

Opinia o pracy doktorskiej mgr. Mariusa Pepera „The role of voids in galaxy formation and gravitational lensing”

Praca doktorska mgr. Mariusa Pepera poświęcona jest badaniu wpływu środowiska w którym powstaje galaktyka na jej własności. Mgr. Marius Peper skoncentrował się na badaniu własności galaktyk powstających w obszarach kosmicznych pustek wykorzystując do tego celu N-ciałowe symulacje numeryczne.

Praca doktorska mgr. Mariusa Pepera składa się z siedmiu rozdziałów i obszernego liczącego 9 stron spisu literatury. W rozdziale pierwszym przedstawiono ogólny zarys pracy i jej strukturę. W rozdziale drugim omówiono model kosmologiczny, który jest wykorzystywany w symulacjach numerycznych. Jak się obecnie powszechnie przyjmuje jest to model Λ CDM z różną od zera stałą kosmologiczną i ciemną materią jako głównym składnikiem materii wypełniającej wszechświat. Przyjęte wartości podstawowych parametrów kosmologicznych są zgodne z wynikami kosmicznej misji Planck. Następnie omówiono podstawowe metody wyznaczanie odległości we wszechświecie. Bardzo dokładnie opisano proces formowania się struktury rozkładu materii we wszechświecie ze szczególnym uwzględnieniem liniowego etapu tego procesu prowadzącego do powstania kosmicznej sieci. Jedną z metod identyfikacji pustek w rozkładzie materii we wszechświecie wykorzystuje własności rozchodzenia się światła w krzywej przestrzeni. Już Einstein w swojej pierwszej pracy poświęconej ogólnej teorii względności rozważał wpływ rozkładu materii na rozchodzenie się światła. Obecnie ten efekt jest wykorzystywany do analizowania zjawiska soczewkowania grawitacyjnego. W drugim rozdziale pracy szczegółowo omówiono zjawisko soczewkowania grawitacyjnego i jego opis za pomocą parametrów rozbieżności i ścinania charakteryzujących rozchodzenie się wiązek światła w zakrzywionej przestrzeni.

W rozdziale trzecim bardzo dokładnie opisano metody wykorzystywane do numerycznej analizy ewolucji układu N cząstek oddziałujących grawitacyjnie i poruszających się w dynamicznej przestrzeni, której własności są opisywane równaniami Friedmana-Lemaitra-Robertsona-Walkera. Numerycznie analizowany jest ruch N cząstek zawartych w 3-wymiarowym płaskim torusie. Cząstki początkowo są rozmieszczone w płaskiej przestrzeni w sposób jednorodny i izotropowy z narzuconymi niewielkimi przypadkowymi zaburzeniami początkowymi rozkładu gęstości i prędkości. Następnie opisano różne algorytmy numeryczne stosowane do analizy

ewolucji takiego układu N ciał. Ten początkowy układ bardzo szybko prowadzi do powstania pustek – obszarów o wyraźnie niższej średniej gęstości. Objętość obszarów zajmowanych przez pustki bardzo szybko rośnie. Do identyfikacji pustek wykorzystano odpowiednio zaadoptowany algorytm wodnodziałowy. Wyróżnienie pustki pozwala na zidentyfikowanie jej środka. Następnym problemem jest identyfikacja halo ciemnej materii w obszarze pustki. Z początkowego rozkładu ciemnej materii, dzięki grawitacyjnemu przyciąganiu, wyłaniają się hala o różnej wielkości, które mogą łączyć się ze sobą. Ten proces ewolucji zaburzeń gęstości kończy się, gdy następuje wirializacja i halo osiąga stan kwazi równowagi. Numeryczne symulacje procesu powstawania struktury we wszechświecie pozwalają na śledzenie hierarchicznych etapów powstawania i łączenia się halo ciemnej materii. W pracy korzysta się z drzewowego schematu do opisu tego procesu. Kolejnym etapem analizy jest rozmieszczenie w masywnych halo ciemnej materii gorącej materii barionowej, która stygnie i tworzy dysk galaktyczny i gwiazdy. W późniejszych fazach ewolucji galaktyk istotną rolę odgrywa tempo wybuchów supernowych i aktywność centralnej supermasywnej czarnej dziury.

Kolejne trzy rozdziały pracy zawierają główne nowe wyniki własne doktoranta. W rozdziale czwartym opisano dokładnie cały proces numerycznej analizy ewolucji 128^3 cząstek o masie $2.03 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ rozmieszczonych w płaskim 3 wymiarowym torusie o boku $L = 80 \text{ Mpc}/h$. Do identyfikacji halo ciemnej materii wykorzystano algorytm opisany w poprzednim rozdziale pracy, który pozwala na śledzenie halo złożonego co najmniej z 5 cząstek. Jednym z głównych celów pracy było zbadanie wpływu środowiska, a konkretnie kosmicznej pustki, na własności galaktyk, które tam powstają. W pracy zaproponowano pomysłowy sposób identyfikowania pustek przez poszukiwanie obszarów lokalnie maksymalnej wartości potencjału grawitacyjnego. Takie obszary nazwano „elaphrocentrum”. Pokazano, że galaktyki powstające w pustkach w pobliżu elaphrocentrum zwiększają swoją masę w tempie podobnym do galaktyk znajdujących się w obszarach o podwyższonej gęstości. Zauważono, że galaktyki w pustkach powstają później niż galaktyki w obszarach o podwyższonej gęstości, są mniej masywne i mają mniejsze rozmiary.

W rozdziale piątym wykorzystano dane z jednej z największych symulacji numerycznych procesy formowania się struktury we wszechświecie – symulacji Bolshoi. W tej symulacji śledzono ruch $2048^3 = 8.58 \cdot 10^9$ cząstek o masach $1.35 \cdot 10^9$ w 3-wymiarowym płaskim torusie o boku $L = 250 \text{ Mpc}/h$. Korzystając z algorytmów omówionych w poprzednich rozdziałach dokonano identyfikacji podstawowych elementów struktury a następnie skoncentrowano się na badaniu wpływu środowiska na własności galaktyk znajdujących się w kosmicznych pustkach. Pokazano, że wpływ środowiska daje się zauważyć tylko dla galaktyk o małych masach. Galaktyki występujące w pustkach powstają później, obracają się szybciej i wolniej tworzą gwiazdy. Takie galaktyki powstają w wyniku mniejsze liczby fuzji niż galaktyki powstające w obszarach o podwyższonej gęstości.

W rozdziale szóstym przeanalizowano wpływ kosmicznych pustek na rozchodzenie się sygnałów świetlnych oraz możliwość identyfikacji pustek na podstawie powierzchniowego rozkładu gęstości i wartości parametrów rozbieżności i ścinania. Jak można było oczekiwać analiza zrzuconych na sferę niebieską parametrów optycznych zmniejsza liczbę pustek. Wyniki przedstawionych w pracy analiz wpływu numerycznie symulowanego rozkładu galaktyk na rozchodzenie się sygnałów świetlnych są obiecujące i mogą się przyczynić do powstania bardziej efektywnych algorytmów służących do identyfikacji kosmicznych pustek i innych elementów wielkoskalowej struktury we wszechświecie.

Praca doktorska mgr. Mariusa Pepera zawiera kilka ważnych wyników naukowych, niektóre z nich zostały już opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych. Aby uzyskać wyniki opisane w pracy trzeba było wykorzystać różne algorytmy i procedury numeryczne. Zostały one szczegółowo opisane i podano miejsca, gdzie zostały zarchiwizowane, tak że każdy kto chciałby powtórzyć przeprowadzone symulacje i analizy może to zrobić.

Moim zdaniem praca doktorska mgr. Mariusa Pepera świadczy o tym, że w pełni opanował i rozwinął techniki numeryczne niezbędne do przygotowywania i analizowania wyników symulacji numerycznych złożonego procesu powstawania struktury we wszechświecie. Uważam, że mgr. Marius Peper jest w pełni przygotowany do prowadzenia własnych badań naukowych.

Uważam, że praca doktorska mgr. Mariusa Pepera „The role of voids in galaxy formation and gravitational lensing” spełnia wszystkie ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Wyniki naukowe przedstawione w rozprawie mgr. Mariusa Pepera mogłyby z powodzeniem być materiałem na dwie prace doktorskie – jedna z kosmologii a druga z metod numerycznych. Proponuję aby uznać pracę za wyróżniającą się.



Prof. Dr hab. Marek Demiański

Warszawa, 6 czerwca 2023r.