

Prof. Jacek Ciborowski
Wydział Fizyki
Uniwersytetu Warszawskiego
L. Pasteura 5
02093 Warszawa

Łopuchowo, 6 czerwca 2020

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr Łukasza Fulka

zatytułowanej:

Charged particle production in diffractive proton-proton scattering at the RHIC and LHC energies

Łukasz Fulek przedstawił rozprawę doktorską na którą składają się wyniki analizy danych zebranych w dwóch eksperymentach fizyki wysokich energii - STAR przy akceleratorze RHIC w Brookhaven (200 GeV w środku masy) oraz ATLAS przy akceleratorze LHC w CERN (13 TeV w środku masy), w obu wypadkach oddziaływań proton-proton. Tematyka fizyczna analiz to oddziaływania dyfrakcyjne, których sygnaturą jest występowanie wiodącego protonu do przodu (pojedyncza dyfrakcja), a w szczególności produkcja cząstek naładowanych.

W rozdziale I autor zaprezentował stronę teoretyczną tematyki, którą się zajmuje. Poza Modelem Standardowym jest to wprowadzenie do oddziaływań dyfrakcyjnych (mięka i twarda dyfrakcja) oraz przedstawienie modeli fenomenologicznych (SaS, DL i MBR). W podrozdziale 1.2 wprowadzone zostały definicje powszechnie przyjętych zmiennych kinematycznych, używanych później w analizie danych. W podrozdziale 1.3 omówione zostało zjawisko przekazu liczby barionowej. Sygnałem jego występowania jest różny od jedynki stosunek produkcji barionów i antybarionów w centralnym obszarze pospieszności, czyli z dala od wiązek. Autor wymienia modele opisujące możliwe mechanizmy takiego zjawiska (Dual Parton Model, String Junction Model i inne). Na koniec opisuje pokrótce generatory Monte Carlo, używane w analizie danych, opisaną w rozprawie: PYTHIA 8, EPOS, HERWIG 7.1 i QGSJET-II.

Opis akceleratorów RHIC i LHC oraz detektorów STAR i ATLAS z opisem części składowych wykorzystywanych w tych szczególnych analizach, przedstawiony został w rozdziale II.

Analiza danych uzyskanych przy pomocy detektora STAR przedstawiona jest w rozdziale III i stanowi pierwszą część wkładu autora do niniejszej rozprawy. W podrozdziale 3.1 autor pisze o dedykowanej symulacji detektorów „Roman pots”. Na podstawie ostatniego zdania streszczenia wnioskuję, że była to samodzielna praca autora. Następnie omówione są kolejne kroki analizy danych: generacja przypadków Monte Carlo i selekcja przypadków. W podrozdziale 3.5 omówiony jest szczegółowo wkład tła do tak wybranej próbki oraz jego parametryzacji. Niżej następuje prezentacja wykresów kontrolnych niepoprawionych rozkładów zmiennych ξ (będącej kwadratem masy dyfrakcyjnego układu hadronów M_X (lewy dolny graf na rys. 1.7) znormalizowanym do kwadratu energii w układzie środka masy, s) oraz t (przekaz czteropędu) na rys. 3.18 (zdefiniowanych w podrozdziale 1.2). Poprawki do przedstawionych rozkładów omówione zostały szczegółowo w podrozdziale 3.7. Autor wyczerpująco rozważył wszystkie istotnie ich źródła. Podzielił poprawki na 5 grup: rekonstrukcja torów w TPC (str. 24), wydajność detektorów TOF (str. 27), straty energii, rekonstrukcja wierzchołka oraz BBC (str. 27); w pierwszych dwóch grupach opisał wszystkie oddzielne wkłady. W podrozdziale 3.8 opisana jest migracja przypadków do i z obszaru roboczego (fiducial volume) oraz migracje między trzema zakresami zmiennej ξ , która jest podstawowym parametrem służącym opisowi produkcji układu hadronowego (w funkcji pędu poprzecznego i pseudopospieszności). W podrozdziale 3.9 autor omawia poprawki wynikające z niepełnej wydajności detektorów; w szczególności dość skomplikowaną procedurę wyprowadzenia rozkładu krotności cząstek naładowanych z niepełnego rozkładu obserwowanego, opartą na odplataniu bayesowskim (Bayesian unfolding). Rezultatem zastosowania tej procedury jest macierz odplatania, która autor wyznaczył dla przyjętych przez siebie trzech zakresów zmiennej ξ (rys. 3.56) na podstawie której możliwe jest wyznaczenie niepewności pochodzącej od tej procedury. Ponadto autor przedstawia metody wyznaczenia poprawek do rozkładów pędu poprzecznego i pseudopospieszności a następnie testy zgodności (konsystencji) poprawionych wielkości oraz testy oczekiwanej symetrii lewo-prawo w detektorach. Spora część tego rozdziału poświęcona jest identyfikacji cząstek na podstawie strat energii, dE/dx . Autor przedstawił szczegółową analizę tego zagadnienia określając zakresy pędu w jakich poszczególne cząstki (π^\pm , K^\pm i p/anty-p) mogą być identyfikowane a następnie zastosowanie wyników do otrzymania stosunków rozkładów krotności zidentyfikowanych cząstek i antycząstek. Szczegółowy opis wyznaczenia niepewności systematycznych (pochodzących z 14 źródeł) przedstawiony został w podrozdziale 3.10, choć niedługim lecz byłym wymagającym

ogromnego wkładu pracy. Wyniki analizy danych z detektora STAR, wraz z licznymi porównaniami, autor przedstawił w podrozdziale 3.11. Zmierzone wielkości można podzielić na dwie grupy. Do pierwszej zaliczają się rozkłady krotności cząstek naładowanych, w tym w funkcji pędu poprzecznego, pseudospieszczości i parametru ξ . Drugą grupę stanowią stosunki przekrojów czynnych na produkcję cząstek i antycząstek π^\pm , K^\pm i p/anty-p w funkcji tychże zmiennych. Na podstawie siedmiu zestawów wykresów autor wyciąga wnioski dotyczące zgodności otrzymanych przez siebie wyników z przewidywaniami generatorów MC. Porównanie wypada zdecydowanie na niekorzyść HERWIG-a (wersje współczesne z lat 2000-tych) oraz wskazuje, że w przypadku generatorów EPOS (2008) istnieje możliwość wyeliminowania rozbieżności poprzez wyważenie proporcji wkładu dyfrakcyjnego (SD) i niedyfrakcyjnego (SD'). Na str. 122 zamieszczona jest uwaga dotycząca ew. „dostrajania” generatora PYTHIA 8 drogą zmiany parametru ϵ Pomeronu (odstępstwa od wartości 1), do skonfrontowania z dyskusją wyników analizy danych z eksperymentu ATLAS.

Analiza danych uzyskanych przy pomocy detektora ATLAS przedstawiona jest w rozdziale IV i stanowi drugą część wkładu autora do rozprawy. Jej metodologia jest podobna to tej opisanej dla detektora STAR. Podstawowym parametrem odróżniającym oba eksperymenty jest energia w środku masy, a co za tym idzie, użycie innych detektorów, selekcji, rekonstrukcji torów, opisu i uwzględnienia tła oraz różnorodnych poprawek. Nie będę szczegółowo omawiał tych zagadnień wobec przedstawienia tej metodologii w poprzednim ustępie. Nadmienię jedynie, że w mojej ocenie autor poświęcił dużo więcej czasu na analizę tych danych ale jest to uzasadnione ze względu na, moim zdaniem, większe znaczenie fizyczne otrzymanych wyników. Wiele aspektów analizy pozostało jednak bardzo podobnych, jak np. identyfikacja cząstek czy procedury odplatania. Autor uwzględnił 13 źródeł niepewności systematycznych i poświęcił tym zagadnieniom spory podrozdział 4.8. Zmierzone charakterystyki dla cząstek naładowanych przedstawione zostały na rys. 4.46-4.56 (razem 65 wykresów!). W komentarzu zamieszczonym na stronach 173 i 179 autor omawia szczegółowo poszczególne grupy wykresów w kontekście zgodności otrzymanych przez siebie wyników z przewidywaniami MC oraz gdzie stosowne - zgodności z jedynką i następnie podsumowuje spostrzeżenia na str. 183. Ogólny wniosek płynący z tych porównań jest taki, że podobnie jak w przypadku danych z detektora STAR, również dla eksperymentu ATLAS nie ma uniwersalnego generatora MC, który by opisywał wszystkie wyniki w całych zmierzonych zakresach i generatory wymagają „dostrajania”. Autor zamieszcza uwagę, że parametr ϵ oraz być może również parametr nachylenia trajektorii Pomeronu, α_p , powinien mieć mniejszą wartość niż założony w

generatorze PYTHIA 8, co jest zgodne z podobną uwagą zamieszczoną we wnioskach z analizy danych eksperymentu STAR.

Porównanie produkcji cząstek naładowanych w obszarze centralnych prędkości w funkcji energii w środku masy, s , omówione jest w rozdziale V (wielkość $1/N \frac{dN}{d\eta}$). Wyniki liczbowe zamieszczone zostały w tabeli 5.1 i przedstawione na rys. 5.1 wraz z pozostałymi światowymi wynikami oraz krzywymi reprezentującymi dopasowanie zależności potęgowej, s^δ , zaobserwowanej w eksperymentach CMS i TOTEM przy akceleratorze LHC. Wyniki grupują się wokół dwóch trendów tej zależności, $\delta \approx 0.12$ dla danych zawierających istotną domieszkę procesów niedyfrakcyjnych i $\delta \approx 0.09$ dla danych składających się z przypadków pojedynczej dyfrakcji. Wkład autora widoczny na tym rysunku to 3 punkty z eksperymentu STAR i 3 z eksperymentu ATLAS i właśnie te ostatnie w sposób rozstrzygający (ze względu na niewielkie niepewności) potwierdzają ten drugi trend, tym samym dowodząc tej odmienności dla procesów pojedynczej dyfrakcji; punkty doświadczalne z eksperymentu STAR, otrzymane przez autora, leżą w zakresie energii, w którym te dopasowania mniej więcej się pokrywają. Na rys. 5.2 przedstawiona jest średnia wartość pędu poprzecznego w funkcji krotności cząstek naładowanych. Wartości otrzymane przez autora w niniejszej analizie danych z eksperymentu ATLAS w trzech przedziałach zmiennej ξ porównane są z innymi wynikami (minimum bias) tegoż eksperymentu, z którego autor wyciąga wniosek, że te ostatnie są zdominowane przez przypadki pojedynczej dyfrakcji.

W rozdziale VI autor przedstawia podsumowanie oraz konkluzje swojej rozprawy. Zostały one już częściowo przedstawione pod koniec rozdziałów III i IV a w większości mają charakter techniczny, dotyczący zgodności wyników otrzymanych przez autora z różnymi generatorami MC. Wyniki te niewątpliwie są ważne dla „dostrojenia” parametrów modeli do danych. Tym niemniej oczekiwałbym w tym rozdziale nieco więcej dyskusji o fizyce procesów, które zostały tak skrupulatnie przebadane. Oczywiście nie spodziewałbym się szczegółowej dyskusji o dziesiątkach parametrów sterujących przewidywaniami modeli – to jest zadanie dla wąskich specjalistów z tej dziedziny. Natomiast brak mi nawet krótkich komentarzy na następujące tematy.

- (1) Skoro w podrozdziale 1.3 autor wymienia dwa modele opisujące transfer (czy transport) liczby barionowej, to przydałoby się odniesienie do tych modeli wobec stwierdzenia autora o nieobserwowaniu tego zjawiska w mechanizmie z obszaru „do przodu” do obszaru centralnego;
- (2) Jednymi z powszechnie znanych i zrozumiałych parametrów opisujących procesy dyfrakcyjne są dwa parametry: ε (odstępstwo od wartości 1 parametru odcięcia) i parametr nachylenia α_p trajektorii Pomeronu. Obie analizy wskazują na to, że lepsze dopasowanie wyników generatora

PYTHIA 8 otrzymałoby się gdyby dokonać pewnego „dopasowania” wartości tych parametrów. Stwierdzenie takie nasuwa natychmiast pytanie o powodzenie wykonania takiej próby. Wiadomo bowiem, że parametry trajektorii Pomeronu mierzone są w dziesiątkach różnych procesów dyfrakcyjnych przeprowadzonych w różnych zakresach zmiennych kinematycznych więc pojawia się kwestia ograniczeń wynikających z istniejących więzów zewnętrznych na ich wartości. Chętnie usłyszałbym komentarz autora na ten temat, czemu w rozdziale VI poświęcił on jedynie ostatnie zdanie pracy;

- (3) Chciałbym lepiej zrozumieć wynik dopasowania parametru δ w zależności s^δ (wzór 5.1 i rys. 5.1). Wiadomo, że tego typu parametryzacja stosowana jest w przypadku całkowitych przekrojów czynnych. W procesach dyfrakcyjnych wykładnik ten można wyrazić przez parametry trajektorii Pomeronu. Rzeczywiście dla procesów miękkiej dyfrakcji wartość parametru δ jest zbliżona do wartości cytowanych. Rozumiem, że to podobieństwo nie jest przypadkowe?

Po przeczytaniu niniejszej rozprawy stwierdzam, że nie mam uwag do pracy jako całości. Przedstawione powyżej trzy uwagi w żadnym wypadku nie pomniejszają mojej wysokiej oceny. Autor wykonał tytaniczną pracę przeprowadzając szczegółową i rzetelną analizę danych z dwóch wielkich experimentów. Poprawnie przedstawiona jest w pracy zarówno strona teoretyczna badanych zagadnień jak i wszystkie kroki analiz doświadczalnych. Wkład samodzielnej pracy autora został jasno określony. Metodologia opisanych analiz jest poprawna i typowa dla współczesnych, wielkich experimentów z tej dziedziny. Jeśli chodzi o uwagi redaktorskie to ujawnię, iż przy czytaniu większości opisów na rysunkach, będąc upośledzonym nadwzrocznością, byłem zmuszony posługiwać się lupą. Rozprawa doktorska Łukasza Fulka dowodzi, że autor posiada szeroką wiedzę z zakresu zarówno fizyki badanych oddziaływań jak i warsztatu doświadczalnego.

W konkluzji stwierdzam, że przedłożona praca spełnia ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Łukasza Fulka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

J. Jankowski