



Prof. dr hab. Lech Szymanowski
Hoża 69, 00-681 Warsaw, Poland
Lech.Szymanowski@ncbj.gov.pl

Warszawa, 10 stycznia 2017 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Tomasza Stebela
„Effects of higher twists and k_T -factorization in the Drell-Yan process”

Przedmiotem rozprawy doktorskiej są badania teoretyczne w ramach chromodynamiki kwantowej (QCD) procesu Drella-Yana (DY), czyli procesu inkluzywnej produkcji pary leptonowej w zderzeniach dwóch hadronów. Cechą charakterystyczną procesu DY jest występowanie w nim dużej, czasowopodobnej masy inwariantnej wyprodukowanych leptonów. Odgrywa ona przy jego opisie teoretycznym rolę tzw. twardej skali, która pozwala oddzielić (rozfaktoryzować) w amplitudzie rozpraszania jej składową z dynamiką krótkozasięgową (opisywaną w ramach teorii zaburzeń) od zdominowanych przez długozasięgową dynamikę QCD rozkładów partonów w zderzających się hadronach. Proces DY jest więc czasowopodobnym odpowiednikiem rozpraszania głębokonieelastycznego leptonu na hadronie z przestrzennopodobnym fotonem emitowanym przez rozpraszany lepton. Obie te reakcje są najintensywniej badanymi doświadczalnie i teoretycznie procesami produkcji inkluzywnej pozwalającymi poznawać rozkłady partonów w hadronach oraz złożone cechy nieliniowych oddziaływań partonów. Recenzowana praca doktorska należy do tego nurtu badań.

W zależności od warunków kinematycznych rozważanego procesu, w tym jego wartości energii zderzenia i/lub wielkości twardej skali, rozfaktoryzowanie amplitudy rozpraszania na krótkozasięgową część perturbacyjną i nieperturbacyjne rozkłady partonów dokonuje się bądź to w ramach ścisłego teoriopolowo rozłożenia iloczynu operatorów na stożku świetlnym (będącego podstawą faktoryzacji kolinearnej QCD) bądź też w ramach mniej formalnej teoriopolowo faktoryzacji k_T , w której stopniami swobody opisującymi dynamikę procesu są pędy poprzeczne partonów. To, w jaki sposób dwie postacie faktoryzacji się uzupełniają, lub jak jeden opis przechodzi w drugi, jest obecnie przedmiotem wielu badań teoretycznych. Z drugiej strony, jest często trudno przewidzieć która postać faktoryzacji jest bardziej adekwatna w konkretnych warunkach kinematycznych procesu, tak że ostatecznie decyduje o tym porównanie otrzymanych w każdym podejściu przewidywań teoretycznych z danymi pomiarowymi.

Głównym przedmiotem badań omawianych w pracy doktorskiej jest obliczenie w ramach wysokoenergetycznej faktoryzacji k_T wkładów do funkcji struktury procesu DY determinujących postać różniczkowych przekrojów czynnych. Zwykle wkład do tych obserwabli jest wyznaczany w ramach faktoryzacji kolinearnej, z uwzględnieniem jedynie wyrazów wiodących asymptotycznie w twardej skali, czyli tzw. wkładów wiodących twistów. W przypadku procesów zachodzących przy niższych energiach (osiągalnych w takich centrach badawczych jak Jefferson Laboratory lub RHIC w USA czy COMPASS w CERNie), tego typu analiza prowadzi często do niezłej zgodności przewidywań teoretycznych z danymi pomiarowymi. Jednakże ten opis teoretyczny musi być zmodyfikowany w przypadku



procesów zachodzących przy dużo wyższych energiach osiągalnych w Wielkim Zderzaczu Hadronowym (LHC) w CERNie. Wyższe energie osiąmane w LHC powinny umożliwić pomiar obserwabli czułych nie tylko na wiodące asymptotycznie wkłady lecz również na niewiodące wkłady wyższych twistów lub też na wkłady związane z niezerowymi pędami poprzecznymi partonów. Ich oszacowanie jest przedmiotem pracy doktorskiej i dlatego uważam że jej tematyka jest bardzo aktualna i ważna dla postępu badań wysokoenergetycznej fizyki małych x -ów.

Rozprawa doktorska składa się z trzech głównych rozdziałów które oparte są na dwóch artykułach opublikowanych w Journal of High Energy Physics oraz na jednym preprincie przesłanym do bazy artykułów arXiv.

Rozdział drugi rozprawy zatytułowany „Basics” zawiera obszerne wprowadzenie do formalizmu teoretycznego niezbędnego do zrozumienia oryginalnych wyników omawianych w kolejnych dwóch rozdziałach.

I tak, na wstępie zostaje omówiona kinematyka procesu DY oraz podana ogólna postać przekroju czynnego. Następnie, zdefiniowane zostają dwa rodzaje funkcji struktury używane do parametryzacji różniczkowego przekroju czynnego procesu DY: niezmiennicze funkcje struktury oraz bardziej popularne w literaturze funkcje struktury skrętności (helicity structure functions, HSF). Wyjaśniony jest związek między nimi oraz omówiono szczegóły zależności postaci funkcji HSF od wyboru osi układów definiujących zależności kątowe różniczkowych i przecałkowanych przekrojów czynnych. W tym kontekście wprowadzono i omówiono związek Lama-Tunga wiążący podłużną funkcję struktury z jej odpowiednikiem z przeskokiem spinu poprzecznego fotonu wirtualnego. Związek Lama-Tunga jest spełniony w przypadku opisu procesu DY opartego na faktoryzacji kolinearnej, nawet z uwzględnieniem niewiodących poprawek, natomiast, jak pokazują wyniki recenzowanej rozprawy, jest naruszony, gdy opis tego procesu opiera się na faktoryzacji k_T . Tę część wprowadzenia uważam za bardzo użyteczną z uwagi na jasność prezentacji pomagającą w dalszej lekturze pracy.

Kolejna część rozdziału drugiego poświęcona jest zwięzłemu przedstawieniu rozwinięcia operatorowego oraz technice faktoryzacji, która pozwala zdefiniować kolinearne jak i nieprzecalkowane funkcje struktury. Dwie ostatnie części rozdziału drugiego zawierają wprowadzenie do metody BFKL (nazwanej od nazwisk jej autorów Balitsky-Fadin-Kuraev-Lipatov) w przybliżeniu wiodących logarytmów oraz opis zjawiska saturacji gluonów. Szczególna uwaga poświęcona jest omówieniu dwóch ważnych fenomenologicznie modeli dipolowych przekrojów czynnych: opartego na obrazie Gribowa-Muellerera modelu Golca-Biernata – Wüsthoffa (GBW) wielokrotnego rozpraszania dipola na niezależnych nukleonach, oraz na modelu BFKL (w ogólnym przypadku opartego na równaniu Balitskiego-Kovchegova sumującego wkłady diagramów z nieliniowym sprzężeniem trzech diagramów drabinowych BFKL (tzw. fun diagrams)).

Rozdział trzeci rozprawy oparty jest na nowych wynikach badań z udziałem mgra Stebela. Dotyczy on opisu funkcji struktury procesu DY w tzw. kinematyce do przodu, czyli z dużą pośpiesznością wyprodukowanego fotonu wirtualnego, w której występuje faktoryzacja hybrydowa, czyli jednocześnie kolarna i k_T . Wybór takiej kinematyki jest motywowany możliwością porównania przewidywań teoretycznych z pomiarami kolaboracji LHCb. Istotnie



nowym i kluczowym wynikiem teoretycznym jest tu wyprowadzenie bezpośrednio z QCD reprezentacji Mellina czynników wpływu (impact factors) procesu DY do przodu dla wszystkich funkcji struktury, dla dowolnej wartości poprzecznego pędu wyprodukowanej pary leptonów. Jest to istotne uogólnienie dotychczasowych wyrażeń istniejących w literaturze, z wykonanym całkowaniem po pędzie pary leptonowej. Wynik ten służy następnie do obliczeń analitycznych wkładów poszczególnych poprawek potęgowych, czyli wyższych twistów, do poszczególnych funkcji HSF, zarówno nieprzebiegowanych jak i przebiegowanych, zarówno w ramach modelu GBW jak i modelu BFKL. Zadanie to jest wykonane przy pomocy eleganckiej metody obliczania wkładów oddzielnych twistów odpowiadających biegunom w zespolonej płaszczyźnie parametru Mellina. Wyprowadzone są również wyrażenia odpowiadające sumie wkładów wszystkich twistów do poszczególnych funkcji HSF.

Powyższe wyniki stanowią następnie punkt wyjścia obszernej analizy numerycznej obserwabli, które mogą być przedmiotem pomiarów w LHC. Aby ocenić niepewności teoretyczne związane z dwoma różnymi dynamicznie modelami dipolowymi wykonane są oszacowania w ich ramach przekroju czynnego na produkcję pary DY przebiegowanego po pędach leptonów w kinematyce eksperymentu LHCb. Otrzymane postacie przekroju czynnego są zadowalająco zgodne z dostępnymi danymi pomiarowymi, co zwiększa wiarygodność najważniejszych przewidywań. Można je streścić w następujących punktach:

- Okazuje się, że w przypadku modelu GBW związek Lama-Tanga zachodzi jedynie przy uwzględnieniu wkładów wiodącego twistu 2, natomiast jest on naruszony przez wkłady wyższych twistów, poczynając od twistu 4. Niemniej, dla dużych mas inwariantnych pary leptonów, kiedy to w modelu GBW suma wkładów wyższych twistów znika, związek Lama-Tanga jest dobrze spełniony. W przypadku modelu BFKL związek ten jest naruszony już przez wyrazy wiodącego twistu 2. Ponadto jest on w tym modelu silnie naruszony przy wszystkich wartościach mas inwariantnych wyprodukowanej pary leptonowej. Wyniki te oznaczają, że kombinacja funkcji HFS występująca w związku Lama-Tanga jest obiecującą obserwabłą służącą do doświadczalnego badania wkładów wyższych poprawek potęgowych, pozwalającą oceniać poprawność przyjętych założeń teoretycznych.

- Analiza wkładu wyższych twistów w modelu BFKL sugeruje że jest on mocno stłumiony i tym samym jego efekty mogą być trudne do zmierzenia. Oznacza to, że za naruszenie związku Lama-Tanga w tym modelu mogą być odpowiedzialne inne efekty dynamiczne niż tylko wyższe twisty, a mianowicie niezerowe pędy poprzeczne partonów opisywanych równaniem BFKL. Wyjaśnienie tej obserwacji może służyć jako przedmiot dalszych badań.

- Wkład wyższych twistów w obu rozważanych modelach jest szczególnie odmienny w przypadku funkcji HSF niediagonalnej w poprzecznych polaryzacjach wirtualnego fotonu, przy małych wartościach masy inwariantnej pary leptonów. Jednak nie daje ona wkładu do przebiegowanego po pędach leptonu przekroju czynnego. Dlatego pomiar doświadczalny tej funkcji musi być powiązany z analizą rozkładów kątowych wyprodukowanych leptonów.

Rozdział czwarty rozprawy doktorskiej poświęcony jest analizie naruszenia związku Lama-Tunga w hadroprodukcji bozonu Z^0 w centralnym obszarze pośpieszności. Proces ten jest ostatnio przedmiotem pomiarów wykonanych w LHC przez kolaboracje ATLAS oraz CMS. Porównanie przewidywań teoretycznych dotyczących stopnia naruszenia tego związku,



opartych na faktoryzacji kolinearnej z uwzględnieniem kolejnych poprawek radiacyjnych z wynikami doświadczalnymi dla dużych wartości pędu poprzecznego bozonu nie jest zadowalające. Stąd zamysł przeprowadzenia badań tego naruszenia w ramach faktoryzacji k_T . Zadanie to wymagało obliczenia dodatkowo wkładu do przekroju czynnego procesu pochodzącego od fuzji dwóch wirtualnych gluonów. Pełny wkład do przekroju tego procesu produkcji Z^0 jest więc sumą wyrażeń obliczonych w rozdziale trzecim rozprawy dla produkcji DY do przodu oraz wspomnianego wkładu fuzji gluonowej. Przeprowadzona następnie analiza numeryczna oparta jest na trzech omawianych w literaturze, lecz dynamicznie różnych, modelach rozkładów gluonowych. Z tego powodu otrzymane przewidywania silnie zależą od użytego modelu rozkładu gluonowego. Najlepszą zgodność z danymi kolaboracji ATLAS otrzymuje się w przypadku modelu opartego na emisjach eikonalnych typu Weizsäcker-Williamsa. Model ten ma jednak słabe strony, gdyż nie zawiera ewolucji oraz nie był użyty do analizy globalnej danych dotyczących procesu DY z uwzględnieniem zależności od pędu poprzecznego wyprodukowanej pary DY. Niemniej, wyniki badań tej części rozprawy prowadzą do ważnego wniosku, że duża dokładność pomiarów naruszenia związku Lama-Tunga może być użyteczna dla dokładniejszego wyznaczenia postaci rozkładów gluonowych przy pośrednich i wyższych wartościach zmiennej Bjorkena x .

Podsumowując moją recenzję uważam, że przedstawiona rozprawa doktorska stanowi ważny i bardzo użyteczny wkład przyczyniający się przez badania wkładów wyższych twistów do procesu DY oraz ważności w jego opisie pędów poprzecznych partonów, do zwiększenia wiarygodności przewidywań teoretycznych wymaganych przez zwiększoną precyzję danych doświadczalnych procesów badanych w LHC. W mojej ocenie, mgr Tomasz Stebel w pełni zasłużył na stopień doktora fizyki i dlatego wnioskuję o Jego dopuszczenie do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. dr hab. Lech Szymanowski
Hoża 69, 00-681 Warsaw, Poland
Lech.Szymanowski@ncbj.gov.pl

Warszawa, 10 stycznia 2017 r.

**Wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgra Tomasza Stebela
„Effects of higher twists and k_T -factorization in the Drell-Yan process”**

Przedstawiona rozprawa doktorska zawiera ważne i bardzo użyteczne wyniki dotyczące badania wkładów wyższych twistów do procesu Drella-Yana oraz znaczenia przy opisie tego procesu pędów poprzecznych partonów. Rezultaty pracy doktorskiej są bardzo aktualne, gdyż przyczyniają się do zwiększenia wiarygodności przewidywań teoretycznych wymaganych przez zwiększoną precyzję danych doświadczalnych procesów badanych w Wielkim Zderzaczu Hadronowym w CERNie.

Otrzymanie wyników przedstawionych w pracy doktorskiej wymagało od mgra Tomasza Stebela opanowania złożonych metod teoretycznego opisu w ramach chromodynamiki kwantowej badanych procesów produkcji. Z kolei otrzymanie ilościowych przewidywań analizy teoretycznej dających się porównać z danymi doświadczalnymi wymaga biegłości w posługiwaniu się złożonymi metodami numerycznymi. Jakość wyników przedstawionych w pracy doktorskiej wykracza istotnie ponad poziom typowych prac doktorskich. Z tego powodu wnioskuję o wyróżnienie recenzowanej pracy doktorskiej mgra Tomasza Stebela.

