

Prof. dr hab. Piotr Bożek  
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej  
Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

Kraków, 11.01.2015

Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr. inż. Łukasza Graczykowskiego  
*Femtoscopic Analysis of Hadron-Hadron Correlations  
in Ultrarelativistic Collisions of Protons and Heavy-Ions  
Registered by ALICE at the LHC*

Praca doktorska mgr. Łukasza Graczykowskiego jest poświęcona badaniom korelacji pędowych dla dwóch cząstek emitowanych w zderzeniach o skrajnie relatywistycznych energiach. W szczególności są to korelacje interferometryczne dla par pionów emitowanych w zderzeniach protonów z jądrami ołowiu i korelacje oddziaływań stanu końcowego dla par barionów w zderzeniach ołów-ołów na akceleratorze LHC w CERN-ie. Femtoskopia, czyli badanie korelacji cząstek w przestrzeni pędów, pozwala na określenie własności przestrzennych źródła emisji. Metoda ta jest najczęściej stosowana dla par identycznych cząstek, gdzie głównym źródłem korelacji są efekty symetryzacji amplitudy produkcji. Metoda korelacji Bosego-Einsteina jest używana dla określenia zasięgu korelacji czasowo-przestrzennych przy emisji cząstek w zderzeniach cząstek elementarnych i w zderzeniach jądrowych. Inna technika femtoskopii wykorzystuje oddziaływanie w stanie końcowym dla cząstek nieidentycznych. Można w ten sposób uzyskać informacje o korelacjach czasowo-przestrzennych punktów emisji i o samych parametrach oddziaływania między hadronami.

Praca doktorska została przygotowana w grupie fizyki ciężkich jonów na Politechnice Warszawskiej pod kierunkiem dr. hab. Adama Kisiela. Przedstawia wyniki badań i analiz doświadczalnych otrzymanych w ramach eksperymentu ALICE na LHC. Rozprawa jest dość obszerna, napisana po angielsku. Pierwsze cztery rozdziały zawierają krótki wstęp do fizyki relatywistycznych zderzeń jądrowych, opis eksperymentu ALICE i metody korelacji femtoskopowych dla cząstek identycznych i nieidentycznych.

Dokładniej opisana jest metoda badania korelacji interferometrycznych dla par pionów i wybór zmiennych kinematycznych dla korelacji badanych w trzech wymiarach. Dla trójwymiarowych funkcji korelacji w zmiennych  $q_{out}$ ,  $q_{side}$  i  $q_{long}$  używane są dwie proste parametryzacje, gausowska i eksponencjalna. Każda z nich wprowadza trzy parametry geometryczne, związane z rozmiarem obszaru emisji,  $R_{out}$ ,  $R_{side}$  i  $R_{long}$ . Autor przedstawia krótki przegląd pomiarów interferometrycznych dla małych układów, od  $e^+e^-$  do p-Pb. Promienie interferometryczne maleją ze wzrostem średniego pędu poprzecznego pary, co może wskazywać na

istnienie korelacji między pędem i miejscem emisji cząstek. Same rozmiary rosną liniowo z  $N_{ch}^{1/3}$ , gdzie  $N_{ch}$  jest zmierzoną krotnością cząstek. Porównanie promieni femtoskopowych w różnych układach, p-p, p-Pb i Pb-Pb dostarczy dodatkowych informacji na temat obszaru oddziaływania i korelacji pędowo-przestrzennych w tych układach. Opisana jest metoda korelacji związanych z oddziaływaniem w stanie końcowym, w szczególności zastosowana dla pary barion-barion i barion-antybarion. W parametryzacji oddziaływania stosuje się zespolone wartości długości rozpraszania, co odpowiada uwzględnieniu procesu anihilacji. Ważnym zastosowaniem analizy femtoskopowej dla par barion-antybarion jest możliwość oszacowania parametrów oddziaływania, a więc przekroju czynnego na anihilację.

Podstawowym problemem w analizie korelacji femtoskopowych jest oddzielenie sygnału związanego z efektem Bosego-Einsteina od korelacji z innych źródeł. Realistyczne modelowanie wszystkich rodzajów korelacji jest niezwykle trudne. Autor używa generatorów eventów EPOS i PYTHIA, które uwzględniają dużą część korelacji tła. Dodatkowo nałożone są korelacje Bosego-Einsteina dla emitowanych par. W ten sposób można porównać sygnał zawierający różne rodzaje korelacji z sygnałem zawierającym tylko korelacje tła. Faktoryzacja tych dwóch rodzajów korelacji pozwala na oszacowanie czystego sygnału korelacji interferometrycznych. Ten etap analizy jest najtrudniejszy i jest głównym źródłem błędów systematycznych. Z konieczności tło musi być oszacowane w modelach Monte Carlo. W mojej ocenie w wyborze modelu tła zawiera się największa niepewność całej analizy. Modele takie jak AMPT, HIJING, DPMJET i THERMINATOR nie opisują tła w funkcji korelacji i nie mogą być użyte do jego odjęcia. Modele PYTHIA i EPOS poprawnie opisują tło dla dużych pędów. Jednak same modele nie w pełni opisują podstawowe obserwacje, takie jak rozkład krotności. Skoro krotność w modelu EPOS jest o czynnik 1.7 zbyt mała, to czy otrzymane tło dla funkcji korelacji jest wiarygodne? W rozdziale 6 omówiona jest ponadto analiza danych pomiarowych: identyfikacja cząstek w detektorze TPC, definicja centralności poprzez odpowiedź detektora VZERO-A, eliminacja podwójnych i złączonych śladów cząstek.

Analiza korelacji femtoskopowych przeprowadzona jest dla czterech klas centralności, charakteryzujących się różnymi gęstościami cząstek naładowanych na jednostkę pseudorapidity. Dla każdej klasy centralności odjęte jest tło niefemtoskopowe, wyliczone w modelach EPOS lub PYTHIA. Wyliczone promienie interferometryczne wykazują typową zależność od krotności i pędu pary. Promienie maleją z pędem pary, co może sugerować kolektywny przepływ w zderzeniu. Zależność od krotności jest liniowa w zmiennej  $N_{ch}^{1/3}$ . Wartości promieni leżą pomiędzy wartościami dla zderzeń p-p i Pb-Pb. Wyniki są porównane z przewidywaniami modeli hydrodynamicznych. Porównanie z modelami wskazuje na istnienie silnego przepływu poprzecznego, który w modelu hydrodynamicznym otrzymany jest dla źródła o małym promieniu początkowym. Jakościowo podobne wyniki otrzymuje się dla

parametryzacji funkcji korelacji funkcją Gaussa i funkcją eksponencjalną. Jednowymiarowe promienie inwariantne zrekonstruowane z analizy trójwymiarowej są w dobrej zgodności z wynikami niezależnej, jednowymiarowej analizy eksperymentu ALICE. Oprócz wspomnianej niepewności związanej z szacowaniem tła w funkcji korelacji (4-35%), przedyskutowano inne źródła błędów. Niepewność związana z zakresem fitu do funkcji korelacji wynosi około 10%.

Rozdział 9 zawiera opis analizy korelacji z oddziaływań stanu końcowego dla pary proton-lambda i proton-antylambda. Zasadniczym elementem procedury jest identyfikacja barionów lambda na podstawie produktów rozpadu (pion i (anty)proton). Domieszka innych procesów do zidentyfikowanych par proton-lambda zaburza obserwowane korelacje. Autor przedstawia sposób korekcji funkcji korelacji na przyczynki od par proton-proton. Wstępne wyniki dla funkcji korelacji par proton-lambda i proton-antylambda wskazują na istnienie antykorelacji w kanale barion-antybarion, spowodowanej wkładem od anihilacji.

Praca jest zredagowana starannie, zawiera opis procedur eksperymentalnych i szereg szczegółowych rysunków. Część technicznych szczegółów zebrana jest w trzech dodatkach. Zastrzeżenia można mieć tylko do części wstępnej rozprawy. Zawiera bardzo szeroki zakres zagadnień i, z konieczności, dyskusja jest bardzo powierzchowna, a sam tekst jest w dużej mierze oparty na istniejącej literaturze. Moim zdaniem praca byłaby bardziej spójna, gdyby część wstępną zasadniczo skrócić.

Zagadnienia badawcze przedstawione w rozprawie doktorskiej mgr. Łukasza Graczykowskiego należą do najbardziej aktualnych tematów fizyki relatywistycznych zderzeń ciężkich jonów. Ciekawe wyniki eksperymentów w układzie proton-ołów na LHC rodzą nowe pytania co do dynamiki zderzenia w małych układach. Pomiar promieni interferometrycznych dla tego układu są ważnym elementem tej analizy, uważam to za najważniejszy wynik badawczy przedstawiony w rozprawie. Badanie oddziaływań dla par barion-antybarion pozwoli na określenie parametrów oddziaływania, które trudno byłoby uzyskać w inny sposób.

Autor rozprawy potwierdził swoją znajomość tematyki i umiejętność prowadzenia zaawansowanej analizy eksperymentalnej. Wyniki, których współautorem jest mgr Graczykowski, zostały wstępnie zaaprobowane przez współpracę ALICE. Doktorant wielokrotnie przedstawiał wyniki prowadzonych prac na ważnych konferencjach międzynarodowych. Stwierdzam, że przedstawiona rozprawa spełnia wymagania ustawowe i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Łukasza Graczykowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Piotr Bożek

