

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

Praca doktorska Pani Pauliny Michalak pt. “Spontaneous Scale Symmetry Breaking and Inflation in a Higgs-Dilaton-Weyl Framework” została przygotowana w Instytucie Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Warszawskiego. Promotorem pracy był prof. dr hab. Zygmunt Lalak.

Mechanizm Higgsa, oparty na skalarnym polu Higgsa, stanowi ugruntowany doświadczalnie proces łamania symetrii elektroslabej. Uwzględnienie kwantowej natury pola, której nie można zaniedbać z uwagi na fakty eksperymentalne (detekcja kwantów pola Higgsa), prowadzi jednak do tzw. problemu hierarchii, zidentyfikowanego na przełomie lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX wieku. Problem ten wiąże się z formą wiodących poprawek kwantowych do masy bozonu Higgsa, tak, że $\delta m^2 \sim \lambda \Lambda^2$, gdzie λ jest stałą samosprężenia pola (w modelu ϕ^4) a Λ jest skalą obcięcia dla pola Higgsa. Stąd, próba ekstrapolowania pola Higgsa do skal energii znacznie powyżej skal energii dostępnych w eksperymentach wysokich energii, w szczególności, do skal bliskich skali Plancka, prowadzi do rozbieżności przewidywań dot. masy bozonu Higgsa.

Przedmiotem dysertacji jest analiza możliwości ekstrapolacji fizyki pola Higgsa do skal energii porównywalnych ze skalą Plancka. Podejście to bazuje na, znanym w literaturze, pomysśle wprowadzenia symetrii skalowania, która nie dopuszcza obecności członów masowych w lagranżjanie pola Higgsa. W konsekwencji, masa jest generowana wyłącznie jako wynik poprawek radiacyjnych. Ponadto łamanie symetrii skalowania jest wprowadzane dynamicznie poprzez sprzężenie z pomocniczym polem dylatonowym, które kontroluje proces spontanicznego łamania tej symetrii, a w konsekwencji wyznacza skalę masową pola Higgsa.

W celu zbudowania konsystentnego opisu procesu łamania symetrii skalowania, sektor Higgsa uzupełniony został o sektor grawitacyjny, opisywany przez grawitację Weyla oraz (wynikający z teorii Weyla) dylaton. Model ten jest poddany szczegółowej analizie, w szczególności pod kątem termicznych poprawek do potencjału efektywnego pola Higgsa. Ponadto, praca zawiera oryginalne rezultaty dotyczące analizy implikacji kosmologicznych analizowanego modelu, w kontekście inflacyjnym. To zaś może stanowić drogę do narzucenia ograniczeń obserwacyjnych na rozważany model fizyki, wykraczający poza Model Standardowy cząstek elementarnych.

Otrzymane wyniki dobrze wpisują się w aktualne trendy badawcze, które starają się dostarczyć możliwego opisu teoretycznego, wykraczającego nieznacznie poza skale energii dostępne obecnie w eksperymentach fizyki wysokich energii. Z drugiej strony, dyskutowana fizyka prowadzi do przewidywań dotyczących fizyki wczesnego wszechświata, wgląd do której stopniowo odsłaniają współczesne obserwacje kosmologiczne. Stąd też, rozwijany kierunek

badawczy daje unikatową perspektywę wykorzystania komplementarnych metod empirycznej weryfikacji i stanowi cenną wskazówkę do dalszych poszukiwań doświadczalnych i obserwacyjnych.

Zaprezentowane wyniki stanowią wkład do w dwóch publikacji:

1. Z. Lalak and P. Michalak, “Spontaneous scale symmetry breaking at high temperature,” JHEP **05** (2023), 206 [arXiv:2211.09045 [hep-ph]].
2. Z. Lalak and P. Michalak, “Inflation in the scale symmetric Standard Model and Weyl geometry,” JHEP **02** (2026), 041, [arXiv:2506.14617 [hep-ph]].

Praca ma 137 stron i została napisana w języku angielskim. Dysertacja została podzielona na dziesięć rozdziałów (zawierających podrozdziały), pięć dodatków oraz bibliografię, zawierającą 117 pozycji literaturowych.

Rozdział 1 zawiera motywację do podjęcia badań stanowiących przedmiot dysertacji. Punktem wyjścia do podjętej tematyki jest próba zrozumienia niskiej wartości masy bozonu Higgsa, względem masy Plancka, co jest związane z problemem hierarchii. Strategia podjęta w dysertacji bazuje na wykorzystaniu mechanizmu łamania symetrii skalowania, co było przedmiotem licznych wcześniejszych rozważań. W rozważanym podejściu, Autorka rozważa sprzężenie sektora Higgsa do grawitacji Weyla, która dostarcza dodatkowego skalarnego stopnia swobody (dylatonu), niezbędnego do realizacji dyskutowanego mechanizmu spontanicznego łamania symetrii.

Rozdział 2 wprowadza technikę potencjału efektywnego, stosowaną w kwantowej teorii pola z oddziaływaniem. Metodologia ta pozwala na systematyczne uwzględnianie kwantowych poprawek do potencjału pola skalarnego. Szczegółową analizę przeprowadzono dla poprawek 1-pętlowych dla przypadku pola skalarnego, pola fermionowego z masą będącą liniową funkcją pola skalarnego oraz dla teorii Yanga-Millsa.

W Rozdziale 3, przedyskutowana została procedura regularyzacji wymiarowej, mająca zastosowanie do nadania fizycznego znaczenia rozbieżnym całkom otrzymanym w Rozdziale 2. Procedura ta nieodzownie wiąże się z wprowadzeniem wymiarowej skali energii μ , która w rozważanym przypadku jest funkcją wartości pola dylatonowego $\mu = \mu(\phi_0)$. Procedura regularyzacji wymiarowej zastosowana została do przypadków dyskutowanych w Rozdziale 2.

W Rozdziale 4, Autorka przybliży czytelnikowi koncepcję geometrii Weyla. Przeanalizowane zostały przypadki sprzężenia grawitacji Weyla z typami pól dyskutowanymi we wcześniejszych rozdziałach. W rozdziale tym pokazano, w jaki sposób dylatonowy stopień swobody można uzyskać z grawitacji Weyla.

Dyskusja ta nie jest jednak do końca jasna. W szczególności, wyjaśnienia wymaga znaczenie implikacji (4.11).

Ponadto, jeśli teoria jest niezmiennicza ze względu na transformację konforemą, to jaki jest cel ustalania współczynnika Ω , pomiędzy równaniem (4.12) a (4.13)?

Stwierdzenie, po wzorze (4.14), dotyczące naturalności odzyskania skali Plancka pozostaje niejasne. Skala masy M nie jest a priori równa masie Plancka, musi do niej zostać przyrównana na zasadzie powiązania otrzymanego członu działania z członem Hilberta-Einsteina.

W rozdziale zabrakło także obiektywnej dyskusji geometrii Weyla, wskazującej na jej silne i słabe strony oraz porównania z alternatywnymi teoriami grawitacji.

Rozdział 5 prezentuje dyskusję pola Higgsa sprzężonego do grawitacji Weyla oraz pola dylatonowego. W rozdziale tym, przedyskutowana została przestrzeń parametrów modelu oraz znaczenie niewielomianowych operatorów pojawiających się w wyniku kwantowej regularyzacji. Choć znaczna część prezentowanego formalizmu opiera się na wcześniejszych wynikach literaturowych, rozdział ten stanowi fundament dla dalszych, oryginalnych analiz przedstawionych w kolejnych częściach rozprawy.

Rozdział 6 zawiera oryginalną analizę możliwych fizycznych implikacji wcześniejszych rozważań. Analizowana jest, w szczególności, granica słabego pola grawitacyjnego (przestrzeń Minkowskiego), w której odzyskiwany jest standardowy sektor Higgsa, znany z Modelu Standardowego. Przedmiotem dyskusji jest także tzw. Weak Gravity Conjecture, pozwalająca na wprowadzenie ograniczenia na stałą sprzężenia q , co stanowi oryginalny i ciekawy element pracy.

W rozdziale 7 Autorka przybliży podstawowe koncepcje związane z termiczną teorią pola. Szczególnie istotne z perspektywy kosmologicznych przejść fazowych jest wyprowadzenie termicznych poprawek do potencjału efektywnego.

Metodologia wprowadzona w Rozdziale 7 została zastosowana w Rozdziale 8, podejmującym dyskusję spontanicznego łamania symetrii w wyniku obecności efektów termicznych. Rozdział ten zawiera wyniki stanowiące kontrybucję do artykułu [1].

Rozdział 9 zawiera finalną dyskusję dotyczącą zastosowania wcześniejszych wyników do przypadku kosmologicznej inflacji. Rozdział ten zawiera wyniki stanowiące kontrybucję do artykułu [2].

W rozdziale tym założono, że spełnione są standardowe zależności pomiędzy indeksem skalarnym n_s oraz parametrem r a współczynnikami slow-roll. Należy jednak pamiętać, że zależności te wynikają z rozważań teorii zaburzeń skalarnych i tensorowych, która to dla teorii Weyla, w ogólności może prowadzić, do odmiennych wyników. W dysertacji nie przed-

stawiono argumentacji stojącej za możliwością odwołania się do tych wyrażen. Warto dodać, że typowym zabiegiem jest tu przejście z układu Jordana (z nieminimalnym sprzężeniem) do układu Einsteina (bez nieminimalnego sprzężenia), co, jak się obecnie rozumie, ma wpływ na kwantową teorię zaburzeń kosmologicznych.

Rozdział 10 stanowi podsumowanie wyników pracy. Należałoby jednak oczekiwać bardziej pogłębionej dyskusji uzyskanych rezultatów, wykraczającej poza samo przywołanie najważniejszych osiągnięć przedstawionych w rozprawie. Również zarys perspektyw dalszych badań przedstawiony w tym rozdziale pozostaje zbyt ogólny i wymaga szerszego omówienia oraz bardziej krytycznej analizy.

Reasumując, praca stanowi spójny ciąg rozumowania, zgodny z metodologią pracy naukowej. Analiza pracy dostarcza przekonania o bardzo dobrym opanowaniu metod kwantowej teorii pola, technik renormalizacji, geometrii Weyla oraz metod stosowanych we współczesnej kosmologii teoretycznej. Autorka niewątpliwie wypracowała wysoki poziom doskonałości w prowadzeniu rachunków i analiz w dyskutowanym obszarze.

Rozprawa została przygotowana z należytą starannością, uwzględniając szereg pomocniczych dyskusji, co zwiększyło jej pedagogiczny charakter.

Na podstawie zawartości dysertacji można dojść do wniosku, że Autorka osiągnęła wysoki stopień samodzielności badawczej, zarówno w zakresie prowadzonych obliczeń jaki i interpretacji otrzymanych wyników.

Dysertacja została przygotowana w oparciu o dwie publikacje, opublikowane w renomowanym czasopiśmie fizycznym Journal of High Energy Physics, będącym jednym z najbardziej prestiżowych czasopism w dziedzinie fizyki wysokich energii. Czasopismu temu przypisano 140 punktów w liście czasopism MEiN. Publikacje te były cytowane łącznie 6 razy, według bazy INSPIRE HEP.

Część z moich uwag do pracy zawarłem w powyższej dyskusji. Do dalszych komentarzy, jakie nasuwają się po zapoznaniu treścią pracy, można zaliczyć:

- Dla obiektywności rozważań należałoby przedyskutować przypadek w którym pole Higgsa jest efektywnym modelem skalarnym, którego skala obcięcia nie wykracza znacząco poza skalę ~ 10 TeV. Jakie argumenty przemawiają za, a jakie przeciw takiej możliwości?
- Różnica pomiędzy symetrią skalowania a symetrią konforemna nie została precyzyjnie zdefiniowana. Wydaje się, że pojęcia te są w pracy stosowane zamiennie, kiedy, w rzeczywistości, symetria skalowania jest węższa do pełnej symetrii konforemnej. Zagadnienie to należałoby poddać dodatkowej dyskusji.
- Fizyczne znaczenie wyboru konkretnej wartości parametru konforemnego Ω pozostaje niejasne. Czy wybór wartości Ω poprzez ustalenie ϕ_0 należy interpretować jako wybór

cechowania czy wynik spontanicznego łamania symetrii skalowania? Czym fizycznie różnią się te dwa przypadki?

- Z treści rozprawy nie jest jasne, w jakim stopniu proponowany model prowadzi do przewidywań odróżniających go od alternatywnych modeli inflacyjnych? Które przyszłe obserwacje mogłyby potencjalnie sfalsyfikować analizowany scenariusz?

Powyższe uwagi nie stanowią krytycznych zastrzeżeń wobec treści dysertacji, lecz należy je traktować jako zachętę do dalszej, pogłębionej eksploracji zagadnień poruszonych w pracy. Nie wpływają one na ogólnie wysoką ocenę rozprawy, zarówno pod względem koncepcyjnym, jak i pod względem staranności przeprowadzonej analizy oraz jej zgodności z aktualnymi kierunkami badań i zainteresowaniami środowiska naukowego.

Podsumowując, stwierdzam, że praca Pani Pauliny Michalak pt. “Spontaneous Scale Symmetry Breaking and Inflation in a Higgs-Dilaton-Weyl Framework” spełnia warunki określone w Art. 186 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024 r. poz. 1571) i wnioskuję o przejście do kolejnego etapu procedury związanej z przyznaniem Pani Paulinie Michalak stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.

Z poważaniem,



dr hab. Jakub Mielczarek, prof. UJ
Instytut Fizyki Teoretycznej
Uniwersytet Jagielloński