



Warszawa 22.06.2023

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

***Ocena rozprawy doktorskiej mgr Mariusa Pepera pt.
„The role of cosmic voids in galaxy formation and gravitational lensing”***

W swej rozprawie doktorskiej pan mgr Marius Peper przedstawił oryginalne wyniki swych badań dotyczących procesów tworzenia się wielkoskalowej struktury Wszechświata, a w szczególności formowania się galaktyk w obszarach pustki. Od chwili ich odkrycia, obszary pustki przyciągają uwagę kosmologów. Jako miejsca o wyjątkowo niskiej gęstości rozkładu materii ich własności są unikatowo czułe na efekty ciemnej energii, zmodyfikowanych teorii grawitacji oraz na zawartość słabo oddziałujących swobodnie poruszających się składowych materialnego budżetu Wszechświata (neutrino, aksjony itp.). Również procesy ewolucji galaktyk w obszarach pustki powinny się znacząco różnić w stosunku do galaktyk stanowiących populację gęstych miejsc kosmicznej sieci, takich jak ściany, włókna czy węzły, gdzie typowym elementem ewolucji galaktyk są merdżery (zlewanie się galaktyk) i wybuchy aktywności gwiazdo-twórczej. Ważnym i jeszcze nie do końca zrozumiałym problemem teorii powstawania i ewolucji galaktyk jest pochodzenie galaktyk o niskiej jasności powierzchniowej (LSBG) oraz tzw. ultrarozmytych galaktyk (UDG). Jedną z hipotez głosi ich związek z obszarami pustki. Tematyka rozprawy jest bardzo aktualna i stanowi część głównego nurtu badań w kosmologii i astronomii pozagalaktycznej. Rozprawa została przygotowana pod kierunkiem prof. dr hab. Boudewijna Roukemy oraz dr hab. Krzysztofa Bolejki w roli współpromotora.

Przedstawiona mi do oceny rozprawa jest napisana w języku angielskim, obejmuje siedem rozdziałów poprzedzonych podziękowaniami, spisem rysunków i tabel, streszczeniami w języku angielskim i polskim oraz bibliografią. Rozdział 1, wprowadzający w rozprawę dostarcza jej syntetycznego szkicu.

Rozdział 2 zawiera wprowadzenie w podstawowe zagadnienia relatywistycznego modelu kosmologicznego opartego na metryce Friedmana-Lemaitre’a-Robertsona-Walkera (FLRW). Opisane zostały m.in. główne epoki ewolucji Wszechświata, koncepcje miar odległości stosowanych w kosmologii. Następnie doktorant syntetycznie omówił podstawowe koncepcje teorii zaburzeń modelu FLRW w ujęciu niezmienniczym. Ostatni pod-rozdział przedstawia teorię soczewkowania grawitacyjnego zarówno w klasycznym ujęciu optyki geometrycznej promieni świetlnych jak i w opisie skalarów optycznych Sachsa, nawiązując do równania dewiacji geodezyjnej dla kongruencji geodetyk zerowych. Rozdział ten czyta się bardzo dobrze, jednak Autor nie uniknął pewnych niedociągnięć. Prezentując opis wczesnego Wszechświata, a w szczególności epokę dominacji promieniowania warto byłoby wspomnieć o procesach kreacji i anihilacji par cząstka, anty-cząstka. Wymieniona we wzorze (2.21) reakcja jest tylko jedną z kilku możliwych reakcji elektroslabych typu rozpadu beta. Pisząc wzór (2.25) nie zostało wyjaśnione co to jest v , choć z kontekstu jest to w miarę oczywiste, lecz zastosowany tam symbol oznaczający prędkość jest podobny do wcześniej stosowanego symbolu dla neutrino. We wzorze (2.17) jest błąd drukarski – powinno być $(a_0/a)^3$. Podobnie, we wzorze (2.43) powinno być $\delta g_{\mu\nu}$, gdyż symbolem g bez indeksów oznacza się zazwyczaj



wyznacznik tensora metrycznego $\det(g_{\mu\nu})$. Prawa strona wzoru (2.70) powinna być równa 2Φ , zamiast $2/\Phi$, natomiast w mianowniku we wzorze (2.71) jest o jeden czynnik „3” za dużo. W Rozdziale 2.3 pada stwierdzenie, że konsekwencją ogólnej teorii względności jest „... that light rays travel on straight lines in the space-time.” Jest to nieprawda: trajektorie promieni świetlnych i ruchu swobodnego ciał masywnych są geodetykami. Co prawda geodetyki stanowią uogólnienie do przestrzeni zakrzywionych, koncepcji linii prostej w geometrii euklidesowej, jednak nie są one w ogólności liniami prostymi. We wzorze (2.85) powinno być $\ln(|\theta - \theta'|)$. We wzorze (2.87) na jasność powierzchniową nie zostało wyjaśnione, co to jest $b(\theta)$. W zdaniu wprowadzającym do wzoru (2.94) sformułowanie „light bundle is described as irrotational null geodesics ...” lepiej brzmiałoby w postaci „irrotational congruence of null geodesics”. Nazwanie wektora η^ν jako „connection” jest mylące – właściwym słowem byłoby „separation”, gdyż „connection” kojarzy się z koneksją afiniczną. Powyższe uwagi nie mają jednak większego znaczenia dla meritum rozprawy.

W rozdziale 3 zostały dość szczegółowo omówione, dostępne publicznie, programy użyte na potrzeby badań przeprowadzonych przez Autora. Ich implementacja stanowi istotny element rozprawy. Numeryczne symulacje obejmowały określenie warunków początkowych – kod MPGRAFIC, n-ciałowe symulacje formowania się struktury wielkoskalowej – kod RAMSES, identyfikację obszarów pustki (ang. *voids*) – kod REVOLVER. Kolejnym elementem była identyfikacja halo ciemnej materii (kod ROCKSTAR), historia zlewania się nadwyżek gęstości materii (CONSISTENT-TREES) oraz fenomenologiczny model formowania się galaktyk (SAGE). Opis zastosowanych programów numerycznych jest przejrzysty i zrozumiały. Jedyną uwagą odnośnie do tego rozdziału jest zdanie na stronie 55 mówiące, że proces promienisty „bremsstrahlung”, czyli promieniowanie hamowania, wymaga istnienia pól magnetycznych. W istocie, w kontekście opisywanego scenariusza, promieniowanie to dotyczy przede wszystkim rozpraszania elektronów na dodatnio naładowanych cząstkach – głównie na protonach oraz na cząstkach alfa. Promieniowanie emitowane przez ładunki elektryczne w obecności pól magnetycznych jest promieniowaniem synchrotronowym.

Rozdział 4 opisuje pierwszy oryginalny wynik rozprawy, jakim było zbadanie wpływu środka obszaru pustki na formowanie się galaktyk. Środek, o którym tu mowa nazwany jest „elaphrocentre”. Techniczne detale metody jego wyznaczania zostały omówione w Rozdziale 3. Chodzi tu mianowicie o miejsce lokalnego maksimum (Newtonowskiego) potencjału grawitacyjnego. Ważnym elementem tych badań było stworzenie oryginalnego kodu pozwalającego symulować tworzenie się struktury wielkoskalowej od początkowych zaburzeń ewoluujących początkowo zgodnie z liniową teorią zaburzeń, później w reżimie silnie nie-liniowym, aż do formowania się galaktyk. Autorski kod został upubliczniony na otwartych repozytoriach zenodo i codeberg. Kwestiom otwartego dostępu oraz powtarzalności wyników Autor poświęcił sporo uwagi w rozprawie. Wyniki symulacji nie dały wyraźnych dowodów wpływu lokalizacji galaktyki w obszarze pustki na tworzenie się galaktyk o niskiej jasności powierzchniowej (LSBG). Wbrew pierwotnym oczekiwaniom okazało się, że promienie wirialne galaktyk powstających w obszarach pustki są mniejsze niż promienie galaktyk w gęstych obszarach struktury (we włóknach i węzłach). Natomiast skala czasowa kolapsu proto-struktury w obszarach pustki okazała się znacząco większa (o miliard lat) niż w obszarach gęstych. Są to bardzo ciekawe oryginalne wyniki.

W rozdziale 5 przedstawione zostały wyniki, uzyskane przez doktoranta we współpracy z czwórką innych badaczy, dotyczące wpływu na własności galaktyk ich otoczenia w ramach kosmicznej sieci struktury wielkoskalowej. W szczególności ważnym



zagadnieniem było uwzględnienie wewnętrznej włóknistej struktury obszarów pustki. Natura badań wymagała symulacji o większej rozdzielczości niż zastosowano w Rozdziale 4. W związku z tym punktem wyjścia była dostępna publicznie symulacja Bolshoi, natomiast do analiz wykorzystane zostały moduły zastosowane w oryginalnym kodzie opisanym we wcześniejszym rozdziale. Różnice pomiędzy galaktykami powstającymi w obszarach pustki i gęstych obszarach kosmicznej sieci dotyczyły jedynie populacji mało masywnych galaktyk. Znaleziony wcześniej trend dłuższego czasu kolapsu proto-struktury znalazł potwierdzenie, natomiast nie znaleziono różnic w promieniach wirialnych w zależności od otoczenia galaktyki.

Przedmiotem rozdziału 6 było ważne zagadnienie praktyczne, jakim jest odtworzenie 3-wymiarowej struktury z 2-wymiarowych map (rzuty na sferę niebieską) dostępnych w przeglądach fotometrycznych, przy braku informacji o przesunięciach ku czerwieni, na podstawie informacji pochodzących z soczewkowania grawitacyjnego. Pomysł polega na wykorzystaniu pomiarów wielkości charakteryzujących słabe soczewkowanie grawitacyjne, takich jak rzutowana powierzchniowa gęstość masy, parametry ścinania oraz skalary optyczne Sachsa, do identyfikacji rzutowanych na sferę niebieską obszarów pustki. Jako dowód poprawności zaproponowanej metody wykonana została symulacja struktury wielkoskalowej dostarczając a priori informacji o obszarach pustki. Następnie na jej podstawie została stworzona 2-wymiarowa mapa reprezentująca obserwowany obraz nieba. Parametry słabego soczewkowania oraz skalary optyczne zostały wyznaczone metodą śledzenia promieni w pełnej 3-wymiarowej symulacji. Uzyskane wyniki potwierdziły oczekiwania, iż technika słabego soczewkowania może być użyta do identyfikacji obszarów pustki rzutowanych na sferę niebieską. Jednak metodologia zastosowana tutaj jest maksymalnie optymistyczna, tj. zakłada, że zmierzone parametry słabego soczewkowania będą dokładnie takie jak wynika z symulacji (tzn. z faktycznego rozkładu masy w ramach struktur wielkoskalowych). Autor jest świadom nieuwzględnienia niepewności pomiarowych. Interesujące byłoby oszacowanie rzędu wielkości takich niepewności. Kolejnym optymistycznym założeniem jest to, że skalary optyczne będą wielkościami mierzalnymi podczas gdy zazwyczaj mierzonymi wielkościami (ściśle związanymi ze skalarami Sachsa) są parametry: konwergencji κ i ścinania γ (wspomniane w rozdziale 3). Podobnie jak wcześniej, kod numeryczny służący do analiz opisanych w rozdziale 6 został upubliczniony na repozytoriach zenodo i codeberg. Rozdział 7 podsumowuje rozprawę, zaś przedstawione w niej wyniki zostały opublikowane w trzech artykułach w renomowanych czasopismach. Wkład doktoranta w opublikowane prace był wiodący. Rozprawa została napisana w sposób przejrzysty, czytelnie, dobrym językiem. Z merytorycznego punktu widzenia oceniam rozprawę wysoko.

Reasumując, uzyskane przez doktoranta, oryginalne wyniki zawarte w przedstawionej mi do oceny rozprawie oraz sposób ich prezentacji wskazujący na dobrą znajomość teorii formowania się struktury wielkoskalowej Wszechświata, teorii silnego i słabego soczewkowania grawitacyjnego oraz metod numerycznych sprawiają, że rozprawa spełnia formalne, ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie pana Mariusa Pepera do dalszych etapów przewodu doktorskiego i do publicznej obrony.

Prof. dr hab. Marek Biesiada