

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Angeliki Magdaleny Tefelskiej „ $K^*(892)^0$ Meson Production in p+p Collisions at the CERN SPS Energies”**

Rozprawa przedstawiona do recenzji została napisana w języku angielskim i składa się z siedmiu rozdziałów w tym wstępu i podsumowania. Wraz ze spisami treści, rysunków i tabel zamyka się na 137 stronach. Praca zawiera wyniki analizy danych zebranych przez eksperyment NA61/SHINE w latach 2009 – 2011 w zderzeniach proton-proton.

### **Opis pracy i uwagi**

Wstęp przedstawia bardzo krótkie wprowadzenie do opisu materii na poziomie subatomowym. Zawiera też rys historyczny dotyczący ewolucji opisu cząstek elementarnych (w tym hadronów) zwieńczonej konstrukcją Modelu Standardowego. Rozdział ten wprowadza pojęcia plazmy kwarkowo-gluonowej (QGP). Opisano tutaj obserwabie wskazujące na powstanie QGP w zderzeniach hadronów. Zauważyłem w nim kilka drobnych błędów merytorycznych: napisano, że rozwiązania równania Kleina – Gordona z dodatnimi energiami dotyczą  $e^+$ , bariony to układy trzech kwarków walencyjnych (co z penta kwarkami?), jako stabilne leptony pierwszej generacji wymieniono (u, d, e) zapominając o neutrinie elektronowym, w Tab. 1.1 napisano, że oddziaływanie Higgsa dotyczy wszystkich cząstek: jeśli miano na myśli poziom drzewowy to dotyczy ono tylko cząstek masywnych.

Rozdział drugi przedstawia podstawowe (trochę zbyt elementarne, jak np. wprowadzenie masy niezmienniczej, czasu życia, czy wartości zredukowanej stałej Plancka) pojęcia związane z rezonansami, historię badania rezonansów hadronowych, wreszcie motywację do badania układu kwarków (anty s-d) o masie  $892 \text{ GeV}/c^2$ , czyli tytułowego  $K^*(892)^0$ . Analiza krotności mezonów  $K^*(892)^0$  może pozwolić na oszacowanie interwału między wymrażaniem chemicznym a kinetycznym w gęstej materii powstałej po zderzeniu hadronów. Oszacowanie krotności w zderzeniach proton-proton stanowi punkt odniesienia dla analogicznych pomiarów w zderzeniach ciężkich jonów. Pomiar różniczkowego przekroju czynnego pozwala na porównanie z

przewidywaniami modeli fenomenologicznych oraz symulacji Monte Carlo. Uwagi co do strony edytorskiej: na końcu rozdziału pojawia się dyskusja stosunków  $\langle\pi\rangle/\langle W\rangle$  bez wprowadzenia znaczenia obu symboli. Wyjaśnienie znaczenia  $\langle W\rangle$  pojawia się dopiero w opisie rysunku 1.8. Podobnie brak definicji uśredniania krotności  $K$ : w przypisie 1, strona 18 napisano, że krotność to liczba cząstek per przypadek. Czym w takim razie jest średnia krotność? Symbole oznaczające krotność i średnią krotność są używane wymiennie. Brakuje też konsekwencji w użyciu jednostek. Na stronie 18 napisano, że pęd jest wyrażany w jednostkach MeV/c, ale w niektórych wzorach (np. 2.1, 4.1) gubi się „c”.

Następny rozdział zawiera bardzo zwięzły (około cztery strony tekstu) opis detektora eksperymentu NA61/SHINE, oraz układu akceleratorów dostarczających wiązkę protonów używanych w eksperymencie. Uwagi: opis eksperymentu jest zdecydowanie zbyt zwięzły. Brakuje tu chociaż paru informacji dotyczących wydajności i rozdzielczości rekonstrukcji obiektów używanych w analizie. Rysunek 3.1 ma przedstawiać rodzaj danych zebranych przez eksperyment NA61/SHINE, ale wydaje się, że jest nieaktualny: wskazano tam pędy wiązki 75 i 150, natomiast omawiana praca dotyczy analizy danych zebranych przy pędach 80 i 158 GeV/c. Kiedy te dane były zbierane? Rysunek 3.4 jest omawiany przed rysunkiem 3.3.

Rozdziały czwarty i piąty zawierają odpowiednio zasadniczy opis analizy danych i uzyskanych wyników. Analiza składała się z dwu zasadniczych kroków: selekcji przypadków w których mogły być wyprodukowane mezony  $K^*(892)^0$ , oraz analizy rozkładu masy niezmienniczej układu  $K^+\pi^-$ . Liczba przypadków rozpadu  $K^*(892)^0 \rightarrow K^+\pi^-$  została wyznaczona przez odjęcie od obserwowanej liczby par  $K^+\pi^-$  tła pochodzącego z przypadkowych kombinacji  $K^+\pi^-$  lub pochodzących z rozpadu innych niż poszukiwany rezonansów. Pomiar liczby przypadków  $K^*(892)^0$  został przeprowadzony zgodnie z regułami sztuki i zawiera wszystkie standardowe elementy, włączając współczynniki korekcji liczby zliczonych kandydatów na pary  $K^+\pi^-$  do liczby wszystkich kandydatów które zostały wyprodukowane w badanych zderzeniach proton-proton. Wynikiem tego etapu analizy jest średnia liczba mezonów  $K^*(892)^0$  w przedziałach pędu poprzecznego mezonu (dane zebrane przy pędach wiązki 40 i 80 GeV/c), lub przedziałach pędu poprzecznego i pospieszności (dane zebrane przy pędzie wiązki 158 MeV/c).

Uwagi dotyczące rozdziału czwartego: w kilku miejscach zbyt szybko czytelnik jest odsyłany do literatury, lub brakuje niektórych szczegółów analizy. Oczekiwałam, że rozprawa będzie zawierać podstawowe informacje o wydajności selekcji na poziomie układu wyzwalania, czy wydajności rekonstrukcji obiektów używanych w czasie selekcji (wierzchołek pierwotny i tory naładowanych cząstek), nawet jeśli Autorka nie

wniosła wkładu w ich rozwój. Niestety zamiast tych informacji znajduje się jedynie odsyłacz do literatury. Zawartość tabel 4.1 oraz 4.3 nie jest dobrze opisana. Brakuje wyjaśnienia znaczenia liczb w nawiasach. W jednej tabeli liczby w nawiasach (np. 41.9%) oznaczają chyba ułamek względem poprzedniego wiersza, zaś w drugiej (np. 70.7%) ułamek względem pierwszego wiersza. W tekście pojawia się „interaction trigger”, ale nie jest wyjaśnione jakie są dokładnie wymagania tego trygera (domyślam się, że chodzi o wykorzystanie scyntylatora S4). W rozdziale 4.2, strona 39, w opisie selekcji, punkt (ii) napisano „no off time beam particle” – bez wyjaśnienia co to znaczy „off-time”. Podobne w punkcie (iii) pojawia się niejasne określenie „well reconstructed”. Rozdział 4.3 zawiera wyczerpujący opis procedury identyfikacji mezonów  $K$  oraz  $\pi$  na podstawie strat energii ( $dE/dx$ ) zarejestrowanych w detektorze TPC. Brakuje mi jednak zdania uzasadnienia różnicy w akceptowanych zakresach  $dE/dx$  między kaonami a pionami. Legenda na rysunkach 4.2 – 4.4 jest mało czytelna, a jest miejsce na jej powiększenie. W rozdziale 4.4, strona 46, podano stosunki rozgałęzień dla analizowanego rozpadu  $K^*(892)^0$  - brakuje tu odnośnika do literatury (pojawi się on dopiero w rozdziale 4.7), szczególnie jeśli tablice PDG podają  $\sim 100\%$ . W rozdziale 4.5 opisano szczegółowo procedurę oszacowania wkładu tła do zliczeń par  $K^+\pi^-$ . Różnica między dopasowanym rozkładem Breita-Wignera (BW) dla  $K^*(892)^0$  a szacunkiem tła jest określona mianem „residual background”. To określenie nie jest zbyt szczęśliwe, ponieważ ta różnica dla większości zakresu masy  $K^+\pi^-$  jest ujemna, więc trudno ją przypisywać jakiemuś dodatkowemu tłu. Jest ona raczej objawem słabej zgodności modelu tła i danych dla metody „standardowej”. Pomijając kwestię nazwy ta słaba zgodność została słusznie zauważona przez Autorkę, która do końcowego wyniku użyła metody „coctail fit” dającej lepsze (ale nie idealne) dopasowanie tła. Metoda „coctail fit” oprócz kształtu tła oszacowanego bezpośrednio z danych zawiera także wkład pochodzący z symulacji Monte Carlo. W analizie niepewności statystycznej tej metody (Rozdział 4.6, strona 55) brakuje wkładu od niepewności parametrów  $a$  i  $b$  dopasowania. W Rozdziale 4.7, strona 58, punkt (ii) napisano, że stosunek rozgałęzień dla rozpadów  $K^*(892)^0$  policzono używając współczynników Clebsha-Gordana. Brzmi to dosyć tajemniczo, warto by napisać w jakiej przestrzeni są tu stosowane te współczynniki. W Rozdziale 4.10 opisano typową procedurę oszacowania niepewności systematycznych, wśród których uwzględniono zależność od warunków selekcji. Procedura ta polega między innymi na zmianie parametrów selekcji i analizie wpływu tej zmiany na wynik. Nie jest jednak jasne, czy w czasie tej procedury zmieniano też wartości odpowiednich współczynników korekcji. Całkowita niepewność systematyczna opisana wzorem 4.13, strona 64, zależy od wielkości  $\sigma_i$ , nie wiadomo jednak jak obliczono tę wielkość (jako różnicę między wariantami  $\pm$ )?

Uwagi dotyczące rozdziału piątego: rysunki 5.1 i następne pokazują wyznaczone wielkości w funkcji pędu lub masy poprzecznej. Brakuje jednak wyjaśnienia znaczenia pasków błędów na rysunku – domyślam się, że są to niepewności statystyczne i systematyczne. Na rysunku 5.2 brakuje wartości liczbowych, tak jak to było zrobione np. na rysunku 4.12. W rozdziale 5.4 nie napisano w jakiej przestrzeni przebiega indeks „i” we wzorze 5.3 (strona 84). We wzorach 5.5 oraz 5.9 (strony 84 i 87) brakuje wkładu od niepewności statystycznych funkcji A oraz I (zawierających dopasowane parametry A, T oraz  $\sigma_y$ ).

Rozdział szósty przedstawia porównanie uzyskanych wyników w innych eksperymentach w zakresie wyznaczonej wartości masy oraz szerokości mezonu  $K^*(892)^0$  w funkcji pędu poprzecznego. Nie jest jasne czy spodziewano się tu jakiejś zależności, czy też sprawdzano, że takiej zależności nie ma. Porównanie z modelem EPOS 1.99 wykazuje znaczną rozbieżność w zakresie średniej krotności mezonów  $K^*(892)^0$ , oraz rozkładu krotności względem pospieszności. Hadron Resonance Gas Model (HGM) daje przewidywania zbliżone do wyników opisanych w Pracy w wariacie, który nie uwzględnia mezonu  $\phi$ . Dostyc rozbudowana analiza uzyskanych wyników w szerszym kontekście zderzeń coraz to większych układów hadronów, bardzo dobrze świadczy o Autorce, która nie tylko skupia się na uzyskaniu wyniku numerycznego dla pewnego pomiaru, ale także ma świadomość do czego ten wynik jest potem zastosowany.

Drobne uwagi dotyczące spisu literatury. Źródła [9] i [80]: nie umniejszając znaczenia i wiarygodności Wikipedii myślę że w tekście „profesjonalnym” należy używać materiałów bliższych źródła, ewentualnie cytować podręczniki. Jako źródło rysunku 3.1 podano „NA61 library of pictures” (wpis [73]), co jest mało precyzyjne. Odnośnik do pakietu ROOT (wpis [96]) jest nieprawidłowy. Poprawne źródło jest podane na stronie pakietu: <https://root.cern.ch/publications>.

## Podsumowanie

Rozprawa Pani Angeliki Magdaleny Tefelskiej przedstawia solidną pracę doświadczalną. Autorka wykazała się znajomością metodologii analizy danych oraz umiejętnością jej zastosowania w konkretnym zagadnieniu uzyskując oryginalny wynik. W dużym tekście zawsze trafią się jakieś błędy. Większość wymienionych powyżej uchybień uznaję za kwestie redakcyjne. Za większe uchybienia uznaję jedynie brak w rozdziale czwartym informacji o niektórych szczegółach selekcji. Uchybienia te jednak nie umniejszają wartości rozprawy, wobec czego uważam że **praca w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim i stawiam wniosek o dopuszczenie mgr. Angeliki Magdaleny Tefelskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**



Artur  
Kalinowski