

dr hab. Paweł Staszal, prof. UJ
Instytut Fizyki Uniwersytet Jagielloński
ul. prof. Stanisława Łojasiewicza 11
30-348 Kraków
tel. (12) 664 4846
e-mail: ufstasze@if.uj.edu.pl

Kraków 25.09.2023

Recenzja pracy doktorskiej pani mgr Diany Pawłowskiej
pod tytułem
**“Femtoscropy of Strange Mesons Produced in
Relativistic Au+Au Collisions at the STAR
Experiment”**

Rozprawa pani mgr Diany Pawłowskiej dotyczy badania rozmiarów źródeł emisji neutralnych i naładowanych kaonów powstających w reakcjach ciężkich jonów przy energii $\sqrt{s_{NN}} = 39$ GeV i $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, badanych w ramach eksperymentu STAR na Relatywistycznym Zderzacz Ciężkich Jonów (RHIC), przy wykorzystaniu zjawiska interferencji kwantowej.

Dokładne analizy dostępnych danych dla widm hadronów produkowanych w reakcjach między ciężkimi jonami na akceleratorach SIS18/GSI, AGS/BNL oraz SPS/CERN wskazują, że mechanizm tej produkcji jest zgodny z prostym modelem zakładającym lokalną równowagę termiczną wraz z równoczesną kolektywną ekspansją produkowanych układów jądrowych. Ekspansja w kierunku poprzecznym uwidacznia się w charakterystycznej zależności nachylenia widm masy poprzecznej (lub pędu poprzecznego) od masy rejestrowanych hadronów. Wielkość poprzecznego pływu rośnie wraz energią wiązek od SIS18 do AGS osiągając wysycenie przy pośrednich energiach osiągniętych na akceleratorze SPS. Co ciekawe wysycenie to utrzymuje się aż do energii osiągniętych na zderzaczach RHIC/BLN i LHC/CERN.

Jedno-cząsteczkowe obserwacje dają jedynie informację uśrednioną po czasowo-przestrzennej ewolucji układów. Okazuje się, że wgląd w poszczególne fazy ewolucji można uzyskać dzięki dwucząstkowym pomiarom korelacyjnym. Szczególną rolę odgrywa tutaj metoda interferometryczna zaproponowana w latach 50-tych XX wieku

przez Hamburego-Browna oraz Twiss'a (HBT) zastosowana do pomiaru rozmiarów gwiazd, a później rozwinięta na potrzeby fizyki cząstek elementarnych oraz fizyki jądrowej.

Badanie reakcji jądrowych przy użyciu tej właśnie metody jest tematem przedłożonej dysertacji doktorskiej Pani mgr Diany Pawłowskiej. Dysertacja napisana jest w języku angielskim, zawiera 147 stron, składa się ze wstępu, ośmiu rozdziałów (włączając w to podsumowanie) oraz dwóch dodatków. Spis literatury obejmuje 108 pozycji oddając aktualny stan wiedzy związanej z tematem pracy.

We wstępie swej pracy Pani mgr D. Pawłowska przedstawia podstawy tzw. Modelu Standardowego oraz zamieszcza krótkie wprowadzenie do fizyki zderzeń relatywistycznych jonów podając przegląd najważniejszych wyników eksperymentalnych uzyskanych w tej dziedzinie przez ostatnie dziesięciolecie.

W rozdziale trzecim Autorka koncentruje się na przedstawieniu dwóch modeli pozwalających na opis zderzeń ciężkich jonów przy wysokich energiach, mianowicie UrQMD i TERMINATOR-2. Oba modele posiadają aplikacje typu Monte Carlo pozwalające na generowanie zdarzeń fizycznych. W dalszych rozdziałach obserwowalne femtoskopowe wygenerowane przy użyciu tych modeli są porównywane w uzyskanymi przez Panią Pawłowską wynikami eksperymentalnymi.

Kolejny rozdział podaje podstawowe informacje o systemie akceleratorowym RHIC oraz opisuje najważniejsze komponenty eksperymentu STAR, jak komory projekcji czasowej czy detektory czasu przelotu. Autorka skupia się na tych cechach układu detekcyjnego, które mają bezpośredni wpływ na prowadzone przez nią analizy.

Rozdział trzeci został poświęcony przedstawieniu współczesnego formalizmu teoretycznego rozwiniętego na potrzeby badań femtoskopowych. Wprowadzona zostaje definicja funkcji korelacji w przestrzeni pędowej dla identycznych cząstek w szczególności dla identycznych bozonów. W szczególności omówiona jest trójwymiarowa parametryzacja źródła, która pozwala na charakterystykę rozmiarów źródła w kierunku podłużnym (kierunek wiązki) oraz w kierunku poprzecznym do wiązki. Przedyskutowane są również szczegółowo efekty mające wpływ na kształt funkcji korelacyjnej jak oddziaływanie kulombowskie i jądrowe cząstek w stanie końcowym. Autorka podaje dokładną parametryzację funkcji korelacyjnych Lednicki-iego-Lyuboshitza używanej przez nią do opisu eksperymentalnych funkcji korelacji dla neutralnych kaonów. Funkcja ta oparta jest na modelu, który pozwala opisać efekty związane z oddziaływaniem silnym w stanie końcowym. Zostały również podane cztery zestawy parametrów funkcji korelacyjnych oznaczone jako Antonelli, Achasov2001, Achasov2003 oraz Martin, używane przez Autorkę w dalszej części pracy. Rozdział kończy się przeglądem najważniejszych wyników analiz femtoskopowych uzyskanych w ramach eksperymentu STAR dla reakcji Au+Au w szerokim zakresie energii od $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ GeV do $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV dla identycznych naładowanych pionów oraz dla eksperymentu ALICE dla reakcji Pb+Pb dla energii $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, dla kilku różnych kombinacji par identycznych cząstek: $\pi^\pm\pi^\pm$, $K^\pm K^\pm$, $K_S^0 K_S^0$, $\bar{p}\bar{p}$, pp .

Rozdział szósty poświęcony jest analizie kształtu funkcji korelacji dla par mezonów $K_S^0 K_S^0$ w zależności od uwzględnienia efektów kwantowych (jak kondensacja Bosego-Einsteina) oraz efektów związanych z jądrowym oddziaływaniem w stanie końcowym dla różnych długości korelacji oraz różnych rozmiarów źródeł. Rozdział ten powstał zapewne z myślą o przygotowaniu czytelnika do lepszego zrozumienia tego, jak różne efekty wpływają na kształt obserwowanych funkcji korelacyjnych.

W rozdziale siódmym zawarty został szczegółowy opis analizy danych. Autorka bardzo dokładnie opisuje procedury zastosowane do odrzucenia zdarzeń zlokalizowanych zbyt daleko od nominalnego punktu interakcji, do selekcji zdarzeń o wybranym stopniu centralności oraz do identyfikacji zrekonstruowanych śladów cząstek. Opisy uzupełnione są wieloma rysunkami, które w prosty sposób tłumaczą istotę i efekty zastosowanych cięć. Selekcja centralności zderzeń bazuje na monotonicznej zależności krotności cząstek zrekonstruowanych od parametru zderzenia, co jest standardową metodą stosowaną w badaniach zderzeń ciężkich jonów. Ze względu na ograniczoną krotność K^0 w pojedynczych zdarzeniach, analizę fizyczną przeprowadzono dla trzech zakresów centralności, mianowicie dla zdarzeń centralnych (0-10%), zdarzeń niecentralnych (10-70%) oraz dla zdarzeń (0-70%), które autorka określa jako zdarzenia minimalnej selekcji (*minimum bias*), co nie do końca jest odpowiednim określeniem biorąc pod uwagę definicję zakresu centralności. Omawiany rozdział zawiera również dokładny opis rekonstrukcji i selekcji dla naładowanych kaonów oraz dla mezonów K_S^0 . Aby dokonać selekcji K_S^0 Pani Pawłowska stosuje osiem cięć bazujących na analizie topologii rozpadu $K_S^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ oraz na konstrukcji Armenteros'a-Podolanski-ego. W kolejnej części tego rozdziału Autorka omawia niektóre efekty detektorowe mające wpływ na jakość i krotność zrekonstruowanych śladów. Mowa tutaj o efekcie podziału (*splitting effect*) oraz o efekcie łączenia się śladów. Rozdział kończy się badaniem wpływu tzw. stopnia czystości rekonstrukcji oraz rozdzielczości pędowej na kształt femtoskopowej funkcji korelacyjnej. Pierwsza poprawka wyznaczana jest na podstawie czystości (*purity*) identyfikacji cząstek tworzących wyselekcjonowane pary. Dla naładowanych kaonów czystość rekonstrukcji jest na poziomie 99%, dla kaonów neutralnych czystość określona jest na podstawie wielkości tła kombinatorycznego w obrzazie masy niezmienniczej mezonów K_S^0 . Wpływ eksperymentalnej rozdzielczości pędowej był badany za pomocą symulacji Monte Carlo. Badania te pokazały, że rozdzielczość pędowa na poziomie 2% – 4% ma zaniedwywalny wpływ na wartości funkcji korelacyjnych ($< 0.02\%$).

Rozdział ósmy przedstawia femtoskopowe funkcje korelacyjne dla par $K_S^0 K_S^0$ oraz $K_S^0 K^\pm$ otrzymane dla energii $\sqrt{s_{NN}} = 39$ GeV i $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV dla trzech wspomnianych wcześniej zakresów centralności. Rozdział podaje funkcje korelacyjne dla neutralnych kaonów bez poprawek (*raw functions*) oraz przedstawia szczegółowe analizy, które doprowadziły do określenia najbardziej optymalnych parametrów DL (> 3 cm) oraz DCL (< 0.6 cm) używanych w procesie rekonstrukcji K_S^0 , a w konsekwencji do określenia ostatecznych poprawek do funkcji korelacyjnych ze względu na czystość

rekonstrukcji K_S^0 . Na rysunku 8.6 Autorka prezentuje funkcje korelacyjne dla obydwu energii przed i po uwzględnieniu poprawek. W obszarze niskich q_{inv} zastosowane poprawki prowadzą do redukcji funkcji korelacyjnych o kilka procent, a effect jest wyraźnie mniejszy od wartości błędów statystycznych.

Dopasowanie funkcji teoretycznych do poprawionych funkcji korelacyjnych pozwoliło Pani Pawlowskiej na uzyskanie informacji o parametrach femtoskopowych badanych źródeł. Uzyskane wartości parametrów R i λ zostały zbiorczo przedstawione w tabeli 8.3 dla energii $\sqrt{s_{NN}} = 39$ GeV oraz w tabeli 8.4 dla energii $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV dla trzech rozważanych zakresów centralności oraz dla różnych wersji użytych do dopasowania funkcji korelacyjnych mianowicie, dla rozkładu Gaussa i czterech wspomnianych wcześniej wersji funkcji korelacyjnych w ramach modelu Lednický-ego - Lyuboshitza. Dalej, w rozdziale ósmym opisana została analiza błędów systematycznych. Autorka rozważa nieokreśloność wyznaczonych funkcji korelacyjnych ze względu na następujące efekty:

- ze względu na wariację parametru DCA (*Distance of Closest Approach*),
- ze względu na wariację parametru $N\sigma$,
- ze względu na wariację parametru R określającego minimalną odległość pomiędzy wierzchołkami rozpadu mezonów K_S^0 będących w parze,
- ze względu na rozdzielczość pędową, oraz
- ze względu na zakres dziedziny dopasowania teoretycznych funkcji korelacyjnych w q_{inv} .

Zakresy rozważanych wariacji oraz wynikające stąd cząstkowe błędy parametrów femtoskopowych R i λ zostały podane w tabelach 8.6 oraz 8.8 odpowiednio dla $\sqrt{s_{NN}} = 39$ GeV i $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV i dla trzech rozważanych zakresów centralności. W oddzielnych tabelach zostały również ujęte wartości wariacji R i λ ze względu na wersję dopasowywanej teoretycznej funkcji korelacyjnej.

Dokładnie takie samo podejście zostało zastosowane do analizy femtoskopowych funkcji korelacyjnych dla mieszanych par $K^0 K^\pm$.

W rozdziale dziewiątym Pani Diana Pawłowska podsumowuje i dyskutuje uzyskane wyniki. Są one następujące:

- dla obydwu badanych energii i rodzajów par kaonów obserwowane są większe promienie źródeł dla bardziej centralnych reakcji,
- promienie źródeł uzyskane dla par $K_S^0 K_S^0$ dla zakresu centralności od 0% do 70% rosną wraz ze wzrostem energii,

- kształt femtoskopowych funkcji korelacyjnych dla neutralnych kaonów jest zgodny z efektami kwantowej statystyki jak również z oddziaływaniem w stanie końcowym poprzez rezonanse $f_0(980)$ i $a_0(980)$,
- kształty femtoskopowych funkcji korelacyjnych dla neutralnych par $K_S^0 K^\pm$ można opisać poprzez oddziaływanie w stanie końcowym poprzez rezonans $a_0(980)$.

Dwa ostatnie i bardzo istotne wnioski bazują na badaniu zgodności opisu eksperymentalnych funkcji korelacyjnych z funkcjami teoretycznymi, które uwzględniają określony efekt (bądź nie uwzględniają). Na przykład, rozkład Gaussa, który dobrze opisuje tylko efekty statystyki kwantowej nie jest w stanie dobrze opisać otrzymanych eksperymentalnie funkcji korelacyjnych. Istotna część wniosków odnosi się do porównania parametrów femtoskopowych dla par $K^0 K^0$ oraz $K^0 K^\pm$, które to porównanie pozwala na wyciągnięcie konkluzji co do natury rezonansu $a_0(980)$, mianowicie tego, czy stan ten można interpretować jako tetrakwark. Wyniki prezentowane w omawianej pracy wskazują na możliwość interpretacji rezonansu $a_0(980)$ jako tetrakwarku szczególnie przy opisie funkcji korelacyjnych w ramach modelu Lednickiego-Lyuboshitza z zestawem parametrów oznaczonych jako *Antonelli*.

Wyniki uzyskane w pracy uważam za znaczące i bardzo interesujące. Szczególnie interesująca jest możliwość badania natury rezonansu $a_0(980)$ metodami femtoskopowymi. Plany kontynuacji tych badań Pani Pawłowska zawarła w rozdziale 9.6 *future Plans*. Praca robi bardzo dobre wrażenie również z powodu szczegółowej analizy błędów systematyczny opisanej w rozdziale ósmym.

Do obowiązków recenzenta należy ocena i wskazanie zauważonych usterek pracy. Jak już zważyono, praca napisana jest w języku angielskim. Pod względem językowym praca jest przejrzysta i na ogół poprawna, chociaż zdarzają się jednak w niej błędy stylistyczne, skróty myślowe, błędów typowo edytorskich jest jednak niewiele.

Moje bardziej merytoryczne uwagi podam w kolejności w jakiej odpowiednie rozdziały pojawiały się w pracy:

1. Z opis diagramu fazowego w końcowej części rozdziału 2.2 można odnieść wrażenie, że pokazana struktura diagramu fazowego QCD jest dobrze poznana i że to poznanie opiera się na głównie na obliczeniach QCD. Tak naprawdę obecnie dostępne obliczenia w ramach QCD pozwalają na otrzymywanie wiarygodnych wyników tylko w obrębie μ_B bliskich zeru.

2. W rozdziale 2.3 zdanie: *“This will allow one to recreate the condition that took place at the time of the creation of the Universe”* nie jest zgodne z naszą współczesną wiedzą.

3. W rozdziale czwartym Autorka podaje, że pierwsze zderzenia jąder złota otrzymane na zderzaczu RHIC miały energię $\sqrt{s_{NN}} = 62$ GeV. Nie jest to jednak prawdą. Pierwsze testowe wiązki na RHIC-u prozwoły na uzyskanie zderzeń przy energii $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV.

4. Rozdział 5.3, zadanie po formule (5.3): W zdaniu “*This function must be symmetric for baryons...*”, *baryons* należy zastąpić przez *bosons*.

5. Rozdział 5.8 (strona 52: trudno zgodzić się ze zdaniem *Thanks to the large statistics, the measurements agree with the theory, ...*, to raczej duża statystyka pozwala wykryć niezgodności pomiarów z opisami teoretycznymi, dlatego aby móc falsyfikować teorie dążymy do uzyskania dużej statystyki eksperymentalnej.

6. Rozdział 7.1.1: na oznaczenie tej samej wielkości użyto innego symbolu w tekście (V_Z), a innego na rysunku z *Vertex*. To zaklasyfikowałbym jako błąd edytorski.

7. Rysunek 7.2, lewy panel: Widać wyraźny brak ciągłości między niektórymi zakresami N_{ch} , np. rozkład dla centralności 5 – 10% (kolor brązowy) jest znacznie niższy niż dla zakresów sąsiednich.

8. Rozdział 7.2.1, rysunek 7.15: Zastosowany do dopasowania rozkład Gaussa nie opisuje rozkładu masy niezmienniczej dla K_S^0 . Dlaczego zastosowano ten właśnie rozkład?

9. Rozdział 7.2.2, rysunek 7.19: nie podano jednostek dla σ_p , σ_Θ i σ_ϕ . Pokazana zależność σ_p od p_{raw} kończy się na zakresie $p_{raw} \approx 1.4$ GeV/c, znacznie niżej niż dla σ_Θ i σ_ϕ . Jaka jest tego przyczyna?

10. Rozdział 7.2.2: formuła 7.25 nie daje jednoznacznej informacji o wartości kąta azymutalnego w zakresie od 0 do 2π .

11. Rozdział 8.2, pytanie: dlaczego dla energii $\sqrt{s_{NN}} = 39$ GeV statystyka była wystarczająca dla analizy par $K_S^0 K_S^0$ a nie jest wystarczająca dla par $K_S^0 K^\pm$?

Pomimo zauważonych błędów i niedociągnięć, uważam rozprawę pani mgr Diany Pawłowskiej za pracę bardzo wartościową, która stanowi istotny wkład do lepszego poznania mechanizmu zderzeń ciężkich jonów, szczególnie w aspekcie dynamiki rozmiarów ewoluującego “fireball’a”. Praca stanowi ważny wkład w poznanie charakteru oddziaływania emitowanych kaonów neutralny w stanie końcowym. Autorka pracy sama nie brała udziału w pomiarach analizowanych przez siebie danych, jednak zdobyła już duże doświadczenie eksperymentalne biorąc udział pomiarach eksperymentu STAR w latach 2018-2022. Sposób w jaki Pani Daria Pawłowska analizuje dane eksperymentalne świadczy o jej dużej intuicji eksperymentalnej oraz o zaawansowanej umiejętności rozumienia znaczenia zebranych danych. Autorka wykazała się również wysokimi umiejętnościami w prowadzeniu wielu wątkowych analiz czego przykładem jest przedstawiona w pracy bardzo solidna analiza błędów systematycznych.

Sądzę, że praca spełnia wszelkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie Autorki do publicznej obrony.


Paweł Staszal