

Recenzja rozprawy doktorskiej
zatytułowanej:
***Femtoscopy of Strange Mesons Produced in Relativistic Au+Au Collisions
at the STAR Experiment***
autor: **Diana Pawłowska**
promotor: dr hab. Hanna Paulina Zbroszczyk (Politechnika Warszawska)

Mgr Diana Pawłowska przedstawiła napisaną po angielsku pracę zawierającą dziewięć rozdziałów poprzedzonych streszczeniem oraz zakończonych podsumowaniem Rozprawę uzupełnia spis literatury i dwa dodatki. Razem rozprawa liczy 170 stron (147+23). Strona VII rozprawy to streszczenie w języku polskim, toteż spełniony jest wymóg ustawy¹, która w Artykule 187 ust. 4 stwierdza: *Do rozprawy doktorskiej dołącza się streszczenie w języku angielskim, a do rozprawy doktorskiej przygotowanej w języku obcym również streszczenie w języku polskim.*

Tytuł rozprawy wskazuje, że dotyczy on aktualnego i ważnego tematu badawczego. Analizy femtoskopowe prowadzące do wyznaczenia strefy emisji w zderzeniach jądrowych wysokich energii oparte są najczęściej na powszechnie emitowanych mezonach π . Pomiar wykorzystujący mezony K (zawierające kwark lub antykwark dziwny) są rzadkie, a jeśli zostały przeprowadzone, to często brak im wystarczającej precyzji. Tymczasem kwestia rozmiaru źródła emitującego cząstki dziwne okazuje się być ciekawym zagadnieniem badawczym. Modele statystycznej hadronizacji, które nadspodziewanie dobrze opisują krotności cząstek emitowanych zarówno w zderzeniach jądro-jądro², jak i proton-proton³, osiągają ten poziom precyzji przy założeniu, że objętość obszaru kanonicznego cząstek dziwnych jest większa, niż dla cząstek bez dziwności. Wyniki eksperymentalne dotyczące rozmiarów strefy emisji często mają niewystarczającą precyzję w przypadku korelacji cząstek dziwnych, co uniemożliwia wyciągnięcie jednoznacznych konkluzji.

Te wysokie oczekiwania wobec pracy, wynikające z tak atrakcyjnej tematyki, zderzyły się z licznymi nieścisłościami zaobserwowanymi podczas lektury pierwszych rozdziałów. Dopiero merytoryczne informacje doświadczalne zawarte w rozdziałach opisujących wstępne

¹ Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, tekst jednolity: Dz. U. 2023 poz.742

² J. Cleymans, P.M. Lo, K. Redlich, N. Sharma, Phys.Rev. **C103**, 014904 (2021).

³ T. Matulewicz, K. Piasecki, J.Phys.G: Nucl.Part.Phys. **48**, 085004 (2021) and EPJ Web of Conferences **276**, 03012 (2023).

obliczenia modelowe, analizy danych eksperymentalnych oraz analizy korelacyjne ukazują znaczenie uzyskanych wyników i są dominujące dla pozytywnej oceny rozprawy.

Wspomniane wcześniej problemy pojawiają się już w końcowej części streszczenia. Jest tam stwierdzenie dotyczące konsekwencji porównania funkcji korelacji par neutralnych kaonów i par kaon neutralny i kaon naładowany. W tym miejscu czytelnik oczekuje odpowiedzi na postawione ważne zagadnienie struktury układu czterech kwarków, ale tej odpowiedzi nie ma. Znajdujemy ją dopiero w dalszej części rozprawy (w Rozdziale 9.4).

Rozdział pierwszy to krótkie wprowadzenie do podjętej tematyki badawczej oraz opis treści kolejnych rozdziałów. Pojawia się tam w pierwszym akapicie stwierdzenie, że odległości we Wszechświecie są nieskończone. Tego typu ogólne i mocne stwierdzenie jest, w świetle obecnej wiedzy, nieuzasadnione, jako że (i) Wszechświat rozszerza się od około 14 miliardów lat, (ii) uważamy, że prędkość światła jest prędkością graniczną, oraz (iii) nasze możliwości obserwacyjne ograniczają się tylko do obszaru, z którego to światło mogło dotrzeć do ziemskiego obserwatora. Na pytanie, czy Wszechświat jest nieskończony, w moim rozumieniu nauka nie umie teraz odpowiedzieć. Nazywanie zderzaczy RHIC i LHC eksperymentami jest też nieprecyzyjne, eksperymenty to ALICE czy STAR.

Rozdział drugi to dość obszerne i ciekawie napisane wprowadzenie do zjawisk zachodzących w oddziaływaniach cząstek przy wysokich energiach. Czytelnik otrzymuje kompendium wiedzy o zachodzących procesach, w zgodzie z obecnym rozumieniem zjawisk. Autorka podnosi (str. 6) zagadnienie ograniczeń Modelu Standardowego (MS), w większości słusznie zauważając problemy tego podejścia. Jednak nie zawsze mogę zgodzić się z Autorką, bowiem MS nie wymaga *explicitie* zerowej masy neutrin, może być łatwo rozszerzony o odpowiedni człon masowy. Szkoda tylko, że MS nie może przewidzieć wartości masy, a eksperymenty dostarczają tylko górne ograniczenie. Wśród wyników eksperymentalnych dotyczących wzmocnienia produkcji dziwności (str. 13) Autorka wymienia współpracę NA49 cytując artykuł o produkcji hiperonów Ξ przy jednej energii wiązki (pęd 158 AGeV/c). Uważam, że najciekawszym wynikiem tej współpracy było zbadanie⁴ zależności energetycznej stosunku produkcji K^+/π^+ , które stymulowało trwającą od ponad dekady aktywność współpracy NA61/SHINE starającej się zrozumieć zaobserwowany efekt maksymalnego ilorazu produkcji tych cząstek przy $s^{1/2}_{NN} \sim 8$ GeV. Ponadto, mam zastrzeżenia co do cytowanych tu artykułów: referencje 2-5 nie podają odnośników do stron internetowych. Wydaje mi się, że można znaleźć w literaturze ogólnodostępne prace przeglądowe dotyczące odkrycia bozonu Higgsa (na przykład rocznicowa edycja w Nature z 4 lipca 2022), bądź zacytować oryginalne prace współprac ATLAS i CMS. Podobne argumenty można podnieść wobec sprawy odkrycia niezerowej masy neutrin. W podpisie Rysunku 2.10 zabrakło informacji, że zmierzone krotności cząstek dziwnych są ograniczone do obszaru *midrapidity*, co jest uwidocznione w opisie osi pionowych tego rysunku.

Po wprowadzeniu (rozdział 2) Autorka przedstawia klarownie klasyfikację modeli teoretycznych, niezbędnych do opisu złożonego procesu zderzeń jąder atomowych przy energiach relatywistycznych. Potem koncentruje się na mikroskopowym modelu transportu (UrQMD) i modelu statystycznym (THERMINATOR2). Lista cząstek uwzględnianych w modelu UrQMD pokazuje złożoność tego świata cząstek uwzględnianą w zastosowaniu numerycznym. Opisujące zjawisko równanie transportu Boltzmann (równanie 3.1, szkoda, że Autorka nie nazywa tego równania jego powszechnie znaną nazwą) podaje podstawę fizyczną

⁴ C. Alt et. al, for NA49 Collaboration, Phys. Rev.C 77 (2008) 024903.

tych rachunków. Nieco więc dziwi, że zabrakło odpowiednich wzorów dla modelu statystycznej hadronizacji.

Z obowiązku recenzenta muszę też skorygować wartość parametru deformacji heksadekapolewej β_4 dla ^{238}U w Tabeli 3.3, bowiem znak tej wartości jest odwrotny (dodatni). Przy okazji warto zwrócić uwagę na znaczenie tej wartości dla interpretacji efektów kolektywnych⁵ oraz na fakt, że odbiega ona od wyznaczonej w pomiarach wzbudzenia kulombowskiego⁶ oraz pomiaru atomów mionowych⁷.

W Rozdziale 4 znajdziemy krótki, ale wystarczający opis zderzacza RHIC oraz eksperymentu STAR użytego przez Autorkę do otrzymania wyników przedstawionych w rozprawie. Zdarzają się drobne niezręczności („takes part as part of” na str. 30, czy „possibly significantly reconstruct” na następnej). Czytelnik nieznający detektora STAR byłby zainteresowany, z czego wynikają ograniczenia pędowe między 0,1 a 1 GeV/c (str. 32). W opisie detektora czasu przelotu (Rozdział 4.2.2) przydałaby się informacja o poziomie zgodności torów cząstek mierzonych w TPC z sygnałami obserwowanymi w TOF.

Kluczowe dla pracy zjawisko femtoskopii jest opisane obszernie w Rozdziale 5. Interpretacja zjawisk korelacyjnych, analiza trójwymiarowa w układzie LCMS, sprawa wyboru układu odniesienia oraz wpływ oddziaływań kulombowskich i silnych na obserwowane efekty są prawidłowo wprowadzane. Pewne nieścisłości dotyczą raczej niezbyt przemyślanych porównań. Nie ma gwiazd o rozmiarach 10^{15} m! Ten rozmiar jest podawany na str. 35 i 36. Największa rozmiarowo znana gwiazda (UY Scuti) ma promień około $1,2 \cdot 10^{12}$ m, a więc trzy rzędy wielkości mniejszy⁸. Metoda HBT nie mierzy odległości między gwiazdami, ale rozmiar jednej gwiazdy (str. 36). Wspomniane badania korelacji pionów z anihilacji proton+antyproton miały czterech, a nie trzech autorów (stąd skrót GGLP: Godhaber, Goldhaber, Lee, Pais, str. 36).

Analizy korelacyjne są prowadzone później dla czterech zestawów parametrów opisujących rezonanse $f_0(980)$ i $a_0(980)$, oznaczane jako: Antonelli, Achasov2001, Achasov2003 i Martin. Parametry tych modeli są wymienione w Tabeli 5.1. Niestety, brak jest komentarza, czym różnią się te parametryzacje, jakie były podstawy ich utworzenia, czy podawane parametry mają deklarowaną przez autorów dokładność.

W przeglądzie wyników eksperymentalnych (Rozdział 5.8) Autorka rozprawy skoncentrowała się na wynikach otrzymanych w eksperymencie STAR ($\text{Au}+\text{Au}$, $s^{1/2}_{\text{NN}} \sim 7\text{-}200$ GeV) i ALICE

⁵ Wouter Ryssens, Giuliano Giacalone, Björn Schenke, and Chun Shen, Evidence of Hexadecapole Deformation in Uranium-238 at the Relativistic Heavy Ion Collider, *Phys. Rev. Lett.* **130**, 212302 (2023)

⁶ C. E. Bemis, Jr., F. K. McGowan, J. L. C. Ford, Jr., W. T. Milner, P. H. Stelson, and R. L. Robinson, E2 and E4 Transition Moments and Equilibrium Deformations in the Actinide Nuclei, *Phys. Rev. C* **8**, 1466 (1973)

⁷ J. D. Zumbro, E. B. Shera, Y. Tanaka, C. E. Bemis, Jr., R. A. Naumann, M. V. Hoehn, W. Reuter, and R. M. Steffen, E2 and E4 Deformations in $^{233,234,235,238}\text{U}$, *Phys. Rev. Lett.* **53**, 1888 (1984)

⁸ B. Arroyo-Torres, M. Wittkowski, J.M. Marcaide, P.H. Hauschildt, The atmospheric structure and fundamental parameters of the red supergiants AH Scorpii, UY Scuti, and KW Sagittarii", *Astronomy & Astrophysics*. **554**: A76 (2013)

(Pb+Pb, $s^{1/2}_{NN}=2760$ GeV). Uważam, że warto tu było wspomnieć także o pomiarze korelacji $\pi\pi$ w układzie Au+Au otrzymanym przez współpracę HADES⁹ przy $s^{1/2}_{NN}=2,4$ GeV).

Do drobnych niedociągnięć można zaliczyć kilka niezręczności tekstowych (np. „linear combination of two-particle emission assumptions” na str. 37) czy też brak wyjaśnienia, co oznaczają „one- and two-channel fits” w opisie Tabeli 5.2 (tamże zabrakło opisu kolejności podawanych niepewności pomiarowych, należy się domyślać, że statystyczne pierwsze).

Rozdział 6 wprowadza czytelnika do najciekawszej części pracy, a mianowicie omawia specyfikę korelacji mezonów K. Obliczenia modelowe pokazują funkcje korelacji dla samego efektu korelacji kwantowych, wpływu oddziaływań silnych w stanie końcowym, efektu łącznego oraz różnic pojawiających się przy stosowaniu różnych podejść modelowych. To bardzo ważna część pracy, bo ułatwia rozumienie wyników eksperymentalnych.

Można zauważyć, że Autorka rozprawy bardzo dogłębnie uczestniczyła w analizie danych eksperymentalnych. Opisujący to zagadnienie Rozdział 7 zawiera kompletne i prawidłowo usystematyzowane informacje o procedurze analizy. Dopasowanie rozkładu masy niezmienniczej (Rysunek 7.15) pokazuje, że opis obserwowanego sygnału przez jedną funkcję Gaussa jest niewystarczający, wydaje mi się, że można było próbować innego kształtu (Breit-Wigner?). Na osi wspomnianego rysunku powinna być masa, a nie jej kwadrat. Dopasowanie zależności uwidocznionych na Rysunku 7.19 dostarczyło parametrów zawartych w Tabeli 7.5. Szkoda, że nie ma tam podanych niepewności, być może nie trzeba było stosować wielomianów aż tak wysokiego rzędu. Nie jest też podane, czy wartość χ^2 jest globalna, czy na stopień swobody.

Rozdziały 8 i 9 zawierają wszystkie uzyskane wyniki eksperymentalne (uzyskane w eksperymencie STAR w 2010 roku), przedstawione w dobrej kolejności i dobrze uzasadnione, oraz ich dyskusję. Jest też bardzo wartościowa analiza niepewności systematycznych. Autorka rozprawy skoncentrowała się na analizie korelacji par mezonów dziwnych: $K^0_s K^0_s$ oraz $K^0_s K^+$ i $K^0_s K^-$. W odróżnieniu od wcześniej badanych korelacji par naładowanych mezonów (tzn. $K^+ K^+$ i $K^- K^-$)¹⁰, badane w rozprawie układy nie wymagają uwzględniania znaczącego efektu oddziaływań kulombowskich. W przypadku par identycznych mezonów (tzn. $K^0_s K^0_s$) uwidacznia się wpływ korelacji kwantowych identycznych cząstek, a we wszystkich badanych – wpływ oddziaływań w stanie końcowym. Otrzymane wyniki eksperymentalne wyraźnie pokazują konsekwencje wspomnianych zjawisk. Ilościowa analiza femtoskopowa uwidoczniała zaskakujący efekt różnych wartości rozmiarów strefy emisji pomiędzy parami $K^0_s K^+$ i $K^0_s K^-$ (Rys. 9.10). Dosyć zaskakujący jest Rozdział 9.6 („Future plans”), gdzie pojawiają się zwiastuny analizy wyników z pomiarów eksperymentu STAR w 2016 roku. Zastanawiający jest wynik przedstawiony na Rys. 9.20, gdzie nie widać tak znaczącej różnicy rozmiarów strefy emisji (wcześniej sygnalizowanej na Rys. 9.10).

⁹ J. Adamczewski-Musch et al., (HADES Collaboration) Identical pion intensity interferometry in central Au + Au collisions at 1.23A GeV, Phys. Lett. B795, 446-451 (2019)

¹⁰ A. Adare et al. (PHENIX Collaboration), Systematic study of charged-pion and kaon femtoscopy in Au + Au collisions at $s^{1/2}_{NN}=200$ GeV, Phys. Rev. C 92, 034914 (2015)

L. Adamczyk et al. (STAR Collaboration) Freeze-out dynamics via charged kaon femtoscopy in $s^{1/2}_{NN}=200$ GeV central Au + Au collisions, Phys. Rev. C 88, 034906 (2013)

Lektura tej ciekawej części pracy jest utrudniona przez bardzo liczne rysunki o identycznych osiach (na przykład centralność i promień: 9.9, 9.9, 9.10, 9.14, trzeba znajdować różnicujące szczegóły w bardzo podobnych opisach). Można było dodawać znaczniki, np. STAR10 na Rys. 9.13 i STAR16 na Rys. 9.20 – tu rozróżnienie jest tylko poprzez inny zakres centralności zderzeń.

Rozprawa jest uzupełniona dwoma dodatkami (A i B). To jej przydatny element, gdyż czytelnik może znaleźć tam szczegółowe wyniki przewidywanego (w modelu THERMINATOR2) wpływu krotności cząstek oraz masy poprzecznej na parametry trójwymiarowej analizy femtoskopowej. Dzięki temu czytelnik łatwiej może ocenić sposób zmienności tych parametrów oraz wagę prawidłowej klasyfikacji zderzeń jądro-jądro oraz pomiaru masy poprzecznej. Można było pokusić się o skrócenie podpisów pod rysunkami, które w znacznym stopniu się powielają.

Stwierdzam, że rozprawa przedstawiona przez mgr Dianę Pawłowską jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego, spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania, a tym samym, pomimo licznych uwag dotyczących wstępnej części rozprawy, stawiam wniosek o dopuszczenie pani magister Diany Pawłowskiej do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

