INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Kraków, 06.11.2024

Prof. dr hab. Mariusz Witek
Instytut Fizyki Jądrowej PAN
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Aleksandra Kevina Gilberta pod tytułem
„Correlations between harmonic flow and transverse momentum in pp and p+Pb collisions at the LHC with the ATLAS detector"

Pan Aleksander Kevin Gilbert przedstawił rozprawę doktorską dotyczącą analizy korelacji przepływu harmonicznego dla wysokoenergetycznych zderzeń proton-proton oraz proton-ołów zebranych w eksperymencie ATLAS na akceleratorze LHC.

Badania sygnatur plazmy kwarkowo-gluonowej (QGP) prowadzone są już od wielu lat. W dedykowanych projektach takich jak Relativistic Heavy Ion Collider zrealizowanym w ośrodku Brookhaven oraz eksperymentach na zderzaczu LHC w ośrodku CERN zaobserwowano znaczącą anizotropię azymutalną w produkcji cząstek w zderzeniach relatywistycznych ciężkich jonów. Analizy danych z przeprowadzonych eksperymentów wskazują na mechanizm formowania się plazmy kwarkowo-gluonowej i jej ewolucji zgodnej z charakterystyką niemalże idealnej cieczy. Opracowane modele hydrodynamiczne dla dużych systemów formowanych w zderzeniach ciężkich jonów dość dobrze odtwarzają trendy z danych eksperymentalnych. Dużym zaskoczeniem okazały się wyniki dla zderzeń proton-jon lub nawet proton-proton, w których zaobserwowano cechy kolektywnej ekspansji typowej dla fazy plazmy kwarkowo-gluonowej. Rozwinięto metody mające na celu wyjaśnienie tego mechanizmu. W szczególności, aby zbadać wpływ innych efektów poza hydrodynamicznym modelem na sygnatury obserwowane w stanie końcowym zastosowano analizę przepływu harmonicznego za pomocą współczynników korelacji parametrów przepływu harmonicznego z uśrednionym pędem poprzecznym przepływu.

Centralnym zagadnieniem analizy zaprezentowanej w rozprawie doktorskiej było zbadanie źródeł sygnatur formacji plazmy kwarkowo-gluonowej w zderzeniach proton-proton i proton-jon i porównanie wyników z eksperymentu ATLAS z przewidywaniami modeli teoretycznych. W tym celu Autor wykorzystał metodę zastosowaną we wcześniejszej analizie eksperymentu ATLAS dla zderzeń ołów-ołów w celu porównania charakterystyk dla dużych i małych systemów oraz w celu sprawdzenia zgodności z przewidywaniami generatorów przypadków zderzeń takich jak PYTHIA czy HIJING. Ważnym elementem pracy jest próba identyfikacji mechanizmów niezwiązanych bezpośrednio ze zjawiskiem formacji QGP a mogących prowadzić do korelacji w rozkładach przepływu harmonicznego charakterystycznego dla produkcji QGP.

Rozprawa napisana jest w języku angielskim, liczy 149 stron i składa się z siedmiu rozdziałów, czterech dodatków oraz bibliografii liczącej 198 referencje. Praca napisana jest starannie. Konstrukcja pracy jest odpowiednia, w szczególności podział informacji pomiędzy głównym tekstem w rozdziałach 1-7 i dodatkami A-D jest dobrze zbalansowana a odnośniki do bogatej bibliografii pozwalają na szersze zapoznanie się z opisywanymi zagadnieniami. Pewna liczba błędów w pisowni nie utrudnia zrozumienia tekstu. Dobór wielkości rysunków jest daleki od optymalnego. Rozmiar dużej liczby rysunków jest zbyt mały powodując trudności z czytelnością opisów osi czy legend. Oczywiście w niektórych przypadkach takich jak grupowanie rysunków dla różnych wariantów w celu łatwiejszego porównania (rodzaje wiązek, energia wiązek, kryteria selekcji) zastosowanie niewielkiego rozmiaru rysunków składowych jest uzasadnione, ale dla szeregu rysunków wskazanym byłoby zastosowanie większego rozmiaru oraz zwiększenie czcionki dla opisów osi i legend. Ułatwiłoby to znacznie porównanie rozmaitych rozkładów w wersji drukowanej bez konieczności wyświetlania wersji elektronicznej na monitorze o odpowiednio dużych rozmiarach. W szczególności dla grup składających się z trzech rysunków takich jak Rys 2.11, 3.7, 6.5 czy 6.6 można było zastosować większy rozmiar oraz układ 2+1. Większość pojedynczych lub podwójnych rysunków mogłaby mieć trochę większy rozmiar lub większe opisy osi lub legend (np. 2.13, 3.2, 3.3, 3.14).

W pierwszym rozdziale Autor zamieścił informacje ogólne, gdzie można znaleźć zwyczajowe przedstawienie podstaw Modelu Standardowego z uwzględnieniem elementów kwantowej chromodynamiki, podstawowe informacje dotyczące plazmy kwarkowo-gluonowej, charakterystykę zderzeń jon-jon, wprowadzenie definicji przepływu harmonicznego, elementy modeli hydrodynamicznych, przegląd pokrewnych wyników dotyczących badanych współczynników korelacji oraz porównań z przewidywaniami modeli teoretycznych. Uważam, że te wstępne informacje są dobrze dobrane i właściwie przygotowują czytelnika do lektury kolejnych rozdziałów.

W kolejnym rozdziale znajdujemy opis infrastruktury akceleratorów w CERN oraz detektora ATLAS, z którego pochodzą dane wykorzystane w analizie. Opisane są w skrócie najważniejsze podsystemy detektora. Na końcu rozdziału zamieszczony jest szerszy opis istotnego elementu, systemu wyzwalania, istotnego ze względu na wymaganie dobrej kontroli zniekształceń wprowadzanych przez wybór przypadków w fazie online. Zastosowano algorytmy charakteryzujące się minimalnym wpływem na rozkłady istotne dla analizy korelacji, selekcje „minimum bias". Autor wniósł między innymi wkład w opracowanie jednego z algorytmów w sekwencji systemu wyzwalania do wyznaczania krotności cząstek naładowanych pochodzących z wierzchołków dla przypadków z wieloma oddziaływaniami w jednym przecięciu wiązek.

W rozdziale 3 znajdujemy opis kolejnych kroków analizy danych prowadzących do końcowych wyników oraz oszacowań niepewności pomiarowych. Przedstawiono sposób wyznaczania wag dla zrekonstruowanych śladów, poprawek na niewydajności detektora, odwikływanie liczby cząstek na podstawie liczby śladów zrekonstruowanych. Przedstawiono także definicję dedykowanego współczynnika korelacji przepływu eliptycznego i

uśrednionego pędu poprzecznego oraz zdefiniowano podział na podgrupy śladów (tzw. *subevents*).

W rozdziale zatytułowanym „Data, Event, And Track Selection" opisano użyte próbki danych oraz próbki Monte Carlo. Przedstawiono selekcję online i offline wraz z dyskusją o zniekształceniach związanych z wyborem śladów mających wpływ na końcowe wyniki oraz przedstawiono zgodność danych i symulacji dla kluczowych dla analizy rozkładów.

Rozdział piąty dotyczy wyznaczania niepewności statystycznych i systematycznych. Ze względu na charakter obserwabli, które wyznaczane są za pomocą sumowania i śrędniowania po kombinacjach śladów, wybór metody do wyznaczania niepewności statystycznych bazujących na metodzie Bootstrap uważam za właściwy a jej implementacje uwzględniającą korelacje za poprawną. Analiza niepewności systematycznych obejmuje najistotniejsze elementy związane z rekonstrukcją i selekcją śladów oraz znajomością materiału oraz niewydajnych obszarów detektora.

Wyniki opisane są obszernie w rozdziale „Results" na 26 stronach. Zawierają rozkłady zarówno obserwabli pośrednich na bazie których obliczany jest dedykowany współczynnik korelacji jak i rozkłady samego współczynnika korelacji w funkcji liczby cząstek naładowanych. Rozkłady prezentowane dla różnych zakresów pędów poprzecznych śladów są porównywane dla różnych wiązek i energii zderzeń oraz różnych wariantów wyznaczania współczynnika korelacji (1-,2- i 3-*subevent*). Autor szczegółowo omawia obserwowane trendy i wskazuje na zaobserwowane prawidłowości. Ważną częścią tego rozdziału jest porównanie z przewidywaniami generatorów fizycznych i próba wyodrębnienia wkładów do korelacji niezwiązanych z przepływem hydrodynamicznym. Zbadano także wpływ modelowania efektów „color reconection" i efektów rozpadów rezonansowych. Rozdział ten jest dobrze zilustrowany rysunkami a trendy zaobserwowane w danych szczegółowo opisane.

W załącznikach A-D można znaleźć szczegółowe wzory, według których obliczane są obserwable oraz dodatkowe informacje dotyczące wyznaczania niepewności systematycznych.

Badanie plazmy kwarkowo-gluonowej formowanej w zderzeniach relatywistycznych jonów nie jest zadaniem łatwym. O skomplikowanych kwantowych procesach wielociałowych wnioskujemy na podstawie analizy stanu końcowego, często składającego się z setek cząstek wyprodukowanych w zderzeniu. Modele teoretyczne starające się wyjaśnić mechanizm zachodzących procesów oraz naturę uformowanej plazmy kwarkowo-gluonowej wykorzystują wiedzę zdobytą przy badaniu bardziej elementarnych procesów oraz korzystają z założeń modeli hydrodynamicznych. Ostatecznym sprawdzianem jest oczywiście zgodność z wynikami eksperymentów. Praca doktorska zawiera wartościowe wyniki, z których można uzyskać informacje o zjawiskach zachodzących w mniejszych systemach formowanych w wyniku zderzeń proton-proton i proton-ołów. Ma to duże znaczenie wobec faktu obserwacji sygnatur w mniejszych systemach a spodziewanych jedynie przy produkcji plazmy kwarkowo-gluonowej w dużych systemach. Mechanizm formowania i ewolucji małych systemów ciągle pozostaje zagadką. Bogaty zestaw wyników, w tym pomiarów pośrednich

obserwabli może stanowić materiał do porównań z przewidywaniami modeli i wskazówki do ich udoskonalenia.

Wkład Autora w prezentowaną analizę oraz w aktywność wynikającą z obowiązków wobec współpracy ATLAS jest wyraźnie zaznaczona w dedykowanym podrozdziale „List of contributions". Autor korzystał z doświadczeń podobnej analizy wykonanej dla zderzeń ołów-ołów. Posłużył się rozwiniętymi do tego celu narzędziami oraz standardowymi instrumentami analizy eksperymentu ATLAS. Autor wykazał się zrozumieniem specyfiki próbek danych użytych w analizie oraz przeprowadził wszystkie kroki skomplikowanej technicznie analizy co wymagało dobrego opanowania narzędzi programistycznych. Za bardzo wartościowy wkład uważam porównanie z generatorami fizycznymi oraz dyskusję zarówno zgodności przewidywań z wynikami z eksperymentu jak i rozbieżności. Autor wykazał się dobrą znajomością wewnętrznych implementacji procesów w tych generatorach. Analiza przeprowadzona została z zachowaniem wysokich standardów wypracowanych w ramach współpracy ATLAS i znajduje się obecnie w fazie wewnętrznej recenzji tej współpracy. Wszystko to świadczy o dojrzałości naukowej Doktoranta pozwalającej na samodzielne prowadzenie pracy naukowej.

Oprócz wspomnianych błędów edytorskich oraz nieoptymalnego doboru wielkości rysunków można wskazać na kilka niejasnych fragmentów i pewnych uchybień rozprawy:

- Rozdział 3.1. Zdanie w pierwszym paragrafie, "The simulations and Then, the MC samples undergo the detector simulation which includes the event selections by the trigger systems and the track reconstruction." jest niezrozumiałe.
- Można zauważyć pewną niejasność w użyciu symbolu N_{tracks}. Pojawia się on w różnych kontekstach w pracy: kontekst offline w rozdziale 3.1, kontekst online w rozdziałach 2.2.5 i 4.2. Ponadto N_{tracks} i N_{trk} używane są wymiennie a nie jest to wprost zaznaczone w tekście. Dla tematyki pracy krotność przypadku ściśle związana ze zmienną N_{tracks} ma zasadnicze znaczenie. Jasna definicja N_{tracks} w momencie pierwszego odniesienia w pracy wraz z krótką informacją o algorytmach rekonstrukcji śladów prowadzących do jej wyznaczenia oraz konsystentne używanie symbolu N_{tracks} zapobiegłoby potencjalnym niejasnościom.
- Rozdział 5.2. W drugim punkcie listy na stronie 67, dotyczącym efektu związanego z niepewnością wyznaczenia wydajności śladów, zakłada się pięcioprocentową zmienność. Czy wybór wartości 5% ma głębsze uzasadnienie? Wydaje się, że wydajności rekonstrukcji śladów są znane z mniejszą niepewnością. Przypuszczalnie odpowiedz na to pytanie może znajdować się w cytowanych referencjach nr 193 i 194, ale są one niedostępne dla osób spoza współpracy ATLAS.
- Rozdział 6.6, Rysunek 6.23. Nie jest jasno wytłumaczone w jaki sposób można wyliczyć obserwable korelacyjne i ich zależność od liczby cząstek naładowanych w przypadku, gdy wyprodukowane w generatorze rezonanse nie ulegają rozpadowi.

- Praca zyskałaby na wartości, gdyby zawierała głębsze porównanie z wynikami wcześniejszej analizy z eksperymentu ATLAS dla zderzeń ołów-ołów i próba wyciągnięcia wniosków dotyczących sygnatur w małych i dużych systemach.
- Referencja nr 187 jest niedostępna publicznie.
- W kilku miejscach pracy pojawia się informacja dotycząca fazy Run 3 (np. w podrozdziale „Minimum Bias Trigger Scintilator", HMT trigger). W opisie danych wykorzystanych w analizie mowa jest jedynie o danych z fazy Run 2 zebranych w latach 2015-2107. Nie jest jasne czy dane z fazy Run 3 były w jakiś sposób wykorzystywane.

Te niewielkie uchybienia nie wpływają na moją pozytywną ocenę rozprawy.

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.

Mariusz Witek