prof. dr hab. Maciej Rybczyński
Instytut Fizyki
Uniwersytet Jana Kochanowskiego
w Kielcach

Kielce, 15 listopada 2023 roku

Ocena rozprawy doktorskiej mgr. Michała Bareja
pod tytułem "Exploration of Baryon Number Factorial Cumulants
in the Context of the Quantum Chromodynamics Phase Diagram"

Rozprawa doktorska mgr. Michała Bareja została przygotowana pod kierunkiem prof. dr. hab. Adama Bzdaka na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Celem przedstawionej rozprawy było wprowadzenie oraz zbadanie modeli matematycznych niektórych zjawisk obecnych w wysokoenergetycznych zderzeniach jąder atomów. Praca dotyczy teoretycznych badań fluktuacji i korelacji zachodzących w procesach produkcji cząstek w zderzeniach relatywistycznych jonów.

Zderzenia relatywistycznych jąder atomowych są głównym źródłem naszej wiedzy o materii jądrowej w stanach charakteryzujących się ekstremalnie wysoką gęstością energii i bardzo wysoką temperaturą, w których możliwe staje się przejście fazowe do nowego stanu materii - plazmy kwarkowo-gluonowej (ang. Quark Gluon Plasma, QGP). Proces przejścia zwykłej materii jądrowej w stan plazmy kwarkowo-gluonowej, jak też własności QGP są przedmiotem szczegółowych badań eksperymentalnych w CERN (ALICE, NA61/SHINE) i BNL (STAR, PHENIX, PHOBOS), a w przyszłości w GSI (FAIR). Badania korelacji i fluktuacji wielkości fizycznych w zderzeniach relatywistycznych jąder atomowych stały się w ostatnich latach jednym z głównych tematów zainteresowania, ponieważ mogą dostarczyć w szczególności informacji o sygnaturach przejścia fazowego materii między stanem gazu hadronowego a QGP.

Autor dysertacji skupił się na analitycznym wyznaczeniu wartości kumulantów i faktorianych kumulantów rozkładów liczby barionów wyprodukowanych w zderzeniach relatywistycznych jonów. W szczególności, po raz pierwszy, obliczył mieszane protonowo-antyprotonowe kumulanty faktorialne (MFC), które zawierają więcej informacji niż dotychczas często badane kumulanty wypadkowej (netto) liczby protonów. MFC mogą być pomocne w rozróżnieniu pomiędzy efektami związanymi z anihilacją barionów w środowisku lokalnie

zachowującym liczbę barionów a innym scenariuszem zakładającym tylko globalne zachowanie liczby barionowej. Następnie Autor rozprawy otrzymał kumulanty i kumulanty faktorialne liczby barionowej z podsystemu powstałego w zderzeniu układu, zakładając globalne zachowanie liczby barionowej oraz obecność korelacji krótkozasiegowych w układzie oddziałujących cząstek. Otrzymany rezultat może posłużyć w przyszłości do korygowania danych eksperymentalnych, które pochodzą zwykle z niewielkiego fragmentu dostępnej przestrzeni fazowej. Mgr Barej opracował metodę obliczania poprawek do kumulantów na zachowanie liczby barionowej i obecność korelacji krótkozasięgowych, co jest szczególnie ważne przy badaniu mechanizmów produkcji cząstek w niewielkich układach, takich jak powstałych w zderzeniach ^{7}Be+^{9}Be czy ^{40}Ar+^{45}Sc w eksperymencie NA61/SHINE. Wreszcie Doktorant wyprowadził wzory na kumulanty i kumulanty faktorialne w przypadku fluktuującej szerokości rozkładu gęstości barionów w pospieszności wynikającej z fluktuacji energii deponowanej przez zatrzymane protony. To wszystko sprawia, że dysertacja zawiera szereg interesujących i cennych rezultatów, przyczyniając się do dalszego rozwoju szeroko rozumianej fizyki wysokich energii.

Rozprawa ma formę monotematycznego cyklu publikacji składającego się z czterech artykułów, które ukazały się w jednym z najlepszych specjalistycznych czasopismach naukowych, Physical Review C. Wszystkie publikacje zostały przygotowane we współpracy z Promotorem pracy - prof. Bzdakiem, a twórca niniejszej rozprawy jest ich pierwszym autorem. Forma przedstawionej rozprawy doktorskiej stanowi bezsprzecznie wartość dodaną, będąc dowodem, iż przeprowadzone badania zostały już przyjęte, pozytywnie zrecenzowane, co stanowi potwierdzenie ich istotności w przestrzeni naukowej. Z uwagi na fakt opublikowania wszystkich prac wykazanych jako osiągnięcie naukowe w renomowanym czasopiśmie znajdującym się w wykazie Journal Citation Reports, czuję się zwolniony ze szczegółowej analizy przedłożonych publikacji - tej roli podjęli się delegowani z ramienia czasopisma recenzenci rekomendujący prace do druku. Zwrócę jedynie uwagę na najważniejsze w mojej ocenie ich aspekty w odniesieniu do wnioskowanej dziedziny i dyscypliny.

Od strony formalnej dysertacja liczy dziewięćdziesiąt cztery strony tekstu wraz z rysunkami i składa się z czterech części, streszczenia, liczącej dziewięćdziesiąt sześć pozycji bibliografii oraz dwóch dodatków. Pierwszy rozdział zawiera opis struktury rozprawy. W rozdziale drugim dyskutowany jest diagram fazowy QCD. Następnie Doktorant w sposób systematyczny wprowadza miary fluktuacji i korelacji użyteczne do opisu procesów produkcji cząstek, to jest kumulanty, faktorialne kumulanty i faktorialne momenty rozkładów krotności cząstek powstałych w zderzeniach relatywistycznych jonów. Następnie Autor przedstawia przegląd współczesnych wyników eksperymentalnych i teoretycznych związanych

z analizowaną w rozprawie tematyką. Rozdział trzeci zawiera opis najważniejszych rezultatów, które zostały umieszczone w publikacjach stanowiących podstawę przedstawionej rozprawy doktorskiej. Rozdział czwarty zawiera podsumowanie rozprawy. W dodatkach Autor zamieścił informacje uzupełniające (opis aktywności konferencyjnej Doktoranta, wykaz jego pozostałych publikacji, wykaz odbytych staży naukowych, uzyskanych grantów i nagród) oraz treści artykułów wchodzących w skład cyklu publikacji.

Warto zaznaczyć, że cała rozprawa doktorska, napisana w języku angielskim, została zredagowana w sposób bardzo staranny i logiczny. Bibliografia jest trafnie dobrana i uwzględnia najnowsze prace z tematyki dotyczącej fluktuacji i korelacji w procesach produkcji cząstek, co wskazuje, że Autor na bieżąco śledzi najnowsze osiągnięcia i postęp w badaniach. Materiał graficzny zawarty w rozprawie dobrze ilustruje omawiane badania i osiągnięte wyniki. Rozprawa jest przejrzysta, prezentowane zagadnienia są jasno omawiane. W ocenianej rozprawie znalazłem kilka punktów, które wymagają komentarza. 1) Na stronie 10 rozprawy Autor pisze o rozkładzie Skellama jako teoretycznym rozkładzie odniesienia dla mierzonego eksperymentalnie rozkładu wypadkowej liczby wyprodukowanych protonów. Rozkład Skellama jest rozkładem różnicy dwóch zmiennych losowych mających rozkład Poissona. Jak wiadomo, eksperymentalnie rejestrowany rozkład liczby cząstek naładowanych wyprodukowanych w zderzeniach relatywistycznych jonów nie jest opisywany rozkładem Poissona a raczej ujemnym rozkładem dwumianowym (NBD), bądź złożeniem kilku NBD. Jak by wyglądał referencyjny rozkład gdyby do jego utworzenia użyć różnicy dwóch rozkładów NBD? Czy własności takiego rozkładu pozwoliłyby łatwo wyznaczyć odpowiednie momenty rozkładu? 2) Na stronie 12 dysertacji Autor pisze fluktuacjach objętości jako niepożądanym oraz nieuniknionym efekcie tła. Zauważa (słusznie), że w badaniach eksperymentalnych nie jest możliwy bezpośredni pomiar początkowej geometrii zderzenia, między innymi parametru zderzenia. W związku z tym centralność zderzeń określana jest na podstawie krotności wyprodukowanych cząstek i jej związku z liczbą oddziałujących nukleonów używając do tego modeli typu Glauber Monte Carlo. Jak zatem należy rozumieć pojęcie *fluktuującej objętości*? A jak ta fluktuująca objętość jest określana w eksperymentach prowadzonej na stałej tarczy (jak choćby w eksperymencie NA61/SHINE), gdzie można zmierzyć energię nukleonów-obserwatorów z jądra-pocisku? Jaki wpływ na kumulanty i faktorialne kumulanty dyskutowane przez Autora ma ta fluktuująca objętość? Czy ten wpływ można określić analitycznie w postaci poprawek do zmierzonych wartości kumulantów? Publikacja [65] ze spisu literatury w dysertacji porusza ten ważny problem. Ja jednak spodziewam się usłyszeć więcej na ten temat w autoreferacie.

Mgr Barej jest autorem bądź współautorem ośmiu publikacji naukowych, z których siedem ukazało się w najlepszych czasopismach naukowych, a jedna ukazała się

w materiałach pokonferencyjnych. Wyniki swoich badań prezentował na siedmiu konferencjach międzynarodowych, z czego pięć razy w formie referatu. Mgr Barej był wykonawcą w grancie kierowanym przez swojego Promotora. Doktorant został, jak dotąd, laureatem trzech nagród, w tym prestiżowej nagrody imienia Arkadiusza Piekary przyznawanej przez Polskie Towarzystwo Fizyczne za najlepszą pracę magisterską. Z innych aktywności naukowych Doktoranta należy wymienić jego dwa wystąpienia na prestiżowym Seminarium Fizyki Ciężkich Jonów w Krakowie. Pan Barej pracował ze studentami Akademii Górniczo-Hutniczej prowadząc zajęcia z Fizyki II. Powyższe dane jednoznacznie wskazują, że mgr. Bareja można niewątpliwie zaliczyć do grona czołowych młodych fizyków w Polsce.

Z przyjemnością zapoznałem się z rozprawą doktorską mgr. Michała Bareja. Odwaga i bardzo duża samodzielność w formułowaniu problemów badawczych oraz waga uzyskanych wyników nie budzą u mnie wątpliwości, że mamy do czynienia z dysertacją na bardzo wysokim poziomie. Moim zdaniem cykl publikacji stanowiący podstawę pracy doktorskiej mógłby stanowić osiągnięcie będące podstawą ubiegania się o stopień doktora habilitowanego, oczywiście poza innymi wymogami ocenianymi w takiej procedurze – dysertacja spełnia zatem z naddatkiem wymagania ustawowe i zwyczajowe stawiane pracom doktorskim. W związku z tym wnioskuję o dopuszczenie mgr. Michała Bareja do dalszych etapów postępowania doktorskiego, jednocześnie, ze względu na wysoki poziom naukowy dysertacji oraz rangę naukową opublikowanych wyników wnoszę o jej wyróżnienie.

Maciej Rybczyński