



19.05.2015

**Recenzja rozprawy mgra Hongguanga Zhanga
wykonanej w ramach przewodu doktorskiego**

Praca doktorska mgra **Hongguanga Zhanga** została napisana w języku angielskim, jej tytuł brzmi: „Phase structure of 1+1 CDT with matter”. Składają się na nią cztery publikacje współautorstwa mgra Zhanga:

1. „Pseudo-topological transitions in 2D gravity models coupled to massless scalar field”, J. Ambjorn, A Goerlich, J. Jurkiewicz and H.-G. Zhang, Nucl. Phys. B863 (2012) 421-434
2. „The spectral dimension in 2D CDT gravity coupled to scalar fields”, J. Ambjorn, A Goerlich, J. Jurkiewicz and H.-G. Zhang, arxiv: gr-qc/1412.3434
3. „A $c=1$ phase transition in two-dimensional CDT/Horava-Lifshitz gravity?”, J. Ambjorn, A Goerlich, J. Jurkiewicz and H.-G. Zhang, arxiv: gr-qc/1412.3873
4. „A note on the Lee-Yang singularity coupled to 2d quantum gravity”, J. Ambjorn, A Goerlich, A.C. Ipsen and H.-G. Zhang, Phys. Lett. B735 (2014) 191

Publikacje zostały poprzedzone 3-rozdziałowym (21-stronicowym) omówieniem autorstwa mgra Zhanga. Są one także uzupełnione załącznikami (Appendix A, Appendix B) zawierającymi dodatkowe informacje o eksponentach krytycznych i modelu dimerowym.

Główna część badań mgra Zhanga dotyczyła modelu grawitacji kwantowej znanego jako przyczynowe triangulacje dynamiczne (Causal Dynamical Triangulations) [2,3,4].

Model CDT jest wynikiem rozwoju teorii modeli opartych na dyskretyzacji Reggego oraz prac prowadzonych nad nimi przez Ambjorna i Jurkiewicza. Swoją obecną, kauzalną postać przyjął w latach 90ch XX wieku. Od tej pory systematycznie rozwija się i obecnie jest uważany za jeden z najbardziej zaawansowanych modeli kwantowej grawitacji. Twórcami modelu są Ian Ambjorn, Jerzy Jurkiewicz oraz Renate Loll. Młodym liderem w tej dziedzinie jest Andrzej Goerlich. Model opiera się sformułowaniu teorii kwantowej w postaci całki Feynmana po historiach klasycznych. Całka Feynmana zastosowana jest do kawałkami płaskich czasoprzestrzeni. Płaskie kawałki są identycznymi kopiami sympleksów dwóch rodzajów. Wymiar sympleksów równy jest wymiarowi czasoprzestrzeni opisywanej przez model. Podział sympleksów na dwa rodzaje jest wynikiem struktury kauzalnej. Struktura ta koduje się w stałym, acz nie równym 1, a dowolnie ustalonym, stosunku długości krawędzi czasowych do długości przestrzennych.

Działanie Hilberta-Einsteina takiej czasoprzestrzeni obliczone jest w przybliżeniu Regge'go i wyraża się przez liczby sympleksów każdego z rodzajów oraz parametry: stałą grawitacyjną, stałą kosmologiczną i stosunek długości krawędzi przestrzennej do krawędzi czasowej. Na rozpatrywane czasoprzestrzenie narzucony jest związek topologiczny: topologia czasoprzestrzeni jest ustalona.

Próżniowy (czyli bez materii) model CDT badany był systematycznie od początku sformułowania programu. Doskonale zrozumianą w ramach modelu obserwabłą jest objętość cięcia przestrzennego czasoprzestrzeni (wszechświata). Analiza własności tej obserwabli doprowadziła do odkrycia i scharakteryzowania kilku faz modelu oraz wyprowadzenia działania efektywnego dla jednorodnego wszechświata zgodnego z granicą klasyczną. Jednak sprzężenie modelu CDT z polem materii bardzo długo pozostawało tematem całkowicie niezbadanym. Zaledwie w kilku

pracach rozważano sprzężenie dyskretnych modeli materii z modelem CDT. Problem uogólnienia modelu przyczynowych triangulacji dynamicznych do przypadku grawitacji oddziałującej z polami skalarnymi został podjęty w pracy doktorskiej mgra Zhanga. Dla uproszczenia, rozważano model czasoprzestrzeni 2-wymiarowej. Uproszczenie to jest uzasadnione, zwłaszcza przy założeniu sygnatury czasoprzestrzeni 1+1, którego to przypadku dotyczą prace w omawianej rozprawie.

W serii prac [1, 2, 3] uogólniono 2-wymiarowy model CDT do przypadku sprzężenia z kilkoma polami skalarnymi. W pracach [1] i [2] były to pola bezmasowe, w pracy [3] wprowadzono pola o niezerowej masie. Podobnie jak we wcześniejszych pracach nad modelem, nałożono więzy na topologię czasoprzestrzeni (torus) oraz na średnią liczbę trójkątów. Trójkąty układają się w kolejne warstwy. Każda warstwa odpowiada dwóm kolejnym ustalonym chwilom czasu. Boki trójkątów odpowiadających ustalonej chwili (skokowo zmieniającego się) czasu tworzą ciecie przestrzenne o kształcie okręgu. Badano zależność całkowitej 1-objętości (czyli długości) cięć przestrzennych od czasu. Podobnie jak w modelach wyżej wymiarowych, otrzymana czasoprzestrzeń składa się z kawałków przypominających łądygę oraz kawałków przypominających kroplę. Obliczono wymiary Hausdorfa oraz spektralny otrzymanej czasoprzestrzeni. Zbadano zależność wyników od liczby pól skalarnych oraz masy pól. Uzyskany wymiar Hausdorfa zmienia się od wartości 2 pod nieobecność pól do wartości 3 gdy pola są włączone. Wartość wymiaru spektralnego wynosi 2 niezależnie od obecności pól skalarnych. Masa pól skalarnych wpływa na zmniejszenie wymiaru Hausdorfa od wartości 3 do 2. Otrzymany wynik zinterpretowano jako wzmocnienie kwantowych własności modelu towarzysząca wzrostowi liczby bezmasowych pól i osłabienie przy wzroście ich masy. Zbadano także fluktuacje czasowe średniej objętości cięcia przestrzennego. Ostatnia praca [4] dotyczyła sprzężenia dyskretnego modelu materii („hard dimer model”) z euklidesowym modelem dynamicznych triangulacji. Zbadano krytyczne eksponenty i obserwabłę analogiczną do magnetyzacji. Wykazano zgodność z teorią Liuvilla sprzężoną z odpowiednią teorią konforemą ($M(2,5)$).

Metodologia badań mgra Zhanga opierała się na numerycznych obliczeniach. Technicznie, obliczana była uśredniona po historiach liczba 2-sympleksów (trójkątów) jako funkcji czasu, przy odpowiednio wyznaczonym cięciu początkowym każdej historii. Podobnie jak w przypadku bez materii, wyniki obliczeń dostarczyły informacji o ewolucji objętości (długości) przestrzennych cięć czasoprzestrzeni.

Wysoko oceniam zarówno wybór kierunku badań jak i uzyskane wyniki. Sprzężenie z polami skalarnymi otwiera drzwi do konstrukcji kwantowych modeli kosmologicznych a także kwantowych modeli czarnej dziury. Przewiduję dynamiczny rozwój zastosowań modelu CDT do badania tych zagadnień w kontekście efektów kwantowej geometrii. Założenie niskiego wymiaru czasoprzestrzeni znacznie ułatwiło obliczenia. Jednak teoria materii sprzężonej z grawitacją w 2ch wymiarach ma wiele własności teorii w 4ch wymiarach. Można przypuszczać że wiele z otrzymanych wyników jakościowych przenosi się na wyższe wymiary. Zbadanie 2-wymiarowego modelu pozwoliło na zrozumienie jakościowych własności teorii w 4ch wymiarach. Przełamana została kolejna intelektualna bariera na drodze rozwoju modeli kauzalnych dynamicznych triangulacji.

prof. dr hab. Jerzy Lewandowski

Kierownik,
Katedra Teorii Względności i Grawitacji,
Wydział Fizyki UW
ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa
tel. 225532958