



Prof. dr hab. Michał Przaszłowicz

Zespół Zakładów Fizyki Teoretycznej
UNIwersytet Jagielloński
Instytut Fizyki
im. M. Smoluchowskiego
ul. S. Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków



Kraków, dn. 1 października 2016

Recenzja rozprawy doktorskiej
pana magistra Marka Lewickiego
pt.:

*Aspects of electroweak symmetry breaking
in the light of new data from the LHC*

Wraz z odkryciem w zderzaczach LHC w roku 2012 bozonu Higgsa fizyka oddziaływań fundamentalnych znalazła się na rozdrożu. Z jednej strony zostały odkryte wszystkie składniki Modelu Standardowego, a ich własności pozostają w zgodzie z przewidywaniami teoretycznymi. Z drugiej strony jest wiele argumentów, które wskazują, że Model Standardowy wymaga rozszerzenia – wystarczy przytoczyć argumenty kosmologiczne dotyczące ciemnej materii i ciemnej energii. W przeciwieństwie do okresu przed odkryciem bozonu Higgsa, kiedy to teoria jasno wskazywała, czego należy poszukiwać, obecnie nie ma przesłanek ani teoretycznych, ani też doświadczalnych, jak miałyby wyglądać uogólnienie Modelu Standardowego. Nie ulega wątpliwości, że poszukiwanie sensownych jego rozszerzeń jest w tej chwili jednym z najaktualniejszych problemów teoretycznej fizyki cząstek, ale też i kosmologii. Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska pana magistra Marka Lewickiego mieści się w tym bardzo aktualnym i ambitnym nurcie badań. Autor identyfikuje pewne problemy Modelu Standardowego, a następnie proponuje rozwiązania, prowadzące do jego modyfikacji. Jest więc to tematyka bardzo aktualna i ważna, a badania będące przedmiotem rozprawy można bez obawy określić jako pionierskie.

Po krótkim wprowadzeniu do Modelu Standardowego autor w rozdziale 1.3 przedstawia trzy problemy, którymi zajmuje się w dalszym ciągu rozprawy. Jest to problem naturalności, problem stabilności próżni oraz tzw. problem *baryogenezy*. Problem naturalności polega na tym (jak definiuje go doktorant), że masa bozonu Higgsa, w przeciwieństwie do mas bozonów pośredniczących i mas fermionów, nie jest chroniona przez symetrie teorii przed dużymi poprawkami kwantowymi. Stąd, aby w teorii otrzymać masę bozonu Higgsa zgodną z doświadczeniem (125 GeV), trzeba uzgodnić parametry Modelu Standardowego z dokładnością do 30 rzędów wielkości. Rozwiązaniem tego problemu jest np. supersymetria, której odpowiednie aspekty autor dyskutuje w rozdziale 2. Z kolei problem stabilności próżni wiąże się z zachowaniem na dużych odległościach uzupełnionego o poprawki kwantowe potencjału pola Higgsa, który może mieć globalne minimum różne od minimum, w którym powinniśmy się znajdować. Dyskusja tego problemu przedstawiona jest w rozdziale 3. Wreszcie trzeci problem dyskutowany w rozprawie pana Lewickiego dotyczy przejścia w trakcie ewolucji Wszechświata ze stanu pełnej symetrii do stanu symetrii złamanej, w którym znajdujemy się obecnie. Aby w czasie tego przejścia można było wygenerować liczbę

barionową Wszechświata, autor wprowadza pewne modyfikacje potencjału pola Higgsa, tak by przejście to nie było zbyt „gładkie”. To zagadnienie dyskutowane jest w rozdziale 4. Najobszerniejszym rozdziałem rozprawy jest liczący 51 stron (na 120 stron, które liczy cała praca łącznie z dodatkami i literaturą) rozdział poświęcony supersymetrii. Supersymetryczne rozszerzenie Modelu Standardowego nie tyle rozwiązuje problem dokładnego dostrojenia parametrów modelu, co przesuwają go na wyższy poziom. Chodzi o to, że – jak wiemy z doświadczenia – supersymetria jest naruszona, co oznacza, że przy pewnej dużej skali należy wprowadzić do lagranżjanu człony łamiące SUSY. Jednak sensowne schematy łamania SUSY przewidują, że w pierwszym przybliżeniu masa bozonu Higgsa jest mniejsza od masy bozonu Z , co jest sprzeczne z doświadczeniem. Ta hierarchia może być odwrócona poprzez poprawki radiacyjne, wymaga to jednak dostrojenia parametrów łamiących supersymetrię (*little hierarchy problem*). Autor stawia sobie za cel zbadanie jak silne jest to dostrojenie. W tym celu konstruuje on zaawansowany kod numeryczny, który ma wbudowane równania grupy renormalizacji oraz różnego rodzaju więzy. Program ten pozwala na wyliczenie mas cząstek w funkcji parametrów łamania SUSY. Rodzaj tych parametrów, a także ich liczba zależą od sposobu łamania supersymetrii. Autor dyskutuje tu cztery przypadki łamania symetrii poprzez tzw. *gravity mediation* i trzy rodzaje tzw. *gauge mediation*. Aby skwantyfikować stopień dostrojenia doktorant posługuje się wielkością Δ , która jest zdefiniowana jako maximum pochodnych logarytmicznych masy bozonu Z względem parametrów łamania SUSY. Czuję tu pewien niedosyt, bo autor nie dyskutuje w ogóle znaczenia tego parametru. Nie wiemy, czy wartość Δ równa np. 500 to jest dobrze czy źle. Dopiero wgląd do oryginalnych publikacji, w tym przypadku do pracy R. Barbieri i G.-F. Giudice Nucl. Phys. B306 (1988) 63 (nawiasem mówiąc autor nie cytuję tej pracy w bardzo obszernej bibliografii), pozwala na wyrobienie sobie intuicji dotyczącej parametru Δ . Okazuje się, że np. $\Delta = 10$ oznacza, że w formule na masę bozonu Z dopuszczalne są korekty na poziomie maksymalnie jednego rzędu wielkości. Czyli wartość Δ rzędu 1000 jest zanedbywalnie małym dostrojeniem w stosunku do 30 rzędów wielkości (jak pisze autor we wstępie) w niesupersymetrycznym Modelu Standardowym. Mam także zastrzeżenia do skrótowego opisu rysunków: nie jest jasne co oznaczają wąskie oscylujące kolorowe pasma na rysunkach 2.2, dopiero sięgnięcie do oryginalnej pracy [1] (akapit po równaniu (2.7)) wyjaśnia, co i jak zostało pokazane. Autor kończy tę część rozprawy konkluzją, że stopień dostrojenia w modelach łamania SUSY w schematach *gauge mediation* oraz *gravity mediation* jest zbliżony, co stanowi pewnego rodzaju zaskoczenie. Ta część pracy oparta jest na publikacji doktoranta [1] powstałej we współpracy z promotorem.

Wypracowane narzędzia oraz nabyte w wyniku dyskusji naturalności supersymetrycznego Modelu Standardowego doświadczenie w operowaniu opublikowanymi w literaturze poprawkami wyższych rzędów, pozwalają autorowi na podjęcie ważnych kwestii fizycznych. W rozdziale 2.5 pan Lewicki stawia sobie pytanie jakie ograniczenia na parametry SUSY narzuca hipoteza, że niezgodność między teorią a doświadczeniem dla wartości $(g_\mu - 2)$ może być wytłumaczona przez supersymetrię. Jest to bardzo ciekawa i aktualna dyskusja, zwłaszcza, że wartość $(g_\mu - 2)$ jest bodaj jedynym wyraźnym przykładem znaczącego odstępstwa teorii od doświadczenia w Modelu Standardowym. Szczególnie podoba mi się powiązanie przeprowadzonej przez autora dyskusji z programem dla planowanych akceleratorów elektronowego i hadronowego. Krótkie podsumowanie tej części jest takie, że w badanym przypadku pojawiają się stosunkowo niskie ograniczenia na masy stopu, chargina i smuonu (za wyjątkiem raczej nienaturalnego przypadku z podrozdziału 2.5.5), co pozwoliłoby zaobserwować te cząstki w akceleratorach następnej generacji. Problemy te były dyskutowane w pracy [3] z załączonej bibliografii.

Następne dwa podrozdziały (2.6 i 2.7) dysertacji pana Lewickiego poświęcone są modyfikacjom minimalnego supersymetrycznego Modelu Standardowego (z ang. MSSM), które pozwalają osłabić dokładność dopasowania parametrów modelu i tym samym „rozprawić się” z problemem naturalności. Pierwsza propozycja, dyskutowana w pracy [4], polega na zmianie charakteru supersymetrycznego partnera kwarku top ze skalarnego na wektorowy. Modyfikacja ta wymaga przeformułowania równań grupy renormalizacji oraz przeliczenia przekrojów czynnych i stosunków rozgałęzienia dla procesów z kwarkiem t. O ile rozumiem te wyniki są znane w literaturze, a rola autora polegała na ich zaimplementowaniu do szczegółowej analizy fenomenologicznej, która ma na celu znalezienie ograniczeń na dopuszczalne wartości sprzężeń oraz masy wektorowego superpartnera kwarku t, oraz znalezienie obserwacji najbardziej czułych na dyskutowaną tu modyfikację MSSM. Konkluzją tej części jest stwierdzenie, że pomiary własności cząstki Higgsa są (oprócz oczywiście bezpośredniego odkrycia wektorowego partnera topu, którego masa jest ograniczona obecnie na powyżej około 700 GeV) dobrą obserwacją do znalezienia bądź wykluczenia proponowanej modyfikacji. Jest to więc przyczynek do badań w następnym etapie działania LHC, gdzie planuje się zwiększenie świetlności (a nie energii), co zaowocuje większą precyzją pomiarów.

Następna modyfikacja, jaką rozpatruje pan Lewicki, to teoria supersymetryczna w 5 wymiarach. Dyskutowane tu wyniki zostały otrzymane w pracy [6]. Oryginalny wkład autora sprowadza się do stworzenia odpowiedniego kodu numerycznego i przeprowadzenia analizy fenomenologicznej. Dyskutowane są różne typy rozszerzenia do 5 wymiarów różniące się sposobem umieszczenia pól w dodatkowym wymiarze oraz sposobem łamania SUSY. Dla mnie najciekawszą konkluzją jest obserwacja, że dodanie piątego wymiaru przyspiesza unifikację stałych sprzężenia. Udaje się także zredukować parametr dostrojenia Δ w stosunku do teorii czterowymiarowej, w przypadku jednej implementacji dość znacznie.

W podsumowaniu całego rozdziału 2, chcę stwierdzić, że zawarty w nim materiał jest wystarczająco obszerny i właściwie rozdział ten mógłby stanowić sam w sobie rozprawę doktorską. Przedstawione w rozdziale tym analizy są bardzo szczegółowe, a autor z dużą swobodą operuje wynikami z bardzo obszernej literatury. Zapoznanie się podczas lektury tej części rozprawy pana Lewickiego ze szczegółowymi próbami poradzenia sobie z problemem naturalności było dla mnie bardzo interesującym i pouczającym doświadczeniem.

Rozdział 3 rozprawy doktorskiej pana Marka Lewickiego poświęcony jest innemu problemowi Modelu Standardowego, jakim jest stabilność próżni. Ta część pracy oparta jest na publikacjach [2,5,7]. Potencjał efektywny dla pola Higgsa, po uwzględnieniu poprawek kwantowych posiada oprócz minimum, w którym nasz Wszechświat się obecnie znajduje drugie minimum dla wartości pól rzędu 10^{11} GeV lub więcej. Wysokość tego minimum oraz wysokość bariery oddzielającej oba minima zależy od wartości różnych parametrów Modelu Standardowego, a w szczególności od mas bozonu Higgsa i masy kwarku t. Wydaje się, że próżnia, w której się obecnie znajdujemy jest metastabilna, tzn., że drugie minimum ma niższą energię, ale czas tunelowania jest dłuższy od wieku Wszechświata. Autor bada, jak warunki stabilności zależą od modyfikacji potencjału pola skalarnego poprzez dodanie efektywnych oddziaływań typu ϕ^6 oraz ϕ^8 . Stosuje w tym celu przybliżenie półklasyczne przedstawiając przybliżone wyniki analityczne i dokładną analizę numeryczną. Uważam, że jest bardzo ciekawa i ważna analiza, gdyż wysnuwanie wniosków o stabilności próżni na podstawie znajomości potencjału jedynie wokół minimum wydawało mi się zawsze jako zbyt daleko idące. Podsumowaniem tej dyskusji jest rysunek 3.12, na którym widać, jak obecne minimum staje się niestabilne przy pewnym doborze nowych stałych sprzężenia oraz rysunki 3.9 i 3.10 gdzie widać jak układają się obszary stabilności na płaszczyźnie sparametryzowanej

przez dwie stałe sprzężenia badanych operatorów. Trochę brakuje mi powiązania tej części pracy z poprzednią dyskusją modyfikacji Modelu Standardowego, a konkretnie jak te modyfikacje – jeśli w ogóle – wpływają na stabilność próżni. Zauważyłem w tej części sporo niestaranności: np. w wzorze 3.4 nie zdefiniowano, co oznacza *prim* przy wyznaczniku – mogę się domyślać, że chodzi tu o standardowe przybliżenie stosowane przy rachunkach instantonowych, właściwie nie wiadomo, dlaczego $\varphi(0)$ jest szerokością bariery, a nie $\varphi(0) - \varphi(\infty)$, pojawiają się literówki, z których najzabawniejsza to „lover maximum”, która występuje dwa razy.

W ostatniej części rozprawy, która jest rozszerzoną wersją pracy [8], pan magister Lewicki zajmuje się problemem bariogenezy. W Modelu Standardowym, w miarę ochładzania się Wszechświata, w potencjale pola Higgsa pojawia się minimum dla niezerowej wartości pola φ i następuje naruszenie symetrii SU(2). Jednak przejście to jest na tyle gładkie, że nie jest spełniony jeden z trzech warunków Zacharowa potrzebnych do generacji liczby barionowej, a mianowicie odejście od równowagi termodynamicznej. W oparciu o tę obserwację autor proponuje modyfikację potencjału pola Higgsa poprzez efektywny człon φ^6/Λ^2 , który powoduje powstanie bariery pomiędzy nowym minimum a trywialnym minimum w zerze. Wówczas za przejście fazowe odpowiedzialne są sfalerony. Autor oblicza w tym kontekście wartość temperatury krytycznej, co wymaga znalezienia prawdopodobieństwa utworzenia się domeny wokół nowej próżni z uwzględnieniem rozszerzania się Wszechświata. Autor uwzględnia różne modele ewolucji Wszechświata i bada zależność rozwiązań sfaleronowych od stałej Λ . W tej części autor posługuje się nowymi narzędziami teoretycznymi, które wychodzą poza standardowe „oprzyrządowanie” teorii pola, rozwiązując równania kosmologiczne i stosując temperaturową teorię pola.

Jak sam autor pisze we wstępie, i jak to sygnalizowałem omawiając poszczególne rozdziały, rozprawa pana magistra Lewickiego oparta jest na ośmiu publikacjach napisanych wspólnie z promotorem, kolegami z Instytutu Fizyki Teoretycznej UW, a także z naukowcami z zagranicy. Publikacje te to artykuły w recenzowanych czasopismach: JHEP [1,2,3,6,8], Phys. Rev. D [4] oraz wystąpienia konferencyjne [5,7]. Pan magister Marek Lewicki jest w sumie współautorem 19. prac naukowych opublikowanych bądź złożonych do publikacji w czasopismach o światowej randze, bądź w recenzowanych materiałach konferencyjnych, z czego siedem artykułów datowanych jest na rok 2016. Jest to dorobek znacznie wykraczający poza wymagania stawiane doktorantom. Znam przypadki, że w oparciu o taki dorobek uzyskano stopień doktora habilitowanego.

W konkluzji stwierdzam, że przedstawiona przez pana magistra Marka Lewickiego rozprawa doktorska p.t. *Aspects of electroweak symmetry breaking in the light of new data from the LHC* spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim, a pozostały dorobek doktoranta oceniam jako znakomity i wnioskuję o dopuszczenie pana magistra Marka Lewickiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. dr hab. Michał Praszalowicz