



prof. dr hab. inż. Iwona Grabowska-Bołd  
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej  
Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie

Kraków, 24 stycznia 2025 roku

## **Recenzja rozprawy doktorskiej pani mgr Barbary Linek pt. “Photon induced processes for LHC and EIC energies”**

Głównym celem rozprawy doktorskiej pani mgr Barbary Linek “*Photon induced processes for LHC and EIC energies*”, przygotowanej pod opieką naukową dr hab. Marty Łuszczak, prof. UR, było zbadanie procesów indukowanych jednym lub dwoma fotonami dla różnych zderzanych systemów w dwóch zderzaczach LHC (z ang. Large Hadron Collider, Wielki Zderzacz Hadronów) oraz EIC (z ang. Electron Ion Collider, Zderzacz Elektron-Jądro). W szczególności Kandydatka do stopnia skupiła się na badaniu stanów końcowych z parami przeciwnie naładowanych leptonów oraz dżetów dyfrakcyjnych. W swoich badaniach używała informacji o możliwości detekcji protonów rozproszonych pod małymi kątami.

Program badawczy eksperymentów na LHC skupia się na precyzyjnych badaniach Modelu Standardowego (teorii, która opisuje cząstki elementarne i ich oddziaływania) oraz poszukiwaniu nowych zjawisk wykraczających poza obecny stan wiedzy. Zderzacz LHC jest obecnie największym i najbardziej zaawansowanym technologicznie urządzeniem do badań w fizyce wysokich energii. Największe z tych eksperymentów, **ATLAS** i **CMS**, wykorzystują detektory ogólnego przeznaczenia do badania największego możliwego zakresu fizyki. Posiadanie dwóch niezależnie zaprojektowanych detektorów jest niezbędne do wzajemnego potwierdzania wszelkich nowych odkryć. Eksperymenty **ALICE** i **LHCb** używają detektory wyspecjalizowane do badania konkretnych zjawiskach. Te cztery detektory znajdują się pod ziemią w ogromnych wnękach na pierścieniu LHC.

Eksperymenty na LHC zbierają dane ze zderzeń pp od roku 2009. W pierwszej fazie zbierania danych zwanej Run 1 (lata 2010-2013) energia zderzeń pp wynosiła kolejno 0.9 TeV, 7 TeV oraz 8 TeV. Natomiast po długiej przerwie technicznej i wznowieniu zbierania danych w drugiej fazie zwanej Run 2 (lata 2015-2018) energia w centrum masy układu pp wzrosła do 13 TeV. Po kolejnej długiej przerwie technicznej obejmującej lata 2019-2021, rozpoczęła się trzecia faza zbierania danych Run 3 (2022-obecnie) przy rekordowej energii 13.6 TeV.

Oprócz zderzeń pp eksperymenty na LHC uczestniczą również w programie fizyki zderzeń ultra-relatywistycznych ciężkich jonów. Głównym celem tych badań jest poznanie własności nowego

stanu materii tzw. plazmy kwarkowo-gluonowej (z ang. Quark-Gluon Plasma, QGP), który istniał we Wszechświecie w ułamku pierwszej sekundy po Wielkim Wybuchu, a który wytwarzany jest w zderzeniach ołów-ołów o dużych centralnościach. Częścią tego programu są też badania zderzeń proton-ołów (p+Pb), które służą do zrozumienia efektów jądrowych istotnych przy interpretacji własności stanu QGP. W ultra-relatywistycznych zderzeniach jądrowych ważną klasę stanowią tzw. przypadki ultra-peryferyczne (z ang. ultra-peripheral collisions, UPC), w których oddziałują silne pola elektromagnetyczne towarzyszące zjonizowanym wiązkom jądrowym. Ta klasa przypadków poddana jest intensywnym badaniom na LHC i ona też jest przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej.

Przyszły zderzacz EIC, który ma powstać w Narodowym Laboratorium Brookhaven w Stanach Zjednoczonych, ma na celu zbadanie struktury materii poprzez analizę zderzeń elektronów z jonami. Kluczowym aspektem tych badań są zderzenia UPC, które pozwolą naukowcom na dokładne badanie oddziaływań między kwarkami i gluonami w warunkach bliskich zeru, co może dostarczyć cennych informacji na temat gęstości energii i dynamiki w skali kwantowej. Dzięki zaawansowanej technologii i precyzyjnym pomiarom, EIC ma potencjał do zrewolucjonizowania naszej wiedzy o złożonej strukturze jądra atomowego oraz o fundamentalnych zasadach rządzących materią.

Rozprawa doktorska pani Linek napisana jest w języku angielskim. Praca liczy 126 stron. Składa się na nią pięć rozdziałów, zestawienia wykresów oraz tabel, bibliografia licząca 130 pozycji oraz dwa dodatki.

Rozdział I poświęcony jest wprowadzeniu do tematyki badawczej będącej przedmiotem rozprawy doktorskiej. Kandydatka do stopnia opisała w nim podejście teoretyczne do opisu zderzeń cząstek, jak również przedstawiła metody używane do opisu struktury tych cząstek w oparciu o podejście faktoryzacji poprzecznej i rozkłady Wignera. Zawarty został w nim również krótki opis bieżących i przyszłych zderzaczy, włączając już nieaktywny akcelerator HERA. Ten rozdział napisany jest starannie, materiał jest dobrze dobrany, a całość świadczy o dobrym przygotowaniu teoretycznym Autorki rozprawy.

W Rozdziale II opisana została produkcja par przeciwnie naładowanych leptonów w zderzeniach pp i p+Pb w oparciu o podejście faktoryzacji- $k_{\perp}$  z pomocą funkcji falowych stanów związanych na stożku świetlnym. W analizie tego mechanizmu produkcji dla obu układów zderzanych cząstek uwzględniono różne funkcje struktury fotonów w protonie, przy czym **po raz pierwszy porównano do danych eksperymentalnych** model Kulagin-Barinov (KB). Autorka przeprowadziła obliczenia dla zakresu przestrzeni fazowej dostępnej w eksperymentach ATLAS i ALICE, oba ulokowane na zderzaczu LHC. W przypadku systemu pp odniosła się do danych eksperymentalnych wyjaśniając przyczynę występowania niewielkiej ilości leptonów dla małych pospieszności (rapidity bliskie 0.0) i dużych mas par  $\ell^+\ell^-$  (300-1000 GeV). W przypadku procesów indukowanych dwoma fotonami analogiczna analiza została wykonana z użyciem generatora SuperChic, który powszechnie używany jest do interpretacji wyników eksperymentalnych dla zderzeń UPC. Jego użycie pozwoliło na wyznaczenie czynnika przeżycia przerwy (z ang. gap survival factor) w pospieszności umożliwiające wykluczenie wkładu od mechanizmów dyfrakcyjnej produkcji stanu dwuleptonowego.

W Rozdziale III zaprezentowane zostały obliczenia produkcji par kwarków  $q\bar{q}$  w tym par  $c\bar{c}$  w zderzeniach p+Pb przy wysokich energiach zderzacza LHC z użyciem podejścia kolorowego

dipola. Rozważono dwa mechanizmy produkcji - dyfrakcyjny i indukowany fotonami oraz przedstawiono ich porównanie. Zbadano sześć modeli uogólnionych funkcji rozkładu gluonów w protonie, z których cztery poddano podwójnej transformacie Fouriera-Bessela celem przejścia do przestrzeni pędów poprzecznych produkowanych kwarków. Dzięki temu zabiegowi uwidoczniło się niedoskonałości dopasowanych modeli do danych oraz konieczność uwzględnienia dodatkowych mechanizmów w celu dobrego opisu wyników uzyskanych na zderzaczu HERA. Analiza produkcji dżetów indukowanych fotonami wykazała dużo mniejszy spadek ich wkładu i w konsekwencji podobne wartości przekrojów czynnych w obszarze dużych pędów poprzecznych i ich dominację dla  $\Delta_{\perp} > 1.5 \text{ GeV}$ . Ciekawym wynikiem jest analiza korelacji w kącie azymutalnym wykazująca źródło korelacji w eliptycznych nieprzecątkowanych rozkładach gluonów w protonie, jak również w nakładanych warunkach kinematycznych. Ponieważ nie ma jeszcze wyników eksperymentalnych dla tych procesów więc wyniki obliczeń mają charakter przewidywań dla przyszłych pomiarów.

W Rozdziale IV użyto podejścia kolorowego dipola do analizy produkcji par kwarków  $q\bar{q}$  w zderzeniach ep dla dostępnych danych z eksperymentów H1 i ZEUS na zderzaczu HERA oraz przewidywania dla przyszłego eksperymentu na zderzaczu EIC. Porównania obliczeń do danych wykazały problem z ich opisem z użyciem modeli MV-IR, MV-BS 2021, MB-BS 2023 oraz MPM. Zauważono, że modele MV-BS zawierają parametry, które mają wpływ na zakres rozkładów różniczkowych w poszczególnych zmiennych. Zatem potencjalnie mogą one być dopasowane do obecnych wyników eksperymentalnych.

Rozprawę doktorską kończy Rozdział V, w którym zebrane zostały wnioski oparte na analizie wyników eksperymentalnych oraz modeli teoretycznych. Wskazują one na konieczność dalszego dogłębnego badania struktury hadronów, w szczególności w kontekście procesów uwzględniających wymianę pomeronu.

Ponadto w rozprawie doktorskiej znajdują się dwa dodatki - Dodatek A zawiera obliczenia całkowitego przekroju czynnego dla zderzenia foton-proton dla czterech rodzajów wymiany foton-pomeron oraz Dodatek B, który zawiera obliczenia dla całkowania w kącie azymutalnym dla splotu twardej amplitudy.

Dysertacja powstała w oparciu o wyniki badań opisane w czterech artykułach naukowych opublikowanych w **Physical Review D** (3 artykuły) oraz **Journal of High Energy Physics** (1 artykuł). Kandydatka do stopnia jest pierwszą autorką w trzech z tych prac. Pani Barbara Linek prezentowała wyniki swoich badań na licznych międzynarodowych i narodowych konferencjach naukowych, w tym na uwagę zasługują Low-x (2021), Cracow Epiphany (2023) oraz prestiżowa 42nd International Conference on High Energy Physics (2024). Na bazie tych prezentacji w sumie powstały cztery artykuły pokonferencyjne, w dwóch z nich pani Linek jest pierwszą autorką. Podczas studiów w Szkole Doktorskiej Kandydatka do stopnia odbyła cztery staże naukowe w Lund, Szwecja (2022), na Politechnice Krakowskiej (2022), w IFJ PAN (2023) oraz w ośrodku CERN, Szwajcaria (2023).

Wybrane uwagi krytyczne do treści rozprawy:

1. Str. 5, Rozdział 1.2: "(...), whose experimental measurements for HERA and ALICE kinematics are shown in Figure. 1.4. " Na wykresach, których formatowanie wymagałoby poprawy, są wyniki z H1 oraz ZEUS (HERA), D0 i CMS, nie znajdują tam wyników z eksperymentu ALICE.

2. Rozdział 1.2.3 kończy krótki opis zakończonych, obecnych i przyszłych eksperymentów, które mają coś do powiedzenia w tematyce niniejszej rozprawy doktorskiej. Tytuł rozdziału “Wigner distributions” wydaje się nieszczerólnie dobrany w kontekście tej dyskusji. We wstępie rozprawy zabrakło mi krótkiego przeglądu dostępnych wyników eksperymentalnych dla procesów indukowanych fotonami. One rozrzucone są po kolejnych rozdziałach pracy.
3. Figure 1.9: Szkoda, że nie pokazuje na płaszczyźnie  $Q^2$  i  $x$  pokrycia dla zderzacza LHC, istotnego z punktu widzenia tej rozprawy.
4. Str. 13, Rozdział 2: “... this is accomplished by measuring protons in the forward proton detectors installed at the ATLAS [27-30] and ALICE [31-33] collaborations.” Detektory w obszarze do przodu mają też inne eksperymenty np. CMS.
5. Figure 2.3: Dopasowanie  $G_E$  dla danych SLAC jest systematycznie powyżej punktów pomiarowych dla  $Q^2 > 1 \text{ GeV}^2$ . Zabrakło mi w rozprawie doktorskiej komentarza w tej sprawie.
6. Str. 27, Rozdział 2.1.5: “In general, the calculated cross-sections are larger than the ATLAS collaboration’s experimental data (see Ref. [27]), which is due to their use of more conditions.” Czy Autorka próbowała nałożyć te dodatkowe warunki w swoich obliczeniach, żeby móc wyciągnąć dokładniejsze wnioski na temat zgodności obliczeń z danymi pomiarowymi?
7. Table 2.2 oraz Figures 2.6+: Dlaczego nie użyto parametryzacji KB w dyskusji tych wyników?
8. Figures 2.25-2.27: Zabrakło dyskusji tych wykresów w tekście rozprawy doktorskiej. Przy skali logarytmicznej na osi Y trudno dostrzec różnice pomiędzy scenariuszami “elastic without GSE” i “elastic with GSE”. Szkoda, że Autorka nie przedstawiła różnic w obu scenariuszach za pomocą dodatkowego panelu ze stosunkiem obu rozkładów.
9. Figure 3.16: Niektóre rozkłady dla dużych wartości  $P_\perp$  wykazują nagły spadek? Z czego on wynika?
10. Table 4.2 i Figure 4.3 wydają się być niekonsistentne dla parametryzacji MV-BS 2023 przy porównaniu z danymi z eksperymentu H1. W szczególności w Table 4.2 obliczone wartości przekroju czynnego są przeszacowane, podczas gdy na Figure 4.3 obliczony przekrój czynny różniczkowy wydaje się dobrze opisywać dane pomiarowe.
11. Figure 4.12 zawiera błędny opis do wykresów.
12. Str. 97, Rozdział 4.2: “(...), where some minor statistical problems, especially with the GBW, KT, and MPM models, can be noted.” Jakie “minor statistical problems” Autorka ma na myśli? Nie bardzo też rozumiem konkluzję dotyczącą pomiaru poniżej 12 GeV na końcu tego paragrafu.

Recenzowaną rozprawę oceniam wysoko. Kandydatka do stopnia z sukcesem zaprezentowała swoją wiedzę teoretyczną w dyscyplinie nauki fizyczne oraz wykazała się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego poprzez zastosowanie aktualnych narzędzi teoretycznych do szeregu procesów dla biegnących i przyszłych eksperymentów dzięki czemu uzyskała nowe i ciekawe wyniki wzbogacające wiedzę w tematyce.

Podsumowując, uważam, że rozprawa doktorska pani mgr. Barbary Linek zatytułowana “*Photon induced processes for LHC and EIC energies*” demonstuje ważny wkład do badań dotyczących procesów indukowanych fotonami na obecnie aktywnym zderzaczu LHC oraz przyszłym EIC. Krytyczne uwagi zawarte w niniejszej recenzji nie umniejszają ogromu wkładu Doktorantki w przygotowanie rozprawy.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (z późn.zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.