

Recenzja pracy doktorskiej magistra Mateusza Iskrzyńskiego

p.t. "Yukawa matrix unification in the Minimal Supersymmetric Standard Model"

Praca doktorska magistra Mateusza Iskrzyńskiego jest krokiem w kierunku odpowiedzi na pytanie: Czy w ramach teorii supersymetrycznej rozumianej jako niskoenergetyczna efektywna teoria wynikająca z teorii wielkich unifikacji (z ang. GUT) możliwa jest unifikacja macierzy stałych Yukawy kwarków dolnych i leptonów? Jest to temat, który pozostaje nadal aktualny gdyż ciągle dyskutowane są w literaturze różne możliwe scenariusze, stawiające sobie za cel wyjaśnienie znanych z doświadczenia wartości mas i kątów mieszania dla sektorów kwarków i leptonów.

W celu uzyskania odpowiedzi na powyższe pytanie w pracy rozważany jest minimalny supersymetryczny model standardowy (z ang. MSSM), wraz z przyjęciem dodatkowej parzystości R , jako teoria efektywna przy założeniu, że powyżej skali GUT obowiązuje symetria opisana grupą z cechowaniem $SU(5)$. Przy założeniu, że poprawki pochodzące ze skali GUT są niewielkie, poszukiwane są takie wartości parametrów MSSM, dla których osiągalna jest pełna unifikacja macierzy Yukawy dla kwarków dolnych i leptonów i które pozostają w zgodzie z obecnymi danymi doświadczalnymi. Rozważane są dwa interesujące przypadki, lub „scenariusze”. W pierwszym scenariuszu założone jest, że człony miękkie nie są uniwersalne, ale są diagonalne w przestrzeni zapachu w bazie super-CKM. W drugim scenariuszu założone jest natomiast, że człony miękkie mają niezerowe elementy pozadiagonalne w macierzach mas, oraz że diagonalne człony macierzy A są proporcjonalne do odpowiednich stałych Yukawy. Rozważane są tu dwa podprzypadki. W pierwszym z nich, zwanym GFV_{23} , założona jest unifikacja jedynie dla sprzężeń Yukawy dla kwarku b i leptonu τ oraz dla kwarku s i mionu. Z kolei w tzw. przypadku GFV_{123} , podobnie jak w pierwszym scenariuszu, rozważana jest pełna unifikacja dla wszystkich trzech rodzin kwarków dolnych i leptonów naładowanych.

W każdym z rozważanych przypadków uzyskana przez doktoranta odpowiedź na pytanie postawione w pracy jest w zasadzie pozytywna, tzn. znalezione są znaczne teoretycznie akceptowalne obszary parametrów MSSM, dla których, przy dodatkowych założeniach i uproszczeniach podanych w pracy, badana unifikacja jest osiągalna. W analizie rozważane są wszystkie potencjalnie ważne ograniczenia na wkłady supersymetryczne z danych doświadczalnych dla procesów dotyczących zapachu z klasy generowanej przez tzw. neutralne prądy zmieniające zapach (tzw. FCNC od angielskiej nazwy) kwarków i leptonów (z ang. LFV) oraz procesów elektroślabych. Wzięte są także po uwagę dane z LHC dotyczące bozonu Higgsa i ograniczeń dolnych na masy superpartnerów, gęstości reliktovej i ograniczeń na przekrój czynny na rozpraszanie w bezpośrednim poszukiwaniu ciemnej materii, a także, jak się okazuje, ważna kwestia stabilności próżni.

Znalezione numerycznie rozwiązania są interesujące same w sobie. Niemniej jednak dostarczone są dodatkowe informacje, które ukazują je w szerszym kontekście. W pierwszym scenariuszu, rozważanym w publikacji [3], pokazane jest, że dla wszystkich znalezionych wartości parametrów MSSM minimum potencjału skalarnego nie jest minimum globalnym, czyli że próżnia dla nich jest niestabilna, chociaż nadal akceptowalna jako wystarczająco długożyciowa. Problem niestabilnej próżni nie występuje w przypadku GFV_{23} ale powraca w przypadku GFV_{123} , a dodatkowo złamane są dla niego silne

ograniczenia z danych dotyczących procesów naruszających zapach w sektorze leptonowym. Jest tak dlatego, że w ogólnym przypadku GFV_{123} elementy niediagonalne w członach miękkich indukują człony mieszania pomiędzy sfermionami, co typowo produkuje zbyt duże wkłady do procesów LFV. Oba te przypadki drugiego scenariusza rozważane są w publikacji [4].

Rozprawa dostarcza więc szeregu informacji na ciągle aktualny temat zrozumienia własności kwarków i leptonów, w szczególności zaś wyjaśnienia ich w kontekście MSSM i wielkich unifikacji. Dodatkową zaletą prezentowanych wyników jest to, że uwzględniają one dane z pierwszej fazy pracy LHC, w szczególności dane dotyczące bozonu Higgsa i ograniczeń na supersymetrię. W tym sensie praca doktorska mgr Iskrzyńskiego i publikacje, na których jest oparta stanowią nowy i niewątpliwie znaczący wkład do dziedziny.

Praca napisana jest po angielsku i liczy w sumie 100 stron. Składa się z ośmiu rozdziałów i bibliografii. Rozdział 1 stanowi zwięzłe wprowadzenie do głównych koncepcji wykorzystywanych w pracy. Rozpoczyna go dyskusja teorii efektywnych i podstawowych, równań grupy renormalizacyjnej i poprawek progowych, a następnie wprowadzone zostają kolejno: Model Standardowy, teorie wielkich unifikacji, supersymetrie i Minimalny Supersymetryczny Model Standardowy.

W rozdziale 2 przedstawione są dwa główne scenariusze rozważane w pracy. Dla obu przedstawiona jest dyskusja głównych wkładów od członów miękkich do poprawek oraz założenia i uproszczenia. W podrozdziale 2.3 dla obu scenariuszy dyskutowane są poprawki progowe to stałych Yukawy pochodzące od diagonalnych elementów członów miękkich i dość dogłębnie analizowane są dominujące wkłady. W podrozdziale 2.4 dyskutowane są dodatkowe poprawki od członów miękkich, które są niediagonalne w przestrzeni zapachu. Jest to zilustrowane na uproszczonym przypadku wkładów do energii własnej kwarków typu d, chociaż analiza numeryczna zawiera pełne wkłady w scenariuszu GFV.

Następnie w rozdziale 3 przedstawione są główne obserwable oraz dyskutowane są ograniczenia na rozpatrywane przypadki z odnośnych danych doświadczalnych. Najważniejsze ograniczenia pochodzą z FCNC i procesów dotyczących naruszania zapachu: mieszania kaonów i mezonów B, oraz rozpadów tych ostatnich, oraz z LFV. Dodatkowe ograniczenia na człony miękkie wynikają też z własności bozonu Higgsa oraz poszukiwań supersymetrii w LHC, a także z badań ciemnej materii i założenia stabilności próżni.

W krótkim rozdziale 4 dość zwięzłe opisane są narzędzia numeryczne użyte w rozprawie. W zasadzie doktorant oparł się na kilku popularnych, publicznie dostępnych i dobrze przetestowanych pakietach. Do wygenerowania spektrum mas i sprzężeń w MSSM dla pierwszego scenariusza użyty został pakiet SOFTSUSY 3.3.8, który został uzupełniony przez doktoranta o poprawki progowe do sprzężeń Yukawy dla pierwszej i drugiej rodziny, zaś dla drugiego scenariusza użyto pakietu SPheno v3.3.3, i sprawdzono jego wyniki przez porównanie ich z wynikami z SOFTSUSY 3.3.8. Do pozostałych obliczeń użyte zostały kody SUSY_FLAVOR v2.10 (obserwable dotyczące zapachu) oraz pakiet BayesFITS, który zawiera kilka innych znanych pakietów, jak podano w pracy, do skanowania przestrzeni parametrów MSSM. Dane doświadczalne do skanów zostały wzięte z Particle Data Book.

Rozdziały 5-7 są poświęcone przedstawieniu głównych wyników autora. W rozdziale 5 pokazane są wyniki skanów dla pierwszego scenariusza, które zostały opublikowane w pracy [3]. Pokazane są uaktualnione wyniki, gdyż od czasu publikacji niektóre dane się nieco zmieniły, ale nie zmienia to ogólnych wniosków. Te zaś są takie, że w scenariuszu z diagonalnymi elementami 3-liniowych członów A pełna unifikacja stałych Yukawy jest możliwa nawet dla wszystkich trzech rodzin, choć łatwiej jest ją osiągnąć dla tylko dla mniejszej liczby z nich (jedynie b-tau, lub b-tau i s-mu). Autor słusznie zauważa, że jest to znacznie trudniejsze do osiągnięcia dla dużych wartości $\tan(\beta)$, gdyż wtedy trudniej jest wygenerować odpowiednio duże poprawki do stałych Yukawy w przypadku dużych członów macierzy A. Następnie przedstawione jest oszacowanie, że dla wszystkich znalezionych rozwiązań pierwszego scenariusza próżnia nie jest globalna i jest wobec tego niestabilna. Te oszacowania są oparte na warunkach uzyskanych w dość starych analizach ale są one tak bardzo przekroczone, że wyciągnięte wnioski wydają się wiarygodne.

Podobnie w rozdziałach 6 i 7 przedstawione są wyniki dla, odpowiednio, przypadków GFV_{23} i GFV_{123} dla drugiego scenariusza. W dodatku do podsumowanych powyżej głównych rezultatów, w rozdziale 6 zawarta jest też dyskusja możliwości częściowego testowania znalezionych obszarów parametrów w LHC. W ostatnim rozdziale 8 uzyskane wyniki są zwięźle podsumowane, a na zakończenie przedstawiona jest i krótko omówiona lista dodatkowych pytań i zagadnień, które nie zostały poruszone w pracy.

Zaprezentowana w rozprawie analiza rozpatrywanych przypadków została wykonana na dobrym poziomie, wyraźnie wskazującym na wzrastającą w trakcie pracy nad doktoratem dojrzałość doktoranta jako niezależnego badacza naukowego. W szczególności, w rozdziałach 6 i 7, w stosunku do rozdziału 5, zauważalne jest wyraźnie poszerzenie analizy i pogłębienie dyskusji uzyskanych wyników. Użycie ogólnie dostępnych pakietów numerycznych, co staje się coraz bardziej powszechną praktyką, niewątpliwie pozwoliło doktorantowi zaoszczędzić ogromną ilość własnej pracy, a nawet zapewne wręcz umożliwiło wykonanie zaprezentowanej analizy. Należy dodać, że na potrzeby projektu doktorant dokonał pewnych modyfikacji i uzupełnień jednego z pakietów, jak wspomniano powyżej. Z drugiej strony korzystanie z takich pakietów doprowadziło do pewnych ograniczeń, np. w analizowaniu dużych wartości parametru $M_{1/2}$, w obszarze kilku TeV, jak wspomniano na stronie 85 rozprawy. Niemniej jednak prezentowana analiza jest wystarczająco wyczerpująca i klarowna, a uzyskane wyniki są interesujące. W szczególności w mojej ocenie istotnym rezultatem jest pokazanie, jakie struktury zapachowe członów miękkich pozwalają na dokładną unifikację sprzężeń Yukawy kwarku b i leptonu tau oraz kwarku s i mionu, a także wszystkich trzech generacji kwarków typu d i leptonów naładowanych. Potencjalnie ważne jest dla mnie również, że w obu scenariuszach autor znajduje też wyraźną preferencję dla dużych ujemnych wartości parametru μ co może mieć znaczenie fenomenologiczne.

Ogólnie rozprawa napisana jest bardzo starannie. Zawarty w niej materiał zaprezentowany jest w sposób logiczny i klarowny. Krótko opisane są praktycznie wszystkie istotne zagadnienia oraz zdefiniowane pojęcia, które są następnie użyte w pracy. Cennym elementem rozprawy są zawarte w niej komentarze i semi-analityczne oszacowania, zwykle dokonane dla uproszczonych przypadków, co pozwala z grubsza ocenić potencjalną rolę poczynionych założeń oraz ograniczeń z danych doświadczalnych w uzyskanych w wyniku analizy wynikach numerycznych z dużych skanów wielu parametrów rozważanych scenariuszy.

Praca zawiera też szereg w miarę drobnych, ale trochę psujących ogólnie dobre wrażenie podczas czytania tekstu, mankamentów:

1. W wielu miejscach brakuje odniesień do oryginalnych prac w kontekście omawianych idei i cytowanych rezultatów, np. przy omawianiu matter parity i R-parity lub przy równaniach (2.9) - (2.12). Literatura cytowana jest w wielu innych miejscach dość oszczędnie, np. na str. 20, w kontekście kwestii mas neutrin wspomniana została Efektywna Teoria Modelu Standardowego (z ang. SMEFT) ale bez żadnego odnośnika do literatury. Podobnie jest w przypadku np. ogólnego mieszania zapachu (general flavour mixing) na str. 39, itd.
2. Doktorant odnosi się do kwestii unifikacji w przypadku masowych neutrin i do potencjalnej roli odgrywanej tu przez wprowadzenie neutrin sterylnych. Natomiast w mojej opinii poziom rozprawy byłby dodatkowo poprawiony przez chociaż zwięzłe podsumowanie alternatywnych do przyjęgo w pracy podejść wyjaśnienia wspólnego pochodzenia mas kwarków i leptonów, używających idei tzw. „family symmetry” na skali GUT.
3. W Streszczeniu (str. 4) na końcu drugiego akapitu w części „przewidywane przez model wartości obserwabli [...] dokonanych przy zderzaczach cząstek...” przyimek „przy” powinien być zastąpiony przez „w”.
4. Chociaż język angielski jest użyty w pracy na ogół na dobrym, a w znacznych fragmentach na bardzo dobrym, poziomie to trochę dziwi jednocześnie użycie pisowni amerykańskiej i brytyjskiej, czasami nawet w tych samych akapitach (np. na dole str. 54).
5. Str. 30: Pod równaniem (1.36) „Higgs-squark-squark” powinno być zastąpione przez „Higgs-sfermion-sfermion”.
6. Na str. 32 „charginos” są zdefiniowane bez subskryptu „i”.
7. Str. 57: Zwicky nie analizował prędkości gwiazd w galaktykach, tylko galaktyk w gromadzie Coma.
8. Powtórzenia na str. 38, linia 3: „the the” oraz str. 39, linia 3: „are are”.
9. Str. 40 pod równaniem (2.3): niewłaściwe jest używanie skrótowego terminu „Yukawas” zamiast „Yukawa couplings”.
10. Odnośniki [102] i [104] dotyczą jednej i tej samej publikacji.

W podsumowaniu wykonanie pracy doktorskiej przez magistra Iskrzyńskiego wymagało opanowania szerokiego zakresu zagadnień z wielu dziedzin: teorii i fenomenologii cząstek elementarnych, w tym szczególnie skomplikowanego zagadnienia łamania zapachu w sektorze członów miękko łamiących supersymetrię, teorii wielkich unifikacji, a także ciemnej materii i stabilności próżni. Dodatkowo doktorant dobrze opanował potrzebne techniki obliczeniowe i odpowiednio zmodyfikował i owocnie wykorzystał dostępne pakiety numeryczne. Pozwoliło mu to na uzyskanie szeregu nowych i ciekawych rezultatów, które zostały opublikowane w bardzo dobrych czasopismach naukowych. Przedstawione rezultaty poszerzają naszą wiedzę i z powodzeniem mogą służyć do dalszych badań nad zagadnieniem unifikacji macierzy Yukawy w ramach supersymetrycznych modeli w kontekście wielkich unifikacji.

W mojej ocenie praca spełnia wymagania stawiane przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym. Wniosuję wobec tego o dopuszczenie rozprawy magistra Mateusza Iskrzyńskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

3/10/2015



prof. dr hab. Leszek Roszkowski