

Paweł Horodecki
Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej
Politechnika Gdańska



Gdańsk 24.10.2014

Ocena dorobku naukowego dr. Andrzeja Dragana w związku z postępowaniem o nadanie stopnia doktora habilitowanego

Jako podstawę wniosku o nadanie stopnia doktora habilitowanego doktor Andrzej Dragan przedstawił osiągnięcie naukowe pt. „Relatywistyczna informacja kwantowa”, które stanowi cykl siedmiu publikacji w renomowanych czasopismach, w tym jedną opublikowaną w Physical Review Letters, jedną w Classical and Quantum Gravity, dwie w Physical Review D oraz trzy w Physical Review A. Wszystkie prace są wieloautorskie, przy czym doktor Dragan jest pierwszym autorem trzech spośród nich. Zasadniczym tematem prac jest są efekty relatywistyczne wynikające z obecności przyspieszenia w opisywanych układach fizycznych obejmujących wybrane pole kwantowe oraz stowarzyszony z nim proces pomiaru. Istotnym elementem badań jest podejście teoriiinformacyjne, kładące nacisk na jakościowy i ilościowy opis korelacji powstających w badanych układach.

Punktem wyjścia badań jest efekt Unruha, który polega na pojawieniu się termicznego promieniowania w przyspieszającym układzie odniesienia, co wiąże się z pojawieniem się tzw. modów Rindlera. Efekt ten jest ostatnio tematem żywego zainteresowania tak z punktu widzenia tradycyjnej kwantowej teorii informacji jak i z perspektywy badań interdyscyplinarnych w kontekście głośnego paradoksu informacyjnego stowarzyszonego z czarnymi dziurami i ewentualnego tzw. efektu „ściany ognia”, który miałby być związany z obserwatorem poruszającym się pod wpływem grawitacyjnego pola czarnej dziury. Niezależnie w ostatnich latach badano korelacje ujawniające się w wyniku przyspieszenia, które w układzie poruszającym prowadzi do kreacji cząstek ze stanu próżni. W badaniach tych powszechnie zakładano przybliżenie modu Minkowskiego modem Unruha. Chronologicznie pierwsza z prac doktora Dragana [7] (w niniejszej recenzji numeracja prac odpowiada tej z autoreferatu habilitanta) dokonuje krytycznej analizy takiego założenia. Autorzy korzystając z dekompozycji transformacji pomiędzy modami Minkowskiego i Rindlera obejmującej mod Unruha jako element pośredni wykazali, że w zasadzie poprzednie badania dotyczyły splątania między modem Minkowskiego w układzie inercyjnym i modem Unruha, a nie dwoma modami Minkowskiego. W pracy wykazano, że splątanie całkowitego stanu między modem Minkowskiego i jednym z modów Rindlera zależy od wyboru modu Unruha, ale niezależnie od tego wyboru maleje do zera w przypadku typowego pola bozonowego (dla obu modów Rindlera) oraz pozostaje niezerowe w przypadku pól Diraca i skalarnych pól Grassmana, przy czym w tym ostatnim przypadku maleje lub rośnie w zależności od wyboru modu Rindlera. Postawiono problem przybliżenia modu Minkowskiego z pomocą modu Unruha i rozwiązano to zagadnienie dla masowych i bezmasowych pól bozonowych pokazując, że w przypadku opisu przy pomocy skończonych pakietów istnieje odpowiednia

zasada nieoznaczoności, która wyznacza swoistą granicę współistnienia obu pakietów.

W pracy [5] rozszerzono poprzednie badania na przypadek bozonów naładowanych dla ustalonej częstości modu Rindlera i wykazano, że splątanie w tym przypadku może zniknąć dla skończonej wartości przyspieszenia niezależnie od wyboru modu. Do pomiaru splątania użyto tzw. miary ujemności. Warto na marginesie zaznaczyć, że do tej pory nie wiadomo czy miara ta nie jest automatycznie jest gwarantem destylowalności splątania, ale z pewnością jej niezerowa wartość jest tu bardzo istotnym warunkiem koniecznym (nawiasem mówiąc, wydaje się, że w pracy doszło do omyłkowej zamiany rysunków 1 i 2, bo wspomniana miara jest monotoniczna ze względu na operację śladu częściowego). W pracy pokazano ponadto istotną własność, znaną wcześniej dla innych pól tj. fermionowych, że dla pewnych wyborów stanu początkowego splątanie może zachowywać się niemonotonicznie w funkcji przyspieszenia.

Praca [1] wprowadza kolejną nową jakość do badań nad efektem Unruha i jest częściowo inspirowana doświadczeniem habilitanta z okresu badań na etapie doktoratu. W pracy tej wyprowadzono systematycznie schemat zlokalizowanego pomiaru rzutowego w oparciu o model Glaubera w przypadku poruszającego się detektora. Wprowadzono zlokalizowany mod charakterystyczny dla detektora i zależny od jego przyspieszenia, a następnie zbadano efekt Unruha w użyciu takiego detektora. W rezultacie otrzymano interesującą poprawkę do efektu Unruha wynikającą ze skończonego charakteru detektora. Mianowicie efektywna temperatura zależy od specyfiki modu, przy czym w odpowiedniej granicy tradycyjny efekt zostaje odtworzony. Z pomocą wprowadzonego modelu pomiaru przeprowadzono tu również analizę splątania próżni. Ponadto przy pomocy metody rachunku zaburzeń udowodniono, że uwzględnienie skończonego czasu procesu detekcji prowadzi do odtworzenia zasadniczych własności proponowanego pomiaru rzutowego. Prace [3,4] stanowią rezultat kontynuacji powyższych badań. W artykule [3] autorzy badają splątanie dwumodowego ścięzionego stanu gaussowskiego mierzone za pomocą wprowadzonego wcześniej pomiaru rzutowego, przy czym dodatkowo rozważa się tu przypadek optymalizacji modu detektora poprzez uwzględnienie wyłącznie częstości z pierwszego regionu Rindlera. Pokazano, że taka optymalizacja pozwala w zakresie małych przyspieszeń (dla ustalonego rozmiaru detektora) obserwować niemal całkowite splątanie, w przeciwieństwie to sytuacji braku takiej optymalizacji. Kolejna praca [4] wychodzi poza założenie małych przyspieszeń i bada zarówno splątanie kwantowe jak i wielkość korelacji kwantowych obejmujących te wynikające z lokalnej niekomutatywności (korelacje takie opisuje się ilościowo przy pomocy funkcji noszącej w literaturze przedmiotu angielską nazwę „discord”). Autorzy obserwują tu, że dla ustalonego rozmiaru detektora, splątanie zanika w skończonym zakresie przyspieszeń, natomiast wspomniane korelacje - dopiero asymptotycznie dla dużych wielkości przyspieszeń, co przypomina zachowanie tych wielkości dla standardowych dynamik układów dwukubitowych. Wyniki te skonfrontowano z analizą splątania badanego w pracach wcześniejszych stanu zdefiniowanego poprzez operator kreacji modu Unruha o konkretnej częstości, gdzie ustalenie modu detektora jako modu Rindlera z dostrojoną częstością pozwala obserwować splątanie o wielkości stałej. Rezultat ten ujawnia zarówno swoistą

zaletę elastyczności proponowanego pomiaru rzutowego jak i konieczność pewnej ostrożności w fizycznej interpretacji modu Unruha (co potwierdzają inni autorzy, np. w dyskusji na temat samej interpretacji [P. M. Alsing, I. Fuentes, *Class. Quant. Grav.* **29**, 224001 (2012)] czy też w analizie dotyczącej zachowania splątania w układach fermionowych [M. Montenero, E. Martin-Martinez, *Phys. Rev. A* **85**, 024301 (2012)]).

Nieco odrębny charakter mają artykuły [2,6]. W publikacji [6] rozważono inny rodzaj detektora (tzw. detektor Unruha-deWitta) o charakterze punktowym i w interesujący sposób porównano dwa scenariusze. W pierwszym przyspieszający detektor trafia do nieruchomej wnęki, w drugim odwrotnie - to wnęka przyspiesza, a detektor spoczywa. Wykonano stosowne obliczenia numeryczne w przybliżeniu rachunku zaburzeń dla rozmiaru wnęki $L=1$ oraz zmiennej masy pola bozonowego. Zauważono pewną tendencję, mianowicie dla małych przyspieszeń i niewielkich mas oba scenariusze były zasadniczo nierozróżnialne, natomiast dla mas większych można je lepiej rozróżnić. Autorzy wiążą to z zasadniczą różnicą przypadków pól bezmasowych i masowych z punktu widzenia konformalnej niezmienniczości równania Kleina-Gordona. Jakkolwiek mamy tu do czynienia z wynikami numerycznymi (być może też obliczenia dla nieco większych mas bardziej wyraźnie potwierdziłyby tendencję rozchodzenia się krzywych w okolicach początku układu współrzędnych na rysunku 2) to zasadnicza idea artykułu bardzo dobrze się broni szczególnie dzięki fizycznej atrakcyjności samego pomysłu.

Praca [2] opublikowana w prestiżowym piśmie *Physical Review Letters* bada możliwość praktycznej generacji splątania jedynie za pomocą przyspieszenia. Jakkolwiek wcześniejsze badania habilitanta i innych autorów sugerowały taką możliwość, ze względu na występującą w pewnych przypadkach niemonotoniczność splątania ze względu na przyspieszenie, to ze względu na brak ograniczeń przyspieszenia i przestrzennego zakresu ruchu trudno było o znaczenie praktyczne. W pracy rozważono [2] ciekawy schemat w którym - co kluczowe z punktu widzenia ewentualnych prób implementacji - zakres ruchu może być ograniczony, jak to ma miejsce w przypadku dynamicznego efektu Casimira. Autorzy rozważają tu przypadek stanów gaussowskich oraz zakres wglądnie niewielkich przyspieszeń, które gwarantują (m. in. dzięki własnościom transformacji Bogolubowa) liniową zależność wybranej miary splątania od symplektycznych wartości własnych macierzy kowariancji. Przy wybranym reżimie parametrów uzyskuje się liniowy wzrost splątania w zależności od liczby powtarzanych trajektorii ruchu przyspieszonego, co efektywnie pozwala na symulację kwantowej bramki oddziałującej. W pracy wykazano ponadto występowanie rezonansów zależnych od przebiegu czasowego procesu oraz częstości wnęki. Wzmiankowane są tu też szanse ewentualnej eksperymentalnej ilustracji wyników w przyszłości w kontekście obserwacji dynamicznego efektu Casimira w układzie nadprzewodzącym [C. M. Wilson *et al.*, *Nature* **479**, 376 (2011)].

Przedstawione w omawianym osiągnięciu wyniki należy ocenić wysoko. W dziedzinie, której dotyczy habilitacja, tak jak i w wielu innych, poziom artykułów jest dość różnicowany. Na tym tle prace habilitanta wyróżniają się nie tylko solidną wartością merytoryczną, ale także, a może przede wszystkim, tym, że obejmują nowatorskie osiągnięcia. W szczególności

praca [7] dokonała krytycznej rewizji dotychczasowego paradygmatu rozumienia splątania typu kubitowego w układzie Minkowskiego w kontekście efektu Unruha m. in. dzięki (i) zasadniczej, precyzyjnej matematycznie krytyce naiwnego przybliżania modu Minkowskiego modem Unruha (ii) zwróceniu uwagi na trudność mierzalności takiego modu oraz (iii) wyprowadzeniu ograniczonych warunków współistnienia obu tych pojęć. Można zaryzykować stwierdzenie, że praca [7] przeorała świadomość badawczą w odnośnej dziedzinie, o czym świadczy fakt, że pomimo, iż opublikowana niedawno, była już cytowana blisko 80 razy. Seria prac [1,3,4] ma bezdyskusyjnie nowatorski charakter jeśli idzie o praktyczną koncepcję detekcji efektu Unruha. Prace te cechuje też, podobnie jak artykuł [7], pomysłowość i pewna elegancja estetyczna, która sprawia, że czyta się je z przyjemnością. Artykuł [6] prezentuje pomysł bardzo pogładowego eksperymentu myślowego, natomiast praca [2] może mieć w przyszłości znaczenie dla eksperymentu na gruncie fizyki ciała stałego. Jednak jej zasadniczą wartością jest walor poznawczy dotyczący fundamentalnego pytania jakie rodzaje fizycznych oddziaływań jesteśmy – przynajmniej w zasadzie - zdolni symulować przez inne. Problem generacji uniwersalnego zestawu bramek w danych warunkach fizycznych ma tu charakter paradygmatyczny (por. w tym kontekście ważny artykuł z podstaw optyki liniowej [A. Bouland, S. Aaronson, Phys. Rev. A **90**, 032311, 2014 (2014)]. Wyniki prac [1,7] oraz [2] (w jej pierwszej, elektronicznej wersji) zostały z przywołane w przeglądowej pracy [D. Rideout *et al.*, Class. Quantum Grav. **29**, 22401 (2012)] napisanej przez duży zespół badaczy (m. in. z ośrodka Perimeter w Waterloo i Uniwersytetu Cambridge) i sugerującej konieczność przeprowadzenia - w charakterze komplementarnym do badań prowadzonych w zderzaczach hadronów - doświadczeń w możliwie jak największych skalach odległości, w celu znalezienia potencjalnego punktu „spotkania” fizyki kwantowej i teorii grawitacji. Warto też nadmienić, że praca [7] była też cytowana na łamach *Reviews of Modern Physics*. Wobec wysokiej jakości prezentowanych badań oraz faktu, że mieszczą one w sobie osiągnięcia nowatorskie, wydaje się w pełni zasadne rozważenie przez komisję ds. habilitacji stosownego ich wyróżnienia.

Do obowiązków recenzenta należy niezależna ocena całkowitego dorobku habilitanta. Dorobek ten w pierwszej kolejności cykl prac stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej, pośród których centralne miejsce zajmuje doświadczalna publikacja pod kierunkiem profesorów Konrada Banaszka i Czesława Radzewicza i przy współpracy doktora Wojciecha Wasilewskiego dotycząca kodowania informacji w polaryzacyjnych stopniach swobody par fotonów w obecności skorelowanego szumu. Należy tu podkreślić, że w tamtym czasie doktor Andrzej Dragan pod kierunkiem opiekunów przeprowadził eksperyment, którego rezultat, stanowiący piękne zastosowanie symetrii w kwantowej komunikacji, był szeroko cytowany (69 razy) i właściwie można go uznać za klasyczny w dziedzinie przedmiotu. Systematyczną bazę teoretyczną dla tego eksperymentu stanowi cytowany 31 razy artykuł o transmisji informacji klasycznej w obecności szumu, gdzie m.in. dokonano systematycznej analizy funkcji Holevo dla rozważanego scenariusza. W ramach pracy doktorskiej dr Andrzej Dragan przedstawił również samodzielny artykuł badawczy w *Physical Review A* na temat teorii sprzęgania fotonów pochodzących ze źródła parametrycznej konwersji częstotliwości z

włóknem optycznym, gdzie wyprowadził konieczne warunki takiego procesu. Artykuł ten świadczy o dużym stopniu samodzielności ówczesnego doktoranta i legitymuje się już pokaźną liczbą cytowań (22). Doktor Dragan posiada też w dorobku artykuł pt. „On appearance of the Moving Bodies” w piśmie o charakterze bardziej popularnym, ale zachowującym rygor naukowości, mianowicie w *American Mathematical Monthly*. Artykuł ten jest tłumaczeniem swojego polskiego odpowiednika, który ukazał się w roku 2003 na łamach pisma krajowego tj. popularnej *Delta*. Stanowi to pozytywny przykład rzetelności i braku kompleksów, bowiem proces transferu wiedzy tego typu częściej zachodzi - w sensie ogólnym - w przeciwną stronę. Podobnie doktor Dragan opublikował ze współpracownikiem artykuł w prestiżowym piśmie akademickim o charakterze dydaktycznym *American Journal of Physics*, gdzie autorzy podali proste wyprowadzenie zjawiska relatywistycznej precesji Fermiego.

Wybrane powyżej artykuły bynajmniej nie wyczerpują dorobku habilitanta, który posiada widoczną łatwość twórczego podejmowania rozmaitych tematów badawczych i publikuje swoje wyniki w renomowanych pismach naukowych. Świadczy o tym między innymi obecność opublikowanego na łamach *Journal of Physics B* artykułu dotyczącego procesu zaniku kondensatu Bozego-Einsteina, prac w *Physical Review A* na temat (i) przetwarzania informacji kwantowej w układzie Jaynesa-Cummingsa, jak również dynamicznego opisu jej degradacji w ogólnym przypadku kubitowym (ii) interferencyjnego charakteru funkcji korelacji pary stanów Focka oraz (iii) generacji kwantowego stanu splątanego typu klasterowego (kluczowego dla pewnej klasy modeli kwantowego komputera bazujących na sekwencji pomiarów) poprzez odpowiednie schładzanie układu, a także publikacji na łamach *New Journal of Physics* proponującej ciekawy schemat termometru w oparciu o interferencję oscylacyjnych stopni swobody atomu, gdzie wartość fazy Berry’ego sygnalizowałaby temperaturę pola w stanie Gibbsa. Należy tu podkreślić, że większość wyników badań habilitanta jest rezultatem samodzielnej szerokiej współpracy międzynarodowej. Z recenzenckiego obowiązku odnotujmy, że prace dr. Dragana były już cytowane blisko 270 razy z indeksem Hirsha 9, co jest bardzo dobrym wynikiem na tym etapie kariery naukowej.

Habilitant został wyróżniony licznymi stypendiami badawczymi, w tym między innymi dwukrotnie stypendium Europejskiej Fundacji Nauki na pobyt w oksfordzkim ośrodku badawczym, prestiżowym dwuletnim stypendium Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej, nagrodą tygodnika *Polityka* „Zostańcie z nami” oraz stypendium Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Doktor Andrzej Dragan wygłaszał liczne referaty na konferencjach międzynarodowych, w tym – co jest szczególnie warte podkreślenia - ponad dziesięć to wykłady zaproszone. Odbyte staże podoktorskie w bardzo dobrych ośrodkach naukowych Imperial College w Londynie oraz na Uniwersytecie w Nottingham gwarantują ugruntowanie doświadczenia badawczego, które już zaowocowało znakomitymi rezultatami składającymi się na dorobek habilitacyjny. Doktor Andrzej Dragan recenzował też artykuły dla renomowanych międzynarodowych pism naukowych, pośród których, zważywszy na młody wiek badacza, na szczególną uwagę zasługuje recenzowanie artykułu dla pisma *Reviews of Modern Physics*.

Habilitant legitymuje się ponadto znaczącym dorobkiem organizacyjnym, w tym udziałem w komitetach organizacyjnych dwóch konferencji międzynarodowych oraz jednej krajowej, a także doświadczeniem dydaktycznym w prowadzeniu zajęć akademickich, w wykładów. Habilitant brał udział w opiece badawczej nad studentami na etapie studiów licencjackich i magisterskich, a obecnie pełni rolę promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim. Na szczególną uwagę zasługuje tu nagroda Dziekana Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego za wyróżniające prowadzenie wykładu semestralnego pt. „Niezwyczajna szczególna teoria względności”. W istocie działalność popularyzatorska habilitanta stanowi rozdział imponujący. Jest on autorem dziewięciu popularnych artykułów, brał udział w popularnych programach radiowych i telewizyjnych, udzielał wywiadów prasowych na tematy bieżących odkryć naukowych. Przede wszystkim zaś prowadził liczne wykłady, m. in. ramach Festiwalu Nauki, dla studentów i młodzieży, organizował warsztaty z fizyki pod auspicjami Krajowego Funduszu na Rzecz Dzieci, był sekretarzem naukowym Komitetu Olimpiady Fizycznej. Jest także m.in. reżyserem krótkiego, niestandardowego filmu popularyzującego relatywistyczne pojęcie dylatacji czasu, który to film cieszy się w sieci internetowej nadzwyczajną popularnością. Z powyższego omówienia bezsprzecznie wynika, że doktor Andrzej Dragan jest obdarzony dużym talentem popularyzatorskim, który z powodzeniem wykorzystuje do upowszechnienia wiedzy naukowej.

Na zakończenie trzeba wspomnieć, że habilitant, który wcześniej brał udział w prowadzeniu projektów badawczych, obecnie z powodzeniem kontynuuje obraną tematykę badań, czego rezultatem jest jego najnowsza publikacja [K. Lorek, D. Pęczak, E. G. Brown, A. Dragan, Phys. Rev. A **90**, 032316 (2014)] w ramach kierowanego przez niego projektu naukowego (Sonata-BIS) pt. „Relatywistyczna informacja kwantowa” mającego na celu między innymi powołanie nowego zespołu badawczego. Jest to, obok rozległej współpracy międzynarodowej, jeszcze jeden z licznych przejawów faktu, że doktor Andrzej Dragan osiągnął pełną samodzielność naukową.

W podsumowaniu pragnę stwierdzić, że przyszło mi oceniać dorobek utalentowanego młodego badacza, który w udany sposób łączy szerokie zainteresowania badawcze z działalnością popularyzatorską. Niektóre z wyników jego badań zdążyły się już spotkać z żywym oddźwiękiem w literaturze międzynarodowej, w tym dwie spośród jego publikacji można wręcz uważać za klasyczne, co w przypadku pracy dotyczącej efektu Unruha, opublikowanej w nieodległej przeszłości, zasługuje na szczególne podkreślenie. Wobec powyższego nie mam najmniejszej wątpliwości, że przedstawiony do oceny dorobek badawczy z nadmiarem spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane w przewodach habilitacyjnych i tym samym z pełnym przekonaniem popieram wnioski o nadanie doktorowi Andrzejowi Draganowi stopnia doktora habilitowanego.