

Prof. dr hab. Marek Zrałek  
Instytut Fizyki  
Uniwersytetu Śląskiego

Katowice, 5. 10. 2015

Dziekanat Wydziału Fizyki UW  
Seksja ds. pracowniczych  
Wpłynęło dn. 13. 10. 2015  
podpis .....

**Recenzja pracy doktorskiej mgr Mateusza Kamila Iskrzyńskiego**  
**pt.**  
**“Yukawa matrix unification in the Minimal Supersymmetric Standard Model”**

Praca doktorska mgr Mateusza Iskrzyńskiego poświęcona jest znalezieniu relacji pomiędzy elementami macierzy Yukawy dla kwarków dolnych i naładowanych leptonów w ramach Minimalnego Supersymetrycznego Modelu Standardowego (MSSM). Badana jest zgodność tych relacji z istniejącymi wynikami doświadczalnymi, w tym ostatnio trzymanymi w eksperymentach LHC. Mgr Mateusz Iskrzyński jest autorem i współautorem 4 opublikowanych prac (dwie monoautorskie, jedna w materiałach konferencyjnych). Dwie z tych prac są ściśle powiązane z tematyką doktoratu.

Zagadnienia poruszane w pracy są obecnie ważną częścią teoretycznej fizyki cząstek elementarnych. Wiele faktów wskazuje na konieczność rozszerzenia Modelu Standardowego (MS). Najpopularniejszym sposobem poszukiwania rozszerzeń MS są tzw. teorie Wielkiej Unifikacji (WU), które, jak się wydaje, rozwiążą kilka kluczowych kwestii oddziaływań fundamentalnych, a przede wszystkim istnienia kilku rodzajów oddziaływań (słabe, elektromagnetyczne, silne a docelowo także grawitacyjne) oraz istnienia wielu rodzajów pól materii (kwarki z kolorem i leptoni). Teorie WU zakładają, iż przy wielkich energiach istnieje jedno oddziaływanie z jedną stałą sprzężenia. Wtedy zakładając, iż w obszarze energii od obecnie testowanych  $O(\text{TeV})$ , gdzie świetnie zgadza się MS, aż do energii WU nie ma dodatkowych oddziaływań, a jedyna korespondencja pomiędzy tymi obszarami to wirtualne poprawki i równania tzw. grupy renormalizacyjnej, wystąpią przynajmniej dwa problemy. Pierwszy to problem unifikacji stałych sprzężenia trzech oddziaływań - równania grupy renormalizacyjnej nie przewidują zbiegania się tych stałych przy jednej energii. Drugi, to tzw. problem hierarchii – znana i już dość dobrze zmierzona masa cząstki Higgsa powstaje przez odjęcie dwóch wielkości o wymiarze masy określonych w skali WU. Najczęściej przytaczanym rozwiązaniem jest wprowadzenie supersymetrii. Mgr Mateusz Iskrzyński w swojej pracy doktorskiej zajmuje się takim właśnie scenariuszem. Autor bada w szczególności czy we wspomnianym scenariuszu można zunifikować macierze Yukawy tak, aby przy obecnie dostępnych energiach otrzymać zgodne z eksperymentem relacje pomiędzy stałymi sprzężenia Yukawy dla kwarków dolnych i naładowanych leptonów.

Praca napisana jest w języku angielskim na 100 stronach. Zawiera wprowadzający opis, rozdział wstępny, sześć rozdziałów roboczych, podsumowanie, bardzo użyteczne wyjaśnienie używanych w pracy skrótów oraz bogaty spis literatury. Jak już wspomniałem, część podstawowa pracy oparta jest na dwóch publikacjach (w European Physical Journal C (monoautorska) oraz w Journal of High Energy Physics).

Rozdział 1 przedstawia ogólne wprowadzenia do tzw. teorii efektywnych. W rozpatrywanym przypadku MS jest efektywną teorią Minimalnego Supersymetrycznego Modelu Standardowego (MSSM) właściwą przy skali  $\mu_{sp}$ , który z kolei jest efektywną teorią Superymetrycznej Teorii Wielkiej Unifikacji (SUSY GUT) obowiązującej przy energiach powyżej  $M_{GUT}$  (w pracy jest to model oparty o grupę symetrii SU(5)). Uważam, że ta część pracy, nie ujęta bezpośrednio w publikacjach, jest bardzo dobrze napisana i wskazuje, iż Autor dobrze poznał teorie, którymi się zajmuje. Jedyne uchybienia, które dla porządku wskazuję to: niepotrzebne charakteryzowanie supersymetrycznych cząstek cechowania (*gauginos*) wskaźnikiem Minkowskiego ( $\mu$ ) (koniec str. 28 i początek str. 29) oraz konflikt pomiędzy wprowadzonymi w Tabeli 2.1 dubletami Higgsa a ich wartościami próżniowymi we wzorze (1.39).

W Rozdziale 2 przedstawiono dwa scenariusze, w których będzie dyskutowana unifikacja członów Yukawy. Wszystkie rozważania są robione w specjalnej bazie zapachowej, w której macierze Yukawy dla kwarków d oraz naładowanych leptonów są diagonalne. W takiej bazie, w przyjętym modelu w skali unifikacji macierze Yukawy dla kwarków d oraz leptonów naładowanych, są diagonalne i mają identyczne elementy na przekątnej. Autor bada sytuację, gdy porawki do tych diagonalnych elementów pochodzą od członów łamiących supersymetrię w skali  $\mu_{sp}$ . Najpierw bada model, w którym człon łamiący supersymetrię nie zmienia zapachu a następnie dwa modele w których zachowanie zapachu jest złamane. W jednym z tych modeli zakłada się, że tylko jeden parametr łamiący symetrię pomiędzy drugą i trzecią generacją jest niezerowy (model GFV<sub>23</sub>), w drugim modelu dopuszcza się złamaniem zapachu pomiędzy wszystkimi generacjami (model GFV<sub>123</sub>). Nie mam uwag krytycznych do tej części. Błędny w tym rozdziale wzór (2.14) został zmieniony w przesłanej w ostatnich dniach do sieci poprawionej pracy.

Rozdział 3 przedstawia różne wyniki doświadczalne, które w istotny sposób ograniczają parametry MSSM i są wykorzystane w analizie przeprowadzonej w pracy. Są to więc różne wyniki pokazujące jak duże mogą być neutralne prądy zmieniające zapach (FCNC), ograniczenia na procesy łamiące zachowanie rodzinnej liczby leptonowej, wyniki z eksperymentu ATLAS i CMS określające masę cząstki Higgsa, bezpośrednie ograniczenia na masy cząstek supersymetrycznych, ograniczenia wynikające z żądania stabilności próżni i na końcu ograniczenia wynikające z własności ciemnej materii.

Krótki Rozdział 4 przedstawia jakie dostępne programy numeryczne były wykorzystane przez Autora do analiz dwóch scenariuszy badania unifikacji macierzy Yukawy przeprowadzonych w pracy.

Kolejne trzy rozdziały 5, 6 oraz 7 przedstawiają główne rezultaty analiz numerycznych wykonanych w pracy, bazujące na wynikach dwóch wspomnianych publikacji. W Rozdziale 5 pokazano, iż biorąc pod uwagę wszystkie ograniczenia można dobrać przestrzeń parametrów MSSM tak aby unifikacja macierzy Yukawy przy energii  $M_{GUT}$  dała akceptowalne stałe sprzężenia Yukawy przy obecnie dostępnych energiach. Cena jaką trzeba zapłacić to niestabilność standardowej próżni. W kolejnym Rozdziale 6 podobna analiza jest zrobiona przy założeniu, że macierz masowa sfermionów ma niezerowy jeden element pomiędzy drugą i trzecią generacją. Tutaj także otrzymano zadowalającą zgodność z danymi

eksperymentalnymi, a poza tym standardowa próżnia pozostawała stabilna. Podobna analiza została przeprowadzona w Rozdziale 7, ale tym razem założono pełną niediagonalność masowej macierzy sfermionów. W takiej sytuacji trudno było otrzymać zgodności z bardzo silnym eksperymentalnym ograniczeniem na zachowanie rodzinnej liczby leptonowej.

Rozdział 8 przedstawia konkluzje pracy i dyskutuje dalsze perspektywy badania unifikacji oddziaływań łącznie z sytuacją nie ignorowania faktu, że neutrina posiadają masę, chociaż jest ona o wiele rzędów wielkości mniejsza, niż masy kwarków i naładowanych leptonów.

Bardzo fachowy jest spis publikacji. Autor zawsze podawał właściwe cytowania i wybierał najważniejsze z danej tematyki. Jedynie prace [16] oraz [17] nie są przedstawione w sposób satysfakcjonujący.

Zachęcałbym Autora, aby w dalszych badaniach powrócił do pełnej unifikacji stałych sprzężenia wszystkich fermionów a więc także neutrin. Poza tym z unifikacją macierzy Yukawy wiąże się także ciągle nierozwiązany problem mas fermionów i warto byłoby sprawdzić czy tu nie można znaleźć jakichkolwiek relacji pomiędzy nimi.

Całą pracę doktorską mgra Mateusza Iskrzyńskiego **oceniam jako bardzo dobrą**. Przetawiał w niej wartościowe analizy modelu SU(5) SUSY GUT. Wykazał, iż dobrze poznał Model Standardowy, jego interpretacyjne kłopoty oraz najważniejsze próby jego uogólnienia.

Wnoszę o dopuszczenie mgra Mariusza Kamila Iskrzyńskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Marek Zrałek