

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

Michał Artymowski

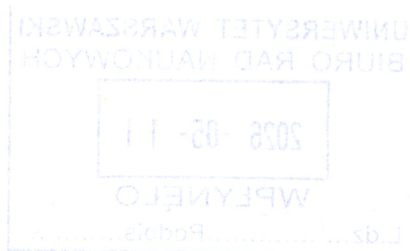
8 maja 2026

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr Pauliny Michalak podejmuje ważny problem teoretyczny dotyczący fundamentalnego pochodzenia skal masowych w fizyce wysokich energii oraz ich kosmologicznych konsekwencji. Szczególny nacisk Autorka położyła na hierarchię pomiędzy skalą elektroslabą a skalą Plancka. Autorka koncentruje się na skalarnych rozszerzeniach Modelu Standardowego oraz Ogólnej teorii względności. Praca opiera się na jednej publikacji opublikowanej w materiałach pokonferencyjnych [1] i dwóch publikacjach opublikowanych w czasopiśmie “Journal of High Energy Physics”: [2] i [3], będącym czołowym czasopiśmie naukowym w środowisku fizyki wysokich energii.

Sam wybór problematyki należy uznać za bardzo trafny. Wpisuje się on bezpośrednio w jeden z centralnych nurtów współczesnej fizyki teoretycznej, obejmujący poszukiwanie bardziej fundamentalnych struktur leżących u podstaw Modelu Standardowego oraz kosmologii wczesnego Wszechświata. Praca podzielona jest na aż 10 rozdziałów i 5 dodatków.

Rozdział 2 ma charakter dydaktyczny. Autorka wprowadza pojęcie potencjałów efektywnych, zawierających poprawki wyższego rzędu. Autorka wyprowadza tu wyniki znane z literatury. W rozdziale 3, także bazującym na dobrze dobranej literaturze, Autorka omawia regularyzację wymiarową, niezbędną do analizy modelu w 4 wymiarach. W konsekwencji Autorka otrzymuje efektywny potencjał, który jest niezmienniczy ze względu na rozważaną skalę pola skalarnego.

W rozdziale 4 Autorka omawia konforemna geometrię Weyla, czyli alternatywną teorię grawitacji sprzężoną do szeregu pól materii, w tym do pól cechowania. Na poziomie efektywnego działania jest to model niezwykle podobny do grawitacji Bransa-Dicke’go. Był to dla mnie szczególnie interesujący i dobrze napisany rozdział. W podrozdziale 4.3 Autorka sprzęga wspomniany model z cząstką Higgsa, tworząc pomost pomiędzy teoriami zmodyfikowanej grawitacji,



których skale stosowalności sięgają okolic skali Plancka, a fizyką skali elektro-słabej. Rozdział ten, podobnie jak poprzednie, ma charakter dydaktyczny i nie stanowi nowego ujęcia.

Mankamentem tego rozdziału jest brak omówienia problemu ekranowania pól skalarnych we współczesnym wszechświecie. Chcąc odtworzyć grawitację Newtonowską w niskich energiach, modele B-D mają zazwyczaj bardzo praktyczną cechę: masa dodatkowego skalaru pośredniczącego w grawitacji jest bardzo duża dla gęstych ośrodków. Model przedstawiony przez Autorkę ma najprawdopodobniej tę samą cechę w niskich energiach (co byłoby szczególnie widoczne w układzie Einsteina), ale Autorka nie wykazała tego w swojej pracy. Na obronę Autorki trzeba zaznaczyć, że ta tematyka jest pośrednio poruszona w rozdziale 6.2.

W rozdziale 5 Autorka wykorzystuje wyniki poprzednich rozdziałów, analizując cząstkę Higgsa sprzężoną do geometrii Weyla i dylatonu. W konsekwencji Autorka dostaje model o Lagrangianie niezwykle podobnym do inflacji Higgsa, w której płaskość efektywnego potencjału jest zapewniona poprzez nieminimalne sprzężenie do krzywizny. Wyjątkowo ciekawym wynikiem jest tu analiza skal masowych. Próżniowa wartość oczekiwana dylatonu wyznacza efektywną skalę Plancka, która dzięki temu zyskuje wartość powiązaną z fizyką niższych energii. Bardzo podoba mi się naturalność hierarchii kolejnych skal i sprzężeń omówiona w tym rozdziale.

W tym rozdziale zabrakło mi zacytowania klasycznej pracy [4], w której Autorzy rozważają bardzo podobne działanie, dyskutując między innymi o problemie unitarności.

W rozdziale 6 Autorka skupia się na fizyce dylatonu i jego sprzężenia z sektorem Higgsa. Jest to wyjątkowo ważne zagadnienie, gdyż bez skutecznego odtworzenia fizyki Higgsa z Modelu Standardowego model omawiany w tej pracy byłby niekonsystentny z danymi obserwacyjnymi. Autorka pokazuje też, jak grawitacja (w swojej nieminimalnie sprzężonej formie) odspręga się od sektora Higgsa.

Wyjątkowo podobał mi się podrozdział 6.3, w którym Autorka argumentuje, że w każdej teorii grawitacji sama grawitacja powinna być najsłabszą z sił. Narzuca to dodatkowe ograniczenia na omawiany model, klarownie zobrazowane na wykresie 6.1.

Rozdział 7, także będący kompilacją wyników znanych z literatury, omawia poprawki termiczne do kwantowej teorii pola. Jest to niezwykle ważne zagadnienie, zwłaszcza w kontekście przejść fazowych w fizyce wczesnego Wszechświata. Autorka omawia tu potencjały efektywne dla pól skalarnych, fermionów i pól cechowania.

Narzędzia wprowadzone w rozdziale 7 są następnie wykorzystywane w rozdziale 8, opartym na oryginalnej pracy Autorki [2]. Jest to wyjątkowo interesujący rozdział, gdyż tematyka elektro-słabej przemiany fazowej jest źródłem wielu

fundamentalnych (i częściowo mierzalnych) zjawisk fizycznych, jak przemiany fazowe pierwszego rodzaju i powstanie spektrum fal grawitacyjnych.

Autorka omawia tu pola skalarne: Higgsa i dylatonu, których efektywne potencjały zawierają poprawki termiczne. Pokazuje mechanizm łamania symetrii skalowania i łamania symetrii elektrosłabej w niskich temperaturach. Ważną cechą omawianego modelu jest fakt, że przemiana fazowa jest drugiego rodzaju: pole Higgsa gładko zmienia swój potencjał, a ewolucja pola prowadzi do obecnego minimum bez udziału efektu tunelowego, bobli nowej fazy i w konsekwencji fal grawitacyjnych.

W przedstawionej analizie zastanawia mnie, jak generyczne są warunki początkowe zaprezentowane przez Autorkę, która pisze "We demonstrated that there are possible initial conditions for the evolution of fields in the hot Universe to reach the physical vacuum state, where both scale and electroweak symmetry are broken." Czy Autorka ma pomysł na oszacowanie, jak duża część przestrzeni fazowej warunków początkowych prowadziłaby do przedstawionych rezultatów?

Zaskakują również wyniki "nierealistycznych" modeli. Czy rosnąca wartość parametru Hubble'a oznacza tu gwałtowny wzrost niejednorodności Wszechświata? Czy tego typu mechanizm mógłby doprowadzić do powstania pierwotnych czarnych dziur?

W rozdziale 9, bazującym na publikacji Autorki [3], Autorka omawia kosmologiczną ewolucję wczesnego Wszechświata w kontekście dominacji pola Higgsa sprzężonego z dylatonem. Początkowa część rozdziału stanowi dydaktyczny wstęp do inflacji i przybliżenia slow-roll. W rozdziale 9.1.4 Autorka omawia najnowsze ograniczenia obserwacyjne na spektrum mocy pierwotnych niejednorodności inflacyjnych.

W rozdziale 9.2 Autorka używa symetrii konformnej, aby przenieść model z układu Jordana (w którym pola skalarne są nieminimalnie sprzężone do krzywizny) do układu Einsteina (w którym grawitacja ma formę znaną z OTW). Znacząco ułatwia to analizę modelu, nie zmieniając przy tym przewidywanych wartości fizycznych parametrów r i n_s . Użycie oznaczenia τ na pole skalarne o niekanonicznym wyrażeniu kinetycznym wydaje mi się być nieco niefortunne, gdyż w kosmologii inflacyjnej τ interpretuje się zwykle jako czas konforemny.

Autorka otrzymuje model, który jednoznacznie przypomina inflację Starobinśkiego lub Higgsa. W równaniu (9.59) otrzymuje płaskowyż inflacyjny. Autorka porównuje otrzymane wartości r i n_s z ograniczeniami obserwacyjnymi. Poprawna wartość r nie jest tu zaskoczeniem. Warto zaznaczyć, że dla odpowiednio dużych wartości ξ Autorka powinna otrzymać niemalże dowolnie małe r . Interesującym jest, jak ciężko otrzymać poprawną wartość n_s w omawianym modelu, która okazuje się zazwyczaj za duża, a nie za mała, jak w przypadku modelu Starobinśkiego/Higgsa. Na wykresie 9.6 Autorka prezentuje przykłady sprzężeń, dla których pierwotne niejednorodności w pełni zgadzają się z danymi.

Jest to dla mnie wyjątkowo interesujący rozdział, gdyż pozwala na narzucenie dodatkowych ograniczeń obserwacyjnych na stałą ξ_0 , a także łączy fizykę skali GUT z badaną w akceleratorach fizyką elektrosłabą. Autorka pokazuje, jak



szerokie zastosowania ma omawiany przez nią model. Ciekawostą jest, że ostateczna postać Lagrangianu ma charakter jednopolowy (patrz skalarna część równania 9.45). Zastanawiam się, czy jest możliwe, aby w modelu Autorki otrzymać efekty inflacji wielopolowej, jak np. produkcję perturbacji izokrzywiznowych?

W rozdziale 9.4 Autorka omawia poprawki pętlowe do swojego modelu. Pokazuje, jak ich obecność wpływa na spektrum mocy pierwotnych niejednorodności. Fakt, że wyniki nie różnią się zbyt od modelu bez poprawek, jest dobrą wiadomością. Pokazuje to, że potencjał inflacyjny nie traci płaskości po uwzględnieniu poprawek pętlowych. W dalszej części tego rozdziału Autorka omawia także niezwykle istotne pojęcie unitarności i wynikające z niego ograniczenie na maksymalną skalę energii. Otrzymane wyniki są konsystentne z inflacją Higgsa.

Podsumowując: Autorka sprawnie omówiła zaawansowany materiał przygotowujący ją do reprezentacji jej oryginalnych wyników. Praca jest napisana klarownie, a kolejne rozdziały w naturalny sposób stanowią swoją kontynuację. Autorka przedstawiła niezwykle ciekawe rezultaty swoich badań, które w ramach jednego modelu opisują najważniejsze wydarzenia w historii Wszechświata od skali GUT do skali elektroslabej. Co więcej, model zaprezentowany przez Autorkę ma niemalże potencjał do dalszych badań.

Pewnym mankamentem jest niewielka liczba prac opublikowanych przez Autorkę oraz ich niska cytowalność. W okresie studiów doktorskich Autorka opublikowała jedynie 2 artykuły, z których żaden nie uzyskał ponad 10 cytowań. Należy oczywiście pamiętać, że Autorka podjęła się tematów dotyczących bardzo fundamentalnych kwestii fizyki teoretycznej, a nie fenomenologii znanych modeli. Ten drugi wybór mógłby jej przynieść lepsze statystyki bibliograficzne, ale byłby zapewne mniej interesujący z punktu widzenia fizyki.

Jestem przekonany, że praca ta spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Z przyjemnością wnoszę o dopuszczenie Pani magister Pauliny Michalak do publicznej obrony.

Literatura

Michał Bdykowski

- [1] P. Michalak, "Origin of mass scales in scale-symmetric extension of Standard Model," PoS **CORFU2022** (2023), 045 doi:10.22323/1.436.0045
- [2] Z. Lalak and P. Michalak, "Spontaneous scale symmetry breaking at high temperature," JHEP **05** (2023), 206 doi:10.1007/JHEP05(2023)206 [arXiv:2211.09045 [hep-ph]].
- [3] Z. Lalak and P. Michalak, "Inflation in the scale symmetric Standard Model and Weyl geometry," JHEP **02** (2026), 041 doi:10.1007/JHEP02(2026)041 [arXiv:2506.14617 [hep-ph]].



- [4] F. Bezrukov, A. Magnin, M. Shaposhnikov and S. Sibiryakov, “Higgs inflation: consistency and generalisations,” JHEP **01** (2011), 016 doi:10.1007/JHEP01(2011)016 [arXiv:1008.5157 [hep-ph]].

