



Narodowe Centrum Badań Jądrowych
National Centre for Nuclear Research
ŚWIERK

Warszawa 10.10.2023

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

Ocena rozprawy doktorskiej mgr Chandra Shekhara Sarafa pt.
„Studying tomographic cross-correlations between CMB gravitational lensing potential and galaxy surveys.”

W swej rozprawie doktorskiej Pan mgr Chandra Shekhar Saraf przedstawił oryginalne wyniki swych badań dotyczących wzajemnej korelacji rozkładu galaktyk oraz zrzutowanego na powierzchnię ostatniego rozproszenia potencjału grawitacyjnego struktur wielkoskalowych odtworzonego metodą soczewkowania grawitacyjnego z fluktuacji promieniowania mikrofalowego tła (CMB). Precyzyjne pomiary anizotropii CMB dokonane przez satelitę *Planck* przeniosły współczesną kosmologię obserwacyjną w erę kosmologii precyzyjnej, gdy stało się możliwe wyznaczanie ważnych dla kosmologii wielkości, takich jak np. stała Hubble’a czy tzw. parametr S_8 , z niepewnością poniżej 1%. Jednocześnie pojawiły się niezgodności co do ich wartości w porównaniu z innymi technikami pomiaru. Z drugiej strony coraz głębsze (próbkujące większe przesunięcia ku czerwieni) i obszerniejsze (obejmujące coraz większe kąty bryłowe) przeglądy galaktyk stanowią istotne uzupełnienie wiedzy pochodzącej z zapisanego w anizotropii CMB obrazu młodego Wszechświata. Natomiast przeglądy galaktyk są narażone na pewne błędy systematyczne, mogące sztucznie zmieniać obserwowany rozkład galaktyk zniekształcając w ten sposób interpretację fizyczną obserwacji. W szczególności korelacja wzajemna między soczewkowaniem grawitacyjnym promieniowania tła możliwym do oceny z obserwowanych fluktuacji temperatury i polaryzacji CMB oraz rozkładem galaktyk w przeglądach fotometrycznych może ulegać takim błędom. Ich zbadanie i propozycja metod naprawczych były tematem rozprawy. W świetle już istniejących (DESI) i planowanych masywnych przeglądów nieba jak LSST tematyka rozprawy jest zatem bardzo aktualna i ważna.

Przedstawiona mi do oceny rozprawa jest napisana w języku angielskim, obejmuje sześć rozdziałów poprzedzonych streszczeniem w języku angielskim i polskim, podziękowaniami i spisem treści, rozprawę kończy bibliografia oraz dodatek. Rozprawa oparta jest na 1 pracy oryginalnej opublikowanej w *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Zawiera też, jeszcze nie opublikowane, lecz ciekawe i oryginalne

Adres:
ul. A. Soltana 7
05-400 Otwock

+48 22 273 10 01
+48 22 779 34 81
ncbj@ncbj.gov.pl

KRS: 0000171393
NIP: 532-010-01-25
www.ncbj.gov.pl



wyniki uzyskane pod kierunkiem dwóch promotorów: dr hab. Pawła Bielewicza i dr hab. Michała Chodorowskiego.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do rozprawy. Na początku, w encyklopedycznym skrócie i stylu przedstawione są podstawowe pojęcia związane ze współczesnym standardowym modelem kosmologicznym. Zostało to zrobione dość chaotycznie, a niektóre hasła przedstawione ubogo. Na przykład, omawiając rozszerzający się Wszechświat, autor odnosi się jedynie do Edwina Hubble'a nie wspominając o wcześniejszych wynikach Lemaitre'a i Friedmana uzyskanych z równań ogólnej teorii względności. W zasadzie jedynym klarownym przekazem pod-rozdziału 1.1 dla czytelnika są odnośniki do prac oryginalnych lub przeglądowych, z których czytelnik mógłby zaspokoić swą ciekawość. Następnie, w kolejnych pod-rozdziałach, nieco szerzej omówione są: mikrofalowe promieniowanie tła (CMB), wpływ słabego soczewkowania grawitacyjnego przez struktury wielkoskalowe na obserwowany rozkład fluktuacji CMB oraz korelacje wzajemne map soczewkowania CMB i rozkładu galaktyk. Rozdział kończy prezentacja fizycznych motywacji rozprawy. Brakuje tu wyjaśnienia na czym polegają niezgodności w ramach modelu Λ CDM. Padają tylko nazwy: niezgodność Hubble'a czy „ $\Omega_m - \sigma_8$ tension” przy czym autor nie wyjaśnia czym jest σ_8 .

Rozdział 2 przedstawia zastosowaną w badaniach metodę. Znowu jest to encyklopedyczny skrót. Nie jest zaznaczone explicite, że wzór (2.2) jest słuszny jedynie w płaskim modelu kosmologicznym, jego uogólnienie na przypadek niezerowej krzywizny przestrzennej Wszechświata jest dość proste i oczywiste. Podobnie brak jest wzmianki o tym, że Ψ jest potencjałem grawitacyjnym w granicy Newtonowskiej (i w ramach ogólnej teorii względności). W ogólniejszym przypadku, gdy w granicy małych zaburzeń metryki FLRW występują dwa potencjały Bardeena, Ψ jest tzw. potencjałem Weyla. Uwaga o ukrytym założeniu płaskości Wszechświata odnosi się też do równań (2.5), (2.7). Opis konstrukcji widma mocy odnoszącego się do pełnej sfery niebieskiej jest zrozumiały jedynie dla znawców tematu. Można by oczekiwać wyjaśnienia co to jest pseudo-widmo mocy oraz więcej szczegółów jak działa algorytm MASTER, a w szczególności własny kod cytując: „our own full-sky estimator based on the MASTER algorithm”. Nie zostało też należycie wyjaśnione czym są wyznaczone w pracy parametry: obciążenia galaktyk b oraz amplituda korelacji wzajemnej A .

Rozdział 3 przedstawia wyniki analiz korelacji wzajemnej pomiędzy katalogiem galaktyk HELP (*Herschel Extragalactic Legacy Project*) oraz mapami potencjału soczewkowania CMB uzyskanymi przez satelitę *Planck*. Rozdział ten przedstawia wyniki opublikowane przez doktoranta (jako pierwszego autora przy współautorstwie promotorów) w *MNRAS*. Dokładnie zostały opisane użyte zbiory danych: analizowane obszary przeglądu HELP, kryteria selekcji obiektów, rozkłady względnych niepewności fotometrycznych przesunięć ku czerwieni (tzw. foto- z), mapy konwergencji. Metoda opisana w Rozdziale 2 została przetestowana na symulacjach Monte Carlo map rozkładu galaktyk i konwergencji soczewkowania CMB o statystycznych własnościach analogicznych do analizowanych później danych. Metoda pozytywnie przeszła ten test. Następnie dokładnie omówione zostały badania na danych rzeczywistych. Najlepiej dopasowane parametry b_0 i A wykazują zgodność na poziomie $1-2\sigma$ pomiędzy badanymi obszarami nieba, natomiast amplituda wzajemnej korelacji A jest na podobnym poziomie $1-2\sigma$ zgodna z przewidywaniem modelu Λ CDM (czyli $A = 1$). Wyraźny jest jednak systematyczny trend niższej wartości centralnej A . Przedyskutowane zostały możliwe efekty systematyczne takie jak zanieczyszczenie



kosmicznym tłem podczerwonym, obciążenie wzmocnienia efektem soczewkowania (ang. *magnification bias*), niepewność wyznaczenia fotometrycznego przesunięcia ku czerwieni (włączając tzw. błędy katastrofalne), błędy kalibracji przeglądów fotometrycznych lub wpływ przyjęcia różnych map soczewkowania CMB. Rozważane efekty, przy realistycznych zakresach ich wielkości, nie były w stanie wyjaśnić otrzymanej niższej wartości amplitudy A .

W rozdziale 4 doktorant podjął się zbadania bardzo ważnego i jeszcze słabo rozpoznanego efektu jakim jest niepewność alokacji galaktyk w predefiniowanych przedziałach przesunięć ku czerwieni (ang. *redshift bins*) na skutek niepewności wyznaczania foto- z oraz wpływ tej niepewności na, wykonane techniką tomografii, pomiary korelacji wzajemnej między mapami soczewkowania CMB i przeglądami galaktyk. Badania zostały wykonane w oparciu o symulowane katalogi galaktyk oraz map konwergencji z soczewkowania CMB. Symulacja katalogu galaktyk zakładała profil rozkładu foto- z oczekiwany w przeglądzie LSST. Opracowana i zastosowana została elegancka metoda odtworzenia prawdziwego rozkładu przesunięć ku czerwieni z obserwowanego rozkładu foto- z . Następnie doktorant zbadał efekt błędnego przypisania galaktyk do przedziałów przesunięć ku czerwieni na skutek niepewności wyznaczania foto- z (tzw. przeciekanie między przedziałami). W tym celu pan mgr Chandra Shekhar Saraf opracował i zastosował technikę tzw. macierzy rozpraszania. Macierz ta może posłużyć do korekty wartości parametrów b_0 i A wyznaczanych w badaniach tomograficznych, czyli uwzględnienia efektu przeciekania między przedziałami przesunięć ku czerwieni. Praca na symulowanych danych pozwala na pełną kontrolę nad badanymi efektami oraz na wiarygodną ocenę skuteczności proponowanej metody. Uzyskane wyniki są bardzo obiecujące w kontekście zastosowania proponowanej metody w przyszłych masowych przeglądach galaktyk w połączeniu z mapami soczewkowania CMB.

W rozdziale 5 techniki zbadane w poprzednim rozdziale zostały zastosowane do analizy danych rzeczywistych. Katalog galaktyk pochodził z Dark Energy Spectroscopic Instrument Legacy Imaging Survey (DESI-LIS) natomiast mapy soczewkowania z satelity *Planck*. Ważnym wynikiem tego rozdziału jest konkluzja, że dokładny opis niepewności wyznaczania foto- z oraz jego wpływu na rozproszenie galaktyk między sąsiednimi przedziałami przesunięć ku czerwieni są kluczowe dla uzyskania nieobciążonych estymatorów parametrów kosmologicznych. W szczególności uwzględnienie tego efektu zmniejsza poziom niezgodności wyznaczenia σ_8 z trzech do jednego odchylenia standardowego.

Rozdział 6 podsumowuje rozprawę, a po spisie literatury umieszczony został dodatek. W dodatku przytoczone są dokładne wyrażenia matematyczne dotyczące macierzy kowariancji dyskutowanej w rozdziale 3. Następnie, szczegółowo pokazany jest wkład różnych przeglądów w zbiór danych katalogu HELP analizowanego w rozprawie. Dodatek kończy walidacja zastosowanej metody dekonwolucji.

Z merytorycznego punktu widzenia nie mam żadnych zastrzeżeń ani uwag krytycznych. Uważam wykonane badania za ciekawe i wartościowe. Sposób prezentacji rozprawy budzi u mnie poczucie niedosytu. Wybrane, konkretne uwagi zawarłem we wcześniejszych akapitach. Rozprawa jest napisana zbyt technicznie. Te uwagi krytyczne w niczym nie umniejszają wartości ani poprawności wykonanych badań i analiz, które to stanowią sedno rozprawy.



Narodowe Centrum Badań Jądrowych
National Centre for Nuclear Research
ŚWIERK

Reasumując, uzyskane przez doktoranta, oryginalne wyniki zawarte w przedstawionej mi do oceny rozprawie oraz sposób ich prezentacji wskazujący na bardzo dobrą znajomość tematyki związanej z kosmologią obserwacyjną, technikami analizy danych, w szczególności map CMB oraz rozkładu galaktyk, sprawiają, że rozprawa spełnia formalne, ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie Pana mgr Chandra Shekhara Sarafa do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora i do publicznej obrony.

Prof. dr hab. Marek Biesiada

Adres:
ul. A. Soltana 7
05-400 Otwock

+48 22 273 10 01
+48 22 779 34 81
ncbj@ncbj.gov.pl

KRS: 0000171393
NIP: 532-010-01-25
www.ncbj.gov.pl