



Krzysztof Piasecki
Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski
E-mail: krzysztof.piasecki@fuw.edu.pl

Warszawa, 23.08.2023

Rada Naukowa Dyscypliny Nauki Fizyczne
Politechnika Warszawska

Recenzja pracy doktorskiej "Multiplicity and net-electric charge fluctuations in central Ar+Sc interactions at SPS energies measured in the NA61/SHINE experiment" autorstwa mgr. inż. Justyny Cybowskiej

Główną **motywacją** analizy podjętej przez mgr. inż. J. Cybowską jest **poszukiwanie punktu krytycznego przemiany fazowej** materii QCD – pomiędzy gazem hadronowym a plazmą kwarkowo-gluonową (QGP). Według przewidywań teoretycznych, gdy podczas relatywistycznego zderzenia jądrowego materia przechodzi przez okolice tego punktu, rozkłady krotności wyprodukowanych hadronów powinny podlegać zaburzeniom. Za charakterystykę takich rozkładów przyjmuje się ich momenty centralne. Jednak pomiędzy kolejnymi zderzeniami jądrowymi w naturalny sposób zachodzą fluktuacje objętości strefy zderzenia. Aby odjąć ten „trywialny” efekt, zidentyfikowane zostały zmienne wciąż zbudowane na momentach rozkładu, ale będące zmiennymi intensywnymi. Podstawowymi takimi zmiennymi są tzw. skalowana wariancja skalowana skośność oraz skalowana kurtoza, których definicję przytoczę poniżej.

Materiałem doświadczalnym do badań Autorki było **sześć zestawów** zrekonstruowanych cząstek naładowanych ze zderzeń Ar+Sc przy pędach wiązki, kolejno: 13, 20, 30, 40, 75 i 150 A · GeV/c.

Celem było otrzymanie i analiza **rozkładów krotności hadronów naładowanych dodatnio, ujemnie oraz rozkładu bilansu ładunku**.

Praca posiada właściwą stronę tytułową, streszczenie po polsku i o angielsku oraz spis treści. Zawartość składa się z sześciu rozdziałów. W pierwszych dwóch czytelnik wprowadzony jest w fizykę zderzeń ultrarelatywistycznych, przejście fazowe między gazem hadronów a QGP oraz zagadnienie fluktuacji krotności. W rozdziale trzecim Autorka prezentuje układ badawczy NA61, zaś w czwartym – kroki analizy danych. Wyniki zostały przedyskutowane w rozdziale piątym, a szósty jest podsumowaniem. Pracę zamyka Appendix, poświęcony trzem rozkładom statystycznym oraz bibliografia, która jest adekwatna do tematyki.

Z istotniejszych części **wprowadzenia** warto podkreślić opis sygnatur przejścia do fazy QGP, zawarty w rozdziale 1.3.1. W szczególności omówiono przewidywane w ramach modelu SMES efekty tzw. *kink*, *horn* i *step*, odpowiadające zmianom z energią swobodną ($\sqrt{s_{NN}}$) : średniej krotności mezonów π wobec krotności nukleonów uczestniczących, stosunku K^+/π^+ oraz odwrotnego nachylenia rozkładu masy poprzecznej mezonów K^+ . Są one po większości obserwowane doświadczalnie, jednak – jak Autorka słusznie opisała – efekt *horn* widać jednoznacznie tylko dla najcięższych systemów.

Następnym ważnym punktem, rozważanym już w **drugim rozdziale**, jest wyszczególnienie wielu możliwych przyczyn fluktuacji krotności. Spora lista przyczyn pozostała po pominięciu fluktuacji objętości strefy zderzenia, nakazuje ostrożność we wnioskowaniu. Motywując konieczność

wspomnianego odjęcia fluktuacji objętości, Autorka definiuje trzy skalowane momenty centralne rozkładu, dalsze niż centroid: skalowana wariancja ($\omega = \langle (\Delta N)^2 \rangle / \langle N \rangle$), skalowana skośność (*scaled skewness*; $S\sigma = \langle (\Delta N)^3 \rangle / \langle (\Delta N)^2 \rangle$) i skalowana kurtoza (*scaled kurtosis*; $\kappa\sigma^2 = \langle (\Delta N)^4 \rangle - 3\langle (\Delta N)^2 \rangle^2 / \langle (\Delta N)^2 \rangle$). Wprowadza ona również *kumulanty* oraz określa, że jej polem badawczym będą: sumaryczny rozkład krotności cząstek dodatnio- (h^+) i ujemnie (h^-) naładowanych oraz rozkład różnicy między nimi ($h^+ - h^-$). Po podstawowe własności rozkładów Poissona, Gaussa i Skellama pani Cybowska odsyła do Appendixu A. W tym miejscu odnotowałbym, że Appendix ten zwiększyłby swą użyteczność, gdyby został wzbogacony o tabelkę z (nieskalowanymi i skalowanymi) wariancjami, skośnościami i kurtozami tych rozkładów, a następnie słowo komentarza, dlaczego w przypadku rozkładu Skellama skalowanie momentów musi mieć szczególną postać.

W następnym podrozdziale Autorka omawia obliczenia krotności i wariancji w modelu statystycznym, dyskutując różnice między zespołem kanonicznym a wielkim kanonicznym. Odnosi też wyniki skalowanej wariancji do wartości referencyjnej 1 dla wcześniej wymienionych prostych rozkładów. Dalej Autorka przedstawia ciekawe przewidywania wkładu fluktuacji od punktu krytycznego w zależności od parametru *długości korelacji* (choć wywód byłby pełniejszy, gdyby Autorka zdefiniowała ten parametr). Pani Cybowska zestawia na rys. 2.4 przewidywaną w ramach modelu sił typu Van der Waalsa mapę wartości badanych zmiennych (ω , $S\sigma$ i $\kappa\sigma^2$) na diagramie fazowym temperatura–potencjał bariochemiczny, co łączy z planem pokrycia tego diagramu przez doświadczalne zderzenia jądrowe, ukazane na diagramie 3.2. Na koniec drugiego rozdziału Autorka zestawia wyniki doświadczalne zmiennych fluktuacyjnych, otrzymane dzięki zderzeniom jądrowym przez grupy NA49, STAR i PHENIX. Według nich, choć rozkłady otrzymane z ciężkiego systemu Pb+Pb nie wykazują sygnału od punktu krytycznego, to mocno obiecujące były wyniki rozkładu $h^+ + h^-$ z układów o średnich rozmiarach, ukazując prawdopodobne maksimum fluktuacji. Słaba statystyka uniemożliwiła ostre wnioskowanie, a zarazem to właśnie te obiecujące dane zmotywowały grupę NA61 do własnych pomiarów z układem Ar+Sc o rozmiarach pośrednich.

W **Rozdziale trzecim** Autorka opisała kolejne komponenty układu badawczego, a następnie omówiła ideę rekonstrukcji torów, wierzchołka zderzenia oraz informacji z detektora PSD, którego celem był pomiar centralności zderzenia. Na koniec, pani Cybowska wspomniała o sposobie symulowania propagacji w środowisku GEANT cząstek ze zderzeń wygenerowanych przez kod EPOS.

Poświęconym rekonstrukcji rozkładów **Rozdział czwarty** rozpoczyna zestaw warunków „dobrego eventu” i „dobrego toru”. Prezentowane klasyfikatory odbieram jako właściwe. Mała wątpliwość dotyczy rys. 4.3, gdzie brzeg dla wysokich wartości odcina część zdarzeń wciąż należących do peaku (pytanie: czy jakiś argument stoi za właśnie takim cięciem?). Podobnie odnośnie prawego panelu rys. 4.6: czy ta linia odcięcia nie ingeruje w sygnał? – choć ostateczne znaczenie tych decyzji może być marginalne. Z kolei odcięcia na sygnałach Bx i By, ukazane na rys. 4.7, w tym sensie nie podlegają wątpliwości, że Autorka dyskutuje wahania systematyczne w scenariuszu ich braku.

Istotnym wobec badań jest podrozdział 4.2.3, dotyczący wyznaczania centralności. Dobrym pomysłem było tu odrzucenie takiego obszaru w detektorze PSD, w którym średnia zdeponowana energia $\langle E_{\text{PSD}} \rangle$ już nie koreluje się z krotnością cząstek naładowanych. Dzięki temu wyostrzeniu podległa przewidywalność centralności poprzez zmienną $\langle E_{\text{PSD}} \rangle$. Z lektury tego działu nie jest jednak wg mnie jasne:

1) skąd wiadomo, że cięcia nałożone na rozkłady $\langle E_{\text{PSD}} \rangle$ widoczne na rys. 4.11 faktycznie wycinają właśnie 1% centralności? Tzn. czy tryger lub inne efekty nie modyfikują obserwowanego rozkładu krotności? Być może porównania z symulacjami mogłyby tu rzucić choćby jakościowo światło.

2) przedział [0-1] % rozkładu zmiennej $\langle E_{\text{PSD}} \rangle$ skorelowanej z centralnością nie musi się jednoznacznie przekładać na przedział [0-1] % rzeczywistej centralności, rozumianej np. w zmiennej parametru b , gdyż korelacja zmiennej proxy z centralnością rzeczywistą zwykle ma charakter pasa o pewnej grubości. Sugerowałbym tu, aby Autorka wykonała w modelu Glaubera symulację ukazującą $\langle b \rangle$ dla centyla [0-1], następnie [0-2], a nawet [0-5] % – odcinanych np. na rozkładzie N_{part} . Gdyby okazało się, że pewne poszerzenie centralności nie wpływa znacząco na $\langle N_{\text{part}} \rangle$ (czy $\langle b \rangle$), to otrzymane zwiększenie statystyki mogłoby być atrakcyjne ze względu na umiarkowaną statystykę raportowaną w tabeli 4.2. Nawet, gdyby dotychczasowa statystyka była akceptowalna dla rdzenia analizy fluktuacyjnej, to zwielokrotniona statystyka mogłaby posłużyć np. do podziału na podpróbki i cross-checku metody *bootstrap* znajdowania niepewności statystycznych, opisanej w podrozdziale 4.4.1.

Sporo miejsca Autorka poświęciła korekcie histogramów krotności ze względu na efekty utraty lub zysku krotności, wprowadzając procedurę „*Unfolding*” realizowaną przez pakiet *RooUnfold*. Przedstawione zostały dedykowane dla eksperymentu tzw. *macierze odpowiedzi*, otrzymane symulacyjnie. W samym centrum opisu brakuje jednak objaśnienia operacji, które ta procedura wykonuje na histogramie, z użyciem powyższych macierzy, jak też dlaczego potrzeba wiele iteracji (wg Tabeli 4.4 – rzędu stu). Uzupełnienie byłoby tu przydatne szczególnie dlatego, że procedura została wykonana w NA61 po raz pierwszy.

Ciekawą zastosowaną metodą szacowania niepewności statystycznych zmiennych fluktuacyjnych jest metoda *bootstrap*. Objaśnienie jej algorytmu w par. 4.4.1 jest wg mnie zrozumiałe, tak samo otrzymane na rys. 4.15 rozkłady rozrzutu dla kolejnych wariantów. Również podział niepewności systematycznych i ich analiza jest właściwa. W przypadku przyczynku od rozdzielczości PSD, algorytm jego znalezienia polega na znalezieniu wariacji zmiennej fluktuacyjnej pod wpływem wariacji zdeponowanej energii na skutek rozdzielczości. Jest to prawidłowa realizacja prawa propagacji błędu. Przy temacie brakuje jednak wizualizacji zależności rozdzielczości od zdeponowanej energii (wzór 4.2 i tabela 4.5). Oszacowanie przyczynków do niepewności pod wpływem parametrów trackowania ma formę trzech wariantów cięć: luźnych, standardowych i wąskich. Jako technika wydaje się ona dość dobrym oszacowaniem. Godne pochwały jest zestawienie wszystkich przyczynków w tabeli 4.7. Proszę tu jednak o sprawdzenie, czy względem cięcia „WFA beam” (par. 4.2.1 c) warunek w pierwszej kolumnie tabeli 4.6 nie powinien mieć postaci modułu?

W **rozdziale piątym** Autorka zaprezentowała zostały wyniki analizy. W pierwszym kroku przedstawiła ona rozkłady h^+ , h^- oraz różnicy $h^+ - h^-$ dla sześciu wartości pędów wiązki. Ukazane histogramy są czytelne. Warto by jednak dla porządku stabelaryzować ich wiodące „zwykłe” momenty. Zestawienie otrzymanych momentów skalowanych rozkładów h^+ , h^- oraz różnicy $h^+ - h^-$ w funkcji energii dostępnej ukazane zostało na rys. 5.2, 5.3 i 5.4 oraz w tabeli 5.1. **Objętość wyników** należy uznać za imponującą. **Stanowi ona znaczny wkład w zasób wiedzy doświadczalnej pola badawczego fluktuacji krotności.** Choć przebiegi większości zmiennych fluktuacyjnych wydają się dość gładkie w funkcji energii dostępnej, to bardzo interesujące są prawdopodobne maksima dla momentów κ_4/κ_2 oraz κ_3/κ_1 (i być może κ_3/κ_2) rozkładu różnicy ładunków ($h^+ - h^-$) przy energii $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 7.6$ GeV. Przebiegi doświadczalne zostały porównane z przewidywanymi przez model transportu EPOS w wersji 1.99. Przewidywania wykazują umiarkowane podobieństwo, jednak nie zgodność, co zostało omówione w pracy. Należałoby tu jednak wyjaśnić, co model EPOS zakłada o równaniu stanu lub przejściu fazowym, a szczególnie, czy posiada on mechanizm generujący poszukiwany w pracy punkt krytyczny?

Ważnym punktem jest zestawienie otrzymanych przebiegów z wynikami NA61 dla mniejszych układów: Be+Be oraz p+p. Porównanie Ar+Sc i p+p w przebiegach zmiennych fluktuacyjnych dla rozkładów h^+ i h^- wykazuje zauważalne różnice. Natomiast w przypadku przebiegu różnicy $h^+ - h^-$, gdy powyższe odstępstwo jest jeszcze wyraźniejsze, to dane z Be+Be wykazują zgodność z Ar+Sc. Jest to z pewnością obszerny materiał dla badań teoretycznych w ramach modeli transportu.

Podsumowując, dysertacja mgr inż. Justyny Cybowskiej wnosi nowe i ciekawe doświadczalne dane fluktuacyjne, które rozważaniom teoretycznym dają szansę pogłębienia wnioskowania o cechach przejścia fazowego między gazem hadronów a plazmą QGP. Występują pewne mankamenty pracy, niemniej nie przesłaniają one faktu, że dysertacja Autorki **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. Justyny Cybowskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Krzysztof Piasecki

