



Narodowe Centrum Badań Jądrowych
National Centre for Nuclear Research
ŚWIERK

Warszawa, 19.02.2025

dr hab. Jakub Wagner, prof NCBJ
Zakład Fizyki Teoretycznej
Departament Badań Podstawowych
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. Pasteura 7, 02-093 Warszawa
jakub.wagner@ncbj.gov.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Barbary Linek
pt. „Photon induced processes for LHC and EIC energies”

Przedstawiona rozprawa doktorska dotyczy opisu procesów produkcji par leptonów oraz par dżetów w zderzeniach proton-proton, proton-jądro oraz elektron-proton, ze szczególnym uwzględnieniem procesów indukowanych fotonami. Składa się ona z czterech rozdziałów, dwóch dodatków oraz bibliografii, napisana została po angielsku.

Praca pani magister Linek oparta jest na czterech artykułach opublikowanych wcześniej w renomowanych zagranicznych czasopismach z dziedziny fizyki wysokich energii:

- 1) „*Probing gluon GTMDs of the proton in deep inelastic diffractive dijet production at HERA*”, **Barbara Linek**, Marta Łuszczak, Wolfgang Schäfer, Antoni Szczurek, **Phys.Rev.D 110** (2024)
- 2) „*Probing proton structure with $c\bar{c}$ correlations in ultraperipheral pA collisions*”, **Barbara Linek**, Agnieszka Łuszczak, Marta Łuszczak, Roman Pasechnik, Wolfgang Schäfer, **JHEP 10** (2023)
- 3) „*Production of e^+e^- in proton-lead collision: Photon-photon fusion*”, **Barbara Linek**, Marta Łuszczak, Wolfgang Schäfer, Antoni Szczurek, **Phys.Rev.D 106** (2022)

- 4) „*Semiexclusive dilepton production in proton-proton collisions with one forward proton measurement at the LHC*”, Antoni Szczurek, **Barbara Linek**, Marta Łuszczak, **Phys.Rev.D 104**

Rozdział pierwszy stanowi wstęp do rozprawy i przedstawia pewne podstawowe podejścia teoretyczne oraz opis eksperymentów, w których mierzono, mierzy się lub będzie się mierzyło opisywane w dalszych rozdziałach procesy. Wprowadza pojęcie faktoryzacji na przykładzie głębokonieelastycznego rozpraszania oraz występujących w jego opisie funkcji rozkładów partonów (parton distribution functions - PDFs) oraz pokrótce opisuje ewolucję tych rozkładów. Następnie autorka wspomina o bardziej skomplikowanych rozkładach takich jak niewycałkowane rozkłady partonów (UTMDs), rozkłady zależne od pędu poprzecznego (TMDs) czy uogólnione rozkłady partonów (GPDs). Rozdział ten stanowić mógłby bardzo wartościowy materiał dla badaczy i studentów zainteresowanych poruszonymi w pracy zagadnieniami, jednakże w mojej opinii szansa ta nie została wykorzystana. Jest on napisany bardzo skrótowo, oznaczenia pojawiające się w wykorzystywanych w nim wzorach nie zawsze są wyjaśniane, lub wprowadzane są dopiero później, nie zawsze też stosowane są konsekwentnie. Różne rozkłady są raczej wymienione niż poparte głębszą analizą tłumaczącą ich własności oraz obszary zastosowania, lub choćby definicją.

Rozdział drugi poświęcony jest opisowi produkcji par leptonów w zderzeniach proton-proton oraz proton-jądro, biorącemu pod uwagę zależne od pędów poprzecznych rozkłady fotonów w hadronach. W przypadku zderzeń proton-proton autorka koncentruje się na obszarze kinematycznym odpowiadającym eksperymentom ATLAS oraz CMS, przedstawiając szereg różniczkowych przekrojów czynnych w kilku zmiennych kinematycznych. Wyniki obliczeń opartych o kilka modeli strumieni fotonów porównane są także z wynikami otrzymanymi przy użyciu popularnego generatora SuperChic. Mam następujące pytania dotyczące tej części pracy:

- 2a) Czy uzyskane wyniki dotyczące zderzeń proton-proton będą/są porównywane z danymi eksperymentalnymi?
- 2b) Jakie są wnioski z porównania obliczeń z wynikami z generatora SuperChic?

W przypadku opisywanych w dalszej części rozdziału drugiego zderzeń proton-jądro, wyniki zaprezentowane zostały w obszarze kinematycznym odpowiadającym eksperymentowi ALICE. Przewidywania zostały porównane z wynikami eksperymentu dotyczącymi całkowitej, inkluzywnej produkcji par elektronów, prowadząc do wniosku że rozważany mechanizm ekskluzywny nie

stanowi istotnego wkładu. Mam następujące pytania/uwagi do tego rozdziału:

2c) Jak można by eksperymentalnie wyznaczyć wkład czysto ekskluzywny do tego procesu? Czy są takie plany?

2d) Na rysunku 2.20 przedstawiono różniczkowy przekrój czynny w funkcji masy inwariantnej pary elektronów. Jest to obszar, w którym istotny wkład powinien pochodzić także od lekkich mezonów (np. ρ). Jaki wpływ miałoby uwzględnienie tego wkładu dla wniosków zawartych w pracy?

W rozdziale trzecim autorka opisuje proces produkcji pary kwark-antykwarł powabny i podaje przewidywania dotyczące możliwości zmierzenia tego procesu w zderzeniach ultraperferyjnych w LHC. Proces ten budzi szczególne zainteresowanie ze względu na jego zależność od uogólnionych, zależnych od pędów poprzecznych rozkładów partonów (GTMDs), mających bliski związek z funkcją Wignera. W szczególności istotne są wyniki dotyczące zależności kątowych różniczkowego przekroju czynnego, bezpośrednio związanych z właściwościami GTMDs. Mam następujące pytanie:

3a) w przedstawionej konstrukcji modeli GTMD, jako transformaty Fouriera amplitudy dipolowej, istotną rolę odgrywa procedura regularyzacji przy pomocy obcięcia Gaussowskiego (wzór 3.37). Czym uzasadnione jest wprowadzenie takiej regularyzacji i jakie jest jej znaczenie fizyczne?

Rozdział czwarty poświęcony jest analizie dyfrakcyjnej produkcji par jetów w zderzeniach elektron-proton w eksperymencie HERA. Użyty formalizm, podobnie jak w przypadku opisanym w rozdziale trzecim, bazuje na GTMDs. Autorka przedstawia porównanie przewidywań teoretycznych dla sześciu różnych modeli z danymi zebranymi w eksperymentach H1 i ZEUS. Przewidywania modeli różnią się o rzędy wielkości, jednakże żaden z nich nie odtwarza wszystkich właściwości różniczkowych przekrojów czynnych (co najwyraźniej widać na wykresach 4.7, 4.8, 4.16). W trakcie lektury rozprawy nie było dla mnie jasne, jaki wniosek wynika z tego faktu. W szczególności:

4a) jakie znaczenie ma on dla przedstawionych w dalszej części przewidywań dla zderzacza elektronów z jonami (EIC)?

Praca zawiera także krótkie podsumowanie, dwa dodatki opisujące bardziej techniczne elementy rachunków, oraz dość rozbudowaną bibliografię.

Moje krytyczne uwagi dotyczą (poza nieco zbyt skromnym wstępem) głównie strony redakcyjnej i językowej rozprawy. Wydaje się, że praca

mogłaby zyskać na wartości gdyby przeszła nieco dokładniejszą korektę. Dla ilustracji, poniżej wymieniam kilka przykładów dość mocno rzucających się w oczy niedociągnięć (dotyczących zwłaszcza wstępnej części rozprawy):

str v (abstract): „proton-yield collisions”

str ix: „unperturbed distributions of photons”, „hastiness gap” (??),

str 1: We wzorze 1.1 nie są wyjaśnione oznaczenia (pojawiają się dopiero na rysunku 1.2 stronę dalej, ale nie ma do niego w tym miejscu odnośnika). W kolejnych wzorach nie wyjaśniono czym są E_e , E_γ , $E_{e'}$ ani nie doprecyzowano w jakim układzie odniesienia są one definiowane.

Str. 3: Na stronie tej (zarówno na rys.1.2, jak i we wzorach np.1.13) występuje zarówno „p” jak i „P”, ale nie wiadomo czy odnoszą się do różnych wielkości.

Str. 4: nie wiadomo czego dotyczy „in the simplest case”, przed wzorem 1.14

Str. 4: niejasne sformułowanie „quark-time interaction”

Str.5: „letter” → „later”

Str. 6: pojawia się stwierdzenie, że $F_L = 0$, jednak nigdzie nie pojawia się definicja tej wielkości.

Str. 7: nie wyjaśniono symbolu m we wzorach 1.19, 1.20, 1.21

Str. 8: „As the above discussion shows the PDFs depend on the factorization scale μ_F ” - pojęcie to nie pojawia się wcześniej...

Str. 13: „detectors installed at the ATLAS and ALICE collaborations”

Str.15: „leaves the possibility to dominates”, niejasne sformułowanie „light-energy kinematics”

str.16: „disassociation” → „dissociation”, przed wzorem 2.6 „off-shell” → „on-shell”, we wzorze 2.8 nie wyjaśnione $m_{1,2}$

str.17: „Sudakov distribution”- → „Sudakov decomposition”

str.18: „upper energy limit” prawdopodobnie „high energy limit”, wzór 2.18 i następne: nie wyjaśniono symboli k_+ i k_- .

str.20: niezrozumiałe zdanie po wzorze 2.33

str.21: po wzorze 2.37 „ $F_1(0) = 1$ gives magnetic moment” powinno być „electric charge”

Powyższe przykłady ilustrują dość liczne niestety niedociągnięcia natury redakcyjnej, nie zmieniają jednak mojej ogólnej pozytywnej oceny rozprawy,

wynikającej przede wszystkim z wagi, oryginalności oraz aktualności osiągniętych wyników.

Omawiane w rozprawie wyniki prezentowane były przez autorkę na kilku krajowych i międzynarodowych konferencjach skupiających ekspertów z dziedziny. Dobrze świadczy to o jej samodzielności naukowej oraz istotnym wkładzie w uzyskane rezultaty.

Podsumowując, stwierdzam iż autorka wykazała się dobrą znajomością zaawansowanych metod teoretycznych fizyki wysokich energii, w szczególności kwantowej chromodynamiki. Osiągnęła oryginalne i wartościowe wyniki w dziedzinie cieszącej się zarówno dużym zainteresowaniem teoretyków jak i będącej polem dużej aktywności eksperymentalnej.

Stwierdzam, że rozprawa spełnia warunki potrzebne dla przejścia do kolejnych etapów postępowania i o takowe niniejszym wnioskuje.

Jakub Wagner

