

Kraków, 17.07.2019

dr hab. Leszek Motyka, prof. UJ
Instytut Fizyki, Uniwersytet Jagielloński
ul. prof. Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków
email: leszek.motyka@uj.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Pawła Olszewskiego

Rozprawa doktorska mgr. Pawła Olszewskiego pt. „*Electroweak vacuum in Standard Model and in its extension motivated by scale symmetry*” poświęcona jest badaniom problemu stabilności próżni Modelu Standardowego oraz jego rozszerzenia opartego o narzucenie kwantowej symetrii skalowania. Obydwa główne problemy teoretyczne podjęte w pracy są bardzo ważne, istotne i ciekawe naukowo, zaawansowane teoretycznie i aktualne.

Rozprawa jest napisana po angielsku, ma 141 stron, składa się z 8 rozdziałów, bibliografii zawierającej 71 dobrze dobranych pozycji i krótkiego dodatku opisującego konwencje i podstawowe parametry fizyczne. Rozprawa opiera się na wynikach oryginalnych badań, w których uczestniczył pan Olszewski, opisanych w pięciu opublikowanych artykułach naukowych (pozycje [1–5] w bibliografii rozprawy). Oprócz dyskusji oryginalnych rezultatów, opisanych w rozdziałach 4–7, rozprawa doktorska pana Olszewskiego zawiera dość obszerne wprowadzenia w stosowany formalizm, ulokowane głównie w rozdziałach 1–3, choć pozostałe rozdziały także zawierają wprowadzenia wychodzące poza treść opublikowanych prac. W rozdziale 8 podane jest zwięzłe podsumowanie otrzymanych wyników.

1. Osiągnięcia naukowe

Centralny w rozprawie problem niestabilności próżni elektrosłabej, to jeden z najciekawszych punktów zaczepienia dla badania fizyki wychodzącej poza Model Standardowy. Przy obecnie zmierzonych wartościach masy cząstki Higgsa i kwarku top, poprawki kwantowe do potencjału Higgsa w Modelu Standardowym prowadzą do pojawienia się globalnego minimum potencjału Higgsa dla skali renormalizacji mniejszej niż skala Plancka. To oznaczałoby, że obecnie obserwowany stan próżni elektrosłabej nie jest stabilny, a jedynie metastabilny i pola elektrosłabe mogłyby kwantowo przetunelować do innego stanu próżni, z zupełnie inną obserwowaną fizyką. Co ciekawe, pomimo tego, że wyliczony w Modelu Standardowym czas życia stanu quasi-próżni jest znacznie dłuższy od czasu życia Wszechświata, to stosunkowo niewielkie poprawki do Lagranżjanu mogą prowadzić do znacznie krótszego oczekiwanego czasu rozpadu fałszywej próżni i sprzeczności z faktycznie obserwowanym stanem. W rozprawie doktorskiej pan Olszewski opisuje szczegółowo mechanizm i prawdopodobieństwo tunelowania kwantowego w Modelu

Standardowym oraz wyniki swoich badań tego efektu dla wybranych rozszerzeń Modelu Standardowego. Wyznaczanie ograniczeń na możliwe rozszerzenia Modelu Standardowego to bardzo żywy i ważny nurt fizyki teoretycznej oddziaływań fundamentalnych, a badania opisane w pracy doktorskiej wniosły tu istotne wyniki dla pewnej klasy modeli.

Ideą przewodnią omawianych w rozprawie rozszerzeń Modelu Standardowego jest przybliżona niezmienniczość teorii na poziomie kwantowym ze względu na skalowanie. Model Standardowy nie ma tej własności ze względu na silne efekty łamania skalowania w poprawkach kwantowych do propagacji pola skalarnego (jest to związane z tzw. „problemem naturalności” lub „problemem hierarchii” dla masy bozonu Higgsa). Niezmienniczość skalowania na poziomie kwantowym jest przywracana na przykład w supersymetrycznych rozszerzeniach Modelu Standardowego, ale jest to własność ogólniejsza, która może być realizowana także na inne sposoby. Koncepcja kwantowej niezmienniczości skalowania i jej zastosowania do zrozumienia Modelu Standardowego do skali Plancka jest przedmiotem wielu wnikliwych analiz teoretycznych, by wspomnieć tu na przykład kluczowe prace Christofa Wettericha, Krzysztofa Meissnera i Hermanna Nicolai. Jest to bardzo poważna możliwa droga w kierunku zrozumienia jak Model Standardowy zachowuje się przy bardzo wysokich skalach energii, a może nawet w jaki sposób łączy się z grawitacją przy skali Plancka. W swoich badaniach pan Olszewski wybrał rozszerzenie Modelu Standardowego przez dołączenie dodatkowego pola skalarnego oraz dodanie wielomianowych członów w potencjale oddziaływania tego pola i pola Higgsa w taki sposób, że otrzymana teoria zachowuje przybliżoną kwantową niezmienniczość skalowania. Otrzymana teoria jest nierenormalizowalna. Jakkolwiek teorie nierenormalizowalne mają ograniczoną zdolność przewidywania i wymagają uzupełnień o nowe parametry przy wyliczaniu kolejnych rzędów rozwinięcia kwantowego, to można je z powodzeniem stosować jako teorie efektywne przy ustalonym rzędzie rozwinięcia. Zastosowane podejście jest dobrze uzasadnione i zrozumiane w formalizmie efektywnych teorii pola.

W najważniejszej części rozprawy poświęconej prezentacji otrzymanych oryginalnych wyników badań, pan Olszewski opisuje rezultaty pięciu prac opublikowanych w bardzo dobrych czasopismach naukowych.

Centralny problem rozprawy to kwestia (nie)stabilności quasi-próżni elektroslabej i zależność czasu jej życia od stałych sprzężenia dla wyżej wymiarowych operatorów w sektorze pól skalarnych rozszerzonego Modelu Standardowego. Badania te, opisane w pracy [2] pozwoliły otrzymać diagram fazowy rozszerzonego Modelu Standardowego i dostarczyły odpowiedzi na kluczowe pytanie: czy można tak dobrać parametry rozszerzonego Modelu Standardowego z przybliżoną kwantową niezmienniczością skalowania, by otrzymać teorię z odpowiednio wysoką skalą *Nowej Fizyki*, dopuszczającą istnienie stanu quasi-próżni o wystarczająco długim czasie życia – czyli takim, by prawdopodobieństwo jego rozpadu było znikome w czasie życia Wszechświata. Odpowiedź na to pytanie jest twierdząca, można znaleźć zakres parametrów, dla których otrzymuje się niesprzeczną z obserwacjami teorię. Od strony technicznej, praca jest zaawansowana i solidna. Metoda obliczenia prawdopodobieństwa tunelowania przez instanton Colemana jest zastosowana w ujęciu przybliżonym i dokładnym ujęciu numerycznym, w potencjale dla sektora Higgsa są włączone poprawki kwantowe.

Bardzo ciekawa część rozprawy, również opisująca wyniki oryginalnych badań przeprowadzonych w ramach studiów, a opublikowanych w pracach [3,4,5], dotyczy nowego podejścia do renormalizacji teorii pola z kwantową symetrią skalowania spontanicznie łamaną przez skalarny dylaton. W pracy [3] rozważana jest teoria, w której skala odjęć ma źródło fizyczne – jest generowana przez próżniową wartość oczekiwaną dylatonu. Zbudowana w ten sposób procedura

regularyzacji zachowuje na poziomie kwantowym klasyczną symetrię skalowania, w odróżnieniu od klasycznej regularyzacji wymiarowej, która jawnie ją łamie. W tym ujęciu można zbudować teorię, która zachowuje na poziomie kwantowym hierarchię mas założoną na poziomie klasycznym. W rozważanej teorii występują nie-wielomianowe operatory i nie jest ona renormalizowalna. Teoria ta spełnia równanie Callana-Symanzika, jest więc spójna na poziomie kwantowym. Uogólnienie tej konstrukcji zostało przedstawione w pracy [4]. Zaproponowane tam zostało zinterpretowanie skali odjęć i skal tłumienia wyżej wymiarowych nierenormalizowalnych operatorów jako wartości oczekiwanych jednorodnych pól tła. Zdefiniowana w ten sposób klasa teorii nierenormalizowalnych zachowuje kwantową niezmienniczość skalowania. W pracy [5] obliczony został dwupętłowy potencjał dla sektora skalarowego zawierającego pole Higgsa i dylaton. Uważam te wyniki za bardzo interesujące, gdyż prezentują nowe, oryginalne podejście do głębokich i ważnych teoretycznych zagadnień: renormalizacji kwantowej teorii pola i kwantowej niezmienniczości skalowania.

Trzecia z najważniejszych analiz opisanych w rozprawie (praca [1]) dotyczy problemu niezależności prawdopodobieństwa tunelowania kwantowego od wyboru cechowania. Oczywiście, prawdopodobieństwo rozpadu quasi-próżni jest wielkością fizyczną i nie może zależeć od cechowania. Ogólny, formalny dowód tej własności jest znany i opiera się na tożsamościach Nielsena. W pracy [1] ta własność badana jest na poziomie perturbacyjnym dla abelowego modelu Higgsa, który można w tym kontekście uważać za uproszczoną wersję Modelu Standardowego. Dodatkowo, abelowy model Higgsa zostaje uzupełniony o nierenormalizowalne operatory dla pola skalarowego. Złamanie renormalizowalności teorii jest na tyle poważną modyfikacją, że sprawdzenie *explicite* tożsamości Nielsena jest potrzebne. Wynik analizy przeprowadzonej w pracy [1] jest pozytywny: prawdopodobieństwo rozpadu quasi-próżni jest niezależne od wyboru cechowania także dla rozszerzonej, nierenormalizowalnej teorii. Te wyniki są ważne, gdyż bez nich byłyby pewne wątpliwości odnośnie jakości podstaw i spójności teoretycznej pozostałych prac [2–5].

Artykuły [1–5] opisują rezultaty ambitnego, spójnego, kompletnego i udanego programu badawczego o wysokim stopniu zaawansowania teoretycznego. Zrealizowany program badań dostarczył ważnych odpowiedzi i metod dla rozszerzonego Modelu Standardowego z przybliżoną kwantową niezmienniczością skalowania oraz dla stabilności jego próżni. Zarówno wagę teoretyczną stawianych problemów, jak i jakość ich rozwiązań oceniam bardzo wysoko. Wszystkie artykuły, które stanowią podstawę rozprawy mają dwóch lub trzech współautorów, co jest standardem w fizyce teoretycznej wysokich energii. Relatywnie niewielka ilość współautorów jednoznacznie wskazuje na wysoki udział pana Olszewskiego w otrzymaniu oryginalnych wyników. Należy dodać, że oprócz artykułów naukowych, które są omówione w rozprawie doktorskiej pan Olszewski jest współautorem czterech artykułów opublikowanych w dobrych czasopismach naukowych, które, zapewne, mogłyby być materiałem na drugi dobry doktorat.

2. Prezentacja

Opisana w rozprawie tematyka jest złożona, bogata i zaawansowana. Wymaga głębokiej znajomości kwantowej teorii pola, tak w ujęciu perturbacyjnym i rachunku diagramów Feynmana, jak w nieperturbacyjnym ujęciu opartym na grupie renormalizacji. Żywy kontekst rozprawy stanowią wielkie pytania i koncepcje współczesnej fizyki teorii podstawowych: problem hierarchii, kwantowa symetria skalowania, problem stałej kosmologicznej oraz dopełnienia ultrafioletowego Modelu Standardowego i jego renormalizowalności. W tej sytuacji, skonstruowanie relatywnie zwartego, ale logicznie spójnego i czytelnego wprowadzenia w tematykę jest trud-

nym zadaniem. Pan Olszewski wywiązał się z niego wyśmienicie, zachowując przy tym wysoki poziom szczegółowości i matematycznej precyzji. Zarówno w częściach wprowadzających w zagadnienia i formalizm, jak i w prezentacji oryginalnych wyników widać wysoką staranność i duży nakład pracy. Autor porusza się swobodnie w rozległym obszarze zaawansowanych pojęć i koncepcji teoretycznych, które są istotne dla zrealizowanego programu badawczego. Mimo, że relatywnie długi, tekst pracy jest bardzo gęsto nasycony treścią, tak fizyczną, jak i matematyczną. Praca napisana jest po angielsku, przejrzysta, rzetelnie, dobrym językiem. Opis oryginalnych wyników jest dobrze oddzielony od wprowadzeń, wyniki otrzymane przez innych autorów są właściwie cytowane. Jakość prezentacji, spójność tekstu rozprawy i poziom merytoryczny wprowadzeń i opisu oryginalnych wyników oceniam jako znakomitą. Odczytany jako całość, tekst pracy wykazuje pełną spójność logiczną i merytoryczną części wprowadzających i otrzymanych wyników, co potwierdza głębokie i wszechstronne zrozumienie przez Autora całego programu badań i jego podstaw teoretycznych.

Jeśli miałbym, z obowiązku recenzenta, wskazać jakieś punkt, który mógłby pozostawić lekki niedosyt na tle wyśmienitej całości badań i rozprawy, to byłby to chyba brak nieco bardziej pogłębionej dyskusji kwantowej symetrii skalowania, z odniesieniami do ewolucji Modelu Standardowego do skali Plancka i nieco szerszą literaturą tego problemu. Nie czynię jednak z tego zarzutu, bo i bez tego rozprawa jest bardzo obszerna.

Jedynym fragmentem pracy, który wzbudził moje wątpliwości jest stwierdzenie umieszczone pod koniec rozdziału 5.4: *Thus we arrive at the number 10^{-248} (...), as the chance that our patch of the Universe had survived till this moment without being swallowed by a bubble.*”, sądzę, że jest to drobna niedoskonałość redakcyjna, która nie wpływa na ocenę prezentacji jako znakomitej.

3. Podsumowanie

Nie mam żadnych wątpliwości co do jakości osiągnięć naukowych i rozprawy doktorskiej mgr. Pawła Olszewskiego. Bardzo ambitny, aktualny i zakończony sukcesem program badań dotyczący wielkich pytań współczesnej fizyki oddziaływań podstawowych, całościowe ujęcie: od budowy nowatorskich metod teoretycznych po zastosowania kosmologiczne, wysoka staranność teoretyczna — jednoznacznie prowadzą do najwyższej oceny wyników naukowych. Potwierdza to bardzo znaczący dorobek: aż dziewięć opublikowanych prac doktoranta przed uzyskaniem doktoratu. Wyśmienita prezentacja godnie wieńczy dzieło.

Dlatego z przyjemnością wnoszę o przyznanie panu Pawłowi Olszewskiemu stopnia doktora, oceniam jego rozprawę doktorską jako bardzo dobrą i wnioskuję o jej wyróżnienie.



dr hab. Leszek Motyka