

2019 -08- 02

	NARODOWE CENTRUM BADAŃ JĄDROWYCH DEPARTAMENT BADAŃ PODSTAWOWYCH 02-093 Warszawa, ul. Pateura 7, tel. 22-273-2826
---	---

Warszawa, 2 sierpnia 2019 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana Pawła Kozówa p.t.

***The W and Z scattering as a probe of physics beyond the Standard Model:
Effective Field Theory approach***

Przedstawiona rozprawa jest pracą teoretyczną (a właściwie fenomenologiczną). Praca jest napisana po angielsku, liczy 157 stron (osiem rozdziałów, trzy obszerne dodatki katalogujące otrzymane wyniki i lista 138 odnośników do literatury).

Temat pracy bardzo dobrze podsumowuje jej tytuł. Poświęcona jest ona zbadaniu możliwości użycia wyników z rozpraszania bozonów wektorowych teorii elektro-słabej, W i Z (zakładając, że takowe wyniki będą dostępne w niedalekiej przyszłości) do badania rozszerzenia Modelu Standardowego (MS) w oparciu o podejście wykorzystujące Efektywną Teorię Pola (ETP). ETP pozwala na badanie fizyki poza MS, czyli na szukaniu tzw. *nowej fizyki*, mogącej stanowić podstawę do sformułowania w przyszłości nowej teorii mogącej zastąpić MS. ETP jest w szczególności bardzo przydatna w sytuacji gdy co prawda jeszcze nie obserwuje się żadnych nowych bardzo ciężkich cząstek (o masie Λ znacznie przekraczającej obecną skalę oddziaływań elektro-słabych), ale ich obecność może się już przejawiać w sposób pośredni przy energiach niższych od tej nowej skali Λ (dla $E \ll \Lambda$) w postaci niewielkich, rzędu E/Λ , ale mierzalnych poprawek do wyników MS. Poprawki te można bowiem parametryzować przez pewne nie-renormalizowalne operatory wyższych rzędów, które dodaje się do wyjściowego lagrangianu MS. Każda szczegółna realizacja ETP to szereg (w zasadzie nieskończony) takich operatorów charakteryzujących się kolejnymi rosnącymi potęgami współczynnika $f_i = (g_i/\Lambda)$, gdzie g_i są pewnymi stałymi sprzężenia (współczynnikami Wilsona) a Λ jest wzmiankowaną powyżej skalą energetyczną. Centralnym punktem tego podejścia jest przyjęcie, że w obszarze $E \ll \Lambda$ wystarczy jedynie pewien ograniczony zbiór odpowiednio wybranych operatorów jako dobre przybliżenie (nieznanej) pełnej teorii. Każdy taki wybór prezentuje pewien "model ETP", który bada się następnie pod kątem jego tzw. *potencjału odkrywczego*, analizując wybrane procesy pod kątem ich

zgodności z przewidywaniami MS. Takim procesem badanym w tej dysertacji jest rozpraszanie mezonów W i Z, a konkretnie badanie reakcji czysto leptonowego rozpadu W w procesie produkcji: $pp \rightarrow 2 \text{ jets} + W^+ W^- \rightarrow 2 \text{ jets} + (l \nu_l)(l' \nu_{l'})$ (głównie $W^+ = W^{*-}$). Tego typu reakcje powinny być mierzalne w przyszłości w LHC (przy wyższych niż obecnie energiach i przy większej świetlności), w szczególności zaś wybrany tutaj kanał leptonowego rozpadu pary WW, który charakteryzuje się korzystnym stosunkiem sygnału do tła. Niedogodnością zaś tego wyboru, z którą musimy się pogodzić, jest niemożliwość doświadczalnego wyznaczania niezmienniczej masy pary WW, M_{WW} , co w konsekwencji powoduje na pewnym etapie pracy konieczność przyjęcie jakiegoś sposobu tłumienia wkładów z obszaru $M_{WW} > \Lambda$ (tutaj przyjęto, że jest ono typu $(\Lambda/M_{WW})^4$ co odpowiada oczekiwanemu asymptotycznemu zachowaniu całkowitego przekroju czynnego z energią).

Głównym celem dysertacji jest dokładne sprawdzenie czy dwie wybrane klasy modeli ETP, a to **Standard Model Effective Field Theory – SMEFT** (z łamaniem wyjściowej symetrii elektro-słabej przez liniową dynamikę sektora Higgsa) oraz tzw. **Higgs Effective Field Theory – HEFT** (gdzie łamanie to zachodzi poprzez dynamikę nieliniową, typową dla tzw. złożonych modeli Higgsa), mają niezerowy potencjał odkrywczy, tzn. czy w przestrzeni parametrów (f_i, Λ) można znaleźć niepuste obszary w których: (a) można stosować opis EFT, (b) nie jest łamana unitarność odpowiednich amplitud rozpraszania, (c) oczekiwany sygnał przekracza 5σ (standardowych odchyień) od tego co widzimy w MS. Każdy z tych warunków nakłada swoje ograniczenie na dozwoloną przestrzeń parametrów, dlatego szukany obszar dostępny doświadczalnie jeśli istnieje to będzie miał kształt trójkąta (mniej lub bardziej zdeformowanego). Celem dodatkowym jest zbadanie czego możemy się dowiedzieć o nowej fizyce analizując w podejściu ETP przewidywane wyniki rozpraszania bozonów wektorowych pod kątem pojawienia się ewentualnych rozbieżności z wynikami MS. Już w tym miejscu należy podkreślić istotnie nowy element wyróżniający przedłożoną dysertację od znanych już w literaturze innych podejść tego typu, jest nim narzucona tutaj konieczność użycia ETP jedynie w obszarze jej stosowalności oraz konieczności spełnienia warunku unitarności. Oba wymagania okazały się bardzo istotne (a w zasadzie kluczowe) w analizie danych, dlatego też z pewnością staną się standardowym wymogiem każdej nowej analizy danych jaka będzie przeprowadzana w przyszłości.

Po przedstawieniu w pierwszym rozdziale (*1. Introduction*) planu i omówieniu celu dysertacji w następnych dwóch rozdziałach: *2. The Standard Model* i *3. Why to go beyond*) zamieszczona jest, z konieczności skrótowa ale wystarczająca dla zrozumienia całości pracy, prezentacja MS i powodów konieczności (oraz doświadczalnej możliwości) szukania jego rozszerzenia, ze szczególnym podkreśleniem roli odgrywanej w tym przez rozpatrywane

tutaj procesy rozpraszania mezonów W i Z. Zasadniczą część rozprawy stanowią cztery następne rozdziały: 4. *Constraints on scattering amplitudes from unitarity*, 5. *Vector boson scattering in the SM*, 6. *Effective Field Theory approach*, 7. *The EFT approach to W^*W^* scattering at the LHC*.

Rozdział 4 zawiera wyprowadzenie (na poziomie "drzewkowym" i na powłoce masy) oraz dyskusję ograniczeń nakładanych na amplitudy rozpraszania bozonów wektorowych przez warunek unitarności. Wyznaczone tutaj ograniczenia na poszczególne amplitudy będą kluczowe w dalszej części pracy do wyznaczania obszarów, w których procesy WW mogą być w ogóle obserwowane. Jak już wspomniałem powyżej, jest to nowy, w odniesieniu do tego typu reakcji, wynik, który może być wykorzystany w analizie innych danych z ATLAS-a czy CMS-u. W przypadku zaś tej dysertacji stanowi on element technicznego przygotowania do właściwej problematyki, która jest kontynuowana w następnych rozdziałach.

W rozdziale 5 omówiono rozpraszanie bozonów wektorowych ($WW \rightarrow WW$, $WZ \rightarrow WZ$, $WW \rightarrow ZZ$) w modelu standardowym (MS) (znowu: na poziomie drzewkowym i na powłoce masy). W szczególności, przyjmując różne warianty możliwych oddziaływań dopuszczalnych w MS (i odpowiednio uwzględniając rozbieżności coulombowskie) policzono wkłady do całkowitego niespolaryzowanego przekroju czynnego pochodzące od kombinacji różnych skrętności w funkcji energii w środku masy, E_{CMS} . Pełny zestaw otrzymanych wzorów analitycznych (dla asymptotycznie wiodących członów i wszystkich dozwolonych kombinacji skrętności, ilustrujący kasowania zachodzące pomiędzy różnymi drzewkowymi diagramami opisującymi zderzenia bozonów wektorowych) liczony w różnych wariantach oddziaływania i prowadzący do perturbacyjnego spełnienia warunku unitarności nałożonego na fale parcjalne, został przedstawiony w 12 tabelach zamieszczonych w Dodatku A.

Dwa następne rozdziały, 6. *Effective Field Theory approach* i 7. *The EFT approach to W^*W^* scattering at the LHC*, stanowią główną część rozprawy. W rozdziale 6 opisano wszystkie najważniejsze elementy ETP potrzebne do opisu zderzeń bozonów wektorowych. W szczególności przedstawiono bardzo szczegółowo obie realizacje ETP mające opisywać fizykę poza MS, które zostały użyte w tej dysertacji: *Efektywną Teorię Pola Modelu Standardowego (Standard Model EFT - SMEFT)* – w podrozdziale 6.1, oraz *efektywną Teorię Pola Higgsa (Higgs Effective Field Theory – HEFT)* – w podrozdziale 6.2. W obu przypadkach bardzo dokładnie wyszczególniono sposób wyboru odpowiednich operatorów (w dysertacji zwanych "modelami ETP"), które następnie zostały użyte do głównych rachunków (z różnych względów, które dokładnie przedyskutowano i uzasadniono, użyte zostały operatory o wymiarze $n=8$, które w rozpatrywanym tutaj kontekście są dominujące).

W rozdziale 7 opisano bardzo szczegółowo konkretne zastosowanie obu wybranych realizacji ETP do analizy reakcji czysto leptonowego rozpadu W : $pp \rightarrow 2 \text{ jets} + W^+ W^- \rightarrow 2 \text{ jets} + (\ell^+ \nu_\ell)(\ell^- \bar{\nu}_\ell)$. Zostały one szczegółowo przebadane pod kątem ich użyteczności w dostarczeniu informacji o skali i sile nowej fizyki, która to informacja jest konieczna w przypadku gdyby oczekiwane dane z LHC nie dawały się już opisać przy użyciu dotychczasowych metod MS. Przy okazji sprawdzono również praktyczną użyteczność języka ETP do opisu danych z rozpraszania bozonów wektorowych pod kątem ich potencjalnego wykorzystania do obserwacji ewentualnych sygnałów nowej fizyki w LHC. Realizacja tego programu zaczyna się od wspomnianego już wyboru dla każdej użytej odmiany ETP zestawu operatorów wymiaru $n=8$, które są dominujące i które są dalszymi obiektami badań. Następnie, tak jak to jest ogólnie przyjęte w analizie danych w LHC wykonywanej z użyciem ETP, analizuje się kolejno konsekwencje dodania do lagrangianu MS jednego z wybranych operatorów (czyli bada kolejne tzw. „modele ETP”). Obecność tych operatorów prowadzi do łamania unitarności amplitud ETP ograniczając ich użyteczność do energii poniżej pewnej, charakterystycznej dla danego operatora skali energii E^U . W przypadku SMEFT odpowiednie wartości tej skali dla wszystkich wybranych operatorów zostały policzone i skatalogowane w 16 tabelach (B.1-B.16) Dodatku B.1. Policzone też dla SMEFT (w przybliżeniu drzewkowym i na powłoce masy) odpowiednie amplitudy rozpraszania a kompletny zestaw ich analitycznych wzorów i szacunkowych wkładów do całkowitego niespolaryzowanego przekroju czynnego jest skatalogowany w 16 tabelach (B.17-B.32) w Dodatku B.2. Dodatkowo ich zależność od energii została przedstawiona na 40 wykresach zgrupowanych w 5 zbiorczych rysunkach (B.1- B.5) w Dodatku B.3. Odpowiednie wyniki dla HEFT zostały zebrane w Dodatku C: w szczególności policzone wartości skali E^U są skatalogowane w 6 tabelach (C.1 – C.6) Dodatku C1, a kompletny zestaw analitycznych wzorów i szacunkowych wkładów do całkowitego niespolaryzowanego przekroju czynnego znajduje się w 6 tabelach (C7 – C12) Dodatku C2, Dodatek C3 zawiera zaś 19 wykresów zgrupowanych w 3 zbiorczych rysunkach (C1-C3).

Otrzymane wyniki pozwoliły przedstawić i dokładnie przedyskutować w podrozdziale 7.2.1 sposób wyznaczania potencjału odkrywczego proponowany w tej dysertacji. Jest to jej główny wynik a ilustrujące go wyniki zostały przedstawione na 18 panelach zgrupowanych w 2 rysunkach (7.10, 7.11) - dla SMEFT, oraz na 26 panelach zgrupowanych w 4 rysunkach (7.13-7.16) dla HEFT. Dla SMEFT zbadano również zachowanie się tych obszarów ze wzrostem energii (dla HEFT będzie ono takie samo). Okazuje się, że o ile poprawia się w tym przypadku czułość na możliwe efekty nowej fizyki to same obszary nie stają się znacząco większe, pojawiają się one tylko przy mniejszych wartościach sprzężeń f_i i

większych wartościach skali Λ (co jest wynikiem braku kontroli masy niezmienniczej M_{WW}). Wyniki te przedstawiono na 16 panelach zgrupowanych w 3 rysunkach (7.17–7.19). Dla SMEFT wyznaczono również zakresy stałych sprzężenia g_i w obszarach niezerowego potencjału odkrywczego. Okazało się, że tylko dla pewnej klasy operatorów można stosować użyte tutaj podejście perturbacyjnego rozwinięcia, dla pozostałych operatorów wyniki są wysoce niejasne jeśli chodzi o ich interpretację w języku głębszej teorii. Natomiast w przypadku bardzo konkretnych już realizacjach HEFT, w tzw. *Composite Higgs Model* oraz na *Minimal Linear σ Model*, nie ma już tego problemu i można znaleźć dla nich sensowne wartości charakteryzujących je sprzężenia.

Podsumowując, uważam, że założony cel tej dysertacji został w pełni osiągnięty. Pokazano, że w obydwu rozpatrywanych klasach modeli ETP można znaleźć niezerowe obszary w przestrzeni parametrów dozwolone dla badanych reakcji, zbadano ich użyteczność pod kątem wyznaczania pewnych parametrów modeli ETP, dodatkowo ustalono też dokładną strategię postępowania jakie należy zastosować przy analizie przyszłych danych doświadczalnych.

W rozdziale 8. *Conclusions and Outlook* przedstawiono zbiorcze podsumowanie osiągniętych wyników oraz krótko zarysowano nowe perspektywy, jak, np. możliwość rozpatrywania więcej niż jednego operatora równocześnie itp. Rozumiem, że dziedzina badana w dysertacji jest bardzo dynamiczna i nowe wyniki pojawiają się nadzwyczajnie szybko. Tym większa jest więc wartość naukowa przedstawionej dysertacji, wyniki której będą zapewne nieocenioną bazą do dalszych przyszłych badań w tej dziedzinie.

W samej edycji pracy nie uniknięto szeregu przekłamań i błędów językowych, na co chciałbym tylko zwrócić uwagę nie wymieniając ich szczegółowo. Dodatkowo, o ile w *Introduction* jest mowa o 7 rozdziałach to ostateczna wersja pracy ma ich 8, a tytuł podrozdziału 7.2 jest identyczny z tytułem całego rozdziału 7 (być może intencjonalnie). Nie wpłynęło to jednak w żadnym stopniu na meritum rozprawy, co najwyżej utrudniło w jakimś stopniu jej lekturę. Ta zaś byłaby znacznie ułatwiona gdyby na końcu pracy zamieszczono wykaz użytych skrótów wraz z ich definicjami.

Podsumowując, znajduję przedstawioną rozprawę Pana Pawła Kozówa jako bardzo ciekawą i wartościową, w pełni spełniającą warunki stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę zatem o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Grzegorz Wilk

