



**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Pauliny Michalak
pt. „Spontaneous Scale Symmetry Breaking and Inflation in a
Higgs-Dilaton-Weyl Framework”**

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr Pauliny Michalak, wykonanej w Instytucie Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem prof. dr. hab. Zygmunta Lalaka, jest szczegółowa analiza modeli teoretycznych wykraczających poza ramy Modelu Standardowego cząstek elementarnych. Autorka koncentruje się na formalizmie opartym na spontanicznym łamaniu symetrii skali, wprowadzeniu pola dylatonowego oraz zastosowaniu geometrii Weyla jako naturalnego środowiska dla konstrukcji teorii lokalnie skalo-niezmienniczych. W centrum rozważań znajduje się problem genezy fundamentalnych skal masowych, w szczególności skali elektrosłabej i skali Plancka, a także pytanie o możliwość ich dynamicznego wygenerowania bez konieczności ręcznego wprowadzania parametrów wymiarowych do lagranżjanu teorii. Istotnym nurtem badań przedstawionych w rozprawie jest również zastosowanie analizowanego modelu do opisu zjawisk zachodzących we wczesnym Wszechświecie, takich jak ewolucja pól w wysokiej temperaturze, przejścia fazowe oraz inflacja kosmologiczna. Tematyka rozprawy dotyczy styku kwantowej teorii pola, grawitacji i kosmologii teoretycznej, i podejmuje aktualne zagadnienia współczesnej fizyki fundamentalnej.

Rozprawa doktorska mgr P. Michalak liczy 122 strony i składa się ze streszczenia, wprowadzenia, dziewięciu rozdziałów merytorycznych, podsumowania oraz pięciu dodatków. Bibliografia obejmuje obszerny zestaw 117 pozycji dotyczących kwantowej teorii pola, kosmologii inflacyjnej, geometrii Weyla oraz modeli skalo-niezmienniczych. Rozprawa napisana jest w języku angielskim.

Wstęp rozprawy doktorskiej mgr P. Michalak zawiera jasne przedstawienie motywacji badań. Autorka wychodzi od znanych ograniczeń Modelu Standardowego, takich jak problem hierarchii czy arbitralność skal masowych, i wskazuje symetrię skali jako możliwy punkt wyjścia do bardziej fundamentalnego opisu natury. Szczególnie interesujące jest

podkreślenie roli geometrii Weyla, w której dodatkowe pole skalarne – dylaton – pojawia się w sposób naturalny, a nie jako sztucznie dołączony składnik modelu. Wstęp ten jest klarowny i dobrze osadza temat pracy w aktualnym kontekście badań teoretycznych.

Rozdział 2 poświęcony jest omówieniu kwantowego potencjału efektywnego. Autorka przedstawia formalizm funkcyjnych generujących, działania efektywnego oraz jednopętlowych poprawek pochodzących od pól skalarnych, fermionowych i cechowania. Jest to materiał w znacznym stopniu podręcznikowy, jednak zaprezentowany starannie i z dbałością o samodzielność wywodu. Rozdział ten spełnia rolę solidnego fundamentu technicznego dla dalszych analiz.

Rozdział 3 dotyczy kwantowej symetrii skali. Mgr P. Michalak omawia w nim regularizację zachowującą symetrię skali poprzez wprowadzenie zależnej od pola skali renormalizacji. Choć wyniki zaprezentowane w tym rozdziale są znane, na podkreślenie zasługuje ich ciekawa prezentacja, dowodząca głębokiej znajomości tej tematyki przez Autorkę

W rozdziale 4, mgr P. Michalak przedstawia podstawowe własności geometrii konforemnej Weyla i sposób, w jaki zbudować można sprzężenia grawitacji do pól Modelu Standardowego w ramach tej struktury geometrycznej. Rozdział ma również charakter przeglądowy i nie zawiera oryginalnych wyników Autorki, lecz został przygotowany w sposób potwierdzający dobrą znajomość literatury przedmiotu. Stanowi fundament, na którym oparta jest dalsza część rozprawy, a obawiam się, że nie bardzo rozumiem zaprezentowaną w nim logikę. Według wywodu Autorki, konstrukcja rozpoczyna się od zapostulowania fundamentalnej roli niezmienniczości skalowania, co prowadzi do skonstruowania działań (4.10) i (4.12). Następnie niezmienniczość ta zostaje złamana, przez wprowadzenie skali masy (4.12). Owa skala utożsamiona jest następnie z masą Plancka (zapewne dlatego, by uzyskanie w ten sposób działanie posiadało kanoniczny człon Einsteina Hilberta). Powstaje pytanie, po co ta cała wycieczka do geometrii Weyla i niezmienniczości skalowania, jeśli ostateczne działanie (4.14) uzyskane jest nie w wyniku pewnej zasady dynamicznej, lecz za pomocą brutalnego złamania struktury wyjściowej teorii?

Mam też drobną uwagę do prezentacji w tym rozdziale: prezentując reguły transformacyjne, Autorka postanowiła oznaczyć symbolem F ogólne pola, co jest nieco konfundujące, jako że tą samą literą F oznaczone są, co jest standardem, natężenia pola Weyla i pól cechowania.

Rozdział 5 poświęcony jest analizie skalo-niezmiennej sektora Higgsa sprzężonego z geometrią Weyla. Autorka omawia strukturę potencjału klasycznego i poprawki jednopętlowe, a także rolę dylatonu sprzężonego z neutralną składową pola Higgsa. Jest to centralna część konstrukcyjna całej rozprawy, przygotowująca grunt pod oryginalne wyniki przedstawione w dalszych rozdziałach. W rozdziale tym nie jest dla mnie jasne, dlaczego, w podrozdziale 5.2 Autorka, ni stąd, ni zowąd, rozważa równania pola na tle FRW, a nie równania w ogólnej czasoprzestrzeni, jeśli i tak interesuje ją tylko forma potencjału? Dalej, w podrozdziale 5.4 mgr. P. Michałak rozważa poprawki jednopętlowe w przypadku, gdy oddziaływania grawitacyjne są nieobecne. Jako że rozprawa dotyczy fizyki w zakrzywionej czasoprzestrzeni, powstaje naturalne pytanie, jak krzywizna czasoprzestrzeni wpływa na uzyskane w tym rozdziale wyniki i przy jakich warunkach może być zaniedbana.

Rozdział 6 zawiera oryginalną analizę mgr. P. Michałak odnoszącą się do oddziaływania grawitacji z dylatonem oraz badanie warunków odsprężenia, czyli odzyskania standardowego sektora Higgsa w płaskiej czasoprzestrzeni. Rozdział kończy dyskusja realizacji hipotezy słabej grawitacji (Weak Gravity Conjecture), prowadząca do ograniczeń na sprzężenie cechowania w modelu.

W rozdziale tym pojawia się argument, który wydaje mi się niezrozumiały. Autorka pisze „To keep the action finite as $M_P \rightarrow \infty$, the curvature R must approach zero.” Po pierwsze, nie rozumiem, co to znaczy $M_P \rightarrow \infty$: masa Plancka jest wymiarową stałą sprzężenia, posiadającą określoną wartość, nie rozumiem więc, jaki jest sens mówienia o tym, że jest ona nieskończona. Można oczywiście rozważać granicę dużego stosunku masy Plancka do pewnej innej skali masy, ale jeśli właśnie to Autorka miała na myśli, to powinna precyzyjnie to wyartykułować. Po drugie i ważniejsze, nie bardzo rozumiem, dlaczego klasyczne działanie grawitacyjne miałyby nie być nieskończone – jest ono nieskończone dla olbrzymiej większości nie-próżniowych rozwiązań równań Einsteina na niezwartej czasoprzestrzeni. Po

trzecie, nawet jeśli przyjąć logikę wywodu Autorki, zupełnie niezrozumiałe jest odrębne traktowanie członu Einsteina-Hilberta i masowego członu pola wektorowego Weyla, które w formalnej granicy $M_P \rightarrow \infty$ są podobnie dominujące.

Rozdział 7 ma charakter wprowadzający i dotyczy kwantowej teorii pola w skończonej temperaturze. Podobnie jak wcześniejsze partie przeglądowe, został napisany rzeczowo i przejrzysto. Materiał ten stanowi naturalne przygotowanie do najciekawszych, w mojej ocenie, wyników rozprawy zawartych w rozdziale 8.

Rozdział 8 przedstawia analizę spontanicznego łamania symetrii skali w wysokiej temperaturze. Autorka bada poprawki temperaturowe do potencjału efektywnego oraz numerycznie śledzi ewolucję pól Higgsa i dylatonu w gorącym, rozszerzającym się Wszechświecie. Wynik, zgodnie z którym odpowiednie warunki początkowe mogą prowadzić do fizycznie dopuszczalnego stanu próżniowego oraz dynamicznego wygenerowania skal masowych, uważam za szczególnie interesujący i oryginalny wkład Autorki.

Rozdział 9 poświęcony jest inflacji kosmologicznej w badanym modelu. Autorka analizuje dynamikę slow-roll zarówno na poziomie klasycznym, jak i po uwzględnieniu poprawek kwantowych. Omawia także ograniczenia unitarności oraz widmo fal grawitacyjnych. Na uznanie zasługuje ambitne połączenie technik teorii pola, grawitacji i współczesnej kosmologii obserwacyjnej. W szczególności istotne jest wskazanie obszarów przestrzeni parametrów zgodnych z danymi eksperymentalnymi.

Na tym kończy się główna część merytoryczna rozprawy doktorskiej. Pomimo paru wątpliwości, które wyraziłem powyżej, w mojej ocenie jest ona – jako całość – dobrze napisana, logicznie uporządkowana i spójna. Autorka wykazuje bardzo dobrą znajomość zaawansowanych metod kwantowej teorii pola, teorii oddziaływań fundamentalnych oraz kosmologii relatywistycznej. Potrafi również sprawnie łączyć zagadnienia formalne z pytaniami o znaczeniu fizycznym.

W podsumowaniu, nie mogę jednak nie sformułować kilku drobnych uwag krytycznych. Po pierwsze, obszerne partie przeglądowe – zwłaszcza dotyczące podstawowego formalizmu

potencjału efektywnego oraz teorii pola w skończonej temperaturze – momentami mogłyby zostać skrócone na rzecz szerszego omówienia własnych wyników Autorki. Po drugie, ambitny zakres pracy powoduje, że niektóre wątki, na przykład związane z testowalnością eksperymentalną modelu, zostały jedynie zasygnalizowane.

Mgr Paulina Michalak jest współautorką dwóch opublikowanych w JHEP oryginalnych prac naukowych bezpośrednio związanych z tematyką rozprawy, obejmujących problem spontanicznego łamania symetrii skali w wysokiej temperaturze oraz inflację w badanym modelu oraz jednego samodzielnego doniesienia konferencyjnego. Taki dorobek zwyczajowo uznaje się za wystarczający dla doktoratu z dziedziny fizyki teoretycznej.

Pomimo zgłoszonych wyżej uwag uważam, że rozprawa doktorska mgr Pauliny Michalak stoi na wysokim poziomie merytorycznym i została przygotowana bardzo starannie. Dowodzi ona szerokiej wiedzy Autorki oraz jej dojrzałości badawczej. Przedstawione wyniki stanowią wartościowy wkład w badania nad teoriami rozszerzającymi Model Standardowy oraz ich zastosowaniami kosmologicznymi.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr Pauliny Michalak spełnia ustawowe, formalne i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim z dziedziny fizyki teoretycznej. Wnoszę o dopuszczenie mgr Pauliny Michalak do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. dr hab. Jerzy Kowalski-Glikman

Narodowe Centrum Badań Jądrowych i

Instytut Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Wrocławskiego

Warszawa, 2 maja 2026