

Warszawa, 18 grudnia 2025

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Mateusza Zycha pod tytułem
“Dynamics of bubble walls in cosmological first-order phase transitions”**

Przedstawiona do recenzji praca doktorska, przygotowana pod kierunkiem dr hab. Marka Lewickiego składa się z pięciu rozdziałów, dwóch dodatków i spisu bibliografii, który zawiera 138 pozycji. Praca napisana została w języku angielskim. Tematyka rozprawy dotyczy przejść fazowych pierwszego rodzaju które zachodziły w trakcie ewolucji Wszechświata, a w szczególności dynamice ścian bąbli prawdziwej próżni które pojawiają się w trakcie przejścia fazowego. Jednym z podstawowych celów tej dysertacji jest zbadanie jak ekspansja bąbli dochodzi do stanów stacjonarnych. Prędkości rozszerzania się bąbla i inne parametry przejścia fazowego w istotny sposób wpływają na przewidywania dotyczące emitowanych fal grawitacyjnych – ten aspekt przedstawionych w rozprawie badań jest istotnym elementem ich motywacji. Tematyka ta ma już swoją historię, ale jest nadal aktywnie badana w świetle rozwoju obserwacyjnych możliwości pomiarów fal grawitacyjnych, a także jej znaczenia w szerszym horyzoncie teorii cząstek elementarnych.

Rozdział pierwszy ma charakter wprowadzający; poświęcony jest przedstawieniu podstawowych przesłanek teoretycznych stosowanych w dalszym ciągu rozprawy. Znajdujemy tu zarys głównych idei leżących u podstaw opisu przemian fazowych w kosmologii, a więc przede wszystkim oszacowanie prawdopodobieństwa pojawienia się bąbla prawdziwej próżni, oszacowanie skali czasu trwania przejścia fazowego i oszacowanie ciepła przejścia które służy do określenia pojęcia siły przejścia fazowego. Ponad to, Autor opisuje w jaki sposób powstają w konsekwencji tego przejścia fale grawitacyjne i przedstawia charakterystyki oczekiwanych widm w zależności od jego siły i czasu trwania.

Rozdział drugi dotyczy opisu przejścia fazowego pierwszego rodzaju w kontekście prostego modelu będącego rozszerzeniem Modelu Standardowego, zawierającego dodatkowe rzeczywiste pole skalarne. Autor przedstawia potencjał efektywny w skończonej temperaturze dla tego modelu i bada własności przejścia fazowego w zależności od parametrów pojawiających się w lagranżjanie efektywnym.

W rozdziale trzecim autor podejmuje zagadnienie dynamiki ściany bąbla. Bąbel rozszerza się z racji różnicy gęstości energii między prawdziwą próżnią wewnątrz bąbla a “fałszywą” próżnią na zewnątrz, ale oddziaływanie ściany z plazmą kosmiczną prowadzi do efektywnego hamowania tej ekspansji. Z punktu widzenia implikacji kosmologicznego przejścia fazowego

pierwszego rodzaju bardzo ważne jest oszacowanie prędkości, z jaką bąbel się rozszerza, bo od niej zależy widmo fal grawitacyjnych a także przebieg bariogenezy. Opisywane w dysertacji prace autora opisują efekt tych oddziaływań w języku hydrodynamicznym. Autor przedstawia dynamikę ekspansji bąbla najpierw przy założeniu lokalnej równowagi termodynamicznej. Analiza ta traktuje plazmę jako płyn doskonały sprzężony do pola skalarnego. Kluczowe dla tej analizy są warunki zszycia rozwiązań na ścianie bąbla, które dla analizy równowagowej zakładają stałość entropii. Warunek ten ulega modyfikacji w sytuacji gdy uwzględnione zostaną efekty nierównowagowe. Analiza ta wymaga dodatkowych założeń odnośnie oddziaływania ściany bąbla z plazmą a także przyjęcia modelowego profilu pola skalarnego. Uproszczenia te są ceną za uzyskanie wyników analitycznych dotyczących możliwych stanów stacjonarnych które autor rozprawy przedstawia. Wyniki te pokazują, że produkcja entropii prowadzi do koegzystencji stabilnych rozwiązań różnego typu.

Rozdział 4 zawiera główne wyniki dysertacji. Przedstawia on badania dynamiki ścian bąbli oparte na obliczeniach numerycznych prowadzonych z użyciem napisanego przez autora oprogramowania. W rozdziale tym autor szkicuje wyprowadzenie układu równań różniczkowych cząstkowych opisujących układ pole-plazma, a następnie przedstawia szczegółowy opis algorytmów wykorzystanych przy numerycznym rozwiązywaniu tego układu przy użyciu dyskretyzacji na sieci. Ogólny schemat tych obliczeń mieści się w ramach wcześniejszych tego rodzaju symulacji, które są w rozprawie cytowane. Implementacja symulacji opisywanych w rozprawie jest jednak nowa i ma na celu stabilne określenie zachowania układu dla dużych czasów. Celem jest porównanie wyników numerycznych z przybliżonymi wynikami analitycznymi opisanymi w rozdziale trzecim dysertacji. Autor opisuje wyniki symulacji zarówno w przypadku założenia lokalnej równowagi, jak i bez. Jedną z głównych konkluzji jest stwierdzenie, że nie wszystkie stacjonarne rozwiązania zidentyfikowane wcześniej są dynamicznie realizowane.

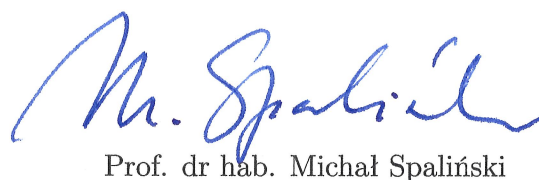
Oryginalne wyniki przedstawione w pracy doktorskiej mgr Mateusza Zycha opublikowane zostały głównie w trzech artykułach. Jest on jednak autorem w sumie siedmiu prac naukowych o tej lub blisko powiązanej tematyce. Wszystkie te prace opublikowane zostały w bardzo dobrych czasopismach naukowych – JHEP i Physical Review. Pozycje te są dobrze cytowane; według bazy inspirehep.net ich sumaryczna liczba cytowań wynosi 280. Uważam, że to jest naprawdę bardzo dobry wynik dla osoby na tym etapie kariery naukowej.

Omawiana rozprawa doktorska w sposób czytelny i zajmujący prezentuje szereg wartościowych wyników. Niemniej, czasem brakowało mi pogłębionej dyskusji przyjętych założeń, dyskusji na którą w doktoracie mogłoby być miejsce. Przykładem może być założenie o tym, że plazmę można traktować jak płyn doskonały, inaczej mówiąc, że efekty lepkości nie odgrywają roli w omawianych sytuacjach. Nie jest dla mnie jasne czy to jest założenie którego głównym uzasadnieniem jest naturalna chęć uproszczenia analizy (przynajmniej na jej wstępnych etapach), czy też istnieją rzeczywiście jakieś wyniki szacujące efekty lepkości i związanej z nimi produkcji entropii. Jest to o tyle istotne, że autor przeprowadza bilans entropii przy wyprowadzeniu warunków zszycia. Inny przykład tego typu to dyskusja wzoru (3.35), gdzie autor stwierdza "The effective coupling η , treated here as a free parameter, encodes the mi-

croscopic model structure and provides a good approximation of the non-equilibrium friction.” Wydaje się, że wzór ten należałoby rozumieć w duchu rozwinięcia gradientowego, jako wyraz zawierający minimalną liczbę pochodnych pola skalarnego, przy czym współczynnik η mógłby chyba zależeć od pola i od temperatury. Jeśli tak jest, to autor czyni tu założenie o stałości tego współczynnika; mogę sobie wyobrazić powody, ale myślę że warto je było omówić.

Praca zawiera też drobne niedociągnięcia o charakterze redakcyjnym, np. na stronie 47 czytamy: “Conservation of the energy-momentum tensor (3.6) projected onto direction of the flow [...] and the direction perpendicular to the flow” co sugeruje, że jest jakiś jeden konkretny kierunek prostopadły do czteroprędkości przepływu, co nie jest prawdą; domyślam się że chodzi to raczej o dowolny z kierunków prostopadłych. Inny przykład mamy na stronie 49, gdzie autor pisze: “taking into account that the speed of sound in the broken phase may differ from the standard value $c_b = 1/\sqrt{3}$ ” – zamiast określenia “standard value” lepiej tu było użyć określenia “conformal value”. Inny przykład mamy na stronie 57, gdzie autor pisze że zakłada profil pola w postaci tangensa hiperbolicznego i stwierdza że daje to dobre przybliżenie, ale czytając ten fragment nie było dla mnie jasne na czym stwierdzenie to jest oparte – warto było tu wspomnieć, że wyniki numeryczne przedstawione w rozdziale 4 są zgodne z takim założeniem i wskazać analizę zamieszczoną w dodatku B. I na koniec trywialna uwaga: we wzorze (4.2) jest oczywista literówka. Powyższe komentarze nie mają oczywiście charakteru poważnych zarzutów i nie wpływają na moją pozytywną ocenę tej pracy.

Po zapoznaniu się z przedstawioną do recenzji rozprawą doktorską mgr Mateusza Zycha stwierdzam, że spełnia ona ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim. W szczególności spełniania ona warunki określone uchwałą Senatu Uniwersytetu Warszawskiego dotyczącą postępowania w sprawie nadania stopnia doktora. W tych okolicznościach wnoszę o dopuszczenie mgr Mateusza Zycha do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. dr hab. Michał Spaliński