

Recenzja pracy doktorskiej mgr Danieli Ruggiano zatytułowanej:

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

1. Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Politechniki Warszawskiej. Podstawa prawna: art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (z późn. zm.). Recenzję przygotowano korzystając ze szczegółowych wytycznych sformułowanych w zleceniu.

2. Charakterystyka i opis rozprawy

Przedmiotowa rozprawa doktorska dotyczy jednego z aktualnych i trudnych zagadnień we współczesnej fizyce cząstek: tzw. „zagadki korelacji barionowych” w zderzeniach proton-proton (pp), proton-ołów (p-Pb) oraz ołów-ołów (Pb-Pb) zarejestrowanych w eksperymencie ALICE przy energiach osiąganych w akceleratorze LHC (Large Hadron Collider) w CERN. Autorka skupia się na analizie kątowych korelacji dwucząstkowych, wyodrębniając różnice w zachowaniu się barionów (protonów) i mezonów (pionów i kaonów).

Badanie korelacji kątowych jest jednym z najskuteczniejszych narzędzi do tego celu, otwierając możliwości badania zjawisk fizycznych, takich jak mini-dżety, statystyki kwantowe Bosego-Einsteina i Fermiego-Diraca oraz różnorodne prawa zachowania, które same w sobie stanowią podstawę mechanizmu produkcji barionów w zderzeniach relatywistycznych jonów. Wyniki eksperymentalne dla zderzeń pp przy energii $\sqrt{s} = 7$ TeV ujawniły antykorelacje w rozkładach wyprodukowanych cząstek, które stanowią wyzwanie dla istniejących modeli Monte Carlo. Ta obserwacja doprowadziła do pojawienia się tzw. „zagadki korelacji barionów”. Autorka w swojej pracy doktorskiej dodała nowy element do zagadki korelacji barionów, analizując zachowanie antykorelacji, a także porównując funkcje korelacji mezonów.

Praca charakteryzuje się interdyscyplinarnym podejściem obejmującym zaawansowaną analizę danych eksperymentalnych, oraz symulacje Monte Carlo. Metodyka jest adekwatna do postawionego problemu i odznacza się wysokim poziomem zaawansowania. Autorka prezentuje znajomość tematyki fizyki cząstek oraz nowoczesnych metod analizy danych eksperymentalnych.

Pierwszy kontakt z pracą pokazuje wielką staranność, z jaką została ona przygotowana, a także jej dużą objętość. Rozprawa ma 254 strony, nie wliczając stron wprowadzających. Główna część rozprawy jest podzielona na jedenaście rozdziałów i dwa dodatki. Pierwsze trzy rozdziały stanowią odpowiednio: wprowadzenie do rozprawy, wprowadzenie do fizyki zderzeń ciężkich jonów w relatywistycznym zakresie energii i opis generatorów Monte Carlo (PYTHIA, EPOS, DPMJET,

HIJING, AMPT oraz CALM) użytych w opisanej później analizie. Wskazano różne mechanizmy produkcji cząstek w nich uwzględniane (m.in. rozrywanie strun, interakcje wielopartonowe, zjawisko tzw. colour reconnection). Omówiono ich przydatność w opisie obserwowanych w eksperymencie korelacji i porównaniu z danymi eksperymentalnymi.

Cel pracy został wyraźnie zdefiniowany w rozdziale pierwszym i polega na:

- a) zbadaniu natury antykorelacji barionów (protonów),
- b) porównaniu tych korelacji z korelacjami mezonów (pionów, kaonów),
- c) sprawdzeniu, w jakim stopniu różne modele Monte Carlo oddają zarejestrowane zależności kątowe.

Cel ten jest zgodny z potrzebami fizyki eksperymentalnej wysokich energii i stanowi istotny wkład w rozwój wiedzy o produkcji barionów. Jest ambitny, ale możliwy do zrealizowania dzięki dużym zbiorom danych eksperymentu ALICE. W mojej ocenie sformułowanie i uzasadnienie celu jest przekonujące i odnosi się do kluczowych problemów współczesnej fizyki cząstek.

Czwarty rozdział pracy jest metodologiczny, w którym autorka precyzuje czym jest kąt azymutalny, pseudospieszość, a także jak definiuje funkcje korelacji dwuczastkowych w przestrzeni $\Delta\eta$ i $\Delta\phi$. Przedstawiono dwie kluczowe definicje funkcji korelacji: standardową (tzw. ilorazu prawdopodobieństw) oraz alternatywną, przeskalowaną funkcję korelacyjną, która eliminuje pewne artefakty skalowania w zależności od liczby cząstek w zdarzeniu.

W rozdziale piątym autorka szczegółowo wprowadza czytelnika rozprawy w z tak zwany „baryon correlation puzzle”, opisując wyniki wcześniejszych eksperymentów (m.in. ALICE), w których zaobserwowano nieoczekiwane antykorelacje dla par proton-proton. Wskazuje, że pomimo kilku zaproponowanych rozwiązań, wciąż brakuje wyjaśnienia dostatecznie dobrze opisującego zjawisko w pełnym zakresie kinematycznym. Ten rozdział sygnalizuje, gdzie pojawiają się nowe, oryginalne wyniki: autorka będzie rozwijać dotychczasowe analizy o dodatkowe typy par cząstek i różne warunki (m.in. różne klasy krotności w zderzeniach pp, p-Pb, Pb-Pb).

W szóstym rozdziale pracy szczegółowo opisano kluczowe detektory używane w eksperymencie ALICE: V0 (do wyznaczania centralności), ITS (wewnętrzny układ śledzący), TPC (komora projekcji czasowej) i TOF (pomiar czasu przelotu). Omówiono techniki identyfikacji cząstek: zależność dE/dx (pomiar strat energii) w TPC, pomiar czasu lotu w TOF, a także procesy kalibracji i rekonstrukcji śladów.

W siódmym rozdziale autorka przedstawia kryteria selekcji zdarzeń (np. wymogi jakościowe i geometryczne), kryteria selekcji śladów (np. akceptancja detektorów w przestrzeni pędu poprzecznego) oraz techniki łączenia cząstek w pary (z uwzględnieniem tzw. $\Delta\phi^*$ minimalizującego wpływ efektów pola magnetycznego). W tej części zawarte są także procedury wyznaczania czystości i efektywności identyfikacji cząstek, a także charakterystyka metod korekcji tła, co stanowi fundament rzetelnej analizy korelacyjnej.

Znaczna część wyników przedstawionych w rozprawie doktorskiej ma status „ALICE preliminary”, co oznacza, że uzyskały aprobatę współpracy ALICE i jako takie mogą być przedstawiane na konferencjach naukowych. Świadczy to dodatkowo o wysokim poziomie przeprowadzonej analizy. Autor niniejszej recenzji zdaje sobie sprawę z tego jak trudno jest uzyskać taką aprobatę, szczególnie

w dużej, międzynarodowej współpracy. Z informacji zawartych w rozprawie oraz z typowej praktyki kolaboracji ALICE wynika, że wyniki uzyskane przez autorkę były prezentowane na międzynarodowych konferencjach poświęconych fizyce wysokich energii, gdzie członkowie ALICE regularnie omawiają najnowsze rezultaty. Niektóre fragmenty pracy zostały już opublikowane w formie artykułów zbiorowych (ALICE Collaboration) w renomowanych czasopismach, takich jak Physical Review C, Physics Letters B, co potwierdza wartość naukową wyników. Autorka w rozprawie odwołuje się do tych publikacji, pokazując spójność analiz i rozwój własnych badań.

3. Nowe rezultaty zawarte w rozprawie

Prezentacja nowych wyników rozpoczyna się w rozdziale ósmym, gdzie zaprezentowano wyniki dla zderzeń pp i p–Pb. Szczegółowo opisano, jak zmieniają się profile korelacyjne (zarówno dla barionów, jak i mezonów) w zależności od klasy krotności – od tzw. układów mało zanieczyszczonych (niska krotność) po ekstremalnie wysokie. Wskazano, gdzie pojawiają się dodatnie lub ujemne piki korelacyjne (antykorelacje).

W kolejnym rozdziale autorka podejmuje próbę rozciągnięcia podobnych analiz na zderzenia ciężkich jonów (ołów-ołów). Wskazuje na większą rolę efektów kolektywnych (np. przepływ eliptyczny) i pokazuje, jak wpływają one na obserwowane funkcje korelacji.

W dziesiątym rozdziale autorka podsumowuje kluczowe, jej zdaniem, różnice między małymi a dużymi systemami zderzeń. Wskazuje, że w pewnych przedziałach pędu poprzecznego, a także w określonych zakresach kąta azymutalnego, zachowania korelacyjne w zderzeniach pp mogą zaskakująco przypominać te obserwowane w zderzeniach Pb–Pb.

W rozdziale jedenastym następuje końcowa synteza wyników. Autorka formułuje wnioski co do perspektyw ulepszenia modeli Monte Carlo, akcentując potrzebę dalszych badań nad „baryon correlation puzzle”.

Całość pracy jest spójna, a autorka wskazuje na osiągnięte rezultaty. Szczególnie w rozdziałach: piątym, ósmym i dziewiątym widać wyraźnie wkład własny doktorantki w postaci nowych wyników i ich interpretacji związanych z antykorelacjami barionowymi.

Metody badawcze, które autorka stosuje w rozprawie obejmują:

- a) analizę korelacji dwucząsteczkowych – kluczowy element, pozwalający oddzielić różnorodne efekty (m.in. zachowanie się dżetów, zasadę zachowania pędu, wpływy efektów kwantowych),
- b) zastosowanie dwóch definicji funkcji korelacji: standardowej (tzw. „probability ratio”) oraz przeskalowanej (wykluczającej sztuczne efekty zależne od liczby śladów w zdarzeniu),
- c) wykorzystanie zaawansowanej identyfikacji cząstek w detektorach ALICE (TPC, TOF), co jest konieczne dla wyodrębnienia protonów, kaonów, pionów z wysoką czystością,
- d) rygorystyczne kryteria selekcji zdarzeń i śladów, m.in. na jakość rekonstrukcji śladu, minimalizację efektów pola magnetycznego, ograniczenie par pozornych),
- e) porównanie z kilkoma modelami Monte Carlo (PYTHIA, EPOS etc.) – umożliwia krytyczną ocenę, w jakim stopniu obecne modele opisują zagadkę korelacji barionowych.

Metody są nowoczesne i adekwatne do skali problemu. Dzięki przeskalowanej definicji funkcji korelacji autorka eliminuje część artefaktów, jakie w standardowym podejściu utrudniają analizę dla różnych

klas krotności. Oceniam, że całość metodologii jest przemyślana i świadczy o kompetencji doktorantki w planowaniu i przeprowadzaniu analizy danych eksperymentu fizyki wysokich energii.

Wyniki uzyskane przez autorkę zostały zaprezentowane w rozdziałach ósmym, dziewiątym i dziesiątym rozprawy, a dodatkowo w załącznikach zamieszczono szczegółowe tabele i obrazy. Najważniejsze elementy to:

- a) korelacje barionowe w zderzeniach pp: autorka przedstawiła, w jakim zakresie $\Delta\eta$ i $\Delta\phi$ pojawiają się antykorelacje, i jak różnią się one od korelacji mezonów,
- b) analiza zderzeń p–Pb: omówiono różnice i podobieństwa względem układu pp – co ciekawe, w pewnych klasach krotności występują podobne trendy antykorelacyjne,
- c) system Pb–Pb: analiza wskazuje na silniejszy wkład efektów kolektywnych (tzw. ridge, przepływ harmoniczny), co modyfikuje kształt funkcji korelacji,
- d) wielość porównań z modelami: ukazuje systematyczne rozbieżności względem powszechnie używanych generatorów (zwłaszcza PYTHIA), co podkreśla skalę wyzwania w opisie antykorelacji barionów.

Opis jest bogato ilustrowany wykresami 2D (Δy vs. $\Delta\phi$) oraz ich projekcjami 1D, z naniesionymi niepewnościami statystycznymi i systematycznymi. Zawarto również dyskusję, co do możliwych przyczyn rozbieżności pomiędzy symulacjami a danymi. Ta część jest zdecydowanie największym atutem rozprawy, gdyż prezentuje oryginalne rezultaty i odważnie konfrontuje je z teorią.

Bibliografia zawarta w rozprawie jest obszerna i adekwatna do tematyki pracy. Zawiera zarówno pozycje teoretyczne (dotyczące QCD i modeli produkcji cząstek), jak i artykuły eksperymentalne (głównie z eksperymentu ALICE, ale też innych eksperymentów LHC, np. CMS, ATLAS). Sporo odwołań pochodzi z recenzowanych czasopism (Physical Review C, Journal of High Energy Physics, Physics Letters B etc.) i stanowi aktualny stan wiedzy w dziedzinie.

W dziedzinie fizyki wysokich energii „praktyczne zastosowanie” ma nieco inny wymiar niż w inżynierii, niemniej:

- a) uzyskane wyniki mają duże znaczenie dla rozwoju modeli teoretycznych. W szczególności, jeżeli modele nadal nie potrafią oddać obserwowanych antykorelacji barionów, oznacza to konieczność rewizji pewnych założeń (np. procesów hadronizacji, przebiegu reintegracji kolorów),
- b) dalsze badania w tym kierunku mogą wpływać na interpretację danych z LHC i pomóc w bardziej precyzyjnym określaniu warunków początkowych zderzenia, co ma pośrednie znaczenie w szerszych zastosowaniach, np. w modelowaniu kosmologicznym.

Rozprawa doktorska pani Danieli Ruggiano może stanowić cenny punkt odniesienia przy rozwijaniu uniwersalnych generatorów zdarzeń Monte Carlo oraz przy formułowaniu przyszłych pytań eksperymentalnych i teoretycznych.

4. Uwagi krytyczne

- i) Brak pełnej interpretacji antykorelacji. Choć autorka rzetelnie opisuje obserwowane antykorelacje proton-proton, nie dokonuje ostatecznej identyfikacji mechanizmu

fizycznego. Jest to zrozumiałe z uwagi na złożoność problemu i niedoskonałość istniejących modeli, niemniej w recenzji należy to odnotować.

- ii) Rozszerzona analiza systematyczna. Praca zawiera wprawdzie rozdziały poświęcone niepewnościom (załączniki), jednak pewne aspekty (np. wpływ rekonstrukcji śladów w warunkach dużej gęstości cząstek) można by omówić nieco bardziej szczegółowo.
- iii) W jaki sposób realizowane są zasady zachowania pędu i energii w modelu CALM?
- iv) Na stronie 38 rozprawy autorka pisze: „The difference in pseudorapidity, $\Delta\eta = \eta_1 - \eta_2$, represents the longitudinal separation between two particles.” W jakiej przestrzeni: koordynacyjnej czy pędowej?
- v) W Eq. (4.2) jest pomyłka. Brakuje czynnika „1/2” przed funkcją logarytm.
- vi) Dlaczego autorka zdecydowała się na wybór klasy centralności „0-0.017%”. Z czego wynika wartość 0.017%?
- vii) Na rys. 8.1 brakuje jednostki dla pędu poprzecznego.
- viii) Wiele rysunków, np. 7.3, A.2-A.7, B.1-B.8 ze względu na swoje rozmiary jest mało czytelna, w szczególności jeżeli do czytania używana jest wydrukowana wersja rozprawy.
- ix) W tabelach 8.1, 8.2 wypisane są wartości średnich krotności dla pionów, kaonów i protonów wyprodukowanych w zderzeniach pp bez podania ich niepewności. Podobnie w tabeli 8.3 dla zderzeń p-Pb i tabeli 9.1 dla zderzeń Pb-Pb. Jak można wyjaśnić duże różnice pomiędzy wartościami zmierzonymi w opisywanej w rozprawie analizie a danymi „dostępnymi publicznie”? Na przykład dla pionów wyprodukowanych w zderzeniach pp w zakresie centralności 70-80% jest to $0.88/1.33=66\%$.
- x) Jak duże jest zanieczyszczenie próbki zidentyfikowanych (wyprodukowanych) protonów w zderzeniach Pb-Pb przez protony pochodzące z wiązki?
- xi) Autorka na stronie 125 rozprawy pisze o trzynastu klasach centralności. W rozprawie nie znalazłem ani jednego rysunku czy tabeli, w którym pokazano rezultaty dla wszystkich trzynastu klas.
- xii) Na stronie 197 rozprawy autorka pisze: „These values were sourced from the literature [131, 136, 137] for each collision system and adjusted to match the multiplicity or centrality classes used in the three analyses.” Na czym polegała procedura „dostosowywania (adjustment)” krotności?

5. Wniosek końcowy

Drobne krytyczne uwagi wymienione powyżej nie wpływają na moją pozytywną opinię na temat rozprawy doktorskiej pani Danieli Ruggiano. Z całą pewnością praca jest oryginalna i stanowi wkład w rozwiązanie problemu naukowego związanego z „baryon correlation puzzle”. Argumenty za oryginalnością:

- a) po raz pierwszy w eksperymencie ALICE tak szeroko przeanalizowano jednocześnie pary barion-barion, barion-antybarion, mezon-mezon przy użyciu dwóch definicji funkcji korelacji oraz w różnych klasach krotności. Autorka zestawia dane z trzech systemów zderzeniowych

(pp, p–Pb, Pb–Pb), co pozwala uzyskać pełniejszy obraz zjawiska – wcześniejsze publikacje skupiały się na pojedynczym układzie,

- b) w rozprawie wykazano braki modeli MC i zasugerowano konieczność rozwinięcia teorii produkcji barionów.

Z analizy tekstu rozprawy wynika, że autorka wykazuje się dobrą znajomością fizyki relatywistycznych zderzeń jądrowych oraz swobodnie porusza się w zagadnieniach QCD, termodynamiki i kinetyki cząstek, co jest niezbędne w tej dziedzinie. Dodatkowo:

- a) samodzielne opracowanie zaawansowanych procedur selekcji i korekcji danych świadczy o umiejętności prowadzenia analizy w warunkach złożonego eksperymentu,
- b) umiejętność stosowania różnych generatorów zdarzeń i krytyczna ich ocena (rzetelne porównanie wyników) dowodzą kompetencji w łączeniu podejść teoretycznych z analizą doświadczalną.

Niewątpliwie pani Ruggiano wykazała się zdolnością do prowadzenia pracy naukowej na wysokim poziomie. Rozprawa jest merytorycznie dojrzała, dobrze uargumentowana i napisana w sposób przystępny, mimo iż dotyczy skomplikowanego zagadnienia z pogranicza QCD i fizyki eksperymentalnej. Zawiera oryginalne wyniki, ukazujące nową perspektywę na antykorelacje barionów i pokazujące braki istniejących modeli. Zaprezentowana metodologia zarówno w obszarze analiz doświadczalnych, jak i symulacji stoi na wysokim poziomie.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określonej 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.