

Prof. dr hab. Jerzy Jurkiewicz
Instytut Fizyki im. Mariana
Smoluchowskiego
UNIwersytet Jagielloński
30-348 KRAKÓW, Łojasiewicza 11



plus ratio quam vis

Kraków, 27 listopad 2016 r.

tel. +48 12 664 46 60

jerzy.jurkiewicz@uj.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr Przemysława Witaszczyka p.t.
„Non-equilibrium dynamics of strongly coupled gauge theory and gauge/string duality”

Rozprawa doktorska pana mgr Przemysława Witaszczyka została wykonana na Uniwersytecie Jagiellońskim pod kierunkiem prof. dr hab. Romualda A. Janika. Praca napisana jest w języku angielskim, ma 177 stron. Całość podzielona jest na 9 rozdziałów, ostatni z nich zawiera omówienie wyników oraz perspektywy dalszych badań. W pracy wykorzystano wyniki własne autora, zawarte w pięciu publikacjach, których pan Witaszczyk jest współautorem. Prace powstały we współpracy z Michałem Hellerem i Romualdem Janikiem. Najczęściej cytowana praca (164 cytowania) powstała i została opublikowana w Physical Review Letters w 2012 roku. W bazie SPIRES znalazłem łącznie 9 publikacji o 378 cytowaniach (339 bez autocytowań), co wskazuje na znaczenie naukowe tematyki pracy oraz o wadze uzyskanych rezultatów. Prace omawiane w rozprawie powstały głównie w latach 2012-2014, kolejne dwie publikacje, nie omawiane w rozprawie, pochodzą z ostatniego roku.

Materiał przedstawiony w rozprawie doktorskiej jest bardzo obszerny. Po wstępnym rozdziale przedstawiającym naukową motywację pracy następuje bardzo szerokie wprowadzenie do teoretycznych zagadnień, na których opiera się rozprawa. Ta część pracy zawarta jest w czterech kolejnych rozdziałach. Tematyka dotyczy analizy modelu opartego na dualności AdS/CFT, wiążącego granice silnego i słabego sprzężenia kwantowej teorii z niezmienniczością cechowania w przypadku supersymetrycznej teorii Yanga-Millsa z $N=4$, opisaną z jednej strony przez super-symetryczną teorię strun, żyjącą w zakrzywionej 10-wymiarowej przestrzeni opisaną geometrią $AdS_5 \times S^5$. Pojęcie D-3 bran pozwala na wprowadzenie w pewnej granicy super-symetrycznej teorii z niezmienniczością cechowania. Teoria ta, mimo istotnych fizycznych różnic, przypomina formalizm opisu silnie oddziałującej materii hadronowej. Niezwykłą własnością opisywanego modelu jest zauważona przez Maldacene, w 1999 roku dualność, pozwalająca w granicy słabego sprzężenia opisać własności teorii kwantowej poprzez klasyczne zachowanie supergrawitacji. Korespondencja AdS/CFT wiąże, poprzez efekt holografii, własności silnie sprzężonej teorii kwantowej z klasycznymi równaniami super-grawitacji opisującej przestrzeń geometryczną tła. Opis własności geometrycznych daje się z kolei opisać równaniami hydrodynamiki wokół rozwiązań geometrii o wysokiej symetrii. Parametry hydrodynamicznego opisu wyznaczone są z kolei przez teorię kwantową. Istnieje nadzieja, że podobny mechanizm pozwala zrozumieć zachowanie obserwowane w wysoko-energetycznych zderzeniach hadronów gdzie wytwarza się, a następnie rozpada, ziarno plazmy kwarkowo-gluonowej. W szczególności podstawowy problem to wyjaśnienie mechanizmu bardzo szybkiej termalizacji otrzymanego układu, który mimo krótkiego okresu życia wydaje się zachowywać jak kropla cieczy bliska stanowi równowagi termicznej.

Zagadnienia dyskutowane w pracy dotyczą numerycznych rozwiązań klasycznej grawitacji w nietrywialnej metryce opisywanego modelu, w szczególności konstrukcji systematycznego rozwinięcia rozwiązań równań Einsteina w otoczeniu rozwiązania o

maksymalnej symetrii. Autor dokonuje przeglądu najważniejszych metod Ogólnej Teorii Względności pozwalających na numeryczne sformułowanie problemu. Temu tematowi poświęcony jest rozdział 4 rozprawy. Rozdział 5 przedstawia własności statycznego rozwiązania równań Einsteina i ich związku, poprzez zasadę holograficzną, z opisem własności układu kwantowego. Równania Einsteina są równaniami nieliniowymi, dlatego też, nawet przy założeniu małych perturbacji analiza tych równań jest bardzo nietrywialna. Autor używa sformułowania równań metodą ADM. Własności rozwiązań, mogące prowadzić do szybkiego zaniku anizotropii układu, analizowane są w rozdziale 6 pracy. Rozdział zawiera omówienie numerycznych metod stosowanych do analizy równań opisujących nieliniowy system. Szczególny wybór parametryzacji oraz symetria rozwiązań pozwala zredukować wielowymiarowy problem numeryczny do analizy dwuwymiarowego układu różniczkowych równań z precyzyjnie określonymi warunkami brzegowymi. Analiza pozwala na częściowe zbadanie nierównowagowego zachowania układu oraz jego ewolucji, prowadzącej do szybkiego zaniku asymetrii. Obserwacja otrzymana w wyniku analizy pozwala powiązać fizyczne zachowanie układu z wartością nie-równowagowej gęstości entropii. Rozdział 6 zawiera też szczegółowe omówienie metod numerycznych używanych w analizie. Mimo, że większość metod jest standardowa, bardzo wysoka precyzja wymagana dla uzyskania fizycznie istotnych wyników i właściwy dobór algorytmu jest bardzo istotny.

Najciekawsze wyniki pracy zawarte są, moim zdaniem, w rozdziale 7. W pierwszym z nich autor rozważa asymptotyczne rozwinięcie hydrodynamiki w granicy dużej wartości czasu własnego. Prezentowane wcześniej wyniki oparte były na użyciu rozwinięcia gradientowego trzeciego rzędu. Zastosowana metoda wykorzystuje rozwinięcie równań Einsteina używając numerycznej procedury, która pozwala otrzymać rozwinięcie w postaci szeregu potęgowego do imponującego rzędu $N=240$. Obliczenia wymagały zastosowania kodu w programie Mathematica z bardzo wysoką precyzją obliczeń. Jak można było się spodziewać rozwinięcie gradientowe jest rozwinięciem asymptotycznym o zerowym promieniu zbieżności. Mgr Witaszczyk używa transformaty Borela i metody aproksymant Padé w celu zbadania czy istnieje możliwość odtworzenia analitycznej struktury badanych funkcji. Położenie biegunów otrzymanych w aproksymancie wskazuje na istnienie zespolonych cięć na płaszczyźnie Borela, a także pozwala na numeryczne oszacowanie wartości związanych z nimi wykładników. Fizyczna interpretacja otrzymanych wartości opiera się na analizie własności kwazi-normalnych modów o zespolonym spektrum. Najniższa wartość własna otrzymana numerycznie doskonale zgadza się z przewidywaniami asymptotyki w podejściu Borela-Padé. Rozdział 8 zawiera próbę sformułowania nierównowagowej hydrodynamiki w otoczeniu punktu równowagi, bez związku z rozwinięciem gradientowym.

Rozprawa zawiera bardzo ciekawe, chociaż z konieczności skrótowe przedstawienie teoretycznego tła badanych w pracy problemów. Ten fragment rozprawy pozwala ocenić doskonałą orientację pana mgr Witaszczyka w obszarze prowadzonych badań. Wyniki własne otrzymane w ramach numerycznej analizy obszaru bliskiego równowagi są interesujące i zdecydowanie nietrywialne, wymagając zarówno biegłości w zakresie metod numerycznych jak zrozumienia podstaw teoretycznych.

Rozprawa napisana jest bardzo jasno, zawiera szczegółowe definicje używanych pojęć i przejrzyste omówienia uzyskanych wyników. Prace współautorstwa mgr Witaszczyka stanowią znaczny postęp w prowadzonej przez niego dziedzinie badań, a wprowadzone w tych artykułach metody umożliwią przeprowadzenie obliczeń nie tylko dla najprostszych przypadków ewolucji stanów kwazi-normalnych, a także uogólnienie tych metod na

przypadek innych geometrii. W zasadzie nie mam żadnych poważnych zastrzeżeń do przedstawionej rozprawy. Praca jest długa, w związku z tym wiele jest miejsc, gdzie pojawiają się błędy edytorskie lub składniowe. Pojawiają się drobne błędy we wzorach i nie zawsze optymalna metoda ich zapisu. Wydaje się na przykład, że niezbyt fortunne jest użycie w rozwinięciu (7.1) $\tau^{2/3n}$ zamiast $(\tau^{2/3})^n$. Nie są to istotne usterki i w niczym nie umniejszają pozytywnej oceny rozprawy.

Wydaje się, że zważywszy młody wiek mgr Witaszczyka, jego prace zyskały uznanie środowiska naukowego znacznie przewyższające standardowe wskaźniki bibliometryczne dla doktoranta. Bardzo podoba mi się konsekwentny profil prac, logicznie wynikających z uzyskanych wcześniej wyników. Nie mam najmniejszych wątpliwości, że jest on znakomitym młodym naukowcem o dobrych perspektywach.

W podsumowaniu mojej opinii: uważam, że pan mgr Przemysław Witaszczyk wykazał się znaczącym dorobkiem naukowym, opanowaniem bardzo zaawansowanego aparatu matematycznego i zdolnością jasnej i kompletnej prezentacji swoich wyników i wnioskuje o dopuszczenie go do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. dr hab. Jerzy Jurkiewicz