

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr.
Macieja Kierkli pod tytułem “Theoretical
consistency and phenomenology of supercooled
cosmological phase transitions”

Michał Artymowski

2 marca 2026

Rozprawa doktorska Pana mgr. Macieja Kierkli dotyczy fundamentalnego zagadnienia przemian fazowych we wczesnym Wszechświecie. Jest ono ściśle powiązane ze zmierzonymi przed ponad dekadą falami grawitacyjnymi, które są jednym z podstawowych narzędzi weryfikacji obserwacyjnej kosmologicznych przemian fazowych. Jest to więc praca podejmująca szczególnie aktualne i dyskutowane przez środowisko naukowe tematy. Praca jest oparta na pięciu pozycjach biograficznych [1, 2, 3, 4, 5], z czego [1, 2] mają ponad 50 cytowań na portalu inspirehep.net. Pozycje [1, 2, 3] zostały też opublikowane w czołowym czasopiśmie naukowym fizyki wysokich energii JHEP. Prace Pana mgr. Kierkli są przy tym cytowane przez czołowe autorytety kosmologii i fizyki cząstek elementarnych.

W rozdziale 2 Autor wprowadza pojęcie działania efektywnego. Cały rozdział ma charakter dydaktyczny i stanowi świetny wstęp do dalszej części pracy. Szczególnie wartościowe jest omówienie w rozdziale 2.2 przykładów praktycznych, jak dobrze znany przypadek modelu $\frac{1}{2}m^2\phi^2 + \frac{1}{4}\lambda\phi^4$. Autor krok po kroku pokazuje, jak poprawki kwantowe zmieniają pozycję minimum efektywnego potencjału. Jedynym mankamentem tego rozdziału jest brak ilustracji, które mogłyby zobrazować poprawki kwantowe do potencjałów efektywnych i ich dewiację od ich klasycznych oryginałów. Jak rozumiem, Autor chciał w ten sposób ograniczyć objętość swojej pracy. W rozdziale 2 Autor pokazuje także, jak należy uwzględniać poprawki do potencjałów efektywnych wynikające z renormalizacji i jej skali. Są to wyniki szeroko używane w dalszych częściach pracy.

Rozdział 3 ma także charakter pedagogiczny. Autor omawia w nim zagadnienie przemian fazowych w kwantowej teorii pola w obecności poprawek temperaturowych. Przedstawione tu zagadnienia stanowią fundament teoretyczny kosmologicznych przemian fazowych, których efekty obserwacyjne stanowić mogą podstawowe narzędzie do weryfikacji różnych modeli wczesnego Wszechświata. Podobnie jak w poprzednim rozdziale, wszystkie zagadnienia zilustrowane

są przykładami praktycznymi, jak w podrozdziale 3.3.3. Znacząco zwiększa to wartość dydaktyczną rozprawy doktorskiej. Szczególnie istotne wydają się być rozdziały 3.4 i 3.5, w których Autor omawia powstawanie bombli nowej fazy w termicznych przemianach fazowych pierwszego rodzaju. Kolejny raz chciałbym podkreślić klarowność, z jaką mgr. Kierkla wprowadza kolejne pojęcia. Miałem poczucie, że czytam pracę przeglądową lub podręcznik eksperta z kilkudziesięcioletnim stażem w tej dziedzinie.

Rozdział 4 to wprowadzenie do konkretnego przypadku rozszerzenia modelu standardowego omawianego w tej pracy. Zawiera on oryginalne wyniki Autora i jego Promotorki. Autor dodaje tu nowe pole z symetrią cechowania $SU(2)$. Co istotne, nowe pole należy do ciemnego sektora, a całość jest rozważona bez poprawek pochodzących od niezerowej temperatury. Autor pracowicie wyprowadza tu postać skalarnego potencjału efektywnego. Następnie skupia się na mechanizmie łamania symetrii, świetnie zilustrowanym na rysunku 4.2. W rozdziale 4 Autor pokazał też biegnięcie stałych sprzężenia dla renormalizacji. Cały rozdział jest pełen kluczowych wyników. Autor znajduje ograniczenia na przestrzeń parametrów modelu żądając odtworzenia poprawnej postaci próżni elektrosłabej.

Rozdział 5 rozszerza poprzednią analizę, uwzględniając poprawki termiczne do badanego modelu. Autor rozważa je zarówno w reżimie niskich, jak i wysokich temperatur. Rozdział ten jest mocno inspirowany opublikowanymi pracami Autora i zawiera wiele jego oryginalnych wyników. Szczególnie podoba mi się analiza przedstawiona w rozdziale 5.4, w ramach której Autor uwzględnia “ogony” rozwiązań, będące zazwyczaj źródłem błędów obliczeniowych. Cały rozdział napisany jest niezwykle klarownie i jest pełen świetnych wizualizacji, takich jak rys. 5.4. Rozdział 5.6 to prezentacja wyników symulacji numerycznych przeprowadzonych przez Autora.

W rozdziale 6, najbardziej interesującym z mojego punktu widzenia, Autor rozważa otrzymane modele w kontekście zakrzywionej czasoprzestrzeni. Kosmologiczne przemiany fazowe są bez wątpienia najbardziej obiecującym wynikiem tej pracy. Autor wkłada dużo wysiłku w zobrazowanie przemiany fazowej do stanu spontanicznie złamanej symetrii. Rozdział 6.2 zawiera też dyskusję inflacji termicznej, a w kolejnych częściach rozdziału 6 omawia również reheating w ramach tego modelu. Zastanawia mnie trochę problem pierwotnych niejednorodności krzywizny, które potencjalnie mogłyby być widoczne w CMB. Zastanawia też bardzo niska skala inflacji, która zazwyczaj oznacza znaczący fine-tuning modelu. Bierze się to częściowo z faktu, że typowy model inflacyjny ma parametr ϵ (powiązany ze skalą inflacji) proporcjonalny do stałej rzędu $10^6 - 2$ podzielonej przez liczbę e-foldów, która zazwyczaj wynosi około 60. Niezwykle podobają mi się wyniki z rys. 6.7. Tego typu histogramy świetnie ilustrują, które wyniki numeryczne są typowe dla tego modelu. Rozdział kończy dyskusja na temat stworzonych w czasie przemiany fazowej fal grawitacyjnych o raz porównanie wyników Autora ze spodziewanymi przyszłymi danymi doświadczalnymi.

Praca jest napisana niezwykle klarownie. Kolejność rozdziałów pozwala stopniowo wejść w kolejne rozszerzenia poprzednio omawianych problemów. Ma jednoznacznie oryginalny charakter, jest pełna nowych, ważnych rezultatów otrzymanych przez Autora. Bardzo podoba mi się sposób, w jaki autor pokazał tworzenie się bombli w przemianach fazowych i porównanie otrzymanych fal grawitacyjnych do obecnych i przyszłych czułości detektorów. Praca jest też pełna otwartych pytań i możliwości rozwoju dalszych badań. Szczególnie zainteresowała mnie możliwość zmiany rozważonego przez Autora ciemnego sektora na inną teorię z cechowaniem. Poza termiczną inflacją interesuje mnie też, czy pole skalarne z ciemnego sektora mogłoby być odpowiedzialne za klasyczną inflację kosmiczną, np. dzięki nieminimalnemu sprzężeniu do krzywizny. Jak wyglądałby wówczas reheating i czy sprzężenie do cząstki Higgsa opisane w równaniu 4.3 jednoznacznie ustalałoby jego skalę?

Drobnym mankamentem pracy jest niewielka liczba wykresów i ilustracji. Wydaje się, że praktycznie każdy rozdział zyskałby na lepszej wizualizacji otrzymanych wyników. Widać to szczególnie w (świetnie napisanych) rozdziałach 2 i 3, mających charakter wprowadzenia do tematu teorii efektywnej i przemian fazowych. Zwłaszcza że wszystkie wizualizacje i wykresy zamieszczone w pracy są bardzo dobrej jakości i znacząco ułatwiają zrozumienie omawianych zagadnień. Pragnę zaznaczyć, że jest to niewielki mankament rozprawy doktorskiej mgr. Kierkli, którą poza tym ciężko poważnie skrytykować. Autor wykonał świetną pracę, opisując swoje wyniki bazujące na bardzo dobrym, jak na ten etap kariery naukowej, dorobku naukowym.

Jestem w pełni przekonany, że praca ta spełnia wszystkie wymogi stawiane rozprawom doktorskim. Z przyjemnością wnoszę o dopuszczenie Pana magistra Macieja Kierkli do publicznej obrony. z racji na nietuzinkową jakość niniejszej rozprawy doktorskiej wnoszę też o jej wyróżnienie.

Literatura

- [1] M. Kierkla, A. Karam and B. Swiezewska, “Conformal model for gravitational waves and dark matter: a status update,” JHEP **03** (2023), 007 doi:10.1007/JHEP03(2023)007 [arXiv:2210.07075 [astro-ph.CO]].
- [2] M. Kierkla, B. Swiezewska, T. V. I. Tenkanen and J. van de Vis, “Gravitational waves from supercooled phase transitions: dimensional transmutation meets dimensional reduction,” JHEP **02** (2024), 234 doi:10.1007/JHEP02(2024)234 [arXiv:2312.12413 [hep-ph]].
- [3] M. Kierkla, P. Schicho, B. Swiezewska, T. V. I. Tenkanen and J. van de Vis, “Finite-temperature bubble nucleation with shifting scale hierarchies,” JHEP **07** (2025), 153 doi:10.1007/JHEP07(2025)153 [arXiv:2503.13597 [hep-ph]].

- [4] M. Kierkla, N. Ramberg, P. Schicho and D. Schmitt, “Theoretical uncertainties for primordial black holes from cosmological phase transitions,” [arXiv:2506.15496 [hep-ph]].
- [5] A. Karam, M. Kierkla and B. Świeżewska, “Scale-Invariant Model for Gravitational Waves and Dark Matter,” PoS **CORFU2022** (2023), 106 doi:10.22323/1.436.0106 [arXiv:2303.18122 [astro-ph.CO]].

Wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej
Pana mgr. Macieja Kierkli pod tytułem
“Theoretical consistency and phenomenology of
supercooled cosmological phase transitions”

dr hab. Michał Artymowski
Wydział Matematyczno-Przyrodniczy
Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie

2 marca 2026

Uzasadnienie wniosku:

- 1) Rozprawa doktorska Pana Macieja Kierkli opisuje niezwykle nowoczesną i szeroko dyskutowaną gałąź fizyki wysokich energii
- 2) Opiera się na badaniach opublikowanych w czołowym czasopiśmie dla tej dziedziny
- 3) Wszystkie prace są wielokrotnie cytowane, także przez wiodące autorytety w dziedzinie. Pokazuje to impakt naukowy prac Pana mgr. Kierkli.
- 4) Praca jest niezwykle przekrzyście napisana. Poza wartością naukową może stanowić świetne źródło wiedzy dla studentów studiów II i III stopnia.