

prof. dr hab. inż. Hanna Zbroszczyk,
Politechnika Warszawska
Wydział Fizyki
ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa

Warszawa, 19 stycznia 2026 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr Valeria Zelina Reyna Ortiz
pod tytułem:
„Multiplicity fluctuations in relativistic heavy ion collisions”

Rozprawa doktorska mgr Valerii Zeliny Reyny Ortiz została wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. Macieja Rybczyńskiego oraz dr. Tobiasza Czopowicza na Wydziale Nauk Ścisłych i Przyrodniczych w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach. Praca dotyczy eksperymentalnej analizy intermityncyjnej ujemnie naładowanych hadronów wyprodukowanych w centralnych zderzeniach $Xe+La$ przy sześciu pędach wiązki: 13A, 19A, 30A, 40A, 75A oraz 150 A GeV/c, co odpowiada energiom zderzenia $\sqrt{s_{NN}} = 5,1 - 16,8$ GeV w eksperymencie NA61/SHINE przy akceleratorze SPS w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych w CERN.

Na początku pracy zostały wymienione osiągnięcia i kontrybucje autorki. Pani Valeria Zelina Reyna Ortiz jest współautorką 4 publikacji kilkuautorskich oraz 14 prac kolaboracyjnych. W trakcie trwania okresu doktoratu wygłoszono 13 wystąpień, w tym 5 o zasięgu międzynarodowym (i poza-kolaboracyjnym), dostępny jest jeden materiał prokonferencyjny. Pani Valeria Ortiz była wykonawczynią łącznie 5 projektów oraz wygrała nagrodę za najlepszą prezentuje na Forum Doktorantów Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach. Dodatkowo, w pracy zostały wymienione aktywności z organizacją pracy w kolaboracji NA61/SHINE, jak na przykład „Deputy expert for the Detector Control System” czy „Outreach deputy”. Są to niewątpliwie ważne odpowiedzialności potwierdzające zaangażowanie w prace eksperymentu.

Autorka w swojej rozprawie skupiła się na badaniu intermityncji w przestrzeni poprzecznego pędu, a dla każdej liczby podziałów wykorzystano statystycznie niezależne

zbiory danych. Uważam, że badania przedstawione w prezentowanej pracy wnoszą istotny wkład w zrozumienie zjawisk fizycznych mechanizmów leżących u podstaw interpretacji o możliwych sygnałach punktu krytycznego.

Praca doktorska mgr Valerie Zeliny Reyny Ortiz jest napisana w języku angielskim, została poddana starannej edycji zarówno pod względem językowym, jak i graficznym. Praca składa się łącznie z 8 rozdziałów, streszczenia w języku polskim oraz angielskim oraz trzech dodatków: jednostek i zmiennych kinetycznych, rozkładów krotności oraz wyboru centralności zderzenia. Praca liczy łącznie 150 strony, z czego część czysto opisowa stanowi 135 stron.

Pierwszy rozdział wprowadza czytelnika w podstawy teoretyczne Modelu Standardowego fizyki cząstek elementarnych, koncentrując się na chromodynamice kwantowej (QCD) i oddziaływaniach silnych. Głównym przedmiotem zainteresowania jest diagram fazowy materii jądrowej, który opisuje przejścia między materią hadronową a plazmą kwarkowo-gluonową (QGP) w ekstremalnych warunkach temperatury i gęstości. W pracy podkreślono, że o ile istnienie QGP zostało potwierdzone, o tyle natura przejścia fazowego, a w szczególności istnienie punktu krytycznego, w którym ciągłe przejście (cross-over) zmienia się w przejście pierwszego rzędu pozostaje nieustalona.

Eksperymentalne poszukiwanie punktu krytycznego odbywa się poprzez skanowanie diagramu fazowego za pomocą zderzeń ciężkich jonów realizowanych przy różnych energiach i dla różnych jonów. Autorka wskazuje na kluczową rolę eksperymentu NA61/SHINE, który bada obszary wysokich gęstości barionowych niedostępne dla akceleratorów o wyższych energiach, takich jak LHC. Rozdział kończy się przeglądem technik badawczych, w tym analizy fluktuacji, femtoskopii oraz intermittencji, która stanowi główne narzędzie badawcze tej pracy. W rozdziale drugim szczegółowo omówiono koncepcję intermittencji, która definiuje nieregularne, zależne od skali fluktuacje wykraczające poza gładkie zachowanie statystyczne. Koncepcja ta, zapożyczona z teorii turbulencji i chaosu, została wprowadzona do fizyki cząstek przez Białasa i Peschanskiego w 1986 roku. Głównym narzędziem pomiarowym są Skalowane Momenty Faktorialne (SFM) rzędu r , które pozwalają wyeliminować niepewności statystyczne wynikające ze skończonej liczby cząstek w jednym zderzeniu, zachowując jednocześnie czułość na zjawiska dynamiczne. W pracy wyjaśniono, że jeśli system jest samopodobny (skalowanie potęgowe), SFM powinny rosnąć wraz ze zmniejszaniem rozmiaru komórek podziału przestrzeni fazowej. Taki wzrost może być sygnałem przejścia fazowego drugiego rzędu. Autorka opisuje historyczne wyniki eksperymentów (EMU-07, NA22, NA35, NA49, STAR), zauważając, że obserwowane

wzrosty momentów były często interpretowane jako sygnały intermitencji. Rozdział zwraca jednak uwagę na korelacje HBT (efekt Hanbury’ego Browna–Twissa) jako alternatywne wyjaśnienie tych wzrostów, co stawia pod znakiem zapytania ich krytyczną naturę. Trzeci rozdział opisuje infrastrukturę eksperymentalną NA61/SHINE w CERN, będącego następcą eksperymentu NA49. Układ detektorów obejmuje cztery duże komory projekcji czasowej (TPC), które służą do precyzyjnej rekonstrukcji śladów cząstek, ich ładunku oraz pędu. Kluczowym elementem wyznaczania centralności zderzenia jest Projectile Spectator Detector (PSD), kalorymetr mierzący energię „spektatorów”, czyli nukleonów, które nie brały bezpośredniego udziału w zderzeniu. Rozdział kończy się opisem procesu rekonstrukcji danych oraz omówieniem roli symulacji Monte Carlo (model EPOS 1.99) w korygowaniu efektów detektorowych. Rozdział czwarty skupia się na metodach matematycznych stosowanych w celu wyeliminowania artefaktów i tła fizycznego. Wprowadzono dwie główne metodologie: standardową analizę w przestrzeni pędu poprzecznego oraz nowatorską metodę kumulatywnego pędu poprzecznego. Transformacja kumulatywna ma na celu uniezależnienie wyników od kształtu jednocząstkowego rozkładu pędu, co teoretycznie pozwala na czystsze wyodrębnienie sygnału punktu krytycznego. Ważnym wkładem metodologicznym jest zastosowanie cięcia mT²TD (Momentum-based Two-Track Distance), które służy do usuwania „rozszczepionych śladów” (split tracks) mogących generować fałszywe sygnały intermitencji. Autorka opisuje również procedurę obliczania niepewności statystycznych za pomocą propagacji błędów dla momentów $r = 2, 3, 4$. Ponadto rozdział wprowadza model potęgowy (Power-law Model), który służy jako punkt odniesienia do testowania, jak idealny sygnał krytyczny zachowywałby się w analizowanym systemie. Piąty rozdział poświęcono technicznym aspektom selekcji danych dla systemów $Xe+La$ przy pędach wiązki 13A, 19A, 30A, 40A, 75A i 150A GeV/c. Procedura selekcji zdarzeń obejmuje m.in. jakość dopasowania wierzchołka oddziaływania, pozycję wiązki oraz selekcję centralności 0–20% na podstawie energii z detektora PSD. W przypadku selekcji śladów autorka wymagała m.in. odpowiedniej liczby klastrów w komorach TPC (minimum 30) oraz stosowała procedurę usuwania elektronów na podstawie zmierzonych strat energii (dE/dx). W pracy wyjaśniono, że w celu zapewnienia niezależności statystycznej każdy punkt danych dla różnej liczby podziałów był obliczany na oddzielnych podzbiorach zdarzeń. Rozdział opisuje także konstrukcję map akceptacji, które definiują regiony pędu, w których detektor wykazuje wydajność powyżej 70%. Na koniec omówiono metodę Barlowa stosowaną do szacowania niepewności systematycznych, polegającą na zmianie rygorystyczności kryteriów selekcji i

porównywaniu wyników. Rozdział szósty prezentuje kluczowe wyniki dla zderzeń $Xe+La$. W standardowej przestrzeni pędu poprzecznego zaobserwowano wyraźny wzrost SFM wraz ze wzrostem liczby podziałów M , co na pierwszy rzut oka mogłoby sugerować istnienie sygnału intermitencji podobnego do raportowanego przez kolaborację STAR. Jednak po zastosowaniu transformacji kumulatywnej wzrost ten całkowicie zanikł, a wartości momentów oscylowały wokół zera.

Analiza funkcji korelacji dwucząstkowych (Δp_T oraz q_{LCMS}) wykazała obecność niewielkiego „pagórka” przy niskich wartościach różnic pędów, charakterystycznego dla korelacji femtoskopowych. W pracy stwierdzono, że transformacja kumulatywna zmienia konfigurację cząstek w komórkach w taki sposób, iż korelacje te przestają być widoczne jako wzrost momentów, podczas gdy sygnał krytyczny (gdyby istniał) powinien zostać zachowany. Prowadzi to do wniosku, że pierwotnie obserwowany wzrost nie ma charakteru krytycznego. W siódmym rozdziale wyniki eksperymentalne zestawiono z modelami teoretycznymi. Model EPOS 1.99 (zarówno w wersji czystej, jak i z uwzględnieniem efektów detektorowych) nie wykazał wzrostu SFM w żadnej z metodologii, co potwierdza, że nie zawiera on fizyki punktu krytycznego ani silnych korelacji krótkozasięgowych typu HBT. Zgodność danych z modelem EPOS po transformacji kumulatywnej sugeruje, że w systemie $Xe+La$ dominuje tło nieskorelowane lub korelacje o niewielkim zasięgu.

Druga część analizy obejmuje testy modelu potęgowego, w którym sztucznie generowane pary cząstek z korelacjami krytycznymi „wszczepiano” do rzeczywistych danych (procedura embeddingu). Wykazano, że gdyby w danych istniała intermitencja potęgowa (nawet przy 25% udziale cząstek skorelowanych), wzrost SFM byłby bardzo wyraźny i utrzymywałby się nawet po transformacji kumulatywnej. Brak takiego sygnału w rzeczywistych danych $Xe+La$ stanowi dowód na brak zachowania krytycznego w badanym zakresie energii. Ostatni rozdział podsumowuje najważniejsze osiągnięcia rozprawy. Głównym wnioskiem fizycznym jest brak dowodów na intermitencję potęgową w zderzeniach $Xe+La$ przy badanych energiach. Autorka wykazała, że wzrosty momentów faktorialnych w pędzie poprzecznym wynikają z korelacji krótkozasięgowych oraz samej procedury podziału przestrzeni na komórki, a nie z przejścia fazowego.

W pracy podkreślono znaczenie metodologiczne transformacji kumulatywnej jako niezbędnego narzędzia do odróżniania prawdziwych sygnałów krytycznych od „mylących sygnałów” (misleading signals). Praca sugeruje, że wcześniejsze wyniki innych kolaboracji mogły zostać błędnie zinterpretowane z powodu braku stosowania tych zaawansowanych

technik korekcyjnych. Rozprawa kończy się stwierdzeniem, że choć punkt krytyczny nie został odnaleziony, praca dostarcza solidnych ram analitycznych oraz danych dla przyszłych eksperymentów badających diagram fazowy QCD z czym trudno się nie zgodzić.

Praca jest napisana starannie. Każdy etap analizy został szczegółowo opisany, co świadczy o bardzo wysokiej jakości uzyskanych wyników, a co za tym idzie - potwierdza jej wiarygodność. W moim odczuciu praca stanowi dowód na dojrzałość mgr Valerii Zeliny Reyny Ortiz. W przedstawionej mi do recenzji pracy doktorskiej autorka dowiodła, że analiza intermittencji może być bardzo dobrym narzędziem do szukania sygnatur przejścia fazowego / punktu krytycznego między materią hadronową, a kwarkową.

W pracy znajdują się drobne uchybienia. Poniżej przytaczam tylko niektóre z nich, wszystkie są bowiem marginalne i nie umniejszają wartości merytorycznej pracy.

Rys. 1.3 zawiera wartości μ_c , T_c , sugerowane jako wartości punkty krytycznego, nie mniej są podpisane przy wartościach maksymalnych - barionowego potencjału chemicznego oraz temperatury, jakie jest znaczenie tych wartości?

Rozdział 1.3, wspomniane są zaledwie 3 eksperymenty realizujące zderzenia ciężkich jonów. Dla kompletności warto byłoby wymienić chociaż inne, obecnie cytowane w środowisku.

Rys. 2.3 nie został wspomniany w tekście pracy.

Sugestie do analizy danych

1. W celu zaobserwowania sygnału intermittencji w obecności punktu krytycznego można wykorzystać model Monte Carlo zawierający równanie stanu uwzględniające punkt krytyczny, a otrzymane w ten sposób wyniki intermittencji porównać z przewidywaniami modelu opartego na innym równaniu stanu, w którym punkt krytyczny nie występuje.

2. Ponadto, modele Monte Carlo nie zawierają zaimplementowanych krótkozasięgowych korelacji femtoskopowych, przez co wyznaczenie rozkładów intermittencyjnych z danych symulacyjnych pozwalają automatycznie uzyskać te rozkłady bez korelacji dwucząstkowych oraz ich zbadać ich związek z potencjalnym skalowaniem momentów faktorialnych.

3. W celu wyeliminowania wpływu korelacji femtoskopowych na wyniki analizy intermittencji w danych eksperymentalnych można dodatkowo wykluczyć pary cząstek o małej różnicy pędów, dla których występują krótkiego zasięgu korelacje.

4. Sugerowałabym także bardziej szczegółową dyskusję systematycznych niepewności, w pracy została ona potraktowana bardzo pobieżnie.

Pytanie o interpretację wyników

W pracy poświęcono za mało miejsca na dyskusję wpływu korelacji femtoskopowych na sygnał intermityncyjny. Czytelnik po lekturze pracy zostaje z niedosytem i niedoinformowaniem, czy korelacje HBT są odpowiedzialne za skalowanie momentów faktorialnych, czy nie, a jeśli tak, to w jakim zakresie. Chciałabym się o tej interpretacji dowiedzieć więcej w trakcie obrony pracy.

Pytania o model potęgowy

1. Na ile realistyczny fizycznie jest zastosowany model potęgowy?

Praca opisuje model potęgowy jako „prosty model”, który służy do generowania korelacji wielocząstkowych o charakterze potęgowym. Jego celem nie jest pełne odwzorowanie dynamiki zderzenia, lecz symulacja zachowania systemu w pobliżu punktu krytycznego, gdzie oczekuje się niezmienniczości względem skali, służy on jako narzędzie do testowania czułości metodologii SFM na sygnał krytyczny.

2. Czy istnieją modele krytyczne inne niż potęgowe?

Praca skupia się na modelu potęgowym jako standardowym sygnale intermityencji. Powiedziane jest jednak, że prawo potęgowe niekoniecznie jest wyłącznym sygnałem zachowania krytycznego i że przewidywania dotyczące lokalizacji oraz natury punktu krytycznego różnią się w zależności od przyjętego modelu teoretycznego. Jakie inne modele moglibyśmy uwzględnić?

3. Dlaczego 25% cząstek skorelowanych uznajemy za realistyczny scenariusz? W pracy brak jest bezpośredniego uzasadnienia, dlaczego 25% (Przypadek 1) jest uważane za „realistyczne”. Frakcja ta, obok frakcji 80% (Przypadek 2), została użyta jako parametr konfigurowalny, aby sprawdzić, jak obecność cząstek skorelowanych wpływa na wyniki SFM w porównaniu z czystymi danymi eksperymentalnymi.

4. Jaki jest minimalny udział cząstek krytycznie skorelowanych, który metoda mogłaby wykryć? Źródła nie definiują precyzyjnego progu wykrywalności (np. 1% czy 5%). Pokazują jednak, że nawet przy 25% cząstek skorelowanych sygnał potęgowy jest bardzo wyraźny i pozostaje widoczny nawet po zastosowaniu transformacji kumulatywnej, co odróżnia go od tła fizycznego w danych $X\ell+La$.

Pytania o ekstrapolację wyników

1. Czy brak sygnału w zderzeniach $Xe+La$ można ekstrapolować na inne systemy i energie? W pracy jest powiedziane, że na podstawie tych wyników nie można potwierdzić ani zaprzeczyć istnieniu punktu krytycznego w ogóle, a wyniki są specyficzne dla badanego obszaru diagramu fazowego. Poszukiwania pozostają zatem otwarte, a inne eksperymenty mogą badać regiony o innych gęstościach barionowych. Pytanie czy możemy mieć jakiegokolwiek przewidywania na podstawie uzyskanych wyników?

2. Jakie warunki eksperymentalne zwiększyłyby czułość na intermitycję krytyczną? Praca wskazuje na kluczowe znaczenie transformacji kumulatywnej, która usuwa tło (np. od korelacji HBT), nie niszcząc sygnału krytycznego. Ważna jest również precyzja pędowa (fine binning do $M=32$) oraz stosowanie niezależnych podzbiorów danych dla każdego punktu pomiarowego, co pozwala uniknąć korelacji statystycznych. Czy jest pomysł na coś jeszcze, czego nie dało się uwzględnić w prowadzonych tu badaniach?

3. Czy przy lepszej statystyce wnioski mogłyby się zmienić? Statystyka ma istotny wpływ na wyższe rzędy SFM. W pracy zauważono, że dla SFM czwartego rzędu przy gęstym podziale przestrzeni fazowej ($M2$) dane są pomijane ze względu na „małą ilość dostępnych danych” i trudność w rekonstrukcji kwadrupletów cząstek w małych komórkach. Czy wyższa statystyka pozwoliłaby na dokładniejsze zbadanie tych wyższych momentów, które są bardziej czułe na sygnał krytyczny? Jeśli tak, to o jakich danych moglibyśmy mówić?

Podsumowując, uważam że rozprawa doktorska mgr Valerii Zeliny Reyny Ortiz zawiera oryginalne i ciekawe wyniki poszerzające naszą wiedzę o poszukiwaniu sygnatur punktu krytycznego w zakresie energii zderzenia $\sqrt{s_{NN}} = 5,1 - 18,8$ GeV. Jako, że rozprawa spełnia wszelkie formalne wymagania stawiane pracom doktorskim wnoszę o dopuszczenie do jej publicznej obrony.

prof. dr hab. inż. Hanna Zbroszczyk
Wydział Fizyki
Politechnika Warszawska
Koszykowa 75, 00-662 Warszawa


Hanna Zbroszczyk