

Prof. Romuald A. Janik
Instytut Fizyki Teoretycznej
Uniwersytet Jagielloński
ul. Łojasiewicza 11
30-348 Kraków
Poland
e-mail: romuald.janik@gmail.com

6 marca 2026 r.



JAGIELLONIAN
UNIVERSITY
IN KRAKOW

Institute
of Theoretical Physics

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Mateusza Zycha

Jednym z najbardziej rewolucyjnych osiągnięć doświadczalnych ostatnich lat jest możliwość obserwacji fal grawitacyjnych, otwierających zupełnie nowe pole badawcze w astrofizyce i kosmologii. Wprawdzie detektory działające na ziemi są czułe zasadniczo tylko na źródła astrofizyczne jak zderzenia/zlewanie się czarnych dziur czy gwiazd neutronowych, planowana misja satelitarna LISA będzie potencjalnie mogła wykryć pierwotne fale grawitacyjne pochodzące z wczesnego wszechświata. W tym kontekście kluczowe jest teoretyczne zrozumienie możliwych mechanizmów powstania fal grawitacyjnych we wczesnym wszechświecie, z których jednym z najbardziej znaczących jest możliwe przejście fazowe pierwszego rodzaju. Procesy produkcji fal grawitacyjnych są powiązane z dynamiką ekspandujących bąbli nowej stabilnej fazy. Kluczowym parametrem jest tu prędkość ekspansji ścian domenowych oraz jej zachowanie z w zależności od charakterystyk przejścia fazowego oraz parametrów fizycznie umotywowanych mikroskopowych modeli. Rozprawa doktorska przedłożona przez mgr. Mateusza Zycha p.t. *Dynamics of bubble walls in cosmological first-order phase transitions* dotyczy właśnie powyższych zagadnień, wpisuje się zatem w bardzo znaczący i aktualny nurt badawczy.

Rozprawa doktorska składa się ze wstępu, czterech rozdziałów, konkluzji, dwóch technicznych appendiksów, liczy 112 stron i zawiera liczącą 138 pozycji bibliografię. Oparta jest bezpośrednio na 3 artykułach (jednym opublikowanym w Phys. Rev. D oraz dwóch w JHEP), ale zawiera również motywacje z czterech dalszych publikacji z JHEP, których współautorem był mgr Mateusz Zych. Według specjalistycznej bazy danych z fizyki wysokiej energii INSPIRE-HEP, te 3 prace mają w sumie 84 cytowania (stan

ul. St. Łojasiewicza 11
PL 30-348 Kraków
tel. +48(12) 664-47-26
+48(12) 664-46-77

e-mail:
sekret@th.if.uj.edu.pl

z 6.03.2026), co jest bardzo dobrym wynikiem i świadczy o szerokim zainteresowaniu osiągniętymi tu rezultatami.

Poniżej omówię bliżej zawartość rozprawy doktorskiej, dzieląc się jednocześnie moimi uwagami, a następnie przedstawię podsumowanie i moją ocenę pracy.

Pierwszy rozdział pracy stanowi dość szczegółowe wprowadzenie w tematykę, omawiając proces nukleacji w zerowej i skończonej temperaturze, podstawowe parametry opisujące przejście fazowe, jak również podsumowanie wzorów dotyczących produkcji fal grawitacyjnych. Ciekawy jest tu nowy mechanizm przejścia fazowego pochodzącego z potencjalnego nieminimalnego sprzężenia pola skalarnego do grawitacji, co zostało zaproponowane w pracy [6], której współautorem jest też mgr. Zych. Ta część wprowadzająca jest bardzo dobrze napisana, może tylko razi jawne wyprowadzenie postaci Laplasjanu z symetrią $O(4)$, co jest dość oczywiste. Zamiast tego można byłoby np. szerzej przedyskutować wzór na siłę przejścia α .

Drugi rozdział pracy zawiera wprowadzenie do pewnego relatywnie prostego rozszerzenia modelu standardowego (tzw. model xSM) dodającego skalarny singlet oddziałujący z polem Higgsa. W zależności od parametrów oddziaływania skalar z polem Higgsa, model ten może prowadzić do przejścia fazowego (o strukturze dwuetapowej). Został też wykonany skan własności przejścia fazowego w zależności od parametrów modelu wykorzystując pakiet CosmoTransitions. Dobrze byłoby tu szerzej wyjaśnić przyjęte ograniczenie na $\alpha < 1$, i w jakim sensie wynika z konsystencji modelu, szczególnie w kontekście komentarza w tekście na ostatniej stronie tego rozdziału, mówiącego że dla przejść z dużym przechłodzeniem i α znacznie większego od 1 sygnał fal grawitacyjnych byłby silniejszy.

Rozdział trzeci pracy, omawia zastosowanie hydrodynamiki i założenia lokalnej równowagi do wyznaczania prędkości ścian domenowych (przybliżenie LTE) oraz przedstawia istotny rezultat pracy, mianowicie rozszerzenie tej konstrukcji uwzględniające efekty nierównowagowe – produkcję entropii sparametryzowaną współczynnikiem tarcia. Ciekawym wnioskiem płynącym z tego uogólnienia, jest pojawienie się ultrarelatywistycznych prędkości ekspansji (w granicy małego tarcia), które dominują nad rozwiązaniami LTE i rzeczywiście są obserwowane w symulacjach numerycznych przeprowadzonych dalej w pracy.

Rozdział czwarty pracy zawiera zasadnicze rezultaty pracy obejmujące numeryczne symulacje układu hydrodynamiki sprzężonej z polem skalarnym. Układ ten jest całkiem nietrywialny do symulacji ze względu na pojawiające się nieciągłości. Zastosowano metodę tzw. *flux corrected transport*, która jest skrótowo opisana w sekcji 4.2. Szkoda, że ten opis nie jest jednak szerszy, z podaną definicją „strumieni” F^L , F^H w kontekście konkretnego symulowanego układu (4.7) i (4.11)-(4.12). Symulacje zostały wykonane dla

dwóch wersji modelu pola skalarnego, traktowanego jako „benchmark” oraz dla modelu xSM, i bardziej szczegółowo dla dwóch jego wariantów. W przypadku modelu xSM, który zawiera dwa pola, przydałby się komentarz na temat jego sformułowania, a konkretnie jak jest tu zdefiniowany współczynnik tarcia (dla którego pola, czy dla obydwóch itp.).

W ramach przeprowadzonych symulacji numerycznych, została w szczególności zbadana zależność prędkości ściany domenowej od wartości parametru tarcia, który jest traktowany jako niezależny parametr, ponieważ jego wartość w konkretnej teorii nie jest znana. Interesującym wynikiem jest „przerwa” w możliwych wartościach prędkości, która została wyjaśniona za pomocą uogólnienia warunków LTE przedstawionych w poprzednim rozdziale.

Interesującym wynikiem jest też obserwacja, że dla wielu zestawów parametrów modelu xSM, prędkości obserwowane w symulacjach (bez współczynnika tarcia) nie pokrywają się z przewidywaniami LTE ale dominują rozwiązania z prędkością równą prędkości światła. Wprowadzenie współczynnika tarcia dość istotnie wpływa na możliwe prędkości ściany domenowej (jak na Rys. 4.12), co wskazuje na kluczowe pytanie o wartość współczynnika tarcia w konkretnym modelu. Przydałaby się może dyskusja na ten temat – jaki jest status teoretyczny jego wyznaczania.

Wyniki te są bardzo intrygujące również z punktu widzenia badań nad prędkością ścian domenowych przy silnym sprzężeniu za pomocą korespondencji AdS/CFT (a więc w całkiem odmiennej sytuacji niż rozważana w tej rozprawie), gdzie żadne nierównowagowe współczynniki nie wpływają jawnie na prędkość, która natomiast jest wyrażona przez nieco „nielokalne” wyrażenie równowagowe. Byłoby interesujące zrozumienie jakościowo relacji pomiędzy fizyką w tych dwóch reżimach.

Podsumowując obecną recenzję, bardzo wysoko oceniam przedłożoną rozprawę doktorską. Uzyskane wyniki są ważne w kontekście niezwykle aktualnej tematyki detekcji pierwotnych fal grawitacyjnych przez planowaną misję LISA. Spotkały się również z dużym zainteresowaniem środowiska naukowego o czym świadczą 84 cytowania trzech głównych prac, których wyniki stanowią bazę przedłożonej rozprawy doktorskiej. Praca jest napisana bardzo dobrze, zamieszczone powyżej uwagi nie umniejszają mojej pozytywnej o niej opinii. Przedłożoną rozprawę doktorską oceniam bardzo dobrze i wnioskuję o dopuszczenie p. mgr. Mateusza Zycha do dalszych etapów postępowania i do obrony doktoratu.

Z poważaniem,



Prof. Romuald A. Janik