

2017 -07- 05

Katowice, 26. 06. 2017

Prof. dr hab. Marek Zrałek
Instytut Fizyki
Uniwersytetu Śląskiego

Recenzja pracy doktorskiej

„Extension of the Standard Model with a Doublet and a Complex Singlet”

mgr Neda Darvishi

Praca doktorska poświęcona jest badaniu rozszerzeń Modelu Standardowego (MS). Na obecnym etapie rozwoju teorii oddziaływań fundamentalnych takie badanie jest rzeczą naturalną, a nawet konieczną. Wskazuje na to niemożliwość wyjaśnienia w ramach MS kilku podstawowych kwestii teoretycznych, gdzie tradycyjnie wymienia się tzw. problem hierarchii, zbyt słabe łamanie symetrii CP konieczne do wyjaśnienia dominacji materii nad antymaterią we Wszechświecie, czy też brak wyjaśnienia problemu ciemnej materii. Próba powiększenia MS w taki sposób, aby udzielić odpowiedzi na część wspomnianych pytań jest treścią recenzowanego doktoratu. Jest to więc tematyka ważna i będąca w sferze zainteresowań obecnych badań fizyki cząstek elementarnych zarówno teoretycznej jak i doświadczalnej.

Rozszerzenia MS, które mgr Neda Darvishi rozpatruje w swojej pracy doktorskiej, dotyczą głównie sektora cząstek Higgsa. Zostaje on powiększony o jeden naładowany singlet, jeden dodatkowy dublet lub też dodatkowy dublet i singlet. Dla silniejszego złamania symetrii CP dodatkowo jeszcze Autorka wprowadza jeden tzw. wektorowy ciężki kwark.

Recenzowana praca doktorska napisana jest w języku angielskim na ponad 140 stronach. Zawiera wstęp, 4 rozdziały zasadnicze i podsumowanie. Prócz tego szczegółły rachunkowe zostały przedstawione w 6 uzupełnieniach, a na końcu podany bogaty spis literatury (220 pozycji). Warto już na wstępie wspomnieć, iż mgr Neda Darvishi jest autorką 3 prac (w tym jednej samodzielnej) opublikowanych w dobrych międzynarodowych czasopismach, 2 prac umieszczonych w *arXiv*, a dwie kolejne, wykorzystane w pracy, nie są do tej pory opublikowane. Nie wiem tylko dlaczego prace te, umieszczone w pozycjach od [1] do [7] w spisie literatury, później obszernie wykorzystywane, pojawiają się nawet dosłownie przepisane duże ich fragmenty, są raz zacytowane w podrozdziale (1.5) opisującym zawartość pracy. W kolejnych rozdziałach od (2) do (5) opartych na pracach autorstwa lub współautorstwa mgr Nedy Darvishi, w których treść w dużych fragmentach jest dosłownie z publikacji przepisana, Autorka nie cytuje już oryginałów. Mam tylko nadzieję, że w pracach współautorskich wkład doktorantki był dominujący. Poza tym prace w wykazie literatury nie są cytowane chronologicznie, zgodnie z rosnącą numeracją. Na początku przedstawiony jest wykaz używanych skrótów. Nie jest on niestety kompletny. W

pracy pojawia się mnóstwo nowych niewymienionych akronimów, co utrudnia czytanie całości.

Rozdział 1 jest wstępem do tematyki pracy. Na początku Autorka bardzo krótko przedstawia Model Standardowy (1.1). Następnie skupia się na jego obecnych kłopotach, opisuje jakie ma MS problemy, aby spełnić warunki Sacharowa konieczne dla pierwotnej bariogenezy (1.2) oraz (1.3). Dalej przedstawia problem ciemnej materii (1.4), a na końcu krótko została streszczona cała praca (1.5). Rozdział ten nie jest oparty na pracach Autorki, bazuje na cytowanej literaturze. Nie jest on niestety napisany precyzyjnie. Pojawia się dużo skrótów myślowych, niezdefiniowanych symboli i zwykłych pomyłek. I tak:

- we wzorze (1.4) parametr λ jest ujemny (lepiej wprowadzić $-\lambda$) i wtedy masa cząstki Higgsa jest równa $m_H = v\sqrt{-2\lambda}$ a więc różna niż podana przez Autorkę we wzorze (1.6)
- we wzorze (1.12) brakuje członu masowego neutrin,
- we wzorach (1.20) oraz (1.21) indeksy „i” oraz „j” są przestawione,
- prąd (1.52) i liczba (1.53) Cherna - Simonsa we wzorze są niepoprawnie określone,
- definicje niezmiennika Jarlskog we wzorach (1.27) i (1.60) nie pokrywają się.

Rozdział 2 bazuje głównie na publikacji [2] oraz [3]. Opisuje rozszerzenie MS o jedną dodatkową naładowaną cząstkę Higgsa [2] i wprowadza też kwark wektorowy [3]. Najpierw przedstawia teorie z różnymi sposobami łamania symetrii CP (podrozdział 2.1), następnie prezentuje wyniki pracy [2] (podrozdziały 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 są praktycznie dokładną kopią pracy) oraz pracy [3] (podrozdziały 2.7 i 2.8). Nie mam zastrzeżeń do fizycznego znaczenia tego rozdziału z wyjątkiem kilku drobnych uwag dotyczących prezentacji. Przykładowo parametr λ (tak jest oznaczany w publikacji) występuje teraz jako λ oraz λ_1 . Warto poza tym byłoby wspomnieć, że macierz masowa M_{mix} we wzorze (2.18) jest rzeczywista i symetryczna, bo tylko w takim wypadku jest diagonalizowana transformacją podobieństwa,

$$R^T M_{mix} R = (M_{mix})_{diag}.$$

Rozdział 3 to kopia pracy [4]. Model opisany w poprzednim rozdziale przewiduje istnienie trzech cząstek Higgsa h_i ($i = 1, 2, 3$) a tylko jedna z nich o masie $M_H = 125.09 \pm 0.24 \text{ GeV}/c^2$ jest obserwowana $h_1 = H$. Masa najlżejszej cząstki Higgsa i brak obserwacji dwóch dalszych cząstek skalarnych narzuca ograniczenia na parametry modelu. Autorka pokazuje, że w rozważanym modelu można takie parametry dobrać, aby być w zgodzie z obecnymi wynikami doświadczalnymi z LHC dwóch kolaboracji CMS i ATLAS. Rozdział uważam za bardzo wartościowy.

Kolejny rozdział 4 uogólnia dotąd rozważany model dla sektora skalarnego i wprowadza dodatkowy dublet cząstek Higgsa. Autorka praktycznie powiela opublikowaną w 2016 roku pracę [5]. Model rozważany w tym rozdziale jest bardziej skomplikowany od analizowanego do tej pory. Przewiduje istnienie 5 neutralnych

cząstek skalarnych i jedną bezspinową cząstkę naładowaną. Autorka rozpatruje tzw. wersję „inert” co oznacza, że drugi dublet cząstek Higgsa nie łamie próżni spontanicznie, dodatkowo także wprowadza specjalnie określoną symetrię Z_2 . To wszystko upraszcza fenomenologiczne porównanie z doświadczeniem. Rozdział zajmuje się taką fenomenologią i w oparciu o dawne dane z LEP-u oraz nowe z LHC ogranicza parametry modelu. Poza tym model aspiruje do przewidywania cząstek ciemnej materii, na które także istnieją ograniczenia astrofizyczne. Te także Autorka bierze pod uwagę. W konsekwencji model przewiduje, akceptowane przez obecne ograniczenia doświadczalne, cząstki ciemnej materii w trzech zakresach mas, małych, średnich i dużych. Podobnie jak poprzednio nie mam uwag merytorycznych, bez wątpienia jest to wartościowa analiza. Jak zwykle jednak mam uwagi do sposobu prezentacji. I tak:

- na stronie 70 pracy pojawiają się parametry $\rho_{2,3}$ oraz $\rho_{3,4}$ zdefiniowane później, na stronie 72,
- pochodna drugiego rzędu (wzór (4.17) jest niepoprawnie przedstawiona, powinno się stosować konwencję : $\frac{\partial^2 V}{\partial \phi_i \partial \phi_j}$.

Rozdział 5 zajmuje się popularnym modelem, w którym sektor cząstek Higgsa zawiera jedynie dwa dublety (2HDM) i, według informacji Autorki, bazuje na pracy [7]. Trudno to zweryfikować, bo praca ta nie jest dostępna. Dyskutowany jest tutaj tzw. problem hierarchii, który występuje w MS, a więc nienaturalnego kasowania się rozbieżności pomiędzy wkładami drzewowym do masy cząstki Higgsa a poprawkami radiacyjnymi. Autorka bada czy w modelu 2HDM można uniknąć problemu hierarchii. Po przedstawieniu modelu, zbadano kasowanie się rozbieżności kwadratowych analitycznie i numerycznie. Pokazano, że istnieje zgodny z obecnymi ograniczeniami doświadczalnymi obszar mas cząstek Higgsa i innych parametrów modelu, w którym rozbieżności kwadratowe kasują się w naturalny sposób. Analiza tu przedstawiona jest wartościowa i w miarę dobrze zaprezentowana.

Krótki rozdział 6 podsumowuje otrzymane wyniki. Rozdział 7 to zbiór 6 uzupełnień to pracy.

Recenzowana rozprawa doktorska dokumentuje pokaźny nakład pracy Autorki. Wymagała sporych umiejętności w posługiwaniu się różnymi komputerowymi programami do analiz numerycznych. Oprócz tego mgr Neda Darvishi udowodniła, że w dobrym zakresie poznała fizykę Modelu Standardowego i jego popularne uogólnienia powiększające sektor bozonów Higgsa.

Pracę oceniam jako bardzo dobrą i wnoszę o dopuszczenie mgr Nedy Darvishi do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Marek Zralek

