, s i b posiadają ładunek $-1/3 e$,

strona 32, akapit 1 i 2, brak znaku minus w jednostce świetlności (powinno być $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$),

strona 32, akapit 2, linia 1 – nie wyjaśniono co oznacza μ ,

strona 38, czwarta linia od dołu – „... is transmitted to photomultiplier tubes, to enhance the signal and transform it to light..” - czy nie chodzi raczej o wybite elektronów (nie światła) z fotokatody fotopowielacza?

strona 46, akapit 3, linia 1 – nie wyjaśniono co to są „T-stations”,

strona 47, linia 2, nie wyjaśniono co to są „TT hits”,

strona 49, akapit 3, linia 1, - nie wyjaśniono skrótu NIEL (non-ionizing energy loss),

strona 50, rysunek 2.18 – brak odnośnika w tekście do rysunku,

strona 54, wzór 3.1 – nie wyjaśniono co to jest μ_R ,

strona 90, tabela 4.7, zamiast „clolour Reconnection” prawdopodobnie powinno być „Colour reconnection”,

strona 91, tabela 4.9, jako P8 default parametru alphaSvalue podano wartość 1.30, która nie mieści się w podanym przedziale (Min, Max) oraz jest inna niż wartość podana w tabeli 3.1,

strona 101, zdanie 1, “..comparison is made between these generators..” – nie powiedziano jednak o które generatory chodzi,

strona 111, akapit 3, zdanie 1, „...and multiplicity..” – prawdopodobnie powinno być „... and azimuthal angle ..”,

strona 113, rysunek 5.5 (a) - czwarty i siódmy interwał histogramu są puste co najprawdopodobniej spowodowane jest niepoprawnym wyborem szerokości interwału (binu), która, w przypadku histogramu przedstawiającego krotność powinna być (a nie jest) równa 1,

strona 135, przedostatnia linia, jest „electrical field” – prawdopodobnie powinno być „magnetic field”, bo do wyznaczania pędu cząstek naładowanych wykorzystywane jest zakrzywienie trajektorii w polu magnetycznym,

strona 142, rysunek 6.11, podpis mówi, że rysunek przedstawia zależność fluencji od energii, podczas gdy na osi x histogramów podany jest symbol r [cm], jak również w odwołaniu do rysunku na stronie 140 mowa jest o zależności fluencji od odległości radialnej r .

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

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2010 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.

