

Prof. dr hab. Janusz Chwastowski

Oddział Fizyki i Astrofizyki Cząstek,
Instytut Fizyki Jądrowej
Polskiej Akademii Nauk,
Ul. Radzikowskiego 152,
31-342 Kraków,
Tel. 12 66 28 449

Kraków, 3/2/2025

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr Barbary Linek

Pani mgr Barbara Linek przedstawiła do recenzji pracę zatytułowaną „*Photon induced processes for LHC and EIC energies*”. Promotorem w procesie doktorskim jest dr hab. Marta Łuszczak, profesor Uniwersytetu Rzeszowskiego.

Napisana po angielsku praca zawiera streszczenie, pięć rozdziałów, dwa dodatki i bibliografię. Poprzedzona jest przedmową i spisem osiągnięć Doktorantki. Po zgrabnym wprowadzeniu w tematykę w rozdziale pierwszym, Autorka przechodzi do zasadniczych części opisujących wykonane przez nią prace dotyczące procesów indukowanych przez foton zachodzących dla różnych typów oddziaływań: proton-proton, proton-jądro i lepton-proton.

Drugi rozdział został poświęcony dwufotonowej produkcji par leptonów w oddziaływaniach proton-proton (2.1) i proton-jądro ołowiu (2.2). Po omówieniu faktoryzacji k_T i ewolucji funkcji gęstości fotonów w protonie następuje wprowadzenie różnych mechanizmów produkcji par leptonów w zderzeniach proton-proton, zdefiniowane zostały podstawowe wielkości kinematyczne. Autorka wprowadziła niekanoniczną definicję niezmiennika s Mandelstama we wzorze 2.7 by chwilę później w 2.9 uznać ją, słusznie, za przybliżoną. Notabene, nie zdefiniowała zmiennej E_{cm} . Później szczegółowo omówiła amplitudę rozważanego procesu oraz przekrój czynny typu off-shell. Następnie przeszła do funkcji gęstości fotonu i jej związków z czynnikami postaci i funkcjami struktury protonu. Bardzo skrótowo, a szkoda, przedstawiła, wykorzystywane później w obliczeniach, parametryzacje F_2 i różnice pomiędzy nimi.

Po tym wstępie Doktorantka przeszła do przedstawienia wyników swoich obliczeń dotyczących dwufotonowej produkcji par leptonów w zderzeniach pp, ograniczając się do przypadków produkcji par o małej masie stowarzyszonej z obserwacją protonu rozproszonego pod małym kątem (do przodu). Przyjęte ograniczenia przestrzeni fazowej są bardzo bliskie przyjętym przez Współpracę ATLAS, za wyjątkiem ograniczenia na akoplanarność pary i wyłączenia zakresu mas pary w sąsiedztwie mas bozonu Z, co niestety uniemożliwia bezpośrednie porównanie wyników obliczeń do pomiaru. Obliczenia zostały wykonane przy pomocy „własnego oprogramowania grupy”(?) i ogólnie dostępnego generatora SuperChic 4. Na podstawie wyników

uzyskanych z SuperChic 4 Autorka trafnie zauważyła zmniejszanie się przekrojów czynnych na produkcję par mionów wraz z ograniczeniem przestrzeni fazowej procesu (tabela 2.1) i przedyskutowała wartość czynnika przeżywania przerwy w rapidity w zależności od typu reakcji. Zwróć uwagę, że fakt, że wyliczone przekroje czynne są większe niż te zmierzone przez ATLAS nie jest „due to their (ATLAS) use of more conditions”, jak napisała Doktorantka, ale wynika z braku wprowadzenia przez nią cięć odpowiadających tym użytym w eksperymencie. W fizyce ciągle pomiar ma walor sprawdzania poprawności obliczeń! W kolejnym kroku badany był wpływ użytej parametryzacji funkcji struktury protonu na wartość przekroju czynnego z konstatacją zgodności wyników uzyskanych z wykorzystaniem parametryzacji „LUX-like” i SuperChic 4 – zgodność ta jest na poziomie 10-30%. Niestety nie ma informacji o protonowej PDF użytej w obliczeniach SuperChic. Natomiast dodatkowo podane zostały wartości przekrojów czynnych na produkcję par e^+e^- . Analiza została pogłębiona o dyskusję otrzymanych rozkładów zmiennych kinematycznych przy założeniu różnych funkcji struktury protonu. Zwykle porównywano rozkłady otrzymane bez i z cięciem na wartość ułamka straconego pędu (energii) przez proton rozproszony do przodu. Przedstawione wykresy jasno potwierdzają zależności użytych parametryzacji od x_{Bj} i Q^2 . O ile ALLM i LUX-like F_2 przewidują podobne rozkłady to FFJLM pokazuje znaczące ograniczenia zakresu Q^2 i M_x (masy układu pozostałości), potwierdzając wyniki numeryczne z tabeli 2.2. Doktorantka przedyskutowała też zależność podstawowych rozkładów (p_{Tll} , M_{ll} i Y_{ll}) od typu reakcji, narzuconych cięć i uwzględnienia, bądź nie, efektów przeżywalności przerwy w rapidity (GSE). Znowu decydującym okazało się ograniczenie przestrzeni fazowej, podczas gdy czynniki GSE mają stosunkowo mały wpływ na wartości prezentowanych rozkładów. Kolejnym elementem jest analiza zależności czynnika przeżywalności przerwy w rapidity (S_G) w funkcji masy, rapidity i pędu poprzecznego produkowanej pary leptonów i rodzaju reakcji. Wartość S_G praktycznie nie zależy od wartości p_{Tll} i M_{ll} w rozważanym zakresie zmienności. Natomiast dość ewidentna jest zależność od rapidity pary leptonów Y_{ll} , która praktycznie zanika po nałożeniu ograniczenia na stratę energii przez proton do przodu. Na koniec Doktorantka rozważyła wpływ produkcji mini-dżetów na wartość S_G w funkcji wykorzystanych cięć.

Drugą część pierwszego rozdziału Doktorantka poświęciła analizie semiekskluzywnej dwufotonowej produkcji par leptonów w ultraperyferycznych zderzeniach p-Pb. Choć narzucone cięcia odpowiadają tym wykorzystanym przez Współpracę ALICE to inkluzywność pomiaru eksperymentalnego w zasadzie wyklucza porównanie wprost z danymi doświadczalnymi. Wyniki numeryczne i rozkłady prezentowane są w dwóch przedziałach masy efektywnej pary i dla różnych parametryzacji funkcji struktury protonu. Przewidywane przekroje czynne są wyraźnie większe w przedziale małych wartości M_{ee} . Jest to prawdziwe również dla różniczkowych przekrojów czynnych. Przewidywania z użyciem FFJLM dają znacząco większe wartości przekroju czynnego czy też różniczkowych rozkładów masy i rapidity pary. Notabene, użycie w tym kontekście słowa „outperforms” (s. 41) jest w moim mniemaniu bardzo mylące. Wniosek o dominacji procesu elastycznego dla pędu poprzecznego pary (rys. 2.21) poniżej 1 GeV nie jest prawdziwy. W zasadzie wszystkie użyte parametryzacje przewidują porównywalne lub większe wartości. Natomiast rozkład kwadratu energii w układzie foton-proton przewidywany

przez FFJLM jest znacząco różny i obserwacja ta została pozostawiona praktycznie bez konkluzji. Rozkłady przekroju czynnego w funkcji zmiennej Bjorkena i wirtualności fotonu dla obszaru małych mas pary leptonów demonstrują cechy związane z użytymi funkcjami struktury. Na koniec Doktoranta przedstawiła wartości przekrojów czynnych uzyskanych z SuperChic 4 przy żądaniu wystąpienia przerwy w rapidity dla reakcji $AA \rightarrow AAl^+l^-$. Zwróć uwagę, że żądanie przerwy nie jest warunkiem wystarczającym dla eksklusywności procesu. W przypadku wiązek jonowych istotną rolę pełnią tzw. Zero Degree Calorimeters (ZDC) wetujące rozpad jądra. Dodatkowo eksperyment ALICE posiada „protonowe-ZDC” pozwalające mierzyć protony rozproszone w przód. Uzyskane wyniki wskazują na słabą zależność S_G w funkcji masy pary – zmniejszenie o około 10% w obszarze 0.5-20 GeV.

Rozdział ten kończy się trzema rysunkami, których Autorka ani nie skomentowała ani się do nich nie odniosła!

Rozdział trzeci jest poświęcony dyfrakcyjnej fotoprodukcji par kwarków powabnych w oddziaływaniach proton-jądro. Schemat prowadzenia pracy jest analogiczny do rozdziału drugiego. Autorka przedstawiła argumenty wskazujące konieczność badania eliptycznych rozkładów gluonów opierając je o ich związek z rozkładami Wignera/GMTD. Następnie zdefiniowała proces dyfrakcyjnej produkcji par ciężkich kwarków w oddziaływaniach pA i wprowadziła kinematykę tego procesu (na marginesie strumień fotonów skaluje się z kwadratem ładunku każdego emitera, również protonu $Z=1$). W kolejnych podrozdziałach przedstawiona została analiza reprezentacji kolorowej amplitudy dipolowej zakończona wyprowadzeniem końcowej postaci przekroju czynnego na dyfrakcyjną produkcję pary kwarków. Później Doktorantka szczegółowo omówiła reprezentację GTMD, jej związek z macierzą gęstości, wpływ orientacji dipola i przedstawiła pięć wykorzystanych parametryzacji GTMD (Golec-Biernat-Wusthoff – GBW, Moriggi-Peccini-Machado -MPM, McLerran-Venugopalan z modyfikacjami lancu-Rezaeian– MV-IR, Hagiwara-Hatta-Ueda – HHU, Kowalski-Teaney – KT), dyskutując ich pochodzenie oraz podobieństwa i różnice pomiędzy nimi w funkcji rozważanych zmiennych. W dyskusji wpływu parametru obciążenia ϵ na wartość $T_0(k_\perp)$ występuje błąd: wartości funkcji rosną wraz z malejącą wartością parametru albo legenda na rysunku 3.5 jest błędna. W następnych sekcjach Autorka przedyskutowała otrzymane wyniki numeryczne dla różnych ograniczeń w $x_{1P} \in \{0.05, 1.0\}$ i dwóch zakresów względnego pędu poprzecznego pary $P_\perp (0,10)$ i $(5,10)$ GeV. Przewidywane wartości przekrojów czynnych są rzędu setek mikrobarnów. Modele GBW i MPM dają podobne natomiast pozostałe (MV-IR, HHU, KT) przewidują znacząco różne wartości przekroju czynnego, co potwierdza rozkład $d\sigma/dP_\perp$. Przekrój czynny jest skoncentrowany dla $P_\perp < 5$ GeV oraz dla $x_{1P} < 0.05$. Interesującym wynikiem są przewidywania przekroju czynnego w funkcji x_{1P} . Z jednej strony silniej uwidaczniają różnice pomiędzy modelami a z drugiej umożliwiają potencjalną weryfikację modeli w przypadku tagowania protonu rozproszonego do przodu w dedykowanych detektorach. Rozkład pędu poprzecznego pary kwarków, $\Delta_\perp$, ma charakterystyczny kształt z najsilniejszym maksimum przewidywanym przez model HHU (w legendzie POP powinno być zastąpione przez MV-IR). Wysokość tego maksimum silnie maleje dla dużych wartości $P_\perp$. Rozkłady zmiennej Mandelstam’a t pokazują kształt typowy dla procesów

dyfrakcyjnych modulo różnice kształtu przewidywań HHU. Przedstawione zostały również rozkłady kąta pomiędzy wektorami $\vec{P}_\perp$ i $\vec{\Delta}_\perp$. W przypadku modeli MPM i GBW modulacje są ograniczone do $\pm 5\%$ średniej wartości i 1-2% w przypadku MV-IR i HHU. Przewidywania znacząco się zmieniają, za wyjątkiem HHU, w przypadku dużych wartości $P_\perp$. Doktorantka trafnie podkreśliła znaczenie fragmentacji kwarków dla ewentualnego pomiaru diskutowanego rozkładu. Następnie badany jest wpływ obciążenia w x_{IP} ($\{0.05, 1.0\}$) w przewidywaniach modelu MPM. Znaczące i rosnące z wartością $P_\perp$ efekty są widoczne w przypadku rozkładu rapidity kwarku, natomiast są one mało znaczące dla rozkładu pędu poprzecznego pary i kąta pomiędzy wektorami $\vec{P}_\perp$ i $\vec{\Delta}_\perp$. Czy takie obserwacje byłyby ważne dla innych parametryzacji, z wyjątkiem HHU?

Kolejny podrozdział został poświęcony produkcji pary kwarków powabnych w procesie dwufotonowym w oddziaływaniach pA. Przedstawiono przewidywania dotyczące przekrojów czynnych dla oddziaływań elastycznych i nieelastycznych (użyto czterech funkcji struktury tak jak w rozdziale 2) dla różnych zakresów pędu poprzecznego i względnego pędu poprzecznego pary. W analizie otrzymanych wyników występują niezgodności.

1. Nie wiem na czym oparty jest wniosek o porównywalnych wartościach przekrojów czynnych na produkcję pary kwarków i pary e^+e^- . Rozumiem, że w tym drugim wypadku należy się odnieść do tablicy 2.2. Zwrócę uwagę, że oba wyniki zostały otrzymane dla różnych ograniczeń przestrzeni fazowej co uniemożliwia ich porównywanie, a przekroje z tablicy 2.2 są wyrażone w pikobarnach, podczas gdy te z tablicy 3.2 w nanobarnach.
2. Przyczynę procesu elastycznego jest najmniejszy a nie największy dla wszystkich użytych cięć, choć porównywalny z FFJLM w przypadku nieograniczonego $\Delta_\perp$. Również rys. 3.16 potwierdza ten fakt w przeciwieństwie do wniosku na s.72.
3. Rozkład masy efektywnej pary (rys. 3.17) nie pokazuje przyczynku elastycznego dla „małych mass” (<10 GeV) chyba, że błędnie oznaczono krzywe w legendzie.

Niestety obszar małych wartości pędu pary nie jest dobrze widoczny na rys. 3.19 i trudno porównać przyczynę elastyczny i przewidywania FFJLM dla $\Delta_\perp < 1$ GeV. Natomiast różnice obserwowane dla przewidywań uzyskanych z użyciem różnych funkcji struktury i zakresów pędu poprzecznego pary są widoczne również w rozkładach energii w układzie foton-proton, zmiennej Bjorkena i wirtualności fotonu. Ostatni podrozdział został poświęcony porównaniu przewidywań dla dyfrakcyjnej (wszystkie modele) i dwufotonowej (przyczynę elastyczny i LUX-like) produkcji pary kwarków powabnych w dopasowanej, jak to podkreśliła Autorka, przestrzeni fazowej. Przekroje czynne dla różnych wartości cięć na $\Delta_\perp$ i $P_\perp$ zebrane są w tabeli 3.3, a rozkłady zmiennych na rysunkach 3.23-3.26. Niestety Doktorantka nie podała wartości parametru obciążenia gaussowskiego dla amplitudy. Czy było to 0.25 fm^{-2} ? Również na rysunkach proces dwufotonowy jest reprezentowany wyłącznie przez model LUX-like. Jaka jest przyczyna pominięcia elastycznego procesu $\gamma\gamma$ na rysunkach?

Autorka skomentowała podobieństwa i różnice, zwłaszcza wielkość przewidywań HHU, zwracając uwagę na ogólną dominację procesów produkcji dyfrakcyjnej. Podkreśliła też przewagę procesów $\gamma\gamma$ dla dużych wartości pędu poprzecznego ($\Delta_{\perp} > 1.5$ GeV) i względnego ($P_{\perp} > 8$ GeV) i ich unikalność dla małych mas efektywnych (poniżej 10 GeV) pary kwarków. Na koniec składowała różnice kształtów rozkładów rapidity pary przewidywane przez poszczególne modele/procesy.

Czwarty rozdział jest dopełnieniem poprzednich i skupia się na dyfrakcyjnej produkcji par dżetów (par kwarków) w oddziaływaniach ep. Swoje rozważania Doktorantka oparła o model dipola kolorowego w przestrzeni pędu i wykorzystała metodologię wprowadzoną dla dyfrakcyjnej produkcji par kwarków (rozdział 3). Następnie wprowadzone zostały dwie, zaproponowane przez Boer i Setyadi w 2021 i 2023 roku, wersje rozszerzenia modelu McLerran-Venugopolan dla GTMD i został przedstawiony formalizm dla wyliczenia przekroju czynnego. W kolejnym podrozdziale Autorka przedstawiła wyniki dla dwóch zestawów cięć bardzo zbliżonych do tych wykorzystanych przez Współpracę H1 i ZEUS w pomiarach. W przypadku H1 zakres doświadczalny to $0.1 < -t < 0.7$ GeV² (powyżej wykorzystano zależność od t mierzoną w procesie inkluzywnej dyfrakcji z protonem do przodu), a w przypadku ZEUSa $\eta_{1,2}$ to tzw. $\eta_{\max}$ oznaczające maksymalną wartość pseudorapidity obiektu fizycznego (kalorymetrycznego bądź śladu cząstki). Istotną różnicą, podkreśloną przez Doktorantkę, jest też to, że badała ona produkcję par kwarków (u, d, s) oraz c a pomiary eksperymentalne dotyczyły par dżetów.

Wyniki obliczeń modelowych przekrojów czynnych zostały przedstawione w tabeli 4.2 a rozkłady różniczkowe na rys. 4.4-4.17 zawierających w niektórych przypadkach porównanie z pomiarami. Demonstrują one szeroki zakres wartości przekrojów czynnych dla rozpatrywanych cięć kinematycznych i typów dżetów. Generalnie modele GBW i KT przewidują najniższe a MVBS najwyższe wartości. Fakt ten potwierdzają rozkłady różniczkowe. Uzyskane przewidywania modelowe wskazują na istotną zależność od zestawu cięć użytych w analizie, pomijając oczywiście dotyczące zakresu zmiennych. Największe różnice kształtów przewidywań dla cięć H1 i ZEUS są widoczne dla rozkładów x_{IP} , β , a zwłaszcza z . Przy omawianiu przewidywań obliczeń modelowych Autorka podkreśliła podobieństwa i różnice, lecz nie zawsze próbowała dotrzeć czy też postawić hipotezę tłumaczącą obserwacje (np. różnice w rozkładzie t czy y).

Znacząca część analizy została poświęcona badaniom zależności kątowych w układzie pary kwarków. Kwarki są produkowane głównie z pędami poprzecznymi skierowanymi przeciwnie. Rozkłady kąta pomiędzy wektorami sumy i różnicy pędów poprzecznych pary kwarków pokazują wyraźną modulację mimo braku przyczynku eliptycznego do funkcji struktury. Jak pokazuje Doktorantka, przy przyjętych przez nią założeniach, modulacje są efektem narzuconych cięć. Z punktu widzenia doświadczalnika ta interesująca obserwacja jest niestety osłabiona przez nieuwzględnienie efektów fragmentacji i hadronizacji, a także przyczynków eliptycznych. W konsekwencji nie jest możliwa szczegółowa analiza, odseparowanie poszczególnych wkładów, potencjalnych danych eksperymentalnych i pozostaje tylko porównanie jakościowe.

Ostatni podrozdział został poświęcony przewidywaniom produkcji par kwarków w oddziaływaniach ep na EIC przy największej planowej energii w układzie środka masy. Doktorantka wykorzystała pięć modeli GTMD. Przewidywania dotyczące przekroju czynnego dla przyjętej w rozważaniach przestrzeni fazowej są podane w tabeli 4.3 i rysunkach 4.18-4.24 przedstawiających rozkłady różniczkowe zmiennych. Znów parametryzacje GBW i KT dają najniższe przekroje czynne. Jednak przekroje otrzymane z użyciem MV-IR i MV-BS 2023 są dwadzieścia a nie dwa razy większe od tych dla KT! Fluktuacje w rozkładzie pędu poprzecznego dla GBW, KT i MPM mogłyby być zmniejszone przy znaczącym wzroście liczby generowanych przypadków. Postulat ograniczenia pomiarów do $P_{\perp 1} > 12$ GeV jest może i interesujący, ale całkowicie nie trafiony, bo dla części modeli trudno mówić o jakości przewidywań (podobnie dla rozkładu masy pary) i nieznane są też błędy teoretyczne. Równie niezrozumiała jest sugestia ograniczenia zakresu Q^2 (dla HERA było to ponad cztery rzędy wielkości przy zmianie przekrojów czynnych o 9 (prądy neutralne) i 7 (prądy naładowane) rzędów). Przypomnę, że dla EIC pracującego ze świetnością chwilową $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ częstość przypadków, wykorzystując tabelę 4.3, a więc tylko dla wybranego procesu i określonej przestrzeni fazowej, waha się od 0.1 do 1 Hz. O ograniczeniu zakresu dla poszczególnych zmiennych będzie decydować głównie czas zbierania danych i rzeczywiste własności detektora. Na rysunku 4.19 jest przedstawiony pęd poprzeczny pary a nie di-kwarku!

Ostatni rozdział pracy stanowi zwyczajowe zakończenie. Autorka starała się podkreślić główne elementy przedstawionych wcześniej a wykonanych przez nią studiów. Niestety nie ustrzegła się drobnych błędów. W przedostatniej linii na stronie 104 „did involve” powinno być zamienione, jak sądzę, na „did not involve”. W przeciwnym razie treść ta jest sprzeczna z tekstem zamieszczonym na stronie 93 („Interestingly, despite the lack of elliptical contribution...”). Brakuje mi tu też podkreślenia wykorzystania rozwiniętych „completely new methods” zapowiadanych w angielskiej wersji Wstępu.

Jako doświadczałnik, do mankamentów pracy zaliczyłbym brak dyskusji zalet i ograniczeń wykorzystanego oprogramowania, SuperChick 4 i „oprogramowania grupy”, jak i oszacowania błędów podawanych przewidywań. Liczę na komentarz podczas publicznej obrony pracy.

Niestety poziom samej pracy nie jest poparty edycją o odpowiadającej mu jakości. Niedbałość edycji powoduje wrażenie, że praca nie została starannie przeczytana i poprawiona.

Wymieniam tylko niektóre usterki. W liście osiągnięć naukowych Doktorantki brakuje dat rocznych czy też nazw konferencji i dat. Niestety również spis literatury dziedziczy te mankamenty. Nie wiem co rysunek 1.4 ma wspólnego z kinematyką HERA czy też ALICE, s. 5. Symbole używane są wcześniej niż następuje ich definicja, np. e_f użyte na stronach 14 i 55 zostało zdefiniowane na stronie 71. Występują niekonsekwencje w zapisie formuł, np. 2.26. W opisie rys. 2.3 słowo „figure” powinno być zastąpione przez „curve”, a „bottoms” przez „bottom/lower one”, a komentarz z rysunku przesunięty do tekstu. W formule 3.9 (lewej) w mianowniku brakuje znaku pierwiastka. Autorka nadużywa pojęcia „całkowitego przekroju czynnego” – powinna pisać raczej o „przekroju czynnym” bo analizuje przewidywania w wycinkach

przestrzeni fazowej. Osobiście dla mnie największą przeszkodą w odbiorze są małe legendy rysunków. W legendach i opisach osi można znaleźć błędy: zakres pędu pary na rys. 3.24, dla danych ep nie istnieje pojęcie $\sqrt{s_{NN}}$, a rys. 4.5 pokazuje rozkład $-t$ nie t .

Sadzę, że praca zyskałaby też na starannej korekcie językowej, np. użycie „diffraction” zamiast „diffractive” bądź „diffractively” czy też nagminne stawianie przecinka przed „that” co jest kalką z języka polskiego.

Podsumowując, magister Barbara Linek przedstawiła wyniki ciekawych badań struktury protonu. Badania te oparła o analizę produkcji par leptonów i kwarków w procesach indukowanych fotonem dla różnych typów oddziaływań. Doktorantka omówiła wykorzystywane parametryzacje funkcji struktury protonu i modele GTMD. Krytycznie przedyskutowała przewidywania wynikające z ich wykorzystywania.

Pomimo wymienionych w recenzji uwag krytycznych uważam, że praca ta spełnia wymogi ustawy i wnoszę o dopuszczenie Doktorantki do dalszych etapów procedury.