



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

dr hab. Wolfgang Schäfer
prof. IFJ PAN

*IFJ PAN, Zakład
Teorii Silnych Oddziaływań
i Układów Wielu Ciał, NZ21
ul. Radzikowskiego 152
31-342 Kraków, Poland
+48 662 8227
Wolfgang.Schaefer@ifj.edu.pl*

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pani Ingi Łakomiec
zatytułowanej**

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

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Ingi Łakomiec została przygotowana pod opieką prof. dr hab. inż. Mariusza Przybieciana na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH w Krakowie. Promotorem pomocniczym jest dr. Leszek Adamczyk.

Tematem pracy jest produkcja mezonów $\phi(1020)$ w zderzeniach proton-proton przy energii $\sqrt{s} = 13$ TeV w układzie środka masy z pomocą detektora ATLAS przy wielkim zderzaczu hadronów LHC. Głównym atutem pracy doktorskiej jest fakt, że Doktorantka bada produkcję mezonów w różnych reakcjach, oprócz inkluzywnej produkcji w nieelastycznych zderzeniach, również dyfrakcyjne procesy różnego rodzaju. Są to badania oddziaływań silnych opisywane przez QCD w obszarze nieperturbacyjnym. W tym kontekście dane doświadczalne, jak te uzyskane przez Doktorantkę są niezwykle ważne dla rozwoju modeli teoretycznych.

Przedstawiona mi rozprawa składa się z krótkiego wstępu, dziewięciu rozdziałów i bibliografii z ponad 170 pozycjami. Dodatkowo w dwóch załącznikach znajduje się obszerna liczba rysunków z wynikami różnych procedur fitowania, które dokumentują wykonaną analizę danych.

W krótkim “zerowym” rozdziale pod tytułem "Introduction", Autorka wspomina o jej wkładzie w eksperymencie ATLAS. Doktorantka podczas czterech miesięcy jej pobytu pełniła typowe obowiązki dla członków kolaboracji ATLAS. Tu zajmowała się pracą nad detektorem ALFA i analizą jego wydajności w rekonstrukcji protonów. Opracowała również oprogramowanie potrzebne do analizy danych. Wyniki tych analiz prezentowała na międzynarodowej konferencji. Jest ona Autorką publikacji pokonferencyjnej. Pani mgr. inż. Łakomiec uczestniczy w pięciu podzespołach eksperymentu ATLAS.

Wyniki recenzowanej pracy doktorskiej w momencie pisania tej recenzji, nie zostały jeszcze opublikowane lub zamieszczone w repozytorium "preprintów".

Praca jest napisana w języku angielskim i nie mam zastrzeżeń do poziomu językowego.

Praca jest ogólnie dobrze napisana i zredagowana, jednak z pewnymi wyjątkami, niektóre z nich będą wymieniane poniżej.

Uważam, że w bibliografii prace nie zawsze występują w kolejności w jakiej są cytowane w tekście. Mianowicie, rozdział drugi kończy się na pozycji [154], natomiast rozdział trzeci startuje od Ref.[165]. W czwartym rozdziale znowu wracamy do Ref.[156]. Nie mogłem znaleźć cytowania pozycji [155] w tekście. Jest to mała edytorska wada, która jednak czytelnikowi utrudnia zorientowanie się w tekście.

W pierwszym rozdziale wprowadzono krótki przegląd najważniejszych koncepcji teoretycznych dla opisu oddziaływań silnych w obszarze wysokich energii. Krótko przedstawione są pewne własności mezonu ϕ jak i rola kwarków dziwnych w reakcjach hadronowych. Rozdział pierwszy zawiera kilka małych błędów lub pomyłek. Są to raczej drobne uchybienia, które nie wpływają znacząco na ocenę merytoryczną i dobre ogólne wrażenie recenzowanej rozprawy.

Pozwolle sobie wymienić kilka z tych niedoskonałości. Po pierwsze, napięcie struny QCD we wzorze (1.1) jest oznaczone literą k , natomiast we wzorze (1.3) ta sama wielkość występuje jako κ . W akapicie 1.3.1 przedstawiono nam mezon $\phi(1020)$. Biorąc pod uwagę, że produkcja tego mezonu jest głównym przedmiotem pracy doktorskiej oczekiwałbym jednak trochę więcej informacji niż kilka zdań. Na przykład wypadałoby wymienić liczby kwantowe $J^{PC} = 1^{--}$ mezonu. Dalej, w rysunku 1.7 zamiast $\pm\Gamma/2$ na osi odciętych powinnien być napisany $M \pm \Gamma/2$. Na rysunku 1.8 zostały pomyłone mezony K^+ i K^- . Poprawny skład kwarków mezonu K^+ to $u\bar{s}$ i odpowiednio dla K^- mamy $s\bar{u}$. Co prawda, ten błąd znajduje się już w pracy [74] która jak wspomina Doktorantka jest źródłem tego rysunku.

Następnie, w rozdziale drugim, Autorka szkicuje opis eksperymentu ATLAS na akceleratorze LHC i przedstawia najważniejsze części detektora ATLAS. Rozdział ten jest dobrze napisany i czytelny również dla osoby nie będącej ekspertem. Przedstawione są detektory ALFA, który służy do pomiaru protonów rozpraszanych przy bardzo małych kątach. Grają one bardzo ważną rolę przy pomiarach procesów dyfrakcyjnych.

W kolejnych rozdziałach zastosowano dość standardową procedurę prezentacji wyników analizy eksperymentalnej w fizyce wysokich energii.

Rozdział trzeci jest poświęcony indentyfikacji cząstek. Po krótkiej dyskusji formuły Bethe-Bloch Autorka przedstawia metody fitowania rozkładu wielkości $\ln dE/dx$ opracowane przez kolaborację ATLAS.

W czwartym rozdziale przedstawione są próbki danych, na których oparta jest analiza. Są to również dane uzyskane w eksperymencie jak i próbki tworzone przy użyciu symulacji Monte Carlo. Autorka tłumaczy kryteria selekcji przypadków jak i cięcia kinematyczne.

W rozdziale piątym dyskutowana jest selekcja mezonów K^+K^- i definiowany jest sygnał - rezonans mezonu ϕ w kanale K^+K^- .

Rozdział szósty przedstawia poprawki do widm mezonów ϕ , natomiast w rozdziale siódmym dyskutowane są testy konsystencji analizy i prowadzona jest analiza błędów systematycznych.

Nie mogłem znaleźć nieścisłości w prowadzeniu analizy danych i wyznaczenia niepewności eksperymentalnych. Doktorantka dość dokładnie opisuje co zrobiła i obszerne załączniki powinny

być pomocne w odtworzeniu wyników jeżeli będzie taka potrzeba. Styl pisania jednak jest często zbyt mało pedagogiczny. Czasami brakuje mi trochę motywacji wybranej metody. Na przykład w akapicie 5.2.1 o ekstrakcji sygnału, Autorka używa kształt rezonansu we formie nierelatywistycznej funkcji Breit-Wignera. W niektórych pracach znajdujemy bardziej złożony opis poprzez relatywistyczny wzór uwzględniający szerokość mezonu, która zależy od energii (np. patrz [70,73]). Zakładam, że metoda wybrana przez Doktorantkę jest wystarczająco dokładna, jednak krótki komentarz byłoby przydatny.

Wreszcie, w rozdziale ósmym Autorka przedstawia główne wyniki rozprawy. Są to liczby zliczeń mezonów ϕ w zależności zarówno od pędu poprzecznego jak i pospieszności (rapidity) mezonu. Dane obejmują tzw. obszar "midrapidity", do tego pęd poprzeczny przyjmuje wartości pomiędzy 0.6 i 1.5 GeV.

Inkluzywna produkcja mezonów ϕ została wcześniej zmierzona w innych obszarach kinematycznych lub energii zderzenia. Na przykład w ostatnich latach poprzez eksperymenty STAR, ATLAS, LHCb, ALICE oraz NA61/Shine. Wyniki Doktorantki wyróżniają się na tle tych wcześniejszych, tym że badała ona zarówno inkluzywną produkcję jak i dyfrakcyjne procesy. Są to zarówno procesy pojedynczo-dyfrakcyjne (SD) jak i tzw. centralna dyfrakcja (CD). Dane są porównywane do wyników dwóch generatorów Monte Carlo, PYTHIA 8 i EPOS. Oba generatory Monte Carlo niedoszacowują danych.

Choć dane w obecnej formie są przydatne do udoskonalenia symulacji Monte Carlo, mają jedną wadę. Problem leży w ich normalizacji. Mianowicie, liczby zliczeń mezonów są podzielone poprzez liczbę przypadków z odpowiednią charakterystyką (np. SD lub CD). Do porównania z modelami dynamicznymi potrzebne byłyby raczej odpowiednio znormalizowane przekroje czynne. Przynajmniej na tym etapie warto byłoby już pokazać zależność mianownika N od odpowiednich cięć kinematycznych. Wydaje się, że ten mianownik jest nietrywialną funkcją kinematycznej zmiennej ξ , i różni się w dwóch używanych generatorach.

Pomimo tych wciąż otwartych problemów, prezentowana praca stanowi nowatorskie wykorzystanie detektora ALFA. Jak Autorka wnioskuje, rozkłady mezonu ϕ dla przypadków o różnych topologiach stanu końcowego, wskazują na wspólny mechanizm produkcji, jak np. fragmentacji.

Jeszcze jedna uwaga końcowa. W dyskusji poszczególnych reakcji, brakuje mi odniesienia się do dyfrakcyjnych procesów ekskluzywnych. Dziwi to, zwłaszcza, że promotor pomocniczy ma duże zasługi w badaniach procesów ekskluzywnych, więc istnieje w grupie badawczej obszerna wiedza na ten temat z której Doktorantka mogłaby skorzystać. Prosiłbym Doktorantkę żeby się odniosła do roli właśnie takich procesów w trakcie obrony.

Konkludując, stwierdzam że przedstawiona mi do recenzji praca doktorska mgr. inż. Ingi Łakomicz stanowi oryginalny i istotny wkład do badań zderzeń protonów na wysokich energiach. Uważam, że spełnia ona wszystkie warunki stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Ingi Łakomicz do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Kraków, 12.XII.2022r.


dr hab. Wolfgang Schäfer

