

dr hab. Radosław Ryblewski, prof. IFJ PAN
Instytut Fizyki Jądrowej
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152
31-342 Kraków

Kraków, 22 września 2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Justyny Cybowskiej zatytułowanej
Multiplicity and Net-Electric Charge Fluctuations in Central Ar+Sc Interactions
at SPS Energies Measured in the NA61/SHINE Experiment

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Justyny Cybowskiej, zatytułowana *Fluktuacje krotności cząstek naładowanych oraz netto-ładunku elektrycznego w centralnych zderzeniach Ar+Sc przy energiach SPS mierzone w eksperymencie NA61/SHINE* (ang. *Multiplicity and Net-Electric Charge Fluctuations in Central Ar+Sc Interactions at SPS Energies Measured in the NA61/SHINE Experiment*), została przygotowana pod opieką Prof. dr hab. Katarzyny Grebieszko oraz dr inż. Mai Maćkowiak-Pawłowskiej i złożona zgodnie z wymogami uzyskania stopnia doktora nauk fizycznych na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej. Rozprawa ta oparta jest na rezultatach przeprowadzonej przez Autorkę analizy danych zmierzonych przez eksperyment NA61/SHINE na akceleratorze SPS w CERN-ie. Prezentowane wyniki są ostateczne, a publikacja je zawierająca jest obecnie w przygotowaniu.

Tematyka rozprawy

Głównym celem prezentowanej analizy danych jest pomiar fluktuacji krotności dodatnio i ujemnie naładowanych hadronów oraz ładunku elektrycznego netto w centralnych zderzeniach Ar+Sc przy pędach wiązki 13, 19, 30, 40, 75 oraz 150 GeV/c na nukleon. Przedstawiona analiza jest integralną częścią programu badań oddziaływań silnych eksperymentu NA61/SHINE ukierunkowanego na poszukiwanie zachowań krytycznych w sąsiedztwie przejścia fazowego pomiędzy gazem hadronowym a plazmą kwarkowo-gluonową oraz punktu krytycznego. Program ten oparty jest na badaniu produkcji cząstek w szerokim zakresie energii zderzenia oraz rozmiaru zderzanych układów. Pozwala to na próbkowanie stanu materii przy różnych gęstościach i temperaturach, a w konsekwencji na eksplorację różnych obszarów diagramu fazowego chromodynamiki kwantowej (QCD). Obecnie wiedza w tym zakresie opiera się głównie na przewidywaniach modeli teoretycznych inspirowanych QCD, oraz na wynikach obliczeń komputerowych w ramach tzw. symulacji QCD na siatkach. Te ostatnie, pomimo znacznego rozwoju w ostatnich latach, mają niestety ograniczony zakres stosowalności, a wraz ze wzrostem gęstości barionowych ich precyzja maleje. W tym kontekście badania eksperymentalne prowadzone przez eksperyment NA61/SHINE jak również podobne pomiary dokonywane przez inne kolaboracje stają się kluczowym źródłem informacji potrzebnych do zrozumienia struktury materii jądrowej oraz natury oddziaływań silnych.

Jednym z głównych narzędzi stosowanych w badaniu zjawisk krytycznych są badania fluktuacji w produkcji cząstek. W otoczeniu punktu krytycznego współistnienie faz

związane jest z nagłymi zmianami w charakterze oddziaływań oraz wzrostem korelacji długozasięgowych. Mogą one prowadzić do nagłych fluktuacji krotności produkowanych cząstek. Obserwacja tychże fluktuacji w warunkach eksperymentalnych jest jednak problematyczna z uwagi na obecność wielu innych efektów. Jednym z nich są fluktuacje rozmiaru układu. Porównanie wartości miar fluktuacji dla różnych zderzanych układów wymaga użycia wielkości intensywnych, które nie zależą od rozmiaru układu, mogą jednak zależeć od jego fluktuacji. Jednym z głównych wyzwań bieżącej analizy jest zatem możliwie maksymalne zredukowanie wpływu tychże fluktuacji na mierzone wielkości przy jednoczesnym utrzymaniu niskich fluktuacji statystycznych. W tym celu, w niniejszej analizie dokonano selekcji 1% najbardziej centralnych przypadków wykorzystując unikalną infrastrukturę eksperymentu NA61/SHINE.

Struktura i główne wyniki rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Cybowskiej została sporządzona w języku angielskim, napisana jest w klarowny sposób, jej struktura jest przemyślana i przejrzysta, a tekst, z nielicznymi wyjątkami, starannie zredagowany. Praca składa się z sześciu rozdziałów poprzedzonych streszczeniem w języku polskim i angielskim oraz spisem treści. Główna jej część uzupełniona jest dodatkiem zawierającym podstawowe informacje na temat rozkładów prawdopodobieństwa oraz spisem literatury.

Rozdział pierwszy zawiera krótkie wprowadzenie do fenomenologii oddziaływań silnych. Autorka zwięźle i przystępnie przedstawia obecny stan wiedzy w zakresie stanów skupienia i przemian fazowych w materii oddziałującej silnie jak również zarysowuje front badań, w który wpisuje się prezentowana analiza.

W rozdziale drugim wprowadzono miary fluktuacji krotności oraz ładunku elektrycznego netto wykorzystywane w prezentowanej analizie tj. znormalizowane stosunki kumulant wyższego stopnia, w tym wariancji, skośności oraz kurtozy. Skonstruowane w ten sposób wielkości stanowią dogodne wskaźniki odstępstw rozkładów eksperymentalnych od rozkładów referencyjnych, odpowiednio Poissona oraz Skellama. W tekście omówione zostały również przewidywania wpływu różnych zjawisk fizycznych na zachowanie tychże miar w ramach niektórych modeli teoretycznych. Ta część pracy napisana jest w sposób przystępny dla niespecjalistów, z zachowaniem minimum szczegółów technicznych. Nie do końca jest dla mnie jednak jasna celowość umieszczenia wzorów 2.4-2.6 przy dyskusji przewidywań modelu zranionych nukleonów, do których nie ma odniesienia w kolejnych partiach tekstu. Rozdział ten zamyka bardzo krótkie podsumowanie rezultatów dotychczasowych pomiarów fluktuacji w eksperymentach na RHIC i LHC.

W rozdziale trzecim znalazł się opis budowy i konfiguracji eksperymentu NA61/SHINE oraz omówienie roli niektórych elementów kluczowych w kontekście bieżącego pomiaru, w tym detektora PSD. Skrótoowo opisano tu procedurę rekonstrukcji przypadków zmierzonych w detektorze jak również generacji odpowiednich danych Monte Carlo które zostały użyte do ich korekty. W tym celu oparto się wyłącznie na modelu EPOS w wersji 1.99. Naturalnie rodzi to pytanie o potencjalny wpływ wyboru tego modelu oraz jego parametrów na końcowy wynik analizy.

W rozdziale czwartym przedstawiono obszerny opis przeprowadzonej analizy danych. Jej pierwszym etapem jest wstępna selekcja przypadków oraz śladów cząstek głównie pod kątem jakości i poprawności rekonstrukcji, oraz założeń analizy. Podczas gdy zasadność większości użytych kryteriów wymienionych w podrozdziałach 4.2.1 i 4.2.2 jest raczej intuicyjna i zrozumiała, rozszerzenie opisów niektórych podpunktów o

dotatkowe wyjaśnienia lub dodanie odpowiednich referencji, w mojej opinii, poprawiłoby odbiór tekstu. W szczególności, wyłącznie na podstawie tekstu, nie jest dla mnie jasne dlaczego poszczególne obszary na rysunku 4.4 zostały wykluczone.

Kluczowa dla bieżącej analizy selekcja 1% najbardziej centralnych przypadków została opisana w rozdziale 4.2.3. Przeprowadzono ją w oparciu o sygnał z podzbioru modułów detektora PSD, w których występowała wyraźna antykorelacja pomiędzy ilością śladów w TPC oraz zmierzoną energią. W przypadku danych Monte Carlo wykorzystano informację o energii cząstek wyprodukowanych do przodu zmodyfikowaną przy użyciu tzw. *symulatora PSD*.

W podrozdziale 4.3 opisano proces naniesienia poprawek na zrekonstruowane dane wynikających z niedoskonałości detektora oraz procedury rekonstrukcji. Do tego celu wykorzystano tzw. procedurę *Unfolding* zaimplementowaną w formie publicznie dostępnego oprogramowania. Korekta danych została przeprowadzona przy użyciu tzw. *macierzy odpowiedzi* utworzonej z zasymulowanych oraz zrekonstruowanych przypadków Monte Carlo. Z uwagi na nowatorskie zastosowanie tejże metody w bieżącej analizie, moim zdaniem, jej obecny opis jest nieco zbyt hasłowy a zrozumienie, np. na czym polega sama procedura, oraz jaka jest rola macierzy odpowiedzi w stosunku do zmierzonych rozkładów, zmusza do sięgnięcia do zacytowanych referencji.

Rozdział czwarty zamyka przejrzysty i szczegółowy opis metody wyznaczenia niepewności pomiaru. Niepewność statystyczną wyznaczono z użyciem klasycznej metody *bootstrap*, co jest zasadne, biorąc pod uwagę własności analizowanych danych. W przypadku niepewności systematycznych zastosowano często stosowaną metodę zmiany kryteriów selekcji danych tj. przypadków i śladów, oraz rozdzielczości PSD, a błąd zdefiniowano jako maksymalną różnicę rezultatów uzyskanych przed i po tej zmianie. Jedyną wątpliwość budzi pochodzenie i forma wzoru definiującego tzw. *funkcję rozdzielczości PSD*.

Główne wyniki przeprowadzonej analizy wraz z odpowiednimi błędami przedstawiono w rozdziale piątym. Znalazły się tutaj zarówno otrzymane wartości kumulant wyższego stopnia w funkcji energii zderzenia jak i użyte do ich wyznaczenia poprawione rozkłady krotności cząstek naładowanych i ładunku elektrycznego netto. Wyniki te są szczegółowo przedyskutowane a konkluzje wynikające z ich analizy trafne. Zmierzane wartości stosunku κ_2/κ_1 zarówno dla cząstek dodatnio jak i ujemnie naładowanych znajdują się nieznacznie poniżej wartości referencyjnych i nie wykazują zachowań niemonotonicznych w funkcji energii wiązki. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku stosunku κ_3/κ_1 , który wykazuje znaczne fluktuacje wartości, które jednak pozostają w okolicy wartości referencyjnych. Istnienie minimum κ_4/κ_2 w funkcji energii zderzenia dla cząstek naładowanych ujemnie, jak trafnie zauważono, jest niekonkluzywne z uwagi na znaczące niepewności pomiaru. Uzyskane wyniki w większości mierzonych wielkości opisywane są przez model EPOS jedynie jakościowo. W przypadku miar fluktuacji ładunku elektrycznego netto można zaobserwować niemonotoniczne zachowanie κ_4/κ_2 oraz κ_3/κ_1 z maksimum w okolicy energii wiązki 30 A GeV/c, jednakże, ponownie, niepewności są zbyt duże by formułować definitywne wnioski, zwłaszcza, że wynik κ_3/κ_1 pozostaje w zgodzie z modelem EPOS, którego implementacja nie zawiera punktu krytycznego. Rozdział ten kończy porównanie wyników bieżącej analizy z wynikami analiz zderzeń p+p oraz Be+Be. Różnice pomiędzy rezultatami dla rozkładów krotności w układach Ar+Sc oraz p+p są zauważalne, szczególnie w przypadku κ_2/κ_1 gdzie dla układu Ar+Sc pojawia się niemonotoniczność w funkcji energii. Porównanie wyników dla ładunku elektrycznego netto wskazuje z kolei, że Ar+Sc jest jedynym z prezentowanych układów gdzie pojawiają się niemonotoniczne zachowania. Jednakże, również i w tym przypadku, znaczne niepewności bieżących wyników utrudniają interpretację

obserwowanych różnic. W związku z powyższym, nasuwa się pytanie czy możliwe jest dalsze zmniejszenie niepewności w prezentowanej analizie a także czy w przypadku innych zderzanych układów można oczekiwać podobnych problemów z precyzją uzyskanych wyników.

W rozdziale szóstym mgr inż. Cybowska przedstawia krótkie podsumowanie prezentowanej rozprawy.

Podsumowanie

Po szczegółowym zapoznaniu się z przedstawioną rozprawą doktorską, uważam, że zawiera ona oryginalne i niezwykle cenne wyniki, które stanowią wartościowy wkład w program badań własności materii oddziałującej silnie, zaś narzędzia i techniki eksperymentalne opracowane w trakcie jest przygotowywania mają potencjalne zastosowanie w przyszłych eksperymentach. Uzyskane rezultaty wskazują na możliwość obecności zjawisk krytycznych w badanym układzie. Niemniej, z uwagi na znaczące niepewności, oraz integralność programu badań, których częścią jest bieżąca analiza, ostateczna interpretacja uzyskanych wyników wymaga zestawienia z rezultatami wciąż trwających analiz pozostałych układów.

W związku z powyższym stwierdzam, że niniejsza rozprawa spełnia wszystkie ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie Pani mgr inż. Justyny Cybowskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

dr hab. Radosław Ryblewski