

Warszawa, styczeń 2025 r.

Prof. dr hab. Wojciech DOMINIK
Instytut Fizyki Doświadczalnej
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
Pasteura 5, 02-093 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Wiolety Rzęsy pt.
**Non-identical femtoscopy of pairs containing deuteron and interaction
studies of nucleons with strange matter**

Rozprawa doktorska mgr inż. Wiolety Rzęsy dotyczy badań zderzeń przeciwbieżnych wiązek jąder ołowiu wytwarzanych w akceleratorze LHC w CERN przy energii w środka masy 5.02 TeV za pomocą aparatury eksperymentu ALICE. Dane doświadczalne zebrane zostały przez współpracę ALICE w latach 2015 (analiza produkcji par kaon-proton) oraz 2018 (analiza produkcji par zawierających deuteron).

Oryginalny tytuł rozprawy w języku angielskim budzi pewien niepokój interpretacyjny. Czy „nieidentyczność” dotyczy femtoskopii czy składników analizowanych par cząstek zawierających deuteron. Sformułowany w streszczeniu tytuł w języku polskim wyjaśnia intencję Autorki i pozwala ocenić zgodność pracy z jej tytułem. Stwierdzam, że cel pracy jest zgodny z tytułem: „Femtoskopia par nieidentycznych zawierających deuteron i badania oddziaływań nukleonów z materią dziwną”.

Praca napisana w języku angielskim liczy 173 strony łącznie ze spisem literatury. Dodatkowo Autorka zamieściła oddzielnie spisy wykresów i tabel. Rozprawa zbudowana jest z siedmiu rozdziałów, w których Autorka logicznie i konsekwentnie przedstawia proces badawczy.

W rozdziale 2 (Introduction), poprzedzonym krótkim wprowadzeniem, Autorka omawia w podstawowy sposób Model Standardowy oddziaływań cząstek oraz procesy zachodzące w oddziaływaniach ciężkich jonów przy energiach relatywistycznych. Bardziej szczegółowo opisuje metody femtoskopowe badania struktury źródeł produkcji cząstek w zderzeniach oraz mechanizmów produkcji lekkich jąder poprzez badanie korelacji dwucząstkowych. Jest to dobre wprowadzenie do zasadniczej doświadczalnej części rozprawy oraz kompletne przedstawienie metodyki, która jest stosowana we własnych badaniach.

Kolejny rozdział przedstawia zestaw aparatury ALICE, za pomocą której zebrany został materiał doświadczalny poddany przez Autorkę analizie. Prezentacja jest kompletna i wystarczająca informacyjnie. Bardziej szczegółowo przedstawione są dwa elementy ALICE: detektor śladowy Time Projection Chamber (TPC) oraz detektor czasu przelotu przelotu Time of Flight (TOF), służące do pomiaru pędu oraz identyfikacji naładowanych produktów zderzeń poprzez pomiar depozytów energii oraz czasu przelotu. Autorka wskazuje na bardzo dobrą

rozdzielczość identyfikacji naładowanych hadronów w przedziale pędów poprzecznych od 0.1 GeV/c (piony) do 3 GeV/c (protony).

Rozdział 4 omawia dane doświadczalne oraz kryteria wyboru podzbiorów par nieidentycznych cząstek do dalszej analizy fizycznej. Konieczność poprawek ze względu na niedoskonałości rekonstrukcji i identyfikacji oraz na procesy tła jest omówiona kompletnie i przedstawiona ilościowo. Pokazano, że czystość identyfikacji naładowanych cząstek pierwotnych każdego rodzaju, w zakresie dalszej analizy, przewyższa 90% w pełnym zakresie pędu poprzecznego. Istotną kwestię udziału produktów oddziaływań wtórnych w materiałach aparatury zbadano metodami Monte-Carlo. Spodziewany udział deuteronów produkowanych wtórnie jest znaczący i sięga kilkudziesięciu procent dla pędów poprzecznych mniejszych niż 1.2 GeV/c i dużej centralności. Na podstawie analizy ograniczeń identyfikacji pierwotnych cząstek Autorka policzyła poprawki doświadczalnych funkcji korelacji par nieidentycznych cząstek z udziałem deuteronów lub anti-deuteronów w funkcji względnego pędu identyfikowanej pary. Prawidłowe uwzględnienie poprawek jest kluczowe dla powodzenia analizy fizycznej.

Zasadniczą część rozprawy stanowi Rozdział 5 (Results) zawierający wyniki analizy charakterystyk femtoskopowych par pion-deuteron, proton-deuteron, kaon-proton i kaon deuteron. Analizy dotyczące poszczególnych rodzajów par przedstawione są w odrębnych częściach. Prezentację każdej z analiz poprzedza szczegółowa informacja o zadaniach wykonanych przez mgr inż. Rzęsę z wyraźnym zaznaczeniem wkładów wymienionych współpracowników w wykonanie kilku niezbędnych zadań w analizie par proton-deuteron i kaon-proton. Bardzo pozytywnie oceniam szczegółowe i rzetelne przedstawienie własnej roli w procesie badawczym oraz wyraźne zaznaczenie kontekstu przedsięwzięcia badawczego w licznej międzynarodowej współpracy ALICE. Można ocenić, że mgr inż. W. Rzęsa miała istotny wkład w wykonanie wszystkich analiz. Jej wiodący wkład w analizy pion-deuter i proton-deuter potwierdza pełnienie przez Autorkę roli kierownika zespołu ALICE powołanego do opracowania tematycznych publikacji naukowych. Mgr inż. W. Rzęsa przygotowała także manuskrypt zawierający wyniki analizy par kaon-deuteron, który został przyjęty przez współpracę ALICE jako podstawa publikacji naukowej. Można ocenić, iż mgr inż. Wioleta Rzęsa jest bardzo aktywnym uczestnikiem grupy femtoskopowej ALICE i uzyskane przez nią wyniki znajdują uznanie w środowisku.

Analiza charakterystyk par pion-deuteron została przeprowadzona z podziałem na dwie klasy: pary o zgodnym i przeciwnym ładunku elektrycznym. Funkcje korelacji wyznaczano oddzielnie dla trzech centralności kolizji jąder ołowiu i odniesiono do teoretycznego modelu Lednicki-Lyuboshits (LL) opisującego dwuciałowe oddziaływania hadronów. Pokazano, iż uwzględnienie w modelu krótkozasięgowych oddziaływań silnych nie wpływa znacząco na policzoną numerycznie wartość funkcji korelacji. Dopasowanie teoretycznych funkcji korelacji do danych doświadczalnych pozwala wyznaczyć promień źródła par pion-deuteron dla badanych centralności zderzeń, a stąd promień źródła deuteronów. Pokazano, iż promień źródła deuteronów ma tendencję wzrostową wraz ze wzrostem centralności zderzeń, jakkolwiek bardziej precyzyjną analizę ilościową ograniczają znaczące niepewności statystyczne i systematyczne. Dokonana w rozprawie ocena rozmiaru źródła emisji neutronów

w zderzeniach ultrarelatywistycznych jąder ciężkich w warunkach plazmy kwarkowo-gluonowej jest wynikiem nowym, choć, jak pisze Autorka, uzyskanie większej statystyki oddziaływań w Run 3 LHC mogłoby znacząco zwiększyć precyzję pomiaru i porównania z modelami teoretycznymi.

Badanie par proton-deuteron skoncentrowano na zbiorczej analizie par o tym samym znaku ładunku elektrycznego czyli próbka zawierała pary materii i pary anty-materii w proporcji, o której niestety nie znalazłem informacji. Badanie tego kanału pozwala na rozważania związane z oddziaływaniem i stanami materii barionowej w modelach dwuciałowych i trójciałowych. Uzyskane wyniki doświadczalne funkcji korelacji pokazują zgodność zarówno z opisem dwu- jak i trój-ciałowym przy odpowiednim dopasowaniu promienia źródła par. Zaobserwowano, podobnie jak dla par pion-deuteron, wzrost rozmiaru źródła deuteronów wraz ze stopniem centralności zderzeń, choć bardziej wyraźny przy podobnych niepewnościach. Ciekawą kwestią mogłyby być badania korelacji par proton-antydeuteron i antyproton-deuteron w badanych reakcjach, o czym Autorka nie wspomina w rozprawie. Wyniki doświadczalne uzyskane z zastosowaniem standardowych narzędzi analizy, nawet jeśli ich opis modelowy byłby niełatwy, mogłyby pewnie wnieść nową informację. Ciekaw jestem komentarza Doktorantki w tej kwestii podczas publicznej obrony.

Kolejne sekcje rozdziału 5 Doktorantka poświęca przedstawieniu wyników badania oddziaływań kaonów z barionami z celem wyznaczenia parametrów rozpraszania oraz femtoskopowych rozmiarów źródła. Badanie korelacji kaon-deuteron odniesione do wyników uzyskanych dla par kaon-proton może wnieść informacje o sprzężeniach kaonów i neutronów. Uzyskane doświadczalnie funkcje korelacji dla K-p i K-d dają się w pełni opisać za pomocą formalizmu oddziaływania dwuciałowego LL. Wyznaczony rozmiar źródeł emisji par w warunkach plazmy kwarkowo-gluonowej w zderzeniach Pb-Pb rośnie wraz ze stopniem centralności zderzeń dla obu badanych kanałów K-p i K-d. Długości rozpraszania K-p i K-d o przeciwnych ładunkach elektrycznych, otrzymane przez dopasowanie modelu teoretycznego LL są zgodne w granicach niepewności pomiarowych z przewidywaniami kilku innych modeli teoretycznych.

W ostatnich dwóch rozdziałach opisano metodykę wyznaczania niepewności doświadczalnych oraz sformułowano zwarte podsumowanie wyników.

Podsumowując, Doktorantka przedstawiła w rozprawie wyniki starannie przeprowadzonej analizy danych doświadczalnych badania korelacji par nieidentycznych cząstek z zastosowaniem metodyki femtoskopowej do wyznaczenia charakterystyk źródła emisyjnego w warunkach ewolucji gęstej materii kwarkowo-gluonowej. Założony cel badawczy został zrealizowany w oparciu o materiał doświadczalny zebrany przez eksperyment ALICE. Uzyskane wyniki są nowe dla par, w których skład wchodzi deuteron, a sposób przeprowadzenia analizy danych i zastosowana metodyka są oryginalne. Autorka udowodniła, że prosty formalizm LL (opracowany dla źródeł emisji o małych rozmiarach) poprawnie opisuje źródła emisji z udziałem deuteronów dla par o jednakowych i przeciwnych ładunkach elektrycznych. Nie zaobserwowano stanów związanych par. Porównanie wyników K-p i K-d z innymi modelami teoretycznymi pokazuje spójność zastosowanej metody analizy. Analiza jest kompletna w zakresie określonych celów i pokazuje bardzo dobre opanowanie przez

Doktorantkę warsztatu analizy złożonego materiału doświadczalnego oraz metodyki interpretacji fizycznej. Niepewności doświadczalnie zostały wyznaczone starannie i poprawnie przedstawione w rozprawie. Wiele z przedstawionych w pracy wyników cząstkowych zostało zatwierdzonych przez współpracę ALICE jako oficjalny wynik eksperymentalny i jest podstawą publikacji oraz prezentacji na międzynarodowych konferencjach. Mgr inż. Wioleta Rzęsa jest jedną z wiodących osób w komitetach ALICE odpowiedzialnych za ostateczne sformułowanie publikacji związanych z tematyką rozprawy; w ciągu ostatnich kilku lat wielokrotnie przedstawiała w imieniu współpracy ALICE wyniki swoich badań na międzynarodowych konferencjach, w tym trzykrotnie na zaproszenie organizatorów. Obfite i szczegółowe odwołania do rozwijanych przez innych modeli teoretycznych pokazuje obszerną wiedzę doktorantki w zagadnieniach związanych z tematyką rozprawy.

Struktura, układ i język pracy są poprawne, chociaż Autorka nie ustrzegła się literówek i drobnych niezręczności sformułowań.

Kilka komentarzy krytycznych poniżej.

Głównym mankamentem pracy wydanej w formacie małej książeczki jest niedostateczna czytelność, przejrzystość i wyrazistość wielu wykresów. Niewielkie wykresy zawierające mnogość cienkich linii wymagają lupy, co znacząco utrudnia proces oceny. Standard, który jest odpowiedni w obszarze filatelistyki zupełnie nie sprawdza się w prezentacji wyników fizycznych.


W pracy brak jest informacji o statystyce przypadków poszczególnych procesów poddanych analizie. Informacja taka umożliwiłaby czytelnikowi lepszą ocenę wyznaczonych niepewności. Przydatne byłoby zdefiniowanie i omówienie używanego w pracy parametru jakim jest stopień centralności zderzeń.

Ponadto kilka zauważonych błędów:

- Na stronie 98 powinno być Fig.5.11 zamiast Fig. 5.24.
- Na str. 142 powinno być Tab. 6.2 oraz Tab. 6.3 zamiast, odpowiednio, Tab. ?? oraz Tab. 6.2
- Na str. 119 podpis Tabeli 5.9 powinien brzmieć „A two-particle kaon-proton ..” zamiast „A two-particle pion-deuteron ..”.

Wymienione uchybienia nie wpływają negatywnie na odbiór i ocenę rozprawy. Rozprawa w sposób wystarczający prezentuje i poprawnie interpretuje wyniki analizy zgodnie z metodyką femtoskopową. Na pewno jest dobrą podstawą do wykonania analiz produkcji par cząstek w podejściu femtoskopowym dla przyszłych danych zebranych przez ALICE podczas Run-3 LHC.

Praca doktorska mgr inż. Wiolety Rzęsy stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Rozprawę oceniam pozytywnie i wnoszę o dopuszczenie Autorki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.


Wojciech DOMINIK