

Wrocław, 23 sierpnia 2022

Prof. dr hab. Andrzej Borowiec
Uniwersytet Wrocławski
Instytut Fizyki Teoretycznej
Pl. Maksa Borna 9, 50-204 Wrocław

Recenzja rozprawy doktorskiej magistra Roberto Caroli

Ricci Cosmologies

Opiekun naukowy: prof. dr hab. Mariusz P. Dąbrowski

Pomimo niezaprzeczalnych sukcesów związanych z wysoką zgodnością z coraz liczniejszymi danymi obserwacyjnymi, kosmologiczny model standardowy Λ CDM zbudowany na zasadach grawitacji Einsteina uważany jest powszechnie za opis efektywny, nie potrafiący wyjaśnić natury ciemnej energii i ciemnej materii oraz zjawiska inflacji. W ostatnim czasie, zauważono również rozbieżności w wartości stałej Hubble'a uzyskanej za pomocą mikrofalowego promieniowania tła (CMB) a wartością otrzymaną z analizy gwiazd supernowych (SnIa). Daje to asumpt do rozwoju alternatywnych sformułowań, które w dużej liczbie i różnorodności stanowią, od wielu lat, przedmiot badań w dziedzinie kosmologii teoretycznej.

Recenzowana rozprawa mgr. Roberto Caroli zalicza się do tego nurtu badań, przy czym część grawitacyjna utrzymana jest w wersji oryginalnej, zaproponowanej przez Alberta Einsteina. W sformułowaniu tym jak i w większości alternatywnych teorii grawitacji lewa strona równań ruchu zawiera człony geometryczne podczas gdy prawa opisuje materię reprezentowaną przez tensor energii-pędu. W kosmologii ma on zazwyczaj formę płynu idealnego zawierającego trzy główne komponenty występujące w modelu Λ CDM: materię pyłową (łącznie barionową i ciemną), promieniowanie oraz ciemną energię (w postaci stałej kosmologicznej). Zmodyfikowane teorie można, w uproszczeniu, podzielić na dwie klasy: zmieniające część geometryczną lub wprowadzające bardziej egzotyczne lub realistyczne formy materii. Przy tym najprostsza modyfikacja, wprowadzona przez Einsteina stała kosmologiczna, może być rozpatrywana na oba sposoby. Rozprawa nawiązuje do tzw. kosmologii Ricciego, zakładającej, że tensor energii-pędu materii zawiera również „efektywne człony geometryczne”, liniowe w skalarze i tensorze Ricciego, które mogą być dodane do każdego rodzaju cieczy idealnej występującej w modelu standardowym. Modyfikują one ciśnienie cieczy wprowadzając do opisu zjawiska dyssypacji energii oraz lepkości, a więc odstępstwa od stanu cieczy idealnej i równowagi termodynamicznej. Ich współczynniki, zwane współczynnikami transportu drugiego rodzaju, podlegają później oszacowaniu na podstawie danych obserwacyjnych.

Należy zaznaczyć, że kosmologia Ricciego jest nową propozycją mającą swe źródło w nieopublikowanej jeszcze pracy, zatytułowanej *Ricci Cosmology* (e-Print: 1907.02974), której autorzy Rudolf Baier, Sayantani Lahiri, Paul Romatschke zaproponowali wspomnianą wyżej modyfikację tensora energii-pędu. Znaleźli też pierwsze analityczne rozwiązania dla metryki Friedmanna oraz zbadali ich przydatność do opisu inflacji. Rozprawa mgr. Caroli oparta jest

na wspólnej publikacji: Roberto Caroli, Mariusz P. Dąbrowski, Vincenzo Salzano, pt. *Ricci cosmology in light of astronomical data*, Eur. Phys. J. C 81 (2021) 10, 881, rozszerzającej istotnie klasę dostępnych modeli oraz badającej ich zgodność z danymi pochodzącymi z obserwacji astronomicznych. Charakterystyczną cechą nowych modeli jest ich formalne podobieństwo do Λ CDM, wyrażające się w „wielomianowej formie” zależności kwadratu parametru Hubble’a od czynnika skali (uogólnione równanie Friedmana).

Napisana w języku angielskim 90 stronicowa rozprawa składa się ze wstępu, 6 rozdziałów, zakończenia i dodatku. Rozdział drugi podsumowuje znane osiągnięcia i trudności modelu Λ CDM. Rozdział trzeci, oparty na monografii Romatschke, traktuje o dynamice relatywistycznej cieczy w pobliżu punktu równowagi, z uwzględnieniem zjawisk dyssypacji oraz lepkości. Modelowanie tych ostatnich za pomocą członów geometrycznych stanowi podstawę badanego formalizmu. Zasadniczy rozdział czwarty stanowi wprowadzenie do kosmologii Ricciego oraz formułuje nowe modele. Dokładniej, standardowa barotropowa zależność pomiędzy ciśnieniem a gęstością zostaje zmodyfikowana poprzez dodanie dwóch członów geometrycznych - liniowych kombinacji skalara oraz zrzutowanego na kierunek czteroprędkości tensora Ricciego. Współczynniki proporcjonalności (współczynniki transportu drugiego rodzaju), będą później szacowane za pomocą wybranych danych obserwacyjnych. Ważnym elementem jest uwzględnienie równania ciągłości tensora energii-pędu oraz różnych warunków energetycznych, nakładających ograniczenia na parametry proponowanych modeli. Dwa, z wprowadzonych rozwiązań wykazują odstępstwa od zasady kosmologicznej jednorodnego i izotropowego wszechświata:

1. model anizotropowy z metryką Bianchi I,
2. model niejednorodny z metryką LTB (Lemaitre-Tolman-Bondi)

W późniejszej analizie zasadniczą rolę odgrywają cztery modele z płaską metryką FLRW:

3. model próżniowy (Ricci Vacuum Cosmology),
4. model z zimną ciemną energią i oddziaływującą próżnią (Cold Dark Matter-Ricci Vacuum interaction),
5. model z ciemnym promieniowaniem i oddziaływującą próżnią (Dark Radiation-Ricci Vacuum interaction),
6. nachylona kosmologia Ricciego (Tilted Ricci Cosmology), z dwoma czteroprędkościami, z których jedna opisuje ciecz druga obserwatora.

W rezultacie, otrzymuje się analog modelu Λ CDM z wykładnikami potęg wyrażonymi za pomocą współczynników transportu. Umożliwia to znalezienie wartości i zakresów tych ostatnich poprzez kontrolę ich zgodności z modelem Λ CDM. Jednak autorzy publikacji wybrali trudniejszą drogę szacowania wartości parametrów transportu na podstawie zgodności z wynikami obserwacji astrofizycznych. Ponieważ liczba współczynników, sześć, jest dwukrotnie wyższa od, liczby składników modelu standardowego, potrzebne są dodatkowe założenia. Ich określenie oraz analiza statystyczna tak wprowadzonych modeli zajmuje pozostałą część rozprawy.

Rozdział piąty przybliża bayesowskie metody statystyczne (symulacje Monte-Carlo wykorzystujące łańcuchy Markowa) służące do uzyskania wartości parametrów modeli kosmologicznych uzgodnionych z danymi obserwacyjnymi. Same obserwacje i związane z nimi zbiory danych z podziałem na dwa zestawy: pełny oraz podzbiór charakteryzujący późny

etap ewolucji wszechświata, omówione są w rozdziale szóstym. Ten ostatni zestaw nie uwzględnia promieniowania mikrofalowego tła (CMB) oraz barionowych oscylacji akustycznych (BAO). Najliczniejszy zbiór danych, wspólny dla obu zestawów, stanowi katalog Pantheon zawierający 1048 Sml. Metodologia i rezultaty dopasowania parametrów czterech modeli przy czterech różnych hipotezach, dotyczących dodatkowych zależności pomiędzy współczynnikami transportu, przedstawione są w rozdziale siódmym, bardzo istotnym z punktu widzenia całości pracy i być może wkładu doktoranta. Niestety, omówione są one zbyt ogólnikowo, co nie odzwierciedla nakładu pracy potrzebnego do uzyskani przedstawionych statystyk. Szacowane wielkości mają formę poprawek do wykładników modelu standardowego związanych z obecnością materii pyłowej, promieniowania oraz stałej kosmologicznej. Analiza statystyczna oparta jest na zastosowaniu symulacji Monte-Carlo wykorzystujących łańcuchy Markowa, omówionych skrótowo w rozdziale V. Wyniki końcowe przedstawione są w czterech tabelach odpowiadającym czterem hipotezom badawczym w porównaniu z modelem LCDM oraz z uwzględnieniem dwóch zestawów danych obserwacyjnych. Pracę kończą podsumowanie i dyskusja wyników końcowych.

W mojej opinii, brak jest zbadania ewentualnych związków pomiędzy analitycznymi rozwiązaniami z pracy arXiv:1907.02974 [gr-qc] a przedstawionymi w rozprawie modelami. Wszak pierwsze mogą być przydatne w opisie inflacji, a drugie sprawdzają się w opisie obecnej fazy przyspieszającej ekspansji. Dodam, że proponowane modele można również analizować i porównywać jako układy dynamiczne na płaszczyźnie, co pozwala oceniać np. ich stabilność, czy też przybliżyć początkowe etapy ewolucji. Można zapytać w jakim stopniu niezerowa krzywizna przestrzenna prowadzi do jakościowych i ilościowych zmian w uzyskanych wynikach końcowych. Niewygodny dla czytelnika i recenzenta jest styl odnośników do literatury, APA (American Psychological Association), bez numeracji poszczególnych pozycji bibliograficznych.

Rozprawa doktorska pana mgr. Roberto Caroli napisana jest poprawnym językiem angielskim i dotyczy świeżej tematyki badawczej. Jej zawartość merytoryczną, metodologię oraz uzyskane wyniki oceniam bardzo wysoko. Układ pracy jest poprawny, literatura kompletna i adekwatna do rozważanych zagadnień, a sposób ich prezentacji zadowalający. Należy docenić podjęcie przez autora rozprawy ambitnej i nowatorskiej tematyki, jak też otrzymanie interesujących rezultatów, opublikowanych w uznanym czasopiśmie naukowym. Na szczególną uwagę zasługuje wyczerpująca analiza statystyczna nowych modeli. Z załączonego „Wykazu osiągnięć” wynika, że oprócz wspomnianej współautorskiej publikacji, doktorant prezentował wyniki swoich badań na dwóch konferencjach międzynarodowych w formie wystąpienia oraz plakatu. Uwzględniając powyższe, wnoszę o dopuszczenie pana magistra Roberto Caroli do dalszych etapów postępowania, uznając, że przedłożona rozprawa spełnia formalne i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2020 r. poz.85 z późn. zm.).

Borowiec