



Kraków 28.06.2022

Dr hab. Jacek Otwinowski, prof. IFJ PAN

jacek.otwinowski@ifj.edu.pl

tel: +48 12 662 8071

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Krzysztofa Nowakowskiego pt. „Measuring $\Lambda(1520)$ production in proton-proton and proton-nucleus collisions with HADES detector”.

Mgr. Krzysztof Nowakowski przeprowadził pierwszy pomiar produkcji inkluzywnej hiperonu $\Lambda(1520)$ w kanale rozpadu $\Lambda(1520) \rightarrow \Lambda^0 \pi^+ \pi^-$ w zderzeniach p+p i p+Nb przy energii 3.5 GeV/u, przy pomocy spektrometru HADES. Jest to część programu eksperymentalnego pomiaru hiperonów FAIR Phase0 na synchrotronie SIS18 w GSI Darmstadt. Ponadto, wykonał symulację w celu oszacowania liczby hiperonów w zderzeniach p+p przy maksymalnej energii zderzeń 4.5 GeV dostępnej na SIS18. Eksperyment ten odbył się w GSI na przełomie lutego i marca 2022.

Rozprawa ma standardowy układ, składa się ze streszczenia w języku angielskim i polskim, podziękowań, wprowadzenia, kontrybucja autora, spisu treści, 7 rozdziałów, dodatku, podziękowań i spisu literatury. Napisana jest po angielsku w bardzo dobrym stylu. Od strony edytorskiej i graficznej praca jest bardzo staranna (pomijając kilka zbyt małych rysunków). **Zauważyłem również dwa błędy ortograficzne w polskim streszczeniu.**

We wprowadzeniu autor sprawnie przedstawił obecny stan wiedzy na temat cząstek elementarnych zawarty w Modelu Standardowym. Przedyskutował budowę hadronów w ramach modelu kwarkowego, ze szczególnym uwzględnieniem hiperonów (**tytuł rozdziału 1.2 trochę zaskakuje**), oraz omówił pomiary ekskluzywnej i inkluzywnej produkcji hiperonów przeprowadzone przez kolaborację HADES. Ponadto, zdefiniował współczynniki postaci i rozpady Dalitza hadronów, oraz omówił strukturę hiperonu $\Lambda(1520)$ i jego możliwe modyfikacje w materii jądrowej na podstawie przewidywań teoretycznych.

Aparatura oraz metody rekonstrukcji śladów i identyfikacji cząstek przedstawione są w rozdziale 2. Autor w przejrzysty sposób opisał system detekcyjny HADES, tarcze (p, Nb) oraz system wyzwalania danych. Ponadto, przedstawił modernizację spektrometru HADES przeprowadzaną w ostatnich latach. **W tym rozdziale zabrakło więcej informacji o SIS18. Ponadto, można było podać daty i statystykę zebranych przypadków dla różnych eksperymentów przeprowadzonych przez HADES.**

W rozdziale 3. autor opisał szczegółowo metodę identyfikacji hiperonu $\Lambda(1520)$ w oparciu o sieci neuronowe. Autor zastosował podejście do wielowymiarowej analizy danych wykorzystując wyłącznie dane pomiarowe. Metoda ta została wykorzystana do identyfikacji Λ^0 (produktu rozpadu $\Lambda(1520)$). Punkt pracy sieci neuronowej został tak wybrany aby zmaksymalizować $S/\sqrt{S+B}$ dla hiperonu $\Lambda(1520)$.

W rozdziale 4, autor przedstawił szczegóły analizy $\Lambda(1520) \rightarrow \Lambda^0 \pi^+ \pi^- \rightarrow p \pi^+ \pi^-$ w zderzeniach p+p. Pomiar $p \pi^+ \pi^-$ w kanale wyjściowym pozwolił również na badanie inkluzywnego kanału rozpadu $\Lambda^0 K^0 X$ traktowanego jako kanał referencyjny (HADES przeprowadził szereg pomiarów ekskluzywnych z $\Lambda^0 K^0$ w kanale wyjściowym).

Autor przeprowadził pełne symulacje odpowiedzi detektora HADES dla różnych kanałów produkcji w celu wyznaczenia wydajności rekonstrukcji sygnału oraz oszacowania tła. Podobną analizę przeprowadził dla kanału referencyjnego. Analiza obejmuje identyfikację cząstek przy pomocy pędu i straty energii (dE/dx vs p) w komorach MDC oraz selekcję zdarzeń zawierających przynajmniej



cztery cząstki naładowane w kanale wyjściowym ($p\pi^+\pi^-$). Dostępna energia w kanale wejściowym pozwala na produkcję tylko jednego hiperonu $\Lambda(1520)$ na zdarzenie. Ponadto, wykorzystał więzy kinematyczne (cięcia na M_{inv} i M_{miss}) w celu dalszej redukcji tła pochodzącego głównie z rozpadów Δ i cięższych rezonansów N^* , Δ^* .

W dalszych etapach analizy autor wykorzystał sieci neuronowe, aby zwiększyć sygnał Λ^0 , otrzymując zbiór około 1000 Λ^0 ($S/B \sim 0.5$). Zbiór danych ze zwiększoną ilością Λ^0 został wykorzystany do dalszej analizy kanału referencyjnego $\Lambda^0 K^0$ i $\Lambda(1520)$. Jako wynik analizy kanału referencyjnego otrzymał inkluzywne przekroje czynne na produkcję $\Lambda^0(K^0) \sim 98$ (85) μb . **Otrzymany przekrój czynny jest około 20% większy od tego z ekskluzywnych kanałów produkcji tych hadronów.**

Ostatecznie autor zrekonstruował $\Lambda(1520)$ stosując dodatkowe kryteria selekcji (odległość PV-SV i kąt otwarcia pomiędzy kierunkiem Λ^0 kierunkiem wyznaczonym przez linię łączącą PV i SV) w porównaniu do analizy Λ^0 . Najlepszy wynik (maksymalny $S/\sqrt{S+B}$) otrzymał dla punktu pracy sieci neuronowej dla Λ^0 (~ 0.5), PV-SV ~ 5 mm i 20° dla kąta otwarcia. Masa niezmiennicza zrekonstruowanego $\Lambda(1520)$ jest zaprezentowana na rys. 4.14 (~ 115 zliczeń). Należy zaznaczyć, że sygnał otrzymany w symulacji (suma sygnałów z ekskluzywnych pomiarów) został arbitralnie przeskalowany (autor nie podaje o ile) w celu lepszego opisu zmierzonego spektrum. **Otrzymana masa niezmiennicza dla $\Lambda(1520)$ jest mniejsza o tej w PDG o około 15 MeV (prawdopodobnie z powodu niedokładnej rekonstrukcji trajektorii cząstek w symulacji lub oszacowania tła – brak szczegółów).** Ponadto, autor wyznaczył rozkłady pędu poprzecznego (p_T) i pospieszności dla $\Lambda(1520)$. Po oszacowaniu błędów systematycznych (rozdział 4.8) **inkluzywny przekrój czynny na produkcję wynosi $\sim 7.1 \mu\text{b}$.** Warto wspomnieć, że na widmie masy niezmienniczej pojawia się również drugie maksimum ~ 1600 MeV, którego pochodzenie nie jest znane.

Autor przeanalizował również spektra masy niezmienniczej $\pi^+\pi^-$, $\Lambda^0 \pi^+$, $\Lambda^0 \pi^-$ i porównał do symulacji przy założeniu, że rozpady modelowane są zgodnie z przestrzenią fazową. Otrzymane wyniki symulacji są zgodne z danymi co w granicy dużych błędów pomiarowych. Większa statystyka zdarzeń jest konieczna, aby wykazać, czy $\Lambda(1520)$ powstaje w wyniku oddziaływania z $\Sigma(1385)$ - π . Takie oddziaływanie może być modyfikowane w materii jądrowej i prowadzić do poszerzenia szerokości $\Lambda(1520)$.

W rozdziale 5 przedstawiona jest analiza $\Lambda(1520)$ w zderzeniach p+ Nb , która jest bardzo podobna to tej w p+p. W tym przypadku niektóre kryteria selekcji przypadków zostały zmodyfikowane (np. brak cięcia na M_{miss}). Ponadto, szacowanie tła bazuje wyłącznie na symulacjach UrQMD ze względu na brak pomiarów. Tak jak w przypadku p+p, autor również przeprowadził analizę kanału referencyjnego. **Inkluzywne przekroje czynne dla kanału referencyjnego wynoszą $\Lambda^0(K^0) \sim 1.4$ (1.334) mb, które są w zgodzie z przeskalowanym przekrojem czynnym w pomiarach p+p (~ 1.38 mb).**

Masa niezmiennicza zrekonstruowanego hiperonu $\Lambda(1520)$ przedstawiona jest na rysunku 5.5. Pozycja maksimum zgadza się z tą w p+p natomiast szerokość rozkładu jest ~ 2 razy większa. Autor, porównał również rozkłady pędu poprzecznego, pospieszności, pędu oraz kąta emisji w układzie CM - $\cos(\theta_{CM})$ dla tych dwóch układów, **które sugerują, że $\Lambda(1520)$ wyemitowana jest w przypadku p+ Nb z wolniejszego źródła i widoczny jest efekt rozpraszania w medium.**

Ponadto, autor przeprowadził analizę wyznaczając tło pochodzące od nierezonansowej produkcji $\Lambda^0 \pi^+ \pi^-$ w oparciu o symulacje UrQMD. Dopasowując do rozkładów masy niezmienniczej dwa kanały $\Lambda(1520)K^+p$ i $\Sigma(1385)^0 pK^0$ (zanurzone w tle termalnym wyznaczył rezonansową i nierezonansową kontrybucję do $\Lambda^0 \pi^+ \pi^-$. Po odjęciu tła pokazał, że kontrybucja kanałów rezonansowych do zmierzonych rozkładów jest zdominowana przez $\Lambda(1520)$. **Parametry sygnału w p+ Nb pokrywają się z tymi z PDG (jednak z dużymi błędami szerokości sygnału).**

Autor wykorzystał generator PLUTO z wbudowanym modelem termalnym w celu symulacji produkcji $\Lambda^0 \pi^+ \pi^-$ w reakcji p+ Nb (bardziej realistyczny model dla zderzeń z udziałem jonów). Rozkłady z modelu termalnego zostały dopasowane do widm eksperymentalnych (p_T i y) jednocześnie dla Λ^0 i $\Lambda(1520)$. Najlepsza parametryzacja otrzymana została dla $E_k \sim 550$ MeV i $T = 75$ MeV



(rysunki 5.16 i 5.17). Ostatecznie, wyznaczył inkluzywny przekrój czynny na produkcję $p+Nb \rightarrow \Lambda(1520) X$, który wynosi ~ 4.97 mb (systematyczny błąd waha się pomiędzy -49% a $+71\%$). Należy zauważyć, że ten przekrój czynny jest kilkakrotnie większy od tego otrzymanego z przeskalowania $p+p$ ($A^{2/3} \sigma_{pp} \sim 0.145$ mb).

W ostatnim rozdziale autor przeprowadził symulację nowego eksperymentu $p+p$ przy energii 4.5 GeV. Przeprowadził selekcję kanałów sygnałowych i tła (tabela 6.1), estymację przekrojów czynnych i współczynników rozgałęzienia oraz pełną symulację i analizę danych. Autor oszacował m.in. inkluzywne przekroje czynne na produkcję hiperonów Λ^0 i Σ^0 (rysunek 6.2). Ponadto, oszacował przekroje czynne na produkcję hiperonów $\Lambda(1520)$ i $\Sigma(1385)^0$ w rozpadach Dalitza (rysunek 6.4).

Podsumowując, Mgr. Krzysztof Nowakowski przygotował rozprawę doktorską, która wymagała dużej wiedzy eksperymentalnej i teoretycznej na temat produkcji cząstek, w szczególności hiperonów. Analizę przeprowadził wykorzystując nowe metody w oparciu o sieci neuronowe, co pozwoliło na pomiar bardzo rzadkich przypadków. Po raz pierwszy wyznaczył inkluzywne przekroje czynne na produkcję $\Lambda(1520)$ w zderzeniach $p+p$ i $p+Nb$ przy energii 3.5 GeV/u i porównał ich produkcję w tych tych systemach. Wyniki tej pracy z pewnością wykorzystane zostaną w analizie danych z nowego eksperymentu $p+p$ przy energii 4.5 GeV, dla którego oszacował przekrojów czynnych na produkcję hiperonów Λ i Σ . Uważam tę pracę za wartościową i wnioskuję o dopuszczenie Mgr. Krzysztof Nowakowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Jacek Otwinowski