

Opinia o pracy doktorskiej mgr Pawła Drozda „Higher order statistics of the large scale structure”

Nowe możliwości obserwowania wszechświata doprowadziły w ciągu ostatnich trzydziestu lat do zaskakujących odkryć, które zmieniły nasze poprzednie wyobrażenia o składzie i ewolucji wszechświata. Okazało się, że galaktyki są otoczone znacznie większymi obłokami ciemnej materii. Dokładne pomiary tempa rozszerzania się wszechświata wykazały, że obecnie tempo rozszerzania się wszechświata przyspiesza. Za to przyspieszone tempo rozszerzania się wszechświata jest odpowiedzialna, tak zwana ciemna energia. Przypuszcza się, że ciemna materia składa się z cząstek bardzo słabo oddziałujących ze zwykłą materią. Nikomu jednak dotychczas nie udało się odkryć cząstek ciemnej materii. Natura ciemnej energii też nie jest znana. W pragmatycznych modelach ciemną energię identyfikuje się ze stałą kosmologiczną lub energią próżni jakiegoś nowego pola fizycznego. Oba wnioski o istnieniu ciemnej materii i ciemnej energii zostały wyciągnięte po porównaniu wyników obserwacji z przewidywaniami standardowego modelu kosmologicznego, który wykorzystuje ogólną teorię względności do opisu dynamiki kosmologicznej czasoprzestrzeni. Ogólna teoria względności znakomicie się sprawdza we wszystkich dotychczasowych testach przeprowadzonych w obszarze Układu Słonecznego i w takich egzotycznych sytuacjach, jak ewolucja układu dwóch gwiazd neutronowych, czy w procesie zlewania się dwóch czarnych dziur. Ogólna teoria względności nie była jednak dotychczas testowana w kosmologicznej skali. Istnieje cała dziedzina zajmująca się tworzeniem alternatywnych teorii grawitacji, które pozwalałyby wyjaśnić kosmologiczne dane obserwacyjne bez konieczności odwoływania się do istnienia ciemnej energii i ciemnej materii.

W pracy doktorskiej mgr Paweł Drozda przedstawia wyniki analiz i porównań statystycznych parametrów opisujących proces powstawania wielkoskalowej struktury rozkładu materii w modelach kosmologicznych bazujących na ogólnej teorii względności i alternatywnych teoriach grawitacji typu $f(R)$ i modelu Dvali-Gabadadze-Porrati.

W pierwszej pracy „Galaxy and halo angular clustering in Λ CDM and modified gravities” napisanej wspólnie z Wojciechem Hellwingiem i Maciejem Bilickim i opublikowanej w Physical Review D 106, 043513 (2022), wykorzystano N-ciałowe symulacje komputerowe do analizy kątowych charakterystyk rozkładu galaktyk i ich halo i ciemnej materii. Wykazano, że różnice między przewidywaniami standardowego modelu kosmologicznego Λ CDM a modelami bazującymi na rozpatrywanych w tej pracy alternatywnych teoriach grawitacji występują przy przesunięciach ku czerwieni $0.15 < z < 0.3$. Dla rozkładów halo i galaktyk najbardziej czuły na zmiany teorii grawitacji jest parametr skośności. Okazało się też, że zmiana teorii grawitacji prowadzi do wyraźnych różnic w rozkładzie rozproszonej ciemnej materii w porównaniu z przewidywaniami modelu Λ CDM, ale w małych skalach kątowych $\theta \sim 0.08^\circ$. Uzyskane wyniki

pozwalają optymistycznie oceniać możliwości testowania alternatywnych teorii grawitacji na podstawie planowanych obserwacji rozkładu galaktyk we wszechświecie.

W kolejnej pracy „Skewness as a probe of gravity: real and redshift space counts-in-cells” tych samych autorów co poprzednia praca, zbadano jak statystyczne charakterystyki rozkładu materii we wszechświecie, w szczególności parametr skośności zależy od teorii grawitacji oraz od typu obserwacji – w rzeczywistej przestrzeni 3-wymiarowej i w przestrzeni przesunięć ku czerwieni. Zauważono kilka ważnych zależności, na przykład parametr ścinania w przestrzeni przesunięć ku czerwieni we wszystkich skalach słabiej zależy od typu grawitacji niż w przestrzeni rzeczywistej i jest to szczególnie wyraźne w rozkładzie halo. Stosunek ścinania w przestrzeni przesunięć ku czerwieni i w przestrzeni rzeczywistej bardzo słabo zależy od typu teorii grawitacji. Ta przybliżona zależność pozwala wykorzystać przewidywane charakterystyki rozkładu w przestrzeni rzeczywistej do oceny parametru ścinania w przestrzeni przesunięć ku czerwieni.

W ostatniej pracy wchodzącej w skład rozprawy „Anisotropic counts-in-cells in redshift space: a new route to cosmological constraints from galaxy surveys” tych samych autorów co poprzednie prace zaproponowano nowy sposób uśredniania po objętości rozważając nie tylko standardowy sposób średniowania po obszarach sferycznych, ale również po obszarach elipsoidalnych. Zastosowanie tej nowej metody uśredniania pozwala na dokładniejszy opis anizotropowego rozkładu materii nawet w dużych skalach. Zauważono, że w przestrzeni przesunięć ku czerwieni funkcja korelacyjna silniej zależy od zmian wartości σ_8 niż od zmiany wartości Ω_M . Te własności elipsoidalnego uśredniania będą miały duże znaczenie w badaniu anizotropowego grupowania się materii w przyszłych dużych przeglądach galaktyk w przestrzeni przesunięć ku czerwieni.

Te trzy prace poprzedzone są dwoma wstępnymi rozdziałami, w których zebrano podstawowe informacje o teoriach grawitacji wykorzystywanych w różnych modelach kosmologicznych, wielkoskalowej strukturze rozkładu materii i statystycznych metodach opisu rozkładu materii. W tej części pracy zauważyłem kilka błędów językowych i pomyłek. Bardzo rozczarował mnie fragment poświęcony opisowi alternatywnych teorii grawitacji. W pracy rozważa się dwa modele alternatywnych teorii grawitacji, model $f(R)$ i jeden z wariantów modelu Dvali-Gabadadze-Porrati. Alternatywne modele grawitacji typu $f(R)$ to bardzo naturalna próba rozszerzenia standardowego działania Einsteina-Hilberta. Model Dvali-Gabadadze-Porrati to jest przykład bardziej egzotycznej klasy modeli typu multiwersu, gdzie czasoprzestrzeń może mieć więcej niż standardowe 4 wymiary. Moim zdaniem mgr Paweł Drozda mało przekonująco uzasadnia wybór właśnie tego modelu z bardzo obszernej rodziny modeli multiwersu.

Te drobne zastrzeżenia nie podważają mojej bardzo pozytywnej oceny pracy doktorskiej mgr Pawła Drozda. Przygotowując pracę doktorską mgr Paweł Drozda wykazał się biegłą znajomością skomplikowanych algorytmów numerycznych wykorzystywanych w symulacjach N-ciałowych. Imponujący jest poziom graficznej prezentacji uzyskanych wyników. W pracy doktorskiej mgr

Pawła Drozda zaproponowano kilka efektywnych metod testowania różnych teorii grawitacji w skali całego wszechświata. Ma to szczególne znaczenie w przededniu rozpoczęcia dużych i szczegółowych przeglądów rozkładu galaktyk we wszechświecie.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr Pawła Drozda spełnia wszystkie ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do dalszych etapów postępowania doktorskiego, uwzględniając publiczną obronę.

Marek Demiański
Signer ID: HQVMLZIB15...

Prof. dr hab. Marek Demiański

Warszawa, 14 sierpnia 2025r.

