



Kraków, 17.04.2025

Prof. dr hab. Marcin Kucharczyk
Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk
Ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Danieli Ruggiano pt.

„Exploring the baryon correlation puzzle via multiplicity-dependent two-particle correlations in pp, p-Pb and Pb-Pb collisions at the LHC energies”

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr Danieli Ruggiano pt. *„Exploring the baryon correlation puzzle via multiplicity-dependent two-particle correlations in pp, p-Pb and Pb-Pb collisions at the LHC energies”*. Rozprawa została przygotowana pod opieką promotora, prof. dr hab. Adama Kisiela oraz promotora pomocniczego, dr hab. Małgorzaty Janik. Prezentowana praca dotyczy analizy dwucząstkowych korelacji kątowych zarówno dla par jednoimiennie, jak i różnoimiennie naładowanych pionów, kaonów oraz protonów, produkowanych w zderzeniach proton-proton (pp), proton-ołów (p-Pb) oraz ołów-ołów (Pb-Pb) w eksperymencie ALICE. Korelacje tego typu, badane w funkcji różnicy kątów azymutalnych ($\Delta\phi$) i pseudospieszczości ($\Delta\eta$) par cząstek, pozwalają uzyskać pełniejszy obraz efektów zachodzących na etapie produkcji cząstek, takich jak np. korelacje związane z przepływem eliptycznym, statystyką kwantową, mini-dżetami, jak również rozpadami rezonansów, oddziaływaniami kulombowskimi czy też zasadami zachowania pędu i energii. Przedstawione wyniki pomiaru korelacji w różnych systemach zderzeń, tj. w tzw. małych systemach (pp, p-Pb), jak również w zderzeniach ciężkich jonów (Pb-Pb) mają istotne znaczenie dla pełniejszego zrozumienia procesu produkcji cząstek, w szczególności pochodzenia zjawisk kolektywnego przepływu materii, związanych m.in. z plazmą kwarkowo-gluonową. Jak wynika z rozprawy, zachętą do wyboru powyższej tematyki, oprócz potrzeby pomiaru korelacji kątowych dla mezonów i barionów w różnych przedziałach krotności cząstek naładowanych w różnych systemach zderzeń, z użyciem nowej metody wykorzystującej przeskalowaną funkcję korelacji, była dodatkowo chęć głębszego zbadania struktury antykorelacyjnej widocznej w funkcji korelacji dla małych różnic w kątach azymutalnych w przypadku par barionów.

Niewątpliwie zagadnienia badawcze analizowane w ramach recenzowanej pracy są istotne z punktu widzenia zrozumienia mechanizmów produkcji cząstek oraz formowania plazmy kwarkowo-gluonowej. Na uwagę zasługuje szczegółowa dyskusja obserwowanej dla par protonów antykorelacji w rozkładach cząstek, gdzie dostępne modele teoretyczne nie odtwarzają struktury antykorelacyjnej dla małych różnic w kątach azymutalnych.

Rozprawa doktorska mgr Danieli Ruggiano oparta jest na danych zarejestrowanych w eksperymencie ALICE w zderzeniach proton-proton, proton-ołów oraz ołów-ołów przy energiach odpowiednio $\sqrt{s} = 13$ TeV (pp) oraz $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV (p-Pb, Pb-Pb).

Praca napisana jest w języku angielskim, składa się ze wstępu, dziewięciu właściwych rozdziałów oraz podsumowania. Zawiera również dodatek na temat symulacji Monte Carlo oraz niepewności systematycznych, jak również bibliografię liczącą 137 pozycji. Praca jest napisana starannie oraz nie budzi zastrzeżeń pod względem merytorycznym.



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Rozdział pierwszy to wstęp do rozprawy wraz z motywacją dla podjętych badań. W rozdziale drugim znajduje się zwięzły opis aspektów teoretycznych leżących u podstaw niniejszej pracy, tj. Modelu Standardowego, chromodynamiki kwantowej oraz stanu plazmy kwarkowo-gluonowej, jaki może powstać w ultrarelatywistycznych zderzeniach ciężkich jonów, wraz z omówieniem najważniejszych sygnatur eksperymentalnych tego zjawiska. Autorka zwraca uwagę na zagadnienie związane z obserwacją efektów kolektywnych w małych systemach zderzeń, co wywołało żywą dyskusję na temat ich pochodzenia, w szczególności, czy mają one to samo źródło co w zderzeniach ciężkich jonów.

Rozdział trzeci stanowi opis wybranych generatorów Monte Carlo, używanych w fizyce wysokich energii do symulacji zderzeń cząstek, wraz ze zwięzłym opisem modelu hadronizacji opartego o mechanizm fragmentacji strun (model LUND). W szczególności są to generatory wykorzystane w przedstawionych w rozprawie analizach fizycznych do symulacji zderzeń proton-proton, proton-ołów oraz ołów-ołów w celu porównania z danymi eksperymentalnymi. Na koniec tego rozdziału Autorka poświęca nieco uwagi generatorowi CALM, pozwalającemu na badanie rozkładów cząstek w oparciu o szereg założeń co do zasad zachowania oraz korelacji, dzięki czemu można zidentyfikować istotne ograniczenia istniejących modeli fragmentacji, takich jak model LUND.

Czwarta część rozprawy zawiera dyskusję podstaw teoretycznych użytej metody badawczej. Jest ona napisana w sposób zrozumiały i rzeczowy. Autorka opisuje najpierw konstrukcję dwucząstkowej funkcji korelacji kątowych z wykorzystaniem definicji ilorazu prawdopodobieństw. Zwraca uwagę na ograniczenia powyższej definicji ze względu na spodziewany współczynnik skalowania, opisując alternatywną koncepcję wykorzystującą przeskalowaną funkcję korelacji. Następnie przechodzi do szczegółowego opisu źródeł korelacji kątowych w układach cząstek powstałych w zderzeniach wysokoenergetycznych, wynikających m.in. z zasad zachowania, statystyki kwantowej, oddziaływań silnych oraz kulombowskich, a także efektów związanych z mini-dżetami, przepływami kolektywnymi, obecnością rezonansów, czy też konwersją fotonów.

W kolejnym rozdziale zawarta jest dyskusja wyników wcześniejszych analiz korelacji kątowych dla par jednoimiennie naładowanych pionów, kaonów, protonów oraz hiperonów Λ , wyprodukowanych w zderzeniach protonów w eksperymencie ALICE oraz w zderzeniach jąder złota w eksperymencie STAR. Uzyskane wyniki wskazują na odmienne zachowanie mezonów i barionów, przy czym w szczególności w przypadku par jednoimiennie naładowanych barionów dostępne modele teoretyczne nie odtwarzają struktury antykorelacyjnej widocznej w funkcji korelacji dla małych różnic w kątach azymutalnych. Co więcej obserwowana struktura antykorelacyjna pogłębia się wraz ze wzrostem pędu poprzecznego cząstek, co stanowi dobrą motywację do przeprowadzenia podobnej analizy korelacji w zależności od liczby cząstek naładowanych w przypadku. Ta część rozprawy w sposób przekonujący dostarcza informacji uzasadniających kierunki pracy badawczej Autorki, opisaną w kolejnych rozdziałach.

W mojej opinii rozdziały czwarty i piąty są dobrym wprowadzeniem do przeprowadzonej analizy korelacji i zawierają niezbędną ilość informacji w celu zrozumienia dalszych części pracy. Dowodzi to dobrej znajomości przez Autorkę zagadnień teoretycznych i eksperymentalnych związanych z tematyką rozprawy.

Rozdział szósty stanowi krótkie przedstawienie kompleksu akceleratorowego LHC oraz eksperymentu ALICE. Autorka omawia wymagania stawiane aparaturze tego systemu detekcyjnego w obliczu oczekiwanych pomiarów fizycznych, przechodząc następnie do opisu najistotniejszych części detektora ALICE, kluczowych dla prezentowanej analizy. Przedstawiono budowę i funkcję głównych podzespołów detektora odpowiadających za



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

rekonstrukcję oraz identyfikację cząstek, podając informacje o ich pozycjach, metodach detekcji oraz rozdzielczościach przestrzennych. Skrótowno opisano procedurę identyfikacji cząstek oraz strukturę przepływu danych pomiarowych z podsystemów detektorowych, jak również narzędzia do rekonstrukcji, symulacji oraz analizy danych.

Prezentacja wyników analiz fizycznych rozpoczyna się od rozdziału siódmego, w którym na wstępie Autorka podkreśla wkład własny w poszczególne etapy selekcji przypadków. Lektura tego rozdziału świadczy o solidności przeprowadzonej analizy, wykonaniu wielu czasochłonnych sprawdzianów i sprawnym posługiwaniu się oprogramowaniem. Ponieważ kryteria wyboru wraz z całą techniczną stroną selekcji związane są z cechami charakterystycznymi danego eksperymentu, ocenę poprawności analizy wyrażonej przez kogoś nieuczestniczącego w eksperymencie należy oprzeć o prezentowany wachlarz przedstawionych przez mgr Danielę Ruggiano poszczególnych etapów analizy. Autorka wzięła pod uwagę wszystkie zagadnienia typowe w tego rodzaju opracowaniach. Jest tu dość szczegółowa dyskusja zastosowanych cięć, wyboru przedziałów krotności cząstek naładowanych czy też centralności, zagadnienia związane z identyfikacją cząstek, wprowadzeniem szeregu poprawek czy też wyznaczeniem czystości próbek.

Trzy kolejne rozdziały stanowią najważniejszą część rozprawy doktorskiej, gdzie ponownie na wstępie do rozdziałów ósmego i dziewiątego Autorka podkreśla wkład własny w wykonane analizy. W rozdziałach ósmym i dziewiątym mgr Daniela Ruggiano omawia kolejno wyniki analizy korelacji kątowych dla par jednoimiennie i różnoimiennie naładowanych pionów, kaonów oraz protonów, dla różnych przedziałów krotności cząstek naładowanych i w różnych systemach zderzeń, tj. pp, p-Pb oraz Pb-Pb. Wyniki analizy obejmują zarówno korelacje kątowe badane w funkcji $\Delta\phi$ i $\Delta\eta$ z dwucząstkową funkcją korelacji skonstruowaną z wykorzystaniem definicji ilorazu prawdopodobieństw, jak również z przeskalowaną funkcją korelacji. W obu przypadkach do konstrukcji próbki referencyjnej użyta została metoda mieszania przypadków. Dla wyników we wszystkich wymienionych systemach zderzeń przeprowadzono test zgodności zrekonstruowanych i wygenerowanych przypadków Monte Carlo (ang. *MC closure test*) w celu potwierdzenia poprawności wyboru cięć selekcyjnych oraz zastosowanych poprawek. Analiza najważniejszych źródeł błędów systematycznego, pochodzących m.in. od niedoskonałości konstrukcji próbki referencyjnej, rekonstrukcji śladów czy też identyfikacji cząstek, zawarta jest w dodatku na końcu rozprawy. Wyniki w zmiennej $\Delta\phi$ w przypadku małych systemów oraz w zmiennych $\Delta\phi$ i $\Delta\eta$ w przypadku zderzeń Pb-Pb, zostały porównane z przewidywaniami szeregu modeli teoretycznych, wskazując m.in. na znaczące rozbieżności między modelami a danymi doświadczalnymi, w szczególności dla par cząstek różnoimiennie naładowanych, co sugeruje tłumienie efektów pochodzących od dżetów „back-to-back”. Modele nie potrafiły również odwzorować antykorelacji dla par jednoimiennie naładowanych protonów we wszystkich badanych systemach zderzeń. Wyniki pomiarów dla trzech różnych systemów zderzeń zostały porównane w rozdziale dziesiątym, uwidaczniając istotne różnice w rozkładach funkcji korelacji pomiędzy tymi układami, na co wpływ miały m.in. efekty związane ze skalowaniem, mini-dżety, przepływy kolektywne, czy też rozpady rezonansów. Autorka zwraca uwagę, że zastosowanie przeskalowanej funkcji korelacji pozwoliło na skuteczne wyeliminowanie efektów skalowania, a wyniki wykazały dobrą zgodność pomiędzy systemami pp i p-Pb. Jednakże w przypadku zderzeń Pb-Pb zaobserwowano słabsze korelacje, co przypisano efektom plazmy kwarkowo-gluonowej w zderzeniach ciężkich jonów.

Wyniki przedstawionych powyżej analiz mają status „*preliminary*” w ramach współpracy ALICE, niemniej jednak należy zaznaczyć, że zaprezentowane analizy fizyczne zostały



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

przeprowadzone w pełnym zakresie. Oznacza to, że zrealizowano wszystkie wymagane etapy – od przygotowania danych po uzyskanie końcowych wyników fizycznych, tj. funkcji korelacji kątowych wraz z pełną oceną niepewności statystycznych i systematycznych. Tym samym główne zadanie powierzone Doktorantce zostało wykonane prawidłowo i w całości. Warto również podkreślić, że uzyskane wyniki mają istotne znaczenie dla lepszego zrozumienia obserwowanych antykorelacji dla par jednoimiennie naładowanych barionów. Co więcej, po raz pierwszy w ramach eksperymentu ALICE, umożliwiają one bezpośrednie porównanie korelacji kątowych dla mezonów i barionów w różnych systemach zderzeń, tj. pp, p-Pb oraz Pb-Pb. Istotnym i nowatorskim wkładem pracy jest również zastosowanie przez Autorkę – po raz pierwszy w eksperymencie ALICE – alternatywnej metody konstrukcji funkcji korelacji, która pozwala na wyeliminowanie ograniczeń związanych ze współczynnikiem skalowania.

Rozprawa mgr Daniela Ruggiano została opracowana w sposób rzetelny i z dużą starannością. W tekście napotkałem jedynie pojedyncze drobne błędy edytorskie, co świadczy o tym, że praca została starannie zredagowana i poddana dokładnej korekcie.

Uwagi krytyczne

1. W rozdziale trzecim na początku przedstawiony został opis modelu hadronizacji opartego o mechanizm fragmentacji strun, chociaż na stronie 24 rozprawy Autorka wspomina również o alternatywnym modelu opartym na rozpadzie masywnych klastrów (model Webbera), który jest używany m.in. w generatorze HERWIG. Jednakże brak jest choćby skrótowego opisu modelu klastrów w tym rozdziale, chociaż, jak Autorka sama wskazuje w rozdziale piątym, odnosząc się do porównania danych eksperymentu ALICE z generatorem HERWIG (rys. 5.7 i rys. 5.8), generator HERWIG wydaje się o wiele lepiej opisywać rozkłady korelacji dla par barionów niż to jest w przypadku generatora PYTHIA.
2. W nawiązaniu do poprzedniej uwagi można postawić pytanie, dlaczego w omawianych w rozprawie analizach fizycznych nie użyto również generatora HERWIG do porównania z danymi eksperymentalnymi, zwłaszcza w przypadku funkcji korelacji dla par protonów w małych systemach zderzeń? Z porównań zamieszczonych w rozdziale piątym (rys. 5.8) wynika, że przewidywania generatora HERWIG zdają się lepiej opisywać efekt antykorelacji dla par barionów niż w przypadku generatorów opartych o mechanizm fragmentacji strun.
3. Wydaje się, że w rozdziale szóstym opis detektora ALICE został przedstawiony w sposób zbyt skrótowy, chociaż oczywiście bardziej szczegółowe informacje można znaleźć w podanych w tym rozdziale odnośnikach do literatury. Stosunkowo mało miejsca poświęcono przepływowi danych pomiarowych, systemowi wyzwalania, oprogramowaniu sterującemu czy też monitorującemu. Brak również choćby krótkiej informacji na temat planowanych modernizacji detektora ALICE, zwłaszcza w kontekście kontynuacji i/lub rozszerzenia analiz przedstawionych w rozprawie.
4. W rozdziale siódmym brak jest informacji na temat scałkowanej świetności dla użytych danych pp, p-Pb, Pb-Pb (nie można znaleźć informacji na ten temat również w rozdziale szóstym), czy też jaki był udział przypadków z więcej niż jednym oddziaływaniem, czyli tzw. *pile-up*. Autorka nie podaje na ogół, w jaki sposób optymalizowane były wartości cięć użytych w selekcji. W rozdziale tym brak jest opisu metody mieszania przypadków użytej do konstrukcji próbki referencyjnej. Oczekiwałbym podania m.in. informacji o tym, ile razy dana cząstka została użyta do mieszania, uzasadnienia przyjętych kryteriów mieszania pod względem krotności i położenia wierzchołka pierwotnego (z_{PV}), a także przedstawienia



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

wykresów kontrolnych porównujących rozkłady z_{PV} i krotności dla próbki referencyjnej z danymi sygnałowymi.

5. W rozdziałach ósmym oraz dziewiątym (np. rys. 8.1) pojawia się niezdefiniowany skrót VOM, natomiast w tabelach 8.1-9.1 Autorka nie podaje błędów na wartości średniej liczby cząstek produkowanych w przedziałach krotności (N_{av}). Na rysunkach 8.20, 8.21, 9.13, 9.14 pojawia się nigdzie niezdefiniowana paleta kolorów z prawej strony pod rozkładem funkcji korelacji w zakresie $\Delta\phi$ od ok. 2.0 rad do ok. 4.5 rad. Poza tym wydaje się, że praca zyskałaby na czytelności, gdyby zwiększony został rozmiar wykresów funkcji korelacji na rysunkach 8.4-8.9, 8.16-8.19, 8.26-8.31 oraz 9.1-9.12. Zarówno w rozdziale ósmym, jak i w rozdziale dziewiątym brakuje jasnego wytłumaczenia, dlaczego obserwowane niepewności na rozkładach funkcji korelacji skonstruowanej z wykorzystaniem definicji ilorazu prawdopodobieństw są generalnie o wiele mniejsze niż niepewności dla przeskalowanej funkcji korelacji (rys. 8.12-8.15, 8.22-8.25, 8.34-8.37), nawet biorąc pod uwagę odwrócone trendy dla wartości błędów w przypadku tych dwóch definicji funkcji korelacji, o czym Autorka wspomina np. w podrozdziale 8.2.2.

6. Jeśli chodzi o oszacowanie niepewności systematycznych opisanych w dodatku B recenzowanej rozprawy, nie jest do końca jasne, czy przyczynek związany z selekcją śladów obejmuje również niepewność systematyczną pochodzącą od efektu tzw. *track merging* (gdy dwa bliskie ślady zostają błędnie zrekonstruowane jako jeden) oraz efektu tzw. *track splitting* (gdy pojedynczy ślad zostaje błędnie zrekonstruowany jako dwa blisko siebie położone ślady). Jeśli przyczynek od wyżej wymienionych efektów został uwzględniony w niepewności związanej z selekcją śladów, to czy jest on znaczący w porównaniu z innymi przyczynkami do tej niepewności?

Recenzent zauważył jeszcze pewną liczbę drobnych błędów edytorskich, które jednak nie mają wpływu na zrozumienie tekstu rozprawy i dlatego nie zostały wymienione.

Podsumowując, uważam, że rozprawa doktorska mgr Danieli Ruggiano demonstruje bardzo ważny wkład Autorki w zrozumienie mechanizmów produkcji cząstek oraz natury oddziaływań silnych w różnych systemach wysokoenergetycznych zderzeń cząstek. Należy zauważyć, że przedstawione analizy wymagały bardzo dobrego opanowania warsztatu eksperymentalnego. Ponadto rozprawa zawiera wiele ogólnych informacji na temat zjawisk związanych z mechanizmem wielorodnej produkcji cząstek, stąd może służyć jako przegląd lub wprowadzenie do tej tematyki dla wszystkich, którzy chcą rozpocząć podobne badania.

Większość wymienionych uwag krytycznych nie dotyczy wartości merytorycznej rozprawy, a jedynie kwestii edytorskich lub preferencji recenzenta dotyczących opisu wybranych zagadnień ujętych w rozprawie. Wspominane w recenzji uwagi nie zmieniają mojej pozytywnej oceny rozprawy.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.

Prof. dr hab. Marcin Kucharczyk