



UNIWERSYTET
WARSZAWSKI

Wydział Fizyki

dr hab. Krzysztof Turzyński, prof. ucz.

**WYDZIAŁ
FIZYKI**

Warszawa, 20 lipca 2024 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Paoli Delgado

Formalne aspekty rozprawy

Rozprawa doktorska mgr Paoli Delgado składa się z siedmiu rozdziałów poprzedzonych streszczeniem i podziękowaniami, licząca 235 pozycji bibliografia znajduje się na końcu pracy. Rozdział 1 jest bardzo krótkim wprowadzeniem do rozprawy, rozdziały 2-6 zawierają oryginalne wyniki naukowe uzyskane przez autorkę w ramach kolejnych projektów badawczych, zaś rozdział 7 stanowi krótkie podsumowanie poszczególnych wyników przedstawionych w rozprawie.

Kryteria formalne oceny rozprawy

Warunki, jakie musi spełniać rozprawa doktorska, określone są w ustawie prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z 20 lipca 2018 roku, z późniejszymi zmianami. Rozprawa doktorska powinna wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną w danej dyscyplinie naukowej oraz umiejętność prowadzenia badań naukowych. W szczególności, rozprawa doktorska może przedstawiać oryginalne rozwiązanie problemu badawczego.

Ocena rozprawy

Oceniając rozprawę doktorską mgr Delgado postaram się przedstawić zwięźle, które elementy rozprawy doktorskiej uważam za ważne wyniki naukowe potwierdzające kwalifikacje mgr Delgado do uzyskania stopnia naukowego doktora, i równocześnie omówię także moje uwagi krytyczne do tekstu rozprawy. Jakkolwiek te uwagi krytyczne mogą zajmować większą objętość mojej oceny, w moim zamierzeniu ich funkcją jest przekazanie mgr Delgado informacji zwrotnej o rozprawie jako o dziele naukowym, a nie wyrażenie mojej krytycznej oceny przedstawionych w rozprawie wyników naukowych.

Tytuł rozprawy jest bardzo ogólny i w zasadzie nie można na jego podstawie nic wywnioskować o tematyce rozprawy. Jest to skutkiem tego, że rozprawa przedstawia wyniki kilku oddzielnych projektów badawczych mgr Delgado poświęconych różnym aspektom ewolucji Wszechświata. Trudno jednak czynić z tego zarzut – taka konstrukcja rozprawy podkreśla szerokość zainteresowań badawczych mgr Delgado i bogactwo uzyskanych przez nią wyników.

Tematyka rozdziałów 2 i 3 dotyczy popularnego i dynamicznie rozwijającego się obszaru badań nad właściwościami wczesnego Wszechświata, w tym możliwego kwantowego pochodzenia pierwotnych niejednorodności prowadzących do powstania obecnej struktury Wszechświata. Klasyczna teoria względności przewiduje, że Wszechświat zaczął się od osobliwości, co było dawniej określane mianem wielkiego wybuchu. W pobliżu osobliwości teoria traci wszakże spójność i niemożliwe staje się deterministyczne opisanie ewolucji Wszechświata. Jednak w środowisku naukowym panuje przekonanie, że ta osobliwość jest wynikiem niedoskonałości klasycznego opisu i powinna zostać usunięta przez bardziej fundamentalną teorię uwzględniającą kwantową naturę rzeczywistości. Taką teorię nazywa się, nieco na wyrost, teorią kwantowej grawitacji i jej sformułowanie jest od lat przedmiotem intensywnych prac. Najbardziej znane kandydatury na taką teorię to teoria strun i pętlowa grawitacja kwantowa. Uproszczone metody opisu, w szczególności pętlowa kosmologia kwantowa, przyniosły obiecujące wyniki, przewidując, że osobliwość wielkiego wybuchu zostaje zastąpiona przez wielkie odbicie, czyli przejście od wszechświata kurczącego się do rozszerzającego się. W tym procesie kwantowy stan Wszechświata zachowuje swoje półklasyczne właściwości, a trajektoria jego rozmiaru jest dobrze oddzielona od stanu zerowej objętości. Podobne przewidywania mają również niektóre modele teorii strun, jak model ekpyrotyczny. Ogólnie, modele te możemy określić jako kosmologie odbiciowe, choć w praktyce używa się raczej angielskiego miana *bouncing cosmologies*.

Rozdział 2 rozpoczyna się od wprowadzenia do metod kwantowej kosmologii, w szczególności do równania Wheelera-De Witta i interpretacji de Broglie'a-Bohma rozwiązań tego równania. Początkowa część wstępu, opisująca formalizm ADM oraz wprowadzenie równania Wheelera-De Witta jest standardowa, zwięzła i bogata w informacje. Natomiast duży niedosyt pozostawia podrozdział poświęcony interpretacji de Broglie'a-Bohma mechaniki kwantowej. Mgr Delgado bardzo powierzchownie rekapituje postulat obiektywnej rzeczywistości stanowiący fundament tej interpretacji oraz nie dyskutuje zasadniczego powodu, dla którego interpretacja ta leży nieco na uboczu głównego nurtu fizyki – niekompatybilności niezmienniczości relatywistycznej, obiektywności i swobody wyboru pomiaru. W mojej ocenie przywołanie w kontekście kosmologicznym tej interpretacji, która została wywiedziona na gruncie nierelatywistycznej mechaniki kwantowej, zasługuje na pogłębioną dyskusję.

Jeśli jednak przejść do porządku dziennego nad interpretacją de Broglie'a-Bohma oraz nad postacią funkcji falowej Wszechświata prowadzącą do asymetrycznego odbicia, która także pojawia się jako *Ansatz* bez jakiegokolwiek szerszego kontekstu, rachunki widma mocy perturbacji gęstości przedstawione w rozdziale 2 są interesujące i stanowią nowe ważne wyniki kosmologii kwantowej, tym bardziej, że podejście półanalityczne wsparte jest obliczeniami numerycznymi. Ostateczny wniosek z nich wynikający jest negatywny – proponowany model Wszechświata okazuje się niezgodny z obserwacjami ze względu na zbyt dużą amplitudę pierwotnych perturbacji tensorowych (fal grawitacyjnych). **Jest to bardzo istotna konkluzja**, wskazująca na to, że konieczne byłoby znaczne skomplikowanie modelu poprzez wzbogacenie go o nowe pole, które nie doczekało się dotąd powściągliwej językowo nazwy w rodzimej mowie, a które, używając odniesień do greki, moglibyśmy nazwać kampilonem. Niestety, przedstawienie tego zasadniczego wniosku cierpi ponownie

przez nadmierną skrótowość tekstu, gdyż mgr Delgado pisze po prostu, że odpowiednie obliczenia należy wykonać analogicznie. Bardzo utrudnia to prześledzenie, jaka dokładnie własność przedstawionego w rozdziale 2 modelu powoduje jego niezgodność z doświadczeniem. Jest to pytanie ważne o tyle, że w przypadku najprostszych modeli inflacyjnych brak obserwacji pierwotnych perturbacji tensorowych nakłada ograniczenia na tzw. parametry wolnego toczenia się, związane z kształtem potencjału pola skalarnego powodującego inflację. Analogiczne rozważania w podsumowaniu rozdziału 2, a w szczególności wskazanie, skąd bierze się wyrażony liczbą rzeczywistą wynik $r = 32/3^{1/2}$, nadałyby głębi przedstawionej tam dyskusji wyników.

Jako warunek początkowy dla skalarnych perturbacji krzywizny przyjęto w rozprawie rozwiązanie odpowiadające próżni Buncha-Daviesa (strona 34). Jest on typowo nakładany w modelach inflacyjnych, jednak model rozważany w rozprawie różni się od typowych modeli inflacyjnych fazą kurczenia i odbicia. Nasuwa się zatem pytanie, czy te wcześniejsze fazy ewolucji Wszechświata nie zmodyfikowały tego warunku. Jakkolwiek w moim przekonaniu odpowiedź na nie jest negatywna, rozprawa nie odnosi się w ogóle do tego problemu.

W opisie metod numerycznych mgr Delgado odwołuje się do „action-angle variables” i podaje ich równania ewolucji bez zdefiniowania ewoluowanych wielkości. Taki sposób poprowadzenia wywodu wydaje się bezcelowy.

Rozdział 3 poświęcony jest analizie fenomenologicznej pierwotnych niegaussowskości w mikrofalowym promieniowaniu tła w modelach pętlowej kwantowej kosmologii. Cechą charakterystyczną tych modeli jest wykładnicze tłumienie niegaussowskości dla długości fal mniejszych niż pewna charakterystyczna długość graniczna. Mgr Delgado odnosi się w swoich rachunkach do propozycji wysuniętej przez innych badaczy, że taka forma pierwotnych niegaussowskości pozwala na wyjaśnienie pewnych anomalii obserwowanych w statystykach mikrofalowego promieniowania tła: tłumienia mocy na małych skalach, asymetrii między parzystymi i nieparzystymi multipolami oraz asymetrii między kolejnymi multipolami. Dzięki starannemu porównaniu przewidywań modelu i danymi obserwacyjnymi mgr Delgado stawia tezę, że niemożliwe jest wyjaśnienie wspomnianych anomalii bez naruszenia ograniczeń obserwacyjnych na pierwotne niegaussowskości pochodzących z danych satelity Planck. **Jest to kolejny ważny wynik zawarty w rozprawie.**

Prezentacja wyników rozdziału 3 wykazuje mankamenty wytknięte już wcześniej. Wstęp teoretyczny zawiera wprowadzenie statystycznego opisu korelacji fluktuacji temperatury mikrofalowego promieniowania tła, co jest, rzecz jasna niezbędne do opisu niegaussowskości tych fluktuacji, ale wiąże się też z dwupunktowymi funkcjami korelacji, czyli z widmem mocy opisywanym w rozdziale 2. Tym samym spójność narracji rozprawy cierpi skutek wybranej przez mgr Delgado modułowej konstrukcji tekstu, w którym poszczególne rozdziały odpowiadają poszczególnym projektom badawczym bez unifikującej je koncepcji. Co więcej, dyskusja na stronie 44, zakładająca, że funkcja falowa może ze względu przejście Wszechświata z fazy kurczenia się do fazy rozszerzania się może wykazywać odstępstwa od stanu próżni Buncha-Davies, wydaje się niezgodna z cytowaną wyżej dyskusją z rozdziału 2, uzasadniającą nałożenie warunku początkowego na stan w postaci próżni Buncha-Davies.

W rozdziale 4 mgr Delgado opisuje kolejny projekt badawczy, tym razem dotyczący problemu ewolucji pól skalarnych w modelach holograficznej ciemnej energii. W rozdziale tym przedstawione są rachunki widma mocy dla perturbacji skalarnych i tensorowych w modelu dwupolowym uwzględniającym liniowe perturbacje stopni swobody dodatkowego sektora holograficznej ciemnej energii.

Wyniki uzyskane w tym rozdziale nie jest trudno jakościowo przewidzieć, biorąc pod uwagę dwa założenia czynione przez mgr Delgado. Pierwszym z nich jest postulat, że dodatkowe wkłady do jednorodnego składnika gęstości energii pochodzące od holograficznej ciemnej energii i ciemnego promieniowania są małe podczas inflacji, drugim jest natomiast słabe sprzężenie dwóch stopni swobody obecnych w teorii. W takiej sytuacji otrzymuje się w wiodącym przybliżeniu widmo mocy perturbacji skalarnych takie jak w przypadku standardowej inflacji z jednym polem skalarnym, z ewentualnymi małymi poprawkami.

Dyskusja perturbacji skalarnych przedstawiona w rozdziale 4 jest stosunkowo powierzchowna, nie wskazuje potencjalnych źródeł nowych efektów oraz, po stwierdzeniu, że poprawki do perturbacji skalarnych są małe, nie proponuje analizy numerycznej potwierdzające słuszność poczynionych założeń i uzyskanych wniosków. Co więcej, fragment dyskusji następujący po równaniach (4.65) jest błędny w tym zakresie, że tłumienie sprzężeń perturbacji inflatonu do perturbacji innych pól przez czynnik będący pierwiastkiem z parametru wolnego toczenia się nie jest argumentem wystarczającym do uznania, że wpływ tych perturbacji na perturbacje inflatonu jest zaniedbywalny. Czynnikiem istotnie o tym decydującym jest niewielki udział wkładów dodatkowych sektorów w budżecie energii Wszechświata.

Analogicznie jak dla perturbacji skalarnych, także perturbacje tensorowe obliczone przez mgr Delgado zgadzają się w wiodącym rzędzie z wynikiem uzyskanym dla standardowej inflacji z jednym polem skalarnym.

W rozdziale 5 występuje kolejna zmiana tematyki rozprawy, polegająca na rozważaniu rezonansu parametrycznego pozwalającego na wzbudzenie modów pola elektromagnetycznej w polu stojącej fali grawitacyjnej. Należy podkreślić, że **tematyka tego rozdziału jest ważna i ciekawa, a przedstawiony w nim pomysł jest nowy i ma potencjalne znaczenie** dla interpretacji obserwacji kosmologicznych.

W porównaniu z istotną wagą naukową przedstawionych w rozdziale 5 idei, sposób ich opisanie może budzić zastrzeżenia. W przeciwieństwie do innych rozdziałów, które zawierają wstępy z opisem założeń, definicji i podstawowych faktów stanowiących bazę metodologiczną dociekań naukowych, w rozdziale 5 odpowiednie wprowadzenie jest bardzo skrótowe. Choć podstawowym narzędziem matematycznym, do którego odwołuje się mgr Delgado, jest twierdzenie Floqueta, nie jest ono przytoczone, ani nie jest zdefiniowane pojęcie wykładników Floqueta. Na rycinie 5.1 przedstawiono obszary niestabilności dla parametrów równania Mathieu, do których mgr Delgado odwołuje się w dalszej części rozdziału 5. To odwołanie jest jednak mało czytelne – po zapisaniu równania (5.29) na ewolucję pola elektromagnetycznego mgr Delgado pisze, że występujące w nim funkcje

można przededefiniować tak, by uzyskać równanie Mathieu i skorzystać z ryciny 5.1, ale analiza ta nie jest przedstawiona w pracy.

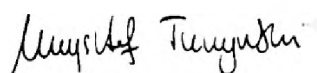
W mojej ocenie wynikom przedstawionym w rozdziale 5 brakuje również kontekstu astrofizycznego. Jednym z zasadniczych wyników ilościowych przedstawionych w tym rozdziale jest stwierdzenie, że fala grawitacyjna przechodząca przez obszar o gęstości optycznej porównywalnej z gęstością wody może wzbudzić promieniowanie elektromagnetyczne. Warto się zastanowić, czy takie warunki spełnione są we Wszechświecie, co dawałoby szansę empirycznej weryfikacji bardzo ciekawej hipotezy przedstawionej przez mgr Delgado.

W rozdziale 6 mgr Delgado korzysta z wypracowanej wcześniej metodologii i stosuje analizę rezonansu parametrycznego w innym problemie – wzbudzania fal grawitacyjnych przez pola lekkich cząstek, które potencjalnie mogą tworzyć halo ciemnej materii. **Zasadniczym i ważnym wynikiem tych badań** jest stwierdzenie, że wytworzone w proponowany przez mgr Delgado sposób fale grawitacyjne mogą być potencjalnie dostrzeżone w urządzeniach takich jak Pulsar Timing Array. Tekst rozdziału 6 jest szczególnie dobrze przygotowany, wywód poprowadzony jest przystępnie, poszczególne argumenty wynikają jeden z drugiego, a wykresy w pouczający sposób ilustrują kolejne etapy rozumowania.

Przedstawione wyżej uwagi prowadzą mnie do wniosku, że rozprawę doktorską mgr Delgado należy oceniać na dwóch poziomach. Pierwszy – ważniejszy! – to waga przedstawionych w rozprawie wyników badawczych. Ten aspekt pracy oceniam bardzo pozytywnie, gdyż są one bardzo różnorodne, a każdy z nich w nietrywialny sposób pogłębia nasze zrozumienie możliwych scenariuszy ewolucji Wszechświata i zachodzących w nim zjawisk, od epok najwcześniejszych po dziś dzień. Drugim poziomem jest sam tekst rozprawy, który oscyluje od nadmiernej szczegółowości do przesadnej skrótowości, co często utrudnia śledzenie prowadzonych w rozprawie rozumowań.

Podsumowanie

Rozprawa doktorska mgr Paoli Delgado wykazuje niezbiecie, że **mgr Delgado jest niezwykle wszechstronną naukowczynią, która potrafi podejmować różnorodne problemy badawcze fizyki teoretycznej wczesnego Wszechświata i podawać ich rozwiązania**. Tym samym, w mojej ocenie rozprawa doktorska mgr Delgado z naddatkiem potwierdza spełnienie wymagań dla kandydatów do stopnia naukowego doktora. Z tego względu wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie mgr Delgado do kolejnych etapów postępowania o nadanie stopnia naukowego doktora.



Podpisany elektronicznie przez
Krzysztof Turzyński, Uniwersytet Warszawski
20.07.2024
9:11:25 +02'00'