

Dr hab. Przemysław Małkiewicz, Prof. inst.  
Narodowe Centrum Badań Jądrowych  
Departament Badań Podstawowych  
ul. Pasteura 7, 02-093 Warszawa

Warszawa, 28.07.2022 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Samuela Barroso Bellido pt.:

**“What Could a Pair of Universes Tell Us About the Multiverse”**

**Ocena wstępna:**

Rozprawa doktorska mgr. Samuela Barroso Bellido dotyczy tzw. formalizmu trzeciej kwantyzacji dla układów grawitacyjnych, a w szczególności układów kosmologicznych. Trzecia kwantyzacja opiera się na interpretacji równania Wheelera-DeWitta jako równania na zespolone pole klasyczne. Kwantyzacja tego pola wprowadza “wielowszechświatowe” stany kwantowe w analogii do tzw. drugiej kwantyzacji bozonów i wielocząstkowych stanów bozonowych. Istotną rolę odgrywa tu globalna symetria przesunięcia fazy, która prowadzi do pojęcia “antywszechświata”. Idea “wieloświata” pojawiła się w pionierskiej pracy autorstwa Caderni i Mardellini, a następnie była rozwijana przez wielu autorów, między innymi przez promotora mgr. Bellido, prof. Mariusza Dąbrowskiego.

Wieloświat jest formalnie możliwym kierunkiem rozwoju kwantowej teorii grawitacji, a w związku z poważnymi trudnościami jakie napotyka kwantyzacja grawitacji jest aktualnym i wartościowym tematem badawczym. Otwartym problemem tego formalizmu jest to czy jest on rzeczywiście w stanie przewidzieć mierzalne efekty fizyczne, które nie są obecne w standardowym równaniu Wheelera-DeWitta. Mgr Bellido w swojej rozprawie stara się odpowiedzieć na to właśnie pytanie.

Rozprawa jest oparta na trzech pracach mgr. Bellido opublikowanych w renomowanym piśmie Physical Review D: jednej czteroautorskiej, jednej dwuautorskiej (w obu z dominującym wkładem) oraz jednej, której mgr Bellido, co warto podkreślić, jest jedynym autorem. A także: na jednej pracy dwuautorskiej w trakcie recenzji dla Phys. Rev. D oraz materiału pokonferencyjnego opracowanego samodzielnie przez mgr. Bellido. Z załączonego oświadczenia wynika, że mgr Bellido prezentował swoje wyniki na 8 konferencjach, które odbyły się w trybie online lub hybrydowym. Z formalnego punktu widzenia jest to dorobek, który spełnia oczekiwania stawiane wobec kandydata na stopień doktora nauk fizycznych.

**Forma rozprawy i jej ocena:**

W swojej rozprawie (roz. 2) mgr Bellido zawarł bardzo jasny, przejrzysty opis najważniejszych elementów kwantowej kosmologii i ich rozszerzenia poprzez formalizm trzeciej kwantyzacji. Znajdziemy tam zarówno opis klasycznej teorii grawitacji i jej kanonicznego sformułowania, jak i wyprowadzenie równania Wheelera-DeWitta wraz z wypunktowaniem najważniejszych problemów interpretacyjnych i technicznych z nim związanych, a także bardzo przejrzysty opis trzeciej kwantyzacji. Cały wywód jest podparty bogatą, bo składającą się ze 164 odnośników, bibliografią. W moim przekonaniu poziom szczegółowości całego wywodu został bardzo dobrze dobrany.

Po przedstawieniu najważniejszych elementów formalizmu kanonicznej kwantowej grawitacji i trzeciej kwantyzacji, mgr Bellido w sposób czytelny i konsekwentny opisuje swój nowatorski wkład w dziedzinę oraz otrzymane przez siebie i współpracowników wyniki. Co warto podkreślić, rozprawa napisana jest z wyraźnym entuzjazmem i wzbogacona o komentarze, które wybiegają poza dotychczasowe osiągnięcia autora. Całość jest zwieńczona podsumowaniem wyników oraz omówieniem ich znaczenia dla dziedziny.

Jedyną niedoskonałością w poruszonym aspekcie rozprawy jest to, że autor nie zawsze optymalnie dobiera anglojęzyczne słowa do kontekstu. Ponadto, zauważyłem kilka niewielkich potknięć we wzorach (np. we wzorze (3.41), (3.33), (2.59b) lub pod wzorem (2.32)), co jest jednak zrozumiałe przy tak rozległym tekście. To wszystko nie zmienia mojej pozytywnej oceny dla tego aspektu rozprawy. Czytając rozprawę nabrałem przekonania, że mgr Bellido dobrze orientuje się w swojej dziedzinie i potrafi samodzielnie pisać w niej naukowe prace na wysokim poziomie.

#### **Ocena merytoryczna zaprezentowanych wyników:**

Mgr Bellido zaprezentował swój wkład w ciekawy, ale i dość złożony formalizm zawierający wiele elementów, zarówno technicznie jak i interpretacyjnie nieoczywistych, oraz szeroki wachlarz metod takich jak miary splątania kwantowego, opis semiklasyczny i pokrewne przybliżenia (np. Born-Oppenheimer), elementy kwantowej teorii pola na zakrzywionej czasoprzestrzeni, teorię zaburzeń kosmologicznych, spektrum promieniowania relikтового, itd. Działając w uporządkowany sposób, opierając się o istotną literaturę i własne obliczenia udało mu się skonfrontować dość abstrakcyjny formalizm z danymi obserwacyjnymi. Jest to oczywiście bardzo ciekawy wynik, do którego odniosę się jeszcze poniżej.

W rozdziale 3 autor skupia swoją uwagę na entropii splątania wszechświata i antywszechświata dla kilku prostych modeli kosmologicznych, bada jej zachowanie w czynniku skali i w parametrze Hubble'a, dyskutuje jej zachowanie w punktach osobliwych, punktach przegięcia i w rekolapsie. Badanie jest przeprowadzone bardzo starannie, a otrzymane wyniki solidne. Istnienie i ewolucja kwantowego splątania jest bardzo ciekawym i charakterystycznym aspektem badanego formalizmu, dlatego otrzymane wyniki są niewątpliwie wartościowe. Mimo to czuję pewien niedosyt z powodu braku pogłębionej dyskusji znaczenia tych efektów dla fizyki obserwowanego wszechświata.

Badanie mierzalnych efektów formalizmu trzeciej kwantyzacji jest dyskutowane w rozdziale 4. Mgr Bellido rozszerza modele jednorodne i izotropowe o niejednorodności w przybliżeniu liniowym. Następnie proponuje poprawkę do Hamiltonianu, która odpowiada za oddziaływanie wszechświatów, i bada jej wpływ na wczesną ewolucję wszechświata, w tym ewolucję pierwotnych zaburzeń kosmologicznych, oraz kątowne spektrum promieniowania relikтового, które jest zmierzone z dużą dokładnością. Opisane badanie stanowi bardzo dobry przykład tego jak nawet

najbardziej odważne spekulacje teoretyczne można, a nawet należy, konfrontować z dostępnymi danymi. To podejście jest niewątpliwie mocną stroną tej rozprawy.

Do mocnych stron rozprawy zaliczam także wnioski jakie autor wyciąga z otrzymanych wyników. Mgr Bellido, mimo wyraźnego entuzjazmu dla idei wieloświata, uczciwie pisze, że wiele wskazuje na to, że być może nigdy nie będziemy w stanie zweryfikować idei wieloświata (“the CMB angular spectrum does not look like a good observation to check the existence of a twin universe”, “the expectation of discovering [the spectrum of gravitational waves] is low in the close future”). To oczywiście mogłoby pogрузić formalizm trzeciej kwantyzacji jako teorii o znaczeniu fizycznym i odesłać ją do świata ciekawostek filozoficznych.

W rozdziale 5 znajdziemy bardzo interesującą spekulację o istnieniu pól kwantowych, które pośredniczą w oddziaływaniu wszechświatów. Oczywiście, tak rozszerzony formalizm staje się jeszcze bardziej abstrakcyjny, a fizyczna interpretacja nowych pól jest niejasna. Jednakże, taka spekulacja otwiera nowe możliwości badawcze, co jest zawsze cenne, a przy tym jest ona teoretycznie bardzo dobrze uzasadniona.

Mimo niewątpliwych mocnych stron, praca mgr. Bellido zawiera również pewne założenia, które warto byłoby dokładniej omówić. Po pierwsze, zaproponowane oddziaływanie wszechświatów w równaniu (4.15) jest kontrolowane sprzężeniem zależnym od supermetryki (czyli po prostu czynnikiem skali we wszechświecie Friedmanna), co jest zgodne z postulatami trzeciej kwantyzacji, ale również od parametru Hubble’a, który nie jest supermetryką. Równanie (4.15) bierze swój początek z równania Wheelera-DeWitta, które jest wyrażone w reprezentacji czynnika skali “a”, a w której parametr Hubble’a powinien być operatorem różniczkowym na “a”. Autor nie komentuje tej niezgodności. Po drugie, wniosek o zaniedbywalnym wpływie wieloświata na zaburzenia gęstości w obserwowalnym Wszechświecie mgr Bellido stara się osłabić przez wskazanie na spektrum fal grawitacyjnych jako jeszcze jedną kosmologiczną obserwabę, na której wieloświat potencjalnie mógłby odcisnąć swój ślad. Pozostawia on jednak niewyjaśnione w jaki sposób miałyby się to stać skoro oddziaływanie musi być bardzo małe, ani dlaczego ewentualny wpływ oddziaływania nie miałyby być równie niezgodny z przyszłymi obserwacjami fal grawitacyjnych, co z obecnymi obserwacjami CMB. Po trzecie, autor wiele pisze o normalizacji funkcji falowej, o unitarnej ewolucji czy o stanie próżni kwantowej dla zaburzeń kosmologicznych, a te pojęcia przecież zależą od wyboru wewnętrznego zegara dla układu kosmologicznego. Na przykład, równanie Wheelera-DeWitta badane przez mgr. Bellido może zostać poddane przekształceniu Lorentza,  $SO(1,1)$ , które traktuje czynnik skali (a dokładniej jego logarytm) jako współrzędną czasową, a pole skalarne jako współrzędną przestrzenną, co zmieniałoby potencjał w tym równaniu. Ponieważ, co do zasady, możemy użyć dowolnej zmiennej czasowej, powstaje pytanie czy taka transformacja nie zmieni fizyki wieloświata, w tym zachowania entropii splątania w czasie. A jeśli tak, to co to wszystko by oznaczało.

### **Podsumowanie:**

Przedstawiona rozprawa doktorska zawiera bardzo ciekawe wyniki dotyczące formalizmu trzeciej kwantyzacji i modelu wieloświata. Skupienie się na ambitnym celu jakim jest konfrontacja badanego formalizmu z danymi obserwacyjnymi oraz szeroki warsztat teoretyczny, którego autor sprawnie użył w opisanych badaniach, są według mnie najsilniejszymi stronami tej rozprawy. Są dowodem na to, że mgr Samuel Barroso Bellido jest dojrzałym naukowcem potrafiącym

rozwiązywać istotne problemy badawcze w dziedzinie kosmologii kwantowej i grawitacji. Zawarte w recenzji uwagi krytyczne są częścią naturalnej naukowej dyskusji i nie wpływają na moją jednoznacznie pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej mgr. Bellido.

Zawarte w pracy osiągnięcia naukowe, a także zaprezentowana wiedza teoretyczna odpowiada zakresowi i poziomowi wymaganym od kandydata do stopnia naukowego doktora. Dlatego z pełnym przekonaniem rekomenduję dopuszczenie mgr. Samuela Barroso Bellido do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia naukowego doktora nauk fizycznych, w tym do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

P. Matkiewicz