

Kraków, 20 grudnia 2024 rok.

Prof. dr hab. Jerzy Smyrski  
Wydział Fizyki, Astronomii  
i Informatyki Stosowanej  
Uniwersytet Jagielloński

**RECENZJA**  
**pracy doktorskiej mgr Yulii Balkovej**  
**pt. „Measurements of strangeness production in heavy-ion collisions**  
**in the NA61/SHINE experiment”**

Przedstawiona do recenzji praca doktorska pani mgr Yulii Balkovej dotyczy analizy danych eksperymentalnych uzyskanych w centralnych zderzeniach  $^{40}\text{Ar}+^{45}\text{Sc}$  celem zbadania produkcji hiperonów lambda. Pomiary przeprowadzone zostały przy pomocy detektora NA61/SHINE dla trzech wartości pędu wiązki jonów argonu z akceleratora SPS w CERNie: 40A, 75A i 150A GeV/c. Pomiary te są częścią programu eksperymentalnego współpracy NA61/SHINE dedykowanego badaniom procesu uwolnienia kwarków i poszukiwaniu punktu krytycznego w przejściu pomiędzy materią jądrową, a plazmą kwarkowo-gluonową, prowadzonego dla różnych energii i mas zderzanych jąder.

Podstawowym celem pracy było wyznaczenie rozkładów krotności produkowanych hiperonów w funkcji pospieszności oraz pędu poprzecznego i porównanie ich z modelami produkcji cząstek w zderzeniach jąder atomowych, a także z dostępnymi danymi ze zderzeń ciężkich jonów i elementarnych zderzeń proton-proton.

Rozprawa składa się z pięciu rozdziałów opatrzonych wstępem.

W pierwszym rozdziale przedstawiono najważniejsze fizyczne koncepcje związane z prowadzonymi badaniami. Opisano podstawy Modelu Standardowego cząstek i oddziaływań fundamentalnych. Podano podstawowe własności plazmy kwarkowo-gluonowej i eksperymenty wykazujące jej istnienie. Wskazano także na znaczenie badań nad jej własnościami dla opisu wczesnej fazy rozwoju Wszechświata, jak również dla poznania własności gwiazd neutronowych. Przedstawiono motywację fizyczną badań produkcji cząstek dziwnych, w tym hiperonów, w zderzeniach ciężkich jonów, związaną z wykorzystaniem zwiększonej produkcji dziwności jako sygnatury plazmy kwarkowo-gluonowej.

W rozdziale drugim przedstawiono układ eksperymentalny zastosowany do przeprowadzenia badań będących tematem pracy. Wykorzystana została w nich zewnętrzna wiązka jonów argonu z akceleratora SPS, która była ogniskowana na stałej tarczy układu detekcyjnego NA61/SHINE wykonanej ze skandu  $^{45}\text{Sc}$ . Trajektorie cząstek wiązki padających na tarczę rejestrowane były z wykorzystaniem układu wielodrutowych komór proporcjonalnych ustawionych przed tarczą, patrząc w kierunku wiązki. Do wyzwalań odczytu zdarzeń z elektroniki zastosowano zespół detektorów scyntylacyjnych ustawionych na linii wiązki zarówno przed, jak i za tarczą, oraz kalorymetr hadronowy pokrywający małe kąty rozpraszania i rejestrujący energię deponowaną przez nukleony pocisku będące spektatorami tj. nie biorące udziału w oddziaływaniu z jądrem tarczy. Ustawienie górnej granicy dla depozytu energii w kalorymetrze pozwalało na wybór zakresu centralności zderzeń.

Zasadniczym elementem układu detekcyjnego NA61/SHINE są cztery duże komory projekcji czasowej z których dwie, umieszczone w polu magnetycznym, pozwalają na analizę pędową cząstek naładowanych produkowanych w kierunku do przodu, a kolejne dwie, rejestrujące gęstość jonizacji gazu roboczego, wykorzystywane są do identyfikacji cząstek.

Rozdział 3 przedstawia procedurę analizy danych eksperymentalnych obejmującą szereg kroków selekcji i rekonstrukcji zdarzeń, stosowaną również do danych symulacyjnych. Symulacje pomiarów prowadzone są z wykorzystaniem generatora zdarzeń opartego na modelu EPOS1.99 oraz pakietu GEANT4 zastosowanego do modelowania oddziaływania z materiałem detektora cząstek wyprodukowanych w wyniku zderzenia. W pierwszym kroku selekcji zdarzeń odrzucane są przypadki z więcej niż jednym jonem wiązki padającym na tarczę w ustalonym oknie czasowym celem uniknięcia efektu nakładania się zdarzeń. Wymagana jest również poprawna rekonstrukcja trajektorii jonu wiązki przy pomocy wielodrutowych komór proporcjonalnych. Następnie wyznaczana jest pozycja pierwotnego wierzchołka oddziaływania wykorzystując informacje o trajektorii cząstki wiązki oraz trajektoriach cząstek wtórnych rejestrowanych w komorach projekcji czasowej. Akceptowane są zdarzenia z pozycją wierzchołka w kierunku wiązki mieszczącą się w zakresie  $\pm 2$  cm w odniesieniu do pozycji tarczy. W kolejnym kroku wybierane jest 10% najbardziej centralnych zderzeń Ar+Sc przez zastosowanie górnej granicy dla całkowitego depozytu energii rejestrowanego w centralnych modułach kalorymetru hadronowego.

W wyselekcjonowanych zdarzeniach poszukiwano śladów pochodzących od rozpadu hiperonu lambda na parę  $p-\pi^-$ . W tym celu znajdowano pary śladów cząstek o przeciwnych znakach ładunków elektrycznych z odległością największego zbliżenia śladów mniejszą niż 1 cm. Dla zredukowania tła pochodzącego od nisko-pędowych elektronów, dla każdej cząstki w parze wymagano, aby jej pęd był większy niż 0.5 GeV/c. Dla identyfikacji protonów i ujemnie naładowanych pionów pochodzących z rozpadu lambda, wykorzystano wartości strat energii rejestrowanych w komorach projekcji czasowej. Celem redukcji tła kombinatorycznego zastosowano cięcie na kosinus kąta pomiędzy kierunkiem łączącym pierwotny i wtórny wierzchołek, a wektorem wyznaczonym jako suma pędu protonu i pionu w parze (w idealnym przypadku kąt ten powinien być równy zeru).

Dla uniknięcia błędnej identyfikacji wierzchołków pierwotnych jako wtórnych zastosowano dolną granicę na odległość pomiędzy wierzchołkiem produkcji i wierzchołkiem rozpadu hiperonu lambda równą 10 cm. Liczbę zliczeń w sygnale od hiperonów lambda widocznym w widmie masy niezmienniczej pary  $p-\pi^-$  wyznaczono niezależnie w każdym z prostokątnych przedziałów na które podzielono dostępny zakres dwuwymiarowej przestrzeni pędowej i pędu poprzecznego ( $y, p_T$ ). Dla każdego przedziału ( $y, p_T$ ) liczba zliczeń w sygnale od produkcji hiperonu lambda została skorygowana na skończoną akceptancję geometryczną detektora, wydajność rekonstrukcji, cięcia zastosowane w analizie, a także wkład od rozpadów cięższych hiperonów. Korektę przeprowadzono z wykorzystaniem danych symulacyjnych. Otrzymano w ten sposób podwójnie różniczkowe widma krotności hiperonów lambda w funkcji pędowej oraz pędu poprzecznego. Dla widm tych wyznaczono niepewności statystyczne i systematyczne. Te ostatnie oszacowano przez wyznaczenie wpływu zmian w kryteriach selekcji stosowanych w analizie na wartości krotności hiperonów. Dla sprawdzenia poprawności przeprowadzonej analizy wyznaczono wykres Armenterosa-Podolanskiego. Otrzymany kształt tego wykresu potwierdził, że zależność pędu poprzecznego i asymetrii pędów podłużnych dla pary  $p-\pi^-$  jest zgodna z kinematyką rozpadu hiperonu lambda. Ponadto, dla każdego z trzech pędów wiązki i każdego z przedziałów pędowej zastosowanych w analizie, wyznaczono średni czas życia hiperonów lambda. Otrzymano wyniki zgodne z wartością podaną w PDG.

Widma krotności hiperonów lambda, będące wynikiem przeprowadzonej analizy danych dla 10% najbardziej centralnych zderzeń  $^{40}\text{Ar}+^{45}\text{Sc}$  zmierzonych dla trzech wartości pędu wiązki, przedstawiono w rozdziale 4. Zaprezentowano je w postaci podwójnie różniczkowych widm zależnych od pospieszności i pędu pospiesznego, jak również jako widma jednowymiarowe zależne od pędu pospiesznego i widma jednowymiarowe zależne od pospieszności. Podano również średnie wartości krotności hiperonów.

Otrzymane wyniki eksperymentalne porównano z przewidywaniami modeli produkcji cząstek: EPOS1.99 i SMASH. Oba modele znacząco nie doszacowują wartość odwrotnego parametru nachylenia rozkładów pędu transwersalnego  $T$  otrzymanego w eksperymencie. Przewidywania modelu SMASH dla rozkładów krotności w funkcji pospieszności są o ponad czynnik dwa zaniżone w stosunku do danych eksperymentalnych, natomiast przewidywania modelu EPOS są znacznie bliższe danych. Podobnie jest dla krotności hiperonów w obszarze pośredniej pospieszności oraz dla średniej krotności. Szczególnie w tym drugim przypadku przewidywania modelu EPOS są bliskie danych, natomiast SMASH silnie nie doszacowuje wartości eksperymentalne.

Otrzymane wyniki dla produkcji hiperonów lambda porównano także z dostępnymi eksperymentalnymi danymi zebranymi przy różnych energiach w układzie nukleon-nukleon w zakresie od 2.5 GeV aż do ok 200 GeV i dla różnych rozmiarów zderzających się jąder poczynając od układu  $p$ - $p$ , aż do układu Pb-Pb. Dane te pochodzą z pomiarów na akceleratorach AGS, SPS i RHIC. Poczyniono szereg ciekawych obserwacji. Stwierdzono m.in., że otrzymane wartości nachylenia rozkładów pędu poprzecznego  $T$  są znacznie wyższe niż te uzyskane w elementarnych zderzeniach  $p$ - $p$  przy energiach w zakresie SPS, natomiast są bliskie wartościom wyznaczonym dla układu Pb-Pb. Inny ciekawy wynik dotyczy stosunku krotności hiperonów lambda i pionów wyznaczonego w funkcji energii w układzie nukleon-nukleon. Obserwowany spadek tego stosunku przy rosnącej energii może wskazywać na istnienie maksimum rozkładu przy niższych energiach, podobnego do zaobserwowanego w układzie Pb-Pb.

W ostatnim, piątym rozdziale pracy, dokonano podsumowania przeprowadzonych analiz i uzyskanych wyników. Przedstawiono także sugestie dalszych badań produkcji dziwności, które pozwoliłyby pogłębić wiedzę zdobytą w ramach badań przedstawionych w pracy.

Na końcu rozprawy podano listę odnośników do literatury obejmującą 148 pozycji oraz spis rysunków i tabel.

Praca napisana jest jasnym, precyzyjnym językiem i jest bardzo starannie zredagowana. Stwierdzam jej wysoki poziom pod względem merytorycznym, w szczególności, w jej zasadniczej części dotyczącej analizy danych eksperymentalnych. Analiza ta została przeprowadzona pomysłowo i rzetelnie. Na wyróżnienie zasługuje zastosowana procedura optymalizacji kryteriów selekcji śladów oraz szczegółowe wyliczenie niepewności statystycznych i oszacowanie niepewności systematycznych dla wyznaczonych krotności hiperonów lambda. Poprawność zastosowanej procedury selekcji przypadków produkcji hiperonów lambda potwierdzono wyznaczając wykres Armenterosa-Podolanskiego, którego kształt okazał się zgodny z kinematyką rozpadu  $\Lambda \rightarrow p-\pi^-$ , oraz sprawdzając, że wyznaczony średni czas życia hiperonów lambda zgadza się z wartością podaną w PDG.

Praca świadczy o bardzo dobrym opanowaniu przez doktorantkę stosowanych narzędzi programistycznych, znajomości zaawansowanych metod analizy danych i orientacji w tematyce fizycznej związanej z badanymi procesami.

Uzyskane wyniki dla krotności hiperonów lambda produkowanych w centralnych zderzeniach  $^{40}\text{Ar}+^{45}\text{Sc}$  przy energiach SPS w sposób istotny uzupełniają dane zebrane przy niższych i przy wyższych energiach oraz dla systemów o znacznie mniejszych masach zderzających się jąder – w tym zderzeń proton-proton oraz dla najcięższych zderzanych jąder - Pb-Pb. To, że uzyskane wyniki są ważne i ciekawe dobrze pokazuje zaprezentowane w pracy porównanie ich z danymi z innych eksperymentów. Jedną z ciekawszych jest obserwacja, że zmierzone krotności hiperonów lambda unormowane do liczby zranionych nukleonów są znacznie bliższe tym zmierzonym w zderzeniach Pb-Pb niż w  $p-p$  i C-C. Może to świadczyć o odmiennym mechanizmie produkcji.

Poniżej zamieszczam kilka uwag i pytań, które nasunęły mi się podczas czytania pracy:

1. W opisie eksperymentu (rozdział 2) nie podano informacji o natężeniu i strukturze czasowej wiązki argonu. Informacja taka byłaby pomocna dla lepszego zrozumienia efektu nakładania się zdarzeń przedstawionego w rozdziale 3.2.1.
2. W tekście komentującym przedstawiony na rys. 3.10 rozkład długości rozpadu zabrakło mi wyjaśnienia skąd bierze się wypikowanie tego rozkładu. Naiwnie spodziewałby się raczej jego monotonicznego spadku.
3. Na rysunku 3.11 pokazano przykładowe widma eksperymentalne masy niezmienniczej  $p \pi^-$ . Ponieważ są to jedne z kluczowych widm w prowadzonej analizie, więc ciekawe byłoby porównanie ich z widmami symulacyjnymi.

Powyższe usterki nie wpływają istotnie na wartość pracy, którą oceniam jako bardzo dobrą. Podsumowując stwierdzam, że praca mgr Yulii Balkovej stanowi ważny przyczynek do badań produkcji dziwności w zderzeniach ciężkich jonów i w pełni spełnia warunki rozprawy na stopień doktora nauk fizycznych. W związku z tym stawiam wniosek o dopuszczenie mgr Yulii Balkovej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Kraków, 20 grudnia 2024 rok.

Prof. dr hab. Jerzy Smyrski  
Wydział Fizyki, Astronomii  
i Informatyki Stosowanej  
Uniwersytet Jagielloński

### **Wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej**

Jako recenzent w postępowaniu doktorskim pani mgr Yulii Balkovej składam wniosek o wyróżnienie przygotowanej przez nią rozprawy doktorskiej pt. „Measurements of strangeness production in heavy-ion collisions in the NA61/SHINE experiment”

Niniejsza rozprawa zasługuje na wyróżnienie ze względu na przeprowadzenie niezwykle pomysłowej i starannej analizy danych zebranych w pomiarach zderzeń  $^{40}\text{Ar}+^{45}\text{Sc}$  w eksperymencie NA61/SHINE. Doprowadziła ona do uzyskania ważnych wyników dla produkcji hiperonów lambda w słabo zbadanym obszarze pośrednich energii i mas zderzanych jąder atomowych. Wyniki te mają wysoką wartość naukową ze względu na ich znaczenie w badaniach własności silnie oddziałującej materii, w tym przejścia między materią jądrową a plazmą kwarkowo-gluonową.

