



Prof. dr hab. Piotr Salabura

Instytut Fizyki im. M. Smoluchowskiego

ul. Prof. Łojasiewicza 11

Uniwersytet Jagielloński

30-348 Kraków

30.09. 2023

Kraków

Recenzja pracy doktorskiej mgr. Justyny Cybowskiej “Multiplicity and Net-Electric Charge Fluctuations in Central Ar+Sc Interactions at SPS Energies Measured in the Na61/SHINE Experiment”

Praca doktorska Pani mgr. Justyny Cybowskiej przedstawia wyniki analizy rozkładów krotności naładowanych cząstek w zderzeniach $^{40}\text{Ar}+^{45}\text{Sc}$ zmierzonych przez międzynarodowy zespół badawczy NA61/SHINE na synchrotronie SPS w CERN przy sześciu energiach wiązki 13A,19A,30A,40A,75A i 150A. W szczególności zbadano fluktuacje rozkładów ładunków oraz ich różnic w zderzeniach przy pomocy tzw. skalowanych kumulantów k_2/k_1 , k_3/k_2 oraz k_4/k_2 . Wielkości te są szeroko dyskutowane w kontekście poszukiwania punktu krytycznego diagramu fazowego silnie oddziałującej materii jądrowej oddzielającego obszar przejścia fazowego pierwszego rodzaju i ciągłego przejścia typu „cross-over” pomiędzy fazami gazu hadronowego i plazmy kwarkowo-gluonowej (QGP). Jego lokalizacja na diagramie fazowym, przedstawianym w funkcji temperatury i potencjału bario-chemicznego, nie jest znana. Obliczenia „ab initio” kwantowej chromodynamiki (QCD) na siatkach które przewidują gładkie przejście fazowe typu „cross-over” przy znikającym potencjale bariochemicznym i temperaturze krytycznej około 155 MeV nie są możliwe do zastosowania w obszarze skończonych gęstości barionowych i badania charakteru przejścia fazowego w tym obszarze są dostępne jedynie poprzez różne podejścia modelowe. Wyniki obliczeń przewidują istnienie punktu krytycznego przy niższych temperaturach w szerokim zakresie potencjału bariochemicznego, (przewidywania rozciągają się od 300 do 650 MeV) i wymagają badań eksperymentalnych w dużym zakresie energii zderzeń, praktycznie od kilku do kilkudziesięciu GeV. Są one motywacją skanów energetycznych eksperymentów nowej generacji takich jak NA61/SHINE, zmodyfikowanego detektora STAR na zderzaczu RHIC oraz nowego eksperymentu CBM w powstającym ośrodku FAIR. Wyżej wymienione badania są komplementarne do badań w obszarze znikającego potencjału bariochemicznego prowadzonych na LHC, RHIC i konieczne do zrozumienia własności silnie oddziałującej materii w całym zakresie diagramu fazowego.

Zgodnie z intuicją, własności punktu krytycznego charakteryzują się dużymi fluktuacjami gęstości które mogą być mierzone w eksperymentach ciężko-jonowych poprzez np. fluktuacje liczby netto barionów, lub protonów, czy też ładunków elektrycznych w pojedynczych zderzeniach. Ich analiza jest możliwa poprzez pomiary rozkładów statystycznych krotności hadronów, ekstrakcję ich momentów lub blisko powiązanych kumulantów. Te ostatnie są szczególnie interesujące ponieważ w opisie bazującym na fizyce statystycznej są one pochodnymi dużej funkcji rozkładu systemu po potencjale bariochemicznym, tzw. podatnościami termodynamicznymi, które są obliczane teoretycznie i zależą od równania stanu materii. Jedną z przewidywanych sygnatur punktu krytycznego jest nie-monotoniczna zależność skalowanych kumulantów od energii wiązki (funkcji wzbudzenia). Oczekuje się iż czułość na obserwację sygnału punktu krytycznego wzrasta z rzędem kumulantu. Z drugiej strony pomiar kumulantów wyższych rzędów wymaga bardzo dużej statystyki a nietrywialnych poprawek związanych z procesem pomiaru. Analiza przedstawiona w pracy odpowiada temu trudnemu wyzwaniu i prezentuje, po raz pierwszy dla eksperymentu NA61/SHINE, kumulantów wyższego (czwartego) rzędu. Po raz pierwszy przeprowadzono proces poprawki rozkładów krotności przy pomocy funkcji odpowiedzi detektora i opracowano metodologie pomiaru. Wyniki przeszły proces wewnętrznej recenzji i zostały uznane za ostateczne i są przygotowywane do publikacji. Należy je uznać za bardzo wartościowe a tematyka badań wpisujące się w główne trendy dyscypliny fizyki zderzeń relatywistycznych ciężkich jonów na świecie.

Praca jest napisana po angielsku, bardzo starannie, i w zasadzie nie znalazłem żadnych błędów edytorskich. Sformułowania są czytelne a zaprezentowane rysunki odpowiednio dobrane do ilustracji kluczowych elementów opisu. Praca ma zwarty charakter, co nie jest wadą, ale w niektórych wątkach jest trochę powierzchowna i nie zawiera istotnych w mojej ocenie informacji. Poniżej zamieszczam opis poszczególnych rozdziałów pracy z uwagami.

Rozdział pierwszy zawiera krótkie wprowadzenie do tematyki pracy którego centralnym punktem jest przedstawienie diagramu silnie oddziałującej materii (rys.1.2) w powiązaniu do fizyki zderzeń relatywistycznych ciężkich jonów. Głównym celem jest zbadanie struktur fazowych, w szczególności plazmy kwarkowej której pewne sygnatury zostały opisane w pracy. Rozdział jest trochę napisany z perspektywy eksperymentu NA61/SHINE działającego na SPS i nie uwzględnia istotnych nowych odkryć dokonanych na zderzaczach LHC i RHIC . Na przykład omówiona sygnatura tłumienia powabu obserwowana na SPS powinna być raczej uogólniona na badanie transportu kwarków ciężkich w medium w celu określenia lepkości QGP oraz zjawiska uwięzienia. Pomiary na LHC przyniosły szereg istotnych odkryć w tym kontekście, np. wzrostu produkcji powabu w stosunku do niższych energii w procesie regeneracji, obserwacji sekwencyjnego tłumienia stanów czarmonium, bottomium czy też ich wpływu istotnego w kontekście termalizacji. Wspomniany rys 1.2 także powinien być uzupełniony o punkty wymrożenia uzyskane w różnych eksperymentach (LHC, FAIR, RHIC-BES) aby lepiej ilustrował stan wiedzy. Dyskusja dotycząca położenia punktu krytycznego powinna także uwzględniać nowe prace których przewidywania są istotnie różne od zaprezentowanego na rysunku (np. dobrą ilustracją podsumowującą obecne trendy jest rys.5 w PLB820(2021)136584).

Rozdział drugi zawiera wprowadzenie do problematyki fluktuacji i definiuje w zrozumiałym sposób wielkości (kumulanty) będące przedmiotem pracy: skalowaną wariancję, skośność oraz kurtozę

rozkładów ładunków które są w pierwszym rzędzie niezależne od wielkości objętości systemu. Jest bardzo istotne w kontekście ich interpretacji. Jak autorka pracy słusznie stwierdza na str.12 te tzw. intensywne wielkości (niezależne od objętości) umożliwiają porównania różnych systemów to istotną kwestią są poprawki na fluktuacje objętości, które są minimalizowane (ale nie wyeliminowane kompletnie) przez wąską selekcję centralności. Dobrze scharakteryzowane zostały efekty wpływające na te rozkłady, w szczególności te „trywialne” które nie są powiązane z poszukiwanym efektem punktu krytycznego. Czułość tych wielkości na istnienie punktu krytycznego dobrze ilustruje zaprezentowany przykład modelu z pracy [55] (rys.2.4). W dyskusji powiązania fluktuacji z punktem krytycznym zabrakło mi powiązania kumulantów z fundamentalnymi własnościami funkcji rozkładu QCD poprzez wspomniane podatności termodynamiczne. Przegląd wyników eksperymentalnych uzyskanych przez NA49, STAR i PHENIX powinien zostać uzupełniony także o wynik eksperymentu HADES (Phys.Rev.C 102 (2020) 2), który uzupełnia wyniki eksperymentu STAR w obszarze niskich energii i jest istotny w kontekście dyskusji nieciągłości skalowanej kurtozy (rozkładu protonów w tym przypadku) w funkcji energii zderzeń.

Rozdział trzeci przedstawia układ eksperymentu NA61/SHINE na SPS w CERN, metodę pomiaru oraz warunki układu wyzwalania akwizycji danych. W szczególności istotne są informacje na temat rekonstrukcji śladów w komorach projekcji czasowej (TPC) oraz pomiaru centralności zderzeń w hodoskopie PSD (tabela 3.2). Z podanych informacji zabrakło mi informacji o czasie martwym (TPC), częstotliwości kolizji oraz prawdopodobieństwa nakładania się zdarzeń (tzw. pile-up) który jest istotny w kontekście pomiaru krotności. Myślę że te informacje ułatwiłyby zrozumienie warunków czasowych na selekcję zdarzeń, przedstawionych w rozdziale 4 (4.2.1 c brak uzasadnienia wybranych warunków czasowych). Istotną brakującą informacją jest, choćby krótki, opis procedur kalibracji energetycznej detektora PSD wyznaczenia jego rozdzielczości (parametry parametryzacji A,B,C w tabeli 4.5) i weryfikacji tych procedur, które są istotne dla poprawnego określenia centralności zderzeń (rozdział 4.2.3 rys.4.11).

Rozdział czwarty przedstawia analizę danych. Rozpoczyna się od zdefiniowania warunków selekcji zdarzeń. Oprócz wspomnianych powyżej warunków czasowych (rys. 4.1), uwzględniony został warunek na zgodność wierzchołka oddziaływania zrekonstruowanego z detektorów wiązki i śladów w TPC, warunki na energię deponowaną w modułach detektora PSD w zależności od odległości od wiązki (rys. 4.4,4.5) a także w zależności od ilości śladów zrekonstruowanych w głównym TPC (rys 4.6). Warunki na w.w rysunkach są intuicyjnie jasne, jednakże brakuje ilościowego uzasadnienia wybranych wartości cięć (kierowano się wynikami symulacji kodem EPOS? badaniami z poprzednich eksperymentów?). Skąd pochodzą odrzucone zdarzenia i jaki jest ich ewentualny wkład w zaakceptowanych obszarach? (wpływ tych cięć na błędy systematyczne nie jest dyskutowany w rozdziale 4.4.2). W analizie odrzucono elektrony (brak ilościowego opisu tego warunku), nie jest do końca jasne dlaczego tylko elektrony są usuwane w generalnym kontekście pomiaru krotności ładunku (miony?). Pomocne do zrozumienia pomiaru są rozkłady akceptacji detektora w funkcji pędu transwersalnego, pospieszności oraz kąta azymutalnego dla wszystkich badanych energii zderzeń(rys. 4.8). Kryterium wyboru centralności (0-1%) bazuje na rozkładach energii zmierzonych w detektorze PSD i jest przedstawione na rys. 4.11. Podobnie jak powyżej rodzi się pytanie o uzasadnienie wybranego cięcia, szczególnie w powiązaniu z

pytaniem o kontrolę kalibracji energetycznej (wspomniane przy rozdziale 3) i zgodność rozkładów eksperymentalnych ze wspomnianą symulacją *PSD Fast Simulations*. Kluczowe dla wyników pracy poprawki rozkładów krotności zmierzonych ładunków hadronów oraz ich różnicy ze względu na wydajność rekonstrukcji śladów są przedstawione w rozdziale 4.3. Wykorzystano metodę rozwikłania z rozkładów zmierzonych rozkładów prawdziwych (z ang. Unfolding) przy pomocy klasy RooUnfold zaimplementowanej w środowisku ROOT, którą często wykorzystuje się w tego typu analizach. Dwuwymiarowe macierze odpowiedzi detektora (rys. 4.12, 4.13), będące podstawą procedury korekcji dla rozkładów ładunków, zostały wysymulowane przy pomocy generatora zdarzeń EPOS oraz pakietu symulacji detektora NA61/SHINE i programu do analizy danych. Warto zwrócić uwagę iż obliczone w ten sposób macierze korekcji są wycałkowane po przestrzeni fazowej (pędu transversalnego, prędkości) pokrytej przez akceptację detektora i w związku z powyższym mogą zależeć od dobrego modelowania rozkładów (wydajność ogólnie zależy od zmiennych kinematycznych). Nie wiem czy tego rodzaju badania systematyczne były prowadzone i prosiłbym o ustosunkowanie się do tego w czasie obrony. Rysunki 4.14 przedstawiają porównania niepoprawionych zmierzonych rozkładów krotności naładowanych hadronów oraz ich różnic z rozkładami symulacyjnymi. Zgodność w przedstawionej skali logarytmicznej wydaje się dość dobra dla ładunków ujemnych i niższych energii wiązki (h-) ale dla ładunków dodatnich (h+) widoczne są dość znaczne różnice w całym badanym zakresie energetycznym. Błędy procedury korekcji zostały podzielone na dwa rodzaje: statystyczne i systematyczne. Błędy statystyczne kumulantów zostały określone przy pomocy symulacji Monte Carlo poprzez generowanie kilkuset rozkładów krotności ze zmierzonych danych z powtórzeniami (ang. Bootstrap), ich korektę procedurą rozwikłania i ostatecznie analizę rozrzutów, natomiast błędy systematyczne uwzględniały zależności poprawek od selekcji zderzeń poprzez warunki: czasowe, rekonstrukcji wierzchołka interakcji, na ilość zmierzonych punktów trafień w komorze TPC (tabela 4.6) oraz osobno zdolności rozdzielczej detektora PSD, która wpływa na selekcję centralności. W pierwszym wypadku rozważono cztery kombinacje zmian cięć z których określono maksymalny rozrzut. Ostateczne estymacje błędów systematycznych zawiera tabela 4.7

Rozdział piąty przedstawia wyniki końcowe poprawionych rozkładów ładunków dodatnich, ujemnych oraz różnicy ładunków hadronów (rys.5.1) dla sześciu badanych energii wiązki. Funkcje wzbudzenia zmierzonych skalowanych kumulantów k_2/k_1 , k_3/k_2 , k_4/k_2 dla naładowanych hadronów (rys. 5.2 , 5.3) oraz dodatkowo $k_2/(k_1^+ + k_1^-)$ i k_3/k_1 dla różnicy ładunków (rys. 5.4) porównano do przewidywań modelu EPOS oraz wartości granicznych przewidywanych dla statystyki Poissona i Skellama (dla różnicy ładunków). Z otrzymanych zależności trudno dostrzec statystycznie istotną niemonotoniczność wyższego rzędu kumulantów. W przypadku różnic ładunków można dostrzec pewne maksimum w funkcjach wzbudzenia k_4/k_2 , k_3/k_2 , k_3/k_1 w okolicy $\sqrt{s}=7.6$ GeV (jeden punkt w ramach 2 odchylenia). Widać natomiast iż otrzymane wartości k_2/k_1 są istotnie mniejsze od granicy nieskorelowanej emisji (statystyka Poissona) oraz także różna od przewidywań modelu EPOS, który za to, w ramach błędów, dość dobrze opisuje funkcje wzbudzenia kumulantów wyższego rzędu k_4/k_2 . W funkcjach wzbudzeń k_2/k_1 dla ładunków dodatnich zwraca uwagę dość znaczny rozrzut punktów poniżej $\sqrt{s}=10$ GeV co może wskazywać na niedoszacowanie błędów. W rozdziale 5.4 przedstawiono porównanie otrzymanych

funkcji wzbudzeń dla $^{40}\text{Ar}+^{45}\text{Sc}$ z pomiarami w układzie referencyjnym p+p (rys. 5.5, rys. 5.6) oraz dla różnicy ładunków także z małym systemem $^7\text{Be}+^9\text{Be}$. To porównanie wykazuje istotną różnicę w stosunku do układu referencyjnego w rozkładach k_2/k_1 dla różnic ładunków oraz mniej istotną dla k_4/k_2 , dla obu znaków, i k_2/k_1 dla różnicy znaków (błędy pomiarowe wyższego rzędu kumulantów dla $^{40}\text{Ar}+^{45}\text{Sc}$ są większe). Choć przedstawione wyniki nie dostarczają statystycznie istotnego i spójnego sygnału anomalnych fluktuacji są nie wątpliwie bardzo cennym, i po raz pierwszy otrzymanym w eksperymencie wynikiem. Pozostaje kwestia przyszłych eksperymentów poprawienie precyzji pomiarów i rozszerzenie ich na inne systemy.

Podsumowując, stwierdzam iż przedstawiona do recenzji praca mgr. Justyny Cybowskiej zawiera wartościowe wyniki, uzyskane po raz pierwszy w eksperymencie NA61/SHINE i wnoszące istotny wkład do dyscypliny. Zawarte w recenzji uwagi nie wpływają na moja jednoznacznie pozytywną ocenę pracy. Praca spełnia warunki ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym doktora i wnoszą do Rady Dyscypliny Nauk Fizycznych o dopuszczenie mgr. Justyny Cybowskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Prof. dr hab.

Piotr Salabura

