



Kraków, 30 listopada 2023

UNIwersYTET  
JAGIELLOŃSKI  
W KRAKOWIE

Piotr Korcyl  
Uniwersytet Jagielloński  
Instytut Fizyki Teoretycznej  
email: [piotr.korcyl@uj.edu.pl](mailto:piotr.korcyl@uj.edu.pl)

Instytut  
Fizyki Teoretycznej

## Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Michała Bareja

z tytułu

*„Exploration of Baryon Number Factorial Cumulants in the Context of the Quantum Chromodynamics Phase Diagram”*

### 1. Cel badań i główne rezultaty naukowe

Rozprawa mgr. Michała Bareja porusza zagadnienie diagramu fazowego oddziaływań silnych opisywanych przez Chromodynamikę Kwantową (ang. Quantum Chromodynamics, QCD). Szczegóły położenia przejść fazowych materii kwarkowej ciągle stanowią wyzwanie zarówno od strony teoretycznej jak i eksperymentalnej. Wyjątkiem jest linia dla zerowej gęstości barionowej. W tym obszarze metody numeryczne oparte na sformułowaniu QCD na siatkach skwantowanym poprzez całki po trajektoriach oraz na algorytmach Monte Carlo pozwalają precyzyjnie wyznaczyć nieperturbacyjnie temperaturę przejścia fazowego z fazy uwięzionej do fazy nieuwięzionej (ang. confinement/deconfinement phase transition). Niestety, z powodu problemu znaku za który odpowiedzialny jest barionowy potencjał chemiczny, metod tych nie da się stosować w pozostałej części diagramu fazowego. Obszar niezerowej gęstości barionowej jest istotny z punktu widzenia np. fizyki gwiazd neutronowych, i może być badany w zderzeniach ciężkich jonów. Istniejące dane eksperymentalne nie pozwalają jednak przekonująco zlokalizować przebiegu wspomnianego przejścia fazowego confinement/deconfinement na płaszczyźnie temperatury/potencjału chemicznego. Oryginalne wyniki otrzymane przez mgr. Michała Bareja próbują obejść ten problem i omawiają zastosowanie pewnej szczególnej klasy obserwabli: kumulantów oraz kumulanty silni (ang. factorial cumulants) pewnych rozkładów prawdopodobieństwa do badania położenia przejścia fazowego. Zdecydowaną zaletą tych obserwabli jest możliwość ich obliczenia teoretycznego jak i pomiaru eksperymentalnego w eksperymentach z zderzeniami ciężkich jonów. W swojej rozprawie Autor omawia wpływ różnych efektów na przewidywane wartości kumulantów. Cel ten uważam za bardzo ważny, szczególnie w świetle istniejących i planowanych eksperymentów z wykorzystaniem ciężkich jonów. Obliczone przez Autora wartości mogą być wykorzystane przy interpretacji danych eksperymentalnych.

Autor przedstawia w Rozdziale 2 rozprawy krótki przegląd ostatnich wyników eksperymentalnych, a następnie koncentruje się na obliczeniach teoretycznych

ul. St. Łojasiewicza 11

PL 30-348 Kraków

tel. +48(12) 664-47-26

+48(12) 664-46-77

e-mail:

[sekret@th.if.uj.edu.pl](mailto:sekret@th.if.uj.edu.pl)

kumulantów i kumulantów silni dla różnych rozkładów prawdopodobieństw. Wprowadzenie w wyczerpujący sposób wprowadza wszystkie niezbędne wielkości i koncepcje potwierdzając dużą ogólną wiedzę teoretyczną Autora. Wydaje mi się że warto również podkreślić, że Autor biegle omawia aktualne wyniki zarówno eksperymentalne jak i teoretyczne.

Rozprawa omawia cztery nowe rezultaty obliczeń w postaci wzorów na kumulanty silni: uwzględniające globalne zachowanie liczby barionowej (wyprowadzone w Artykule 1), wzory na kumulanty silni uwzględniające krótko-zasięgowe korelacje oraz globalne zachowanie liczby barionowej (Artykuł 2), poprawki do kumulantów silni pochodzące od skończonej liczby barionowej (omówione w Artykule 3) oraz wzory na kumulanty silni uwzględniające fluktuacje w szerokości dystrybucji gęstości rapidity protonu (Artykuł 4). Wszystkie powyższe wyniki zostały otrzymane analitycznie i są podane w formie funkcji generujących oraz jawnych wzorów dla kilku najniższych kumulantów silni. Zgodnie z oświadczeniem Autora rezultaty te zostały otrzymane samodzielnie przez Autora przy częściowym wykorzystaniu pakietu do obliczeń symbolicznych Mathematica. Podsumowując, przedstawione w rozprawie wyniki, uwzględniające różne dodatkowe efekty, będą mieć duże znaczenie praktyczne w interpretacji danych eksperymentalnych i uważam że są bardzo ciekawe i wartościowe. Otrzymane rezultaty stanowią mocną stronę przedstawionej rozprawy.

## **2. Treść i układ pracy**

Rozprawa ma 94 strony. Składa się z czterech rozdziałów, bibliografii oraz dwóch dodatków, z których pierwszy zawiera dodatkowe informacje o Autorze rozprawy, natomiast drugi zawiera cztery opublikowane artykuły współautorstwa Pana Michała Bareja. Rozdział 1 opisuje strukturę rozprawy, Rozdział 2 wprowadza główny temat badań podając motywację oraz aktualne wyniki, natomiast Rozdział 3 pokrótce omawia streszczenie wyników opublikowanych w czterech artykułach naukowych w przedstawionym wcześniej kontekście wskazując na najważniejsze otrzymane rezultaty. Rozdział 4 zawiera krótkie podsumowanie. Całość jest bardzo zwięzła. Zasadnicze rezultaty naukowe zawarte są w czterech artykułach opublikowanych w czasopiśmie Physical Review C wraz z promotorem prof. dr. hab. Adamem Bzdakiem. Rozprawa zawiera wszystkie wymagane części. Choć wprowadzenie tematu badań i opis wyników są bardzo krótkie i nie wykraczają poza podanie najbardziej niezbędnych informacji, całość pozwala na zrozumienie najważniejszych wyników pracy Autora.

## **3. Oryginalne wyniki badań**

Oryginalne wyniki badań przedstawione są w postaci czterech dołączonych opublikowanych artykułów naukowych. Artykuły są napisane dobrym językiem, są zwięzłe, niemniej jednak jasno motywują i przedstawiają rezultaty końcowe obliczeń. Wszystkie zawierają nowe i oryginalne rozwiązania poruszonych problemów oraz pokazują, że Autor potrafi sprawnie zastosować opanowaną metodologię do nowego zagadnienia.

- a. w Artykule 1 omawiany jest wpływ więzu w postaci zachowania całkowitej liczby barionowej na kumulanty silni rozkładów protonowych, antyprotonowych i mieszanych w zderzeniach relatywistycznych ciężkich jonów. W szczególności, kumulanty silni tych ostatnich rozkładów zostały podane po raz pierwszy i, jak zauważają Autorzy, byłoby bardzo ciekawe zobaczyć jak wyglądają odpowiadające im dane eksperymentalne.
- b. w Artykule 2 omawiana jest sytuacja w której jedynie pewna część całości układu jest obserwowana oraz narzucony jest więz zachowania całkowitej liczby barionowej dla całości układu. Obliczenia zostały przeprowadzone przy uwzględnieniu dowolnych krótko-zasięgowych korelacji wewnątrz obydwu części. Wyprowadzone zostały kumulanty silni rozkładów protonowych dla obserwowanej części układu dla asymptotycznie dużych liczb barionowych.
- c. Artykuł 3 jest kontynuacją pracy rozpoczętej w Artykule 2, w szczególności wyprowadzone zostały wzory na poprawki do kumulantów silni rozkładów protonowych dla mniejszych całkowitych liczb barionowych.
- d. w Artykule 4 omawiane są wielocząstkowe funkcje korelacji w rapidity przy pomocy których uwzględnione zostały fluktuacje szerokości dystrybucji gęstości rapidity protonu z poszczególnych zarejestrowanych zdarzeniach zderzeń ciężkich jonów. W artykule wyprowadzone zostały wzory na ilorazy kumulantów rozkładów protonowych dla różnych rozkładów fluktuacji oraz przedyskutowane zostały wyniki numeryczne dla sytuacji odpowiadających pomiarom eksperymentalnych kolaboracji STAR.

Biorąc pod uwagę, że wkład Autora w opublikowanych pracach był zarówno koncepcyjny, jak również Pan Michał Bareja samodzielnie prowadził obliczenia analityczne oraz brał udział w spisywaniu artykułów, w mojej ocenie Autor wykazał wiedzę i umiejętności prowadzenia samodzielnej pracy naukowej oraz jej prezentacji na wysokim, międzynarodowym poziomie.

#### **4. Metodologia**

Metodologia opiera się zasadniczo na analitycznym obliczeniu odpowiednich funkcji generujących kumulanty i kumulanty silni dla rozkładów uwzględniających różnego rodzaju dodatkowe korelacje. Na uwagę zasługuje fakt że wszystkie wyniki zostały otrzymane analitycznie, a więc przyjęta strategia prowadzenia obliczeń została dobrze dobrana do celów pracy. Niestety szczegóły obliczeń nie zostały przedstawione ani omówione, co wydaje mi się jest słabszą stroną rozprawy gdyż daje to Czytelnikowi szansy na docenienie włożonego w otrzymanie tych wyników wysiłku. Dołączone artykuły naukowe są ze swojej natury krótkie i techniczne i przedstawiają zasadniczo jedynie wyniki końcowe.

## 5. Bibliografia

Bibliografia składa się z 96 pozycji i zawiera zarówno odniesienia do prac eksperymentalnych jak i teoretycznych. Autor zakłada wcześniejsze zapoznanie się Czytelnika z problematyką Chromodynamiki Kwantowej i koncentruje się na referencjach wprost odpowiadających omawianej tematyce i stan aktualnych badań eksperymentalnych i teoretycznych. Według mnie brakuje referencji do chociaż paru podręczników na poziomie magisterskim które posłużyłyby za wprowadzenie dla Czytelnika niezaznajomionego z głównym tematem badań.

## 6. Uwagi i komentarze

Pomimo kilku uwag krytycznych dotyczących zwięzłości rozprawy zasygnalizowanych powyżej, nie mam uwag krytycznych dotyczących spełnienia przez rozprawę mgr. Michała Bareja któregośkolwiek formalnego lub zwyczajowego kryterium oceny. Uważam, że przedstawione oryginalne wyniki naukowe Autora mocno potwierdzają jego sprawność i samodzielność w pracy badawczej. W trakcie czytania rozprawy nasunęły mi się pewne pytania:

- Jaka jest motywacja wyrażenia wyników końcowych w postaci funkcji generujących które zawierają informacje o wszystkich wyższych kumulantach? W przedstawionych wynikach eksperymentalnych oraz w opublikowanych w dołączonych Artykułach wzorach ‘praktycznych’ używane są jedynie kumulanty rzędu co najwyżej 6. Czy istnieje zatem jakaś przesłanka eksperymentalna, że kumulanty wyższych rzędów staną się kiedyś dostępne, a zatem forma funkcji generującej stanie się bardziej praktyczna?
- Czy uwzględnienie wybranych dodatkowych źródeł korelacji analizowanych w dołączonych Artykułach wyczerpuje efekty które mogą pojawić się przy analizie danych eksperymentalnych? Czy te, które zostały uwzględnione przez Autora, opisują w jakimś sensie ‘wiodące’ efekty dodatkowych korelacji?

## 7. Uwagi końcowe

Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa doktorska przedstawiona przez magistra Michała Bareja spełnia wszystkie zwyczajowe i ustawowe wymagania oraz wnoszę o dopuszczenie pana Michała Bareja do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia naukowego doktora w dyscyplinie Nauki Fizyczne.

Piotr Konyl