

dr hab. Anna Staśto
Associate Professor
Department of Physics
Eberly College of Science
The Pennsylvania State University
104 Davey Laboratory
University Park, PA 16802

2017-01-12

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Tomasza Stebla

Rozprawa doktorska mgr. Tomasza Stebla zatytułowana „*Effects of higher twists and k_T -factorization in the Drell-Yan process*” i napisana pod kierunkiem dr. hab. Leszka Motyki, jest poświęcona badaniom procesu inkluzywnej produkcji pary leptonów w zderzeniach protonów przy wysokich energiach. Proces ten, nazywany procesem Drella-Yana (DY), jest szczególnie interesujący ze względu na brak oddziaływania silnego w produkowanym stanie końcowym dwóch leptonów. Standardowym podejściem stosowanym do opisu tego procesu jest formalizm oparty na faktoryzacji kolinearnej w przybliżeniu wiodącego twistu. Ze względu na nieskomplikowany stan końcowy proces ten jest wykorzystywany do studiowania struktury zderzanych hadronów i w przypadku faktoryzacji kolinearnej może być użyty do pomiaru kolinearnych rozkładów gęstości partonów. W przedstawionej rozprawie autor dokonuje bardzo szczegółowej analizy efektów, które wychodzą poza standardowe przybliżenie kolinearne. Są to efekty związane z tak zwanymi wyższymi twistami oraz efekty niezerowego pędu poprzecznego partonów. W rozprawie użyte zostały dwa rodzaje faktoryzacji, tj. faktoryzacja hybrydowa oraz faktoryzacja k_T . Faktoryzacja hybrydowa, czyli taka w której jeden z partonów jest kolinearny z początkowym hadronem, a drugi z partonów posiada pęd poprzeczny, została użyta przez autora do analizy wyższych twistów dla produkcji DY dla dużych wartości rapidity (pospieszności). Analiza ta została dokonana przy pomocy dwóch modeli dipolowych związanych z gluonowymi gęstościami zależnymi od pędu poprzecznego: modelu dipolowego Golca-Biernata i Wüsthoffa (GBW) oraz modelu opartego na rozwiązaniu równania Balitskiego-Fadina-Kuraeva-Lipatova (BFKL) w przybliżeniu wiodących logarytmów. W przypadku modelu GBW wyższe twisty okazują się być bardzo istotne, w przypadku modelu opartego na BFKL, najbardziej istotny jest niezerowy pęd poprzeczny. W obu przypadkach efekty te prowadzą do łamania relacji Lama-Tunga dla funkcji struktury w procesie DY. Łamanie tej relacji dla różnych modeli odbywa się w nieco innych obszarach kinematycznych co może pozwolić na odseparowanie tych dwóch efektów. W drugiej części pracy autor analizuje proces DY używając faktoryzacji k_T . Tak zwana faktoryzacja k_T , jest stosowana wówczas gdy oba partony wchodzące w elemen-

tarny przekrój czynny są wirtualne i mają niezerowy pęd poprzeczny. Autor rozpatruje proces DY w obszarze centralnym i porównuje obliczenia teoretyczne z danymi eksperymentalnymi z Wielkiego Zderzacza Hadronów (LHC). Dane te dotyczą relacji Lama-Tunga dla obszaru produkcji centralnej bozonu Z_0 . Okazuje się bowiem, że dane te nie są dobrze opisywane przez obliczenia oparte na faktoryzacji kolinearnej, nawet w rzędzie NNLO rachunku zaburzeń. W obliczeniach opartych na faktoryzacji k_T , autor rozprawy otrzymuje nowy i bardzo interesujący wynik. Wykorzystując różne modele na nieprzebieżne funkcje rozkładu gluonów uwzględniających poprzeczny pęd partonów, otrzymuje znacznie lepszy opis danych eksperymentalnych.

Przedstawiona rozprawa zawiera wyniki opublikowane w trzech oryginalnych artykułach:

- L. Motyka, M. Sadzikowski, T. Stebel, JHEP **1505** (2015) 087.
- L. Motyka, M. Sadzikowski, T. Stebel, arXiv: 1609.04300 [hep:ph] (w recenzji w Physical Review **D**).
- D. Brzeziński, L. Motyka, M. Sadzikowski, T. Stebel, JHEP **1701** (2017) 005.

Praca została napisana w języku angielskim i składa się z pięciu rozdziałów oraz bibliografii. Na początku rozprawy załączone jest streszczenie zarówno w języku angielskim jak i polskim.

Rozprawę rozpoczyna krótki rozdział wprowadzający „*Introduction*”, który zawiera motywację prowadzonych badań oraz pogłębione streszczenie rozprawy. Jest on dobrze skonstruowany i pozwala czytelnikowi zorientować się w tematyce pracy. Moje uwagi do tej części są czysto redakcyjne:

- Na stronie 14 użyty jest zbyt ogólny zwrot : „...*they are related by certain relations.*”
- Na stronie 15, podobnie zbyt ogólnikowe sformułowanie z powtórным użyciem tych samych słów: „...*is a very interesting region in high energy physics, many interesting phenomena may be found there...* ”
- Na stronie 15, zostało użyte słowo „*relay*” zamiast „*rely*”. W tej samej linijce powinno być „*resummation*” zamiast „*resumation*”.
- Na tej samej stronie poniżej, zdanie: „*The forward DY scattering is a natural choice when one searches for small- x effects since the strong asymmetry of the x values of partons guarantees probing this region.* ” jest trochę niefortunnie napisane. Czytelnik poza tym może nie wiedzieć o jaki x właściwie chodzi, gdyż jest to dyskutowane w dalszej części pracy.
- Strona 17, końcowe zdanie zawiera „*summary are given*”, raczej powinno być „*summary is given*”.

Drugi rozdział rozprawy p.t. „*Basics*” zawiera opisy podstawowych pojęć i prezentację formalizmów użytych w pracy. Autor rozpoczyna ten rozdział od bardzo szczegółowego opisu procesu Drella-Yana, używanej kinematyki i wprowadza pojęcia funkcji struktury. Opisuje również dwa układy odniesienia użyte w pracy, układ Gottfrieda-Jacksona oraz układ Collinsa-Sopera. Następnie autor wprowadza relacje Lama-Tunga oraz przecałowane funkcje struktury. W następnym podrozdziale zawarta jest dyskusja dotycząca rozwinięcia w iloczynach operatorów (*Operator Product Expansion*, OPE) oraz wprowadzone jest pojęcie faktoryzacji kolinearnej oraz faktoryzacji k_T . Kolejny podrozdział poświęcony jest równaniu Balitskiego-Fadina-Kuraeva-Lipatova (BFKL). W tej części autor dyskutuje podstawowe elementy wyprowadzenia równania BFKL oraz wprowadza relację rozwiązywania tego równania do nieprzecalcowanego rozkładu gluonów. Kolejny podrozdział to dyskusja o saturacji partonowej i unitarności amplitudy rozpraszania. Autor opisuje również model dipolowy i w szczególności parametryzację Golca-Biernata i Wüsthoffa (GBW). Rozdział ten zamyka dyskusja o skalowaniu geometrycznym w kontekście danych z rozpraszania głębokonieelastycznego ze zderzacza HERA. W szczególności autor prezentuje wyniki otrzymane w swojej oryginalnej pracy dotyczące analizy tego skalowania dla nowych danych HERY.

Rozdział ten jest bardzo kompetentnie napisany i zawiera wszystkie potrzebne pojęcia używane w dalszej części rozprawy. W szczególności bardzo dobrze i szczegółowo opisany jest formalizm procesu Drella-Yana.

Poniżej pozwolę sobie załączyć kilka drobnych uwag dotyczących tego rozdziału:

- Być może się mylę ale normalizacja równań (2.7), (2.9), (2.10), (2.12) wydaje się być nie do końca konsystentna. Tensor hadronowy $W^{\mu\nu}$ w równaniu (2.7) jest zdefiniowany jako wielkość wymiarowa i funkcje struktury, które są omawiane w dalszej części pracy również mają wymiar. Z kolei w równaniu (2.12) normalizacja jest taka, że funkcje struktury T_i są bezwymiarowe, co jest niezgodne z równaniem (2.9) i (2.7). Również definicja (2.10) powoduje że $\tilde{P}_{(\pm)}^\mu$ są wymiarowe, co (błędnie) sugerowałoby że zgodnie z rozkładem (2.9) funkcje T_i mają różny wymiar.
- W równaniach (2.14) i (2.21) wielkość M_T jest niezdefiniowana (masa poprzeczna).
- W równaniu (2.20) w ostatnim członie wskaźnik ν powinien być górny. Również w tym samym równaniu, człon proporcjonalny do $X^\mu X^\nu$ powinien mieć normalizację z czynnikiem 2.
- W równaniu (2.39) d_k chyba powinno być zastąpione d_j (autor w zdaniu poniżej odnosi się do d_j jako wymiaru prądów).
- Na stronie 31 autor wprowadza pojęcie faktoryzacji kolinearnej, poprzez równanie (2.49), gdzie pojawia się pojęcie rozkładu partonowego. Myślę, że dobrze byłoby

przy tej okazji wyjaśnić dokładniej czym jest rozkład partonowy, w szczególności jaka jest jego interpretacja fizyczna bądź wprowadzić również definicję takiego rozkładu.

- Na stronie 31, powyżej równania (2.51) użyte jest sformułowanie: „...and the second Sudakov factor were neglected. ” Formalnie jest to poprawne sformułowanie ale może się skojarzyć z faktorem Sudakova (formfaktorem) występującym w innym kontekście fizycznym.
- W podrozdziale 2.3, o równaniu BFKL autor dyskutuje granicę wysokich energii, tj. granicę Regge’go. Wprowadzone są pojęcia przybliżenia wiodących logarytmów w x , ale zmienna x de facto nie jest w ogóle zdefiniowana w tym podrozdziale. Autor wprawdzie odnosi się do równania (3.32) ale jest to równanie, które dopiero pojawia się w następnym rozdziale.
- Notacja dotycząca pędów partonów (w szczególności pędów kwarków q_1, q_2) na Fig.2.3a jest inna niż notacja zastosowana w równaniach (2.55), (2.58) (pędy P_1, P_2).
- W równaniu (2.58) w ostatnim członie zamiast kwadratu powinien być górny wskaźnik Lorentza μ .
- W definicji trajektorii gluonowej Regge, po równaniu (2.59) powinien być znak ‘-’ oraz czynnik w mianowniku powinien być $(2\pi)^2$. Pędy powinny być również zaznaczone jako poprzeczne.
- Generalnie w tym podrozdziale notacja pędów poprzecznych nie jest zawsze konsyistentna z definicjami w poprzednich podrozdziałach. $\mathbf{k}$ czy $\mathbf{k}_T$?
- Strona 35, pod równaniem (2.59), jest „conclucison”, powinno być „conclusion”.
- W tekście przed równaniem (2.60) jest odniesienie do rysunku 2.3b w kontekście amplitudy $\mathcal{A}^{(1)}$. Obiekt ten pojawia się w równaniach (2.60), (2.61) jako urojona część amplitudy do przodu. Wobec tego poprawnie byłoby się odnieść do diagramu „ciętego” (à la Fig. 2.5) i wyjaśnić dokładniej o jaką amplitudę chodzi.
- W równaniu (2.61) pojawia się funkcja $\tilde{F}$, która nie jest zdefiniowana. Dobrze byłoby wyjaśnić, że jest to czteropunktowa gluonowa funkcja Green’a z wirtualnymi gluonami. Również, rysunek 2.5 byłby bardziej czytelny gdyby zostały zaznaczone na nim pędy gluonów.
- W równaniu (2.63) nie powinno być czynnika 2 w mianowniku.
- Po równaniu (2.67) autor pisze: „where $f_0(x, \mathbf{k}^2)$ represents the exchange of two perturbative gluons.”. Nie jest to całkiem poprawne sformułowanie gdyż $f_0(x, \mathbf{k}^2)$, poprzez relację (2.66) jest związane z czynnikiem Φ_2 , faktorem hadronowym, który zawiera nieperturbacyjną informację na temat hadronu.

- Przed równaniem (2.69) na stronie 38 jest odniesienie do równania (4.16), które pojawia się dwa rozdziały później.
- Na tej samej stronie, 38, przy okazji wprowadzenia równania (2.69) warto byłoby zdefiniować transformatę Mellina w γ oraz podać rozwiązanie równania.
- Na tej samej stronie, 38, przy okazji dyskusji o poprawkach NLL BFKL brakuje referencji do prac Camicio i Ciafaloni, w których NLL BFKL zostało niezależnie wyprowadzone. Są to prace: Camici, Ciafaloni, Phys. Lett. B430 (1998) 349; Phys. Lett. B412 (1997) 396; Phys. Lett. B386 (1996) 341.
- Na stronie 38 jest odniesienie do referencji [65] Pomeranchuka, która jest niekompletna (brakuje roku).
- Przy okazji dyskusji o modelu dipolowym pomocny byłby rysunek ilustrujący ten proces.
- Równanie (2.77) pojawia się bez wyjaśnienia skąd się bierze, przydatna byłaby tu referencja do któregoś z prac Muellera lub Nikolaeva.
- Podobnie, na stronie 41, dobrze byłoby wyjaśnić skąd wynika relacja (2.79).

W obszernym rozdziale trzecim, zatytułowanym „*Twist expansion of forward Drell-Yan structure functions*” zgromadzona jest pierwsza część oryginalnych wyników rozprawy. Autor rozpoczyna ten rozdział od wyprowadzenia *impact factors* w przestrzeni pędów oraz w przestrzeni położenia. Następnie zrobiona jest transformata Mellina zarówno dla nieprzecalkowanych jak i przecalkowanych wielkości po pędzie poprzecznym emitowanego bozonu. Wyrażenia te są użyte następnie do analizy wyższych twistów dla funkcji struktury. W analizie tej autor rozpatruje dwa modele na dipolowy przekrój czynny: model GBW oraz model oparty na rozwiązaniu równania BFKL w przybliżeniu wiodących logarytmów. Autor wyprowadza rozwinięcie twistowe do twistu 4 dla funkcji W_T, W_{TT}, W_L, W_{LT} oraz do twistu 5 dla funkcji przecalkowanej $\tilde{W}_{LT}$. Okazuje się, że relacja Lama-Tunga jest spełniona dla twistu 2 i łamana dla twistu 4 w przypadku modelu GBW. W przypadku modelu BFKL rozwinięcie twistowe jest inne i dla każdego twistu z osobna może zostać przedstawione w postaci nieskończonego szeregu. W modelu tym wyższe twisty okazują się być bardzo małe, ale relacja Lama-Tunga pozostaje złamana nawet dla twistu 2. Okazuje się, że za łamanie tej relacji odpowiedzialny jest niezerowy pęd poprzeczny partonów. W dalszej części tego rozdziału autor prezentuje analizę numeryczną. Ciekawym wynikiem jest to, że dla modelu GBW wyższe twisty są znacznie bardziej istotne dla funkcji $\tilde{W}_{LT}, \tilde{W}_{TT}$ niż dla funkcji $\tilde{W}_T, \tilde{W}_L$. Te pierwsze są mierzalne tylko w rozkładach kątowych leptonów. Wyniki dla relacji Lama-Tunga zaprezentowane na rysunku 3.8 są niezwykle interesujące. Okazuje się, że ta relacja jest bardzo czuła na obecność wyższych twistów ale również na rozkład w pędzie poprzecznym. Dla modelu GBW widać wyraźnie że relacja jest łamana dla małych mas,

tam gdzie wyższe twisty zaczynają być istotne, natomiast dla modelu BFKL łamanie tej relacji jest nawet większe w niemal całym obszarze mas pary leptonowej. W dalszej części tego rozdziału autor przechodzi do podobnej analizy dla przecałkowanych współczynników. Konkluzje dla obu modeli są tu podobne. Rozdział zamyka porównanie wyników opartych na obu modelach z danymi eksperymentalnymi z LHCb dla przecałkowanego przekroju czynnego w funkcji masy DY. Kształt obu przewidywań dość dobrze zgadza się z danymi doświadczalnymi, normalizacja dla modelu BFKL jest nieco zawyżona. Z tego porównania widać wyraźnie jak takie przecałkowane wielkości jak $d\sigma/dM$ nie są specjalnie czułe na duże różnice między modelami i potrzebna jest analiza innych wielkości jak na przykład relacji Lama-Tunga aby dobrze odseparować różne efekty niewiodące.

To świetny rozdział, zawiera bardzo dużą ilość oryginalnych wyników, zarówno jeśli chodzi o wyniki analityczne jak i przewidywania fenomenologiczne. Autor wykazał się tutaj dogłębną wiedzą na temat metod rozwinięcia twistowego oraz rozszerzył i uogólnił wcześniej stosowane metody. Widać, że doktorant włożył ogromny nakład pracy w tę bardzo szczegółową i nietrywialną analizę. Wyniki dla relacji Lama-Tunga w podejściu opartym na modelu dipolowym zaprezentowanym w pracy są całkowicie nowe i oryginalne.

Kilka uwag i pytań do tej części rozprawy:

- Na stronie 45 (oraz w kilku innych miejscach rozprawy), autor używa sformułowania „*Basing on*”, które jest polonizmem. W języku angielskim używa się raczej „*based on*”.
- Przy końcu strony 46 pojawia się sformułowanie „*where by target we understand proton P_1 with small $x_1 \equiv x_g$.*”, które jest trochę skrótem myślowym. Wielkość x_1 dotyczy pędu partonu a nie protonu.
- W równaniach (3.5), (3.10), (3.12) (oraz dalszych) kolinearny rozkład partonowy powinien zależeć od skali. Jaka skala jest tam użyta?
- Notacja w argumentie $\hat{\sigma}$ na stronie 50 jest niekonsystentna, czasami jest to argument wymiarowy r a czasami bezwymiarowy ρ .
- W opisie modelu GBW, na stronie 53, autor pisze, że x gluonu jest przeskalowany o czynnik 2. Skąd bierze się akurat taka wartość?
- Na stronie 54 przed równaniem (3.27) autor wspomina o „*LL collinear approximation*”. Nie za bardzo wiadomo o jakie przybliżenie tutaj właściwie chodzi.
- Przed równaniem (3.30) jest napisane, że parametry modelu są w referencji, ale nie ma odnośnika do tej referencji.

- Na stronie 55, w definicji x_g zaniedbane jest k_T , gdyż używa się założenia że $k_T^2 \ll q_T^2$. Czy jest to zawsze dobre założenie? Antycypując wyniki uzyskane w rozdziale czwartym gdzie dane dla relacji Lama-Tunga są opisywane rachunkami z użyciem gluonów o szerokim rozkładzie w k_T , można się zastanowić czy to założenie jest słuszne.
- Po równaniu (3.46) w relacji Lama-Tunga powinno być 2 w górnych wskaźnikach a nie 4, gdyż tekst odnosi się do wiodącego twistu.
- Jakie jest fizyczne wytłumaczenie faktu, że dla funkcji $\tilde{W}_{LT}$ pojawiają się nieparzyste twisty?
- Czy metodę rozwinięcia twistowego dla modelu BFKL podaną w rozdziale 3.3.3 można uogólnić na przypadek równania z biegnącą stałą sprzężenia?
- W obliczeniach numerycznych x_F jest ustalone na wartości 0.05. Czy wiadomo jak bardzo zmieniają się własności współczynników $\tilde{A}_i$ gdy zmieni się wartość x_F ?
- Na stronie 77, przy końcu tego podrozdziału, jest dyskusja na temat wielkości obu efektów (wyższych twistów i niezerowego k_T). Dyskusja oparta jest na dwóch modelach (GBW i BFKL), ale można sobie wyobrazić model, który miałby jednocześnie wyższe twisty i spore niezerowe k_T . Dlatego byłabym tutaj ostrożna w formułowaniu wniosków na temat, który efekt jest bardziej dominujący.

Rozdział 4 zawiera analizę procesu DY dla produkcji centralnej przy masie bozonu Z_0 . Ponieważ jest to produkcja centralna, mierzona przez eksperymenty ATLAS i CMS, a nie produkcja do przodu jak w przypadku LHCb, autor rozwija inny formalizm dla tego przypadku. W szczególności uwzględnia dodatkowe diagramy, w których oba partony wchodzące do procesu mają pęd poprzeczny. W tym celu autor przeprowadza rachunek, w którym uwzględnia przyczynki od elementarnego procesu $g^*g^* \rightarrow q\bar{q}V$ i liczy przekrój czynny używając faktoryzacji k_T . Używa w tym celu trzech różnych modeli na nieprzecałkowany rozkład funkcji gluonów: model Junga-Hautmanna (JH) oparty na równaniu CCFM; model BFKL z warunkami brzegowymi GBW; oraz model opisany jako Weizsäcker-Williams (WW), który jest fenomenologiczną parametryzacją. Porównanie tych rachunków z danymi doświadczalnymi dla kombinacji Lama-Tunga $A_0 - A_2$ mierzonymi przez kolaborację ATLAS wygląda niezwykle interesująco. Okazuje się, że opis danych jest znacznie lepszy przy zastosowaniu tego formalizmu z pędem poprzecznym niż jakikolwiek rachunek oparty na faktoryzacji kolinearnej, nawet w rzędzie NNLO. Widać przy tym wyraźnie, iż ta obserwacja jest niezwykle czuła na efekty k_T partonów biorących udział w procesie. Autor wyciąga bardzo interesujący wniosek, iż dane eksperymentalne preferują gęstości gluonowe, które mają szeroki rozkład w pędzie poprzecznym.

Wyniki zaprezentowane w tym rozdziale są bardzo oryginalne i interesujące. Pokazują iż pomiary rozkładów kątowych dają znacznie bardziej szczegółowe informacje dotyczące dynamiki partonów w zderzeniach wysokoenergetycznych. Na szczególną uwagę zasługuje bardzo istotny wniosek płynący z tej analizy, iż rozkład gluonów w pędzie poprzecznym może być zmierzony w procesie DY poprzez badanie relacji Lama-Tunga.

Poniżej pozwolę sobie na kilka uwag i pytań dotyczących tej części rozprawy:

- W pierwszym zdaniu tego rozdziału: „... *one observes a violation of the Lam-Tung relation occurs...*” , być może brakuje tam „*that*”.
- Na stronie 82 powinno być: „... *if one uses...*” zamiast „... *if one use...*” .
- Na stronie 84 autor pisze: „... *last DGLAP splitting.*” . W całej pracy nie ma jednak zdefiniowanego pojęcia ewolucji DGLAP.
- Również na stronie 84 (pod koniec) jest napisane: „... *gluons at this diagrams...*” powinno być raczej „... *gluons in these diagrams...*”
- Na rysunku 4.2 brakuje opisu pędów poszczególnych partonów, utrudnia to odniesienie do wzorów umieszczonych w tekście.
- Również dobrze byłoby umieścić numerację tych diagramów na Fig. 4.2, tak aby było wiadomo do których z nich odnoszą się amplitudy umieszczone w równaniach (4.8).
- W amplitudzie $\tilde{M}_1^\sigma$ czynnik γ^μ powinien być zwężony z wektorem polaryzacji.
- Wzór (4.13) jest bardzo schematyczny, powinien być lepiej opisany. Również przestrzeń fazowa dPS_3 powinna być zdefiniowana.
- Na stronie 88, w opisie modelu JH, pojawia się skrót CCFM. Powinna tam być umieszczona referencja do oryginalnej pracy i krótki opis co to za równanie.
- Na stronie 89, przy opisie modelu BFKL, nie ma definicji N_0 (nie ma również w rozdziale 3.2.2). Nie jest również napisane jakie są wartości parametrów użytych do opisu tego gluonu dla $x > 0.1$.
- Ponieważ wszystkie różnice w wartościach przekroju czynnego biorą się z różnic w rozkładzie k_T tych gęstości gluonowych, warto byłoby to zilustrować wykresem porównującym te różne rozkłady.
- Na stronie 90 powinno być „*particularly sensitive*”, zamiast „*particular sensitive*”.
- W podpisie rysunku 4.4 brakuje referencji do danych eksperymentu ATLAS.

- Nie bardzo rozumiem zachowanie poszczególnych krzywych na rysunku 4.4 (po prawej stronie). Ma to być ilustracja dla różnych szerokości rozkładu w k_T dla modelu WW. Zgodnie z wnioskami autora, oczekiwałabym, że rozkład z mniejszym b jako szerszy, daje większy efekt niż rozkład z większym b , który powinien silniej spadać z k_T . Wykres sugeruje odwrotną tendencję. Z czego to wynika? Czy jest to również efekt tego że parametr b modyfikuje równocześnie zależność od x w równaniu (4.17) ?

Ostatni, piąty rozdział stanowi podsumowanie rozprawy. Jest ono zwięzłe i zawiera najważniejsze wnioski uzyskane w pracy. Nie mam wielu uwag do tej części poza czysto redakcyjnymi (na przykład znów pojawia się „*relay*”, natomiast z kontekstu zdania wynika, że powinno być użyte „*rely*”).

Podsumowując, uważam rozprawę doktorską mgr. Tomasza Stebla za bardzo dobrą. Uwagi zamieszczone w tej recenzji nie zmieniają mojej wysokiej opinii o tej pracy. Wręcz przeciwnie, są raczej wyrazem osobistego zainteresowania tematem i nowatorskimi wynikami uzyskanymi przez autora. Ilość oryginalnego materiału zamieszczonego w tej rozprawie jest ogromna, jest on też bardzo zróżnicowany gdyż obejmuje nowe rezultaty analityczne, przewidywania numeryczne i analizę fenomenologiczną z bezpośrednim odniesieniem do danych eksperymentalnych. Zaprezentowane wyniki są bardzo wysokiej jakości, o czym między innymi świadczy fakt, że oryginalne prace zostały opublikowane w bardzo prestiżowym czasopiśmie JHEP. Rezultaty przedstawione w rozprawie mają kluczowe znaczenie dla badań efektów niewiodących w chromodynamice kwantowej. Jestem przekonana, że te znakomite wyniki zamieszczone w rozprawie, będą podstawą do dalszych intensywnych badań w tej dziedzinie, zarówno od strony eksperymentalnej jak i fenomenologicznej. Pragnę również wspomnieć, iż doktorant posiada już bardzo znaczący dorobek naukowy, w którego skład wchodzi 7 prac (zgodnie z bazą inSpire) opublikowanych lub będących w recenzji oraz kilka kontrybucji do międzynarodowych konferencji.

Stwierdzam, że przedłożona rozprawa mgr. Tomasza Stebla spełnia ustawowe wymagania dotyczące prac doktorskich i stawiam wniosek o dopuszczenie kandydata do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Anna Stas'ko