



Katowice, 8 kwietnia 2025 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Michała Ryczkowskiego
"Indirect searches for the Standard Model extensions"

Na pracę doktorską magistra Michała Ryczkowskiego liczącą 152 stron składa się pięć rozdziałów głównych i pomocniczych materiałów w dodatkach A-J oraz odnośniki do 254 prac naukowych. W bibliografii wymienione są dwie opublikowane prace Autora [52] (Physical Review D) oraz [73] (Computer Physics Communications) na podstawie których przygotowano rozprawę doktorską.

Rozprawa poświęcona jest badaniu pośrednich efektów wykraczających poza zakres Modelu Standardowego (MS) fizyki cząstek elementarnych. Ponieważ po wykryciu w 2012 roku cząstki skalarnej Higgsa MS został domknięty, obecnie nie ma żadnych jednoznacznych teoretycznych przewidywań na możliwą skalę nowej fizyki i badanie efektywnych modeli wykraczających poza MS jest bardzo pożądane i może okazać się jedynym sposobem detekcji nowych wirtualnych oddziaływań czy też rezonansów (w przypadku gdy obecne i przyszłe akceleratory okażą się być poza zasięgiem skali energetycznej określającej bezpośrednią produkcję nowych masywnych stanów materii).

W pracy zastosowano dwa komplementarne podejścia do testowania teoretycznych modeli, tzw. oddolne (ang. bottom-up) w którym bada się różnice między danymi eksperymentalnymi a przewidywaniami MS przy założeniu ogólnych operatorów efektywnej teorii (SMEFT). W podejściu odgórnym (ang. top-down) analizowane są konkretne rozszerzenia MS. W rozprawie dyskutowane jest także dopasowanie tych dwóch podejść.

Rozdział 1 to wprowadzenie z krótkim opisem MS, listą najważniejszych niewyjaśnionych problemów, wprowadzeniem do efektywnych modeli i motywacją do rozpatrzenia specyficznych modeli zawierających ciężkie wektoropodobne fermiony oraz rzeczywiste skalary.

Rozdział 2 poświęcony jest opisowi generatora reguł Feynmana dla modelu SMEFT, który oparty jest na bazie operatorów o wymiarze 5 i 6 opracowanych w pracy [13]

przez grupę Grzadkowski-Iskrzyński-Misiak-Rosiek. Dla operatorów o wymiarze 8 zastosowano bazę opracowaną przez Murphy’ego w pracy [76]. Opracowany generator SmeftFR v3 został opublikowany w Computer Physics Communications w roku 2024 (praca [73] w bibliografii), Autor niniejszej rozprawy doktorskiej jest współautorem. Praca [73] jest już cytowana kilkanaście razy przez grupy zajmujące się efektywnymi teoriami. Opracowane reguły Feynmana obejmują sektor pól Higgsa, cechowania oraz fermiony w dwóch stosowanych powszechnie schematach renormalizacji (G_F, α_{em}). Oprócz opisu zdefiniowanych komend, formatu zapisu wyników, omówiono analityczne i numeryczne testy generatora. Przedstawiono przykład obliczeń efektywnych reguł Feynmana dla rozprośnień bozonów $W^\pm$. Program ten został wykorzystany do uzyskania wyników, które opisane są w dalszej części rozprawy doktorskiej.

W rozdziale 3 rozpatrzono produkcję dwóch cząstek Higgsa poprzez fuzję bozonów wektorowych $W^\pm, Z^0$ (VBF) w ramach SMEFT (podejście niezależne od specyfiki modeli BSM) na poziomie jednopętlowym. Mechanizm VBF jest podrzędny w stosunku do mechanizmu produkcji bozonów cechowania przez fuzję gluonową, tym niemniej można go odróżnić od tła ze względu na dobrze określone dwa dżety i, potencjalnie, nawet niewielkie modyfikacje oddziaływań między bozonami Higgsa i cechowania mogą prowadzić do znacznego zwiększenia przekroju czynnego produkcji pary bozonów Higgsa. W pracy przeanalizowano jak odpowiednie operatory HHH, HVV, HHVV wymiaru 6 i 8 mogą wpłynąć na wartości oczekiwane dla badanych procesów VBF gdzie współczynniki Wilsona (WCs) przyjęto jako maksymalne, zgodnie z danymi eksperymentalnymi. W pracy nie badano możliwej interferencji związanej z WCs, zakładano jeden nieznikający WCs w danym obliczeniu przy warunku zbieżności w potęgze ekspansji parametru $1/\Lambda$. Znormalizowane do SM przekrojów czynnych wyniki numeryczne dla procesów $WW \rightarrow HH$ oraz $ZZ \rightarrow HH$ przedstawiono na wykresach 3.3-3.6. Odpowiednie amplitudy helicity zapisano w dodatkach F i G.

Z wykresów wynika, że największe efekty dla WCs wymiaru 6 dla przekrojów czynnych $VV \rightarrow HH$ można uzyskać dla operatorów $C_{\phi\Box}$ oraz $C_{\phi W}$. Z kolei największe efekty dla WCs o wymiarze 8 uzyskano dla współczynników C_{ϕ^8} oraz $C_{\phi^8\Box}$.

Na zakończenie tego rozdziału z oddolnym podejściem do badania modeli BSM podjęto próbę odpowiedzi na pytanie jakie może być maksymalne wzmocnienie produkcji pary bozonów Higgsa poprzez fuzję bozonów wektorowych w ramach teorii SMEFT w akceleratorze dużej świetlności HL-LHC, który będzie przez następną dekadę najważniejszym akceleratorem fizyki wysokich energii. W tym celu przeanalizowano pełny proces $pp \rightarrow HHjj$, w tym celu użyto program MadGraph z operatorami wygenerowanymi przez generator SmeftFR. Rozpatrzono scenariusze w których WCs zależą lub nie od energii procesu. Z analizy wynika, że dla operatorów niezależnych od energii procesów (Tabela 3.3) względnie duże wartości WCs mogą prowadzić do znacznych odstępstw przekrojów czynnych VBF od wartości MS.

W przypadku WCs zależnych od energii dla procesów VBF, warunki stosowalności (zbieżności) SMEFT ograniczają mocno WCs, w konsekwencji możliwe wzmocnienie sygnałów VBF ponad MS jest małe.

W podsumowaniu rozdziału stwierdzono, że ograniczenia na parametry WCs dla zdefiniowanej w rozprawie stosowalności SMEFT (zbieżność) są na tyle duże, że produkcja pary bozonów Higgsa poprzez proces VBF nie wydaje się być potencjalnym źródłem odkrycia odchyleń sygnałów od przewidywań MS.

W rozdziale 4, ostatniej z głównych części rozprawy doktorskiej, mgr Ryczkowski rozpatruje specyficzne klasy modeli A,B,C, odpowiednio z wektoropodobnymi fermionami (VLF, dublety grupy $SU(2)_L$), rzeczywistym skalarom S z symetrią dyskretną $\mathbb{Z}_2$ i ich mieszkanką VLF+S. Ważną częścią dyskusji jest dodanie do warunków na stabilność próżni i perturbacyjność sprzężeń do skali Λ także warunku na stabilność perturbacyjnego rozwinięcia w parametrze Λ . Dodatkowo w obliczeniach numerycznych uwzględniono obecne ograniczenia na masy i sprzężenia niestandardowych cząstek VLF i S. W szczególności pokazano, że zależność od energii stałej sprzężenia pól Higgsa ogranicza liczbę multipletów VLF poniżej 4 (Fig.4.4) i ustalono maksymalne możliwe sprzężenia VLF Yukawy (Tabela 4.4). Dodanie singletu S do modelu zwiększa maksymalne sprzężenia Yukawy nawet o 50% w porównaniu z modelami VLF, co widać z porównania Tabel 4.2 i 4.4.

Rozpatrzono również wpływ warunku unifikacji sprzężeń bozonów cechowania i wyodrębniono dwa scenariusze (VLQ II z $n = 2$ oraz VLQ III z $n = 1$) jako najbardziej obiecujące konfiguracje dla realizacji unifikacji sprzężeń cechowania w rozważanych modelach VLF.

Jeśli chodzi o produkcję pary bozonów H w zderzeniach pp, uwzględniając ustalone wcześniej maksymalne wartości sprzężeń LFV, pokazano, że ich wpływ na sprzężenie HHH jest mało znaczący, poniżej jednego procenta. Podobne wnioski wyciągnięto przy analizie multipletów VLQ.

Ograniczenia na przestrzeń parametrów modelu LFV wynikające z eksperymentalnych ograniczeń i poprawek STU są słabsze od ograniczeń pochodzących z teoretycznych warunków EW stabilności, warunku zbieżności perturbacyjnej oraz z pojedynczych pomiarów produkcji cząstki Higgsa.

W rozprawie wykazano również, że przestrzeń parametrów modelu SM z dodatkowym polem skalarnym S jest mocno ograniczona, pozostawiając bardzo mało miejsca na przemianę fazową pierwszego rodzaju, co jest jednym z warunków koniecznych do zajścia elektrosłabej bariogenezy. Dodanie VLF nie zmienia sytuacji. Modele te nie są więc atrakcyjne do badania asymetrii materia-antymateria.

Rozdział zakończono dyskusją procedury dopasowania modeli VLQ i SMEFT w uproszczonym scenariuszu, biorąc pod uwagę tylko produkcję pary bozonów Higgsa poprzez fuzję gluonów z pojedynczym współczynnikiem Wilsona SMEFT C_ϕ , co może być źródłem dodatkowych ograniczeń na parametry modelu.

Rozprawa doktorska jest bardzo wartościowa, wpisuje się w nurt obecnie prowadzonych badań niestandardowych modeli opartych o efektywne teorie i podkreśla znaczenie pośredniego poszukiwania wirtualnych efektów kwantowych jako obiecującego podejścia do poszukiwań nowej fizyki.

Szczególnie istotne dla wyników pracy jest przyjęcie warunku, że poprawki SMEFT do procesu $VV \rightarrow HH$ powinny maleć z każdym rzędem rachunku zaburzeń w rozwinięciu EFT. Nie wiem, czy tę tezę można formalnie udowodnić (w każdym rzędzie rachunku liczba diagramów znacząco rośnie dla dużej liczby operatorów rzędu 6 i 8).

W pracy rozpatrzono jedynie warunki dla procesów w przypadku HL-LHC. Na ile dość pesymistyczne wyniki na produkcję par HH mogłyby się zmienić w przypadku wyższych energii, proponowanych na przykład w FCC-hh? Bardziej ogólnie, istnieje wiele prac na temat poprawek LO, NLO do teorii SMEFT w przyszłych akceleratorach, także e^+e^- , które wykazują czułość na efekty skali Λ do kilkudziesięciu TeV (na przykład praca <https://cds.cern.ch/record/2928193>, rozdziały 2.2, 2.3 oraz <https://arxiv.org/pdf/2412.14241>). Ciekawe byłoby zastosowanie proponowanego w rozprawie podejścia do precyzyjnych obliczeń w tego typu przyszłych zderzaczach.

Moim zdaniem rozprawa doktorska w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie mgra Michała Ryczkowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



prof. dr hab. Janusz Gluza