

2019 -08- 12

Prof. dr hab. Marek Zrałek
Instytut Fizyki
Uniwersytetu Śląskiego

Katowice 08.08.2019

Recenzja pracy doktorskiej mgr Pawła Kozówa**pt.****„The W and Z scattering as a probe of physics beyond the Standard Model: Effective Field Theory approach”**

Praca doktorska mgr Pawła Kozówa poświęcona jest badaniu opisu oddziaływań cząstek elementarnych poza Modelem Standardowym (MS). Zgodnie z obecnymi wynikami doświadczeń wszystkich eksperymentów do tej pory wykonanych, Model Standardowy pracuje bardzo dobrze. Niemniej jednak panuje powszechne przekonanie, że jest on tylko modelem efektywnym pracującym dobrze przy obecnie dostępnych energiach i dokładnościach pomiarowych. Jest zbyt dużo pytań na które MS nie odpowiada i problemów, które nie rozwiązuje. Wszystko to pokazuje dlaczego obecna aktywność fizyków zajmujących się oddziaływaniami elementarnymi jest właśnie nakierowana na znalezienie Nowego MS, który to rozwiąże. Wskazuje to, że tematyka recenzowanej pracy doktorskiej jest bardzo ważna i wpisuje się w nurt zainteresowań w wielu najlepszych ośrodkach na świecie.

Recenzowana praca doktorska napisana jest w języku angielskim na ponad 150 stronach, zawiera wstęp, 6 rozdziałów zasadniczych i podsumowanie. Prócz tego szczegóły rachunkowe zostały przedstawione w 3 rozbudowanych uzupełnieniach, a na końcu podany jest spis literatury (138 pozycji). Mgr Paweł Kozów zredagował swoją pracę doktorską w oparciu o cztery artykuły, dwa opublikowane, jeden raport CERN-u oraz jedną pracę, która ukazała się w czerwcu 2019 w arXiv.org. We wszystkich czterech publikacjach mgr Paweł Kozów jest jednym ze współautorów. Trzeba jednak zaznaczyć, że pełna tematyka rozprawy doktorskiej jest w znaczący sposób poszerzona w stosunku do treści zawartych w publikacjach. Może już na wstępie zaznaczyć, że recenzowaną pracę oceniam pozytywnie, a wszelkie uwagi krytyczne zostały zebrane na końcu. Moje uwagi dotyczą głównie niestaranności, niezbyt dogłębnego przeczytania pracy i znalezienia pomyłek. Nie mam natomiast poważniejszych zastrzeżeń merytorycznych do pracy.

W krótkim Wstępie Autor argumentuje dlaczego badanie rozszerzeń MS i sposób w jaki Autor proponuje to robić jest, na obecnym etapie naszej wiedzy, bardzo ważne. Gdybyśmy mieli jakąś eksperymentalną informację o nowych oddziaływaniach lub o nowych cząstkach, badalibyśmy konkretne, zbudowane na tę okoliczność, modele teoretyczne. Jednak, jak do tej pory, takich informacji nie posiadamy. W takich okolicznościach uzasadnione jest badanie tzw. Efektywnych Teorii Pola (ETP), które nie zakładają znajomości konkretnego rozszerzenia MS, badają tylko istnienie takowego. Co więcej, takie badanie obecnych i przyszłych wyników doświadczalnych z LHC i konstruowanych kolejnych eksperymentów, ma szansę pomóc nam w znalezieniu przyszłego modelu poza MS. Jest przypuszczenie, i Autor go podziela, że następcę MS należy szukać w mechanizmie Higgsa spontanicznego złamania symetrii. Na ten zaś mechanizm bardzo czułe jest oddziaływanie bozonów cechowania, stąd chociaż to nie łatwe, właśnie rozpraszanie bozonów W i Z poza powłoką masy, jest tematyką publikacji i recenzowanej rozprawy doktorskiej. We Wstępie

podana jest też struktura pracy i związek poruszanej tematyki z opublikowanymi artykułami. Niestety jest to jedyne miejsce, gdzie można znaleźć związek treści pracy doktorskiej z publikacjami, w których mgr Kozów jest współautorem. W dalszych rozdziałach, które w dużej mierze bazują na publikacjach, takich odnośników brakuje.

W Rozdziale 2, Autor w dużym skrócie opisuje teoretyczne podstawy Modelu Standardowego. Najpierw podaje ogólne zasady na których MS jest skonstruowany, a więc zasadę niezmienniczości cechowania, lokalną i globalną. Potem opisuje ideę spontanicznego złamania symetrii. W kolejnym podrozdziale dokładniej opisuje strukturę MS i jego eksperymentalną weryfikację. Wszystkie istotne własności MS zostały przedstawione. Jedyną rzeczą, którą warto byłoby zmodyfikować to nie uznawać za mankament MS bezmasowości neutrin. Istotnie w momencie postawiania MS taka była potrzeba doświadczalna, nikt wtedy nie obserwował oscylacji neutrin. MS powstał bez prawoskrętnych, chiralnych stanów neutrin i w naturalny sposób miały one zerową masę. Problem przy obecnym stanie wiedzy to nie bezmasowość tych najlżejszych obiektów, ale ich natura (czy są to cząstki Diraca czy Majorany) oraz pytanie dlaczego ich masy są tak wiele rzędów wielkości mniejsze niż masy leptonów naładowanych.

Krótki Rozdział 3 przedstawia powody dlaczego poszukujemy uogólnienia MS. Wymienia wszystkie istotne mankamenty MS, gdzie na pierwszym miejscu jest znowu problem masy neutrin. Wszystkie pozostałe przytaczane powody są rzeczywiście bardzo istotne. Dalej Autor jeszcze raz w większych detalach podaje argumenty dlaczego rozpraszanie bozonów wektorowych uznaje w chwili obecnej za najlepszy sposób poszukiwania fizyki poza MS. Przedstawia też sposób jak z danych doświadczalnych z LHC, w więc rozpraszania proton-proton wydedukować oddziaływanie dwóch naładowanych bozonów W^+W^+ .

Rozdział 4 poświęcony jest w całości interesującej kwestii ograniczeń dla amplitud rozpraszania cząstek wynikających z unitarności pełnej macierzy opisującej ich oddziaływanie. W dalszym ciągu Autor będzie wykorzystywał znalezione tu ograniczenia do poszukiwania, w reakcjach oddziaływań bozonów cechowania, odstępstw od MS. Jedyne co mi przeszkadza w tym rozdziale to zbyt dosłowne wykorzystanie opisu podobnej tematyki w niepublikowanej pracy z Uniwersytetu Warszawskiego [77].

Kolejna część pracy (Rozdział 5) poświęcony jest opisowi elastycznego zderzenia dwóch bozonów cechowania w ramach MS. Autorowi głównie chodzi o problem unitarności amplitud i ich zachowanie ze wzrostem energii. W MS wkłady do amplitud, pochodzące od różnych diagramów Feynmana, nie muszą mieć właściwego wysokoenergetycznego zachowania, jednak symetrie modelu, sposób ich złamania i fakt, że model jest renormalizowalny powoduje, że suma wszystkich wkładów, w każdym rzędzie rachunku zaburzeń, zachowuje się właściwie. Problem powstaje w efektywnych teoriach pola, gdzie dodaje się wkłady nierenormalizowalne i bada się ich rolę w sposób wybiórczy. Zwrócenie więc uwagi na unitarność amplitud ma bardzo istotne znaczenie.

Dwa kolejne rozdziały to zasadnicza część pracy. W rozdziale 6 Autor przedstawia Efektywną Teorię Pola (ETP). Najpierw na przykładzie Modelu Fermiego poglądowo opisuje samą ETP. Następnie opisuje dwie różne wersje efektywnych teorii. W pierwszej mamy dokładnie te same pola co w MS tylko ich sprzężenia są różne. Cząstka Higgsa występuje dokładnie tak jak w SM, jest dubletem grupy $SU(2)$. Ten typ teorii efektywnej nosi nazwę SMEFT (Standard Model Effective Field Theory). Ze względu na to, że spontaniczne złamanie symetrii może być zrealizowane w inny sposób niż w MS, i mamy poza tym możliwość obejść problem hierarchii, także inna konstrukcja

sektora Higgsa jest brana pod uwagę. Taki właśnie drugi model, nazywany HEFT (Higgs Effective Field Theory), jest także rozpatrywany w recenzowanej pracy.

Rozdział 7 poświęcony jest numerycznemu testowaniu przedstawionych modeli dla rozpraszania dwóch naładowanych bozonów, $W^+W^+ \rightarrow W^+W^+$. Autor definiuje w obydwu modelach operatory poza MS, a następnie stara się znaleźć ich ewentualną rolę w opisie danych doświadczalnych z LHC, za każdym razem biorąc pod uwagę ograniczenia wynikające z unitarności. Ze względu na to, że MS dobrze się zgadza z danymi doświadczalnymi efekt ewentualnej Nowej Fizyki nie jest duży, niemniej jednak dalsze badania prowadzone w sposób prezentowany w pracy doktorskiej, szczególnie przy zwiększonej energii i dokładności, roszą duże nadzieje na poznanie oddziaływań poza MS.

Ostatni Rozdział przedstawia podsumowanie całej pracy. Interesujące są, umieszczone na końcu rozdziału trzy sugestie Autora, w jakim kierunku powinny pójść dalsze badania dotyczące poszukiwania fizyki poza MS.

Recenzowana rozprawa doktorska dokumentuje duży nakład pracy Autora. Przedstawiona analiza wymagała dobrej znajomości Modelu Standardowego, Efektywnych Teorii Pola a także niezbędnej wiedzy z informatyki i metod numerycznych.

Z mankamentów jakie dostrzegam to brak systematycznego cytowania skąd Autor czerpał różne informacje, z jakich źródeł pochodzą formuły teoretyczne. W wielu miejscach brak jest wyczerpującego opisu przedstawionych faktów. Brakuje też wyraźnego wskazania, które fragmenty pracy są powieleniem informacji z opublikowanych artykułów ze współautorstwem mgra P. Kozówa. Mam poza tym wrażenie, że Autor nie dość wnikliwie przeczytał pracę po jej napisaniu. W wielu miejscach pojawiają się błędy drukarskie i zwykłe pomyłki. Podaje tylko kilka takich sytuacji:

- we wzorze (2.8) w części środkowej brakuje członu z masą fermionu,
- na str. 9 w pierwszej linii ma być: electron – photon,
- we wzorze (2.13) pewnie Autor chce mieć N cząstek z różnymi masami, więc macierz $\mathbf{m}$ jest macierzą skalarną a nie macierzą proporcjonalną do macierzy jednostkowej,
- na str. 13 na początku części B - co oznacza zapis $(i = 1,2,3)^T$?
- we wzorze (2.62) zamiast U_D ma być D_R ,
- we wzorze (2.84) brakuje znaku „=”,
- na str. 24 w drugiej linii po wzorze (2.111) ma być e^-e^+ ,
- we wzorze (2.113) brakuje nawiasu,
- we wzorze (4.3) ma być $(2\pi)^4$,
- we wzorze (4.11) druga funkcja Wignera ma być bez zespolonego sprzężenia,
- wzory (6.5), (6.6) oraz (6.8) są niepoprawne,
- Lagrangiany podane we wzorach (6.17) i (6.19) różnią się pomiędzy sobą.

Wszystkie te uwagi utrudniają czytanie pracy, ale nie mają fundamentalnego znaczenia. Pracę oceniam jako **bardzo dobrą** i wnoszę o dopuszczenie mgra Pawła Kozówa do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Marek Zrałek

