

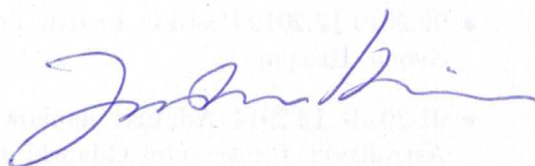
Autoreferat

Załącznik do wniosku o przeprowadzenie
postępowania habilitacyjnego na podstawie
jednotematycznego cyklu publikacji pt.:

*Aspekty przejścia kwantowo-klasycznego: od
splątania do obiektywności*

Jarosław Korbicz

2016



1 Imię i nazwisko

Jarosław Korbicz

2 Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytuł rozprawy doktorskiej

Tytuł doktora nauk przyrodniczych nadany przez Wydział Matematyki i Fizyki, Leibniz Universität Hannover w dniu 16.06.2006.

Tytuł rozprawy doktorskiej: "Quantumness of States: From Positive P -Representations to Entanglement Tests", kierownik: Prof. M. Lewenstein

3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych

- 04.2002-12.2006 Doktorant, Institut für Theoretische Physik, Leibniz Universität Hannover, Niemcy
- 01.2007-12.2007 Postdoc, Departament d'Estructura i Constituents de la Matèria, Universidad de Barcelona oraz Institut de Ciències Fotòniques (ICFO), Barcelona, Hiszpania
- 01.2008-02.2008 Postdoc, Institut de Ciències Fotòniques (ICFO), Barcelona, Hiszpania
- 02.2008-09.2008 Postdoc, Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, Politechnika Gdańska oraz Krajowe Centrum Informatyki Kwantowej w Gdańsku (KCIK)
- 10.2008-02.2010 Postdoc, Instytut Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki, Uniwersytet Gdański oraz Krajowe Centrum Informatyki Kwantowej w Gdańsku (KCIK)
- 02.2010-12.2012 Postdoc, Institut de Ciències Fotòniques (ICFO), Barcelona, Hiszpania
- 01.2013- 12.2014 Adiunkt naukowy, Instytut Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki, Uniwersytet Gdański oraz Krajowe Centrum Informatyki Kwantowej w Gdańsku (KCIK)

- 01.2015 – 04.2015 Pracownik naukowo-techniczny, Instytut Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki, Uniwersytet Gdański oraz Krajowe Centrum Informatyki Kwantowej w Gdańsku (KCIK)
- 05.2015 - Adiunkt naukowy-nauczyciel akademicki, Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, Politechnika Gdańska oraz Krajowe Centrum Informatyki Kwantowej w Gdańsku (KCIK)

4 Wskazanie osiągnięcia wynikającego z Art. 16 ust. 2 Ustawy z dnia 14.03.2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)

4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

Jednotematyczny cykl publikacji pt.: *Aspekty przejścia kwantowo-klasycznego: od splątania do obiektywności*

4.2 Autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa

Literatura

- [A] J. K. Korbicz, J. Wehr, M. Lewenstein, *Entanglement of positive definite functions on compact groups*, Comm. Math. Phys. **281**, 753 (2008)
- [B] J. K. Korbicz, J. Wehr, M. Lewenstein, *Entanglement and Quantum Groups*, J. Math. Phys. **50**, 062104 (2009)
- [C] J. K. Korbicz, M. Almeida, J. Bae, M. Lewenstein, A. Acin, *Structural approximations to positive maps and entanglement breaking channels*, Phys. Rev. A **78**, 062105 (2008)
- [D] J. K. Korbicz, P. Horodecki, R. Horodecki, *Quantum-correlation breaking channels, broadcasting scenarios, and finite Markov chains*, Phys. Rev. A **86**, 042319 (2012)
- [E] J. K. Korbicz, P. Horodecki, R. Horodecki, *Objectivity in the Photonic Environment Through State Information Broadcasting*, Phys. Rev. Lett. **112**, 120402 (2014)

- [F] R. Horodecki, J. K. Korbicz, P. Horodecki, *Quantum origins of objectivity*, Phys. Rev. A **91**, 032122 (2015)
- [G] J. Tuziemski, J. K. Korbicz, *Dynamical objectivity in quantum Brownian motion*, EPL **112**, 40008 (2015)
- [H] J. Tuziemski, J. K. Korbicz, *Objectivisation In Simplified Quantum Brownian Motion Models*, Proszona publikacja spoza listy JCR, Photonics **2**, 228 (2015)
- [I] J. Tuziemski, J. K. Korbicz, *Analytical studies of Spectrum Broadcast Structures in Quantum Brownian Motion*, J. Phys. A: Math. Theor. **49**, 445301 (2016)

4.3 Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Osiągnięciem naukowym są wyniki zaprezentowane w powyższych pracach zbiorowych. Mój wkład do każdej z tych prac opisany jest w punkcie 1.2 w załączniku *Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki*. Wkłady współautorów przedstawione są w załączonych oświadczeniach.

W dalszej części Autoreferatu pozycje oznaczone literami [A]-[I] odnoszą się do prac stanowiących cykl publikacji, na którym opiera się niniejszy wniosek habilitacyjny i które wypisane są powyżej. Pozycje oznaczone liczbami [1]-[13] odnoszą się do prac wnioskodawcy nie wchodzących w skład jednotematycznego cyklu publikacji. Pozostałe referencje oznaczone są nazwiskiem pierwszego autora i rokiem wydania, np. [Schrödinger1935].

4.3.1 Wstęp

Przejście kwantowo-klasyczne pozostaje wciąż jednym z podstawowych problemów współczesnej fizyki pomimo ponad 100 lat istnienia teorii kwantowej [Joos2003]. Problemem o tyle istotnym, że w mnogości swych aspektów dotyczy całego spektrum problemów od podstaw rozumienia otaczającego nas świata (np. czy i czym jest rzeczywistość?) do rozwijających się technologii kwantowych (np. jak odróżnić czy dana maszyna pracuje kwantowo czy też klasycznie?). Ilość kontrowersji i narosłych interpretacji jest olbrzymia i przypomina trochę sytuację z elektromagnetyzmem ciał w ruchu z

przełomu 19-go i 20-go wieku. Celem wykonanych przeze mnie prac było badanie aspektów tego przejścia, opierając się na możliwie jasno określonych pojęciach i wynikach zamiast spekulacji. Jednym z takich pojęć jest pojęcie splątania. Odzwierciedla ono bardzo podstawową dla mechaniki kwantowej zasadę liniowej superpozycji dla układów wielociałowych i prowadzi do wybitnie nieklasycznych korelacji. Zauważone już przez Schrödingera [Schrödinger1935], splątanie stało się obecnie jednym z centralnych obiektów badań teorii kwantowej [Horodecki2009] jak i celem różnorodnych implementacji praktycznych (np. w kryptografii). Jednak jego wykrycie w przypadku realistycznych stanów z uwzględnieniem szumu (tzw. problem separowalności) jest zagadnieniem bardzo trudnym matematycznie i w pewnym sensie wciąż w pełni nie poznanym, pomimo istnienia wydajnych algorytmów wykrywania [Doherty2002]. Dlatego szukanie nowych metod jest tu uzasadnione zarówno ze względów poznawczych jak i praktycznych.

Po drugiej stronie granicy kwantowo-klasycznej, w świecie klasycznym, splątania (podobnie jak i ogólnych koherencji kwantowych) nie obserwujemy i ciekawym aspektem są tu mechanizmy jego zaniku. Jednym z matematycznych opisów tego zaniku są tzw. kanały kwantowe łamiące splątanie [Horodecki2003]. Są to takie odwzorowania całkowicie dodatnie i zachowujące ślad, które działając tylko na podukład zawsze prowadzą do zaniku splątania. Opis takich kanałów zdawał się być dobrze poznany w terminach tzw. izomorfizmu Jamiołkowskiego zastosowanego do stanów separowalnych i procedur typu zmierz i przygotuj. Jednak jak wiadomo stany separowalne nadal mogą zawierać nieklasyczne korelacje [Modi2012] i powstaje pytanie jakim kanałom takie stany odpowiadają.

Jak udało mi się pokazać, to zdawało się dosyć techniczne pytanie wiąże się w bardzo nieoczekiwany sposób z jednym z fundamentalnych aspektów przejścia kwantowo-klasycznego: problemem obiektywności. Jak wiadomo w teorii kwantowej obserwacja (pomiar) w ogólności zaburza stan mierzonego układu. Z drugiej strony, w życiu codziennym obserwujemy pewnego rodzaju niezmienniczość względem obserwacji, określaną jako obiektywność zewnętrznego świata. Rodzi się pytanie: skoro teoria kwantowa jest obecnie naszym najbardziej podstawowym opisem przyrody, to w jaki sposób wyłącza się z niej obiektywność? Pionierskie badania w tym kierunku zapoczątkował W. H. Żurek [Zurek2009], używając jednak pojęć z teorii informacji o niejasnym w tym kontekście znaczeniu. Głębsza analiza, na podstawowym poziomie stanów kwantowych, okazała się konieczna. W tym duchu poniższy opis osiągnięcia naukowego przedstawia najpierw moje badania splątania, następnie kanałów łamiących splątanie i na koniec pojawianie się obiektywności poprzez rozgłaszanie informacji podczas dekoherencji w kwantowych

układach otwartych.

4.3.2 Podsumowanie

Badanie aspektów przejścia kwantowo-klasycznego rozpocząłem od matematycznego badania kwantowych korelacji w postaci splątania kwantowego oraz problemu ich odróżnienia od korelacji klasycznych. W pracach [A, B] rozwinąłem wraz ze współautorami nowatorski opis splątania w języku analizy harmonicznej na klasycznych grupach zwartych [A] oraz na ich kwantowych odpowiednikach [B]. Była to kontynuacja moich wcześniejszych badań z okresu doktoratu [6, 7] oraz pracy [Gu1985], w której jednak nie badano splątania. Najważniejsze osiągnięcie stanowi tu praca [A], gdzie wyprowadziliśmy język niekomutatywnych funkcji charakterystycznych stanów z Twierdzenia Petera-Weyla, sformułowaliśmy problem separowalności dla nich oraz dowiedliśmy grupowo-teoretyczny odpowiednik tzw. Twierdzenia Horodeckich [Horodecki1996]. Jest to centralne twierdzenie teorii splątania, wiążące problem separowalności z (nierozwiązanym w pełni) problemem opisu odwzorowań dodatnich ale nie zupełnie dodatnich. Znaleziony grupowy odpowiednik stanowi w pewnym sensie przeliczalnie-wymiarowe uogólnienie tego twierdzenia, nieznanego dotychczas w analizie harmonicznej. Opisuje ono separowalne niekomutatywne funkcje charakterystyczne przy pomocy odwzorowań zachowujących funkcje dodatnio określonego typu. Dalsze uogólnienie części wypracowanego formalizmu na zwarte grupy kwantowe jest tematem pracy [B], gdzie sformułowaliśmy wraz ze współautorami analog dodatniej określoności oraz Twierdzenia Bochnera charakteryzujący stany kwantowe, zdefiniowałem pojęcie separowalności na zwartych grupach kwantowych i dowiodłem analog tzw. kryterium częściowej transpozycji (*PPT*). Badania te nie przyniosły na razie nowych kryteriów splątania, gdyż postawione problemy okazały się nowe, nieznanego i analiza harmoniczna nie ma odpowiednich narzędzi. Otworzyły jednak drogę w przeciwnym kierunku: do stawiania problemów i generowania rezultatów w obszarze analizy harmonicznej fizycznymi metodami teorii splątania.

Kolejny krok po opisie splątania to badanie, dalej w abstrakcyjny i matematyczny sposób, jak może być ono łamane, czyli zamieniane w korelacje klasyczne [C, D]. Tematem pracy [C] jest tzw. strukturalne przybliżanie (*SPA*) [Horodecki2002] dodatnich ale nie całkowicie dodatnich odwzorowań – centralnego obiektu w teorii wykrywania splątania. Takie przybliżanie stanowi model fizycznej realizacji powyższych, niefizycznych odwzorowań. Zbadaliśmy wraz ze współautorami szereg ważnych dla teorii splątania tzw. optymalnych odwzorowań [Lewenstein2001], pokazując, że ich fizyczne przybliże-

nia są kanałami kwantowymi łamiącymi splątanie i w związku z tym dopuszczają koncepcyjnie prostą fizyczną implementację w postaci tzw. procedury zmierz i przygotuj [Horodecki2003]. Jako produkt uboczny tych badań, wprowadziłem nową rodzinę stanów tzw. stany unitarnie-symplektycznie niezmiennicze. Rodzina ta jest prosta w opisie i zawiera splątanie związane [Horodecki1998]. Dalsze badania kanałów łamiących splątanie prowadziłem wraz ze współautorami w pracy [D], gdzie wprowadziliśmy i opisaliśmy nowe rodziny takich kanałów, pochodzące od stanów skorelowanych klasycznie-klasycznie (CC) oraz kwantowo-klasycznie (QC) [Modi2012]. Wprowadziliśmy również pojęcie tzw. rozgłaszania spektralnego, stanowiące znacznie słabszą wersję kwantowego rozgłaszania stanu [Barnum1996], gdzie tylko widmo (spektrum) stanu jest rozgłaszane. Znaleźliśmy też dość zaskakujące i nietrywialne powiązanie z Teorią Perrona-Frobeniusa, na mocy którego każdy kanał typu QC posiada całą rodzinę stanów, które spektralnie rozgłasza. Co ciekawe pomiar definiujący kanał nie musi być pomiarem von Neumanna lecz może być ogólnym pomiarem typu $POVM$.

Kulminacją moich dotychczasowych badań przejścia kwantowo-klasycznego były badania obiektywności i jej wyłaniania się z teorii kwantowej, przeprowadzone w pracach [E, F, G, H, I]. Kontynuując pionierskie badania W. H. Żurka i zespołu zwane kwantowym Darwinizmem [Zurek2009, Riedel2010], który to jest zaawansowaną formą teorii dekoherencji, zastosowałem ideę spektralnego rozgłaszania z pracy [D] i wprowadziłem wraz ze współautorami w pracach [E, F] nowatorskie podejście oparte na tzw. spektralnych strukturach rozgłoszeniowych (SBS). Są to klasycznie skorelowane, wielociąłowe stany kwantowe badanego układu oraz części jego środowiska, odzwierciedlające obiektywność pewnej obserwabli w sensie niezmienniczości wartości jej pomiarów względem obserwatorów. W pracy [E] stany te znaleźliśmy w jednym ze sztandarowych modeli dekoherencji i kwantowych układów otwartych: modelu oświetlonej sfery Joosa i Zeha z 1985r. [Joos1985] (patrz również [Riedel2010], gdzie badano pewną formę obiektywności), wprowadzając pojęcie tzw. makrofrakcji, które odzwierciedlają makroskopowy charakter obserwacji. Udało się znaleźć odpowiednie skale czasowe oraz stosując zaawansowane twierdzenia kwantowej teorii informacji, wyprowadziliśmy ze struktur rozgłoszeniowych poprzednio używany warunek skalarny kwantowego Darwinizmu. Używając Twierdzenia Perrona-Frobeniusa pokazaliśmy również dość zaskakującą możliwość wiernego rozgłaszania pewnej klasycznej wiadomości poprzez mechanizm dekoherencji. Należy podkreślić, że model Joosa i Zeha jest nieprzerwanie badany od ponad 30-tu lat i znalezienie jego jakościowo nowego aspektu stanowi godne uwagi osiągnięcie. Znalezione w konkretnym modelu struktury rozgłoszeniowe wprowadziłem następnie

wraz ze współautorami w ogólny, niezależny od modelu sposób w pracy [F]. Jej centralnym wynikiem jest udowodnienie pewnej równoważności między operacyjnym pojęciem obiektywności a strukturami rozgłoszeniowymi. Waga tego rezultatu polega na uchwyceniu pojęcia filozoficznego, jakim jest obiektywność, w języku stanów kwantowych. Co ciekawe, dowód opiera się na definicji niezaburzenia układu kwantowego, pochodzącej od Bohra i wypracowanej w toku słynnej dyskusji Einstein-Podolsky-Rosen kontra Bohr z 1935r [EPRB1935]. Pojęcie to, użyte wtedy do obrony mechaniki kwantowej, posłużyło tu paradoksalnie do definicji klasyczności.

Dalsze badania obiektywności i struktur rozgłoszeniowych kontynuowałem wraz ze współautorem w modelu kwantowego ruchu Browna [Ullersma1966] (kwantowy oscylator harmoniczny, sprzężony liniowo z kąpielą innych oscylatorów harmonicznych) w pracach [G, H, I]. Jest to jeden z najbardziej popularnych i szeroko stosowanych modeli kwantowych układów otwartych o bogatej dynamice, i w którym badano już pewną formę obiektywizacji [Blume-Kohout2008]. Pomimo, iż jest to model opisany kwadratowym Hamiltonianem, znalezienie rozwiązania na stan tylko częściowo zredukowany i zawierający fragment środowiska okazało się zadaniem dosyć skomplikowanym ze względu na brak narzędzi. Pracując w odpowiednim do stawianym pytań przybliżeniu braku odrzutu centralnego oscylatora, znaleźliśmy w tym modelu nowy typ struktury rozgłoszeniowej – dynamiczną strukturę rozgłoszeniową [G]. Jej cechą charakterystyczną jest zmienność w czasie. Koduje on położenie początkowe centralnego oscylatora jak i kilka innych parametrów jego ruchu (np. częstość). Badania te były kontynuowane w pracy [H] (jest to publikacja pomocnicza, spoza listy JCR, jednak zawiera ciekawe rezultaty) w uproszczonych reżimach modelu, stosując pewną formę twierdzenia ergodycznego dla funkcji prawie okresowych i wprowadzając pojęcie makroskopowej obiektywności – obiektywności pojawiającej się tylko na skalach makroskopowych. W pracy [I] numeryczna analiza z pracy [G] została uzupełniona odpowiednimi rozważaniami analitycznymi. W reżimach zarówno niskiej jak i wysokiej temperatury środowiska, udało się wyprowadzić warunki powstawania dynamicznej struktury rozgłoszeniowej w funkcji parametrów modelu, takich jak temperatura, czas oraz wielkość branych pod uwagę fragmentów środowiska.

Na opisane powyżej badania można spojrzeć z perspektywy kwantowych układów otwartych. Podobnie jak kwantowy Darwinizm, łamią one dotychczasowy paradygmat dotyczący roli środowiska jako tylko źródła szumu i stawiają nowy krąg pytań, np.: jaką informację gromadzi środowisko o układzie, jak jest ona odzwierciedlona w strukturze stanu z uwzględnieniem części środowiska i czy stan ten jest bliski strukturze rozgłoszenio-

wej? Odpowiedzi na te pytania pozwalają odsłonić nowe aspekty przejścia kwantowo-klasycznego w układach wielociałowych i mogą znaleźć zastosowanie zarówno na poziomie technologicznym (np. pomagając kontrolować "wyciekanie" podczas dekoherencji informacji z rejestrów kwantowych) jak i podstawowym (np. do badania problemu pomiaru w teorii kwantowej lub prób opisu powstawania czasoprzestrzeni jako efektu kwantowego). Dużym wyzwaniem jest tu jednak brak odpowiednich narzędzi do generowania rozwiązań i nieuniknione jest zaprzęgnięcie całego dostępnego arsenału metod (np. całek po trajektoriach) w celu ich wypracowania.

5 Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych)

Dane bibliometryczne:

- liczba publikacji **22** w tym **14** po uzyskaniu stopnia doktora
- łączna liczba cytowań: **385** w tym **364** bez autocytowań
- indeks Hirscha: **9**
- sumaryczny impact factor: **75**

5.1 Osiągnięcia przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora

5.1.1 Ogólna teoria względności

W pracy [1] badaliśmy metryki typu Bondiego-Sachsa dostosowane do foliacji czasoprzestrzeni powierzchniami zerowymi. Wypisaliśmy działanie Hilberta dla takich metryk oraz zastosowaliśmy metodę Diraca badania układów z więzami do sformułowania odpowiedniego formalizmu Hamiltonowskiego, będącego odpowiednikiem słynnego formalizmu ADM [Arnowitt1959] ale z zerową foliacją.

5.1.2 Badanie kwantowości stanów poprzez uogólnione ściskanie

Podalem wraz ze współautorami ciąg warunków określających nieklasyczny charakter stanów kwantowych w postaci uogólnionego ściskania dla układów opisywanych przez zmienne ciągłe [2] oraz układów wielu spinów $1/2$ [3, 4]. W przypadku zmiennych ciągłych podaliśmy nowe warunki istnienia tak zwanej dodatniej P -reprezentacji dla stanu i powiązaliśmy je z 17-tym

problemem Hilberta (istnienie wielomianów dodatnich, które nie są sumami kwadratów innych wielomianów). W przypadku układów spinowych, badaliśmy stany całkowicie symetryczne i wyprowadziliśmy warunki istnienia dwu oraz trójciałowego splątania w postaci uogólnionego ściskania spinowego dla makrospokowego spinu [3]. Warunki te zostały zastosowane do analizy danych doświadczalnych [4], potwierdzając nieklasyczny charakter uzyskanych stanów.

5.1.3 Statystyka Fermiego-Diraca i teoria liczb

W pracy [5] badaliśmy powiązania statystyki Fermiego-Diraca dla idealnego gazu Fermiego w pułapce harmoniczej z zagadnieniem podziału danej liczby naturalnej. Stosując metody kwantowej fizyki statystycznej, znaleźliśmy kumulanty rozkładu prawdopodobieństwa ilości podziałów na różne części.

5.1.4 Zastosowanie analizy harmoniczej do badania kwantowości

Zaproponowałem wraz ze współautorem w pracy [6] nową metodę badania splątania w układach skończeniowymiarowych przy pomocy teorii grup zwartych i analizy harmoniczej na nich. Sformułowaliśmy podstawowe twierdzenia charakteryzujące stany splątane poprzez ich niekomutatywne funkcje charakterystyczne. Metodę tę rozwijałem w kolejnych publikacjach. W pracy [7] zastosowaliśmy, zamiast funkcji Wignera, niekomutatywne funkcje charakterystyczne na (niezwartej) grupie Heisenberga-Weyla do nowego opisu przejścia kwantowo-klasycznego.

5.2 Osiągnięcia po uzyskaniu stopnia naukowego doktora

5.2.1 Splątanie, geometria algebraiczna i fizyka statystyczna

Szukając nowych sposobów opisu splątania, zaproponowaliśmy w pracy [8] metodę opartą na podstawowych metodach geometrii algebraicznej – badaniu zer układów wielomianów. Wielomiany zostały skonstruowane za pomocą: 1) rozmaitości Stiefla, opisującej w tym przypadku zbiór rozkładów wypukłych danej macierzy gęstości; 2) zanurzenia Segre przestrzeni rzutowych $CP^m \times CP^n \rightarrow CP^{mn}$ (blisko powiązanego z tzw. uogólnioną konkurencją kwantową). W ten sposób ich wspólne zera odpowiadają rozkładowi produktowemu danego stanu, czyli jego separowalności. Brak dalszych narzędzi po stronie geometrii algebraicznej wymusił fizyczne podejście do

problemu – zastosowanie metod fizyki statystycznej. Definiując odpowiedni układ Hamiltonowski z więzami, wprowadzając sztuczną temperaturę (jako parametr regularyzujący), związaliśmy z oryginalnym problemem pewien model mechaniczno-statystyczny. Jego dalsze badanie przebiegało numerycznie na tzw. stanach Wernera w celu sprawdzenia metody. Choć udało się otrzymać pewnego rodzaju zmianę przy przejściu od stanów separowalnych do splątanych to jednak potrzebne zasoby numeryczne okazały się bardzo duże.

5.2.2 Korelacje niesygnalizujące i nierówności Bella

Wyjaśnienie dlaczego przyroda nie jest bardziej nielokalna niż pozwala na to mechanika kwantowa stało się obecnie jednym z fundamentalnych problemów teorii kwantowej (patrz np. [Pawlowski2009]). Problem ten daje się sformułować przy minimalnych założeniach co do badanej teorii, używając tylko prawdopodobieństw warunkowych $p(a_1, \dots, a_n | X_1, \dots, X_n)$, opisujących łączne rozkłady wyników a_1, \dots, a_n pewnych (abstrakcyjnych) procedur pomiarowych X_1, \dots, X_n , przeprowadzanych przez n obserwatorów. Skończona prędkość przesyłania informacji nakłada pewne liniowe więzy na zbiór takich prawdopodobieństw, tzw. warunki niesygnalizowania (*non-signaling*), wycinając pewien wielościan wypukły. Jednak korelacje dozwolone przez mechanikę kwantową nie wyczerpują całego wielościanu niesygnalizującego. Znalezienie warunków jednoznacznie charakteryzujących zbiór kwantowy, które dawałyby tym samym odpowiedź na postawione na wstępie pytanie, okazało się bardzo trudnym zadaniem. Uczestniczyłem w badaniach tego problemu w pracy [9], gdzie pokazaliśmy, że równoczesne założenie: 1) zasady niesygnalizowania oraz 2) kwantowej opisywalności lokalnych pomiarów prowadzi do korelacji bardziej ogólnych niż kwantowe. Wynik jest o tyle zaskakujący, że wymaga użycia trzech lub więcej obserwatorów – dla dwóch obserwatorów niesygnalizowanie i lokalna mechanika kwantowa odtwarzają dokładnie korelacje kwantowe [Barnum2010]. Praca nasza wiąże też zagadnienie korelacji kwantowych z wielościanowymi rozszerzeniami twierdzenia Gleason.

Okazało się, że skonstruowany w tej pracy przykład opiera się na bardzo ciekawym obiekcie – nierozszerzalnych bazach produktowych (*unextendible product bases, UPB*). Są to ortonormalne zbiory wektorów w wielościanowej przestrzeni Hilberta, skonstruowane całkowicie z wektorów produktowych i takie, że nie można znaleźć żadnego innego wektora produktowego, prostopadłego do podprzestrzeni rozpiętej przez ten zbiór. Jest to ważny obiekt w teorii splątania, pozwalający m.in. na konstruowanie tzw. świadków spląta-

nia (z czym i mieliśmy do czynienia). Obserwacja ta zasugerowała związek pomiędzy UPB a nierównościami Bella, opisującymi podzbiór prawdopodobieństw dozwolonych klasycznie. Związek ten badaliśmy w pracy [10], gdzie podaliśmy procedury konstruowania: 1) klasy nierówności Bella z UPB oraz 2) UPB z pewnych nierówności Bella. Uzyskane nierówności Bella okazały się o tyle interesujące, że nie są one łamane przez korelacje kwantowe lecz tylko przez bardziej ogólne niesygnalizujące.

5.2.3 Superaddytywność kwantowych kanałów z wieloma nadawcami

Zwiększanie pojemności kanałów przy użyciu splątania jest tematem prac [11], [12]. Pokazaliśmy tam jak użycie splątania pozwala na zwiększenie klasycznej pojemności kanałów kwantowych z wieloma nadawcami (tzw. kanałów MAC) poza obszar klasycznie dozwolony. Skupiając się na kanałach Gaussowskich (zmiennie ciągłe), badaliśmy protokół przesyłu danych, inspirowany kwantowych gęstym kodowaniem i podaliśmy pozaklasyczne reżimy jego pracy. Co ciekawe, w tych reżimach formalnie jeden z nadawców nadaje stały symbol, czyli nie przesyła żadnej informacji a mimo to zwiększa możliwości nadawania partnera. Stanowiło to przeniesienie na kanały o zmiennych ciągłych wcześniej znalezionych protokołów dla zmiennych dyskretnych [Czekaj2009]. Zaproponowany schemat okazał się koncepcyjnie prosty i przez to bardzo atrakcyjny ze względu na możliwość realizacji praktycznej – potrzebne są jedynie płytki światłodzielące oraz źródło dwumodowego ściskania. Problemem jest jednak potrzeba dość wysokiego ściskania – na poziomie 6dB. Z drugiej strony, ściskanie tego rzędu znajduje się już w zasięgu współczesnych technologii.

5.2.4 Typowe skale czasowe dochodzenia do równowagi w układach termodynamicznych

Jeden z podstawowych problemów mechaniki statystycznej i termodynamiki to wytłumaczenie dochodzenia do równowagi termodynamicznej (patrz np. [Popescu2006]). Jeden z aspektów tego problemu to wyjaśnienie obserwowanych skal czasowych termalizacji. Rozmaite wersje twierdzeń ergodycznych i o powrocie nie dają odpowiedzi na tego typu pytania i inny rodzaj analiz jest tu potrzebny. Uczestniczyłem w badaniach tego problemu w pracy [13], gdzie wykonaliśmy pewien interesujący krok polegający na przejściu od ustalonego do losowego Hamiltonianu i badaniu typowości. Losowanym Hamiltonianem był tu całkowity Hamiltonian układu i środowiska przy założeniu

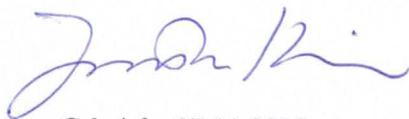
skończonych wymiarów. Miara typowości zadana była przez miarę Haara (baza) oraz niezależne miary Gaussowskie (energje). Głównym obiektem badań była odległość (w normie Hilberta-Schmidta) zredukowanego, aktualnego stanu układu do jego asymptotyki, zdekoherowanej w bazie energii. Losowanie Hamiltonianu pozwoliło podać typowe skale czasowe zaniku tej normy w czasie. Oczywiście nie stanowi to jeszcze o termalizacji układu, gdyż stan równowagowy nie musi być stanem Gibbsa, ale i tak jest to dość interesujący wkład do zagadnienia termalizacji, doceniony przez środowisko specjalistów. Koncepcje tę rozwijam dalej pracując nad typowością cech obiektywnych w mechanice kwantowej.

Literatura

- [1] J. Korbicz, J. Tafel, "Lagrangian and Hamiltonian for the Bondi-Sachs metrics" *Class. Quant. Grav.* **21**, 3301 (2004)
- [2] J. Korbicz, J. I. Cirac, J. Wehr, M. Lewenstein, "Hilbert's 17th problem and the quantumness of states", *Phys. Rev. Lett.* **94**, 153601 (2005)
- [3] J. Korbicz, J. I. Cirac, M. Lewenstein, "Spin squeezing inequalities and entanglement of N qubit states", *Phys. Rev. Lett.* **95**, 120502 (2005)
- [4] J. K. Korbicz, O. Guehne, M. Lewenstein, H. Heaffner, C. F. Roos, R. Blatt, "Generalized spin squeezing inequalities in N qubit systems: Theory and experiment", *Phys. Rev. A* **74**, 052319 (2006)
- [5] A. Kubasiak, J. Korbicz, J. Zakrzewski, M. Lewenstein, "Fermi-Dirac statistics and the number theory", *EPL* **72**, 506 (2005)
- [6] J. K. Korbicz, M. Lewenstein, "Group theoretical approach to entanglement", *Phys. Rev. A* **74**, 022318 (2006)
- [7] J. K. Korbicz, M. Lewenstein, "Remark on a Group-Theoretical Formalism for Quantum Mechanics and the Quantum-to-Classical Transition", *Found. Phys.* **37**, 879 (2007)
- [8] J. K. Korbicz, A. Osterloh, F. Hulpke, M. Lewenstein, "Statistical-mechanical description of quantum entanglement", *J. Phys. A: Math. Theor.* **41**, 375301 (2008)
- [9] A. Acín, R. Augusiak, D. Cavalcanti, C. Hadley, J. K. Korbicz, M. Lewenstein, Ll. Masanes, M. Piani, "Unified Framework for Correlations

- in Terms of Local Quantum Observables”, Phys. Rev. Lett. **104**, 140404 (2010)
- [10] R. Augusiak, J. Stasińska, C. Hadley, J. K. Korbicz, M. Lewenstein, A. Acín , “Bell inequalities with no quantum violation and unextendible product bases”, Phys. Rev. Lett. **107**, 070401 (2011)
- [11] Ł. Czekaj, J. K. Korbicz, R. W. Chhajlany, P. Horodecki, “Quantum superadditivity in linear optics networks: Sending bits via multiple access Gaussian channels”, Phys. Rev. A **82** (R), 020302 (2010)
- [12] Ł. Czekaj, J. K. Korbicz, R. W. Chhajlany, P. Horodecki , “Schemes of transmission of classical information via quantum channels with many senders: Discrete and continuous variables cases”, Phys. Rev. A **85**, 012316 (2012)
- [13] F. G. S. L. Brandão, P. Źwikliński, M. Horodecki, P. Horodecki, J. K. Korbicz, M. Mozrzykas, “Convergence to equilibrium under a random Hamiltonian“, Phys. Rev. E **86**, 031101 (2012)
- [Joos2003] E. Joos, *et al.*, *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*, Springer, Berlin (2003).
- [Schrödinger1935] E. Schrödinger, Proc. Cambridge Philos. Soc. **31**, 555 (1935).
- [Horodecki2009] R. Horodecki, P. Horodecki, M. Horodecki, and K. Horodecki, Rev. Mod. Phys. **81**, 865 (2009).
- [Doherty2002] A. C. Doherty, Pablo A. Parrilo, and Federico M. Spedalieri, Phys. Rev. Lett. **88**, 187904 (2002).
- [Horodecki2003] M. Horodecki, P. W. Shor, and M. B. Ruskai, Rev. Math. Phys **15**, 629 (2003).
- [Modi2012] K. Modi, A. Brodutch, H. Cable, T. Paterek, and V. Vedral, Rev. Mod. Phys. **84**, 1655 (2012).
- [Zurek2009] W. H. Zurek, Nature Phys. **5**, 181 (2009).
- [Gu1985] Y. Gu, Phys. Rev. A **32**, 1310 (1985).
- [Horodecki1996] M. Horodecki, P. Horodecki, and R. Horodecki, Phys. Lett. A **223**, 1 (1996).

- [Horodecki2002] P. Horodecki, A. Ekert, Phys. Rev. Lett. **89**, 127902(2002).
- [Lewenstein2001] M. Lewenstein, B. Kraus, J. I. Cirac, and P. Horodecki, Phys. Rev. A **62**, 052310 (2000).
- [Horodecki1998] M. Horodecki, P. Horodecki, and R. Horodecki, Phys. Rev. Lett. **80**, 5239 (1998).
- [Barnum1996] H. Barnum, C. M. Caves, C. A. Fuchs, R. Jozsa, and B. Schumacher, Phys. Rev. Lett. **76**, 2818 (1996).
- [Riedel2010] C. J. Riedel and W. H. Zurek, Phys. Rev. Lett. **105**, 020404 (2010).
- [Joos1985] E. Joos and H. D. Zeh, Z. Phys. B - Cond. Matt. **59**, 223 (1985).
- [EPRB1935] A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, Phys. Rev. **47**, 777 (1935); N. Bohr, Phys. Rev. **48**, 696 (1935); H. M. Wiseman, Ann. Phys. **338**, 361 (2013).
- [Ullersma1966] P. Ullersma, Physica **32**, 27 (1966).
- [Blume-Kohout2008] R. Blume-Kohout and W. H. Zurek, Phys. Rev. Lett. **101**, 240405 (2008).
- [Arnowitt1959] R. Arnowitt, S. Deser, C. Misner, Phys. Rev. **116**, 1322 (1959).
- [Pawlowski2009] M. Pawłowski, T. Paterek, D. Kaszlikowski, V. Scarani, A. Winter, and M. Żukowski, Nature **461**, 1101 (2009).
- [Barnum2010] H. Barnum, S. Beigi, S. Boixo, M. B. Elliott, S. Wehner, Phys. Rev. Lett. **104**, 140401 (2010).
- [Czekaj2009] Ł. Czekaj, P. Horodecki, Phys. Rev. Lett. **102**, 110505 (2009).
- [Popescu2006] S. Popescu, A. J. Short, A. Winter, Nature Phys. **2**, 754 (2006).



Gdańsk, 07.11.2016