



dr hab. Radosław Ryblewski, prof. IFJ PAN
Instytut Fizyki Jądrowej
im. H. Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
Radzikowskiego 152
31-342 Kraków, Poland
radoslaw.ryblewski@ifj.edu.pl

Kraków, 19 stycznia 2026 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Valerii Zeliny Reyny Ortiz pt.
*Multiplicity fluctuations in relativistic heavy-ion collisions (Negatively charged
hadrons intermittency analysis on Xe+La collisions in NA61/SHINE at CERN SPS)***

Rozprawa doktorska mgr Valerii Zeliny Reyny Ortiz, zatytułowana *Fluktuacje krotkości w relatywistycznych zderzeniach ciężkich jonów (Analiza intermittencyjna ujemnie naładowanych hadronów w zderzeniach Xe+La zarejestrowanych przez NA61/SHINE w CERN SPS)*, została przygotowana na Uniwersytecie Jana Kochanowskiego w Kielcach pod kierunkiem prof. dr. hab. Macieja Rybczyńskiego (promotor) oraz dr. Tobiasza Czołowicza (promotor pomocniczy). Rozprawa oparta jest na rezultatach analizy danych zarejestrowanych w 2017 r. przez eksperyment NA61/SHINE na akceleratorze SPS w CERN w zderzeniach jądra ksenonu z tarczą z lantanu ($^{129}\text{Xe} + ^{139}\text{La}$) dla centralnych (0–20%) zderzeń przy sześciu pędach wiązki: 13A, 19A, 30A, 40A, 75A i 150A GeV/c. Prezentowane wyniki mają charakter wstępny. Część rezultatów dyskutowanych w rozprawie została opublikowana we współautorskich publikacjach niekolaboracyjnych (m.in. *Nuclear Physics A*, *Nuclear Physics B*) oraz w doniesieniu konferencyjnym (*Ukrainian Journal of Physics*).

Tematyka i znaczenie rozprawy

Tematyka rozprawy wpisuje się w szeroki program badań poszukiwania punktu krytycznego (ang. *critical point*, CP) QCD, hipotetycznego punktu na jej diagramie fazowym, w którym kończy się linia przejścia fazowego pierwszego rodzaju między materią hadronową a plazmą kwarkowo-gluonową. Istnienie takiego punktu nie zostało dotąd potwierdzone doświadczalnie, a jego znalezienie stanowi jedno z najważniejszych wyzwań fizyki wysokich energii. W celu lokalizacji CP na diagramie fazowym eksperyment NA61/SHINE przy akceleratorze SPS (CERN) prowadzi dwuwymiarowy skan właściwości materii produkowanej w relatywistycznych zderzeniach jąder atomowych zmieniając zarówno pęd wiązki, jak i rozmiar zderzających się jąder. Obiektem recenzowanej analizy są zderzenia $^{129}\text{Xe} + ^{139}\text{La}$ w zakresie energii $\sqrt{s_{\text{NN}}} \approx 5.1\text{--}16.8$ GeV. Układ ten jest



szczególnie interesujący, gdyż właśnie w tym obszarze parametrycznym scenariusze teoretyczne lokują potencjalny CP.

Analiza intermityncyjna jest uznaną metodą badania wielocząstkowych fluktuacji i korelacji. Opiera się na statystycznej analizie fluktuacji w rozkładach krotności cząstek poprzez badanie tzw. *skalowanych momentów czynnikowych* (ang. *Scaled Factorial Moments, SFM*) w funkcji rozdzielczości M (tj. liczby podziałów w każdym kierunku przestrzeni pędu). Pojawienie się charakterystycznej zależności potęgowej (samopodobnej/fraktalnej) momentów wyższych rzędów od rozdzielczości może wskazywać na pojawianie się kaskadowych fluktuacji, które mogą towarzyszyć zjawiskom krytycznym. Metoda była najczęściej stosowana dla protonów, ponieważ w pobliżu CP szczególnie wzmacniają się fluktuacje związane z liczbą barionową, a protony stanowią jej najłatwiej mierzalny eksperymentalnie nośnik w zderzeniach ciężkojonowych.

W analizie intermityncyjnej kluczowe jest odróżnienie ewentualnego sygnału krytycznego od wzrostu SFM generowanego przez inne znane źródła korelacji oraz efekty aparaturowe. W niniejszej rozprawie zastosowano ulepszony wariant tej techniki, w którym użyto zmiennych skumulowanych w przestrzeni pędu, poprawek tą metodą zdarzeń mieszanych oraz statystycznie niezależnych podzbiorów danych dla różnych liczb podziałów M . Postępowanie takie minimalizuje artefakty od niejednorodnej gęstości fazowej i skończonej statystyki przy zachowaniu ewentualnych korelacji potęgowych oraz daje bardziej rzetelne oszacowanie niepewności.

Jednocześnie analizę przeprowadzono dla hadronów naładowanych ujemnie, co stanowi podejście komplementarne względem badań na protonach. Z uwagi na dominującą rolę pionów, analiza w takiej próbie jest wrażliwa na korelacje krótkosięgowe, w tym te typu HBT (Hanbury Brown – Twiss). Dlatego istotnym aspektem analizy jest rygorystyczna kontrola źródeł pozornych sygnałów oraz interpretacja obserwowanych zachowań SFM w kategoriach mechanizmów fizycznych i detektorowych. Wzmacnia to wartość metodologiczną przedstawionych wyników. Porównanie bieżących wyników z tymi dla protonów może pozwolić na uzyskanie pełniejszego obrazu korelacji krótkozasięgowych.

Struktura i główne wyniki rozprawy

Rozprawa została napisana w języku angielskim i liczy 150 stron. Składa się ze wstępu, ośmiu rozdziałów oraz trzech dodatków. Struktura pracy jest logiczna i przejrzysta.

Rozprawę otwiera krótkie wprowadzenie, w którym zawarto strukturę rozprawy oraz oświadczenie o wkładzie i osiągnięciach Autorki.

Rozdział 1 zarysowuje ogólne tło naukowe, motywację badań oraz cel analizy. Omówiono w nim diagram fazowy, koncepcję CP oraz status jego poszukiwań. Autorka wskazuje również fluktuacje i intermityncję jako jedne z metod poszukiwania sygnałów krytycznych.

Rozdział 2 poświęcony jest szczegółowemu wprowadzeniu do metody intermityncji. Zawarto tu definicje SFM oraz ich rolę w poszukiwaniach CP. Autorka przedstawia również syntetyczny przegląd dotychczasowych wyników dotyczących intermityncji w różnych eksperymentach oraz dyskusje teoretyczne, jakie one spowodowały. Szczególnie interesujące jest omówienie prac analizujących alternatywne źródła sygnałów intermityncji, w tym korelacje HBT.



Rozdział 3 zawiera opis eksperymentu NA61/SHINE, ze szczególnym uwzględnieniem programu badawczego związanego z oddziaływaniami silnymi i poszukiwaniem CP. Czytelnik znajdzie tu informacje o wykorzystanej aparaturze, zebranych danych, jak również o ich przetwarzaniu oraz modelowaniu Monte Carlo.

Rozdział 4 pełni rolę rozdziału warsztatowego, w którym Autorka precyzyjnie definiuje aparat analizy intermittencyjnej i użyte obserwable oraz opisuje, jak ograniczany jest wpływ efektów niefizycznych. Rozdział wprowadza podejście z mieszaniem zdarzeń oraz transformację do zmiennych skumulowanych, która redukuje bias od niejednorodnej gęstości jednocząstkowej. Zasygnalizowano tu praktyczne ograniczenia tej procedury, zwłaszcza dla wyższych rzędów, wynikające m.in. z kombinatoryki wielocząstkowej w bardzo małych komórkach. Rozdział uzasadnia użycie statystycznie niezależnych podzbiorów zdarzeń dla różnych M , aby uniknąć korelacji między punktami. Autorka wprowadza tu też kluczową korektę detektorową, *momentum-based Two-Track Distance* (mTTD), eliminującą problem wyznaczenia śladów cząstek położonych blisko siebie w przestrzeni fazowej i inne sztuczne korelacje, które mogłyby generować fałszywy sygnał intermittencji. Ponadto definiuje funkcje korelacji dwucząstkowych, które później wykorzystuje do diagnozy korelacji krótkozasięgowych oraz przedstawia *Power-law Model* jako narzędzie do testów czułości metody.

Rozdział 5 to proceduralna część pracy. Autorka krok po kroku dokumentuje pełny łańcuch analizy danych. W rozdziale opisano m.in.: (i) użyte zbiory danych (dane eksperymentalne oraz symulacje Monte Carlo, w tym próbki poddane pełnej symulacji odpowiedzi detektora i rekonstrukcji), (ii) selekcję zdarzeń, (iii) selekcję torów, (iv) konstrukcję map akceptancji oraz implementację i parametryzację mTTD, a także (v) podejście do niepewności systematycznych.

Główne wyniki analizy są zamieszczone w Rozdziale 6. Dane pochodzą z podzbioru 0–20% najbardziej centralnych zdarzeń (wyznaczonych w oparciu o sygnał z PSD), co ogranicza fluktuacje geometrii/objętości i redukuje szum statystyczny, ułatwiając interpretację fluktuacji jako dynamicznych. Jako obserwable wykorzystano SFM rzędu $r = 2, 3$ i 4 z korekcją metodą mieszania zdarzeń, $\Delta F_r(M)$, i badano ich zależność od stopnia podziału M^2 dwuwymiarowej przestrzeni pędu poprzecznego (p_x, p_y) na siatkę $M \times M$ komórek. Analizę wykonano zarówno w zmiennych oryginalnych, jak i po transformacji do przestrzeni pędu poprzecznego *skumulowanego*, $\Delta F_r(M)_c$. Istotnym elementem metodologicznym było zastosowanie statystycznie niezależnych podzbiorów danych dla każdej wartości M , co redukuje korelacje między punktami i upraszcza interpretację rezultatów (kosztem mniejszej statystyki). Skalowanie zbadano do maksymalnych wartości $M = 32$ i $M = 150$, co pozwoliło ocenić wpływ efektów związanych z rozdzielczością pędu w eksperymencie.

Wyniki analizy pokazują brak jednoznacznego sygnału intermittencji o interpretacji krytycznej w badanym układzie i zakresie energii. Inaczej rzecz ujmując: w żadnej z analizowanych energii zderzeń Xe+La nie uzyskano przekonujących przesłanek na prawo potęgowe w SFM, które można byłoby wiązać z korelacjami typu krytycznego. Podczas gdy dla wszystkich badanych energii zaobserwowano wzrost $\Delta F_r(M)$ wraz z M w zmiennych oryginalnych, nie zaobserwowano wyraźnej zależności potęgowej od skali dla $\Delta F_r(M)_c$ w zmiennych skumulowanych. Pokazuje to, że przejście do zmiennych skumulowanych istotnie ogranicza (a w prezentowanych danych praktycznie całkowicie



usuwa) pozorne trendy generowane przez niejednorodność rozkładu jednocząstkowego. Ponadto zaobserwowano, że dla bardzo dużych M wartości $\Delta F_r(M)$ mogą być systematycznie mniejsze niż dla $M = 1$, co wskazuje na wpływ cięć związanych z ograniczoną zdolnością rozróżniania blisko położonych torów w detektorze.

Co ważne, praca nie ogranicza się do stwierdzenia braku obserwacji krytycznych fluktuacji, lecz również stara się badać genezę pojawienia się w danych sygnałów pozornych. W Rozdziale 7 autorka wspiera wnioski poprzez porównanie rezultatów eksperymentalnych z danymi z symulacji w ramach modeli. W pracy wykorzystano dwa podejścia: (1) model Monte Carlo EPOS 1.99, będący zaawansowanym generatorem zdarzeń dla zderzeń ciężkojonowych, zawierającym wiele znanych mechanizmów fizycznych generujących korelacje cząstek (bez implementacji zjawisk krytycznych), oraz (2) *Power-law Model*, w którym do danych wprowadza się domieszkę sztucznego sygnału typu potęgowego.

Porównanie wyników eksperymentalnych z symulacjami EPOS pokazuje, że w zmiennych skumulowanych obraz jest zasadniczo zgodny z brakiem sygnału, natomiast w zmiennych oryginalnych obserwowany w danych wzrost $\Delta F_r(M)$ może być silniejszy niż w EPOS. Różnica ta jest spójna z hipotezą, że część sygnału w danych może pochodzić z korelacji krótkozasięgowych typu HBT, których EPOS w standardowej konfiguracji nie opisuje.

Z kolei test z użyciem *Power-law Model* miał na celu sprawdzenie, czy ewentualne fluktuacje krytyczne (gdyby występowały w danych) dałyby się odróżnić od korelacji krótkosięgowych. Autorka przeprowadziła test polegający na wprowadzeniu do rzeczywistych danych domieszki sztucznie generowanych cząstek o korelacjach potęgowych i obserwacji wpływu na SFM. Wynik jest jednoznaczny: charakter fluktuacji uzyskany przy założeniu obecności korelacji typu potęgowego znacząco różni się od obserwowanego w danych. W szczególności funkcje korelacyjne w tym przypadku mają postać odmienną od tej uzyskanej eksperymentalnie. To wspiera konkluzję, że obserwowany w zderzeniach Xe+La wzorec fluktuacji nie nosi cech fluktuacji krytycznych, a wykryte niewielkie odchylenia mają inne pochodzenie.

Uwagi i pytania

Pomimo ogólnie bardzo pozytywnej oceny merytorycznej mam kilka uwag o charakterze redakcyjnym. Autorka starała się przedstawić analizę w sposób przystępny dla niespecjalisty, unikając nadmiernie technicznych detali; miejscami jednak (dotyczy to głównie początkowych rozdziałów) język staje się zbyt publicystyczny. Bardziej opisowy i precyzyjny styl ułatwiłby weryfikowalność formułowanych stwierdzeń. Tekst rozprawy zawiera ponadto dosyć liczne drobne usterki redakcyjne (literówki, błędy gramatyczne, itp.), co miejscami utrudnia lekturę. Błędy te powinny zostać usunięte przed ostateczną wersją rozprawy. Poniżej wymieniam niektóre z nich:

- W rozdziale 1.1: N w definicji barionowego potencjału chemicznego oznacza liczbę barionów (a nie liczbę cząstek), natomiast μ_B można interpretować jako energię potrzebną do dodania do układu jednego barionu (a nie cząstki).



- Niejasne jest jednoczesne wykorzystanie rysunków 1.2 i 1.3: rys. 1.3 przekazuje zasadniczo tę samą informację co rys. 1.2. Warto rozważyć usunięcie jednego z nich lub wyraźniejsze rozróżnienie ich funkcji.
- Odnosząc się do rys. 1.4: proszę doprecyzować znaczenie strzałek na diagramie (tj. kierunek przemieszczania się po płaszczyźnie $T-\mu_B$ przy zmianie energii zderzenia i/lub rozmiaru układu) oraz wskazać, w jakim stopniu kierunki te mają charakter wyidealizowany.
- Rys. 1.5: proszę uzupełnić podpis o odniesienia bibliograficzne do prac zaznaczonych na rysunku.
- W rys. 2.1 pojawia się szerokość binu δ , która nie jest dalej wykorzystywana; proszę o wyjaśnienie jej roli lub usunięcie oznaczenia.
- W podrozdziale pt. *Lanthanum target* opisano problem utleniania materiału tarczy oraz zbierania danych z i bez zainstalowanej tarczy, jednak nie wyjaśniono, jakie znaczenie mają te aspekty dla bieżącej analizy.
- W rozdziale 4.1.1 sugeruję następujące korekty notacji i indeksów:
 - po “and knowing that...”
$$n_i (n_i - 1) \dots (n_i - r + 1) = r! \sum_{i=1}^{M^2} \binom{n_i}{r} \rightarrow n_i (n_i - 1) \dots (n_i - r + 1) = r! \binom{n_i}{r}$$
 - w (4.2)
$$\left\langle \sum_{m=1}^M \binom{n_m}{r} \right\rangle \rightarrow \left\langle \sum_{i=1}^{M^2} \binom{n_i}{r} \right\rangle$$
 - po “For $r = 2 \dots$ ”
$$n_m \rightarrow n_i; \quad n \rightarrow n_i; \quad n_1 \rightarrow n_i$$
 - w (4.3)
$$F(M^2) \rightarrow F(M)$$
 - po “Simplifying each term...”
$$\langle N_{pp} \rangle \rightarrow \langle N_2 \rangle$$
- Dla kompletności wyводу warto dodać (krótko) definicję/postać „formuły propagacji błędu” bezpośrednio przed równaniem (4.6).
- W rozdziale 4.3 proszę wyraźniej zdefiniować wielkość gTTD (oraz odróżnić ją od mTTD).
- Proszę poprawić opis oznaczeń punktów na rys. 4.7 (obecny opis niespójny z legendą).
- Proszę ujednolicić oznaczenia zmiennych r oraz q w opisie i na rysunku 4.8.
- Tablice 5.3 i 5.4: proszę wskazać, gdzie w tekście zdefiniowano symbole X_μ oraz $Y_{\mu,\sigma}$ (lub dodać definicje w opisie).
- Proszę wyjaśnić różnice między rys. 5.11 i 4.4 oraz między rys. 5.12 i 4.6.



- Proszę wyjaśnić, czym różnią się rysunki 8.1–8.6 od 6.15–6.20 (czy jest to inny wariant analizy, inna prezentacja tych samych danych).

Powyższe uwagi nie umniejszają wysokiej jakości recenzowanej analizy.

Na zakończenie chciałbym zadać jedno pytanie zainspirowane lekturą rozprawy:

Jakiej wartości wykładnika prawa potęgowego oczekuje się w scenariuszach fluktuacji krytycznych przy obecnej analizie? Czy, z punktu widzenia teorii i dotychczasowej literatury, wykładnik ten powinien być taki sam dla analiz protonów oraz dla próby h^- , czy też należałoby oczekiwać różnych wartości i z jakich powodów fizycznych?

Wniosek końcowy

Wyniki przedstawione w rozprawie stanowią istotny wkład w badania fluktuacji wielocząstkowych w relatywistycznych zderzeniach ciężkich jonów, zarówno z punktu widzenia fizyki badanego układu, jak i metodologii poszukiwań sygnałów krytycznych. Praca przekonująco pokazuje, że obserwowane w literaturze nietypowe zachowania momentów czynnikowych i sygnały przypominające intermitencję wymagają szczególnej ostrożności interpretacyjnej, gdyż mogą być w znacznym stopniu generowane przez efekty niekrytyczne takie jak ograniczenia akceptancji, niejednorodności rozkładu jedno-cząstkowego, artefakty rekonstrukcji, czy innego krótkosięgowego korelacje (w bieżącej analizie korelacje HBT). Zastosowany w rozprawie ulepszony zestaw narzędzi analitycznych, obejmujący m.in. transformację do zmiennych skumulowanych, kontrolę tła poprzez zdarzenia mieszane, statystycznie niezależne próbkowanie dla kolejnych podziałów oraz rygorystyczne procedury eliminacji artefaktów detektorowych wzmacnia wiarygodność wniosków i jednocześnie wyznacza dobre standardy dla przyszłych analiz, których celem jest rozróżnienie fluktuacji krytycznych od innych pozornych sygnałów.

Autorka wykazała się dojrzałością naukową i bardzo dobrą znajomością zarówno tła teoretycznego, jak i praktyki eksperymentalnej, samodzielnie przeprowadzając solidną analizę danych oraz wprowadzając elementy wykraczające poza schematy stosowane w dotychczasowych pracach (w tym testy z użyciem symulacji modelowych), co pozwoliło pogłębić interpretację obserwowanych efektów. Na podkreślenie zasługuje także aktywność naukowa Autorki w ramach kolaboracji NA61/SHINE, udokumentowana współautorstwem publikacji w recenzowanych czasopismach oraz wystąpieniami konferencyjnymi co potwierdza rozpoznawalność i znaczenie uzyskanych rezultatów. Całościowo rozprawa podejmuje temat aktualny i ważny dla programu badania diagramu fazowego QCD, dostarczając zarówno nowych wyników fizycznych, jak i cennych wskazań dotyczących potencjalnych pułapek interpretacyjnych w poszukiwaniach punktu krytycznego.

W świetle powyższej oceny stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr Valerii Zeliny Reyna Ortiz spełnia wszystkie ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie mgr Valerii Zeliny Reyny Ortiz do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

dr hab. Radosław Ryblewski, prof. IFJ PAN