

Prof. dr hab. inż. Mariusz Przybycień  
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. Piotra Podlaskiego  
pt. „Study of charged hadron production with tof-dE/dx identification method  
in central Ar+Sc collisions in NA61/SHINE experiment at CERN”**

Rozprawa doktorska Pana mgr. Podlaskiego dotyczy pomiarów produkcji naładowanych hadronów ( $p$ ,  $\bar{p}$ ,  $\pi^\pm$  oraz  $K^\pm$ ) w centralnych zderzeniach Ar+Sc w eksperymencie NA61/SHINE na akceleratorze SPS. Pomiary zostały wykonane w zderzeniach wiązki jonów  $^{40}\text{Ar}$  o pędach 13A, 19A, 30A, 40A, 75A oraz 150A GeV/c ze stacjonarną tarczą w postaci płytek o grubości 1 mm wykonanych ze  $^{45}\text{Sc}$ .

Rozprawa doktorska Pana mgr. Podlaskiego liczy 123 strony, a napisana jest w języku angielskim, z załączonym jednostronicowym streszczeniem w języku polskim. Składa się z siedmiu rozdziałów, trzech dodatków oraz spisów używanych akronimów i literatury.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawia krótkie wprowadzenie do Modelu Standardowego (SM) oraz bardziej szczegółową dyskusję relatywistycznych zderzeń ciężkich jonów. W szczególności omawia modele ewolucji plazmy kwarkowo-gluonowej (QGP) produkowanej w ultra-relatywistycznych zderzeniach ciężkich jonów. Koncentruje się na dyskusji diagramu fazowego i cech charakterystycznych dla przejścia fazowego od materii hadronowej do stanu uwolnionych kwarków, czyli właśnie QGP. Należy podkreślić, że pomiary mające na celu pogłębienie naszej wiedzy na temat diagramu fazowego w zakresie energii dostępnych na SPS są jednym z głównych celów eksperymentu NA61/SHINE. A samo zrozumienie natury tego przejścia może dostarczyć istotnej wiedzy na temat kwantowej chromodynamiki (QCD). Uważam, że zakres tematyczny i poziom szczegółowości dyskusji przedstawionej w tym rozdziale są odpowiednie do zakresu badań opisanych w kolejnych rozdziałach.

Rozdział pierwszy kończy się podsumowaniem bezpośredniego wkładu Doktoranta do eksperymentu i do analizy danych. Taka informacja jest bardzo cenna dla recenzenta, który nie ma możliwości uzyskania tych danych z innych źródeł. Oprócz standardowych obowiązków w tego typu współpracach, polegających na uczestnictwie w zbieraniu danych i ich analizie, na podkreślenie zasługuje wkład Doktoranta do rozwoju detektorów. Doktorant uczestniczył w konstrukcji systemu gazowego dla przedniej komory projekcji czasowej (FTPC) oraz systemu odczytu dla przedniego detektora czasu przelotu (FToF). Na podkreślenie zasługuje też fakt, że od 2018 roku koordynuje prace związane z rozwojem nowego systemu trygerowania dla eksperymentu NA61/SHINE.

Rozdział drugi poświęcony jest opisowi akceleratora SPS oraz systemu detekcyjnego w eksperymencie NA61/SHINE. Bardziej szczegółowo omówione są zasady działania oraz konstrukcje detektorów TPC i ToF, a więc tych które są najważniejsze z punktu widzenia prowadzonej przez Doktoranta analizy danych oraz w których rozwoju później uczestniczył. W samej analizie danych odgrywają one kluczową rolę, ponieważ wspólnie umożliwiają bardzo wydajną identyfikację cząstek naładowanych.

Rozdziały trzeci i czwarty poświęcone są odpowiednio, dyskusji procesu rekonstrukcji danych w eksperymencie NA61/SHINE (i przypadków symulowanych) oraz charakterystyce danych zebranych w 2015 roku i wykorzystanych w analizie. W szczególności omówione zostały trygery stosowane podczas zbierania danych ze zderzeń Ar+Sc. Jakie są wydajności tych trygerów i w jaki sposób zostały oszacowane?

Rozdział piąty przedstawia szczegóły analizy danych wykonanej przez Doktoranta. Pierwszym krokiem w selekcji przypadków jest żądanie aby współrzędna z wierzchołka znalazła się w pewnym bardzo szerokim zakresie ( $-590$  cm,  $-570$  cm). Rozumiem jak powstał rozkład na rysunku 5.2, ale nie rozumiem dlaczego w ostatecznej analizie dopuszcza się aby współrzędna z wierzchołka znalazła się poza obszarem tarczy, a nie przeprowadza się np. procedury powtórznego dopasowania śladów z żądaniem aby wierzchołek znalazł się w obszarze tarczy. Czy detektor nie jest osłonięty przed oddziaływaniami z obszaru przed miejscem gdzie jest zamontowana tarcza? Czy w procedurze wyznaczania śladów z rzeczywistego zderzenia, nie należałoby użyć jako dodatkowego więzu, żądania że ślady powinny tworzyć wierzchołek w obrębie tarczy? Jak wygląda rozkład wierzchołka w symulacji Monte Carlo?

Za bardzo użyteczne uważam wyjaśnienie w jaki sposób w zderzeniach ze stałą tarczą wyznacza się centralność zderzenia. Jednak mimo podjętych prób nie udało mi się dotrzeć do źródła skąd pochodzą wartości  $E_{\text{PSD}}^{\text{cut}}$  podane w tabeli 5.1. Czy zostały one wyznaczone przez Doktoranta na potrzeby aktualnej analizy, czy też są to standardowe wartości używane przez Współpracę NA61/SHINE dla zderzeń Ar+Sc? W kolejnych podrozdziałach Autor przedstawia kryteria używane do selekcji śladów przy pomocy detektorów TPC i ToF, a także omawia metodę identyfikacji rodzaju cząstki z wykorzystaniem informacji z obu tych detektorów. W dalszej części tego rozdziału przedstawione zostały poprawki oszacowane na podstawie symulacji Monte Carlo, związane z geometryczną akceptancją detektora i wydajnością identyfikacji cząstek. Jaka jest przyczyna dużych fluktuacji poprawek dla antyprotonów przy małych  $p_T$  na rysunku 5.14? Z dotychczasowej lektury również nie jest dla mnie jasne jakie jest minimalne  $p_T$  przy którym mogą być rekonstruowane ślady. Wszystkie poprawki i wydajności przedstawione w tym rozdziale zostały oszacowane na podstawie symulacji Monte Carlo. W pracy zdecydowanie brakuje pokazania, że rozkłady wielkości mierzonych są poprawnie opisywane przez Monte Carlo. Stosowanie tego typu poprawek (bin-by-bin) jest uzasadnione jeśli symulacja Monte Carlo opisuje bardzo dobrze dane, a migracje pomiędzy binami są zaniedbywalne. Jeśli tak nie jest, to należałoby zastosować bardziej wyrafinowane metody statystyczne.

W rozdziale tym Autor dyskutuje również potencjalne źródła błędów systematycznych i metody ich szacowania. W tej dyskusji brakuje mi oszacowania jak na rozkłady  $p_T$  i rapidity wpływa fakt, że współrzędna z wierzchołka jest w niefizycznym obszarze poza tarczą. Jak duże są to migracje i czy uzasadniają stosowanie poprawek bin-by-bin?

W podrozdziale 5.7 Autor wspomina o dwóch podobnych analizach, które jednak znacząco różnią się obszarami akceptancji w przestrzeni  $p_T - y$ . Czy jednak w przekrywających się obszarach wszystkie trzy metody dają porównywalne wyniki?

Rozdział szósty zawiera wyniki analizy przeprowadzonej przez Doktoranta i właśnie porównanie, tam gdzie to możliwe, z dwiema równoległymi analizami wspomnianymi wyżej. Wyniki przedstawione są w formie dwuwymiarowych rozkładów różniczkowych w przestrzeni  $p_T - y$  oraz jednowymiarowych rozkładów  $p_T$  w przedziałach  $y$ . Na rysunkach 6.1 – 6.6 brakuje informacji jaka wielkość i w jakich jednostkach jest pokazana na osi 'z'. Ani informacje zawarte na rysunkach ani w podpisach pod rysunkami, nie pozwalają stwierdzić jaka jest różnica pomiędzy rysunkami 6.1 i 6.2 oraz 6.3 i 6.4. Poza tym tego typu rysunki dwuwymiarowe są słabo czytelne i oczywiście warto podać wartości liczbowe, jak to zrobił Autor w Dodatku C. Ale same rysunki raczej należałoby zastąpić odpowiednimi rozkładami jednowymiarowymi. Rozkłady  $p_T$  zostały częściowo przedstawione w kolejnym podrozdziale, w którym Autor porównuje swoje wyniki z wynikami dwóch równoległych analiz wspomnianych wyżej. Generalnie zgodność pomiędzy analizami we wspólnych zakresach przestrzeni fazowej okazuje się być bardzo dobra. W kolejnym rozdziale przedstawione są rozkłady  $p_T$  w centralnym obszarze pospieszności. Do rozkładów kaonów oraz protonów dopasowano przewidywania modelu SMES. W przypadku kaonów z tego dopasowania wyciągnięto parametr  $T$ , który w modelu SMES jest powiązany z temperaturą w której zachodzi tzw. wymrozenie kinetyczne. Dlaczego parametru  $T$  nie wyliczono w przypadku protonów? Jaka jest interpretacja tego parametru w przypadku protonów? Nie jest dla mnie też jasne w jaki sposób dokładnie powstał rysunek 6.13 - Autor pisze, że powstał on z rysunku 6.1 z uwzględnieniem informacji zawartych w tabeli 6.2 - skąd w takim razie wzięły się np. punkty z  $p_T < 0.2$  GeV/c dla wiązki 13A GeV/c? Czy jest jakieś uzasadnienie dlaczego uporządkowanie względem pędu wiązki rozkładów  $p_T$  na rysunku 6.14 jest odwrotne dla protonów i antyprotonów, a w przypadku  $K^+$  i  $K^-$  te uporządkowania są takie same. Interesujące jest porównanie wyników z różnych eksperymentów, w tym otrzymanych przez Autora, dotyczące zależności parametru  $T$  od energii zderzenia w układzie środka masy, a przedstawione na rysunku 6.15. W każdym z rozkładów pojawia się charakterystyczne plateau, którego wartość w modelach hydrodynamicznych związana jest z temperaturą wymrozenia kinetycznego. W szczególności można wyciągnąć z tego porównania wnioski, że ta temperatura w zderzeniach Ar+Sc jest znacznie wyższa niż w zderzeniach Be+Be, i jest raczej zbliżona do zderzeń większych jonów takich jak Au+Au oraz Pb+Pb. Stosunek produkcji  $K^+/\pi^+$  przedstawiony na rysunku 6.17 może świadczyć o przejściowym charakterze wielkości jonów i zakresu energii na SPS w zderzeniach Ar+Sc jeśli chodzi o produkcję QGP w stanie równowagi termodynamicznej. Przedstawione wyniki zdają się w tym sensie interpolować pomiędzy małymi i dużymi systemami. Jest to bardzo ciekawy rezultat otrzymany przez Doktoranta. Powyższe zależności w produkcji dziwności oraz w wartości parametru  $T$  są przedstawione na rysunkach 6.18 i 6.19 w funkcji liczby zranionych nukleonów (będącej miarą wielkości systemu w którym produkowana jest silnie oddziałująca materia). W podrozdziale 6.6 przedstawione zostały porównania otrzymanych wyników eksperymentalnych z przewidywaniami trzech modeli: EPOS, PHSD oraz SMASH. Żaden z modeli nie jest w stanie opisać wszystkich rozkładów eksperymentalnych w pełnym zakresie energii. Przewidywań najbliższych danym dostarcza model PHSD. Brak przewidywań PHSD dla próbki antyprotonów Autor tłumaczy zbyt małą statystyką dostępną próbki. Trochę to dziwi, bo przecież można wygenerować więcej przypadków MC w zadanym obszarze kinematycznym, np. stosując odpowiednie filtry.

Mam też kilka ogólnych uwag edytorskich. Nie ma potrzeby pisania za każdym razem  $^{40}\text{Ar}+^{45}\text{Sc}$  - wystarczy raz podać liczby masowe tych izotopów, a później konsekwentnie pisać po prostu Ar+Sc. Opisy osi na wielu rysunkach powinny być większe, bo jest na to miejsce.

Również zakresy osi należy dobierać tak, aby możliwie dobrze wykorzystać miejsce na rysunkach. Rysunki 5.20 i 5.21 powinny się znaleźć w tekście przed rozpoczęciem podrozdziału 5.7. Na wielu rysunkach (6.15, 6.17, ...) brakuje symboli w legendach, a kolory dla zderzeń  $\text{Ar}+\text{Sc}$  i  $\text{Pb}+\text{Pb}$  są prawie identyczne. Tylko dodatkowa wiedza czytelnika pozwala na stwierdzenie, które punkty odpowiadają którym danym. W spisie literatury w pozycjach [39] i [60] brakuje referencji do czasopism.

Generalnie uważam, że rozprawa doktorska Pana mgr. Podlaskiego zawiera nowe, interesujące wyniki eksperymentalne. Pytanie, na które nie znalazłem odpowiedzi w tekście rozprawy, to dlaczego te wyniki nie zostały opublikowane przez Współpracę NA61/SHINE. Wzbudza to pewne zdziwienie, bo przecież w obecnych czasach, praktycznie każdy doktorant pracujący w dużych eksperymentach fizyki wysokich energii w dniu obrony ma na swoim koncie przynajmniej jedną publikację współpracy eksperymentalnej, która powstała (bądź jest na ostatnich etapach wewnętrznej recenzji) z jego wiodącym udziałem.

Podsumowując, uważam że rozprawa doktorska Pana mgr. Podlaskiego zawiera interesujące wyniki fizyczne otrzymane w rezultacie przeprowadzonej przez niego analizy danych w ramach dużej współpracy międzynarodowej. Rozprawa spełnia wymagania dotyczące rozpraw doktorskich i wnoszę o dopuszczenia go do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

*Mariusz Przybycień*  
Mariusz Przybycień