



Kraków, 15.11.2017

dr hab. inż. Marcin Kucharczyk, profesor IFJ PAN
Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Jeremiego Niedzieli pt.

„Investigation of the source size and strong interaction with the femtoscopic correlations of baryons and antibaryons in heavy-ion collisions registered by ALICE”

Prezentowana praca dotyczy analizy femtoskopowej dla par barionów produkowanych w relatywistycznych zderzeniach ciężkich jonów w eksperymencie ALICE. Femtoskopia opiera się na analizie korelacji cząstek o małym pędzie względnym, pozwalając na wyznaczenie czasoprzestrzennej charakterystyki źródła cząstek, którego rozmiary są rzędu femtometrów. Ponieważ źródłem korelacji mogą być nie tylko efekty statystyki kwantowej lecz również oddziaływania w stanie końcowym, analiza tego typu pozwala jednocześnie na pomiar efektów oddziaływania silnego. Dotychczasowe przesłanki co do istnienia kolektywności materii powstałej w zderzeniach ciężkich jonów mogą zostać zweryfikowane poprzez analizę zależności rozmiaru źródła w funkcji masy poprzecznej pary cząstek. Ponadto, pomiar parametrów oddziaływania silnego wydaje się szczególnie istotny w przypadku par barion-antybarion, dla których znajomość zarówno parametryzacji efektów oddziaływania silnego, jak i przekrojów czynnych na oddziaływanie par barion-antybarion jest niewystarczająca do poprawnego modelowania fazy rozpraszania. Podsumowując, analiza femtoskopowa dla par barionów może przyczynić się do lepszego zrozumienia procesu produkcji barionów w zderzeniach ciężkich jonów przy dużych energiach, a w szczególności procesu ich anihilacji w fazie rozpraszania. Jak wynika z rozprawy, zachętą do wyboru takiego tematu, oprócz standardowej potrzeby pomiaru parametrów oddziaływania silnego i rozmiarów źródła dla par barionów, była dodatkowo możliwość analizy korelacji rezydualnych, które to zjawisko może istotnie wpływać na funkcje korelacji, a w konsekwencji na wartości rozmiarów źródła oraz parametrów oddziaływania silnego.

Uważam, że badania przedstawione w prezentowanej pracy wnoszą ważny wkład w zrozumienie procesów produkcji barionów w zderzeniach ciężkich jonów oraz formowania plazmy kwarkowo-gluonowej. Na uwagę zasługuje szczegółowa dyskusja wpływu korelacji rezydualnych na otrzymane wyniki - problem, który rzadko jest poruszany w literaturze. Praca jest napisana zwięźle oraz nie budzi zastrzeżeń pod względem merytorycznym.

Rozprawa doktorska mgr inż. Jeremiego Niedzieli oparta jest o dane zarejestrowane w eksperymencie ALICE w latach 2009-2015 przy energiach zderzeń wiązek jonów ołowiu $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ oraz 5.02 TeV. Praca napisana jest w języku angielskim, składa się ze wstępu, ośmiu rozdziałów oraz podsumowania.



Rozdział pierwszy to wstęp do rozprawy wraz z motywacją dla podjętych badań oraz krótką informacją o zawartości dalszych rozdziałów.

Z kolei rozdział drugi, omawiający motywację fizyczną, zawiera jasne i zwięzłe przedstawienie aspektów fizycznych badań, tj. modelu kwarków, chromodynamiki kwantowej oraz stanu plazmy kwarkowo-gluonowej, jaki może powstać w ultrarelatywistycznych zderzeniach ciężkich jonów, wraz z omówieniem najważniejszych sygnatur eksperymentalnych tego zjawiska. Autor podkreślił, że zderzenia relatywistycznych jąder atomowych są głównym źródłem naszej wiedzy o materii jądrowej w stanach o ekstremalnie dużej gęstości i bardzo wysokiej temperaturze, w których możliwe jest przejście fazowe do stanu plazmy kwarkowo-gluonowej. Zwrócił również uwagę, że pomiary korelacji fizycznych w zderzeniach relatywistycznych jąder atomowych mogą dostarczyć cennych informacji na temat procesu formowania plazmy kwarkowo-gluonowej, jak również weryfikacji modeli gwiazd neutronowych. Osobny podrozdział autor poświęcił na krótki opis jednego z modeli fenomenologicznych o nazwie *Thermal Heavy Ion Generator*, użytego w przedstawionej analizie do testowania zastosowanej metody badawczej.

Rozdział trzeci stanowi krótkie przedstawienie kompleksu akceleratorowego LHC oraz eksperymentu ALICE. Autor omawia wymagania stawiane aparaturze tego systemu detekcyjnego w obliczu oczekiwanych pomiarów fizycznych, przechodząc następnie do opisu najistotniejszych części detektora ALICE, kluczowych dla prezentowanej analizy. Moim zdaniem opis samego detektora został w tym miejscu przedstawiony w sposób zbyt skrótowy, gdyż opisane zostały najistotniejsze parametry tylko pięciu spośród dziewiętnastu wymienionych subdetektorów eksperymentu ALICE. Brak chociażby krótkiej wzmianki na temat funkcji pozostałych elementów detektora. Krótki opis byłby wskazany tym bardziej, że autor aktywnie uczestniczył w rozwoju algorytmów wizualizacji przypadków w eksperymencie ALICE, co opisuje na końcu rozdziału oraz w dodatku A. Zabrakło mi również choćby krótkiej dyskusji systemu wyzwalania eksperymentu ALICE.

Czwarta część rozprawy zawiera obszerną dyskusję podstaw teoretycznych użytej metody badawczej. Także i ta część rozprawy jest napisana w sposób zrozumiały i rzeczowy. Autor szczegółowo opisuje źródła korelacji pędowych w układach cząstek powstałych w zderzeniach ciężkich jonów, wynikające ze statystyki kwantowej, oddziaływań silnych oraz kulombowskich. Następnie przechodzi do opisu konstrukcji jednowymiarowej funkcji korelacji dla par barionów przy założeniu gaussowskiego kształtu funkcji źródła. Autor uzasadnia użycie modelu Lednický'ego-Lyuboshitz'a nie tylko w celu ograniczenia liczby parametrów dopasowania, użytego dla rozkładów danych eksperymentalnych, ale również w celu redukcji czasu potrzebnego na przeprowadzenie dopasowania poprzez możliwość użycia formuły analitycznej w przypadku niektórych systemów barion-(anty)barion. W rozdziale tym przedstawione zostały również założenia modelu ECS użytego do wyznaczenia efektywnych parametrów rozpraszania dla procedury dopasowania funkcji korelacji do danych eksperymentalnych. Lektura fragmentów rozdziału poświęconych obecnemu stanowi wiedzy na temat oddziaływań barionów uzmysławia trudności związane z badaniem tego typu zjawisk. Ta część rozprawy w sposób przekonujący dostarcza informacji uzasadniających kierunki pracy badawczej autora, opisanej w kolejnych rozdziałach.



W kolejnym, piątym rozdziale zawarta jest krótka dyskusja korelacji rezydualnych, powstających wskutek femtoskopowej korelacji par cząstek pierwotnych, które ulegają rozpadowi do cząstek wtórnych, rejestrowanych ostatecznie w detektorze. Przeprowadzona przez autora ocena ich wpływu na funkcje korelacyjne, a w konsekwencji na wyniki przedstawione w rozdziale ósmym, zasługuje na pochwałę.

W rozdziale szóstym zademonstrowano teoretyczną weryfikację zastosowanej metody badawczej, opartej na formalizmie dwucząstkowej funkcji korelacji. To złożone zagadnienie zostało przez autora potraktowane poważnie i przedstawione wyczerpująco, co zasługuje na podkreślenie. Autor w sposób właściwy przedyskutował możliwe implikacje związane z porównaniem przewidywań dla funkcji korelacji wyznaczonej przy użyciu metod numerycznych oraz uproszczonej formuły analitycznej opartej na modelu Lednický'ego-Lyuboshitz'a. Oszacowano ponadto czułość funkcji korelacji na wybrane parametry oddziaływań silnych, jak na przykład wartość części urojonej długości rozpraszania opisującej zjawisko anihilacji. Ważnym wnioskiem z przeprowadzonych w tym rozdziale badań jest możliwość użycia analitycznej formuły na funkcję korelacji z uśrednionymi po spinie parametrami rozpraszania dla wszystkich analizowanych w pracy par barion-antybarion.

W kolejnym, siódmym rozdziale autor przeprowadza test zastosowanej metody dopasowania przy wykorzystaniu rozkładów funkcji korelacji pochodzących z generatora *Thermal Heavy Ion Generator*, w ramach którego możliwe jest modelowanie nie tylko efektów statystyki kwantowej czy oddziaływań w stanie końcowym, lecz również korelacji rezydualnych. Zgodność wyznaczonych wartości promieni źródła barionów z przewidywaniami modelu uzasadnia zastosowanie opracowanej przez autora metody dopasowania do danych eksperymentalnych. Oczekiwałbym w tym miejscu podania większej liczby szczegółów dotyczących użytych parametrów wejściowych w generatorze *Thermal Heavy Ion Generator*, chociażby w postaci dodatku na końcu rozprawy oraz informacji na temat jakości wykonanych dopasowań.

Obszerny rozdział ósmy zawiera opis wykonanej przez autora analizy femtoskopowej dla par proton-antyproton, (anty)proton-(anty) Λ i Λ -(anty) Λ zmierzonych w zderzeniach jąder ołowiu o energii w środku masy na parę nukleonów $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ oraz 5.02 TeV, dla danych zebranych przez eksperyment ALICE na akceleratorze LHC. Wynikiem części doświadczalnej pracy jest wyznaczenie parametrów opisujących efekty oddziaływania silnego dla wyżej wymienionych par barionów oraz efektywnych parametrów oddziaływania silnego dla par cięższych barionów. Pozytywną konkluzję pracy stanowi stwierdzenie, że ujemna wartość części rzeczywistej długości rozpraszania, obserwowana dla wszystkich analizowanych par barionów, może świadczyć m.in. o istnieniu stanów związanych barionów i antybarionów. Z drugiej strony, obserwowana dla wszystkich analizowanych par barionów niezerowa wartość części urojonej długości rozpraszania prowadzi do konkluzji, iż kanały anihilacji istnieją nawet w przypadku par barionów różnego typu, jak np. proton-(anty) Λ . Lektura tego rozdziału świadczy jednoznacznie o solidności przeprowadzonej analizy, wykonaniu wielu czasochłonnych sprawdzianów i bardzo sprawnym posługiwaniu się oprogramowaniem. Ponieważ kryteria wyboru wraz z całą techniczną stroną selekcji sygnału związane są z cechami charakterystycznymi danego eksperymentu, ocenę poprawności



analizy wyrażonej przez kogoś nieuczestniczącego w eksperymencie należy oprzeć o prezentowany wachlarz przedstawionych przez mgr inż. Jeremiego Niedzielę poszczególnych etapów analizy. Autor wziął pod uwagę wszystkie zagadnienia typowe w tego rodzaju opracowaniach. Jest tu dość szczegółowa dyskusja cięć, rozważania związane z wprowadzeniem szeregu poprawek czy też założenia dotyczące rozmiarów źródeł barionów oraz użytych technik dopasowania, włącznie z formalizmem korelacji rezydualnych, których znaczenie zostało szczegółowo zbadane w rozdziale dziewiątym, w którym autor przeprowadził pogłębione studium użytej techniki dopasowania. Innowacyjnym wkładem pracy jest rozwinięta przez autora technika jednoczesnego dopasowania dla sześciu różnych układów barion-(anty)barion, wykonana w sześciu binach centralności dla dwóch energii zderzenia wiązek jonów ołowiu. Porównanie uzyskanych w tym rozdziale wyników do przewidywań modelu ESC wskazuje, że szczególny charakter oddziaływań silnych wymaga dalszych wysiłków pod względem interpretacji fenomenologicznej. Moim zdaniem autor powinien dokładniej przedstawić analizę błędu systematycznego, gdyż o ile w przypadku publikacji wymagane wydaje się podanie tylko znaczących przyczynków do niepewności systematycznej, to w rozprawie doktorskiej dobrze byłoby zamieścić więcej szczegółów, aby rozwiać ewentualne wątpliwości co do możliwych źródeł błędu systematycznego oraz ich znaczącości. W szczególności brak rozważań na temat niepewności systematycznej związanej z identyfikacją cząstek. Autor nie podaje wydajności rekonstrukcji badanych cząstek, np. protonów. Z faktu, iż nie jest ona nigdy doskonała wynika, że istnieje pewne prawdopodobieństwo, że cząstka taka jak np. proton może być niepoprawnie zidentyfikowanym pionem lub kaonem, co może mieć wpływ na kształt badanej funkcji korelacji. Zabrakło mi również bardziej szczegółowych informacji o próbce danych użytych w analizie, na przykład informacji o wymaganiach systemu wyzwiania dla użytej próbki danych, jaka była statystyka przypadków, czy też jaki był udział przypadków z więcej niż jednym oddziaływaniem jon-jon, czyli tzw. pile-up. Ponieważ korelacje badane są dla cząstek pochodzących z tego samego oddziaływania jon-jon, ewentualny efekt pile-up może zaburzyć funkcję korelacji, zwłaszcza w binach o dużej centralności. W rozprawie brakuje informacji na temat wielkości tego efektu i jego przyczynku do całkowitej niepewności systematycznej.

Wybrana przez autora tematyka pracy ma istotne znaczenie poznawcze, zwłaszcza w kontekście przygotowywanej modernizacji eksperymentu ALICE. Opracowana i przedstawiona w rozprawie metodyka badawcza będzie mogła być również bezpośrednio zastosowana w przyszłości. Zwiększona statystyka przypadków pozwoli na weryfikację przewidywań teoretycznych otrzymywanych różnymi technikami, jak i na ograniczenie niepewności wyznaczanych parametrów rozpraszania.

Praca napisana jest rzeczowo i starannie. Należy zauważyć, że przedstawiona analiza wymagała bardzo dobrego opanowania warsztatu eksperymentalnego, a narzędzia rozwinięte przez mgr inż. Jeremiego Niedzielę będą mogły zostać wykorzystane przez innych członków współpracy ALICE.



Pragnę wyrazić następujące uwagi krytyczne dotyczące szczegółów rozprawy:

1. W rozdziale ósmym brak informacji na temat użytej statystyki przypadków, czy też scałkowanej świetlności, jak również informacji na temat próbki danych, np. czy była to próbka, gdzie ewentualnie użyte zostały jakieś ograniczenia na poziomie układu wyzwalania?
2. Informacja na temat niepewności systematycznych wydaje się zbyt krótka. Na przykład brak informacji na temat indywidualnych przyczynków do niepewności systematycznej od źródeł błędu systematycznego wymienionych na stronie 109, czy też innych niewymienionych tutaj źródeł.
3. Brak konsekwencji w stosowaniu jednostek wielkości fizycznych. Autor wielokrotnie używa konwencji, według której prędkość światła $c = 1$ i wówczas np. podaje masy w GeV (np. masa protonu na stronie 11), nie uprzedzając jednak nigdzie czytelnika o tym fakcie. Jednocześnie, w przypadku innych wielkości c jest podawane explicite, jak np. w przypadku pędu poprzecznego cząstki, który na stronie 93 jest podany w jednostkach GeV/c.
4. Brak wyjaśnienia niektórych skrótów, np. GVL, YaJEM-D, ASW na rysunku 2.7, FTPC na rysunku 2.8, RF na stronie 15, czy też MR na rysunkach 9.3-9.5. Poza tym niektóre skróty są wprowadzone kilkakrotnie, jak na przykład QGP na stronie 12 i stronie 16, LCMS na stronie 51 i 84, czy też ITS na stronie 29 i 30. Używane skróty 1D, 2D i 3D również nie są nigdzie wprowadzone.
5. Podawanie odnośników do literatury zbyt późno (np. do opisu zderzacza LHC) lub ich brak w ważnych miejscach. Na przykład brak odnośników do chromodynamiki kwantowej, Modelu Standardowego, czy też zderzacza RHIC.
6. Na rysunku 2.6 nie ma wzmianki, że procentowe udziały 0-5%, 5-10% itd. oznaczają biny centralności. Nie jest wyjaśnione, co oznacza skrót SP w opisie zmiennej na osi y . Objasnienie wszystkich skrótów występujących na rysunkach zaczerpniętych z innych opracowań wydaje się być kwestią preferencji recenzenta, jednakże w rozprawie doktorskiej podawany jest na ogół pełny opis występujących w pracy oznaczeń.
7. W rozdziale ósmym słowo “cut” jest nadużywane. Powinno być ono zastąpione przez np. “requirement” czy “selection criterium”.
8. Nie do końca jasny opis rysunku 4.6, tzn. w tekście brakuje jednoznacznego opisu legendy zamieszczonej na rysunku.
9. Począwszy od strony 72 autor używa skrótu bb ($bb(\text{bar})$), który nie został wcześniej wprowadzony i może być mylący, ponieważ zazwyczaj jest zarezerwowany dla kwarków b i (anty) b , a nie dla par barion-(anty)barion. Poza tym nie jest do końca jasne, czy oznacza on wszystkie pary barionów, co sugeruje pierwsze zdanie na stronie 115, czy też pary barionów z wyłączeniem par (anty)proton-(anty) Λ i Λ -(anty) Λ , co z kolei sugeruje tabela 8.7 i opis pod nią.



10. Wydaje się, że odnośniki do literatury [46] oraz [51] oznaczają tę samą pracę, tj. CERN-THESIS-2016-172.

11. W tabeli 8.7 na stronie 110 w nagłówku zamiast *bb(bar)* powinno być *pp(bar)*, co sugeruje opis na dole strony 109.

12. Na rysunkach 9.3-9.5 nie jest jasne, co oznaczają punkty? Czy są to wyniki dla danych eksperymentalnych, co sugeruje opis w podrozdziale 9.3?

Recenzent zauważył jeszcze pewną liczbę drobnych błędów edytorskich, które jednak nie mają wpływu na zrozumienie tekstu rozprawy i dlatego nie zostały wymienione.

Większość wymienionych uwag krytycznych nie dotyczy wartości merytorycznej rozprawy, a jedynie kwestii edytorskich lub preferencji recenzenta dotyczących opisu wybranych zagadnień ujętych w rozprawie. Wspominane w recenzji uwagi nie zmieniają mojej pozytywnej oceny rozprawy. **Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wszelkie ustawowe wymogi stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Jeremiego Niedzielę do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

dr hab. inż. Marcin Kucharczyk, prof. IFJ PAN