

Prof. dr hab. Romuald A. Janik
Instytut Fizyki Teoretycznej
Uniwersytet Jagielloński
ul. Łojasiewicza 11
30-348 Kraków
e-mail: romuald.janik@uj.edu.pl

14.03.2022



JAGIELLONIAN
UNIVERSITY
IN KRAKOW

Institute
of Theoretical Physics

Ocena osiągnięć naukowych dr. Pawła Caputy w związku z postępowaniem habilitacyjnym

Niniejszą ocenę osiągnięć naukowych dr. Pawła Caputy rozpocznę krótkim podsumowaniem formalnym rozprawy habilitacyjnej oraz wprowadzeniem do jej tematyki badawczej. Następnie omówię wyniki otrzymane w rozprawie oraz inne osiągnięcia naukowe. Recenzję zakończę podsumowaniem.

Rozprawa habilitacyjna

Na merytoryczną część rozprawy habilitacyjnej zatytułowanej *Dynamics of entanglement and complexity in the AdS/CFT correspondence* składa się cykl dziesięciu opublikowanych prac wraz z 20-stronicowym omówieniem. Odwołania typu [A1] odnoszą się do prac habilitanta wymienionych na stronie 2 autoreferatu. Liczby cytowań i indeks Hirscha podaję według specjalistycznej bibliograficznej bazy danych z fizyki wysokich energii INSPIRE-HEP, stan z 7 marca 2022 roku.

Charakterystyka tematyki badawczej

Korespondencja AdS/CFT postuluje równoważność dwóch zupełnie odmiennych teorii: niższej wymiarowej teorii pola nie zawierającej grawitacji oraz teorii strun w wyższej liczbie wymiarów, która w szczególności obejmuje grawitację. Zasadniczym pytaniem teoretycznym w tej dziedzinie jest zrozumienie powstania geometrycznego opisu grawitacyjnego bezpośrednio w języku niższej wymiarowej teorii pola. Z wielu badań stopniowo wyłonił się obraz, że własności splątania kwantowego po stronie teorii pola wydają się być kluczowe dla interpretacji geometrycznej. W szczególności entropia splątania (*entanglement entropy*) jest tu istotnym pojęciem, prowadzącym też do analogii holograficznej geometrii i tzw. sieci tensorowych. Idąc dalej tym tropem wprowadzono (i starano się zdefiniować) pojęcia złożoności

ul. St. Łojasiewicza 11

PL 30-348 Kraków

tel. +48(12) 664-47-26

+48(12) 664-46-77

e-mail:

sekret@th.if.uj.edu.pl

(*complexity*) po obydwu stronach korespondencji AdS/CFT. Istotne jest badanie tych wielkości zarówno z punktu widzenia teorii pola jak i holografii, szczególnie zwracając uwagę na możliwość geometrycznej interpretacji wyników teorio-polowych. Przedłożona rozprawa habilitacyjna dotyczy właśnie tego kręgu zagadnień.

Wyniki otrzymane w ramach rozprawy habilitacyjnej

Najważniejszym i chyba najciekawszym wynikiem rozprawy habilitacyjnej dr. Pawła Caputy jest według mnie konstrukcja wyżej wymiarowej geometrii odpowiadającej danej konforemnej teorii pola poprzez procedurę tzw. *path integral optimization*, wprowadzoną w pracy [A6] i szerzej omówioną w pracy [A7]. Konstrukcja ta jest motywowana renormalizacją sieci tensorowych i pozwala na wyliczenie w naturalny sposób geometrii Anti-de-Sittera, którą można potencjalnie interpretować jako hiperpowierzchnia w dualnej geometrii (analogicznie do postulowanego związku sieci tensorowych i AdS/CFT). Ponadto konstrukcja ta definiuje tzw. względną złożoność pomiędzy konforemnymi teoriami pola określonymi na różnorodnościach z różnymi metrykami [A7]. Prace [A6] i [A7] spotkały się z bardzo dużym zainteresowaniem, otrzymały odpowiednio 188 i 235 cytowań. Praca [A6] została opublikowana w *Physical Review Letters*.

Interesujące zastosowanie powyższej konstrukcji zostało dokonane w pracy [A8] (opublikowanej w *Physical Review Letters*) i dotyczyło splątania stanu mieszanego (*entanglement of purification*) w pewnych konkretnych konfiguracjach, dla której było możliwe obliczenie analogicznej wielkości po stronie holografii. W pracy tej pokazano, że wykorzystując techniki z [A6] i [A7] można odtworzyć holograficzny wynik dla stykających się odcinków oraz dla pewnego obszaru parametrów konfiguracji ogólnej (dla którego można stosować metody z pracy [A7]).

Problem zdefiniowania złożoności w sposób najbardziej naturalny i zgodny z oczekiwaniami z korespondencji AdS/CFT pozostaje ciągle otwarty i badane są rozmaite konstrukcje. Bardzo interesującym podejściem jest wykorzystanie do jej definicji ``bramek'' skonstruowanych z generatorów algebry Virasoro przeprowadzone w pracy [A10] (opublikowanej w *Physical Review Letters*). Intrygujące jest pojawienie się w tym kontekście działania Polyakova.

Interesujące jest również zastosowanie pojęcia złożoności zdefiniowanego dla układu oscylatorów harmoniczych do systemu z parametryczną zmianą w czasie parametru hamiltonianu (tzw. *quench*). Analiza ta została wykonana w pracy [A9] (opublikowanej *Physical Review Letters*) gdzie otrzymano w szczególności liniowe skalowanie dla szybkich zmian parametrów. Tak zdefiniowana złożoność została tu zaproponowana jako interesująca obserwabla do badania *quench'u*.

Praca [A5] zawiera ciekawą analizę tzw. korelatorów OTOC (*Out-of-Time-Ordered Correlators*) w dwuwymiarowych konforemnych teoriach pola. Korelatory te są ważne jako indykatory chaosu, jak również ich odpowiednie znikanie dla dużych czasów wydaje się być koniecznym warunkiem na (klasyczny) opis holograficzny. W pracy tej wyprowadzono elegancki wzór na nieznikającą asymptotykę tych korelatorów dla tzw. wymiernych konforemnych teorii pola (RCFT). Interesująca też jest jego interpretacja w języku topologicznych teorii pola. Co więcej, podobne nieznikające zachowanie zachodzi nawet w granicy dużego N modeli WZW $SU(N)_k$ wskazującej na brak klasycznego opisu holograficznego dla tej rodziny teorii.

Pozostała, chronologicznie wcześniejsza, grupa prac wchodząca w skład rozprawy habilitacyjnej koncentruje się wokół tematyki entropii splątania i informacji wzajemnej.

Praca [A1] analizuje entropię splątania w teorii z zachowanym ładunkiem. Jednym z ciekawych wyników jest rozwiązanie pozornej sprzeczności *a-priori* pomiędzy wynikami holograficznymi a teorio-polowymi w tym kontekście. Kolejne dwie prace [A2, A3] dotyczą dodawania, w kontekście entropii splątania, wzbudzenia poprzez wstawienie lokalnego operatora. Analizy zostały przeprowadzone zarówno w zerowej jak i niezerowej temperaturze kontynuując równoległe badania po stronie konforemnej teorii pola i po stronie dualnego opisu holograficznego. Zgodność tych wyników jest istotnym testem holograficznego opisu splątania kwantowego.

Bardzo interesująca praca [A4] dotyczy tzw. *scrambling time*, czyli czasu potrzebnego na zaniknięcie informacji wzajemnej pomiędzy dwoma obszarami po zaburzeniu jednego z nich lokalnym operatorem. Praca ta zawiera rachunek tej wielkości zarówno po stronie konforemnej teorii pola jak i po stronie holografii i otrzymuje pełną zgodność tych całkiem nietrywialnych wyników w granicy dużego ładunku centralnego konforemnej teorii pola (czyli granicy dla której możemy oczekiwać porównania z klasycznym opisem grawitacyjnym).

Podsumowując, bardzo wysoko oceniam prace wchodzące w skład rozprawy habilitacyjnej. Spośród tych dziesięciu prac, cztery zostały opublikowane w *Physical Review Letters*. Całkowita liczba cytowań prac wchodzących w skład rozprawy habilitacyjnej wynosi 1090, przy czym wszystkie z nich miały ponad 50 cytowań. Jest to niewątpliwie bardzo dobry wynik.

Inne osiągnięcia

Poza pracami wchodzącymi w skład rozprawy habilitacyjnej, dr Paweł Caputa jest jeszcze autorem 25 opublikowanych prac po uzyskaniu stopnia doktora. Dr Paweł Caputa ma aktualnie 1776 cytowań, a jego indeks Hirscha wynosi 23 (stan z 7 marca 2022).

Praktycznie całą swoją karierę naukową dr Paweł Caputa spędził poza granicami Polski pracując oraz odbywając staże naukowe i wygłaszając referaty w bardzo dobrych ośrodkach. Warto również wspomnieć wygłaszane zaawansowane wykłady na szkołach dla doktorantów. Jest on również kierownikiem grantu NAWA Powroty oraz grantu NCN Sonata bis.

Jest to bardzo dobry dorobek naukowy, odpowiadający z dużym nadmiarem wymaganiom stopnia doktora habilitowanego.

Podsumowanie

Osiągnięcia stanowiące podstawę rozprawy habilitacyjnej są na bardzo wysokim poziomie. Prezentują spójny program badawczy, obejmujący wiele aspektów powiązania splątania kwantowego i holografii oraz pojęcia złożoności. Moja ocena jego dorobku naukowego jest zdecydowanie pozytywna. W związku z powyższym gorąco popieram nadanie dr. Pawłowi Capucie stopnia doktora habilitowanego.

Z poważaniem,



Prof. dr hab. Romuald A. Janik