



Krzysztof Piasecki  
Wydział Fizyki  
Uniwersytet Warszawski  
E-mail: [krzysztof.piasecki@fuw.edu.pl](mailto:krzysztof.piasecki@fuw.edu.pl)

Warszawa, 21.03.2023

Rada Naukowa Dyscypliny Nauki Fizyczne  
Politechnika Warszawska

**Recenzja pracy doktorskiej "Femtoscopy of meson-meson and meson-baryon systems obtained in heavy ion collisions in the Beam Energy Scan program in the STAR experiment" autorstwa mgr. inż. Pawła Roberta Szymańskiego**

Przedmiotem badań opisanym w pracy jest analiza femtoskopowa wybranych par hadronów naładowanych o różniącym się typie ( $\pi^\pm - K^\pm$ ,  $\pi^\pm - p(\bar{p})$ ,  $K^\pm - p(\bar{p})$ ), gdzie  $\pi$  = pion,  $K$  = kaon,  $p(\bar{p})$  = (anty)proton). Cząstki te emitowane były zderzeń Au + Au przy energiach dostępnych w układzie nukleon-nukleon  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7, 11.5$  oraz 39 GeV. Zderzenia realizowane były w ośrodku RHIC w Brookhaven (USA) i rejestrowane przez spektrometr STAR. Zarejestrowane zderzenia zostały podzielone na klasy centralności, a w pracy zaprezentowano analizę dla klas: 10% najbardziej centralnych, semicentralnej w ramach 10–30 centyla i semiperiferyjnych w 30–70 centylu.

Praca jest napisana w języku angielskim. Rozpoczyna ją czytelna strona tytułowa, adekwatny do badań abstrakt w obu językach, zestawienie osiągnięć naukowych (w tym – spis publikacji i referatów) oraz spis treści. Dokument składa się z 8 rozdziałów, zakończonych bibliografią.

**Rozdział 1.** Autor rozpoczyna od opisu Modelu Standardowego i potencjału QCD. Wprowadza pojęcie diagramu fazowego QCD, faz materii jądrowej i przejść fazowych, a następnie pojęcia centralności zderzenia i parametryzację Woodsa-Saxona profili jądrowych. Zaopatrzony w te definicje, omawia algorytm modelu Glaubera oraz schemat Bjorkena faz zderzenia jądrowego. Ponieważ w obszarze energii wiązki powyżej badanego odkryto fazę QGP (plazmy kwarkowo-gluonowej), Autor opisuje sygnatury przemawiające za nią, wprowadzając właściwe obserwacje. Pozwala to zarazem na omówienie wpływu hadronów, który później okaże się być istotny – jako przyczyna powolnych zmian funkcji korelacji z pędem względnym pary cząstek oraz możliwa przyczyna obserwowanej asymetrii miejsca i czasu powstania między hadronami różnych typów. Trzeba tu odnotować, że określenie oddziaływań silnych jako wyłącznie przyciągających kłóci się np. z przebiegiem potencjału QCD na rysunku 1.2, który przy odległościach powyżej 0.6 fm zmienia znak. Również moim zdaniem wybór fotonów, aby opisać źródła ich produkcji, powinien mieć minorową pozycję wobec opisu „typowo rozważanych” źródeł bądź kanałów produkcji pionów, kaonów i protonów (w tym tematu wiodących rozpadów z masywniejszych hadronów) – gdyż to one, a nie fotony, są przedmiotem pracy.

**Rozdział drugi** zawiera ogólny opis akceleratora RHIC i układu badawczego STAR, z akcentem na detektory TPC i TOF, najistotniejsze dla pomiaru badanych hadronów. Omówiono tu sposób zbierania sygnałów z komory TPC i zasadę rekonstrukcji toru na podstawie helisy, a następnie metodę wyznaczania czasu przelotu. W rozdziale zarysowano też program badawczy BES (Beam Energy Scan), w podziale na jego I i II fazę (analizowane dane pochodzą z tej drugiej).

W **Rozdziale 3.** Autor omawia ujęcia teoretyczne przyczyn korelacji cząstek o zbliżonych pędach. Efekt HBT jako skutek własności mechaniki kwantowej został przedstawiony wpięty dla

pierwowzoru astrofizycznego, a następnie w świecie subatomowym. Wprowadzono tu funkcję korelacji, zarówno teoretycznie, jak i w ujęciu obserwabli. W sekcji 3.3 Autor wprowadza układy współrzędnych LCMS i PRF oraz definiuje wielkości kinematyczne właściwe dla pary cząstek. Sekcja ta zawiera jednak nieścisłości: (A) omawianie rys. 3.3 zaraz po wprowadzeniu LCMS sugeruje, że zachodzi dla niego wymóg antyrównoległości składowych Z pędów w LCMS (równ. 3.12), a tymczasem rysunek tego nie zachowuje; (B) notacja strzałki dla wektorów i jej braku dla skalarów (czterowektorów) jest przemieszana. Np. równ. 3.12 nie powinno mieć strzałek, a równ. 3.13 powinno je mieć nad pędami. LHS tego ostatniego słusznie nie ma strzałki, a w momencie opisu tego pojęcia akapit wyżej –  $q_{inv}$  ją ma. Nie jest niejasne, czy czytelnik ma traktować 3.14 jako długość wektora, czy normę czterowektora; (C)  $\bar{K}$  zdefiniowane jako  $(\bar{p}_A + \bar{p}_B)/2$  nie jest prostopadłe do osi wiązki (zdanie pomiędzy równ. 3.12 a 3.13), natomiast  $\bar{K}_T$  jest; (D) przy wprowadzeniu układu PRF potrzeba go zorientować względem LCMS, CM lub LAB. Orientacja ta jest ważna np. przy równ. 3.30-32, na wykresach typu 7.30, gdzie rozważa się pierwszeństwo między cząstkami pary, czy przy rozkładzie na składowe *out* i *side*, stosowane w kontekście układu PRF [wyrażenia typu  $\text{sgn}(k_{out}^*)$ ]. (E) W okolicy tego rozdziału powinna też znaleźć się definicja masy poprzecznej dla pary cząstek różnych typów.

Natomiast godny aprobaty jest opis teoretyczny trzech głównych źródeł sygnału femtoskopowego: statystyki kwantowej, oddziaływań Coulomba oraz silnych. Ilustrują go wykresy poglądowe postaci funkcji korelacji dla par  $\pi^+\pi^+$ ,  $pp$ ,  $\pi^+K^+$  i  $\pi^+K^-$ . Również klarownie opisane zostały 1- i 3-wymiarowe parametryzacje funkcji korelacji, łącznie z poprawką na efekt Coulomba i na asymetrię emisji dwóch rozważanych w parze cząstek. Podobnie w jasny sposób Autor wprowadził rozkład funkcji korelacji na harmoniki sferyczne, przy czym ich wizualizacja na rys. 3.11 pomaga czytelnikowi w zrozumieniu, za co te komponenty są odpowiedzialne. Istotna jest też dyskusja przypadków asymetrii emisji, wprowadzająca kąty między położeniami, prędkościami i pędami, a następnie pojęcie DR (double ratio). Z kolei sekcja 3.7 w adekwatny sposób ukazuje istotne femtoskopowe wyniki doświadczalne przy energiach programu BES dla RHIC, w zakresie rozmiarów źródła emisji par  $\pi\pi$  oraz parametrów par nieidentycznych: promienia  $R_{out}$  i przesunięcia  $\mu_{out}$ .

**Rozdział 4** skupia się na kodach modelujących relatywistyczne zderzenie ciężkich jonów. Omówiony został model chwili początkowej (GLISSANDO), który w celu wyznaczenia centralności na użytek modelu UrQMD, łączy parametr zderzenia z liniową kombinacją liczbą partycypantów i ich binarnych zderzeń. Kod transportu UrQMD został wybrany do symulacji przebiegu zderzenia, natomiast jako model opisujący stan końcowy, będący osadzeniem ruchu termicznego w ekspansji typu Blast-Wave, wybrano Therminator2. Trzeba ocenić, że najważniejsze składniki każdego z tych modeli zostały omówione prawidłowo, łącznie z plikami wejścia i wyjścia i stabilizowanymi wartościami parametrów, dobranymi dla układów i energii zderzających się jąder w sposób adekwatny. Mała uwaga – w tabeli 4.8 liczba cyfr znaczących jest nadmierna. Za ważne trzeba uznać porównanie promieni w trzech kierunkach pomiędzy analizą eksperymentu a danych z Therminator2. Szczególnie systematyczne niedoszacowanie komponentu  $R_{out}$  jest wyraźne (choć wnioski o przeszacowaniu promieni  $R_{side}$  i  $R_{long}$  są nieco za mocne, biorąc pod uwagę niepewności), a wskazany wniosek o potrzebie zastosowania innej hiperpowierzchni freeze-outu (wymrożenia) jest zasadną opcją.

W **Rozdziale 5** Autor opisuje selekcję danych na trzech kolejnych poziomach: eventu, torów i par. Na etapie eventu, po omówieniu cięcia na pozycję wierzchołka, mgr Szymański ukazał rozkład krotności cząstek naładowanych, służący do wyznaczenia klas centralności. Natomiast brakuje tu informacji o liczbie eventów: zmierzonych a zaakceptowanych, oraz o liczbie zaakceptowanych par (przynajmniej co do rzędu wielkości i dla „typowej” energii). Na etapie torów Autor klarownie

„zrehabilitowane” to zostało na rys. 6.67–69, gdzie widać efekt korekcji. Również i tu przedstawiono krzywe najlepszego dopasowania kodu CorrFit do funkcji korelacji we wspomnianych dwóch reprezentacjach, wraz z najlepszymi parametrami. Większość krzywych dobrze zgadza się z danymi, natomiast niekiedy widać systematyczne odchylenia, np. dla par  $K^+p$ ,  $K^-p$  i  $K^+\bar{p}$  przy  $\text{sgn}(k_{\text{out}}^*) \cdot k^* \approx -70 \dots -30 \text{ MeV}/c$ . Rozdział kończą pracowite zestawienia przyczynków do niepewności systematycznych dla przypadku powyższych par.

Przedstawioną w **Rozdziale 7** dyskusję wyników rozpoczyna zależność od centralności. Wyniki wskazują na zmniejszanie się rozmiaru  $R_{\text{out}}$  źródła oraz asymetrii emisji, przechodząc ku zderzeniom peryferyjnym. Ponadto, wyniki z parametryzacji harmonik sferycznych oraz Bertscha-Pratta okazały się zwykle wzajemnie zgodne. Następnie, rezultaty dla zderzeń centralnych zostały zestawione w funkcji energii wiązki. Dzięki temu Autor wykrył wzrost parametru asymetrii z tą energią, natomiast zmiany parametru  $R_{\text{out}}$  z nią okazały się słabe. Porównano też sygnały femtoskopowe między parami  $\pi K$ ,  $\pi p$  a  $Kp$ . Tu przydałoby się jednak słowo objaśnienia pochodzenia wzorów 7.1–3 (stanowiących metodę rozwikłania rozmiarów źródeł pionów, kaonów i protonów osobno) oraz 7.4 (wiążącego trzy parametry rozsunięcia). Istotne jednak, że wyniki są zaprezentowane, a zachowanie równości 7.4 wykazane w granicach niepewności – ale też fakt, że spójność wyników z dwóch parametryzacji jest stale poddawana porównaniom. Następnie Autor przeszedł do przewidywań modeli Therminator2 i UrQMD, skupiając się na energii  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 39 \text{ GeV}$ . Co ciekawe, okazało się, że nie tylko średnie chwile czasu emisji hadronów są różne w obu modelach, co nawet kolejność dla typów cząstek ( $\pi$ ,  $K$ ,  $p$ ): gdy wg Therminator2 w pierw emitowane są cząstki cięższe, to wg UrQMD – te lżejsze. Natomiast oba modele zgodnie twierdzą, że cząstki lżejsze emitowane są z bardziej wewnętrznych punktów względem środka zderzenia. Następnie mgr Szymański porównał przewidywane i doświadczalne przebiegi funkcji korelacji dla par  $\pi K$ . Jak ukazuje tabela 7.5, parametry  $R_{\text{out}}$  i  $\mu$  są w granicach niepewności wzajemnie zgodne. Natomiast Autor nie odnotował, że profile funkcji korelacji (na rys. 7.32 i 33) w przypadku Therminator2 wykazują systematyczne osłabienie względem eksperymentu.

**Podsumowując**, przedstawiona dysertacja zawiera bardzo obszerny materiał badawczy: mamy tu 3 energie wiązki, 3 rodzaje par hadronów nieidentycznych, a dla jednej z energii – 3 centralności. W każdym przypadku funkcja korelacji została zrutowana w 2 parametryzacjach. Autor dokonał analizy szeregu czynników mających wpływ na niepewności systematyczne wyników. Ponadto, przedstawiono przewidywania dwóch kodów teoretycznych, konfrontując je tak wzajemnie, jak i z wynikami doświadczalnymi, co wykazało ciekawe różnicowanie się przewidywań. W pracy pojawia się szereg nieścisłości, ale moim zdaniem nie ma wątpliwości, że po doszlifowaniu jest to materiał na porządne publikacje, posuwające wiedzę tematyczną do przodu. Podkreślić tu też należy obfitość referatów na konferencjach międzynarodowych (w tym 2 proszone) i publikacji z małą liczbą autorów (7). Autor uczestniczył w eksperymencie, z którego dane opracował oraz nadzorował funkcjonowanie detektorów.

Moim zdaniem, dysertacja mgr inż. Pawła Szymańskiego bez wątpienia **spełnia wymagania** stawiane pracom doktorskim przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Dlatego **wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Pawła Szymańskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego**.

Ponadto, z uwagi na bardzo znaczną objętość przebadanego materiału, konsystentną analizę niepewności systematycznych oraz znaczną ilość wygłoszonych referatów (w tym 2 proszone) i publikacji z max. trzema autorami (7 prac), **wnoszę o wyróżnienie niniejszego doktoratu**.

Krzysztof Piasecki