

dr hab. inż. Hanna Paulina Zbroszczyk, prof. PW
Politechnika Warszawska
Wydział Fizyki
ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa

Warszawa, 16 grudnia 2022 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr Ingi Łakomicz pod tytułem:
„The measurement of $\phi(1020)$ meson production in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector at the LHC”

Rozprawa doktorska mgr Ingi Łakomicz została wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Mariusza Przybycienia (i dr inż. Leszka Adamczyka w roli promotora pomocniczego) na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Praca dotyczy eksperymentalnej analizy produkcji mezonów $\phi(1020)$ w zderzeniach p+p przy energii $\sqrt{s} = 13$ TeV w eksperymencie ATLAS przy Wielkim Zderzaczu Hadronów LHC w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych w CERN. W pracy zostało przedstawione porównanie produkcji mezonu $\phi(1020)$ w różnych typach nieelastycznego rozpraszania proton-proton: pojedynczej dyfrakcji (*ang.* **S**ingle **D**iffraction), centralnej dyfrakcji (*ang.* **C**entral **D**iffraction) i procesach niedyfrakcyjnych (*ang.* **N**on-**D**iffractive). Uzyskane wyniki są także istotne z punktu widzenia rozwoju modeli fenomenologicznych opisujących produkcję hadronów w zakresie przewidywań przekrojów czynnych nieelastycznych procesów rozproszenia proton-proton. Uważam, że badania przedstawione w prezentowanej pracy wnoszą istotny wkład w zrozumienie mechanizmów produkcji mezonu $\phi(1020)$.

Praca doktorska mgr Ingi Łakomicz jest napisana w języku angielskim, została poddana starannej edycji zarówno pod względem językowym, jak i graficznym. Praca składa się łącznie z 9 rozdziałów, wstępu, streszczenia w języku polskim, spisu literatury i 2 dodatków. Na

początku pracy został umieszczony słownik - zestawienie akronimów użytych w rozprawie doktorskiej. Praca liczy łącznie 128 strony, z czego część czysto opisowa stanowi 86 stron. Spis literatury stanowi 173 pozycji.

We wstępie autorka opisała motywację przeprowadzonych badań, streściła zawartość pracy, a także opisała pokrótce swoje zobowiązania jako członkini kolaboracji ATLAS. Pani Inga Łakomic w ramach swojej współpracy w kolaboracji ATLAS była zaangażowana w cztery zagadnienia: produkcja dziwności w przypadkach pojedynczej dyfrakcji, centralnej dyfrakcji oraz procesów nie-dyfrakcyjnych przy energii $\sqrt{s}=13$ TeV (jest to główne zagadnienie przestawione mi do recenzji w rozprawie doktorskiej), ekskluzywną produkcją par mezonów π przy energii $\sqrt{s}=13$ TeV, zagadnienie pojedynczej dyfrakcji w zakresie niskich mas przy energii $\sqrt{s}=13$ TeV oraz obserwację procesu $\gamma\gamma \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj$. W ostatnie trzy zagadnienia mgr inż. Inga Łakomic była zaangażowana w procesie identyfikacji cząstek oraz przy walidacji uzyskanych wyników za pomocą modeli Monte Carlo.

W Rozdziale 1 autorka opisała zaplecze teoretyczne pracy: W ramach wprowadzenia w Model Standardowy znalazł się opis oddziaływań silnych, elastyczne rozpraszanie proton-proton, następnie zostało omówione zagadnienie dziwności, kwarków, procesów fragmentacji, rezonansów, mezonu $\phi(1020)$, zmiennych kinematycznych, generatorów Monte-Carlo, a także motywacje i cele badań.

Rozdział 2 stanowi to opis aparatury eksperymentalnej. Znalazł się w nim opis akceleratora LHC, detektora ATLAS (z opisem poszczególnych zespołów pod-detektorowych), co uważam za bardzo wartościowe, ponieważ umożliwia zrozumienie funkcjonowania detektora ATLAS osobom spoza kolaboracji.

W rozdziale 3 znajduje się opis zagadnienia identyfikacji cząstek. Tutaj autorka opisała wstęp (straty energii cząstek, formułę Bethe-Bloch'a), rekonstrukcję pędu rejestrowanych cząstek wraz z dopasowaniem wyznaczonych strat energii dE/dx .

Rozdział 4 to opis selekcji wybranych przypadków kolizji proton-proton. Autorka opisała zarówno przypadki danych eksperymentalnych, jak i dane symulacyjne z generatorów Monte-Carlo. W pracy zostały użyte generatory PYTHIA 8 oraz EPOS. Odrębny fragment pracy został poświęcony selekcji śladów cząstek w detektorze ALFA.

Rozdział 5 przedstawia zagadnienie ekstrakcji sygnału mezonu $\phi(1020)$. Mezon $\phi(1020)$ jest rekonstruowany na podstawie rejestracji produktów jego rozpadu - przeciwnie naładowanych mezonów K. Odpowiedni kandydaci są wybierani na podstawie rozkładu masy niezmienniczej pary K^+K^- . Wartościowym elementem pracy jest fakt, że oprócz

rekonstrukcji mezonów K , zostały przedstawione także wyniki rekonstrukcji mezonów π oraz barionów p , co jest zrozumiałe, ponieważ sumaryczne prawdopodobieństwo rejestracji każdego z wymienionych hadronów jest równe jedności, co w przypadku precyzyjnej rekonstrukcji i określenia prawdopodobieństwa poprawnej rejestracji wybranego kandydata wymaga uwzględnienia pomiarów dwóch pozostałych hadronów. W przypadku mezonów K , który były głównym zainteresowaniem mgr inż. Ingi Łakomicz zostały oddzielnie przeanalizowane wydajności identyfikacji oraz czystość (prawdopodobieństwo identyfikacji śladu jako mezon K) w funkcji pędu mezonu K . W celu uzyskanie jak najwyższej wydajności przy jednocześnie wysokiej wartości czystości próbki zostały przetestowane trzy różne zakresy pędowe.

Rozdział 6 opisuje niezbędne korekcje, jakie musiały być zastosowane w przypadku zmierzonych rozkładów mezonu $\phi(1020)$. Są one następujące: efektywność rekonstrukcji wierzchołka, efektywność rekonstrukcji śladu cząstki, efektywność identyfikacji mezonów K , korekcję Minimum Bias Trigger Scintillator (MBTS), korekcję mierzonego tła.

Rozdział 7 stanowi opis systematycznej analizy m. in. korekcji rekonstrukcji wierzchołka, korelacji identyfikacji cząstek. Oddzielny rozdział został poświęcony analizie niepewności systematycznych, zostały opisane cztery przyczynki (pozostałe, których wkład jest zniesiony w analizie nie został uwzględniony): niepewności rekonstrukcji śladu cząstek (dane, model), niepewności efektywności identyfikacji cząstek, korekcji MBTS.

Rozdział 8 zawiera wyniki oraz ich dyskusję. Zostały przedstawione wyniki dotyczące przypadku pomiaru Single Diffraction, pomiaru Central Diffraction, pomiarów Min-Bias, które zostały poparte dyskusją. To niewątpliwie najważniejszy rozdział pracy zawierający wyniki mgr inż. Ingi Łakomicz. We wstępie autorka przypomina wszystkie parametry, jakie zostały uwzględnione przy analizie kandydatów na mezony $\phi(1020)$ (zakresy prędkości, pędów, itp. Zostały przedstawione tabele zestawiające wszystkie niepewności systematyczne. Wyzwaniem pracy była ekstrakcja sygnałów pochodzących z procesów pojedynczej dyfrakcji, ponieważ trygery SD zawierają jednocześnie sygnały z pozostałych procesów: centralnej dyfrakcji, podwójnej dyfrakcji oraz procesów niedyfrakcyjnych. Wyniki uwzględniające wszystkie wkłady zostały porównane z przewidywaniami modeli Monte Carlo, co wykazało znaczącą nadwyżkę w prezentowanych rozkładach. Dopiero ekstrakcja właściwego sygnału mogła zostać poddana porównaniu z przewidywaniami modeli fenomenologicznych. Oba modele przewidują podobne rozkłady widm w zakresie rozważanych pędów poprzecznych oraz prędkości i są one niedoszacowane o faktor ok. 2 w porównaniu z wynikami

eksperymentalnymi (przy uwzględnieniu wszystkich procesów nieelastycznych). Zostało też przedstawione porównanie do wcześniejszych wyników, uzyskanych przy energii 7 TeV (zderzenia p+p). W zakresie rozważanych pędów poprzecznych zaobserwowana została dobra zgodność pomiędzy dwiema energiami (dla energii $\sqrt{s} = 13$ TeV zmierzone wartości są większe, ale znajdujące się w granicach wyznaczonych niepewności).

Rozdział 9 stanowi podsumowanie. Głównym wnioskiem z pracy, jest to, że produkcja mezonu $\phi(1020)$ jest powiązana ze średnią liczną wybranych cząstek, co sugeruje, że mezon $\phi(1020)$ pochodzi z procesów fragmentacji, a także, że zależność produkcji mezonu $\phi(1020)$ od początkowych etapów (ang. initial stages) w zadanych procesach pomeron-pomeron w pojedynczej dyfrakcji, pomeron-pomeron w centralnej dyfrakcji, pomeron-pomeron w procesach niedyfrakcyjnych nie jest zaobserwowana.

Praca jest napisana starannie. Każdy etap analizy został szczegółowo opisany, co świadczy o wysokiej jakości uzyskanych wyników, zaraz potwierdza jej wiarygodność. W przedstawionej mi do recenzji pracy doktorskiej mgr Inga Łakomic dowiodła, że precyzyjnie dokonała produkcji mezonu $\phi(1020)$ w zderzeniach p+p przy energii $\sqrt{s} = 7$ TeV.

W pracy znajdują się drobne uchybienia. Poniżej przytaczam tylko niektóre z nich, wszystkie są bowiem marginalne i nie umniejszają wartości merytorycznej pracy.

W rozdziale 1 autorka zdefiniowała bariony jako cząstki zbudowane z nieparzystej liczby kwarków, według tabel PDG barion składa się z trzech kwarków walencyjnych, podobnie w przypadku mezonu, który jest zbudowany z dwóch kwarków walencyjnych.

W tym samym rozdziale, w części dedykowanej dziwności autorka napisała, że dziwność nie jest zachowana w oddziaływaniach słabych, co jest oczywiście prawdą, ale warto byłoby wspomnieć, że ta liczba kwantowa S oscyluje w zakresie jedności.

W opisie morza kwarków jest wspomniane, że studia struktury protonu wykazały kontrubucję kwarków dziwnych, przydałaby się referencja.

W opisie zmiennych kinematycznych nie zostały dokładnie zdefiniowane wielkości Mandelstama: s, t, u.

Rozdział 1.6, opisujący motywacje i cele pracy jest umieszczony w części teoretycznej. Ponieważ odbiega treścią od pozostałych, umieściłabym go oddzielnie.

W pracy przyjęto notację $c=1$. Powinno być to wspomniane, tym bardziej że wiele rysunków zawiera wielkość c (np. Rys. 4.3), podobnie we wzorach na stronie 39.

W tabeli 3.1 powinna być zastosowana ta sama precyzja w przedstawianiu wszystkich niepewności, czasem są to dwie cyfry dziesiętne, czasem trzy, a czasem cztery

W rozdziale 4.3 zostało wspomniane spełnienie tych samych warunków selekcji przypadków, przydałoby się skonkretyzować o jakie warunki chodzi.

W rozdziale 5, w opisie selekcji mezonów K jest napisane, że oczekuje się różnych wydajności identyfikacji cząstek w danych eksperymentalnych oraz w symulacjach Monte Carlo. Warto byłoby to zagadnienie wyjaśnić czym jest to spowodowane.

Warto też byłoby skomentować wybór zakresów pędowych w analizie danych (formuły 5.3 a - 5.3 c).

W rozdziale 6 wspomniane zostało, że zostały zaobserwowane inne wydajności rekonstrukcji dodatnich i ujemnych mezonów K . Czy wiadomo czym jest to spowodowane?

Niektóre rysunki są omawiane nie po kolei: na stronie 51 najpierw został omówiony rys. 6.5, a dopiero potem 6.4, warto byłoby zamienić kolejność.

W rys. 6.5 zostały przedstawione parametry dopasowania dla ujemnych i dodatnich mezonów K , warto byłoby pokrótce omówić ich zgodność w zakresie wyznaczonych niepewności by móc wnioskować czy są zgodne, czy nie.

W pracy jest wiele odniesień do zdefiniowanych w słowniku skrótów. Niekiedy jednak zamiast skrótu jest opisywany cały termin. Nie ma takiej potrzeby przy obecności słownika. Ze względu na bardzo dużą liczbę terminów uważam za niewygodną konieczność częstego wracania do słownika w celu identyfikacji skrótu.

W podziale 7.4 zostały wspomniane trzy przyczynki niepewności systematycznych, podczas gdy zostały opisane cztery.

W podsumowaniu, oprócz porównania do niższej energii eksperymentu ATLAS warto byłoby się odnieść do wyników innych eksperymentów, o ile takie istnieją.

Podsumowując, uważam że rozprawa doktorska mgr Ingi Łakomiec zawiera oryginalne i ciekawe wyniki poszerzające naszą wiedzę o procesach wywołanych fotonami. Jako, że rozprawa spełnia wszelkie formalne wymogi stawiane pracom doktorskim wnoszę o dopuszczenie do jej publicznej obrony.

Heine Broxayh