



Katowice, 17 kwietnia 2026 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Krzysztofa Pawła Mękały
"Modelling electroweak interactions at lepton colliders
— from the Z pole to the highest energies"

Na pracę doktorską magistra Krzysztofa Mękały liczącą 143 strony składa się ogólne wprowadzenie, rozdział o Modelu Standardowym fizyki cząstek elementarnych, dwa rozdziały dotyczą różnych wersji przyszłych zderzaczy wysokich energii, możliwym badaniom fizycznym w ich zakresie oraz generatorom Monte Carlo. Rozdziały 6-8 zawierają dyskusję uzyskanych wyników głównie przy użyciu rozwijanego z pomocą mgr Mękały programu Whizard dla sprzężeń bozonu Z z kwarkami, efektów radiacyjnej produkcji oraz rozpadów cząstek Higgsa oraz bozonów cechowania oraz elektroślabych funkcji rozkładu partonów. Rozdział 9 omawia możliwe dalsze rozwinięcie badań, rozdział dziesiąty przedstawia podsumowanie. Dwa dodatki zawierają dane konstrukcyjne przyszłych zderzaczy i detektorów oraz funkcje struktury w programie Whizard. Bibliografia zawiera odnośniki do 402 pozycji.

Rozprawę doktorską przygotowano pod kierunkiem profesora Filipa Żarneckiego (UW) oraz doktora Jürgena Reutera (DESY, Niemcy) na podstawie czterech prac opublikowanych w Journal of High Energy Physics (pozycje [1–3,5] w bibliografii), dwóch prac w European Physical Journal C (pozycje [5,6]) oraz jednej pracy w Physics Letters B [4]. Czasopisma te należą do czołówki w dziedzinie fizyki wysokich energii.

Trzy główne wątki rozprawy obejmują: omówienie metody wyznaczania sprzężeń elektroślabych lekkich kwarków w przyszłym akceleratorze e^+e^- o dużej świetlności, pracującym w rezonansie bozonu Z; zastosowanie faktoryzacji kolinearnej do produkcji bozonów w zderzeniach o energiach znacznie przewyższających ich masy; wyznaczenie elektroślabych funkcji rozkładu partonów (EWPDF) z uwzględnieniem resumacji dużych logarytmów w ramach faktoryzacji przekrojów czynnych.

Po zwięzłym opisie Modelu Standardowego cząstek elementarnych i przedstawieniu otwartych pytań z nim związanych, w rozdziale trzecim scharakteryzowano przyszłe akceleratory, których budowa jest rozpatrywana. Omówiono strategiczne plany w procesie Europejskiej Strategii Fizyki Cząstek, status działania obecnego akceleratora LHC oraz parametry techniczne możliwych przyszłych akceleratorów HL-LHC, e^+e^- kołowych (FCC, CEPC) i liniowych ILC/LCF, CLIC, mionowych ($\mu^+\mu^-$, μ^+e^- , $\mu^+\mu^+$).

W rozdziale 4 skupiono się na omówieniu badań, które będzie można prowadzić w przyszłych akceleratorach. Przyszłe zderzacze leptonowe zapewnią wyjątkowe warunki eksperymentalne dla badań fizyki bozonu Higgsa, kwarku top, oddziaływań elektroślabych oraz poszukiwania nowej fizyki poza Modelem Standardowym. Duża ilość danych zebranych przy rezonansie bozonu Z pozwoli także znacząco poprawić pomiary w fizyce zapachów. Zwrócono uwagę, że unitarność procesów pozwala oszacować masy cząstek BSM na co najwyżej kilka TeV, dlatego efekty fenomenologiczne z nimi związane powinny być widoczne w LHC (możliwe, że jest to zbyt optymistyczne założenie). Jeśli chodzi o oddziaływania pól skalarnych, przyszła fabryka cząstek Higgsa jest możliwa dzięki procesowi $e^+e^- \rightarrow ZH$ przy energii 250 GeV. Proces ten pozwoli na określenie szerokości połówkowych rozpadów H , z kolei wyższe energie otworzą nowe procesy (WW fuzja, $t\bar{t}H$) do badań cząstek W i kwarku top. Powyżej energii 500 GeV (liniowe zderzacze) możliwe jest także badanie potrójnych sprzężeń ($e^+e^- \rightarrow ZHH$ oraz $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}HH$). Przy energiach kilku TeV można także badać dokładniej sprzężenia cechowania oraz kształt potencjału Higgsa (odtworzenie symetrii cechowania). Wymienione przykłady nie wyczerpują możliwych badań, w rozprawie zawarto również dyskusję efektów BSM związanych z ciężkimi neutrino, ciemną materią, dodatkowymi bozonami cechowania i niestandardowymi oddziaływaniami neutrino.

Ponieważ większość wyników uzyskanych w rozprawie oparta jest na programach Pythia i Whizard, w rozdziale 5 opisano ogólną koncepcję według której działają symulacje oparte na generatorach Monte Carlo, takie jak MadGraph, Herwig, Pythia, Sherpa i wspomniane Pythia oraz Whizard. W szczególności określono najważniejsze składniki takich generatorów, które obejmują określenie twardego rozpraszania (rachunek perturbacyjny) dla EW i QCD, modelowanie funkcji struktury dla wiązek, kaskady partonowe, proces hadronizacji i rozpady.

Rozdziały 6-8 obejmują opis oryginalnych wyników uzyskanych przez Autora rozprawy. W rozdziale 6 zaproponowano metodę rozdzielania sprzężeń pięciu kinematycznie dostępnych lekkich kwarków (u,d,s,c,b) oraz oszacowanie poziomu niepewności systematycznych jaki musi zostać osiągnięty, aby móc skorzystać ze zwiększonej statystyki danych przyszłych akceleratorów, w szczególności w przypadku tzw. scenariusza Tera-Z w FCC-ee, gdzie szacuje się produkcję i rozpad do 10^{12} bozonów Z. Zaproponowana analiza może stanowić najdokładniejszy test uniwersalności zapachowej sprzężeń w elektroślaby sektorze kwarków.

Idea wyznaczenia sprzężeń lekkich kwarków z bozonem Z polega na jednoczesnym badaniu zarówno radiacyjnych, jak i inkluzywnych hadronowych rozpadów bozonów Z. Prawdopodobieństwo emisji fotonu zależy od ładunku elektrycznego cząstki dlatego kwarki typu górnego emitują więcej fotonów niż kwarki typu dolnego. Jednocześnie kwarki typu dolnego dominują reakcje inkluzywne ze względu na większą wartość ich elektroślabej sprzężenia w Modelu Standardowym. Te różne zachowania można wykorzystać do dopasowania przekrojów czynnych w obu przypadkach i rozdzielania elektroślabych sprzężeń różnych kwarków.

Bazując na formalizmie opartym na klasyfikacji liczby dżetów w danym proce-

sie zdefiniowano i wyznaczono macierz efektywnej identyfikacji pojedynczych dżetów a następnie zdefiniowano statystyczne i systematyczne niepewności związane z rozpatrywanymi procesami z udziałem dżetów i algorytm dopasowania przekrojów czynnych o największej wiarygodności. Symulację zdarzeń w generatorach MC wykonano według określonej procedury, gdzie próbki danych są generowane przy użyciu obliczeń elementów macierzowych w ustalonym rzędzie, włącznie z emisją twardych fotonów, uzgodnionych z funkcjami struktury promieniowania początkowego i kaskad promieniowania końcowego. Równocześnie uwzględniona jest emisja kolinearnych i miękkich cząstek oraz modele hadronizacji. Do symulacji z odpowiednimi cięciami kinematycznymi użyto generatorów Pythia i Whizard. Zagadnienia te nie są trywialne. Odpowiednie procedury dopasowań do warunków w zderzaczu CLIC przy energiach 380 GeV i 3 TeV zostały skonfrontowane z generatorem KKMC i opublikowane w pracy [311]. W niniejszej rozprawie przekroje czynne dla lekkich kwarków bez i z twardymi fotonami zostały zebrane w Tab.6.2. Podrozdział 6.4 zawiera pełną dyskusję z uwzględnieniem rekonstrukcji zderzeń, dopasowaniami dla dwóch i pięciu kwarków i dyskusją niepewności systematycznych i korelacji w pomiarach sprzężeń kwarków lekkich. Ogólny wniosek z przeprowadzonych analiz wskazuje iż dla niepewności rzędu 0.1% można oczekiwać precyzji około 0.3% w pomiarze sprzężeń lekkich kwarków z bozonem Z przy statystyce Tera-Z, co oznacza poprawę o co najmniej rząd wielkości dla w porównaniu z wynikami LEP.

Według przeprowadzonej analizy, dla świetlności rozważanych w przyszłych eksperymentach e^+e^- , niepewność identyfikacji powinna osiągnąć precyzję około 0.3%, aby umożliwić pomiar sprzężeń lekkich kwarków z bozonem Z z dokładnością poniżej jednego procenta i ograniczyć niepewność sprzężeń kwarku b (c) do poziomu odpowiednio 0.05% (0.1%), co oznacza rząd wielkości poprawę względem LEP-u.

W rozdziale 7 przedstawiono wyniki dla procesów z udziałem bozonów W i Z powyżej skali ich mas gdzie można użyć (w określonych warunkach) przybliżenia tzw. równoważnych wektorów bozonowych. Przypadek masywnych bozonów jest bardziej złożony od oryginalnej idei zastosowanej do fotonów. Funkcje struktury zależą od izospinu fermionów i różnią się dla polaryzacji poprzecznych i podłużnych. Przybliżenie oparte na kolinearnej faktoryzacji amplitud daje możliwość przyśpieszenia rachunków. W pracy rozpatrzono kilka procesów w których przybliżenie równoważnych wektorów bozonowych jest uzasadnione i opiera się na identyfikacji obszarów przestrzeni fazowej, które prowadzą do logarytmicznych wzmocnień wynikających z kolinearnych rozszczepień w stanie początkowym. W tym przybliżeniu pomija się niediagonalne korelacje spinowe między bozonami wektorowymi na liniach wewnętrznych w amplitudach oraz upraszcza się odpowiednio kinematyczne zależności w kolinearnej granicy oraz dostosowuje całkowanie przestrzeni fazowej. Wyprowadzone relacje zaimplementowano w programie Whizard. Szczegółowe badania rozkładów niezmienniczych mas, pędów poprzecznych dla różnych kinematycznych cięć potwierdziły, że rozpatrywane przybliżenia dają dość dokładny opis procesów zdominowanych przez fuzję podłużnych bozonów cechowania W lub Z, takich jak produkcja pary bozonów Higgsa; rozpatrzono proces $e^+\mu^- \rightarrow HH + (\bar{\nu}_e\nu_\mu \text{ oraz } e^+\mu^-)$.

Z kolei dla procesów zdominowanych przez poprzeczne bozony cechowania w stanie końcowym, mogą być konieczne dodatkowe, odpowiednie dopasowania kinematycznych cięć. Cięcia takie są często konieczne w celu znalezienia obszarów kinematycznych wzmocnionych przez proces bozonowej fuzji. W przypadku procesu z parą fotonów $e^+\mu^- \rightarrow \gamma\gamma + \bar{\nu}_e\nu_\mu$ pokazano, że wbrew pewnym opiniom pojawiającym się w literaturze, przybliżenie równoważnych wektorów bozonowych nie działa dobrze, nawet przy zastosowaniu cięć, wpływ topologii innych niż fuzji bozonowej jest widoczny. Także proces produkcji $e^+\mu^- \rightarrow ZH + X$ nie jest dobrze opisany w tym przybliżeniu. Z kolei procesy z udziałem pary kwarków top $e^+\mu^- \rightarrow t\bar{t} + X$ oraz $\mu^+\mu^- \rightarrow t\bar{t} + X$ w przybliżeniu równoważnych wektorów bozonowych zgadzają się bardzo dobrze z pełnymi obliczeniami.

W rozdziale 8 wprowadzono elektroślabe partonowe funkcje rozkładu (EWPDF). Podejście EWPDF stanowi obiecującą drogę do poprawy precyzji teoretycznej w reżimie kolinearnym poprzez systematyczne uwzględnianie efektów resumacji. Funkcje EWPDF zaimplementowano do programu Whizard i przeprowadzono szereg testów jego poprawności przy użyciu parametrów poprzecznej masy, który lepiej odzwierciedla procesy rozpatrywane w poprzednim rozdziale od parametryzacji poprzez niezmienniczą masę. W ogólności, podejście EWPDF wydaje się być dokładniejszym od przybliżeń równoważnych wektorów bozonowych, chociaż do pełnej porównawczej analizy potrzebne są dodatkowe badania, choćby z udziałem kolorowo naładowanych cząstek, których obecność w fuzji bozonowej jest istotna dla zderzaczy mionowych. Tego typu analiza została zainicjowana w rozprawie dla procesów generowanych przez parę fotonów, kwarków i gluonów (wykresy 8.8 i 8.9).

Rozdział 9 omawia dalsze możliwe ulepszenia w precyzji pomiarów sprzężeń lekkich kwarków z bozonem Z jak i wyznaczeniu i implementacji elektroślabyh funkcji struktur EWPDFs. W przypadku sprzężeń Z-kwarki lekkie poprawę systematycznych niepewności w pomiarach można uzyskać poprzez uwzględnienie podłużnej polaryzacji wiązek, co jest łatwiejsze do zrealizowania w przypadku zderzaczy liniowych niż kołowych. Implementacja EWPDFs w programie Whizard wymaga uwzględnienia stanów mieszanych H/Z na poziomie mnożenia amplitud od stanów z różnymi masami, uwzględnienia w wiązkach kolorowych liczb kwantowych oraz wkładów elektroślabyh w końcowych kaskadach. W planach jest również wyjście z rozwojem EWPDFs na potrzeby zderzaczy hadronowych. Ostatecznie, schemat EWPDF powinien przyczynić się do poprawy precyzji przewidywań teoretycznych dzięki dopasowaniu wyników resumacji w formalizmie kolinearnym do obliczeń wyższych rzędów w pełnej przestrzeni fazowej. Opracowanie spójnej procedury dopasowania oraz potwierdzenie dokładności i wiarygodności tych przewidywań są głównymi wyzwaniem w tych badaniach.

Rozprawa napisana jest starannie. W rozdziale 4.3 zauważyłem, że liczby podane na dokładność wyznaczenia mas i szerokości połówkowych bozonów W i Z są błędne (dotyczy to obecnego stanu wiedzy, ale także oszacowań przyszłych wartości, które wydają się być zbyt optymistyczne, nie podano źródeł tych oszacowań). W przypadku analizy procesów niestandardowych, w szczególności doty-

czących sprzężeń i mas ciężkich neutrin zabrakło mi choćby wzmianki o efektach związanych z parzystością CP neutrin, co w przypadku różnych parzystości CP lub łamania symetrii CP wpływa na maksymalne sprzężenia tych neutrin z cząstkami standardowymi (destrukcyjna interferencja, w przypadku e^+e^- analizowana np. w pracy <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.51.4707>, w przypadku zderzeń pp , w pracy <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2015.06.077>).

Uważam że praca spełnia wszystkie warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie mgra Krzysztofa Mękałę do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Opublikowane prace związane z rozprawą jak i rozwój i wykorzystanie jednego z najważniejszych generatorów Monte Carlo (Whizard) dotyczą frontowych badań i problemów w badaniu Modelu Standardowego oraz jego uogólnień w obecnych i przyszłych akceleratorach wysokich energii, są istotne dla rozwoju badań w akceleratorach wysokich energii. Przeprowadzona szczegółowa analiza sprzężeń bozonu Z z lekkimi kwarkami pokazuje w jaki sposób będzie można określić te sprzężenia analizując dane w rezonansie bozonu Z osiągając precyzję poniżej procenta przy odpowiednio czulej identyfikacji zapachów lekkich kwarków. Pokazano, że poprzeczne funkcje struktury można lepiej określić stosując poprzeczną masę od masy niezmienniczej przy wyborze skali faktoryzacji. W programie WHIZARD wprowadzono nową implementację formalizmu EWPDF, którą zweryfikowano dla różnych procesów pokazując iż wkłady indukowane przez QCD mogą odgrywać istotną rolę w wysokoenergetycznych zderzaczach leptonowych i powinny być uwzględniane w celu uzyskania wiarygodnych przewidywań fenomenologicznych. Rozprawa świadczy o opanowaniu przez mgr Mękałę teorii oraz narzędzi potrzebnych do wykonania obliczeń, dokumentuje także długoletnią, efektywną współpracę pomiędzy naukowcami z Uniwersytetu Warszawskiego, w tym doktoranta, z naukowcami z DESY w Hamburgu. Prace opublikowane w ostatnich 2 latach związane z tematem rozprawy są już szeroko cytowane (dwie prace opublikowane w JHEP mają już prawie 50 cytowań).

Biorąc pod uwagę powyższe wyniki pracy, wnoszę o wyróżnienie niniejszej rozprawy doktorskiej autorstwa mgra Krzysztofa Mękały.

Elektronicznie podpisany przez
Janusz Gluza
2026.04.17 17:58:45 +02:00