



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

Warszawa, 01.09.2022 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Daniela Nemetha pt.

“Studies of Critical Phenomena in Causal Dynamical Triangulations on a Torus”

Ocena wstępna:

Rozprawa doktorska mgr. Daniela Nemetha jest oparta na szeregu wyników, jakie autor wraz ze współpracownikami otrzymał w swoich badaniach nad 4-wymiarowym modelem Kausalnych Dynamicznych Triangulacji (CDT). Model ten stanowi nieperturbacyjne podejście do kwantowania grawitacji przez całki po torach zdefiniowanych na sieci oraz przejście z parametrem sieci do zera. Zasadniczą cechą tego modelu jest to, że sieć, którą tworzą tzw. triangulacje, jest dynamiczna. Działanie grawitacyjne w modelu CDT przyjmuje postać działania Regge. Zasadniczym założeniem tego modelu jest założenie o istnieniu nietrywialnej granicy ciągłej, w której parametr sieci zbiega do zera, a zasadniczym celem w badaniach nad CDT jest identyfikacja tej granicy. Poszukiwanie granicy ciągłej opiera się na badaniu diagramu fazowego modelu i korzysta z teorii przejść fazowych Landau’a.

Model CDT to jasno zdefiniowany program badawczy, który został zapoczątkowany przez prof. Jana Ambjorna z Uniwersytetu Kopenhaskiego, prof. Jerzego Jurkiewicza z Uniwersytetu Jagiellońskiego (współpromotora mgr. Nemetha) oraz prof. Renate Loll z Uniwersytetu w Nijmegen. Stanowi poważną próbę kwantowania grawitacji w oparciu o bardzo solidne narzędzia teoretyczne, a w związku z poważnymi trudnościami jakie napotyka kwantyzacja grawitacji jest aktualnym i wartościowym tematem badawczym. Jeśli model CDT odniesie sukces, będziemy w posiadaniu kwantowej teorii grawitacji, która wywrze wielki wpływ między innymi na nasze rozumienie najbardziej ekstremalnych zjawisk w kosmosie.

Model CDT jest stale rozwijany. Wyniki ostatnich lat, w których rozwój zaangażowany był mgr Daniel Nemeth, dotyczą przede wszystkim diagramu fazowego 4-wymiarowego modelu CDT o topologii torusa, przejść fazowych, użycia pól skalarnych jako współrzędnych oraz ich wpływu na kwantową geometrię, identyfikacji lokalnych struktur w kwantowej geometrii wszechświata. Mgr Daniel Nemeth w swojej rozprawie prezentuje oryginalne wyniki, które choć nie wskazują jednoznacznie nietrywialnej granicy ciągłej tego modelu, to zdecydowanie przybliżają ten cel, a także poszerzają wiedzę o kwantowej geometrii wszechświata przy założeniu, że nietrywialna

granica ciągła dla tego modelu rzeczywiście istnieje. Zawarte w rozprawie wyniki stanowią zatem wartościowy wkład w poszukiwanie kwantowej teorii grawitacji.

Rozprawa jest oparta na sześciu pracach mgr. Nemetha opublikowanych w renomowanych pismach Journal of High Energy Physics, European Physical Journal C, Physical Review Letters oraz Classical and Quantum Gravity. Wszystkie opublikowane prace są kilkautorские (4-6 autorów). Z dołączonych oświadczeń autora wynika, że wkład mgr. Nemetha jest znaczny (obejmujący wszystkie etapy pracy, w tym wykonywanie numerycznych symulacji i analizę otrzymanych wyników, a także udział w spisywaniu prac), w dwóch z nich jego wkład wyniósł 20%, w dwóch kolejnych 30%, a w dwóch pozostałych pracach był dominującym autorem z wkładem 70% i 75%. Z formalnego punktu widzenia jest to więc dorobek, który spełnia zwyczajowe oczekiwania i ustawowe wymagania, stawiane wobec kandydata na stopień doktora nauk fizycznych.

Forma rozprawy i jej ocena:

Mgr Daniel Nemeth przedstawił swoją rozprawę doktorską w formie skróconej prezentacji swoich artykułów opublikowanych w recenzowanych pismach, które stanowią podstawę osiągnięcia naukowego wymaganego do uzyskania stopnia doktora. Przedstawiona rozprawa doktorska składa się z 7 rozdziałów oraz z 2 dodatków, przy czym rozdział 7 zawiera oświadczenie autora o udziale w cytowanych publikacjach, a rozdział 1 stanowi krótki wstęp do tematu rozprawy wraz z kilkoma historycznymi uwagami. Do rozprawy załączono również oryginalne prace autora.

W rozdziale 2 mgr Nemeth zawarł bardzo klarowny opis podstawowych założeń, na których oparty jest model Kauzalnych Dynamicznych Triangulacji oraz wprowadzenie do najważniejszych wyników poprzedzających jego badania. Autor poświęca wiele uwagi konstrukcji działania na przestrzeni triangulacji, a w dodatku A prezentuje topologiczne relacje pomiędzy parametrami triangulacji. W kolejnym, 3 rozdziale autor przechodzi do szczegółowego opisu tego w jaki sposób konstruuje się triangulacje w symulacjach Monte Carlo Markov Chain. Symulacje oparte są, jak wyjaśnia autor, na wyborze pewnej początkowej triangulacji, która następnie zostaje poddana sekwencji "ruchów", w wyniku których po okresie termalizacji otrzymuje się reprezentatywną próbkę triangulacji. Autor w bardzo pomysłowy i przejrzysty sposób opisuje ruchy generujące nowe triangulacje, a także proponuje nowe, niesosowane dotąd ruchy, których dokładną definicję znajdziemy w dodatku B. Taki sposób prezentacji tego materiału świadczy o tym, że autor bardzo dobrze orientuje się w swojej dziedzinie oraz że potrafi myśleć o niej w sposób twórczy.

Rozdziały 4 i 5 zawierają dalszy opis metodologii stosowanej do badania modelu CDT oraz omówienie oryginalnych wyników otrzymanych przez mgr. Nemetha. Rozdział 4 zawiera wyniki otrzymane dla pustego wszechświata o topologii torusa, które poszerzają wiedzę na temat diagramu fazowego tego modelu, w tym przejść fazowych. Rozdział 5 zawiera wyniki otrzymane dla wszechświata o topologii torusa wyposażonego w dynamiczne oraz niedynamiczne (próbne) pola skalarne, które poszerzają wiedzę na temat lokalnej struktury kwantowego wszechświata oraz oddziaływania kwantowej geometrii z materią. Całość napisana jest w bardzo klarowny i uporządkowany sposób, a poziom szczegółowości opisu, w moim przekonaniu, został bardzo dobrze dobrany.

Rozdział 6 stanowi podsumowaniem wyników oraz omówieniem ich znaczenia dla dziedziny. Autor podsumowuje otrzymane wyniki i jasno określa swój wkład w ich otrzymanie. Rozdział kończy się bardzo ważną dyskusją statusu modelu CDT, bo przecież nietrywialna granica ciągła modelu nadal

pozostaje nieznana. Autor podaje interpretację fizyczną tego modelu w sytuacji niezalezienia tej granicy, a także omawia możliwe kierunki przyszłych badań nad modelem. Tym samym autor umieszcza swoje wyniki w szerszym kontekście kwantowania grawitacji.

Podsumowując, czytając rozprawę nabrałem przekonania, że mgr Nemeth bardzo dobrze orientuje się w swojej dziedzinie, potrafi myśleć o niej w sposób uporządkowany i twórczy, a także potrafi samodzielnie pisać w niej prace na wysokim poziomie. Zasadniczo nie zauważyłem żadnych słabości w poruszonym aspekcie rozprawy.

Ocena merytoryczna zaprezentowanych wyników:

Mgr Daniel Nemeth zaprezentował swój oryginalny wkład do modelu CDT w rozdziałach 4 oraz 5, które oparte są na sześciu jego oryginalnych pracach, które stanowią osiągnięcie naukowe będące podstawą do starania się o uzyskanie stopnia doktora. Poniżej odniosę się do każdego wyniku i ocenę jego wagę dla tego programu badań nad kwantową grawitacją.

Rozdział 4 jest poświęcony opisowi wyników opublikowanych w pracach [1,2,3]. W tych pracach mgr Nemeth wraz ze współpracownikami bada trzy przejścia fazowe (wzdłuż różnych trajektorii), które na diagramie fazowym modelu oznaczone są jako A-B, C_b -B, C-B. Zostaje wykazane, że przejścia fazowe A-B są pierwszego rzędu, wykazując krytyczny wykładnik równy jeden. Dla przejść fazowych C_b -B w pobliżu punktu potrójnego B-C- C_b , pokazano, że krytyczny wykładnik jest większy od jedności wskazując, że są to przejścia fazowe wyższego rzędu. Przejścia wyższego rzędu są kluczowe dla istnienia granicy ciągłej modelu CDT. Badanie przejść fazowych C-B okazało się bardziej wymagające, ostatecznie wskazując na przejścia pierwszego rzędu. Wszystkie te wyniki zostały użyte do postawienia hipotezy, że przejścia fazowe są pierwszego rzędu, gdy zachodzą między fazami o różnych tzw. "efektywnych" topologiach. Ta hipoteza pozwoliła autorowi domniemywać, że to samo przejście fazowe (tzn. C-B) dla wszechświata o rzeczywistej topologii sferycznej, które nie zostało jeszcze zbadane, może być przejściem wyższego rzędu. Jest to oczywiście istotna wskazówka do poszukiwania nietrywialnej granicy ciągłej modelu. Wszystkie otrzymane w pracach [1,2,3] wyniki stanowią zatem istotny postęp w rozumieniu modelu CDT, i nadają kierunek przyszłym badaniom. Należy podkreślić, że uzyskanie tych wyników wiązało się ogromną pracą związaną z wykonywaniem obliczeń numerycznych oraz analizą otrzymanych danych. Wkład mgr. Nemetha był istotny we wszystkich pracach, a w pracach [2,3] nawet wiodący.

Rozdział 5 jest poświęcony polom skalarnym w modelu CDT. Dynamiczne pola skalarne zgodnie z ideą Kuchara traktowane są jako tzw. współrzędne wewnętrzne, bo będąc częścią układu fizycznego służą jako współrzędne dla pozostałych pól układu. Pola skalarne w toroidalnym modelu były badane przez mgr. Nemetha w pracach [4,5,6]. Gdy pola skalarne nie są zmiennymi dynamicznymi [4,5] stanowią układ współrzędnych, dzięki któremu mgr Nemeth wraz ze współpracownikami uzyskali obraz lokalnych struktur w kwantowej geometrii wszechświata, a także określili wymiar tej geometrii. Bardzo ciekawy okazał się obraz lokalnej geometrii wszechświata w fazie semiklasycznej (C), która globalnie odtwarza zachowanie klasycznego modelu jednorodnego i izotropowego. Otrzymana struktura bardzo przypomina niejednorodną strukturę obserwowanego Wszechświata, która jak się domniema ma źródło właśnie w kwantowych fluktuacjach pierwotnej geometrii. Badanie lokalnej struktury pozwala również wyznaczyć "efektywną" topologię modelu. Równie ciekawe okazały się wyniki dla dynamicznych pól skalarnych, które są źródłem pola grawitacyjnego. Ich efekt na geometrię wszechświata badany był przez mgr. Nemetha w pracach [5,6]. Pokazano, że przy dostatecznie silnie grawitujących polach skalarnych, efektywna topologia

modelu w danej fazie może ulec zmianie, tzn. być różna od modelu próżniowego. Wszystkie zaprezentowane wyniki są bardzo interesujące, z jednej strony stanowią ważną informację dla szukania granicy ciągłej dla konfiguracji z polem skalarnym, z drugiej strony w dramatyczny sposób poszerzają możliwą fizyczną interpretację modelu CDT, przybliżając go tym samym do żywych zagadnień fizycznych w kosmologii i grawitacji, co jest celem całego programu. Wkład mgr. Nemetha w otrzymanie powyższych, niezwykle istotnych, wyników był znaczny.

Przejdźmy do uwag krytycznych. Mgr Daniel Nemeth otrzymał swoje wyniki w ramach modelu CDT, którego niektóre z zasadniczych założeń nie zostały, w moim przekonaniu, dostatecznie wyjaśnione przez autora rozprawy. Powoduje to oczywiście pewną trudności w interpretacji otrzymanych wyników. (a) Jest to przede wszystkim zagadnienie foliacji w modelu CDT. O ile jej wprowadzenie zostało uzasadnione przez autora względami technicznymi, to nie została podjęta głębsza dyskusja na temat znaczenia foliacji w modelu CDT. W klasycznej teorii mamy przecież pełną dowolność wyboru wewnętrznego zegara, który ustala równoczesność zarówno wewnątrz czasoprzestrzeni (triangulacji) jak i pomiędzy zdarzeniami w różnych czasoprzestrzeniach (triangulacjach) zawartych w danym modelu. Czy taki jest sens foliacji w CDT? Jeśli tak, to z jakim wewnętrznym stopniem swobody w modelu próżniowym związana jest foliacja? Oraz, czy można skwantować grawitację w innym zegarze wewnętrznym i czy kwantowy model będzie ten sam czy inny? A jeśli foliacja nie może być utożsamiona z żadnym wewnętrznym stopniem swobody, czy oznacza to, że cała po torach wykonana jest po wszystkich zegarach i jaki jest wtedy sens np. profilu objętości w "czasie"? (b) Jaki ma sens i uzasadnienie warunek periodyczności triangulacji w czasie? Jeśli cała po torach wykonana jest we wszystkich zegarach, warunek periodyczności przestaje być jednoznacznie określony. Jaki jest wtedy jego sens? (c) Dla wielu badaczy zasadniczą motywacją do poszukiwania kwantowej grawitacji jest istnienie osobliwości w teorii klasycznej. Czy konstrukcja modelu CDT gwarantuje, że osobliwości na początku kosmologicznej ewolucji lub wewnątrz czarnych dziur są usunięte? A może ta teoria kwantowa dopuszcza istnienie osobliwości?

Podsumowanie:

Przedstawiona rozprawa doktorska zawiera bardzo ważne wyniki dotyczące modelu CDT. Dotyczą one zagadnienia istnienia nietrywialnej granicy ciągłej modelu toroidalnego, także z ważnymi wnioskami dla modelu sferycznego. Dotyczą również zagadnienia włączenia do modelu pól skalarnych, ich wpływu na geometrię kwantową, a także ich użyteczności jako wewnętrznych współrzędnych. Wkład autora rozprawy w otrzymane wyniki jest znaczący. Są one dowodem na to, że mgr Daniel Nemeth jest dojrzałym naukowcem potrafiącym rozwiązywać istotne problemy badawcze w dziedzinie kwantowej grawitacji. Zamieszczone na końcu recenzji uwagi krytyczne są częścią naturalnej naukowej dyskusji i nie wpływają na moją jednoznacznie pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej mgr. Nemetha.

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. Daniela Nemetha do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia naukowego doktora nauk fizycznych, w tym do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.**