



Dr hab. Justyna Łagoda
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
Departament Badań Podstawowych

Warszawa, 2 grudnia 2025 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Bartosza Kozłowskiego
zatytułowanej
„ $K^*(892)^0$ production in Ar+Sc collisions at CERN SPS energies
measured by NA61/SHINE”**

Praca doktorska mgr. Bartosza Kozłowskiego pt. „ $K^*(892)^0$ production in Ar+Sc collisions at CERN SPS energies measured by NA61/SHINE” przedstawia pomiary krotności rezonansu $K^*(892)^0$ oraz oszacowanie dolnego limitu czasu między wymrożeniem chemicznym i kinetycznym, uzyskane na podstawie danych zebranych w eksperymencie NA61/SHINE dla zderzeń Ar-Sc przy pędach wiązki 40A, 75A i 150A GeV/c.

Eksperyment NA61/SHINE jest eksperymencie ze stałą tarczą znajdujący się w CERN. Bada oddziaływania protonów i jonów, otrzymywanych z akceleratora SPS, w szerokim zakresie pędów, z różnymi jądrami tarczy. Detektor NA61/SHINE składa się z kilku komór projekcji czasowej, które pozwalają na dokładne pomiary torów i depozytów energii cząstek. Komory znajdujące się najbliżej wierzchołka oddziaływania są umieszczone w polu magnetycznym zapewniającym pomiar pędu. Eksperyment wyposażony jest także w liczniki czasu przeletu, które poprawiają identyfikację cząstek, oraz Projectile Spectator Detector, pozwalający na wybieranie zdarzeń centralnych oraz pomiar centralności. W programie fizycznym NA61/SHINE znajdują się m.in. niezmiernie istotne badania oddziaływań silnych i precyzyjne pomiary produkcji hadronów (ważne np. dla eksperymentów neutrinowych z długą bazą oraz dla eksperymentów mierzących promieniowanie kosmiczne).

Autor badał w swej pracy produkcję rezonansu $K^*(892)^0$ z użyciem metody szablonów (*templates*), wykorzystanej po raz pierwszy w analizie zderzeń jonów. Wyznaczył i porównał z modelami rozkłady pospieszności, otrzymał także krotności i rozkłady zmiennych poprzecznych, które porównał z istniejącymi wynikami dla różnych energii i różnych jąder. Na podstawie tych wyników Autor oszacował również dolny limit czasu między wymrożeniem chemicznym i kinetycznym w przebiegu zderzeń.

Rozprawa została napisana w języku angielskim i składa się z 9 rozdziałów (wliczając wstęp i podsumowanie), bibliografii zawierającej 87 pozycji, oraz dodatku przedstawiającego rozkłady masy niezmienniczej w przedziałach pospieszności i pędu poprzecznego.

We wstępie (rozdział 1) Autor przedstawia krótko Model Standardowy cząstek elementarnych, opisując składniki materii i oddziaływania, po czym przechodzi do omawiania diagramu fazowego materii silnie oddziałującej i przebiegu zderzeń ciężkich jonów. Przedstawia

także trzy charakterystyczne różnice w zależnościach pewnych zmiennych opisujących zderzenie od energii, które są sygnaturami powstania plazmy kwarkowo-gluonowej („kink”, „step” i „horn”). Dalej wprowadza pojęcie rezonansów i zmiennych je charakteryzujących, oraz wyjaśnia, jak obserwowana częstość produkcji rezonansów (dokładniej spadek tej częstości) wiąże się z powstaniem w trakcie zderzenia plazmy kwarkowo-gluonowej. Rozdział ten stanowi dobre wprowadzenie do pozostałej części pracy i świadczy o znajomości i zrozumieniu tematu zderzeń ciężkich jonów.

Rozdział 2 opisuje eksperyment NA61/SHINE, poczynając od jego programu fizycznego. Autor prezentuje zestawy danych zebranych przez eksperyment dla różnych kombinacji jąder wiązek i tarcz, oraz pokrycie przez nie diagramu fazowego. Opisuje także pomiary produkcji hadronów dla eksperymentów neutrinowych i promieniowania kosmicznego. Następnie przechodzi do omówienia składowych części detektora NA61/SHINE: komór projekcji czasowej Vertex TPC i Main TPC, detektorów czasu przelotu TOF i detektora centralności PSD. Na koniec przedstawione są detektory wiązki i warunki systemu wyzwalania.

Uwagi do rozdziału:

- czy na rys. 14 z lewej strony rozmiar kwadratów jest proporcjonalny do ilości zebranych danych przy danej konfiguracji? Dodatkowo, podpis mówi o przyszłych pomiarach, a na rysunku ostatnią datą jest 2024.

- co dokładnie oznaczają procenty przy centralności („The centralities of T2 events were 35%” itd.) i dlaczego są różne dla różnych pędów wiązki?

Rozdział 3, jednostronicowy, zawiera skrótowe informacje o przygotowaniu danych eksperymentalnych do analizy, w tym nieco więcej miejsca poświęcono rekonstrukcji. Opisany jest także proces produkcji symulacji Monte Carlo, w szczególności użyte modele. Rozdział ten jest bardzo krótki, nie zawiera informacji o efektywności rekonstrukcji, czy uzyskiwanej rozdzielczości przestrzennej i pędowej. Nie jest wspomniana w ogóle identyfikacja cząstek (choćby jako odnośnik do rozdziału 5). Podanie takich informacji pozwoliłoby lepiej zrozumieć dobór wartości niektórych cięć używanych w selekcji.

Kolejny rozdział jest poświęcony selekcji przypadków i torów używanych w analizie, wraz z przedstawieniem ich na tle rozkładów przypadków. Sam opis cięć jest precyzyjny i jasny, w większości podana jest również motywacja lub korzyść z danego cięcia.

Uwagi do rozdziału:

- nie jest jasne, czy cięcia na tory są nakładane przed czy po cięciach na przypadki. Czy liczby torów $N_{\text{VtxTracks}}$ i N_{Tracks} zawierają tory przed czy po cięciach?

- nie jest zdefiniowana zmienna $N_{\text{VtxTracks}}$ – jakie kryteria musi spełniać tor, by zostać zaliczonym do tej grupy? Czy jest to cięcie na parametr zderzenia wymienione w podrozdziale 4.2?

- cięcia podane w tabelach 1, 2 i 5 dotyczą przypadków akceptowanych, natomiast w tabeli 3 wykluczanych, co jest mylące.

- jak dobierane były wartości cięć z tabel 3, 4, 5? Czy i jakie próbki kontrolne były stosowane? Jakie kryterium stanowiło o wyborze konkretnej liczby?

- opis cięcia na jakość toru nie zawiera żadnej informacji, jak uznawano, że tor jest źle zrekonstruowany lub nie połączony z głównym wierzchołkiem.

- skąd wynika cięcie na pęd poprzeczny?

W następnym rozdziale przedstawione zostały cięcia na depozyty energii cząstek, dzięki którym wybrać można tory-kandydatów na pion i kaon. Cięcia zdefiniowano jako „pasma” o szerokości ± 1.5 lub 2σ od wartości przewidywanej w określonych przedziałach pędów. Do-

datkowo, użyto tylko torów o pędach większych niż 3 GeV/ ze względu na przecinanie się krzywych dla pionu, kaonu i protonu dla niższych pędów.

Uwagi do rozdziału:

- dlaczego zdecydowano się na wybrane wartości σ i jak zmieniłyby się czystość próbki, gdyby użyć innych wartości?

- z wykresów przedstawionych na rys. 28-30 widać, że dla niższych pędów „pasma” dozwolonych przypadków kaonów zahaczają o krzywą teoretyczną dla protonów, a także pionów. Jak wpływa to na czystość próbki kaonów i dlaczego nie zastosowano w tym obszarze mniejszych wartości sigma?

Rozdział 6 opisuje analizę przeprowadzoną na wyselekcjonowanych przypadkach. Rozpoczyna się od omówienia koncepcji analizy z wykorzystaniem rekonstruowanej masy niezmienniczej, po czym kolejno przedstawione są: dobór granic przedziałów pędu poprzecznego i pospieszności (binowanie), dopasowanie sygnału i tła z użyciem metody szablonów, poprawki na efektywność identyfikacji i rekonstrukcji, oraz uzyskiwanie rozkładów w przypadkach w funkcji pędu poprzecznego, masy poprzecznej i pospieszności, a także średniej krotności mezonu $K^*(892)^0$. Dalej Autor podaje listę źródeł błędów systematycznych i metodę ich estymacji na podstawie obserwacji zmian wyników przy zmianie modelu, szerokości przedziałów dopasowania czy wartości cięć używanych w selekcji. Na koniec pokazany jest sposób znajdowania odstępów czasu między wymrożeniem chemicznym i kinetycznym. Przedstawione w tym rozdziale metody i ich zastosowanie nie budzą moich wątpliwości co do poprawności przedstawionej analizy, aczkolwiek mam do nich kilka pytań:

Uwagi do rozdziału:

- czym kierowano się przy wyborze granic przedziałów pędu poprzecznego i pospieszności?
- przy otrzymywaniu rozkładów pędu poprzecznego użyto poprawionych liczb przypadków, natomiast dla pospieszności niepoprawionych. Dlaczego?

- brakuje mi dyskusji dominujących wkładów do błędów systematycznych, np. dlaczego „fit/scale range” ma tak duże znaczenie dla krotności przy pędzie wiązki 40A GeV/c, a praktycznie żadne dla pozostałych? Dlaczego cięcie na PID wprowadza dużą niepewność krotności tylko dla pędu wiązki 75A GeV/c?

Same wyniki otrzymane z analizy, w postaci wykresów i tabel, przedstawione są w Rozdziale 7, natomiast ich dyskusja została zawarta w rozdziale 8, gdzie porównano je z przewidywaniami modeli EPOS1.99 i FTTP-BERT i wynikami z eksperymentu NA49 oraz ze zderzeń proton-proton w eksperymencie NA61/SHINE. Otrzymane wyniki są niezgodne z oboma modelami (plasują się pomiędzy ich przewidywaniami), natomiast wpasowują się w zależność krotności od liczby zranionych nukleonów obserwowaną w innych pomiarach. Ostatni podrozdział zawiera obliczenie czasu pomiędzy wymrożeniem chemicznym i kinetycznym, a właściwie – jak trafnie wskazuje Autor – dolnego limitu na ten czas, co wynika z przyjętego założenia o braku regeneracji mezonów $K^*(892)^0$ w przebiegu zderzenia.

Uwagi do rozdziału:

- pomijając niezgodność w skali pionowej, kształt rozkładów pospieszności wydaje się zbliżony do modelowych dla pędów wiązki 40A i 150A GeV/c, natomiast jest węższy dla 75A GeV/c. Czy przeprowadzono jakąś ilościową analizę niezgodności z modelami, która by potwierdziła (lub nie) to wrażenie? Jaki może być powód takiej zmiany kształtu?

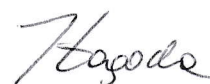
Rozdział 9 jest podsumowaniem pracy i przytacza jeszcze raz najważniejsze elementy analizy i wnioski z niej wynikające. Załącznik A zawiera rozkłady masy niezmienniczej dla wszystkich binów i pędów wiązki użytych w analizie.

Rozprawa napisana jest w sposób zrozumiały i na ogół poprawny. W tekście w paru miejscach pojawia się żargon czy skróty myślowe. Rozdziały 4 i 5 zyskałyby na jasności, gdyby wszystkie cięcia (łącznie z identyfikacją, która niepotrzebnie w mojej opinii znajduje się w oddzielnym rozdziale) przedstawione były w kolejności, w jakiej są aplikowane. Graficznie rozprawa prezentuje się dobrze, aczkolwiek kilka rysunków jest nieco za małych i są przez to trudno czytelne (rys. 5, 6, 10).

Rozprawa należy do raczej krótkich, tekst zawiera kluczowe informacje, ale jest mało rozbudowany. Autor skąpi czytelnikowi szczegółów związanych z uzasadnieniem wyboru wartości niektórych cięć, czy dodatkowych informacji w rodzaju czystości próbek i innych, wymienionych w uwagach do poszczególnych rozdziałów. Tę lakoniczność uważam za największy mankament pracy, która poza tym przedstawia **interesującą i poprawnie wykonaną, rzetelną analizę fizyczną, w której zastosowano nową metodę estymacji tła, i która doprowadziła do otrzymania nowego, ważnego wyniku.**

Dlatego też, mimo wymienionych wcześniej uwag, przedstawiona do recenzji rozprawa spełnia w moim przekonaniu warunki stawiane przez ustawę pracom doktorskim, wnoszę więc o dopuszczenie mgr. Bartosza Kozłowskiego do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

Z poważaniem



Justyna Łagoda