

dr hab. Maciej Rybczyński

Kielce, grudzień 2014 roku

Instytut Fizyki

Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach

25-406 Kielce ul. Świętokrzyska 15

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr Małgorzaty Anny Janik

pod tytułem

“Two-particle correlations as a function of relative azimuthal angle  
and pseudorapidity in proton-proton collisions registered by the ALICE experiment”

Rozprawa doktorska pani mgr Małgorzaty Anny Janik została wykonana pod kierunkiem prof. nzw. dr. hab. inż. Adama Kisiela na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej. Dotyczy analizy korelacji dwucząstkowych zarejestrowanych przez eksperyment ALICE przy Wielkim Zderzaczu Hadronów LHC w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN. Analiza została oparta o dane eksperymentalne zebrane w 2010 roku w zderzeniach wiązek proton-proton przy energiach  $\sqrt{s} = 0.9, 2.76$  i 7 TeV.

Dwucząstkowe korelacje kątowe są bogatym źródłem informacji o produkcji cząstek w wysokoenergetycznych zderzeniach hadronów. Korelacje kątowe umożliwiają przekrojową analizę wielu fizycznych źródeł, między innymi korelacji „minidżetów”, korelacji wynikających ze statystyki kwantowej Bosego-Einsteina, zasad zachowania obowiązujących w systemie powstałym w trakcie zderzenia, czy rozpadów rezonansów.

W swojej rozprawie doktorskiej mgr Małgorzata Anna Janik zaprezentowała pomiary korelacji kątowych w funkcji względnego kąta azymutalnego i względnej pseudopospieszności pary cząstek, zmierzone przy użyciu detektora ALICE w zderzeniach proton-proton. Szczegółowa obserwacja umożliwiła scharakteryzowanie wielu aspektów źródeł korelacji. Praca doktorska pani mgr Małgorzaty Anny Janik została zrealizowana w ramach udziału autorki w jednym z najbardziej istotnych przedsięwzięć eksperymentalnych ostatnich lat, we współpracy z międzynarodową grupą badawczą. Warto podkreślić, że w przedstawionej rozprawie korelacje dwucząstkowe analizowane były, po raz pierwszy dla danych zebranych przy LHC, w zależności od energii zderzenia, liczby cząstek naładowanych wyprodukowanych w zderzeniu i sumy pędów poprzecznych par cząstek, dla różnych kombinacji ładunku elektrycznego cząstek wchodzących w skład pary. Ponadto, przeprowadzono unikalną analizę zidentyfikowanych cząstek, pionów, kaonów i protonów oraz rozwinięto procedury dopasowywania eksperymentalnych funkcji korelacyjnych funkcjami wielu zmiennych. Cząstkowe rezultaty badań będących przedmiotem pracy zostały dotychczas opublikowane w czterech pracach konferencyjnych, pozycje [1-4] ze spisu literatury.

Praca doktorska pani mgr Małgorzaty Anny Janik jest napisana w języku angielskim i została poddana starannej edycji zarówno pod względem graficznym jak i językowym. Praca liczy niemal 250 stron tekstu wraz z ilustracjami i składa się z dziesięciu rozdziałów oraz czterech dodatków. Zawiera kilkadziesiąt rysunków i tabel oraz obszerny spis literatury, składający się z 235 pozycji. Trzy pierwsze rozdziały mają charakter wprowadzający. W krótkim rozdziale pierwszym autorka zwięźle charakteryzuje cele pracy. Rozdział drugi zawiera wprowadzenie do niektórych aspektów fizyki wysokich energii, istotnych dla treści przedstawionych w kolejnych rozdziałach. Autorka dużo uwagi poświęca narzędziom Monte Carlo, stosowanym w swojej analizie do generowania rozkładów, które później porównuje z rozkładami uzyskanymi w eksperymencie. W rozdziale trzecim zdefiniowano wielkości fizyczne używane w rozprawie do opisu korelacji dwucząstkowych, przedstawiono historyczną perspektywę pomiarów korelacyjnych w fizyce wysokich energii oraz opisano możliwe źródła dające wkład do wyznaczanych dwucząstkowych funkcji korelacyjnych. Autorka podaje tu liczne odnośniki do bogatej literatury dotyczącej fluktuacji i korelacji w wysokoenergetycznych zderzeniach hadronów i jąder atomowych. W rozdziale czwartym przedstawiony jest detektor ALICE. Opisano wszystkie jego elementy, najwięcej uwagi poświęcając elementom, które są istotne w procesie gromadzenia danych i przeprowadzenia analizy zawartej z rozprawie. Rozdziały 5-8 stanowią rdzeń pracy i opisują w precyzyjny sposób analizę danych ALICE wykonaną przez autorkę. Rozdział piąty zawiera szczegóły techniczne kryteriów dotyczących wyboru przypadków zderzeń oraz śladów cząstek w tych przypadkach, które używane są do analizy danych eksperymentalnych. Rozdziały: szósty, siódmy i ósmy zawierają opis metody pozwalającej otrzymać eksperymentalne funkcje korelacyjne wraz z poprawkami usuwającymi pewne niepożądane efekty oraz wyniki eksperymentalne otrzymane przez autorkę rozprawy wraz ze szczegółowym omówieniem możliwych źródeł niepewności systematycznych, pozwalającym na ich oszacowanie ilościowe. W rozdziale siódmym część rysunków została oznaczona jako „ALICE preliminary”. Wyniki, które są na nich pokazane 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. W rozdziale dziewiątym autorka podaje pewną interpretację otrzymanych przez siebie wyników opierając się na ich porównaniu z wynikami symulacji komputerowych wykonanych przy pomocy dwóch powszechnie używanych generatorów zderzeń proton-proton: Pythia i Phojet oraz przygotowanego przez siebie generatora CALM. Narzędzie to pozwala na oszacowanie wpływu zasad zachowania obowiązujących w badanych zderzeniach na otrzymane wyniki korelacyjne. Podstawowe wyniki pracy doktorskiej mgr Janik przypomniane są w rozdziale dziesiątym. Dodatki przedstawiają ciekawy materiał dotyczący związku między zmiennymi korelacyjnymi  $\Delta\eta\Delta\phi$  a wielkościami opisującymi korelacje femtoskopowe (Dodatek A), szczegółową analizę zastosowanej procedury korekcji wyników doświadczalnych wraz z opisem czterowymiarowej mapy poprawek (Dodatek B). Dodatek C zawiera eksperymentalne funkcje korelacyjne otrzymane w zderzeniach proton-ołów i ołów-ołów. W Dodatku D przedstawiono funkcje korelacyjne dla par nieidentycznych cząstek.

Przechodząc do oceny pracy wymienię listę najważniejszych oryginalnych wyników uzyskanych przez autorkę:

- (i) Każde z opisanych w pracy źródeł korelacji przejawia się w swój szczególny sposób i w związku z tym własności tych źródeł mogą być analizowane oddzielnie. Wkład do dwucząstkowej funkcji korelacyjnej pochodzący od „minidżetów” wzrasta wraz ze

wzrostem wartości sumy pędów poprzecznych par cząstek (pt-sum). Dla par utworzonych z cząstek o tym samym ładunku elektrycznym, które w funkcji korelacyjnej zawierają wkład pochodzący od „minidżetów” i od korelacji Bosego-Einsteina (BEC) dwucząstkowa korelacja maleje dla najniższych wartości pt-sum ze względu na zmniejszający się wkład od BEC i wzrasta dla większych wartości pt-sum bo wkład od „minidżetów” rośnie.

- (ii) „Minidżety” generują w funkcji korelacyjnej struktury, które zanikają wolniej niż  $1/N_{ch}$ , gdzie  $N_{ch}$  to liczba wyprodukowanych naładowanych cząstek w zderzeniu, sugerując dodatkowe mechanizmy, które zwiększają korelacje dwucząstkowe.
- (iii) Długozasięgowe korelacje wpływające na pomiary femtoskopowe mają swoje źródło w obecności „minidżetów”.
- (iv) Analiza wykazała znaczące różnice w kształcie funkcji korelacyjnej wygenerowanej dla cząstek naładowanych i cząstek zidentyfikowanych. Sugeruje to, że zasady zachowania (liczby barionowej, dziwności) mają duże znaczenie dla dwucząstkowych funkcji korelacyjnych.
- (v) Powszechnie stosowane generatory zderzeń hadronowych nie opisują poprawnie kształtu dwucząstkowej funkcji korelacyjnej w zderzeniach proton-proton. W pracy wskazano pewne sposoby, które pozwolą na modyfikację mechanizmów produkcji cząstek obecnych w generatorach Monte Carlo.
- (vi) Przygotowany na potrzebę analizy generator CALM pozwalający między innymi na oszacowanie wpływu zasad zachowania obowiązujących w badanych zderzeniach na otrzymane wyniki korelacyjne pozwolił jakościowo odtworzyć wszystkie struktury obecne w doświadczalnych funkcjach korelacyjnych. Sugeruje to, że kształt dwucząstkowej funkcji korelacyjnej w dużej mierze wynika z zasad zachowania.

Praca jest napisana jasno i starannie. Nieliczne błędy (np. ilości i zakresy przedziałów  $N_{ch}$  i  $p_T$ -sum podane w tabelach 5.1 i 5.2 są inne niż na późniejszych rysunkach, choćby Fig. 5.5) nie powodują dyskomfortu u czytelnika. Procedury doświadczalne i analizę wyników przedstawiono szczegółowo. Autorka jest czytana w literaturze dotyczącej tematu rozprawy.

W rozdziale dziewiątym, w którym autorka skupia się na opracowanym przez siebie modelu CALM, służącym to testowania, między innymi, wpływu zasad zachowania na kształt funkcji korelacyjnej, autor niniejszej recenzji nie mógł znaleźć informacji na temat sposobu zachowywania energii i pędu w zaadoptowanej klasie TGenPhaseSpace. Jako że istnieje wiele metod prowadzących do zachowania energii i pędu, dobrze byłoby poznać te, które są użyte w modelu CALM oraz sprawdzić dokładność z jaką pęd i energia są zachowywane. Recenzent spodziewa się usłyszeć więcej na ten temat w autoreferacie.

Podsumowując uważam, że rozprawa doktorska mgr Małgorzaty Anny Janik zawiera oryginalne i bardzo ciekawe wyniki poszerzające naszą wiedzę o korelacjach występujących w procesach produkcji cząstek. Z przyjemnością stwierdzam, że rozprawa spełnia wszelkie formalne i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie do jej publicznej obrony.

dr hab. Maciej Rybczyński