

Wrocław, dnia 18.10.2023

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

## Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Jaime de Cabo Martín

Rozprawa doktorska Pana mgr Jaime de Cabo Martín o tytule “Modelling the primordial universe with quantum spacetimes” została przygotowana w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku (departament badań podstawowych w Warszawie) pod kierunkiem dr hab. Przemysława Małkiewicza. Tematyka pracy wpisuje się w obecnie bardzo popularny i dynamicznie rozwijający się obszar badań nad własnościami wczesnego Wszechświata, w szczególności nad możliwym kwantowym pochodzeniem pierwotnych niejednorodności prowadzących do uformowania się obecnej struktury Wszechświata. Klasyczna teoria względności (GR) przewiduje, iż Wszechświat rozpoczął swoją egzystencję w tzw. osobliwości wielkiego wybuchu, gdzie sama teoria traci spójność a możliwość deterministycznego opisu ewolucji wszechświata załamuje się. W społeczności naukowej panuje jednak (powszechne) przekonanie, iż ta osobliwość jest jedynie artefaktem niedoskonałego ze względu na klasyczny charakter opisu, który powinien zostać usunięty poprzez zastosowanie jakiejś doskonalszej (bardziej fundamentalnej) teorii, w szczególności uwzględniającej kwantową naturę rzeczywistości. Taki opis łączący teorię względności w fizykę kwantową określa się ogólnie mianem teorii kwantowej grawitacji. Obecnie trwają zaawansowane prace nad kandydatami na taką teorię.

Do najbardziej znanych (ale bynajmniej nie jedynych) należą: teoria strun i tzw. pętlowa grawitacja kwantowa. Uproszczone metody opisu, w szczególności zastosowane metod grawitacji pętlowej do modeli kosmologicznych znane jako pętlowa kosmologia kwantowa dostarczyły obiecujących wyników w tej materii. Według ich przewidywań osobliwość wielkiego wybuchu jest zastąpiona poprzez tzw. wielkie (lub kwantowe) odbicie stanowiące deterministyczne przejście od wszechświata kolapsującego do (obecnie obserwowanego) ekspandującego. W tym procesie kwantowy stan wszechświata zachowuje swoje semiklasyczne własności a trajektoria jego rozmiaru jest dobrze oddzielona od stanu zerowej objętości. Nie jest to wyłączna cecha kosmologii pętlowej, podobne przewidywania dają niektóre modele wywodzące się z teorii strun (bran), jak model ekpyrotyczny. Ogólnie modele dające takie przewidywania znane są pod nazwą kosmologii odbiciowych (bouncing cosmologies).

W opisywanej rozprawie doktorskiej Kandydat stosuje do modeli kosmologicznych dość nieortodoksyjną metodę opisu ewolucji stanów kwantowych poprzez dynamikę tzw. uogólnionych stanów koherentnych (GCS). Stany takie definiowane są jako stany minimalizujące wariancję w określonej algebrze podstawowych operatorów. W opisie swobodnej cząstki jednowymiarowej jest to algebra Weyla-Heisenberga, natomiast w kosmologii ze względu na dodatnią określoność czynnika skali (którego monotoniczna funkcja zazwyczaj jest jedną ze zmiennych konfiguracyjnych) bardziej właściwa (jako zachowująca przestrzeń Hilberta) jest algebra afiniczna, której generatorami są położenia i dylatacje. Same GCS tworzą nadmiarową (overdefined) bazę – nie są ortogonalne ale pozwalają zdefiniować rozkład jedynki z pewną nietrywialną miarą. Daje to *a-priori* możliwość opisu dynamiki stanu kwantowego jako ewolucji funkcji rozkładu w w/w “bazie” stanów koherentnych. W badaniach opisywanych w rozprawie doktorskiej Kandydat przyjął uproszczoną technikę przybliżonego opisu dynamiki kwantowej, określoną dalej jako semikwantową (semiquantum), a która opiera się na (niejednoznacznym) wyborze pewnej skończonej wymiarowej rodziny stanów koherentnych (zwanej dalej fiducial) a następnie założeniu, iż ewolucja czasowa systemu kwantowego zachowuje wybraną rodzinę. Wtedy kwantową ewolucję

można zapisać jako ewolucję parametrów definiujących stan w obrębie wybranej rodziny generowaną przez pewien efektywny hamiltonian.

W rozprawie metoda powyższa została zastosowana do zbadania kilku modeli kosmologicznych (włączając w to model izotropowy oraz tzw Bianchi IX) w formalizmie geometrodynamiki. Kandydat uzyskał szereg interesujących technicznych rezultatów dotyczących zarówno dynamiki samego wszechświata jednorodnego, jak i perturbacji, dla których jednorodna czasoprzestrzeń stanowiła tło. Sama rozprawa liczy (ze spisem literatury) 109 stron i jest podzielona na siedem rozdziałów. Spis literatury zawiera 98 pozycji. Przedstawione w niej wyniki opublikowane zostały (do tej pory) w dwóch artykułach opublikowanych w wysokiej jakości recenzowanych czasopismach (Physical Review D) (+jeden preprint obecnie w procesie recenzji oraz jeden w przygotowaniu) oraz dwóch publikacjach pokonferencyjnych (proceedings). Prace te są kilkuautorskie - udział kandydata w każdej z nich był znaczący lub większościowy a szczegóły tego udziału są opisane we wstępie do rozdziałów 3-6. Zawartość poszczególnych rozdziałów jest następująca: rozdział 1 zawiera wstęp motywacyjny, rozdział 2 zawiera przejrzyste i zwarte wprowadzenie do badanych zagadnień i użytych metod: W szczególności pokrótce przypomniane zostały podstawowe własności jednorodnych (w tym izotropowych) modeli kosmologicznych, teoria liniowych perturbacji kosmologicznych opartych o zmienne Muchanowa-Sasakię, wspomniana paragraf wcześniej metoda GCS opisu systemów kwantowo mechanicznych oraz semikwantowe przybliżenie opisu ich dynamiki.

Opis wyników uzyskanych przez Kandydata rozpoczyna się od rozdziału 3, w którym rozważany jest problem niejednoznaczności opisu kwantowego perturbacji kosmologicznych. Konkretnie, Kandydat rozważa liniowe perturbacje wszechświata izotropowego z płynem barotropowym (emulowanym za Kucharem zestawem pól skalarnych). Stopnie swobody tła kwantowane są standardowymi metodami mechaniki kwantowej (podejście geometrodynamiczne) z zastosowaniem GCS, a ich ewolucja jest determinowana metodą semikwantową. W pierwszym etapie analizowana jest dynamika tylko izotropowego/jednorodnego wszechświata, w szczególności pokazane zostaje, iż klasyczna osobliwość zastąpiona zostaje pewnym rodzajem odbicia. Następnie perturbacje (zmienne Muchanowa-Sasakię) są kwantowane przy użyciu standardowo stosowanych w kosmologii metod teorii pola w przybliżeniu pola testowego. Kandydat analizuje modele oparte dwa wybory zmiennych: fizyczny (zwany w pracy *fluid*) i konforemny, konkludując iż dają one jakościowo różne opisy perturbacji kosmologicznych. Dla uzyskanych opisów Kandydat oblicza widmo spektrum mocy perturbacji w rozdziale 4. W szczególności badana jest zależność parametrów tegoż spektrum od wyboru stanów odniesienia (fiducial) w formalizmie GCS zastosowanym dla tła. Wyniki pogłębiają ustaloną wcześniej niejednoznaczność przewidują fizycznych dla różnego wyboru zmiennych w opisie perturbacji.

Rezultaty poprzednich rozdziałów stosowane są następnie w rozdziale 5, gdzie badane jest tzw. finalna struktura perturbacji, ustalona poprzez stan w momencie przekroczenia danego modu perturbacji poza horyzont Hubbla - ważna ze względu na to, iż po wyjściu poza horyzont Hubbla dany mod ulega zamrożeniu i przez to zmienia naturę z czysto kwantowej fluktuacji na klasyczną. W szczególności zbadany został wpływ na tą strukturę parametrów bezpośrednio wynikających z wyboru stanów odniesienia, np kształtu i amplitudy efektywnego potencjału odpychającego indukowanego poprzez opis semikwantowy. Aby móc odtworzyć obserwowaną strukturę niejednorodności potencjał ten musi być anomalnie silny.

W rozdziale 6 badany jest (przy zastosowaniu semikwantowego przybliżenia w formalizmie GCS) model wszechświata jednorodnego nieizotropowego znany jako Bianchi IX. Klasycznie model ten cechuje się, pomimo swojej prostoty, nader skomplikowaną dynamiką i zachowaniami chaotycznymi. Tutaj Kandydat zadaje bardzo ciekawe pytanie: czy w obrębie bogactwa dynamiki w tym modelu można zrealizować scenariusz, gdy spowodowana odpychającym potencjałem (charakterystycznym dla semikwantowego podejścia w GCS w rozważanych modelach kosmologicznych) epoka kwazi-inflacji może być na tyle długa, aby dać model konkurencyjny wobec standardowych modeli inflacyjnych. Niestety odpowiedź na to pytanie okazała się negatywna - epoka ta jest zbyt krótka.

Ostatni rozdział 7 zawiera krótkie podsumowanie uzyskanych wyników i dyskusję nad możliwościami poszerzenia ich w dalszych badaniach.

Moja główna krytyka pracy dotyczy nie tyle samych badań (które zostały przeprowadzone bardzo solidnie)

ale samego przybliżenia semikwantowego w formalizmie GCS i w szczególności ich zastosowania w pracy: odnoszę wrażenie, iż została ona tutaj użyta dość bezkrytycznie – nie przeprowadzono ani nie omówiono tutaj żadnych elementów kontroli konsystencji. Otóż należy zwrócić uwagę na kilka aspektów:

1. W standardowej mechanice kwantowej opis cząstki swobodnej na połowie linii ( $\mathbb{R}^+$ ) jest dobrze znany i szczegółowo opisywany w podręcznikach. Charakteryzuje się on brakiem samosprężoności hamiltonianu, co prowadzi do istnienia rodziny samosprężonych jego rozszerzeń, z której każde generuje unitarną ewolucję. W konsekwencji dane początkowe nie wystarczają do jednoznacznego opisu ewolucji czasowej stanu – do tego potrzebne są dodatkowe dane brzegowe na krańcu domeny ( $x = 0$ ). Dla każdego z rozszerzeń dynamikę cechuje odbicie pakietu falowego od  $x = 0$ , aczkolwiek szczegóły odbicia (zależne od pędu przesunięcie fazowe) zmieniają się pomiędzy rozszerzeniami. Zastosowanie tego opisu do kosmologii izotropowej prowadzi do modelu “kosmologii odbiciowej”, jednak bardzo różnego od np. LQC. O ile w LQC odbicie jest konsekwencją ograniczenia spektrum operatora gęstości energii a semiklasyczny pakiet falowy jest zawsze odległy (względem wariancji rozmiaru wszechświata) od osobliwości, to tutaj pakiet falowy zbliża się do  $x = 0$  na odległość porównywalną z (mniejszą od) wariancją. W efekcie proces odbicia nie jest determinowany żadną klasycznie obserwowalną wielkością a parametrami kwantowymi - konkretnie wariancją pakietu falowego, podobnie jak odbicie fotonu w lustrze. Oczywiście Kandydat w pracy stosuje inną metodę, ale bardzo brakuje porównania jej z tą podręcznikową choćby w części wstępnej pracy, zwłaszcza, że takie porównanie mogłoby rzucić światło na źródła wykrytych przez Kandydata niejednoznaczności.
2. Tak samo jak wynik pomiaru fizycznego jest niewiele wart bez określenia błędu pomiaru, tak opis trajektorii kwantowej wiele traci bez uzupełnienia jej o wariancję. Wykryta własność fenomenologiczna może być na przykład całkowicie maskowana przez wariancję i przez to nie mieć fizycznego znaczenia. Tymczasem w badaniach opisanych w rozprawie nie ma zupełnie żadnej próby jej analizy. Jest ona jednak bardzo ważna zwłaszcza w kontekście dyskutowanych w pracy niejednoznaczności oraz różnic wobec podejścia “podręcznikowego”. Poznanie wariancji pozwoliłoby na przykład na stwierdzenie, czy wszechświat rzeczywiście odbija się daleko od osobliwości, czy też sięga jej (z dokładnością do wariancji).
3. Podejście semikwantowe opiera się w swoim “rdzeniu” na milczącym założeniu, iż wybrana klasa stanów odniesienia (fiducial) jest zachowywana przez działanie Hamiltonianu. Ponieważ stany te są wybierane ad-hoc, założenie to pozostaje niezwyfikowane. Można jedynie mieć nadzieję, że klasy te są zachowywane w przybliżeniu. Wtedy można się spodziewać, iż efektywna trajektoria semikwantowa będzie dobrym przybliżeniem rzeczywistej trajektorii dla wybranego stanu początkowego. Niestety w pracy nie omówiono żadnych testów pozwalających ocenić dokładność takiego przybliżenia. W efekcie zidentyfikowane własności trajektorii mogą równie dobrze być artefaktami rozbieżności przybliżonego efektywnego opisu w stosunku do rzeczywistej ewolucji kwantowej. Dlatego krytyczne staje się pytanie: jak dobre są wybrane stany odniesienia? Czy istnieją metody weryfikacji ich “jakości” i czy zostały one tu zastosowane? Czy można wyjść poza przybliżenie semikwantowe w celu jego weryfikacji? Odpowiedź na te pytania jest szczególnie ważna w świetle opisanych niejednoznaczności przewidywań - zależności części wyników od wyboru klas stanów odniesienia. Bez tego trudno uznać je za godne zaufania. Tytaj znowu pojawia się też pytanie, jak wykryte różnice mają się do wariancji stanów.
4. W kontekście powyższych punktów ważne staje się pytanie: jak wybrana metoda działa dla innych (badalnych doświadczalnie) systemów kwantowo mechanicznych? Czy zastosowanie go do np. odbicia fotonu od lustra prowadziłyby do wyników odmiennych od podręcznikowych? Jeśli tak, to dlaczego nie jest to widoczne w eksperymentach czy choćby w działaniu luster w LIGO? Jeżeli wyniki są rozbieżne z danymi doświadczalnymi, to użyteczność tej metody stoi pod znakiem zapytania. Jeżeli przyjmujemy z kolei postawę, iż wybrana metoda powinna być stosowana do kosmologii a nie do dostępnemu doświadczalnemu elementom, to lepiej aby wybór ten miał głębokie uzasadnienie pochodzące od fizycznych pryncypiów.

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

1. Zdanie w abstrakcie: “The result of our research raises new questions and challenges for the development of quantum cosmology” powinno być sformułowane ostrożniej. Źródłem wątpliwości mogą (i w ogólności historycznie z reguły są) być niedobory zastosowanych technik i przyjęte założenia oraz przybliżenia. W tym sensie jest to raczej problem dla konkretnej przyjętej metody, nie dla dziedziny.
2. Dyskusja nad koniecznością wprowadzenia kwantowej grawitacji na początku str. 2 jest myląca. Sama niekompletność geodezyjnych nie jest przesłanką. Jest nią raczej fakt, że GR nie uwzględnia efektów kwantowych, o których wiemy (skądinąd), że w małych skalach i dla wysokich energii są znaczące.
3. Na str. 9 przytoczone są wyniki klasycznego opisu dynamiki wszechświata izotropowego. Tu bardzo przydałoby się też dodać krótkie podsumowanie podręcznikowego opisu kwantowego.

Podsumowując, w rozprawie Kandydat zaprezentował 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 aspektami 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 Pana mgr Jaime de Cabo Martín.

dr hab. Tomasz Pawłowski