

Wrocław, dnia 28.11.2024

dr hab. Tomasz Pawłowski, prof. UWr
Instytut Fizyki Teoretycznej
Wydział Fizyki i Astronomii
Uniwersytet Wrocławski

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Alice Boldrin

Rozprawa doktorska Pani mgr Alice Boldrin o tytule “Classical and quantum aspects of perturbations in Primordial Universe” została przygotowana w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku (departament badań podstawowych w Warszawie) pod kierunkiem dr hab. Przemysława Małkiewicza oraz dr Patricka Petera.

Tematyka pracy obejmuje bardzo obecnie dynamicznie się rozwijający obszar badań w fizyce teoretycznej – interfejs kosmologii i grawitacji kwantowej. O ile ogólna teoria względności (OTW) opisuje z dużą dokładnością rzeczywistość w makroskali (skala astronomiczna) podczas gdy fizyka kwantowa dobrze odzwierciedla rzeczywistość w mikroskali, obie te teorie oparte są na wzajemnie wykluczających się pryncypiach. Stanowi to przeszkodę w zrozumieniu fizyki wczesnego Wszechświata gdzie zarówno zjawiska relatywistyczne jak i kwantowe grają znaczącą rolę. Dlatego wiarygodny opis w/w epoki wymaga teorii konsystentnie łączącej oba aspekty – tzw. kwantowej grawitacji. Z drugiej strony obserwowana obecnie struktura rozkładu materii we wszechświecie ma swoje źródło w tzw. pierwotnych fluktuacjach materii, co do których panuje powszechne przekonanie, iż narodziły się z fluktuacji kwantowych. Dlatego też oczekuje się, że (spodziewana) kwantowość grawitacji miała wpływ na proces tworzenia pierwotnych fluktuacji i poprzez obserwacje struktury materii/promieniowania relikтового ta ostatnia może być falsyfikowalna.

Ze względu na nieliniowość grawitacji i potwierdzoną obserwacyjnie małą wielkość niejednorodności we wczesnym Wszechświecie jednym z podstawowych narzędzi w kosmologii stał się opis perturbacyjny, gdzie niejednorodności opisywane są przez liniowe perturbacje żyjące na jednorodnym (najczęściej izotropowym) tle. Opis ten może następnie stanowić punkt wyjścia do kwantowania, jednak mimo prostszej struktury dziedziczy on część własności stanowiących przeszkodę w kwantowaniu dla pełnej teorii. Jednym z nich jest fakt, że w opisie hamiltonowskim (stanowiącym podstawę do kwantowania) OTW jest teorią z więzami, w szczególności jej hamiltonian jest trywialny a ewolucja czasowa generowana jest przez więz hamiltonowski. Prowadzi to do tzw. problemu czasu w OTW – swoboda wyboru współrzędnej czasowej (zegara) prowadzi do mnogości opisów, które po skwantowaniu nie są unitarnie równoważne (definiują różną dynamikę). Dodatkowo, o ile teoria perturbacji kosmologicznych wokół izotropowego tła jest powszechnie rozwijana, jej rozszerzenie na tło jednorodne ale nieizotropowe nawet na poziomie klasycznym cieszy się znacznie mniejszą popularnością. Właśnie problem czasu przez w/w rozszerzenie opisu perturbacyjnego stanowią główne cele badawcze objęte rozprawą.

Sama rozprawa liczy (ze spisem literatury) 107 stron i jest podzielona na cztery rozdziały (z dodatkowymi dwoma appendiksami). Spis literatury zawiera 117 pozycji. Przedstawione w niej wyniki opublikowane zostały (do tej pory) w trzech artykułach opublikowanych w wysokiej jakości recenzowanych czasopismach (*Physical Review D* oraz *Classical and Quantum Gravity*) oraz dwóch publikacjach pokonferencyjnych (proceedings). Prace te są kilkautorские - publikowane wspólnie z promotorem rozprawy doktorskiej. Zawartość poszczególnych rozdziałów jest następująca: po krótkim (nie numerowanym) wstępie motywacyjnym rozdział 1 zawiera zwarte wprowadzenie do formalizmu hamiltonowskiego (kanonicznego) dla teorii z więzami, w szczególności relacji więzów z cechowaniem oraz tzw. programu Diraca identyfikacji dynamiki. Formalizm ten stanowi podstawowe narzędzie w badaniach opisywanych w dalszych rozdziałach.

Opis wyników uzyskanych przez Kandydatkę rozpoczyna się od rozdziału 2 gdzie dokonano rewizji formalizmu hamiltonowskiego dla liniowych perturbacji w OTW, w szczególności implementując w sposób systematyczny program kwantyzacji Diraca, wprowadzając do tego celu specyficzną parametryzację czasoprzestrzeni wykorzystującą tzw dekompozycję Kuchara. Na poziomie wiodącym (tła) ewolucja czasowa (podobnie jak OTW) jest generowana przez wiąz hamiltonowski, jednak po ustaleniu cechowania dla tła ewolucja perturbacji jest już generowana przez prawdziwy hamiltonian. O ile sformułowanie hamiltonowskie dla perturbacji kosmologicznych jest znane, nowym wynikiem jest tu specyficzna konstrukcja formalizmu, spodziewana stanowić szczególnie użyteczny punkt wyjścia do kwantyzacji na późniejszych etapach badań.

Formalizm zbudowany w rozdziale 2 posłużył następnie do konstrukcji opisu perturbacji kosmologicznych wokół nieizotropowego tła, konkretnie wszechświata typu Bianchi I z materią w postaci masywnego pola skalarnego. O ile formalizm hamiltonowski dla tego scenariusza został zbadany wcześniej (Pereira *at al*) nowym aspektem pracy jest tu jego specyficzne, odmienne od poprzednich sformułowanie dostosowane do (planowanej) późniejszej kwantyzacji. Znamienną własnością uzyskanego opisu jest to, iż (inaczej niż dla perturbacji we wszechświecie izotropowym) polaryzacje w modach tensorowych i mody skalarne nie rozdzielają się, co prowadzi do trudności w zdefiniowaniu fal grawitacyjnych w w/w scenariuszu. Opis skonstruowany został dla kilku wyborów cechowania w tym, dla wyborów osobliwych w przejściu granicznym do wszechświata izotropowego.

Rozdział 4 poświęcony jest problemowi czasu. Wprowadzony w rozdziale 2 specyficzny formalizm został tu użyty do opisu modelu analogicznego do analizowanego w rozdziale 3, jednak gdzie tłem perturbacji pozostaje jednak wszechświat izotropowy – płaski (toroidalny) wszechświat Friedmanna-Lemaitre’a-Robertsona-Walkera (FRLW). Dla tak zdefiniowanego układu rozważone zostały transformacje funkcji czasu (zegara) polegające na lokalnym przesunięciu o funkcję opóźnienia (będącą funkcją samego czasu i zmiennych dynamicznych). Stopnie swobody tła zostały następnie skwantowane a ich dynamika opisana przy użyciu formalizmu tzw. dynamiki uogólnionych stanów koherentnych (GCS) podczas gdy dla modów perturbacji użyto standardowych dla kosmologii procedur kwantowania. W kolejnym kroku dynamika samego tła jak i pierwotnych fal grawitacyjnych została przeanalizowana dla kilku wybranych kształtów funkcji opóźniającej. Analiza ta wykazała, iż różne wybory czasu mogą prowadzić do znaczących modyfikacji dynamiki w pobliżu tzw. wielkiego odbicia (tu będącego wynikiem zastosowania formalizmu GCS) ale w granicy małych gęstości występuje konwergencja do wspólnej dla wszystkich zbadanych wyborów trajektorii. Prowadzi to do ogólnego wniosku, iż dowolność wyboru czasu prowadzić może do znaczącej dowolności w przewidywaniach ewolucji Wszechświata w danym modelu/teorii kwantowej grawitacji w epoce wysokich energii (near bounce).

Ostatecznie główne wyniki są dyskutowane w krótkim nienumerowanym rozdziale końcowym.

O ile nie mam znaczących uwag do badań opisanych w rozdziałach 2 i 3, to mam wrażenie, że wyniki uzyskane w rozdziale 4 powinny być potraktowane jako wstępne i interpretowane z dużą ostrożnością. Powody ku temu są następujące

1. Metoda GCS użyta w kwantowaniu stopni swobody tła wprowadza znaczący poziom dowolności, których konsekwencje mogą być w dyskutowanym zastosowaniu trudne do kontroli. Mianowicie, system kwantuje się podobnie do modelu cząstki swobodnej na pół linii. W standardowym Schrödingerowskim sformułowaniu mechaniki kwantowej hamiltonian nie jest operatorem samosprzężonym. Dlatego też tutaj algebrę Heisemberga modyfikuje się, zastępując pęd dylatonem. Następnie wybiera się rodzinę stanów “fiducjalnych” (*fiducial*) i z nich konstruuje się rodzinę stanów (tzw. uogólnionych stanów koherentnych). W oryginalnych zmiennych położenie-pęd prowadzi to do zmodyfikowania hamiltonianu o efektywny potencjał osobliwy na brzegu przestrzeni konfiguracyjnej, w rozważanych tutaj scenariuszach odpowiedzialny za odbicie (bounce). Następnie konstruuje się tzw dynamikę efektywną zakładając, iż ewolucja zachowuje skonstruowaną rodzinę stanów i rzutując ewolucję kwantową na ewolucję zmiennych parametryzujących tę rodzinę. Wybory dokonane przy w/w konstrukcji znacząco wpływają na potencjał efektywny a więc i na przewidywaną dynamikę całego układu. Dodatkowo, zmiana cięć stałego czasu powoduje, że te same funkcje zmiennych dynamicznych będą opisywały różne stany fiducjalne a w konsekwencji różne rodziny stanów GCS. W efekcie różnice w dynamice skonstruowanej przy różnych wyborach stanów, zwłaszcza przy milczącym założeniu, iż wybrane rodziny są zachowywane przez dy-

namikę kwantową, prowadzi do różnic w przewidywaniach. Pojawia się zatem pytanie, czy obserwowane różnice są rzeczywiście manifestacją problemu czasu, czy też są efektem dowolności w formalizmie GCS. Odpowiedzieć na to pytanie można chociażby powtarzając obliczenia dla tła skwantowanego standardowymi metodami mechaniki kwantowej, gdzie dla podobnych systemów konstruuje się rodzinę rozszerzeń samosprzężonych hamiltonianu za pomocą funkcji defektu. Metody te również przewidują odbicie (niejednoznaczne, zależące od wyboru rozszerzenia), występujące jednak znacznie bliżej brzegu przestrzeni konfiguracyjnej. Porównanie takiej analizy z wynikami uzyskanymi przy użyciu GCS pozwoliłoby na większą pewność w identyfikacji powodów obserwowanych dowolności w dynamice.

2. Analizy zależności wyników od funkcji opóźnienia dokonano dla zaledwie dwóch wybranych postaci funkcyjnych tejsze. Dlatego nie jest jasne czy konwergencja rozwiązań dla małych energii jest cechą ogólną, czy też jest konsekwencją pewnych cech wspólnych dla wybranych postaci, np faktu, że opóźnienie stabilizuje się bądź wręcz zanika dla małych pędów czynnika skali. Także brak informacji o rozmiarze populacji przykładowych wartości parametrów i zasięgu przebadanych wartości. W rozprawie podano informację o zaledwie kilku przypadkach ukazanych na rysunkach.
3. Wybierając np wszechświat izotropowy z bezmasowym polem skalarnym można zbudować prosty system kwantowomechaniczny, gdzie więź hamiltonowski odpowiada równaniu Kleina-Gordona, a pole skalarne zastępuje czas. W takiej sytuacji, jednoznaczny stan na płaszczyźnie czynnik skali-pole (odpowiadający historii wszechświata) można charakteryzować różnymi obserwabliami Diraca odpowiadającymi no obserwabliom geometrycznym na ustalonych cięciach czasu. Wtedy modyfikacja czasu zaproponowana w rozprawie też będzie prowadzić do różnic w przewidywanych trajektoriach, ale te różnice w znacznym stopniu będą powiązane z wariancją tychże obserwabli. Dlatego też przy badaniu różnic trajektorii nie wystarczy zbadanie samych wartości oczekiwanych. Ważne jest też sprawdzenie, na ile wykryte różnice są znaczące w stosunku do wariancji ewoluujących stanów kwantowych. Niestety tego porównania w rozprawie nie przeprowadzono, przez co niemożliwe jest określenie na ile wykryte niejednoznaczności są poprawkami “wyższego rzędu” maskowanymi przez wariancję. Jest to odpowiednik pytania zadawanego przy eksperymencie: czy obserwowane różnice są znaczące w stosunku do błędu pomiarowego?

Poza powyższą główną krytyką, mam jedynie parę drobnych uwag dotyczących prezentacji. Są to:

1. W ostatnim paragrafie abstraktu Kandydatka pisze “time reparametrization invariance in GR affects the quantum evolution...”. Zapewne chodzi o to, że niszczy on jednoznaczność tej ewolucji a nie ją modyfikuje.
2. W polskiej wersji abstraktu (trzeci paragraf) użyty jest termin “uniezgadnianie cechowania”. Czy chodzi tu o warunki wyboru czy też braku wyboru cechowania?
3. Str. 7, paragraf pod rysunkiem: lapse i shift nie są zmiennymi pomocniczymi a komponentami w rozkładzie metryki. Jedynie ze względu na trywialność pędów pełnią rolę mnożników Lagrangea.

Podsumowując, w rozprawie Kandydatka zaprezentowała serię własnych wyników, które są ciekawe i obiecujące. W badaniach nie wykryłem żadnych podstawowych błędów mogących uczynić wyniki nieprawdziwymi. Sama rozprawa napisana jest w sposób przystępny i (poza kilkoma punktami omówionymi powyżej) klarowny. W związku z powyższym stwierdzam, iż przedstawiona dysertacja spełnia formalne i merytoryczne warunki obowiązującej ustawy o szkolnictwie wyższym i nauce, oceniam pracę bardzo pozytywnie i wnioskuję o przeprowadzenie dalszych etapów procedury uzyskania stopnia naukowego doktora nauk fizycznych dla Pani mgr Alice Boldrin.

dr hab. Tomasz Pawłowski