



Warszawa 10.08.2025

Prof. dr hab. Marek Biesiada
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
Pasteura 7
02-093 Warszawa

Ocena rozprawy doktorskiej mgr Pawła Drozdy pt.
„ Higher Order Statistics of the Large Scale Structure ”

W swej rozprawie doktorskiej mgr Paweł Drozda przedstawił oryginalne wyniki badań nad statystycznymi własnościami rozkładu halo ciemnej materii oraz galaktyk w symulowanych katalogach. Odkryta na przełomie XX i XXI wieku przyspieszająca ekspansja Wszechświata doprowadziła do ugruntowania się modelu Λ CDM w roli standardowego modelu kosmologicznego. W jego ramach za przyspieszające tempo ekspansji odpowiada stała kosmologiczna Λ . Za powstanie wielkoskalowej struktury Wszechświata obserwowanej bezpośrednio jako skupiska galaktyk zorganizowane w złożoną sieć tworzącą włókna, ściany i obszary pustki odpowiada natomiast zimna ciemna materia (ang. Cold Dark Matter). Mimo dużej zgodności modelu Λ CDM z większością faktów obserwacyjnych, niedosyt budzi utrzymujący się brak poznania fizycznej natury tych dwóch wiodących składników modelu. Skłania to do refleksji nad słusnością Ogólnej Teorii Względności (OTW) jako opisu grawitacji w skalach kosmologicznych, w których to skalach jest ona wciąż niedostatecznie przetestowana. Jedną z rozważanych w literaturze alternatyw jest modyfikacja OTW polegająca na modyfikacji działania Einsteina-Hilberta polegające na dodaniu do gęstości lagranżjanu pewnej funkcji skalaru Ricciego $f(R)$. Inne podejście, tzw. wszechświata branowego polega na rozważaniu 5-cio wymiarowej czasoprzestrzeni, w której propaguje się grawitacja, natomiast inne pola fizyczne są zawężone do 4-wymiarowej brany reprezentującej znaną nam czasoprzestrzeń. Jednym z najbardziej znanych modeli tego typu jest model Dvali-Gabadadze-Porrati'ego (DGP). Swobodne parametry takich teorii można dobrać w taki sposób, aby reprodukowały OTW w skalach, w których jest ona najlepiej przetestowana (Układ Słoneczny, układy podwójne gwiazd neutronowych) i jednocześnie tłumaczyły przyspieszającą ekspansję Wszechświata. Jest to jednak zbyt mało, aby przesądzić o słusności jakiegokolwiek z konkurencyjnych podejść. Duże nadzieje wiąże się z badaniami procesów formowania się struktury wielkoskalowej Wszechświata, których głównym motorem jest grawitacja. Bezprecedensowej jakości dane pozwalające na tego typu testy zostaną w bliskiej przyszłości dostarczone przez masywne przeglądy już prowadzone przez satelitę Euclid i Obserwatorium Very Rubin (przegląd LSST). Temat rozprawy wychodzi naprzeciw tym oczekiwaniom i potrzebom stworzenia jak najbardziej czułych testów pozwalających zróżnicować przewidywania oparte na OTW (czyli na modelu Λ CDM) oraz na alternatywnych teoriach $f(R)$, czy DGP. Doktorant systematycznie przebadwał w tym celu użyteczność funkcji korelacji i centralnych momentów rozkładu kontrastu gęstości. Badania stanowiące treść rozprawy zostały



przeprowadzone pod kierunkiem profesorów CFT PAN: dr hab. Wojciecha Hellwinga oraz dr hab. Macieja Bilickiego.

Przedstawiona mi do oceny rozprawa jest napisana w języku angielskim, obejmuje sześć rozdziałów poprzedzonych spisem treści, streszczeniami w języku angielskim i polskim oraz podziękowaniami. Następnie doktorant przedstawił listę trzech publikacji, na których oparta została rozprawa wraz z oświadczeniem swego wkładu. Jedna z nich ukazała się w renomowanym czasopiśmie *Physical Review D*, dwie pozostałe są w stadium recenzji tamże oraz dostępne na serwisie preprintów arXiv.org. We wszystkich tych publikacjach mgr Paweł Drozda jest pierwszym autorem, zaś pozostałymi autorami są promotorzy. Podkreśla to wyraźnie oryginalny i wiodący wkład doktoranta. Wykazana jest także jeszcze jedna wieloautorska publikacja doktoranta, która ukazała się także w *Physical Review D*. Chociaż tematycznie jest nieco zbliżona do treści rozprawy, jednak praca ta jest zasadniczo odmienna i nie weszła w skład dysertacji. Kolejne elementy rozprawy to spis treści i rysunków, rozdziały merytoryczne oraz obszerna bibliografia. Bibliografia wyczerpująco odnosi się do treści omawianych w rozprawie.

Rozdział 1 wprowadza czytelnika w podstawy kosmologii relatywistycznej opartej na Ogólnej Teorii Względności oraz wynikającej z założenia jednorodności i izotropii Wszechświata metryki Friedmana-Lemaitre’a-Robertsona-Walkera (FLRW). W jego pierwszej części – w pod-rozdziale 1.1 omówione zostały najważniejsze pojęcia teoretyczne, takie jak równania Friedmana, przesunięcie ku czerwieni, koncepcje odległości stosowane w kosmologii, parametry gęstości fizycznych składników wszechświata, model Λ CDM oraz przesłanki skłaniające do rozważania alternatywnych teorii grawitacji. Następnie opisane zostały teorie $f(R)$ i DGP oraz występujące w nich mechanizmy ekranowania typu kameleona oraz Vainshtein’a. Kolejny pod-rodział 1.2 jest poświęcony omówieniu teorii niestabilności grawitacyjnej prowadzącej do powstania struktur w reżimie liniowym w ramach OTW i w zmodyfikowanych teoriach grawitacji. Opisany został model sferycznego kolapsu prowadzący do wiralizacji tworzącego się halo ciemnej materii oraz związku galaktyk z halo. Następnie doktorant wyczerpująco i rzetelnie przedstawił zagadnienie pól prędkości i ich związku z obserwowanymi przesunięciami ku czerwieni. W szczególności wyjaśnił istotę dystorsji w przestrzeni przesunięć ku czerwieni znanych jako tzw. „Palce Boże” (ang. Fingers of God) oraz efektu Kaisera. Dalej, szczegółowo zostały opisane kosmologiczne symulacje N-ciałowe, w szczególności te, które posłużyły do stworzenia katalogów, na których zostały przeprowadzone badania będące treścią rozprawy.

Rozdział 2 zawiera krótki wykład teorii statystycznego opisu pola kontrastu gęstości. Omówione zostały pojęcia widma mocy, funkcji korelacji, centralnych momentów funkcji rozkładu wygładzonego pola gęstości, z uwzględnieniem specyfiki badań numerycznych. Kolejne trzy rozdziały przedstawiają publikacje doktoranta z promotorami, zawierające oryginalne i nowatorskie wyniki rozprawy. Każdy z tych rozdziałów otwiera krótki wstęp, po którym zamieszczona jest *in extenso* omawiana praca, kończy zaś krótkie podsumowanie.

Rozdział 3 prezentuje wyniki badań kątowej funkcji korelacji jako narzędzia charakterystyki i zróżnicowania wzorców grupowania halo ciemnej materii oraz galaktyk na sferze niebieskiej w katalogach symulowanych w ramach modelu Λ CDM oraz modelach $f(R)$ i



DGP zmodyfikowanych teorii grawitacji. W tym celu symulacje musiały reprodukować geometrię stożka światła odpowiadającą rzeczywistym obserwacjom. Najciekawszym i najbardziej wartościowym wynikiem było stwierdzenie możliwości zaobserwowania odstępstw od przewidywań modelu Λ CDM sięgających 20% gdyby analizowane były galaktyki o przesunięciach ku czerwieni w zakresie $0.15 < z < 0.30$. Jest to bardzo ciekawy i zachęcający wynik z punktu widzenia toczących się i przyszłych przeglądów galaktyk.

W rozdziale 4 przedstawiona jest praca, w której doktorant zbadął momenty centralne, w szczególności skośność, funkcji rozkładu prawdopodobieństwa w pełni trójwymiarowego pola kontrastu gęstości w przestrzeni rzeczywistej i w przestrzeni przesunięć ku czerwieni. Uzyskanym wynikiem było stwierdzenie, że efekt „Palców Bożych” tłumi skośność na małych skalach w przestrzeni przesunięć ku czerwieni i jednocześnie osłabia sygnał grawitacyjny. W przypadku galaktyk odchylenia od modelu Λ CDM dochodziły do 4%. Sygnały w katalogach galaktyk okazały się silniejsze niż w katalogach halo. Jest to ważny wynik w kontekście potencjalnych obserwacyjnych testów grawitacji przy użyciu skośności.

Rozdział 5 prezentuje kolejną pracę, w której zastosowane zostały elipsoidalne uśrednione funkcje korelacyjne, będące analogiem anizotropowej dwupunktowej funkcji korelacji opartym na formalizmie centralnych momentów rozkładu pola kontrastu gęstości. Jest to całkowicie nowatorskie podejście, w którym tradycyjnie stosowane sferyczne jądra wygładzające są zastąpione przez anizotropowe, elipsoidalne warianty. Implementacja tej nowej techniki odbyła się na dedykowanych symulacjach siatki modeli typu Λ CDM różniących się parametrami gęstości materii Ω_m i parametrami siły grupowania σ_8 wykonanych przy użyciu N-ciałowych kodów COLA. Zostało wykazane, że optymalny kształt elipsoid przy stałej objętości zależy od siły efektów „Palców Bożych” i Kaisera, czego można było oczekiwać. Istotnym spostrzeżeniem, mającym potencjalne znaczenie dla przyszłych badań, było wykazanie, że skośność jest lepszym wskaźnikiem różnicującym scenariusze wzrostu struktury kosmicznej w przestrzeni przesunięć ku czerwieni. Ostatni rozdział 6 podsumowuje rozprawę i bardzo krótko rysuje perspektywy zastosowań na danych obserwacyjnych uzyskanych z misji satelitarnej Euclid i przeglądu LSST.

Wyniki uzyskane w rozprawie stanowią cenny materiał do przyszłych badań i zastosowań w analizie danych obserwacyjnych. Rozprawa jest napisana porządnie. Ma walory dydaktyczne - jej lektura może stanowić doskonałe wprowadzenie w tematykę symulacji kosmologicznych i badań statystycznych pola kontrastu gęstości. Język angielski jest dobry, chociaż w tekście występują błędy gramatyczne i stylistyczne.

Mam kilka drobnych uwag odnośnie do Rozdziału 1. Na stronie 4, przywołując pierwszą zasadę termodynamiki autor używa symbolu „ p ” na oznaczenie ciśnienia, podczas gdy wcześniej zastosował symbol „ P ”. Poza tym równanie (1.9) wynika bezpośrednio z równania (1.7) bez potrzeby odwoływania się do pierwszej zasady termodynamiki, choć oczywiście rozumowanie autora jest poprawne. Na stronie 5 – zdanie następujące po wyjaśnieniu równania (1.15) zawiera pomyłkę: wiek Wszechświata na danym przesunięciu ku czerwieni otrzymamy biorąc „ z ” za górną granicę całkowania, całka od ∞ do 0 daje obecny wiek Wszechświata.



Na stronie 10, po równaniu (1.25) doktorant pisze, że można zaniedbać zależność czasową skalaronu, więc d'alambertjan przechodzi w laplasjan. Przy przyjętej w równaniu (1.3) konwencji sygnatury metryki, raczej w minus laplasjan. Wypadałoby również wyjaśnić, dlaczego zależność f_R od czasu może być zaniedbana. Wprowadzając dalej potencjał efektywny V_{eff} , wypadałoby bliżej go opisać, np. wyrazić przez pole skalaronu, skalar Ricciego, gęstość energii itp. W opisie modelu DGP, po równaniu (1.31) nie zostało należycie wyjaśnione czym jest potencjał Ψ , jaki jest jego związek z potencjałem Newtonowskim w przybliżeniu słabego pola. Odwołanie się do równania Poissona zakłada przybliżenie słabego pola.

W rozdziale 1.2.6 nie zostało należycie wyjaśnione czym jest 3-wymiarowa przestrzeń przesunięć ku czerwieni. W opisie równania (1.61) - zmienna „s” nie została zdefiniowana. W rozdziale 1.2.7 omawiającym symulacje numeryczne tworzenia się struktury wielkoskalowej, autor opisuje, że symulacja jest wykonywana w pudełku z periodycznymi warunkami brzegowymi, aby zapewnić reprezentatywność jednorodnego, izotropowego wszechświata o rozmiarach znacznie większych od rozmiaru pudełka. Chciałbym podczas obrony usłyszeć więcej szczegółów na ten temat, gdyż prosta periodyzacja ścian daje topologię torusa T^3 a nie reprezentację nieskończonego przestrzennie, płaskiego wszechświata. Na stronie 23 w definicji parametru $h = H/(100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1})$ powinno być H_0 zamiast H . Na stronie 24, w równaniu (1.63) oznaczenie pola przesunięcia jako Ψ , bez dodatkowego wyjaśnienia, kreuje konflikt oznaczeń z wcześniej wprowadzonym potencjałem w modelu DGP. Powyższe krytyczne uwagi w niczym nie umniejszają merytorycznej wartości rozprawy.

Reasumując, uzyskane przez doktoranta, oryginalne wyniki naukowe zawarte w przedstawionej mi do oceny rozprawie wskazujące na bardzo dobrą znajomość teorii formowania się struktur we wszechświecie, symulacji numerycznych tych procesów oraz analiz statystycznych pola kontrastu gęstości, jak również zmodyfikowanych teorii grawitacji, sprawiają, że rozprawa spełnia formalne, ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie pana mgr Pawła Drodzy do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora i do publicznej obrony.

Prof. dr hab. Marek Biesiada

