



prof. dr hab. inż. Iwona Grabowska-Bołd
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica

Kraków, 3 kwietnia 2023 roku

Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr Pawła Szymańskiego pt. “Femtoscropy of Meson-Meson and Meson-Baryon Systems Obtained in Heavy Ion Collisions in the Beam Energy Scan Program in the STAR Experiment”

Przedmiotem rozprawy doktorskiej pana mgr Pawła Szymańskiego “*Femtoscropy of Meson-Meson and Meson-Baryon Systems Obtained in Heavy Ion Collisions in the Beam Energy Scan Program in the STAR Experiment*” są eksperymentalne badania korelacji typu Hanbury-Brown-Twiss (HBT) dla pionów, kaonów i protonów w zderzeniach ciężkich jonów. Celem programu fizyki zderzeń ciężkich jonów jest poznanie własności materii w stanie plazmy kwarkowo-gluonowej, czyli w warunkach ekstremalnie wysokich temperatur i gęstości energii. Do badań została użyta technika femtooskopii, która wykorzystuje korelacje dwucząstkowe w przestrzeni pędów do charakteryzacji czasowo-przestrzennej układu powstałego w zderzeniu. Korelacje między dwoma nieidentycznymi cząstkami, które są przedmiotem tej rozprawy, są czułe na asymetrię czasowo-przestrzenną w procesie emisji cząstek.

Analiza korelacji dla par pion-kaon wykonana została dla trzech energii zderzenia złoto-złoto (Au+Au) zebranych przez eksperyment STAR na zderzaczu RHIC w programie Skanu Energii Wiązek (z ang. Beam Energy Scan, BES): 7.7, 11.5 oraz 39 GeV. W przypadku najwyższej energii zderzenia 39 GeV zbadano korelacje dla par pion-kaon, pion-proton oraz kaon-proton w funkcji centralności zderzenia Au+Au w trzech klasach: 1) centralnej (0-10%), o pośrednich centralnościach (10-30%) oraz peryferycznej (30-70%). Funkcje korelacji zmierzono z użyciem dwóch metod: 1) Double Ratio (DR) oraz 2) rozkładu na harmoniki sferyczne (z ang. spherical harmonics decomposition, SHD). Analiza wykazała, że metoda SHD jest bardziej dokładna w badaniach korelacji femtoskopowych zwłaszcza w przypadku nieidentycznych par cząstek.

Ważnym elementem analizy danych była identyfikacja cząstek pionów, kaonów i protonów, którą wykonano z wykorzystaniem informacji z dwóch systemów detektora STAR: TPC oraz TOF. W analizie par cząstek przebadano dwa efekty eksperymentalne: łączenia (z ang. track merging) oraz dzielenia (z ang. track splitting) śladów w funkcji zależności kątowych. Ponadto przy pomiarze korelacji uwzględniono trzy poprawki: 1) od tła typu “niefemtoskopowego” w tym od wpływu

eliptycznego, 2) na czystość próbki z powodu nieidealnej identyfikacji cząstek, 3) na rozdzielczość pomiaru pędu cząstek wynikającej ze skończonej precyzji systemu pomiarowego.

W rozprawie doktorskiej **uzyskano szereg ciekawych wyników**. W szczególności przy użyciu metody SHD zmierzono rozmiary źródeł R_{out} dla par πK , których wartość średnia dla wszystkich kombinacji ładunków rośnie z centralnością zderzenia od 7.3 fm dla zderzeń peryferycznych do 12.4 fm dla 0-10% centralności przy energii zderzenia 39 GeV. W przypadku metody DR wzrost w tych klasach centralności jest od 7.3 fm do 10.6 fm. Do podobnych wniosków prowadzą wyniki uzyskane dla niższych energii zderzenia 7.7 GeV oraz 11.5 GeV, choć w tym przypadku wzrost rozmiaru źródła nie jest tak silny. Ponadto zmierzono asymetrię emisji μ , która wykazuje podobną zależność jak R_{out} . W szczególności $|\mu|$ maleje wraz ze spadkiem centralności zderzenia i rośnie z energią zderzenia. Metody DR i SHD dają podobne wyniki, choć metoda SHD obarczona jest mniejszą niepewnością. Zależność od energii zderzenia jest silniejsza dla asymetrii niż w przypadku rozmiaru źródła.

Wyniki pomiaru funkcji korelacji porównano dla zderzeń centralnych przy energii 39 GeV z dwoma przewidywaniami UrQMD (centralność 0-10%) oraz Therminator 2 (centralność 0-5%). Z porównań wynika, że Therminator 2 charakteryzuje się mniejszym sygnałem od korelacji cząstek w przypadku metody DR, co prowadzi do nieznacznie większych rozmiarów źródła niż wynik pomiaru. W przypadku metody SHD asymetria emisji dla obu modeli w ramach niepewności zgadza się z wynikami pomiarów. W przypadku metody DR, przewidywania dają nieznacznie wyższe wartości.

Rozmiar promieni dla par pion-kaon i pion-proton jest podobny, podczas gdy dla par kaon-proton jest dużo mniejszy dla tej samej klasy centralności, energii zderzenia i warunków eksperymentalnych. Obliczenia dla pionów wskazują na większy rozmiar źródła niż to wynika z danych eksperymentu STAR, choć trzeba podkreślić, iż obie analizy wykonane zostały przy lekko różnych selekcjach m.in. w doborze klas centralności. Rozmiary źródeł jedno-cząstkowych σ_{out} obliczonych dla kaonów i protonów są podobne i mniejsze niż dla pionów. Rozmiary źródeł dla par π^+p uzyskane w modelu Therminator 2 są w zgodzie z pomiarami, podczas gdy UrQMD przewiduje mniejsze rozmiary niż te zmierzone w eksperymencie. W przypadku par K^+p oba modele przewidują podobne rozmiary źródeł do tych zmierzonych w eksperymencie w ramach niepewności.

Asymetria emisji dla par pion-kaon i pion-proton jest podobna, podczas gdy pary kaon-proton mają bardzo małą asymetrię. Zmierzone wartości asymetrii są w zgodzie z przewidywaniem modeli hydrodynamicznych ich związku dla tych trzech par cząstek $\mu_{\pi p} = \mu_{\pi K} + \mu_{Kp}$.

Z modeli Therminator 2 i UrQMD wynika rozbieżność w rozkładach różnic w czasie emisji. W modelu Therminator 2 lekkie cząstki produkowane są później niż ciężkie, podczas gdy w modelu UrQMD odwrotnie - ciężkie cząstki produkowane są później. W obu modelach różnica w czasie emisji jest większa dla par o większej różnicy mas cząstek $|\Delta t_{\pi p}| > |\Delta t_{\pi K}| > |\Delta t_{Kp}|$. Podobna relacja zachodzi dla różnic w emisji przestrzennej w obu modelach: średnio lekkie cząstki emitowane są bliżej centrum niż cięższe cząstki. Efekt jest silniejszy dla par o większej różnicy mas cząstek.

Rozprawa doktorska pana Szymańskiego napisana jest w języku angielskim. Składa się ona z ośmiu rozdziałów oraz bibliografii liczącej 116 pozycji. Praca ma typowy układ dla tej dziedziny. Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do tematyki Modelu Standardowego i relatywistycznych zderzeń ciężkich jonów wraz z dyskusją wybranych sygnatur charakterystycznych dla plazmy kwarkowo-gluonowej (z ang. Quark-Gluon Plasma, QGP). W Rozdziale 2 znajduje się opis aparatury eksperymentalnej tj. zderzacza RHIC i detektora STAR wraz z krótką charakterystyką jego głównych systemów. W tej części czytelnik dowiaduje się m.in. czym jest program BES i jakie są jego zadania. W Rozdziale 3 dyskutowane są teoretyczne podstawy zagadnienia femtoskopowych korelacji dwu-cząstkowych oraz techniki eksperymentalne służące do ich pomiaru. Rozdział ten kończy zestawienie przykładów pomiarów korelacji HBT dla par pionów oraz πK w eksperymencie STAR oraz par πK w eksperymencie ALICE. W Rozdziale 4 znajduje się dyskusja modeli używanych do opisu cząstek produkowanych w zderzeniach ciężkich jonów. W szczególności Autor poświęca uwagę dwóm wybranym modelom - UrQMD oraz Therminator 2, których używa do interpretacji wyników pomiarów w kolejnych rozdziałach. W Rozdziale 5 opisana jest analiza korelacji par nieidentycznych cząstek, natomiast Rozdziały 6 i 7 poświęcone są oszacowaniu niepewności systematycznych oraz wynikom i ich interpretacji. Rozprawę zamyka Rozdział 8 będący podsumowaniem wykonanych badań.

Rozprawa doktorska pana Pawła Szymańskiego zyskałaby na bardziej wnikliwej korekcie edytorskiej tekstu. W tekście pracy znaleźć można pewne nieścisłości. Niektóre wykresy zaledwie wspomniane są w tekście bez głębszej dyskusji ich zawartości. Również w niektórych przypadkach opisy pod wykresami zyskałyby na ich doprecyzowaniu. Wymienię tylko wybrane zarzuty i komentarze dotyczące Rozdziałów 4-7.

1. Autor ma tendencję do odwoływania się w tekście do równań zanim zostaną one zdefiniowane (przykład równanie 4.1). Obecny układ zaburza płynność czytania rozprawy.
2. Wniosek wynikający z Rysunku 4.3 "The R_{side} and R_{long} are overestimated for almost all collisions energies ..." wydaje się ignorować duże niepewności związane z punktami dla modelu Therminator 2. Nasuwa się pytanie skąd wynikają tak duże niepewności dla przewidywań? Naiwnie można by się spodziewać, że zwiększenie liczby generowanych przypadków powinno doprowadzić do mocniejszych konkluzji.
3. Tabele 4.4-4.5 przedstawiają termodynamiczne i geometryczne parametry dopasowania dla modelu Therminator 2. A co z ich niepewnościami? Czy mamy dla nich jakieś oszacowania?
4. Str. 65 "The STAR experiment cannot directly measure the number of participants or impact parameter." Czy Autor może skomentować czy to ograniczenie dotyczy tylko eksperymentu STAR? Obecne sformułowanie nasuwa właśnie taki właśnie wniosek.
5. Rysunek 5.2: jakie jest pochodzenie dziur/wcięć na granicach przedziałów centralności w przypadkach o dużych centralnościach na wykresie? Z tekstu rozprawy czytelnik nie dowiaduje się jak kalibrowana jest centralność w eksperymencie STAR.
6. W tekście rozprawy Autor nie poświęca uwagi zagadnieniu rekonstrukcji śladów w analizie korelacji. Czy potencjalna niewydajność rekonstrukcji śladów może mieć wpływ na wynik pomiaru?
7. Efekt podziału i łączenia śladów możemy badać w symulacji MC. Być może recenzent przeoczył szczegóły tej dyskusji, ale jak duży to efekt?
8. Rysunki 5.9-5.10: czy należy się martwić strukturami, które ciągle widoczne są na wykresie?
9. Rysunki 5.12-5.13: brak opisu osi z.
10. Rozdział 5.2.2: brak definicji "Purity".
11. Rysunek 5.18: czy wykres przedstawia punkty pomiarowe czy też jest to wynik dopasowania? Jaka jest niepewność tego dopasowania?

12. Figure 5.24 i równania 5.17 i 5.18: zależności dla σ_θ i σ_ϕ wyglądają bardzo podobnie. Czy w związku z tym potrzebujemy różnych parametryzacji w równaniach 5.17 i 5.18?
13. Rozdział 6: wykresy tego rozdziału mają niekompletne opisy. W szczególności brakuje informacji co na wykresach oznacza słupek błędu. Czy reprezentuje on niepewność statystyczną czy może całkowitą uwzględniając również niepewność systematyczną, której oszacowanie dyskutowane jest w tej części rozprawy?
14. Figures 7.16-7.18: opisy zdają się zawierać błędy dotyczące ładunku prezentowanych par cząstek.
15. Figures 7.38-7.39: jaka jest przyczyna tak dużych niepewności dla przewidywań UrQMD Primordial?

Wyniki badań prezentowane w rozprawie nie zostały jeszcze opublikowane, choć artykuł jest w trakcie przygotowania. Obecnie przechodzi on wewnętrzną recenzję we Współpracy STAR. Natomiast w latach 2016-2020 Doktorant był autorem lub współautorem 7 raportów pokonferencyjnych.

Pan Paweł Szymański prezentował wyniki badań opisanych w rozprawie w latach 2015-2022 na **19 międzynarodowych i krajowych konferencjach** naukowych oraz szkołach, w tym m.in. 15th Workshop on Particle Correlation and Femtoscopy (WPFC), East Lansing, USA (**referat zaproszony**), 14th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, Praga, Czechy (poster), 29th International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2022), Kraków, Polska (poster) i innych.

Podsumowując, uważam, że rozprawa doktorska pana mgr Pawła Szymańskiego zatytułowana "*Femtoscopy of Meson-Meson and Meson-Baryon Systems Obtained in Heavy Ion Collisions in the Beam Energy Scan Program in the STAR Experiment*" demonstruje istotny wkład Doktoranta w zrozumienie femtoskopowych korelacji dwucząstkowych w zderzeniach Au+Au zebranych przy energiach programu BES w eksperymencie STAR. Ponadto Doktorant wniósł wkład w obsługę i zbieranie danych eksperymentu oraz zrealizował dwa zadania z kategorii Service Tasks (opracowanie aplikacji ułatwiającej dostęp do publikacji naukowych w serwisie INSPIRE i arXiv oraz analiza danych z detektora iTPC). Krytyczne uwagi zawarte w niniejszej recenzji nie umniejszają znaczenia wyników naukowych oraz ogromu wkładu Doktoranta w przygotowanie rozprawy.

Recenzowana rozprawa doktorska spełnia warunki ustawowe stawiane rozprawom doktorskim stąd wnioskuję o dopuszczenie pana mgr Pawła Szymańskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

.....
Grabowska-Bołd
.....
Iwona Grabowska-Bołd