

Katowice, 21.09.2016

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Marka Lewickiego:
"Aspects of electroweak symmetry breaking
in light of new data from the LHC"

Na pracę doktorską mgr Marka Lewickiego liczącą 120 stron składa się pięć rozdziałów, krótki dodatek oraz spis literatury.

Rozprawa napisana w języku angielskim oparta jest na sześciu artykułach opublikowanych w bardzo dobrych czasopismach (JHEP, PRD) oraz dwóch materiałach pokonferencyjnych.

Rozprawa doktorska jest bardzo ciekawa i dotyczy żywo dyskutowanych podstawowych problemów w modelowych opisach fizyki cząstek elementarnych. W dyskusji uwzględniono konsekwencje nowej sytuacji w jakiej znaleźliśmy się po 2012 roku, kiedy to w LHC odkryto skalarną cząstkę Higgsa o masie ok. 125 GeV. W rozprawie uwzględniono również wpływ nowych ograniczeń na masy i sprzężenia hipotetycznych cząstek supersymetrycznych uzyskanych w LHC na dyskutowane w pracy efekty modelowe.

Praca obejmuje badania w zakresie szerokiego spektrum generycznie różnych modeli obejmujących:

- (i) modele supersymetryczne połączone z teoriami wielu wymiarów;
- (ii) modele zawierające supersymetryczną reprezentację wektorową kwarku top;
- (iii) modele z polem skalarnym zawierającym prosty potencjał grawitacyjny;
- (iv) model z potencjałem Higgsa modyfikowanym przez nierenormalizowalne operatory o wymiarze sześć;
- (v) modele kosmologiczne ze sfaleronami.

Tego typu bogaty zbiór modeli pozwolił na swobodne badanie wielu nie-standardowych efektów w elektrosłabej bariogenezie, anomalnym momencie magnetycznym mionu, stabilności próżni oraz dyskusję związaną z wymogiem

bardzo ścisłego, przez co wyglądającego na niepokojąco sztucznego, dostrojenia parametrów modeli do danych eksperymentalnych na poziomie poprawek kwantowych.

Oprócz próby zrozumienia wszystkich powyższych aspektów wartościowe jest także numeryczne potwierdzenie przybliżeń stosowanych w dotychczasowych analizach i literaturze. Takie sprawdzenia są istotne gdyż zawsze istnieje możliwość popełnienia błędów w oszacowaniach. W doktoracie sprawdzono w ten sposób dotychczasowe wyniki związane z równaniami grupy renormalizacyjnej w SUSY, metastabilnością próżni i efektami tunelowymi w efektywnych potencjałach, temperaturą przejścia fazowego potencjału Higgsa. Numeryczne obliczenia pozwalają także na rozszerzenie dyskusji poza stosowane zazwyczaj obszary parametrów. Takie "bonusy" zostały także zidentyfikowane i przeanalizowane.

W rozprawie wiele efektów diskutowanych jest w kontekście efektywnych pól, przez co uzyskane konkluzje stają się bardziej ogólne i uniwersalne.

Do innych ciekawych i już bardziej szczegółowych wyników opisanych w rozprawie zaliczyć należy:

1. Pokazanie, że w ogólnych modelach GMSB problem dopasowań parametrów modeli jest nie większy niż w modelach z łamaniem grawitacyjnym supersymetrii (skale dopasowań szacowano odpowiednio zdefiniowanym parametrem Δ);
2. Biorąc pod uwagę eksperyment $(g-2)_\mu$ oraz masę cząstki Higgsa, obliczono dolną granicę na $\tan\beta$ oraz górną granicę na masę superpartnera kwarku top;
3. Uwzględniając górną granicę masy stopu, jeśli SUSY jest odpowiedzialne za lekką anomalię obserwowaną w $(g-2)_\mu$, cząstki supersymetryczne powinny zostać odkryte przy energii 100 TeV (do tego potrzebny będzie jednak "kosmiczny" zderzacz FCC-hh).
4. Modele z wektorową reprezentacją kwarku top pomniejszają problem małej hierarchii. Podobnie model MSSM-5D z dodatkowym wymiarem przestrzennym daje duże mieszanie stopu i mniejszy problem dopasowań mas cząstek do danych eksperymentalnych;
5. Rozpatrzone wpływ Nowej Fizyki na destabilizację próżni (może zachodzić praktycznie w dowolnej skali), szczególnie uwzględniając efekty

grawitacyjne w modelu potencjału w zakrzywionej czasoprzestrzeni (ciekawe efekty tunelowania);

6. Zbadano bariogenezę i przejścia fazowe w standardowym potencjale Higgsa z operatorami o wymiarze sześć, oraz modelu kosmologicznym z izolowanym od SM pojedynczym członem gęstości energii;
7. Określono rolę sfaleronów w barionowej asymetrii w kosmologicznym modelu z $n = 6$ (uniknięcie problemu rozmycia asymetrii w ewolucji Wszechświata).

Moim zdaniem różnorodność nietrywialnych tematów, raczej skondensowany i jasny opis zagadnień oraz dyskusja podjęta w rozprawie są bardzo wartościowe. Szkoda, że nie rozwinięto w rozprawie tematu ciemnej materii. Termin ten pojawia się jedynie w Streszczeniu chociaż Autor rozprawy napisał na temat związku między ciemną materią a bariogenezą publikację, pozycja [8] literatury: Marek Lewicki, Tanja Rindler-Daller, and James D. Wells. "Enabling Electroweak Baryogenesis through Dark Matter", JHEP, 06:055, 2016. Chciałbym przedstawić jeszcze kilka pytań czy też spostrzeżeń, które nasunęły mi się po lekturze rozprawy.

Zacznę od spostrzeżenia. W Streszczeniu można przeczytać "Currently all the data is consistent with the SM prediction,...", a zdanie w rozdziale 2 mówi: "Muon anomalous magnetic moment is one of the few observables which do not agree with their SM predictions." Chyba jednak drugie zdanie nie można uznać za prawdziwe lub też dochodzimy do sprzeczności. O jakie inne obserwabla chodzi w drugim zdaniu?

W rozdziale 2 znalazło się stwierdzenie, które nie jest dla mnie jasne: "However, as the energy and luminosity increase for HL-LHC the observables at play in the electroweak precision analysis do not improve substantially. Therefore, precision electroweak analysis constraints become relatively less important in time compared to direct detection probes of new states and especially compared to precision Higgs analysis...". Z wielu powodów są to stwierdzenia z którymi mam problem. Po pierwsze, założono brak postępu w wyznaczaniu precyzyjnych poprawek do obserwabli elektrosłabych. Taki postęp następuje w SM (ostatnio zostały doliczone poprawki bozonowe dla rozpadu bozonu Z na kwarki $b\bar{b}$ stabilizujące estymatę błędów teoretycznych na poziomie promila). Nie można założyć także braku postępu w tym kierunku np. w ramach modeli SUSY. Przy okazji, w literaturze dotyczącej

$(g-2)_\mu$ brak prac D. Stöckingera i współpracowników, którzy np. pokazali, że poprawki dwupętlowe też mogą być istotne (dla bardzo dużych $\tan\beta$ i SUSY w skali TeV). Ujmując rzecz krótko, moim zdaniem precyzyjne obliczenia elektroslabe zawsze będą ważne, wręcz nieodzowne. Gdy mówimy dalej o precyzji, nie wiadomo jak mogą się zmienić parametry S,T przy przejściu z obliczeń jedno- na dwu-pętlowe w ramach danego modelu. W rozprawie skorzystano z formuł Martina do obliczeń S,T w modelu z reprezentacją wektorową kwarku top na poziomie NLO. Samo określenie ograniczeń na niestandardową fizykę w fizyce hadronowej nie w bezpośredni sposób ale przez takie parametry jak S, T nie jest trywialne, patrz procedura określenia tzw. pseudoobserwabli w zderzeniach e^+e^- . Nawiasem mówiąc procedura ta wymaga zmian na poziomie NNLO w przyszłych akceleratorach wysokiej świetłości. To co jest określone np. w ref. [99] rozprawy doktorskiej nie jest wystarczające. Odpowiednią dyskusję na ten temat można znaleźć na przykład w rozdziale 3 pracy 1604.00406.

W rozdziale 3 zabrakło mi w literaturze kilku, wydaje mi się, że jednak ważnych prac dotyczących problemu stabilności próżni, np. M. J. G. Veltman, *Acta Polon.* B 12, 437 (1981); F. Jegerlehner, *Acta Phys. Pol.* B 45, 1215 (2014); F. Jegerlehner, *Acta Phys. Pol.* B 45, 1167 (2014); A. V. Bednyakov, B. A. Kniehl, A. F. Pikelner and O. L. Veretin, *Phys. Rev. Lett.* 115, 201802 (2015); S. D. Bass, *Acta Phys. Pol.* B 45, 1269 (2014).

F. Jegerlehner argumentuje (jako pierwszy po określeniu masy bozonu Higgsa), iż przejście fazowe następuje blisko skali Plancka, 10^{16} GeV (w niektórych pracach wartość ta jest nawet kilka rzędów wielkości niżej - oszacowanie to jest bardzo czułe na masę kwarku top oraz połączenia pomiędzy $\overline{MS}$ i fizycznymi parametrami). Chociaż prace te są bardziej "cząstkowe" niż kosmologiczne bazując na analizie poprawek pętlowych w RGE a nie efektywnych podejściach, tym niemniej zasługują moim zdaniem na uwagę ze względu na prostotę podejścia, w którym $\overline{MS}$ jest wystarczający do opisów kosmologicznych (stabilność próżni, inflacja), praktycznie do skali Plancka. Z tego punktu widzenia w samym SM jest jeszcze dużo do zrobienia i zrozumienia. Wymieniona powyżej praca Bednyakov et al. jest w zasadzie zgrabnym zebraniem i podsumowaniem wszystkich ważnych poprawek zastosowanych w obliczeniach dotyczących stabilności próżni.

Na kilku rysunkach w rozdziale 4 potencjały, minima i przejścia fazowe są czułe na temperaturę na poziomie dziesiątych części stopnia, domyślam się, że Kelwina). Z kolei potencjał także rozpatrywany ma dodany do SM człon

$\sim |H|^6$. Co zmieniłyby człony wyższych rzędów? Podchodząc całościowo do zagadnienia potencjałów, czy istnieje związek pomiędzy potencjałem (3.25) i (4.1)? Czy potencjał (4.1) jest wystarczający do opisu przejścia z fałszywej próżni do prawdziwej? Przy okazji, brakuje jednostek dla ϕ i V na Fig.3.15, w jakich jednostkach jest potencjał o wartości $V \simeq 10^{-120}$ oszacowany na stronie 81?

Na zakończenie kilka słów o formalnej stronie rozprawy. Niestety, praca zawiera wiele zaskakujących błędów edytorskich, szczególnie na pierwszych kilkunastu stronach. Kilka przykładów, np. powtórzenia: "in in", "particles particles", "The the", przestawienia liter w wyrazach, take w tytułach rozdziałów, np. Supremultiplets (Supermultiplets), Extnesion (Extension), prartner (partner), Suprsymmetry (Supersymmetry), neurtalino (neutralino), togehter (together), pomijanie liter: genera (general), agains (against), msses (masses), staring (starting). Czasami mamy kropki po wzorach i dalej kontynuowane zdania lub na odwrót, przecinki po wzorach a następnie nowe zdanie z dużej litery.

Co gorsza, błędy te dotyczą również fachowych terminów, np. czasami baryogenesis pisane jako bariogenesis, np. "Baryogenesis called electroweak baryogenesis" (s.6) - trudno mi zrozumieć genezę takich błędów. Pojawiają się także błędy gramatyczne np. "than" zamiast then, "two section".

W opisie Fig.2.1 jest odnośnik do szczegółów algorytmu w dodatku, którego nie ma, natomiast krótki dodatek nie wydaje się być zbyt istotnym.

Jeśli Autor chce upublicznić treść rozprawy, na przykład poprzez archiwum xxx.lanl.gov, z pewnością należy poprawić tekst i uniknąć niepotrzebnych niejasności (na szczęście, także zabawnych, jest "lover" zamiast "lower").

Jak już wcześniej napisałem, pracę uważam za bardzo dobrą. Rozprawa jest ambitna, zawiera wiele ciekawych obliczeń numerycznych i ciekawych spostrzeżeń dotyczących przeprowadzonych rachunków oraz bardziej ogólnych wniosków związanych z analizą niestandardowych modeli.

Praca w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim i stawiam wniosek o dopuszczenie mgra Marka Lewickiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



prof. dr hab. Janusz Gluza
Instytut Fizyki, Uniwersytet Śląski w Katowicach