

## **Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Sebastiana Siejki pt. „Femtoskopia protonów i antyprotonów w programie Beam Energy Scan eksperymentu STAR”**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Sebastiana Siejki skupia się na pomiarze parametrów femtoskopowych w relatywistycznych zderzeniach jądrowych zarejestrowanych w eksperymencie STAR przy akceleratorze RHIC w Brookhaven National Laboratory. W oddziaływaniach jądrowych przy energiach zderzeń w RHIC tworzony jest gorący i gęsty ośrodek, będący w stanie plazmy kwarkowo-gluonowej (PKG). Znajomość wielkości tego ośrodka, dostarczona przez pomiary femtoskopowe, może przyczynić się do lepszego zrozumienia właściwości PKG, przejścia fazowego od PKG do gazu hadronowego, a nawet punktu krytycznego na diagramie fazowym chromodynamiki kwantowej. Analiza fizyczna przedstawiona w rozprawie doktorskiej wykorzystuje dane eksperymentalne dla oddziaływań jonów złota przy pięciu energiach zderzeń  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$  GeV, 11.5 GeV, 19.6 GeV, 27 GeV i 39 GeV. Użyty zakres energii zderzeń pozwala na „sondowanie” diagramu fazowego w zakresie dużych wartości potencjału chemicznego. W oparciu o powyższe dane doświadczalne dokonano pomiaru korelacji dwucząstkowych dla par proton-proton, proton-antyproton oraz antyproton-antyproton w funkcji pędu cząstki w układzie środka masy pary oraz centralności zderzenia oraz pomiaru odpowiadających im promieni obszaru emisji cząstek. Funkcje korelacji zostały sparametryzowane funkcją uwzględniającą rozmiar obszaru emisji oraz efekty związane z oddziaływaniem kulombowskim i silnym.

Rozprawa doktorska napisana w języku polskim liczy 160 stron. Składa się ze streszczenia, wstępu, 11-u rozdziałów, bibliografii zawierającej 87 poz. oraz dwóch dodatków.

**Wstęp** rozprawy zawiera ogólną motywację dotyczącą pomiarów femtoskopowych, plan rozprawy doktorskiej, dorobek naukowy oraz doświadczenie eksperymentalne Autora.

**Rozdział 1** poświęcony jest opisowi zderzeń ciężkich. Autor przedstawia podstawowe pojęcia i definicje związane ze zderzeniami jądrowymi. W szczególności przedstawia pojęcie centralności, energii zderzenia, parametru zderzenia, definicję „uczestników” i „obserwatorów”. Następnie przedstawiono dwa scenariusze czasoprzestrzennej ewolucji zderzenia ciężkich jonów. Pierwszy scenariusz zakłada istnienie PKG, natomiast w drugim scenariuszu obecności PKG jest wykluczona. Rozdział kończy się opisem modelu ewolucji Wszechświata. Uważam, że dobór i ogólny opis pojęć przedstawionych w tym rozdziale jest poprawny, nie licząc paru drobnych uchybień. Np. opis Rys. 3 jest mylący, gdyż rysunek ten zgodnie z Ref. [9], przedstawia różnicę pomiędzy płaszczyzną reakcji (ang. reaction plane), a płaszczyzną przypadku (ang. participant plane), z kolei czynnik Lorentz’a zdefiniowany wzorem 1.5 jest równy odwrotności pierwiastka przedstawionego w tym równaniu. Natomiast w pierwszym zdaniu na str. 16, stwierdzono, że w zderzacach „jest możliwość osiągnięcia dwukrotnie większej energii zderzenia niż w eksperymentach na stałej tarczy”. Należałoby raczej podkreślić, że w zderzeniach ze stałą tarczą energia dostępna do wytworzenia nowych cząstek jest proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego energii wiązki, a na zderzaczu dostępna energia jest proporcjonalna do energii wiązek, czyli wielokrotnie większa.

**Rozdział 2** poświęcony jest teoretycznym aspektom fizyki zderzeń ciężkich jonów. Autor krótko przedstawia elementy Modelu Standardowego istotne dla oddziaływań jądrowych, tj. model kwarków. W rozdziale tym omówione zostało zjawisko uwięzienia kwarków oraz diagram fazowy QCD z interesującym porównaniem do diagramu fazowego dwutlenku węgla. W opisie rysunku 11, należałoby raczej podkreślić, że jest to schematyczny wykres potencjału dla oddziaływań silnych pomiędzy kwarkami oraz podać wartości użytych parametrów  $\alpha_s$  i  $k$ . Parametr  $k < 0$  jest

nazwany w rozprawie niezbyt fortunnie stałą sprężenia – jest on raczej związany ze „string tension”,  $\sigma = -k$ , z kolei Rys. 15 nie ma odnośnika w tekście rozprawy.

**Rozdział 3** zawiera opis akceleratora RHIC z opisem etapów przyspieszania protonów oraz ciężkich jonów. Następnie jest omówiony detektor STAR wraz z jego głównymi „pod-detektorami”, ze szczególnym uwzględnieniem detektora projekcji czasowej TPC oraz wewnętrznego detektora krzemowego HFT. W rozdziale opisano program badawczy BES jego główne założenia oraz przykłady rezultatów fizycznych uzyskanych w ramach tego programu. Na str. 42 przedstawiono informację o materiale doświadczalnym uzyskanym podczas BES. Pomieaż są to dane wykorzystywane przez Autora w rozprawie doktorskiej oczekiwabym bardziej szczegółowego opisu poszczególnych próbek, zawierający statystykę przypadków, okres zbierania danych, energie wiązki itp., np. w formie tabeli. Informacji tych również nie znajdujemy w następnym rozdziale. Pomimo tej drobnej uwagi uważam, że Autor dobrze przedstawił akcelerator RHIC wraz z detektorem STAR.

**Rozdział 4** jest poświęcony selekcji danych doświadczalnych. W rozdziale nie tylko przedstawiono warunki selekcji w postaci tabeli, ale podano także ich uzasadnienie fizyczne. Większość rysunków przedstawionych w tym rozdziale to praca własna mgr. inż. Sebastiana Siejki, co jest godne pochwały. Najpierw omówiono sposób rekonstrukcji wierzchołków oddziaływania. W następnym kroku omówiono sposób selekcji torów cząstek w oparciu o parametr DCA oraz sposób identyfikacji cząstek w oparciu o jonizacyjną stratę energii cząstek w ośrodku detektora TPC i pomiar czasu przelotu w oparciu o detektor ToF. Omówiono również sposób selekcji par cząstek z uwzględnieniem zdolności rozdzielczej detektora. Interesujące byłoby poznać statystykę zrekonstruowanych protonów i antyprotonów oraz par w użyciu próbkach oddziaływań Au+Au.

**Rozdział 5** zawiera ogólną definicję korelacji dwucząstkowych, pozwalających wyznaczyć rozmiar źródła emitującego cząstki w oddziaływaniu jądrowym (w definicji 5.1 w mianowniku występują dwa symbole dla prawdopodobieństw jednocząstkowych  $P$  i  $P'?$  – rozumieć, że jest pomyłka redakcyjna). Po wprowadzeniu układów odniesienia LCMS i PRF Autor rozprawy omawia parametryzacje funkcji korelacji dla nieidentycznych (np. proton-antyproton) i identycznych (np. proton-proton lub antyproton-antyproton) par barionów. Wpływ oddziaływań silnych i elektromagnetycznych oraz efektów kwantowych został przedstawiony w tekście rozprawy oraz zilustrowany na Rys. 45 i 46.

**Rozdział 6** zawiera krótkie opisy modeli vHLLE+UrQMD i THERMINATOR użytych do uzyskania porównań pomiedzy przewidywaniami teoretycznymi a wynikami doświadczalnymi. Oba opisane modele nie zawierają korelacji femtoskopowych dlatego do uzyskania przewidywań konieczne jest użycie dodatkowego programu tzw. kalkulatora wag Lednickiego, który po zastosowaniu odpowiednich wcześniejszych przygotowanych wag jest w stanie wygenerować efekty femtoskopowe dla par cząstek różnego typu w oddziaływaniach jądrowych wygenerowanych przy pomocy modeli vHLLE+UrQMD lub THERMINATOR 2. Kalkulator Lednickiego jest przedstawiony w ostatniej części rozdziału 6.

**Rozdział 7** jest poświęcony omówieniu uzyskanych dotychczas wyników femtoskopowych w kontekście tematyki rozprawy doktorskiej. W pierwszej części przedstawiono wyniki pomiarów dla funkcji 3-wymiarowych parametrów femtoskopowych dla identycznych pionów w centralnych oddziaływaniach ciężkich jonów w zakresie energii  $\sqrt{s_{NN}} = \text{ok. } 2 \text{ GeV}$  - 200 GeV. Rysunki 48 i 49 nie zostały jednak w pełni podsumowane, w tekście brakuje odnośników i komentarzy do tych rysunków. W następnej części rozdziału omówiono rezultaty bezpośrednio związane z rozprawą doktorską. Dotyczą one pomiarów 1-wymiarowych funkcji korelacji oraz odpowiadających im parametrów femtoskopowych dla par proton-proton, proton-antyproton oraz antyproton-antyproton w oddziaływaniach Au+Au przy wyższych energiach  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4 \text{ GeV}$  i 200 GeV niż energie zderzenia rozważane w rozprawie doktorskiej.

**Rozdział 8** zawiera najważniejsze wyniki rozprawy doktorskiej dotyczące pomiarów funkcji korelacyjnych proton-proton lub antyproton-antyproton i proton-antyproton oraz odpowiadających im parametrów femtoskopowych dla par proton-proton, proton-antyproton oraz antyproton-antyproton w oddziaływaniach Au+Au przy wyższych energiach  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4 \text{ GeV}$  i 200 GeV niż energie zderzenia rozważane w rozprawie doktorskiej.

energii zderzeń  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$  GeV, 11.5 GeV, 19.6 GeV, 27 GeV i 39 GeV oraz dla trzech przedziałów centralności 0-10%, 10-30% i 30-70%. Na początku rozdziału omówiono sposób wyznaczania błędów statystycznych oraz różne źródła niepewności systematycznych. Funkcje korelacyjne w wykonanej analizie zostały poprawione na zdolność rozdzielczą detektorów eksperymentu STAR, dokładność identyfikacji cząstek (tzw. czystość), oraz na obecność cząstek wtórnych (tzw. korekcja rezydualna). Wpływ poszczególnych etapów korekcji na funkcje korelacji oraz odpowiadających im promieni został szczegółowo omówiony. W rozdziale tym zabrakło mi dyskusji dotyczącej wielkości niepewności systematycznych. W szczególności nie ma omówienia niepewności dla funkcji korelacji - w dodatku A podano tylko niepewności dla promieni. Interesujące byłoby zobaczyć zależność różnych wkładów do całkowitej niepewności od  $k^*$ . Dlaczego całkowitą niepewność oszacowano jako błąd maksymalny a nie np. jako pierwiastek z sumy kwadratów niepewności od poszczególnych źródeł?

Z kolei **Rozdział 9** zawiera przewidywania funkcji korelacji i promieni obszarów emisji cząstek uzyskanych w oparciu o modele vHLL+UrQMD i THERMINATOR 2. Generacja danych modelowych została wykonana dla energii zderzeń jonów złota odpowiadającym energiom w danych doświadczalnych. Dane MC posłużyły do wyliczenia funkcji korelacji proton-proton, antyproton-antyproton i proton-antyproton dla tego samego zakresu kinematycznego co w danych doświadczalnych. Stosując tą samą metodę co przy analizie danych uzyskano przewidywania na funkcje korelacji oraz promienie obszarów emisji cząstek. Uzyskanie przewidywań parametrów femtoskopowych stanowi istotny element rozprawy doktorskiej.

**Rozdział 10 i 11** to dyskusja wyników i podsumowanie. Z uzyskanych rezultatów wynika, że w oddziaływaniach Au+Au przy energii  $\sqrt{s_{NN}} = 39$  GeV promienie obszarów emisji cząstek dla korelacji proton-proton oraz antyproton-antyproton są zgodne. Pomimo dużych niepewności, zaobserwowano mniejsze promienie emisji dla korelacji proton-antyproton niż dla korelacji identycznych barionów dla oddziaływań Au+Au przy energiach zderzeń  $\sqrt{s_{NN}} = 11.5$  GeV, 19.6 GeV, 27 GeV i 39 GeV w trzech zakresach centralności zderzenia 0-10%, 10-30% i 30-70% - co jest interesujące. Wyniki wskazują również, zgodnie z oczekiwaniami, że wartości promieni w oddziaływaniach centralnych są większe niż w oddziaływaniach peryferycznych dla wszystkich energii zderzeń i rodzajów korelacji. Natomiast nie zależą one od energii zderzenia. Rezultaty eksperymentalne dla oddziaływań centralnych porównano z przewidywaniami teoretycznymi dla modelu THERMINATOR 2. Dla korelacji proton-proton i antyproton-antyproton zaobserwowano zgodność promieni emisji dla danych modelowych oraz eksperymentalnych, natomiast większe wartości promieni emisji uzyskano dla korelacji proton-antyproton dla modelu niż dla pomiarów doświadczalnych - co jest zastanawiające. Porównanie w pełnym zakresie centralności zostało przedstawione dla modelu vHLL+UrQMD. Jakościowo dane eksperymentalne i przewidywania modelu hybrydowego są podobne chociaż nie uzyskuje się pełnej zgodności. Drobną uwagę, na rysunkach 82 i 83 opis symboli wskazuje na brak rezultatów dla oddziaływań średniocentralnych. Uważam, że przeprowadzona analiza eksperymentalna w rozprawie doktorskiej jest interesująca i wartościowa. Jednak, pomiary są obciążone dużymi niepewnościami systematycznymi, które w większości przypadków są znacznie większe niż niepewności statystyczne. Czy bardziej gruntowna analiza źródeł niepewności systematycznych pozwoliłaby uzyskać precyzyjniejsze wyniki? Które niepewności systematyczne dominują przy wyznaczaniu promieni emisji?

Tekst rozprawy doktorskiej jest napisany poprawną polszczyzną. Chociaż niektóre opisy mogłyby być bardziej precyzyjne, np. opisy rysunków, równań oraz użytych wielkości fizycznych. Kilka rysunków pozostaje bez odnośników w tekście rozprawy. Należy pochwalić Autora za wyczerpujący spis literatury. Te redakcyjne potknięcia nie umniejszają jednak wartości merytorycznej rozprawy.

Podsumowując, uważam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska w pełni spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Sebastiana Siejki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Adam Frzypek