

Lublin, 30. 08. 2021

Dr hab. Jerzy Matyjasek
Instytut Fizyki
Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej
w Lublinie

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. Zbigniewa Drogosza**

zatytułowanej

**New topological observables in a model of
Causal Dynamical Triangulations on a torus**

Trwające już od 85 lat próby skonstruowania kwantowej grawitacji doprowadziły do pojawienia się licznych teorii, o różnym stopniu złożoności i ogólności. Jednym z najbardziej interesujących podejść do tego zagadnienia jest model Kauzalnych Dynamicznych Triangulacji. Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska pana magistra Zbigniewa Drogosza, wykonana pod kierunkiem prof. dr. hab. Jerzego Jurkiewicza i dr. hab. Jakuba Gizbert-Studnickiego dotyczy więc niewątpliwie jednego z najbardziej interesujących aspektów współczesnej teorii grawitacji. Jest ona oparta na czterech pracach opublikowanych w renomowanych czasopismach (znanych z rygorystycznego przestrzegania wysokich standardów naukowych) i dwóch (oczekujących na publikację) ogólnodostępnych preprintach. Starannie wyedytowana pod względem graficznym praca mgr. Drogosza napisana jest w języku angielskim i składa się ze streszczenia (również w języku polskim), stosownych oświadczeń, wstępu i sześciu rozdziałów, z których każdy zawiera materiał oryginalny. We wstępie podane są informacje o ogólnych celach rozprawy i jej kontekście naukowym. Przedstawiono w zwięzły sposób historię problemu, ze szczególnym uwzględnieniem podejścia rozwijanego w recenzowanej pracy. Wprowadzone zostały najważniejsze formuły, niezbędne do śledzenia pozostałych jej części i ustalone wykorzystywane dalej skróty i akronimy. Rozdział ten wieńczy omówienie dokonań autora.

Ponieważ w czterowymiarowym modelu Kauzalnych Dynamicznych Triangulacji nie są znane rozwiązania analityczne, oczywiste jest, że jedyną drogą uzyskiwania konkretnych wyników jest odwołanie się do metod numerycznych, w tym przypadku do symulacji metodą Monte Carlo. W rozdziale drugim przedstawione zostały strategie obliczeniowe, szczegóły implementacji, a także skala złożoności problemu i przeprowadzonych obliczeń. Uważam, że umieszczenie tego rozdziału na samym początku rozprawy jest bardzo korzystne dla czytelnika. Wbrew często powtarzanej opinii o tym, że rola metod numerycznych, choć kluczowa w

procesie otrzymywania wyników, nie ma praktycznie żadnego znaczenia w ich interpretacji, pozwolę sobie mieć w tej mierze przeciwne zdanie. Nie ukrywam również, że lekturę każdego rozdziału zaczynałem od przejrzenia raz jeszcze zawartości rozdziału drugiego. Jest bowiem rzeczą bardzo interesującą w jaki sposób abstrakcyjne matematyczne treści można (z powodzeniem) przeformułować w problem numeryczny. W jaki sposób praca nad implementacją rozważanych problemów pogłębia nasze rozumienie i w jaki sposób możliwości jakie daje nam komputer pomaga wyrobić sobie niezbędne intuicje.

Zanim przejdę do zwięzłego omówienia zawartości rozdziałów 3-6, chcę poczynić kilka uwag natury ogólnej. W teoriach, zadaniem których jest opis zjawisk tak różnych od naszego codziennego doświadczenia, należy najpierw określić zbiór pytań, które możemy zadać i ich zakres oraz obiekty (obserwable), które musimy bądź możemy wprowadzić wraz z ich naturalną interpretacją. Należy jednak zdać sobie przy tym sprawę model Kausalnych Dynamicznych Triangulacji, który jest próbą realizacji nieperturbacyjnej kwantowej grawitacji, wykorzystuje wprawdzie pojęcie czasu własnego, ale bez konkretyzacji przestrzennej geometrii.

Mój, z konieczności krótki przegląd oryginalnych wyników przedstawionych w rozprawie rozpocznę od rozdziału 3. W rozdziale tym, opartym w częściowo na wynikach opublikowanych w pracy [1] (w/g spisu prac własnych mgr. Drogosza zamieszczonego na stronie 19 rozprawy) pokazano, że jeżeli przestrzenna topologia jest typu T^3 , to można wprowadzić zespół takich obserwabi, które mogą pełnić rolę użytecznych (przestrzennych) współrzędnych, nazwanych przez autorów pseudo-kartezjańskimi. Warto tutaj dodać, że w przypadku topologii S^3 zadanie to jest bardzo trudne do zrealizowania. Rozdział ten zawiera niezbędne informacje dotyczące sposobu wprowadzania takich współrzędnych, a także ich dalszego wykorzystania. Uzyskane z ich pomocą wyniki są bardzo interesujące i sugerują, że w strukturze kwantowej toroidalnej geometrii da się wydzielić toroidalną część główną z różnymi wyrostkami, przy czym te ostatnie zawierają większą część z całkowitej liczby sympleksów. Z rozdziałem 3 jest związany w sposób naturalny rozdział 4. Omówione w nim zostały konsekwencje innego wyboru obserwabi. Tym razem wybór padł na nieściągalne geodezyjne pętle, dzięki którym można wprowadzić wygodną topologiczną obserwablę nazwaną przez autora wysokością (*height*), która jest zdefiniowana jako długość minimalnej nieściągłej krzywej przechodzącej przez dany sympleks. Przy pewnej wprawie, posiłkując się wynikami licznych symulacji, można zyskać jeszcze lepsze wyobrażenie o ogólnej strukturze kwantowej toroidalnej geometrii. Studium tym poświęcony jest cały rozdział 4. Rozdział 5 wykorzystuje kwantową krzywiznę Ricciego, obserwablę wprowadzoną kilka lat temu przez Klitgaarda i Loll, w przypadku toroidalnej topologii. I na koniec w rozdziale 6, opartym na materiale zawartym w pracach [3-6] w/g spisu autora, badane są pola skalarne w ($D = 4$)-wymiarowym modelu Kausalnych Dynamicznych Triangulacji. Pola te pojawiają się w dwóch inkarnacjach. Po pierwsze rozważane są pola skalarne, które mogą zostać wykorzystane do określenia współrzędnych. W symulacjach pola te nie wpływają na triangulację i prowadzą do bardzo interesujących konfiguracji, przypominających obserwowaną wielkoskalową strukturę Wszechświata. Istotnie, na zamieszczonych w rozdziale 6 rysunkach dobrze widać długie nitkowate struktury (filamenty) i pustki. Z analiz przedstawionych w bardzo obszernej pracy [6] wynika, że dla 'dużych' triangulacji wielkoskalowa geometria jest w przybliżeniu jednorodna i izotropowa. Własność ta jest jednak tracona w mniejszych skalach. Widoczne są wtedy rzadkie obszary reprezentujące toroidalne części główne i gęsto rozłożone wyrostki. I

właśnie te ostatnie tworzą subtelny strukturę pustek i filamentów, a ponieważ jesteśmy w reżimie planckowskim, możemy spekulować, że mogłyby się one stać zarodkami formowania struktury w post-inflacyjnym wszechświecie. W drugim przypadku pola są dynamiczne i dla konfiguracji rozważanej w rozprawie doktorskiej taki układ zdaje się wykazywać zmianę topologii z toroidalnej na sferyczną. Ciekawy jestem czy dalsze analizy potwierdzą taką możliwość. Ostatni, 7 rozdział (poprzedzający obszerną bibliografię i oświadczenia współautorów) zawiera uwagi końcowe, uzupełnienia i (dosyć lakonicznie omówione) plany na przyszłość.

Na koniec odniosę się do samej pracy doktorskiej. Jest przemyślana i napisana w bardzo klarowny sposób, a w warstwie językowej (na ile to mogę ocenić) - nienaganna. Czyta ją się bardzo dobrze. Oczywiście nie muszę się zgadzać z każdym wyborem autora, ale całość (również od strony edytorskiej) prezentuje się naprawdę znakomicie. Ilustracje przygotowane zostały z dużą troską o to, by niosły zamierzone przez mgr. Drogosza informacje. Należy również pochwalić autora za pewną powściągliwość, czy też ostrożność w formułowaniu wniosków.

Prace referowane w rozprawie są wieloautorskie. Taka jest specyfika uprawianej przez mgr. Drogosza dziedziny. Z oświadczeń współautorów, a także z wyjaśnień zamieszczonych na stronie 18 rozprawy, wynika, że jego wkład w przypadku czterech prac był znaczący, a w przypadku pozostałych dwóch dominujący.

Nie mam wielu uwag krytycznych, ale pewien niedosyt pozostawia kwestia wprowadzenia samego czterowymiarowego modelu Kauzalnych Dynamicznych Triangulacji. Uważam, że byłoby pożądanym przedstawić w sposób uporządkowany matematyczną strukturę teorii, poczynając od najbardziej podstawowych pojęć. Zrozumielibyśmy wtedy lepiej jakie pytania możemy stawiać, jakiego typu obiekty możemy wprowadzić i jakiego typu operacje możemy przeprowadzać. Po drugie myślę, że dobrym posunięciem byłoby doprecyzowanie terminu 'topologia prawie T^3 ' (i temu podobnych terminów) i wyjaśnienie jakim kryterium należy się posługiwać, orzekając czy dana topologia jest jeszcze 'prawie', czy już całkiem inna. Po trzecie, w mojej opinii byłoby pożądanym umieszczenie większej ilości informacji dotyczących naukowych zamierzeń. Czy planowane są badania innych konfiguracji, a jeżeli tak to jakich. I na koniec, brakuje mi informacji na temat spodziewanej wrażliwości uzyskanych wyników (bądź jej braku) na zwiększenie liczby sympleksów. Możliwe, że w trakcie przeprowadzania licznych symulacji autor zyskał w tej mierze znaczną intuicję, którą mógłby się podzielić z czytelnikiem.

Podsumowując, uważam że przedstawiona mi do recenzji praca doktorska dotyczy bardzo interesującej i aktualnej tematyki. Możliwe uogólnienia i nowe kierunki badań bezpośrednio związane z przedstawionymi przez autora rezultatami również przedstawiają się obiecująco. Samą zaś pracę oceniam bardzo wysoko i uważam, że zasługuje ona na wyróżnienie.

Uważam, że recenzowana praca spełnia zarówno ustawowe jak i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie mgr. Zbigniewa Drogosza do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Jerzy Matyjasek