



dr hab. Paweł Brückman de Renstrom, prof. IFJ PAN
Instytut Fizyki Jądrowej PAN
ul. Radzikowskiego 152
32-342 Kraków

Kraków, 27.05.2020 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Fulka zatytułowanej
„Charged particle production in diffractive proton-proton scattering at the
RHIC and LHC energies”**

Pan mgr inż. Łukasz Fulek przedstawił do recenzji rozprawę doktorską zatytułowaną „Charged particle production in diffractive proton-proton scattering at the RHIC and LHC energies”, przedstawiającą szczegółowo dwie analizy fizyczne mających na celu pomiar najistotniejszych charakterystyk produkcji cząstek naładowanych w oddziaływaniach proton-proton z pojedynczą dyfrakcją (ang.: *single diffractive*). Pierwsza analiza oparta jest o dane eksperymentu STAR zebrane na akceleratorze RHIC przy energii w układzie środka masy 200 GeV. Druga wykorzystuje dane eksperymentu ATLAS zebrane na akceleratorze LHC przy znacznie wyższej energii w układzie środka masy, 13 TeV. W obu przypadkach dane pochodzą z naświetlań w 2015 roku.

Cechą charakterystyczną oddziaływań z pojedynczą dyfrakcją jest rozproszenie jednego z protonów w kierunku „do przodu” oraz tzw. przerwa w pospieszności pomiędzy tym protonem a końcowym stanem hadronowym pochodzącym z dysocjacji drugiego protonu. Stąd, w obu analizach kluczową sygnaturą jest detekcja protonu rozproszonego w kierunku lotu wiązki w dedykowanych detektorach położonych tuż przy osi wiązki w sporej odległości od nominalnego punktu oddziaływania (detektory Roman Pot w eksperymencie STAR i detektory ALFA w eksperymencie ATLAS) w koincydencji z aktywnością hadronową w centralnej części detektora.

Znakomita większość cząstek produkowanych w badanych zderzeniach to cząstki o niskim pędzie poprzecznym, będące wynikiem miękkich oddziaływań kolorowych. Z tego względu, nie istnieją ścisłe przewidywania oparte na rachunku zaburzeń, a przewidywania Monte Carlo oparte są o modele fenomenologiczne wymiany Pomeronu i wymagają dopasowania do danych. Taką strategię obrały wszystkie liczące się generatory Monte Carlo, takie jak PYTHIA, HERWIG, czy też bardziej wyspecjalizowany EPOS. Niemniej, optymalizacja modeli oparta jest zazwyczaj na inkluzywnych danych, co nie gwarantuje poprawnego modelowania oddziaływań dyfrakcyjnych. Podobnie rzecz ma się z tzw. transportem liczby barionowej który, w zależności od modelu, może prowadzić do asymetrii produkcji barionów i antybarionów (w tym proton/antyproton) w centralnym obszarze pospieszności. Z oczywistych względów, szczegółowe porównanie modeli do danych możliwe jest jedynie dla cząstek naładowanych. Praca doktorska postawiła sobie zatem za cel porównanie do danych modelowania produkcji cząstek naładowanych przez wybrane generatory Monte Carlo, a zarazem dostarczenie informacji mogącej posłużyć do ich dalszej optymalizacji. W szczególności ten drugi cel podyktował strategię analizy, która odwickluje obserwacje eksperymentalne do poziomu pierwotnych rozkładów w wybranych zakresach kinematycznych, stosując kolejno odejmowanie tła, korekty licznych niewydajności eksperymentalnych oraz odwickływanie rozdzielczości i akceptancji (ang.: *unfolding*).

Pan Łukasz Fulek w ramach pracy doktorskiej przeprowadził dwie kompletne analizy fizyczne oparte na danych dwóch różnych eksperymentów. Na uwagę zasługuje fakt, że doktorant uczestniczył również w bardzo ważnym dla późniejszej analizy procesie precyzyjnego wyznaczenia położenia detektorów Roman Pot oraz wprowadzenia szczegółowej optyki systemu magnesów RHIC w celu symulowania transportu protonów z punktu oddziaływania do stacji Roman Pot w pakiecie GEANT4. Te ważne prace przygotowawcze nie zostały ujęte w rozprawie. Tak więc rozprawa, de facto, opisuje jedynie część pracy wykonanej przez doktoranta.



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ im. Henryka Niewodniczańskiego POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Przedstawiona do recenzji rozprawa składa się z krótkiego wprowadzenia, sześciu rozdziałów, zestawienia użytych akronimów (bardzo przydatne) oraz bardzo obszernej bibliografii zawierającej 244 pozycje. Praca napisana jest w języku angielskim z dodatkiem zwięzłego streszczenia w języku polskim.

Rozdział 1 zawiera wprowadzenie teoretyczne i koncentruje się na sektorze oddziaływań silnych Modelu Standardowego. Po ogólnym wstępie, opis koncentruje się na tzw. miękkiej chromodynamice kwantowej, a to na modelowaniu procesów hadronizacji. Osobny podrozdział poświęcony jest oddziaływaniom dyfrakcyjnym, definiując zaliczane do tej kategorii procesy, opisujące je zmienne kinematyczne (w szczególności wykorzystywane w opisanych dalej analizach zmienną Mandelstam'a t , i zmienną ξ wyrażającą względną stratę energii rozproszonego do przodu protonu) oraz wprowadzając teorię Regge opartą na analizie fal parcjalnych oraz jej rozwinięcie niezbędne w reżimie wyższych energii, czyli wymianę Pomeronu. Dalej, opisane są modele parametryzujące oddziaływania dyfrakcyjne, w szczególności modele SaS, DL i MBR wykorzystywane przez generatory Monte Carlo rozważane w kontekście zaprezentowanych analiz. Kolejne podrozdziały omawiają hipotezę transportu liczby barionowej i spodziewaną w związku z tym asymetrię produkcji barionów i antybarionów, oraz używane w dalszej części pracy generatory Monte Carlo.

Rozdział 2 wprowadza do omawianych dalej analiz przedstawiając istotne elementy układów eksperymentalnych, dyskutując kolejno akcelerator RHIC, spektroskop STAR, akcelerator LHC i eksperyment ATLAS. Szczególną uwagę poświęca autor układom służącym detekcji protonów dyfrakcyjnych oraz systemom rekonstrukcji i identyfikacji cząstek naładowanych, czyli odpowiednio Roman Pot, TPC i TOF w eksperymencie STAR oraz ALFA i Inner Detector w ATLASie.

Rozdział 3 zawiera szczegółowy opis analizy danych eksperymentu STAR. Już na wstępie autor cytuje swoją pracę inżynierską i pracę magisterską w których udokumentował symulacje transportu protonów na odcinku pomiędzy punktem oddziaływania a stacjami Roman Pot. Po szczegółowym omówieniu i uzasadnieniu wyboru trygera oraz selekcji przypadków i śladów cząstek naładowanych, autor definiuje kinematyczny obszar odniesienia zastosowany do dalszej analizy. Kolejny podrozdział omawia spodziewane kategorie tła jak i metody ich szacowania. Przypadki tła wynikające z koincydencji dwóch oddziaływań z których jedno dało sygnał w Roman Pot a drugie ślady w TPC oszacowane zostało przy pomocy danych rzeczywistych z użyciem trygera „Zero Bias”. Drugą kategorię tła stanowią ślady wtórnych cząstek naładowanych lub błędnie zrekonstruowane ślady. Ta kategoria została oszacowana za pomocą symulowanych przypadków Monte Carlo. Również za pomocą symulacji Monte Carlo oszacowane został wkład od przypadków centralnej dyfrakcji, podwójnej dyfrakcji oraz przypadków niedyfrakcyjnych. Kolejny podrozdział omawia poprawki wynikające z wydajności rekonstrukcji śladów w TPC, kojarzenia sygnału w TOF, rekonstrukcji wierzchołka pierwotnego oddziaływania, wymaganego trygera oraz poprawki na zrekonstruowaną energię cząstek. W każdym przypadku przedstawiona jest szczegółowa dyskusja związanych z poprawkami błędów systematycznych. Kolejnymi etapami analizy są poprawki na migrację przypadków z i do obszaru referencyjnego ze względu na rozdzielczość rekonstrukcji pędu poprzecznego i pseudo-*pospieszności* śladu oraz parametru ξ protonu w Roman Pot. Rozkład krotności cząstek naładowanych otrzymano za pomocą iteracyjnej metody odwikłania Bayes'owskiego. W celu pomiaru stosunków produkcji cząstek i anty-cząstek niezbędna jest identyfikacja, tutaj oparta na jonizacji właściwej (dE/dx) mierzonej w komorze TPC. Fit do rozkładu dE/dx umożliwił oszacowanie wkładów od elektronów, pionów, kaonów oraz protonów. Osobny podrozdział prezentuje wpływ rozważanych wcześniej błędów systematycznych na końcowe rozkłady. Rozdział kończy prezentacja wyników w postaci odwikłanych rozkładów krotności, pędu poprzecznego i pseudo-*pospieszności* jak również ich średnich wartości w trzech rozważanych binach ξ . Podobnie, stosunki krotności pionów, kaonów i protonów do ich antycząstek przedstawione są w funkcji pędu poprzecznego oraz parametru ξ . We wszystkich wypadkach, rozkłady eksperymentalne porównane są do przewidywań modeli PYTHIA 8 (SaS i MBR), HERWIG SD, EPOS SD+SD' oraz EPOS SD'.

Rozdział 4 przedstawia analogiczną analizę na danych eksperymentu ATLAS. Wysoka wartość \sqrt{s} oraz akceptancja detektora ALFA pozwoliły na znacznie niższą granicę obszaru odniesienia ($\xi > 10^{-5}$). Wysoka rozdzielczość detektora pikselowego pozwoliła na precyzyjne oszacowanie tła pochodzącego od wtórnych cząstek naładowanych na podstawie poprzecznego parametru zderzenia w stosunku do wierzchołka pierwotnego. Bardzo podobna procedura prowadziła do wyznaczenia skorygowanych rozkładów kinematycznych, przy czym procedurę odwikłania Bayes'owskiego zastosowano również do rozkładów pędu poprzecznego. Do identyfikacji pionów kaonów i protonów wykorzystana została informacja o starcie energii



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

dE/dx w detektorach pikselowych dzięki informacji „time over threshold”. Odmiennością analizy danych ATLAS'a jest badanie zarówno modelowania pojedynczej dyfrakcji (SD), czyli po odjęciu wkładów od podwójnej dyfrakcji (DD), dyfrakcji centralnej (CD) i procesów niedyfrakcyjnych (ND) jak również sumy wszystkich powyższych procesów z wyłączeniem CD. Szkoda, że ta istotna specyfika definiująca główny cel analizy została zakomunikowana dopiero na stronie 137 niejako przy okazji omawiania tła non-SD, odwołując się do różnic w modelowaniu przyczynków DD i ND w różnych generatorach. Nie zostało jednak wyjaśnione jaka korzyść dla oceny modeli fenomenologicznych wypływa z tak przyjętej strategii. Porównania danych do modeli dokonano zarówno dla bezwzględnie wyznaczonych rozkładów kinematycznych jak też samych ich kształtów, po znormalizowaniu. Nieco inny jest też zestaw generatorów wybranych do porównania z danymi. W przypadku analizy danych ATLAS'a są to PYTHIA 8 (SaS, DL i MBR), EPOS, oraz QGSJET.

Rozdział 5 przedstawia zwięzłe porównanie uzyskanych wyników do innych pomiarów eksperymentalnych, zwłaszcza w inkluzywnych oddziaływaniach nieelastycznych oraz non-SD. Porównanie wymagało ekstrapolacji uzyskanych wyników do obszaru odniesienia $n_{ch} > 1$ i $\eta^* = \ln(\sqrt{s}/M_X)$ w celu porównania gęstości cząstek naładowanych w obszarze centralnym do wyników z innych eksperymentów. Szkoda, że wielkości ρ_M i ρ_C zestawione w tabeli 5.1 nie są opisane w tekście (spodziewam się, że chodzi o gęstość zmierzoną i po ekstrapolacji). Wyniki uzyskane przez doktoranta wskazują na nieco niższy wykładnik zależności gęstości cząstek od M_X niż ten dopasowany do danych nieelastycznych i non-SD w funkcji \sqrt{s} .

Rozdział 6 stanowi krótkie podsumowanie pracy.

Rozdziały opisujące analizy danych eksperymentalnych dokumentują wkład własny doktoranta i świadczą o ogromnej ilości rzetelnie wykonanej pracy i opanowaniu rzemiosła analizy fizycznej. Są bardzo szczegółowe. Praca jest dobrze napisana, poprawnym językiem angielskim. W zasadzie nie wymaga korekt edytorskich, poza drobiazgami takimi jak niedokończone zdanie w przedostatnim akapicie na stronie 123, czy pomyłony opis osi na rysunku 4.36. Zawartość rozprawy jest bardzo skondensowana mimo niebagatelnej objętości ponad 200 stron. Zawiera więc ogromną ilość materiału doświadczalnego. W niektórych miejscach można by dokonać skrótów i uniknąć powtórzeń, które nieuchronnie pojawiają się ze względu na podobieństwo dwóch analiz, ale zdaję sobie sprawę, że w tym układzie pracy nie byłoby to łatwe. W pierwszym zdaniu pierwszego rozdziału, autor o całą dekadę odmładza Model Standardowy a kilka zdań dalej może nieco nadinterpretuje spuściznę LEP'u. W pierwszym zdaniu na str. 37 autor miał pewno na myśli moduł a nie warstwę detektora SCT. W dyskusji tła, w zależności od jego pochodzenia autor albo szacuje jego bezwzględną ilość, albo szacuje jako względny udział. Podczas gdy pierwszy sposób nie potrzebuje dalszych wyjaśnień, tak ten drugi wymaga uzasadnienia. Tak ma się rzecz na przykład z tłem protonów wtórnych. Mylącym wydaje się tytuł podrozdziału 3.6, „Control Plots”, który omawia sposób szacowania istotnego nieredukowalnego tła, jakim są przypadki DD, CD i ND. Zmieniłbym również używaną tam nomenklaturę, która np. określa mianem „MC models” to, co spodziewam się oznacza przypadki Monte Carlo po pełnej symulacji detektora. Nieco nieprzekonywująca jest też dyskusja migracji z i do obszaru odniesienia. Stwierdzenie jaki jest procentowy udział migracji w pobliżu granicy obszaru (str 92 i 151) jest trudna do jednoznacznego zinterpretowania, jako że zależy bezpośrednio od wielkości użytego binu. Nie oznacza to jednak, że przedstawiona metoda prowadzi do błędnych wyników. Chodzi jedynie o sposób jej prezentacji. Podobnie, niezrozumiałym w dyskusji błędu systematycznego migracji (str 151, punkt 1.) jest założenie, że migracja zależy od użytego generatora Monte Carlo. Czy to oznacza, że rozdzielczość rekonstrukcji śladów zależy od generatora? Bardzo skrupulatnie podszedł autor do wyznaczania błędów systematycznych. Przeanalizował wszelkie możliwe ich źródła. Pewne wątpliwości może jednak budzić przyjęcie niektórych z nich jako faktyczne źródło, podczas gdy może ono jedynie odzwierciedlać fluktuacje statystyczne. Tak, w moim pojęciu, może być w przypadku systematyki „closure test” i „EAST-WEST asymmetry” w analizie STAR. Nie jest też jasne, dlaczego uwzględniono systematykę na poziomie 0.25% związaną z wpływem częstości trygera na wydajność TPC (str. 75) a podobną systematykę dla TOF oszacowaną na 0.5% uznano za zaniedbywalną? Z drugiej strony, na rys. 3.67 i w tekście na stronie 110 pojawia się systematyka rzędu 50% dla krotności śladów 8, której nie da się w łatwy sposób powiązać z dyskusją w rozdziale 3.7. Prawdę powiedziawszy, dla niefachowego oka ta systematyka niepokojąco skorelowana jest z niską statystyką w najwyższych binach krotności. Ten fakt wymagałby dodatkowego komentarza. Bardzo szczegółowo opisana jest technika identyfikacji cząstek za pomocą dE/dx . W przypadku analizy STAR można by wręcz zaoszczędzić nieco miejsca nie przytaczając wszystkich etapów dopasowania



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

zależności wielomianowych dla wszystkich trzech rodzajów cząstek. Za to brakuje mi wyjaśnienia jak wykorzystane są dopasowania funkcji Gaussa do rozkładów $n\sigma_{dE/dx}$ dla trzech różnych hipotez masy cząstki. Nie rozumiem też zdania „Almost all centroids and widths are constrained by a function with free parameters p_k , where $k \in \mathbb{N}$ ”. Pewne pytania rodzi też dyskusja stosunków cząstek do antycząstek. W drugim punkcie na stronie 108 uzasadnione jest nieodejmowanie tła non-SD taką samą kontrybucją dla cząstek jak i antycząstek. Pomijając nieoczywistość samego stwierdzenia, czysto matematycznie dodanie tej samej liczby do licznika i mianownika nie zachowuje ułamka. Zdaję sobie sprawę, że w granicy małego przyczynku tła to jest prawdą, ale przynajmniej jedno zdanie uzasadnienia byłoby tutaj na miejscu. Podobnie wątpliwości w przypadku analizy danych ATLAS budzi stwierdzenie w punkcie czwartym na str. 164, a dotyczące tła z koincydencji. Nie jest też jasno uzasadnione, dlaczego przy korekcie na poziomie śladów (str. 157 punkt 2) wszystkie źródła są przyjmowane jako udział względny. W rozdziale 4.4 istotna część dyskusji tła non-SD poświęcona jest wyznaczeniu czynników skalujących tła CD za pomocą dopasowania w obszarze kontrolnym. Z tekstu wynika, że zastosowanie powyższej korekcji przeprowadza modelowanie zmiennej ξ^{ALFA} z rysunku 4.11 w to pokazane na rysunku 4.14. Niejasnym pozostaje jednak, dlaczego kontrybucja SD w tych dwóch przypadkach nie pozostaje identyczna.

Autor uzyskał szereg wartościowych wyników będących wskazówką dla poprawy parametryzacji generatorów Monte Carlo. Nie ukrywam, że niektóre z nich nie są łatwe do przeanalizowania i oceny dla nie eksperta. Nie zawsze wiadomo, dlaczego dana obserwacja jest istotna i jak ją interpretować. Dla przykładu nie jest wyjaśnione, dlaczego asymetria proton-antyproton badana jest w funkcji parametru ξ w eksperymencie STAR, a w eksperymencie ATLAS jedynie w funkcji pędu poprzecznego. Wnioski dotyczące transportu liczby barionowej do obszaru centralnego są przeciwne w tych dwóch przypadkach, co nie zostało opatrzone komentarzem.

Powyższe uwagi nie mają, jednakże, wpływu na jednoznacznie pozytywną ocenę pracy, która dokumentuje rzetelnie przeprowadzoną pracę badawczą i dostarcza wartościowych wyników. Nie mam wątpliwości, że przedstawiona praca w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim i wnoszę do Rady Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH o dopuszczenie pana mgr. inż. Łukasza Fulka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Z poważaniem

Paweł Brückman de Renstrom