

dr hab. Piotr Sułkowski
Instytut Fizyki Teoretycznej, Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski
ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR. JACKA PUCHTY
„APPLICATIONS OF THE SPIN NETWORKS AND SPIN FOAM MODELS
IN QUANTUM GRAVITY”**

Rozprawa doktorska „Applications of the spin networks and spin foam models in quantum gravity” („Zastosowania sieci spinowych i modeli pian spinowych w kwantowej grawitacji”) napisana została przez mgr. Jacka Puchtę pod kierunkiem prof. dra hab. Jerzego Lewandowskiego i złożona do recenzji na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w sierpniu 2014 r.

Rozprawa poświęcona jest kilku problemom w dziedzinie pętłowej kwantowej grawitacji („Loop Quantum Gravity”), związanym w szczególności z formalizmem pian spinowych („Spin Foams”). Rozprawa jest dość obszerna – liczy prawie 300 stron – i podzielona jest na 3 główne części oraz zawiera 2 dodatki i spis literatury. Pierwsza część poświęcona jest ogólnemu wstępowi do pętłowej kwantowej grawitacji oraz pian spinowych (rozdział 1), a także krótkiemu przedstawieniu problemów badanych przez autora i zwięzłemu streszczeniu znalezionych przez niego rozwiązań (rozdział 2). Szczegółowa analiza i rozwiązanie tych problemów przedstawione są w części drugiej rozprawy, w rozdziałach od 3. do 6. W krótkiej części trzeciej omówione są otwarte problemy związane z tematyką rozprawy, których rozwiązanie wymaga dalszej pracy w tej dziedzinie. Dwa dodatki poświęcone są, odpowiednio, bardziej szczegółowemu wstępowi matematycznemu do zagadnień przedstawionych w rozprawie, oraz bardziej technicznym dowodom i rachunkom, pominiętym w głównym tekście. Bibliografia składa się ze 102 pozycji, w tym klasycznych i przełomowych prac dotyczących teorii grawitacji (prace Einsteina, Palatiniego, Anowitta-Desera-Misnera, etc.), monografii oraz serii wykładów i podręczników (Rovelli, Thiemann, Białynicki-Birula), podstawowych prac dotyczących pętłowej kwantowej grawitacji (prace Ashtekara, Lewandowskiego, Thiemanna, etc.), prac poświęconych aktualnym badaniom nad zagadnieniami bezpośrednio związanymi z tematyką rozprawy (przede wszystkim prace z ostatnich kilku-kilkunastu lat), a także prac (innych autorów) jeszcze nieopublikowanych i w przygotowaniu.

Wyniki przedstawione w rozprawie zawarte są również w czterech artykułach autorstwa Jacka Puchty, także wymienionych w bibliografii. Pozycje [53] i [64], opublikowane

w prestiżowym czasopiśmie *Class. Quant. Grav.*, to artykuły których współautorami jest promotor rozprawy doktorskiej Jerzy Lewandowski oraz Marcin Kisieliowski; wyniki tych prac przedstawione są w 3. i 4. rozdziale rozprawy. Pozycja [81] to artykuł konferencyjny opublikowany w *J. Phys. Conf. Ser.*, zwięźle prezentujący wyniki publikacji [53]. Pozycja [83] to samodzielny artykuł Jacka Puchty, umieszczony w serwisie arXiv (dotychczas nieopublikowany), którego wyniki przedstawione są w rozdziale 6 rozprawy. Natomiast nie znalazłem w rozprawie informacji dotyczącej wyników przedstawionych w rozdziale 5., w szczególności stwierdzenia czy wyniki te zostały już w jakimś czasopiśmie opublikowane, czy też są to nowe rezultaty dotychczas nieopublikowane.

Rozprawa Jacka Puchty poświęcona jest badaniom nad jednym z największych wyzwań fizyki współczesnej, jakim jest sformułowanie teorii kwantowej grawitacji. Poza grawitacją, wszystkie inne znane obecnie oddziaływania fundamentalne zostały sformułowane na poziomie kwantowym, w doskonałej zgodności z doświadczeniem. Wiadomo też, że klasyczna teoria grawitacji nie jest w stanie w pełni i poprawnie opisać osobliwości czasoprzestrzennych, zachowania czarnych dziur, Wielkiego Wybuchu, itd. Naturalna jest zatem hipoteza, że opis tych zjawisk wymaga połączenia idei dotyczących kwantyzacji z teorią grawitacji. Pętlowa kwantowa grawitacja jest konkretną propozycją realizacji takiego programu, a sieci spinowe i piany spinowe propozycją formalizmu, który pozwala na opis kwantowych stanów pola grawitacyjnego oraz obliczanie amplitud opisujących ich ewolucję.

W rozprawie poruszone są trzy (czy też, jak sam autor ujmuje to w różnych miejscach, cztery) zagadnienia dotyczące pian spinowych, związane z tzw. formalizmem EPRL-FK-KKL. Piany spinowe, reprezentowane przez dwuwymiarowe kompleksy (2-complexes) złożone z wierzchołków, krawędzi i ścian, pozwalają m.in. na obliczenie amplitudy pomiędzy dwoma stanami pola grawitacyjnego (początkowym i końcowym). Obliczenie takiej amplitudy wymaga wysumowania wkładów od wszystkich możliwych pian spinowych łączących stan początkowy ze stanem końcowym. Okazuje się, że wskazanie w jawny sposób wszystkich takich możliwych pian spinowych jest bardzo nietrywialnym zadaniem – problem ten jest pierwszym zagadnieniem poruszonym w obecnej rozprawie. Rozwiązanie tego problemu, zaproponowane przez autora, oparte jest na wprowadzonym przez autora formalizmie diagramów grafowych („graph diagrams”) oraz operatorowych diagramów sieci spinowych („operator spin-network diagrams”, OSD). Autor przedstawia ten formalizm w rozdziale 3. rozprawy, i w szczególności wyjaśnia, jak skonstruować wszystkie możliwe piany spinowe zgodne z danym diagramem grafowym oraz charakteryzuje ich topologiczne własności. Konstrukcja zaproponowana przez autora pozwala w szczególności wyznaczyć piany spinowe dające wkład do wspomnianych wyżej amplitud. Pewna subtelność rozwiązania proponowanego przez autora związana jest z określeniem, które diagramy należy traktować jako równoważne – autor podaje listę warunków pozwalających to rozstrzygnąć, ale jak sam przyznaje, obecnie brak dowodu, czy jest ona kompletna. Tym niemniej, konstrukcja

diagramów sieci spinowych jest istotnym aspektem rozprawy, a także osiągnięciem ważnym dla tej dziedziny i powinna znaleźć wiele różnych zastosowań.

Drugim zagadnieniem poruszonym w rozprawie jest zastosowanie formalizmu OSD do rozwiązywania problemu brzegowego, tzn. jawne wyznaczenie wszystkich pian spinowych zgodnych z diagramami reprezentującymi początkowy i końcowy kwantowy stan grawitacyjny, oraz ilustracja tej konstrukcji na przykładzie „Kosmologii dipolowej” („Dipole Cosmology”). Zagadnienie to omówione jest w rozdziale 4. W rozdziale tym autor podaje ścisły algorytm wyznaczający wszystkie piany spinowe zgodne zadanym stanem początkowym i końcowym oraz sposób obliczenia amplitud przypisanych do takich diagramów. Algorytm ten także jest ważnym osiągnięciem i powinien on umożliwić analizę różnych procesów. W szczególności, jego zastosowania do opisu „Kosmologii dipolowej” przedstawione jest w podrozdziałach 4.4 i 4.5 (jak autor przyznaje, analiza ta przeprowadzona została w dużej mierze przez Marcina Kisielowskiego, współautora pracy [64]). W tym wypadku ogólny algorytm przedstawiony przez autora pozwolił na wyznaczenie 20 diagramów opisujących „Kosmologię dipolową” w wiodącym rzędzie rozwinięcia. Szczegółowe rachunki wykazały, że 16 z nich daje zaniedbywalny wkład do pełnej amplitudy – wiadomo natomiast z prac innych autorów, iż 3 ze znalezionych diagramów dają nieznikający wkład do pełnej amplitudy. Jak autor przyznaje, w tym rzędzie rachunku wkład jednego diagramu jest dotychczas nieznany.

Trzecie zagadnienie poruszone w rozprawie dotyczy nieskończonych wkładów do kwantowych amplitud grawitacyjnych. W rozdziale 5. przedstawiony jest sposób wyznaczenia „elementarnych” części diagramów („bubble subdiagrams”) generujących takie nieskończoności. Wyniki te zilustrowane są kilkoma przykładowymi rachunkami. Rozdział 6. poświęcony jest analizie nieskończonego wkładu związanego z pewnym szczególnym operatorem („Lorentzian Polyhedra Propagator”), który pojawia się m.in. w procesie określanym jako „melonie bubble”, a także jako wkład do „Kosmologii dipolowej”. Autor szczegółowo wylicza oba te wkłady i w szczególności wykazuje, że drugi z nich jest zgodny z niezależnymi rozważaniami dotyczącymi „Kosmologii dipolowej”. Analiza takich elementarnych procesów jest bez wątpienia ważna dla rozwoju tej dziedziny.

Podsumowując, na pozytywną ocenę pracy składa się kilka czynników. Po pierwsze jest to wybór analizowanych zagadnień i konkretnych przykładów. Określenie które diagramy powinny być uwzględniane w obliczaniu amplitud kwantowych, zgodnie z wynikami przedstawionymi w rozdziałach 3. i 4., powinno być zasadniczą kwestią dla dalszych obliczeń w tej klasie modeli. Z kolei rachunki dla najprostszych układów, czyli w szczególności „Kosmologii dipolowej” oraz elementarnych diagramów prowadzących do rozbieżności, z pewnością powinny być przeprowadzone przed analizą bardziej skomplikowanych problemów. Po drugie, w rozprawie autor wykazał się dużą biegłością techniczną i umiejętnościami rachunkowymi, m.in. dogłębnie analizując własności topologiczne diagramów i pian spinowych i proponując algorytmy generujące różne klasy takich diagramów, przeprowadzając oszacowania różnych całek metodami punktu siodłowego,

stosując wyniki analizy harmonicznej dla grupy $SU(2)$ przy analizie pian spinowych, itd. Po trzecie, dzięki dosyć szczegółowemu wstępowi, technicznym dodatkom, oraz obszernej bibliografii, rozprawa powinna być bardzo dobrym źródłem informacji dla wszystkich, którzy chcieliby się zająć tematyką sieci i pian spinowych.

Niezależnie od ogólnej pozytywnej oceny rozprawy, można wymienić także kilka zastrzeżeń dotyczących jej treści. Przede wszystkim w dosyć niewielkim stopniu przedstawiona jest dyskusja i fizyczna interpretacja otrzymanych wyników. Na przykład rozdział 4. kończy się konkluzją, iż 16 z 20 znalezionych przez autora diagramów opisujących „Kosmologię dipolową” (w danym rzędzie rozwinięcia) daje zaniedbywalne wkłady (w odpowiedniej granicy). Nie jest jednak oczywiste, jaki wpływa stąd wniosek dotyczący całego układu „Kosmologii dipolowej”. Nawet jeśli istotny wkład dają tylko trzy diagramy obliczone w innych publikacjach, warto byłoby ten wkład przedyskutować i podkreślić jego znaczenie w kontekście zaniedbywalnego wkładu 16 analizowanych w rozprawie diagramów; brakuje też wyjaśnienia dlaczego dotychczas nie została obliczona amplituda odpowiadająca ostatniemu diagramowi (nr 17 na rys. 4.19), jakie trudności z takim rachunkiem się wiążą, oraz jaki potencjalnie mógłby mieć on wpływ na ostateczną interpretację „Kosmologii dipolowej”. Z kolei przy lekturze rozdziałów 5. i 6. nie jest oczywiste jakie jest znaczenie różnej zależności rozbieżnych amplitud od skali obcięcia Λ . W kilku miejscach autor sugeruje, że różnego rodzaju rozbieżności mogłyby być usunięte w procedurze renormalizacji – nawet jeśli dotychczas nie została ona sformułowana, byłoby interesujące zapoznać z opinią i przewidywaniami autora, w jaki sposób procedura taka mogłaby wpłynąć na interpretację otrzymanych w rozprawie wyników.

Druga moja uwaga dotyczy konstrukcji całej rozprawy. Konstrukcja ta jest jak najbardziej czytelna, natomiast rozprawa zawiera stosunkowo dużo powtórzeń podsumowujących wyniki autora (przedmowa, cały rozdział 2., wstępy do kolejnych rozdziałów); w niektórych miejscach wyniki te można by podsumować zwięźle. Można by też rozważyć podzielenie rozdziału 4. na dwie części (dwa oddzielne rozdziały), jedną przedstawiającą ogólny algorytm znajdowania diagramów dla ustalonego brzegu, a drugą poświęconą zastosowaniu tego formalizmu w konkretnym modelu „Kosmologii dipolowej”. Ponadto wskazane byłoby poprawienie samego języka (angielskiego) którym rozprawa jest napisana, m.in. literówek oraz konstrukcji różnych zdań. Niemniej jednak uwagi wymienione w tym i poprzednim paragrafie nie zmieniają mojej pozytywnej opinii o pracy.

Podsumowując, rozprawę doktorską Jacka Puchty oceniam pozytywnie, stwierdzam, iż spełnia ona wymogi formalne stawiane rozprawom doktorskim, oraz wnioskuję o dopuszczenie go do dalszych etapów przewodu doktorskiego.


dr hab. Piotr Sułkowski