



dr hab. Kamila Kowalska, prof. NCBJ
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. Pasteura 7
02-093 Warszawa

Warszawa, 21.04.2025

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. Michała Ryczkowskiego
„Indirect searches for the Standard Model extensions”**

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska pana mgr. Michała Ryczkowskiego, przygotowana na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem pana prof. dr. hab. Janusza Rośka, dotyczy poszukiwania fizyki poza Modelem Standardowym (BSM) w sposób pośredni, czyli poprzez badanie potencjalnego wpływu nowych cząstek na pomiary w eksperymentach precyzyjnych, a także poprzez analizę ograniczeń teoretycznych, które nakładają na scenariusze BSM warunki spójności danego modelu. Jest to intensywnie rozwijany kierunek badań, rozprawa wpisuje się więc dobrze w główny nurt prac prowadzonych obecnie w fizyce cząstek elementarnych.

Praca opiera się na trzech artykułach naukowych, w których mgr Ryczkowski jest jednym z kilku współautorów i które opublikowano w wiodących czasopismach w dziedzinie fizyki cząstek elementarnych, a także na wynikach, które nie zostały wcześniej upublicznione. Napisana jest po angielsku, liczy 152 strony i składa się z 5 rozdziałów, 10 dodatków oraz bibliografii liczącej 254 pozycje.

Rozdział pierwszy („*Introduction*”) stanowi wprowadzenie do tematyki rozprawy. Autor omawia w nim Model Standardowy (MS) fizyki cząstek elementarnych, dyskutuje powody, dla których nie może być on uznany za fundamentalną teorię natury, a następnie prezentuje dwa podejścia do poszukiwań fizyki BSM. Podejście oddolne (bottom-up) opiera się na założeniu, że efekty BSM mogą być obserwowane eksperymentalnie niezależnie od ostatecznego kształtu teorii fundamentalnej. Efekty tego typu opisuje się zwykle w języku *efektywnej teorii pola* (EFT), którą mgr Ryczkowski pokrótce omawia. Podejście odgórne (top-down) natomiast wychodzi od zdefiniowania fundamentalnych zasad i symetrii w celu skonstruowania modelu BSM, który ma za zadanie odpowiedzieć na konkretne pytania fenomenologiczne. Wstęp kończy podsumowanie zawartości kolejnych sekcji rozprawy. Brakuje mi tutaj wzmianki o publikacjach (lub nieopublikowanych oryginalnych wynikach), na których opierają się poszczególne rozdziały.

Rozdział drugi („*Tool development: SmeftFR v3 - Feynman rules generator for the Standard Model Effective Field Theory*”) zawiera omówienie narzędzia numerycznego SmeftFR v3, którego rozwój jest jednym z najważniejszych osiągnięć mgr. Ryczkowskiego. Celem narzędzia jest zautomatyzowanie obliczeń dla fizycznych procesów i obserwacji w ramach efektywnej teorii pola Modelu Standardowego (SMEFT). Cały rozdział stanowi niejako instrukcję obsługi narzędzia, zawiera też jeden przykład jego zastosowania. To bez wątpienia wartościowy rezultat, nie jest jednak dla mnie do końca jasne, co SmeftFR v3 robi lepiej w porównaniu do innych narzędzi o tym samym zastosowaniu (w szczególności tych wymienionych na stronie 22) i prosiłabym Autora o wyjaśnienie.

W rozdziale trzecim („*Bottom-up approach: Double Higgs production via vector boson fusion at next-to-leading order in SMEFT*”) przedstawiony jest kolejny przykład zastosowania kodu SmeftFR w ramach podejścia oddolnego. Rozważany proces to podwójna produkcja bozonu Higgsa przez fuzję bozonów wektorowych (VBF), który to proces jest bardzo czuły na efekty fizyki BSM. Oryginalnym elementem analizy jest uwzględnienie operatorów wyższego rzędu w EFT: wszystkich operatorów wymiaru 6 i wybranych operatorów wymiaru 8. Głównym wynikiem jest oszacowanie maksymalnego wzmocnienia przekroju czynnego na podwójną produkcję bozonu Higgs w planowanym eksperymencie HI-LHC, z energią w środku masy $\sqrt{s} = 14$ TeV oraz świetlnością 3000 fb^{-1} . Wzmocnienie jest dość słabe w przypadku współczynników Wilsona zależnych od energii (kilka, kilkanaście procent), podczas gdy w przypadku współczynników niezależnych od energii może ono sięgać nawet kilku tysięcy procent, przewyższając sygnał spodziewany w MS o czynnik 10^5 . Dziwi mnie zatem, że w podsumowaniu rozdziału Autor pisze: „*The enhancements were (...) somewhat higher for energy-dependent ones*” oraz „*(...) the signal remained limited, (...) suggesting restricted applicability of VBF double Higgs production for new physics searches.*”

W rozdziale czwartym rozprawy („*Top-down approach: Vector-like fermions, real scalar and Higgs boson phenomenology*”) efekty fizyki BSM analizowane są w ramach podejścia odgórnego. Rozważany model zawiera, poza MS, dodatkowe fermiony wektorowe oraz singletowe pole skalarne. Przestrzeń parametrów modelu jest poddana ograniczeniom teoretycznym wynikającym z wymagania stabilności próżni elektroslabej, perturbacyjności stałych sprzężenia do skali obcięcia ultrafioletowego oraz stabilności rozwinięcia równań grupy renormalizacji w ramach rachunku zaburzeń. Przeanalizowana jest także możliwość unifikacji sprzężeń cechowania MS. Następnie tak ograniczona przestrzeń parametrów została skonfrontowana z przewidywaniami dla podwójnej produkcji bozonu Higgsa, precyzyjnych obserwacji S i T oraz elektroslabego przejścia fazowego pierwszego rodzaju. We wszystkich przypadkach stwierdzono, że wpływ fermionów wektorowych na rozważane procesy jest ograniczony, co jest oryginalnym wynikiem rozprawy.

Piąty i ostatni rozdział dysertacji („*Summary*”) to krótkie podsumowanie zaprezentowanych wcześniej wyników. Dziesięć dodatków zawiera przydatne informacje uzupełniające.

Rozprawa doktorska mgr. Ryczkowskiego porusza temat ciekawy i aktualny, wartość naukowa przedstawionych wyników też nie budzi wątpliwości. Mam natomiast poważne zastrzeżenia co do prezentacji tychże wyników oraz sposobu przygotowania całej rozprawy. Nie mogę oprzeć się wrażeniu, że praca pisana była na chybcika i to wrażenie pośpiechu potęguje się z każdym kolejnym rozdziałem. W konsekwencji dostałam do ręki dzieło napisane niestarannie, pełne literówek i błędów edytorskich (o których za chwilę). Wziąwszy pod uwagę fakt, że dwa główne rozdziały pracy oparte są na opublikowanym materiale i jedynym zadaniem mgr. Ryczkowskiego było napisanie wstępu oraz zebranie całego materiału w logiczną całość, jego podejście do własnej rozprawy doktorskiej sprawia wrażenie nieco niefrasobliwego.

Najbardziej rzucającym się w oczy problemem jest dość przypadkowe użycie angielskich rodzajników. Mimo, że angielski nie jest językiem ojczystym Autora, liczba dostępnych online edytorów korygujących błędy gramatyczne jest tak duża, że trzeba tylko chęci, aby z nich skorzystać. To samo dotyczy licznych literówek, innych błędów gramatycznych (nagminne gubienie litery „s” w liczbie mnogiej rzeczowników i w trzeciej osobie czasu teraźniejszego czasowników) oraz błędów edytorskich, takich jak kierowanie czytelnika to niewłaściwych tabeli, równań czy rysunków (dla przykładu, na stronie 29 Autor przywołuje równania (2.33) i (2.34) zamiast równań (2.32) i (2.33), na stronie 96 Tabelę 4.9 zamiast Tabeli 4.8, a na stronie 98 Tabelę 4.9 zamiast Tabeli 4.10). W wielu równaniach brakuje kropek albo na ich miejscu pojawiają się przecinki. Niektóre zdania urywają się w połowie (np. na stronie 14 czytamy „*anomalies in B-meson semileptonic decays suggesting*”). W kilku miejscach natknęłam się na niezdefiniowane symbole i oznaczenia: C_i w równaniu (1.26), parametry C_1 i C_2 w równaniu (J.1); na stronie 75 pojawia się symbol δ i nie jest jasne, czy jest to parametr zdefiniowany poprzednio w równaniu (3.12), czy też niezależne oznaczenie. Na stronie 14 brakuje cytowania dla anomalii masy bozonu W . W równaniu (1.10) pojawiają się niezdefiniowane sprzężenia cechowania, a tuż pod spodem, bez wyjaśnienia, symbole ładunku i trzeciej składowej izospinu (to samo dotyczy Tabeli 1.1). Przy definicji stałej Fermiego w równaniu (1.24), lewa i prawa strona równania (1.23) nie zgadzają się.

Kolejnym problemem jest niekonsekwentne użycie akronimów. Na przykład Model Standardowy został zdefiniowany już w abstrakcie jako SM, potem ponownie w pierwszym paragrafie wstępu, mimo to Autor używa w wielu miejscach pełnej nazwy. Podobnie, w podsumowaniu rozdziału 4 na stronie 98 pojawia się pełna nazwa „vector-like fermions” wraz z definicją akronimu VLF, mimo że ten sam akronim został zdefiniowany już we wstępie i był używany przez całą rozprawę.

Mam też szereg uwag do poszczególnych fragmentów pracy, które wydają mi się niejasne lub nieścisłe i wymagają wyjaśnień ze strony Autora:

- Na początku podrozdziału 1.2.2 Autor stwierdza, że MS nie jest w stanie wyjaśnić szeregu zjawisk, które mogą wskazywać na fizykę BSM. Po czym wymienia, jako dwa z siedmiu przykładów, problem hierarchii oraz strukturę zapachu w sektorze fermionowym. Jakkolwiek oba zagadnienia uznaje się za problemy MS, mają one charakter teoretyczny i nie są związane z żadnymi obserwowanymi zjawiskami.
- Problem naruszenia symetrii CP w MS wspominany jest po raz pierwszy w podrozdziale 1.2.2. Tymczasem w poprzednim podrozdziale dyskutowana jest macierz CKM, która w MS stanowi jedyne źródło naruszenia tej symetrii, byłoby to więc idealne miejsce na jej przedyskutowanie.
- W rozdziale 2.5 nie jest jasne, jaki jest związek między przekrojem czynnym na proces $pp \rightarrow W^+W^+jj$ (Tabela 2.4) a amplitudą na rozpraszanie bozonów W , równanie (2.41) oraz dyskusja poniżej. Proszę o wyjaśnienie.
- Na stronie 48 oraz w Tabeli 2.4 Autor dyskutuje wpływ poszczególnych współczynników Wilsona, w tym $(C_W)^2$, na przekrój czynny w procesie $pp \rightarrow W^+W^+jj$, podkreślając, że wszystkie obserwowane efekty są konsekwencją równania (2.41). Tymczasem współczynnik C_W , dla którego wkład rzędu $\mathcal{O}(1/\Lambda^4)$ jest największy, nie pojawia się w równaniu (2.41). Ponadto, wkład ten jest rzeczywiście bardzo duży (3.7×10^4 pb wobec 0.12 pb w MS), co jest trochę zaskakujące dla wyrazów rzędu $\mathcal{O}(1/\Lambda^4)$ w rozwinięciu EFT i wymagałoby dodatkowego komentarza.
- Na stronie 53 Autor stwierdza: „*A model independent study of the VBF channel in SMEFT is essential to determine the potential to enhance this process in (...) experiments*”, ale na stronie

57 dodaje: „*Finally, we should stress that the bounds (...) assuming the EFT convergence criterion are not the absolute upper values (...). In specific UV model stronger enhancement may be possible*”. Czy drugie zdanie nie zaprzecza trochę pierwszemu? Idąc tą logiką mogę sobie wyobrazić sytuację, w której analiza SMEFT wykazuje, że efekty BSM są zanedbywalnie małe, podczas gdy w ramach konkretnego modelu okazują się one znacznie silniejsze.

- Na rysunkach 3.3-3.6 pojawia się parametr $\Lambda = 1$ TeV. Jeśli dobrze rozumiem, wielkość ta oznacza skalę odcięcia ultrafioletowego, do której SMEFT pozostaje teorią efektywną. Z drugiej strony, na osi x wszystkich wykresów zmienna Mandelstama $\sqrt{s}$ sięga 2 TeV, czyli jest wyższa niż skala odcięcia. Czy zatem $\Lambda = 1$ TeV to literówka (w tekście na stronie 60 napisano $\Lambda = 10$ TeV)?
- Nie jest jasne, w jaki sposób zostały obliczone wielkości $\Delta\sigma_{D6}$ oraz $\Delta\sigma_{D8}$ w Tabeli 3.3 (nie jestem w stanie odtworzyć ich wartości na podstawie równań zawartych w rozprawie). Ponadto, zwiększenie przekroju czynnego o kilka tysięcy procent wydaje się bardzo dużym efektem jak na operatory rzędu $\mathcal{O}(1/\Lambda^4)$. Z drugiej strony, w podsumowaniu rozdziału 3 Autor stwierdza, że te przekroje czynne są zaledwie „*somewhat higher*”. Proszę o wyjaśnienie.
- W rozdziale 4.5 dyskutowane są różne możliwości eksperymentalnego testowania przestrzeni parametrów modeli z fermionami wektorowymi oraz polem skalarnym. Nie jest jednak wspomniany najbardziej, wydawałoby się, oczywisty sposób ich detekcji, a mianowicie bezpośrednia produkcja w Wielkim Zderzaczu Hadronów. Proszę o komentarz.
- Na stronie 87, w kontekście dyskusji o podwójnej produkcji bozonu Higgsa, pojawia się nagle wzmianka o procesie pojedynczej produkcji tej cząstki, ale na wyjaśnienie, dlaczego jest on istotny, trzeba czekać do strony 89.
- Dlaczego na Rysunku 4.11 masa pola skalarnego jest większa niż 200 GeV? Z czego wynika to ograniczenie?
- W podsumowaniu rozdziału 4 Autor stwierdza: „*Our analysis suggests that the constraints from the stability and perturbativity requirements can be important (...) and should always be checked as a part of realistic phenomenological analyses.*” To akurat nie jest szczególnie odkrywcze. Fizycy byli świadomi znaczenia perturbacyjności stałych sprzężenia od dziesięcioleci i wszystkie dobre analizy fenomenologiczne biorą ją pod uwagę. Podobnie rzecz ma się z komentarzem: „*(...) leading to the conclusion that the strong first order phase transition in the SM with VLF only cannot be realized*”. Scenariusze BSM z przejściem fazowym pierwszego rodzaju analizowane są od kilku dobrych lat i fakt, że wymaga ono rozszerzonego sektora skalarnego, jest już dzisiaj wiedzą podręcznikową.
- W podsumowaniu na stronie 102 Autor pisze o analizie SMEFT procesu produkcji dwóch bozonów Higgsa, przeprowadzonej w rozdziale 3: „*The results indicate rather limited impact of new physics on this process*”. Jeśli tak, to po co analizować ten sam proces w rozdziale 4 w modelach z fermionami wektorowymi?
- W dodatku I przedstawiono uproszczone formuły na parametry S i T . Nie jest jednak wyjaśnione, na czym te uproszczenia polegają. Nie wyjaśniono też roli macierzy $\mathcal{V}$, $\mathcal{U}$ i $\mathcal{D}$.

Podsumowując, rozprawa mgr. Michała Ryczkowskiego pt. „*Indirect searches for the Standard Model extensions*” jest ciekawa i aktualna, chociaż samo jej wykonanie pozostawia wiele do życzenia. Niemniej jednak uważam, że **spełnia ona warunki stawiane pracom doktorskim** przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz. U. z 2024 r.

poz. 1571 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie mgr. Michała Ryczkowskiego do dalszych etapów postępowania doktorskiego.



Kamila Kowalska

