

2017 -05- 17

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

Kraków 9.05.2017

Recenzja pracy doktorskiej pani mgr Volhy  
Charviakovej  
pod tytułem  
**“Hadron-hadron interferometry in  
nucleus-nucleus collisions at 1.9A GeV”**

Rozprawa pani mgr Volhy Charviakovej dotyczy badania rozmiarów źródeł emisji protonów i pionów powstających w reakcjach ciężkich jonów przy energii 1.9A GeV wykorzystując zjawisko interferencji kwantowej zachodzące przy równoczesnym pomiarze dwóch identycznych cząstek.

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 osiąganych na akceleratorze SPS.

Jedno-cząsteczkowe obserwable 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 odrywa 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 V. Charviakovej. Dysertacja napisana jest w języku angielskim, zawiera 140 stron, składa się ze wstępu, sześciu rozdziałów oraz podsumowania. Spis literatury obejmuje 124 pozycje oddając aktualny stan wiedzy związanej z tematem pracy.

Na wstępie swej pracy pani mgr V. Charviakova w konsystentny i jasny sposób przedstawia historię badań naukowych związanych z wykorzystaniem metody HBT, wyjaśniając istotę tej metody na kilku poglądowych rysunkach i przy okazji wprowadza najistotniejsze zmienne używane w analizie. Rozdział kończy się opisem pionierskich prac i podejść teoretycznych związanych z metodą HBT w dziedzinie fizyki cząstek elementarnych. Tutaj też pojawia się termin "fentoskopia" określający metodę uzyskiwania informacji o rozmiarach systemów posiadających rozmiary rzędu jednego do kilku femtometrów.

W rozdziale drugim Autorka wprowadza współczesny formalizm teoretyczny rozwinięty na potrzeby badań fentoskopowych. Wprowadzona zostaje definicja funkcji korelacji w przestrzeni pędowej dla identycznych cząstek w szczególności dla identycznych pionów oraz identycznych protonów. 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 związane z oddziaływaniem kulombowskim cząstek w stanie końcowym jak również efekty związane z dynamiczną ewolucją źródła. Rozdział kończy się opisem sposobu w jaki Autorka wiąże wielkości teoretyczne występujące w funkcji korelacji z dostępnymi obserwacjami eksperymentalnymi. Użyta metoda do odtworzenia części skorelowanej badanych zdarzeń oraz referencyjnej części nieskorelowanej opiera się na powszechnie stosowanej procedurze mieszania zdarzeń. Autorka opisuje tutaj również sposób wyznaczania eksperymentalnej funkcji korelacji dla różnych warunków zakładanych na wielkości charakteryzujące poszczególne zdarzenia oraz wielkości charakteryzujące pary cząstek jak. np. średni pęd poprzeczny czy całkowita energia kinetyczna pary.

Trzeci rozdział poświęcony jest przedstawieniu infrastruktury akceleratorowej ośrodka badawczego GSI oraz opisowi detektora FOPI, przy użyciu którego zebrano dane eksperymentalne analizowane przez panią mgr Charviakovą. Autorka przedstawia kompletny układ detektora FOPI podając jednocześnie dokładny opis jego części składowych. W rozdziale tym omówione zostały zastosowane metody do wyznaczenia śladów produkowanych

cząstek, identyfikacji cząstek oraz wyznaczanie globalnych charakterystyk rejestrowanych zdarzeń jak stopień centralności zderzenia jąder. Zebrane dane analizowane przez panią Charviakovą pochodzą z dwóch pomiarów:  $^{27}\text{Al} + ^{27}\text{Al}$  oraz  $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$  przy energii 1.9A GeV przeprowadzonych odpowiednio w roku 2005 oraz 2008. Autorka oznacza te pomiary jako eksperymenty S279 oraz S325e. Ważną częścią tego rozdziału jest informacja o układzie trygera użytego do selekcji zdarzeń *on-line*. Według podanych informacji dla reakcji Al + Al zastosowany układ trygera odrzucał część zdarzeń peryferyjnych i semi-centralnych prowadząc do selekcji zdarzeń o wysokim stopniu centralności na poziomie 15% całkowitego geometrycznego przekroju czynnego. Dla reakcji Ni + Ni selekcja była mniej restrykcyjna i prowadziła do rejestracji zdarzeń odpowiadających 55% całkowitego geometrycznego przekroju czynnego. Taka selekcja pozwoliła na analizę danych z tej reakcji dla dwóch odrębnych klas stopnia centralności zdarzeń.

W rozdziale czwartym zawarty został szczegółowy opis analizy danych. Autorka bardzo dokładnie opisuje procedury zastosowane do odrzucenia zdarzeń stanowiących tło eksperymentalne (zdarzenia poza tarczą), do selekcji zdarzeń o wybranym stopniu centralności oraz do identyfikacji zrekonstruowanych śladów cząstek. Opis uzupełniony jest wieloma rysunkami, które w prosty sposób przedstawiają efekty zastosowanych cięć. Zależność stopnia centralności zdarzeń od krotności mierzonych cząstek zbadana została przy użyciu symulacji, w której do generacji zdarzeń fizycznych zastosowano model IQMD, zaś do transportu cząstek przez układ detekcyjny użyto programu GEANT. Wyniki symulacji, jak można było się spodziewać wskazują na monotoniczną zależność krotności cząstek od parametru zderzenia. Aby wyselekcjonować najbardziej centralne zdarzenia w reakcji Al + Al pani mgr Charviakova nakłada cięcie na krotność cząstek rejestrowanych w detektorze "Plastic Wall". Według autorki selekcja zdarzeń dla krotności większych niż 15 prowadzi do selekcji zdarzeń z zakresu parametru zderzenia od 0 do 2 fm (zdarzenia centralne). W podobny sposób określono parametry zderzenia dla reakcji Ni + Ni. Dla tej reakcji autorka wyróżnia dwie klasy centralności z zakresu parametru zderzenia 0 do 3.4 fm (zdarzenia centralne) oraz z zakresu 3.4 do 7 fm (zdarzenia peryferyjne). Za każdym razem używane jest ostre odcięcie na wartości parametru zderzenia. Te ostre odcięcia są z kolei wykorzystane do wyznaczenia zakresu liczby nukleonów biorących udział z zdarzeniem,  $N_{part}$  (w recenzowanej pracy używane jest oznaczenie  $A_{part}$ ). W tym celu zastosowany został czysto geometryczny model zakładający proporcjonalność  $N_{part}$  do objętości jąder w obszarze przekrywania się ich powierzchni w płaszczyźnie prostopadłej do osi wiązki. Uzyskane w tym rozdziale wartości  $N_{part}$  są bardzo ważne gdyż jak wynika z kolejnych rozdziałów wpływają na interpretację otrzymanych wyników.

Kolejne dwa rozdziały poświęcone są prezentacji otrzymanych wyników, które otrzymano przez porównanie uzyskanych eksperymentalnych funkcji korelacyjnych z przewidywaniami modelowymi. W rozdziale piątym autorka koncentruje się na badaniu funkcji korelacyjnej dla par protonów. Przedstawia wyliczone teoretyczne funkcje korelacyjne bazujące na modelu Koonina z tzw. potencjałem Reid'a z miękkim rdzeniem dla oddziaływania proton-proton. Przedstawione funkcje uwzględniają efekt aparaturowy związany z eksperymentalną rozdzielczością pędową. Dla niewielkich wartości względnego pędu cząstek widać silną zależność wartości funkcji korelacji od przyjętego w modelu rozmiaru źródła  $R_0$ . W zakresie pędu względnego, gdzie zależność funkcji korelacji od  $R_0$  jest najsilniejsza ( $< 50$  MeV/c) autorka dopasowuje teoretyczną funkcję korelacji do funkcji eksperymentalnej stosując standardową metodę minimalizacji funkcji  $\chi^2$  i uzyskuje w ten sposób rozmiar źródła  $R_0$  odpowiadający najlepszej zgodności. Ta sama procedura dopasowania zastosowana jest do wyselekcjonowanych centralnych zderzeń Al + Al oraz do dwóch wybranych klas centralności dla reakcji Ni + Ni. W wyniku opisanych wyżej procedur Autorka otrzymała zależność rozmiaru źródła od  $N_{part}$ , która przedstawiona jest na rysunku 5.6. Wyniki przedstawione zostały również w formie tabeli, gdzie obok wartości  $R_0$  podane są błędy systematyczne oraz błędy statystyczne. Błędy te są porównywalne i stanowią około 10% wyznaczonych wartości  $R_0$ . Uzyskane wyniki wskazują na liniową zależność  $R_0$  od  $N_{part}$ . Pani mgr V. Charviakova wyznaczyła również zależność rozmiaru źródła emitującego protony od średniego pędu poprzecznego oraz od całkowitej energii kinetycznej pary skorelowanych protonów. Otrzymane wyniki wskazują na wyraźne zmniejszanie się  $R_0$  wraz ze wzrostem średniej wartości pędu poprzecznego, podobny efekt występuje dla zależności od całkowitej energii kinetycznej par. Autorka dokonuje porównania swoich rezultatów z eksperymentalną systematyką zależności rozmiarów źródła od całkowitej energii wiązki. Otrzymane wyniki w tej pracy są zgodne - biorąc pod uwagę błędy pomiarowe - z liniową zależnością wynikającą z wcześniejszych pomiarów dla reakcji Ca + Ca (FOPI) w zakresie od 400A MeV do 1.5 GeV oraz dla reakcji Ar + KCl (HADES) dla energii 1.76A GeV. Wyniki uzyskane w tej pracy pozwoliły również określić zależność  $R_0$  do pierwiastka sześciennego z  $N_{part}$  dla energii 1.9A GeV.

Szósty rozdział pracy pani mgr Charviakovej poświęcony jest badaniu funkcji korelacyjnej dla par identycznych pionów. Do określenia parametrów źródła par identycznych pionów Autorka używa zmodyfikowanej wersji teoretycznej funkcji korelacji zaproponowanej przez Bowlera i Sinyukowa. W nowej formule pojawia się parametr  $\lambda$  określający stopień niekoherencji źródła. Użyta zostaje jednowymiarowa jak i trójwymiarowa parametryzacja rozmiarów źródła. Przedstawione przez Autorkę dopasowania pokazują, że formuła

zaproponowana przez Bowlera-Sinyukowa bardzo dobrze opisuje otrzymane eksperymentalnie funkcje korelacji dla pionów dodatnich. W pierwszej kolejności Autorka bada korelacje dla pionów dodatnich dla centralnych zderzeń  $Al + Al$  oraz dla trzech klas centralności dla zdarzeń  $Ni + Ni$  (centralne, semi-centralne oraz peryferyjne). Analiza dostarczyła dużej liczby ciekawych wyników, które zostały zebrane w kilku tabelach oraz przedstawione na rysunkach. Autorka uzyskała zależności  $R_0$ ,  $R_{side}$ ,  $R_{out}$ ,  $R_{long}$ ,  $\lambda$  oraz czasu życia źródła od średniego pędu poprzecznego, od całkowitej energii kinetycznej par oraz od liczby nukleonów uczestniczących w zderzeniu. Ze względu na ich dużą liczbę trudno w tym miejscu omówić wszystkie wyniki uzyskane przez Autorkę. Proponuje więc przejść od razu do konkluzji pracy. W konkluzjach Autorka pisze o wzroście rozmiarów źródła wraz ze wzrostem  $N_{part}$ . Co więcej daje się zauważyć liniową zależność pomiędzy  $R_0^3$  oraz iloczynem  $R_{side}R_{out}R_{long}$  a  $N_{part}$ . Ponieważ zależność iloczynu  $R_{side}R_{out}R_{long}$  od  $N_{part}$  ekstrapolowana do  $N_{part} = 0$  daje zerowe rozmiary źródła (jak należałoby się tego spodziewać) Autorka słusznie konkluduje, iż parametryzacja trójwymiarowa pozwala na dokładniejszy opis kształtu źródła w porównaniu do parametryzacji jednowymiarowej. Dla reakcji  $Ni + Ni$  otrzymano również wartość stosunku  $R_{out}/R_{side}$  na poziomie 1.2, która nie zależy w znaczący sposób od rozmiarów źródła. Czas życia źródła emitującego piony rośnie natomiast ze wzrostem  $N_{part}$ . Wyniki pani Charviakovej wskazują na wyraźne zmniejszanie się wyżej wymienionych parametrów określających rozmiary źródła ( $R_0$ ,  $R_{side}$ ,  $R_{out}$ ,  $R_{long}$ ) wraz ze wzrostem średniego pędu poprzecznego oraz całkowitej energii kinetycznej pary skorelowanych pionów. Tak jak w przypadku par protonów Autorka interpretuje to zachowanie jako efekt kolektywnej ekspansji źródła. Cząstki o większych pędach (energii) są emitowane we wczesnej fazie ewolucji, gdy źródło ma mniejsze rozmiary. Jeżeli chodzi o czas życia  $\tau$  źródła pionów oraz parametr jego niekoherencji  $\lambda$ , obie te wielkości zmniejszają się wraz ze wzrostem średniego pędu poprzecznego par pionów, zarówno dla danych z  $Al + Al$ , jak i dla danych z reakcji  $Ni + Ni$ . Trochę inną sytuację mamy jednak w przypadku zależności tych wielkości od całkowitej energii kinetycznej. W tym przypadku  $\tau$  maleje ze wzrostem całkowitej energii kinetycznej zaś parametr  $\lambda$  wzrasta. Szkoda, że pani mgr Charviakova pozostawiła te ciekawe wyniki bez komentarza. Analiza została przeprowadzona również dla par ujemnych pionów. Wyniki przedstawione w formie tabeli są zgodne z tymi, uzyskanymi dla par pionów dodatnich dlatego nie zostały już bardziej szczegółowo przez Autorkę przedyskutowane.

Do obowiązków recenzenta należy ocena i wskazanie zauważonych usterek pracy. Jak już zważyliśmy, 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 oraz błędy typowe

edytorskie. Przykładem może być odwoływanie się w tekście do rysunków i rozdziałów z podaniem błędnych numerów, czy też użycie terminu “atomic number” zamiast “mass number” na określenie masy jądra. W tekście pojawia się również egzotyczny pierwiastek  $^{28}_{58}\text{Ni}$ . W podrozdziale 3.2 wyliczenie gęstości powierzchniowej tarczy aluminiowej jest niepoprawne (pomyłka o czynnik 10). Nie jest to jednak błąd czysto edytorski, gdyż ta sama wartość pojawia się w tekście oraz w podsumowującej wyniki tabeli 3.1. O ile sama procedura określenia stopnia centralności zdarzeń wydaje się być poprawna to dziwi trochę użycie ostrego odcięcia na zakres zmienności parametru zderzenia dla danego cięcia na liczbę rejestrowanych śladów w detektorze “Plastic Wall” (PMUL). Symulacje pokazują przecież znaczące przekrywanie się zdarzeń w parametrze zderzenia dla  $\text{PMUL} > 15$  i  $\text{PMUL} < 15$ . Brak dyskusji dotyczącej dokładności określenia liczby nukleonów biorących udział w reakcji w związku z tą niejednoznacznością selekcji jest według mnie istotnym zaniedbaniem. W rozdziale czwartym “Data analysis” został umieszczony podrozdział 4.3 pod tytułem “Reaction plane reconstruction”. Rozdział ten oprócz tego, że zawiera błędy merytoryczne, to również w żaden sposób nie koresponduje z całością pracy. Informacja o płaszczyźnie reakcji nie jest wykorzystywana w analizach przedstawionych w kolejnych rozdziałach. Można odnieść wrażenie, że rozdział ten znalazł się w pracy przez pomyłkę. Ostatnia krytyczna uwaga dotyczy dyskusji analizy błędów systematycznych, której w pracy poświęcono bardzo mało miejsca (w zasadzie jedno zdanie), a przecież analiza ta stanowi ważną część warsztatu fizyka-eksperymentatora i sądzę, że w pracy doktorskiej powinno się poświęcić jej więcej miejsca.

Pomimo zauważonych błędów i niedociągnięć, uważam rozprawę pani mgr Volhy Charviakovej za pracę bardzo wartościową, która stanowi istotny wkład do lepszego poznania mechanizmu zderzeń ciężkich jonów, szczególnie w aspekcie dynamiki rozmiarów ewoluującego “fireball’a”. Jak się domyślam Autorka pracy sama nie brała udziału w pomiarach, lecz sposób w jaki analizuje dane eksperymentalne świadczy o jej dużej intuicji eksperymentalnej oraz o zaawansowanej umiejętności rozumienia znaczenia zebranych danych. Autorka wykazała się również wysokimi umiejętnościami wykonywania teoretycznych obliczeń numerycznych.

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

Paweł Staszek