

Michał Szleper  
Narodowe Centrum Badań Jądrowych  
ul. Pasteura 7, 02-093 Warszawa  
e-mail: Michal.Szleper@ncbj.gov.pl

Warszawa, 07.04.2026

**Recenzja pracy doktorskiej mgr. Krzysztofa Mękały pt.  
„Modelling electroweak interactions at lepton colliders - from the Z pole to the  
highest energies”**

Praca pana Krzysztofa Mękały, „Modelling electroweak interactions at lepton colliders - from the Z pole to the highest energies”, dotyczy wybranych aspektów bardzo szerokiej tematyki jaką są przyszłe zderzacze cząstek. Niezależnie od tego, czy działający obecnie Wielki Zderzacz Hadronów (LHC) zdoła po raz pierwszy zobaczyć nową fizykę, czy też nie, można z dużą dozą pewności powiedzieć, że nie rozwiąże on wszystkich zagadek z fizyki cząstek elementarnych. Dlatego planowanie przyszłych zderzaczy jest obecnie jednym z najważniejszych kierunków badań fizyków. Obejmuje to w szczególności rozwój technik analizy przyszłych danych oraz narzędzi do symulacji procesów fizycznych, a ostatecznym celem jest pełne zdefiniowanie tzw. physics case, czyli czego więcej będziemy mogli się dowiedzieć, przed podjęciem ostatecznej decyzji o budowie takiej bądź innej wersji zderzacza. Temu celowi służy praca pana Mękały, należy więc ona do jednego z najważniejszych nurtów dzisiejszej fizyki cząstek. Praca, przynajmniej w części doświadczalnej, koncentruje się w zasadzie na generycznym zderzaczach elektron-pozyton, ale w wielu aspektach, zwłaszcza teoretycznych, nie jest ograniczona do żadnego konkretnego projektu.

Praca składa się z 10 rozdziałów. Po krótkim wstępie ogólnym, kolejne rozdziały 2-5 przedstawiają nieco bardziej rozbudowane wstępy do: teorii Modelu Standardowego (rozdział 2), aktualnie istniejących projektów przyszłych zderzaczy (rozdział 3), głównych zagadnień fizycznych, które będą badane w przyszłych zderzaczach (rozdział 4), oraz generatorów Monte Carlo do symulacji zdarzeń (rozdział 5). Wszystkie te rozdziały napisane są raczej zwięźle, ale zawierają to, co najważniejsze, żeby dobrze zrozumieć szersze tło pracy. Autor nie uznaje za potrzebne pisanie wszystkiego co wie na dany temat, na czym praca jedynie zyskuje. Przy tym trzeba jeszcze podkreślić, że wszystko to napisane jest w sposób bardzo dydaktyczny, jasny i przejrzysty, tak że doskonale nadaje się na wprowadzenie do tematu dla studentów którzy właśnie zaczynają swoją przygodę z fizyką cząstek, albo i dla szerszego grona niekoniecznie specjalistów, którzy chcieliby się po prostu zorientować w temacie. Sposób pisania bardzo wyraźnie świadczy o kompetencji Autora w omawianych kwestiach i śledzeniu na bieżąco rozwoju dziedziny. Może tylko nieco zaskakiwać, że przy omawianiu otwartych pytań w Modelu Standardowym (podrozdział 2.3) Autor łączy tzw. problem hierarchii jednoznacznie z grawitacją, chociaż związek taki - jeśli rozumieć problem hierarchii konkretnie jako kwestię stabilizacji masy Higgsa względem poprawek pętlowych - jest bynajmniej nieoczywisty.

Rozdziały 6-8 zawierają szczegółowy opis pracy własnej Autora. Wkład własny Autora ma dwie wyraźnie oddzielone od siebie części. Jedną część związana jest z rozwijaniem kodu źródłowego generatora WHIZARD i obejmuje oryginalne obliczenia teoretyczne wykonane przy użyciu zaimplementowanego przez siebie kodu. Drugą częścią jest wykonanie fenomenologicznej analizy na poziomie symulacji zderzeń  $e^+e^-$  w przyszłym zderzacz, ale bez odwoływania się do własnej pracy na polu teorii. Nie ma więc tutaj jasno określonego, spójnego tematu wiodącego. Jest to raczej nietypowe jak na pracę doktorską, ale chyba nie stanowi problemu z formalnego punktu widzenia, o ile tylko sumaryczna praca Autora stanowić będzie istotny wkład do szeroko pojętej tematyki.

W rozdziale 6 Autor proponuje nową metodę wyznaczania stosunków rozgałęzień bozonu Z do poszczególnych kwarków w zderzacz  $e^+e^-$  działającym przy energii odpowiadającej masie Z. Zagadnienie jest o tyle istotne, że dotychczas najdokładniejsze pomiary pochodzą z LEP-u, ich precyzja jest jednak znacznie poniżej precyzji przewidywań teoretycznych w ramach Modelu Standardowego, a co więcej pomiary ograniczają się praktycznie rzecz biorąc do ciężkich kwarków. Proponowana metoda polega na wykorzystaniu dwóch pomiarów: całkowitej szerokości Z w rozpadach na hadrony oraz w rozpadach na hadrony z dodatkową emisją fotonu. Poszczególne kwarki kontrybuują do obydwu procesów z różnymi wagami, w zależności od ich ładunku, co daje możliwość rozwikłania wkładów od kwarków górnych i dolnych. Sama metoda nie jest naprawdę nowa, albowiem była już stosowana w LEP. Istotną różnicę może jednak sprawić znacznie większa statystyka spodziewana w przyszłych zderzaczach  $e^+e^-$ , a przede wszystkim postępy w technikach tagowania zapachu kwarków, w szczególności możliwości odróżnienia kwarków s od kwarków d. Autor wykonał stosowne symulacje procesu produkcji i rozpadu bozonu Z przy użyciu generatora WHIZARD, którego jest współautorem (o czym później), wraz z generacją kaskady partonów (parton shower) i hadronizacją w Pythii 6, oraz symulacją detektora przy użyciu programu DELPHES ze standardowymi parametrami opisującymi realistyczny przyszły detektor - tak jak go sobie dzisiaj wyobrażamy. Sama idea pomiaru jest bardzo ładnie wyjaśniona w podrozdziałach 6.1 i 6.2, jest jednak parę niejasności. W równaniu (6.2) Autor używa symbolu  $y_{cut}$ , ale dopiero 10 stron później dowiadujemy się, co właściwie ta wielkość oznacza i to też tylko pośrednio, bo nigdzie nie jest powiedziane wprost, że to jest właśnie definicja. A w każdym razie, przydałoby się wiedzieć co to jest  $y_{cut}$  zanim jeszcze zaczniemy patrzeć na rysunek 6.3, przedstawiający efektywność sygnału w funkcji tegoż  $y_{cut}$ . Druga drobna niejasność dotyczy rekonstrukcji dżetów opisanej w podrozdziale 6.4.1. Autor pisze, iż używa algorytmu Durham do klastrowania cząstek w stanie końcowym w **dwa** (podkreślenie moje) dżety. A co jeśli liczba dżetów będzie różna od dwóch? Wydaje się, że przedstawiona analiza nie bierze pod uwagę radiacji dodatkowych gluonów, ale nie ma na ten temat żadnego komentarza.

Kluczowa dla całej analizy jest możliwość rozróżniania zapachów kwarków poprzez szczegółową analizę ich dżetów hadronowych w detektorze. Autor zakłada efektywności tagowania poszczególnych kwarków wzięte z pracy [300], upraszczając nieco oryginalną macierz  $11 \times 11$  do postaci  $5 \times 4$ . Kryteria tegoż uproszczenia nie budzą większych wątpliwości, z jednym wyjątkiem. Albowiem, wedle własnych słów, Autor zaniedbuje tutaj przyczynki od dżetów gluonowych. Ale zgodnie z pracą [300], conajmniej 10% kwarków u, d i s zostanie błędnie

zatagowane jako gluony - i co wtedy zrobić, nie jest jasne, a jest to ogromny efekt w porównaniu z precyzją jaką chcielibyśmy osiągnąć. Prawdą jest, że w takiej czysto fenomenologicznej analizie poszczególne efektywności nie mają większego znaczenia, albowiem dla końcowego wyniku istotna jest jedynie precyzja z jaką potrafimy je wyznaczyć. Teoretycznie można więc było przyjąć dowolną macierz. Jednak w rzeczywistym eksperymencie te dwie rzeczy są ze sobą ściśle związane i nie można ich rozpatrywać osobno. I tutaj dochodzimy do kwestii zasadniczej. Autor zakłada domyślną precyzję wyznaczenia poszczególnych efektywności na poziomie 0.1%, w tym także dla kwarków lekkich (przy czym, jak mniemam, chodzi o absolutną liczbę 0.001, a nie o 0.1% samej wartości), a w najbardziej optymistycznym wariacie bierze nawet pod uwagę precyzję na poziomie 0.01%. Niestety nie ma w całej pracy niczego, co by przekonało mnie, że liczby te są nawet z grubsza realistyczne. Nie ma na poparcie tego żadnej referencji ani żadnych własnych głębszych analiz, zaś przytoczony fakt, że obecnie w eksperymencie ATLAS tagowane są kwarki b z precyzją kilku procent, raczej tych docelowych liczb nie uprawdopodobnia. Kwestia ta zaś jest bardzo ważna, albowiem łatwo widać np. z rysunku 6.6, że niepewności systematyczne zaczynają dominować już po zebraniu  $100 \text{ fb}^{-1}$  danych, dalsze ich zbieranie może więc być - z punktu widzenia tej analizy - bezcelowe. Trochę szkoda więc, że to kluczowe zagadnienie nie zostało w pracy przestudiowane nieco głębiej.

Rozdział 7 pracy poświęcony jest przybliżonej technice obliczeniowej dla procesów z udziałem emisji bozonów W i Z, znanej jako Equivalent Vector boson Approximation (EVA, czy jednak literka E nie oznaczała pierwotnie Effective?). Przybliżenie to opiera się na założeniu współliniowości emisji względem kierunku cząstki macierzystej. Autor samodzielnie zaimplementował przybliżenie EVA w programie WHIZARD, a następnie wykonał szereg obliczeń porównując wyniki uzyskane przy użyciu przybliżenia EVA z wynikami pełnego rachunku elementów macierzowych. Badane procesy obejmowały produkcję pary Higgsów, pary neutrin taonowych, pary fotonów, pary kwarków t, stowarzyszonej produkcji Higgsa z bozonem Z, oraz rozpraszania pary bozonów W. Co charakterystyczne, wszystkie obliczenia zostały wykonane dla fikcyjnego zderzacza  $e^+ \mu^-$  żeby tym sposobem mitygować znane ograniczenia przybliżenia EVA, w szczególności w celu pozbycia się wkładów od diagramów w kanale s. Wyniki obliczeń nie mają więc bezpośredniego znaczenia fizycznego w kontekście planowanych przyszłych zderzaczy, natomiast szczegółowo pokazują w jakich obszarach przybliżenie działa w miarę zadowalająco, a w jakich kompletnie się załamuje. Ta część pracy może więc być interesująca głównie dla teoretyków chcących studiować samo przybliżenie, ale raczej nie widać, żeby narzędzie to było szczególnie użyteczne do modelowania rzeczywistych procesów fizycznych w przyszłych zderzaczach. Zresztą przyznaje to sam Autor. Wszystkie przedstawione wyniki raczej tylko potwierdzają, że użyteczność przybliżenia EVA jest w dzisiejszych czasach bardzo ograniczona. Trzeba natomiast powiedzieć, że koncepcja przybliżenia EVA i wszystkie ograniczenia z nim związane zostały wyjaśnione w sposób niezmiernie kompetentny, przejrzysty i dydaktyczny.

Rozdział 8 dotyczy elektroslabych funkcji rozkładu partonów (PDF-ów). Ich idea polega na takim opisie zderzeń leptonów przy wysokich energiach, w którym rozdzielamy od siebie twarde oddziaływanie oraz funkcje struktury, które przypisujemy cząstkom obydwu zderzających się wiązek na podobieństwo PDF-ów w chromodynamice kwantowej (QCD), powszechnie używanych do opisu zderzeń hadronów. O ile jednak hadronowe PDF-y potrzebują istotnego wkładu

eksperymentalnego w postaci dopasowań do danych, o tyle elektroslabe PDF-y mogą zostać po prostu obliczone na gruncie kwantowej teorii pola. Taki sposób opisu pozwala na znaczne usprawnienie obliczeń przy jednoczesnym zachowaniu żądanej precyzji. Temu właśnie zagadnieniu służy ta część pracy. Jako część swojego projektu doktorskiego, pan Mękała samodzielnie zaimplementował rachunek elektroslabych PDF-ów w generatorze WHIZARD. Następnie przeprowadzone zostały obliczenia dla tych samych procesów co w poprzednim rozdziale i szczegółowe porównania wyników do tych uzyskanych zarówno w przybliżeniu EVA jak i w pełnym rachunku elementów macierzowych. Przedstawione obliczenia pozwalają stwierdzić dobrą zgodność, jednak niestety ograniczają się znowu do fikcyjnego zderzacza  $e^+\mu^-$ . Autor uzasadnia to tym, że koncepcja elektroslabych PDF-ów opiera się również, podobnie jak EVA, na przybliżeniu kolinearnym; takie potrójne porównanie pozwala więc na oddzielenie od siebie różnych efektów. Można się z tym zgodzić, ale dla potencjalnego przeciętnego użytkownika programu WHIZARD najważniejsze byłoby pytanie, jak dokładnie potrafimy opisać procesy zachodzące w realistycznym zderzaczach  $e^+e^-$ , włączając wszystkie kontrybuujące diagramy. Na to pytanie niestety nie znajduję odpowiedzi, trudno więc wyrokować, czy ten sposób opisu będzie rzeczywiście użyteczny w przyszłych symulacjach. Na koniec Autor zwraca uwagę na istotną rolę procesów QCD wyższego rzędu w obliczaniu przekrojów czynnych, w szczególności dla zderzacza mionowego, których to efektywne włączenie jest zaletą proponowanego podejścia. Jak rozumiem, stanowi to główny argument za tym, że proponowany kierunek jest perspektywnie właściwy, nawet jeśli na dzień dzisiejszy praca jest dosyć daleka od ukończenia i wiele rzeczy pozostaje ciągle do implementacji i zbadania.

Trochę niefortunna jest moim zdaniem kolejność rozdziałów 6, 7 i 8. Przedstawianie najpierw wyników określonej analizy, a później dopiero rozwoju narzędzi teoretycznych, które służą do takich analiz, trochę zbija czytelnika z tropu. Nawet jeśli tematy tych rozdziałów nie są ze sobą bardzo ściśle związane, zamiana ich kolejności mogłaby poprawić ogólne wrażenie spójności pracy.

Pewne aspekty pracy, które będą wymagały dalszych badań, przedstawione są w rozdziale 9. W podrozdziale 9.1 Autor proponuje rozszerzenie metody wyznaczania sprzężeń bozonu Z do kwarków, przedstawionej w rozdziale 6, w postaci dodatkowego pomiaru ich lewo- i prawoskrętnych składowych. W zasadzie można tego dokonać poprzez polaryzację wiązek i wykonania osobnych pomiarów dla czterech możliwych kombinacji polaryzacji. Jest to bardzo ciekawa propozycja, a w dodatku mogłaby faworyzować koncepcję zderzacza liniowego, jednak szczegóły pomiaru i związane z tym niepewności systematyczne pozostają do sprawdzenia. W podrozdziale 6.2 Autor dyskutuje możliwe przyszłe ulepszenia implementacji podejścia elektroslabych PDF-ów do w pełni realistycznej symulacji zderzeń leptonów przy wysokich energiach. Nie ulega wątpliwości, że jest to obszerny program na przyszłość. Jednak pierwsze kroki zostały już postawione przez Autora i opisane w rozdziale 8, a wiele przemawia za tym, że mogą być to kroki we właściwą stronę.

Pracę kończy krótkie podsumowanie (rozdział 10) oraz dwa techniczne załączniki.

Od strony redakcyjnej, praca jest napisana w sposób niezwykle staranny, i co szczególnie

warte podkreślenia - perfekcyjną angielszczyzną (choć to ostatnie może być zasługą wspomnianych we wstępie narzędzi AI). Wszystkie odnośniki w tekście, czy to do rysunków, tabel, wzorów czy rozdziałów, są zaopatrzone hyperlinkami. Rysunki są na ogół przejrzyste i dobrze opisane, chociaż niektóre trzeba powiększać żeby dojrzeć szczegóły. Każdy większy rozdział pracy ma własny wstęp i własne podsumowanie. Praca zawiera też imponujący, bardzo obszerny wykaz bibliografii, pokrywający wszystkie poruszane w pracy zagadnienia w sposób całkowicie zadowalający. Ponadto warto tu znowu powtórzyć, że autor pokazał wyraźny talent do tłumaczenia rzeczy w sposób prosty i zwięzły, bez użycia niezrozumiałego żargonu. Co z kolei świadczy również o dobrym zrozumieniu własnym przedstawianych problemów. Nade wszystko, pracę naprawdę przyjemnie się czyta.

Podsumowując, pan Mękała wykonał oryginalną pracę, która w pełni kwalifikuje się na doktorat z fizyki. Wspomniane powyżej niedostatki pracy wynikają przede wszystkim z bieżącego stanu badań, a nie z zaniedbań samego Autora. Rozwiązanie pewnych kluczowych kwestii w celu doprowadzenia do finalnych konkluzji będzie jeszcze wymagało wiele pracy od wielu osób i zdecydowanie wykracza poza ramy tego, co zrobić może jeden doktorant. Pan Mękała pokazał, że jest ekspertem w swojej dziedzinie. Uważam, że przedstawiona praca spełnia wszelkie warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie do dalszych etapów procedury nadania stopnia doktora.



Michał Szleper