



Warszawa, 29.04.2021

Recenzja rozprawy pana mgra Artura Miroszewskiego
pod tytułem
"Quantum corrections and the singularity problem in cosmology"
(Korekcje kwantowe i problem osobliwości w kosmologii)

Rozprawa oparta jest na czterech artykułach współautorstwa Doktoranta opublikowanych (lub przyjętych do publikacji) w recenzowanych czasopismach :

- *Przemysław Małkiewicz and Artur Miroszewski, Internal clock formulation of quantum mechanics, Phys. Rev. D 96, 046003 (2017)*
- *Przemysław Małkiewicz, Artur Miroszewski, and Hervé Bergeron, Quantum phase space trajectories with application to quantum cosmology, Phys. Rev. D 98, 026030 (2018)*
- *Przemysław Małkiewicz and Artur Miroszewski, Dynamics of primordial fields in quantum cosmological spacetimes, arXiv:2011.03487, przyjęta do druku w Phys. Rev. D ;*
- *Artur Miroszewski, Quantum Big Bounce Scenario and Primordial Gravitational Waves, Acta Phys. Pol. B Proc. Suppl. 13, 279 (2020)*

oraz na prepryncie Doktoranta z 2009 roku:

- *Artur Miroszewski, Quantum dynamics in Weyl-Heisenberg coherent states, arXiv:2009.00056.*

Tematem pracy jest kwantowy model czasoprzestrzeni wypełnionej płynem doskonałym oraz propagacja na tym tle kwantowych perturbacji. Kosmologiczna czasoprzestrzeń oraz płyn opisane są teorią kanoniczną z więzami pierwszego rodzaju. Problem ewolucji czasowej rozwiązany zostaje przy wykorzystaniu mechanizmu deparametryzacji - zmienna czasowa zostaje zastąpiona funkcją zależną od pola materii. Poprzez rozwiązanie więzu skalarnego wyprowadzony zostaje efektywny hamiltonian fizyczny generujący relacyjną ewolucję obserwabli fizycznych dyktowaną równaniami Einsteina. Model kwantowy konstruowany jest metodą kwantyzacji koherentnej. Jej podstawowym elementem jest rodzina stanów koherentnych, na której odpowiednia całka po przestrzeni fazowej dostarczona przez ogólną teorię przyporządkowuje funkcjom zmiennych dynamicznych danej teorii klasycznej operatory kwantowe. W pracy zastosowano stany koherentne dostarczone przez reprezentacje grupy afinicznej działającej na przestrzeni fazowej o geometrii półpłaszczyzny. W uzyskanym modelu przewidywany przez teorię klasyczną wielki wybuch zastąpiony zostaje wielkim odbiciem - kwantowy wszechświat ewoluowany wstecz w czasie dochodzi do pewnej minimalnej skali, przy której kurczenie zatrzymuje się, a następnie kwantowy wszechświat rozszerza się. W rezultacie krótka faza kwantowa zawierająca odbicie oddziela dwie fazy semiklasyczne, kurczącego się i ekspandującego wszechświata. Jest to znany scenariusz badany w kontekście kwantowych modeli kosmologicznych od kilkunastu lat. Kolejnym krokiem w konstrukcji modelu, jest zdefiniowanie kwantowych perturbacji propagujących się po

kwantowym tle. O ile jednak w teorii klasycznej przybliżenie pola testowego jest dość dobrze zdefiniowane, o tyle teoria pola testowego na tle kwantowym jest znacznie trudniejsza. Doktorant stawia jej czoła wyposażony w swoją ulepszoną metodę zmiennych stanów semiklasycznych.

W rozdziale pierwszym przedstawione zostały dwie niezależne teorie wykorzystywane w pracy: pierwszą jest kanoniczna teoria jednorodnej izotropowej czasoprzestrzeni oddziałującej z płynem doskonałym zgodnie z ogólną teorią względności, a druga to teoria stanów koherentnych. Omówiono także, w jaki sposób ich wspólne zastosowanie prowadzi do definicji i ewolucji stanu kwantowego wszechświata wygładzającego osobliwość początkową, zamieniając wielki wybuch w wielkie odbicie.

W rozdziale drugim omówiono koncepcję czasu relacyjnego, która pojawia się naturalnie, gdy hamiltonian jest jednym z więzów teorii, co ma miejsce w teorii Einsteina. Można też przeprowadzić odwrotną konstrukcję, czyli w teorii bez więzów wyposażonej w jednoznacznie zdefiniowany czas rozszerzyć przestrzeń fazową o dwa wymiary, czas i hamiltonian i nałożyć dodatkowe więzy. Więzy zredukują jeden stopień swobody a transformacje cechowania drugi.

O ile w teorii klasycznej z więzami nie robi różnicy, którą zmienna dynamiczną wybierzemy do parametryzacji dynamicznych zmian pozostałych zmiennych, o tyle kwantyzacja silnie zależy od tego wyboru. W rezultacie ta równoważność nie przenosi się do teorii kwantowej.

Nie podzielam więc optymizmu, jaki miałby płynąć z poniższego wniosku (str. 21): "wszystkie odpowiednie formalizmy kanoniczne oparte na wszystkich możliwych zegarach wewnętrznych i powiązane pseudokanonicznymi przekształceniami mogą być kwantowane w jednolity sposób. Wszystkie odpowiednie teorie kwantowe mogą być umieszczone w tej samej przestrzeni Hilberta H." Do tego tematu mam jeszcze jedną uwagę. W literaturze teorii kanonicznych z więzami hamiltonowskimi często używa się zwrotu "wybór czasu". Podobny zwrot występuje w Rozprawie. W rzeczywistości kluczowy dla zdeparametryzowanej teorii jest wybór zmiennej kanonicznej sprzężonej z czasem, czyli hamiltonianu. Co więcej, sama zmienna czasowa jest tak bardzo zależna od transformacji cechowania, że nie posiada żadnego sensu fizycznego.

Rozdziały trzeci i czwarty opisują propozycje spójnego formalizmu łączącego bardzo skuteczne ale przybliżone metody semiklasyczne z dokładną mechaniką kwantową. W rozdziale trzecim stosowana jest rodzina stanów koherentnych odpowiadających grupie Weyla-Heisenberga, natomiast w rozdziale czwartym wykorzystane zostały stany koherentne grupy afinicznej. Te drugie stosowane są w podejściu do kosmologii kwantowej przyjętym w Rozprawie.

Oryginalnym elementem uogólnionego formalizmu są kwantowe obserwable i ich dynamika. Dzięki większej dokładności mają one ujawniać asymetrie pomiędzy kurczącą a rozszerzającą fazą ewolucji kwantowych stanów wszechświata. W rozdziale trzecim brakuje jednak argumentów dowodzących, że wprowadzone uogólnienie metod semiklasycznych rzeczywiście poprawia ich ścisłość. Przydałyby się też definicje używanych symboli matematycznych. Szkoda też, że praca będąca źródłem tych oryginalnych wyników rozdziału trzeciego nie została opublikowana w recenzowanym czasopiśmie, mimo, że preprint istnieje od 2009 roku.

Rozdział piąty Rozprawy poświęcony został kwestii efektów obserwacyjnych w późnym Wszechświecie spowodowanych kwantowym mechanizmem unikania klasycznej osobliwości początkowej. W tym celu wprowadzono perturbacje kwantowe i zbadano ich propagację na kwantowym tle czasoprzestrzeni ze szczególnym zwróceniem uwagi na efekty powodowane przez potencjał odpychający pochodzący z kwantyzacji afinicznej i spychający dynamikę wszechświata z jego klasycznej trajektorii oraz na efekty rozrzutu kwantowej funkcji falowej wszechświata. Dokładnie zbadano zjawiska związane z przejściem liniowych modów perturbacji przez rejon czasoprzestrzeni odpowiadający wielkiemu odbiciu. Głównymi przewidywaniami są zjawisko

promieniowania grawitacyjnego generowanego podczas przechodzenia modów perturbacji przez silnie kwantowy rejon wielkiego odbicia oraz dyspersja.

Rozdział szósty zawiera podsumowanie i omówienie przyszłych kierunków badań. Wyniki Rozprawy zajęły tu jedynie 10 linijek - to stanowczo za mało. Podsumowanie jest właśnie tym, co ma pozostać na trwałe jako nowa wiedza wpływająca z wieloletnich badań Doktoranta.

Bibliografia Rozprawy zawiera poważne luki. Całkowicie brak wzmianki o modelach pętlowej kosmologii kwantowej, które także przewidują wielkie odbicie jako wygładzenie osobliwości zwanej wielkim wybuchem. Co więcej, w ramach tego programu także badane są kwantowe perturbacje jednorodnego wszechświata. Systematyczne porównanie tych różnych podejść do perturbacji kwantowych w kwantowym wszechświecie w cenny sposób uzupełniłoby Rozprawę

W uznaniu ciekawych wyników badań przedstawionych w Rozprawie i licząc na wyjaśnienie wspomnianych w mojej recenzji wątpliwości, stwierdzam, że Rozprawa spełnia warunki potrzebne dla przejścia do kolejnych etapów postępowania i o takowe niniejszym wnioskuję.

Prof. dr hab. Jerzy Lewandowski
(ten plik jest podpisany elektronicznie)

jerzy.lewandowski@fuw.edu.pl