

Wrocław, dnia 19.08.2022

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

## Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Samuela Barroso Bellido

Rozprawa doktorska Pana mgr Samuela Barroso Bellido o tytule “What Could a Pair of Universes Tell Us About the Multiverse” została przygotowana w Instytucie Fizyki (Wydział Nauk Ścisłych i Przyrodniczych) Uniwersytetu Szczecińskiego pod kierunkiem prof. dr hab. Mariusza Dąbrowskiego. Praca dotyczy poszukiwania obserwowalnych efektów istnienia mutliwszechświata tzw IIIgo typu w klasyfikacji Tegmarka (a raczej jego pewnej nieortodoksyjnej wersji) w kontekście kanonicznej kosmologii kwantowej. Pojęcie multiwszechświata IIIgo typu wywodzi się z teorii pomiaru kwantowego, konkretnie z tzw interpretacji Everetta pomiaru, gdzie (mówiąc bardzo ogólnie) obserwowana (klasyczna) makroskopowa rzeczywistość jest rzutem na zestaw wektorów własnych rodziny obserwabli. W konsekwencji jedna rzeczywistość kwantowa dopuszcza całą rodzinę (klasycznych) rzeczywistości makroskopowych. Ze względu na fakt, iż Wszechświat kwantowy jest obiektem autonomicznym i jakiegokolwiek układy pomiarowe są strukturami w jego obrębie, nie systemami zewnętrznymi, precyzyjny opis struktury takiego multiwszechświata jest niestety nader trudny. Praca skupia się na pewnej wariacji realizacji tej idei, zapożyczającej struktury opisu i metodologię z teorii cząstek elementarnych w ujęciu kwantowej teorii pola. Opiera się ona tzw trzeciej kwantyzacji – pomysłu, iż kwantyzacja modeli kosmologicznych o wysokiej symetrii (np. izotropowych) prowadzi do reprezentacji Wszechświata jako obiektu kwantowo-mechanicznego o skończonej liczbie zmiennych kwantowych i w miarę prostej przestrzeni stanów kwantowych. Dla wielu modeli, biorąc populację pojedynczych kwantowych wszechświatów można wtedy uformować przestrzeń Focka i zastosować interpretację stanów własnych (odpowiednio deparametryzowanego) Hamiltonianu jako analogu cząstek o określonej energii. Obserwowany Wszechświat jest wtedy jedną z takich “cząstek”. Jeżeli teraz struktura matematyczna teorii bądź fenomenologiczny postulat zada jakąś formę oddziaływania pomiędzy wszechświatami w populacji, można zadać pytanie o obserwowalność jego efektów. Podejście to nie jest bardzo popularne, ale jest konsekwentnie rozwijane przez grupę badaczy i sensownie wpisuje się w ekosystem fenomenologicznej kosmologii. Jako takie, jest ono naukowo konsystentne, ma potencjał (pod warunkiem uzyskania charakterystycznej sygnatury obserwacyjnej) uzyskania znaczących wyników w przyszłości i jest zdecydowanie warta dalszego rozwijania.

Sama rozprawa liczy (ze spisem literatury) 105 stron i jest podzielona na sześć rozdziałów. Spis literatury zawiera 161 pozycji. Przedstawione w niej wyniki opublikowane zostały (do tej pory) w trzech artykułach opublikowanych w wysokiej jakości recenzowanych czasopismach (Physical Review D) (+jeden preprint obecnie w procesie recenzji): dwóch kilkuautorskich i jednej jednoautorskiej Kandydata oraz w jednej publikacji pokonferencyjnej (proceedings). Zawartość poszczególnych rozdziałów jest następująca: rozdział 1 zawiera wstęp motywacyjny, rozdział 2 zawiera przejrzyste i zwarte wprowadzenie do użytego podejścia i rodziny rozważanych modeli kosmologicznych. W szczególności pokrótce streszczony został program kwantyzacji geometrodynamicznej ogólnej teorii względności i przedstawione zostało jego zastosowanie do izotropowych modeli kosmologicznych (modele Wheelera-DeWitta), oraz sam program trzeciej kwantyzacji. Dla uproszczenia, jako populację wszechświatów kandydat rozważa ich parę, odpowiadającą sektorom superselekcji o dodatniej i ujemnej energii naturalnie pojawiającym się w opisie ze względu na podobieństwo więzu Hamiltonowskiego z

równaniem Kleina-Gordona. Dla takiej pary zdefiniowana jest reprezentacja niezmiennicza a następnie entropia splątania.

Opis wyników uzyskanych przez Kandydata rozpoczyna się od rozdziału 3, w którym zapostulowana jest naturalna relacja pomiędzy wszechświatami o dodatniej i ujemnej energii oraz wprowadzony konkretny algorytm obliczania entropii splątania. Następnie, algorytm ten jest zastosowany do obliczenia w/w entropii dla serii prostych modeli kosmologicznych (modele izotropowe z polem skalarnym, stałą kosmologiczną i materią barotropową). Następnie (przy wykorzystaniu wspomnianych przykładów) zachowanie entropii splątania zostało zanalizowane dla różnych typów kosmologicznych osobliwości w klasyfikacji Tiplera i Królaka.

Zawartość rozdziału 4 stanowi próba uzyskania potencjalnie obserwowalnej sygnatury obecności drugiego członka pary wszechświatów (“antyświata”). W tym celu Kandydat rozważa teorię liniowych perturbacji kosmologicznych (bez reakcji zwrotnej) dla których tłem jest wszechświat izotropowy o dynamice zidentyfikowanej w rozdziale 2. Po zapostulowaniu wybranej prostej klasy członów Hamiltonianu oddziaływania obliczane są (przy wykorzystaniu przybliżonych metod analitycznych) wynikające z tego oddziaływania poprawki do spektrum mocy perturbacji. Dla rozważanych przykładów obliczenia te przewidują wzmocnienie najniższych multipoli w reliktowym promieniowaniu tła o intensywności (poprzez to obserwowalności) zależnej od stałych sprężenia w członie oddziaływania Hamiltonianu.

Rozdział 5 zawiera opis próby zbliżenia rozważanego podejścia do oryginalnej teorii pola, z której zapożycza ono metodologię. Poważną odmiennością od tej ostatniej (oprócz faktu, iż cząstki-wszechświaty żyją na abstrakcyjnej przestrzeni, nie w czasoprzestrzeni Minkowskiego) jest naturalna dla kosmologii bezpośrednia zależność potencjałów od czasu. Aby ją usunąć, kandydat proponuje dość często stosowany w takich przypadkach pomysł – wprowadzenie dodatkowego pola, które wygenerowałoby potrzebny potencjał jako efektywny. Proponowany jest konkretny przykład takiego pola. Niestety zaprezentowane w tym samym rozdziale obliczenia dla tego przykładu wskazują, iż nie spełnia on pokładanych w nim nadziei.

Ostatni rozdział 6 zawiera krótkie podsumowanie uzyskanych wyników i perspektyw prezentowanej linii badawczej.

Dyskusję przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników chciałbym rozpocząć od obserwacji, iż wyniki te uzyskane zostały dla zapostulowanej ad-hoc postaci oddziaływania pomiędzy wszechświatami. Jak Kandydat sam zauważa w rozprawie, na dzień dzisiejszy nie jest znany fizyczny argument pozwalający wybrać wyróżnioną formę Hamiltonianu oddziaływania. Oczywiście nie umniejsza to sensowności przeprowadzonych badań. Celem pracy było ustalenie czy efekty istnienia struktury multiświatów mogą być obserwowalne i analizę tą od czego trzeba było zacząć. Jednak uzyskane wyniki traktować trzeba jako bardzo wstępne.

Biorąc to pod uwagę, stwierdzam, iż uzyskane wyniki są obiecujące a prezentowana linia badawcza ma szansę na dynamiczny rozwój. Mam jednak kilka pytań i wątpliwości dotyczących przyjętej metodologii. Są to:

1. *Wybór wewnętrznego czasu:* Kandydat deparametryzuje wiąź Hamiltonowski na poziomie kwantowym wybierając jako parametr ewolucji czynnik skali. Wybór ten nie jest fortunny, jako że klasycznie dla wszechświata zamkniętego nie jest on monotoniczny. Prowadzi to do szeregu komplikacji, gdzie np. stan fizyczny kwantowego wszechświata zamkniętego trzeba by interpretować jako parę wszechświat-antyświat (inną od rozważanej w w pracy w kontekście multiświatów a odpowiadającej epokom ekspansji/kolapsu jednego z wszechświatów w parze) anihilującą w momencie rekolapsu. Rozumiem, iż Kandydat chciał pozostać w zgodzie z istniejącą literaturą i mieć możliwość odwoływania się do istniejących wyników, jednak istnieją bardziej wygodne wybory parametrów ewolucji: pola materii jak np. bezmasowe pole skalarene czy (jeżeli chce się pozostać przy geometrycznych stopniach swobody) pęd kanoniczny objętości ( $a(t)^3$ ) proporcjonalny do parametru Hubble’a. Czy ich zastosowanie nie dałoby bardziej przejrzystego i konsystentnego opisu? Np. postulowana wysoka kwantowość punktu rekolapsu jest spowodowana konkretnym wyborem wewnętrznego czasu.
2. *Fizyczne znaczenie entropii splątania* dla scenariuszy kosmologicznych nie dopuszczających poza “czasem” żadnych dynamicznych kwantowych stopni swobody: (podrozdziały 3.6.2, 3.7). W takich przypadkach, dla ustalonych wartości parametrów klasycznych przestrzeń Hilberta ma wymiar 2. Dodatkowo

stany wszechświata i antyświata są powiązane wybranym warunkiem brzegowym. Rozumiem, że w takim przypadku dalej można obliczyć uzyskane matematyczne wyrażenie na entropię splątania, jednak jakie jest znaczenie tego parametru?

3. *Numeryka*: W rozdziale 4 Kandydat oblicza entropię splątania numerycznie, jednak poza samym wspomnieniem tego faktu w rozprawie nie ma żadnych informacji dotyczącej użytych metod czy też kontroli dokładności obliczeń. Jak dokonano obliczeń i jaka była ich precyzja? Jak kontrolowano błędy numeryczne? Zachowanie entropii splątania jest jednym z głównych wyników pracy i w/w informacje są niezbędne do oceny prawidłowości wyników.

Oprócz mankamentów metodologii rozprawa zawiera też pewne drobne niedociągnięcia i błędy w prezentacji, ograniczone głównie do rozdziałów wstępnych (nie wpływające na jakość prezentowanych wyników). Są to:

1. Na str. 19-20 Autor przypisuje nietrywialność członów brzegowych działania zwartości przestrzeni. Tymczasem dla przestrzeni zwartych (brak brzegu) one właśnie znikają. Ważne są one natomiast dla rozmaitości niezwartych (z brzegiem "asymptotycznym").
2. Dlaczego we współczynnikach rozkładu na elementy bazy w (2.13) nie ma faz?
3. Jaka jest rola przykładu zdefiniowanego w (2.31). Nie wydaje się on być wykorzystywany dalej w pracy ...
4. W dyskusji problemu czasu warto było *explicite* przypomnieć, że uzyskany stan fizyczny odpowiada *historii* Wszechświata, nie jego stanowi w danym czasie i cała komplikacja techniczna polega na wprowadzenie intuicyjnego rozumienia ewolucji poprzez odpowiedni wybór obserwabli bądź deparametryzację.
5. Paragraf poniżej (2.66) jest trochę niejasny. Czy możliwe było zdeterminowanie rozkładu spektralnego stanu próżni dla wszystkich definicji tego ostatniego i w każdym przypadku jest to rozkład Plancka? Jeżeli tak, warto też przytoczyć źródła.
6. Technika obliczenia jednej z ważniejszych wielkości użytych w pracy – entropii splątania zdefiniowana jest w jednym krótkim paragrafie (tuż przed rozdziałem 3.4) wymuszającym skakanie do innego rozdziału. Jako ważny element, powinien on zostać zaprezentowany w formie bardziej szczegółowej i "samowystarczальной".
7. Dyskusja w drugim (pierwszym pełnym) paragrafie na str. 86 jest nieprecyzyjna. Skonstruowany model nie jest teorią pola, więc nie ma powodu spodziewać się symetrii dlań charakterystycznych. Jest on natomiast analogiem zapożyczającym z niej metody opisu i wygodne jest uczynienie tego analogu bliższym poprzez "odzyskanie" użytecznych symetrii.
8. W całej rozprawie Kandydat używa jednej z wersji jednostek Plancka. Jednak, ze względu na kwantowy charakter poszukiwanych wyników i bezpośrednie znaczenie grawitacji, znacznie łatwiej byłoby ocenić efekty jakościowo, gdyby  $G$ ,  $\hbar$  zostały pozostawione (oczywiście tam, gdzie to jest możliwe) w wyrażeniach.

Na koniec, sam tekst rozprawy zawiera niewielką ilość błędów językowych: ortograficznych i składniowych, których nie będę wymieniał i które jednak nie wpływają na klarowność pracy w sposób znaczący.

Podsumowując, w rozprawie Kandydat zaprezentował serię własnych wyników, które są ciekawe i obiecujące. W badaniach nie wykryłem żadnych podstawowych błędów mogących uczynić wyniki nie wartymi zaufania. Sama rozprawa napisana jest w sposób przystępny i (poza przypadkami wymienionymi powyżej) klarowny. W związku z powyższym stwierdzam, że 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 Samuela Barroso Bellido.

dr hab. Tomasz Pawłowski