

Warszawa, 20.12.2022

Dr hab. inż. Remigiusz Augusiak
Centrum Fizyki Teoretycznej PAN
Aleja Lotników 32/46
02-668 Warszawa

**Recenzja osiągnięcia naukowego oraz dorobku naukowego
dr. Kamila Korzekwy
w związku z postępowaniem o nadanie stopnia doktora habilitowanego**

Sylwetka Kandydata

Dr Kamil Korzekwa doktoryzował się w 2016 roku na podstawie rozprawy doktorskiej pt. „*Quantum coherence, thermodynamics and uncertainty relations*” przygotowanej pod kierunkiem prof. T. Rudolpha w Imperial College London. Następnie w latach 2017-2019 odbył staż podoktorski na Uniwersytecie w Sydney w Australii w grupie prof. S. Bartletta. Stamtąd przeniósł się na Uniwersytet Gdański gdzie przez kilka miesięcy realizował kolejny staż podoktorski w grupie prof. P. Horodeckiego, by wreszcie pod koniec 2019 roku osiedlić się w Krakowie, gdzie do teraz prowadzi Grupę Zasobów Kwantowych finansowaną w ramach dużego projektu Team-NET ufundowanego przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej i ulokowaną na Uniwersytecie Jagiellońskim. Przebieg kariery naukowej habilitanta wygląda imponująco. Pobyt w aż pięciu różnych ośrodkach naukowych, przy czym uwzględniłam tutaj również studia na Politechnice Wrocławskiej, w trakcie których realizował już pracę badawczą pod kierunkiem prof. P. Machnikowskiego, w tym kilku bardzo znanych, z całą pewnością miała bardzo pozytywny wpływ na rozwój naukowy habilitanta.

Osiągnięcie habilitacyjne

Przedstawione przez dr. Korzekwę osiągnięcie naukowe pt. „*Optymalizacja przetwarzania informacji kwantowej w obecności więzów*” to bardzo pokaźny cykl aż 15 artykułów naukowych, które zostały opublikowane w latach 2017-2022. Wszystkie prace ukazały się w renomowanych czasopismach naukowych, z czego większość to czasopisma wydawane przez Amerykańskie Towarzystwo Fizyczne: *Physical Review A/E* czy *Physical Review Letters*. Warto tutaj podkreślić, że kilka artykułów pojawiło się w „topowych” czasopismach takich jak wspomniane już *Physical Review Letters*, *Physical Review X* bądź *Quantum*. Praca otwierająca cykl habilitacyjny [H1] to praca samodzielna, z pozostałe są wieloautorskie. Na podstawie załączonych do wniosku oświadczeń habilitanta oraz jego współpracowników jednoznacznie można stwierdzić, że jego wkład w powstanie wszystkich prac był bardzo duży, a w przypadku niektórych prac, jak np. [H3,H6,H13], był on dominujący. Uważam, że osiągnięcie habilitacyjne świadczy o dużej samodzielności naukowej dr. Korzekwy.

Prace wchodzące w skład osiągnięcia dotyczą przetwarzania informacji kwantowej. Jest to obszar fizyki kwantowej, który już od wielu lat jest intensywnie eksplorowany ze względu na ogromny potencjał jaki skrywa się w układach kwantowych, a także w różnych formach korelacji jakie te układy pozwalają wytwarzać. Układy kwantowe pozwalają bowiem uzyskiwać szeroko-rozumianą przewagę nad fizyką klasyczną w wielu zastosowaniach takich jak komunikacja kwantowa, przykładem czego jest analizowane w ramach osiągnięcia gęste kodowanie, ale także np. metrologia kwantowa. Co więcej, użycie wielociałowych skorelowanych układów kwantowych ma przynieść ogromny zysk w postaci znacznego przyspieszenia obliczeń w stosunku do komputerów klasycznych. Z drugiej strony, badanie formalizmu mechaniki kwantowej, jego ograniczeń i możliwości, a także tego jak bardzo odbiega on od formalizmu fizyki klasycznej jest również samo w sobie bardzo ciekawym i ważnym problemem badawczym. Oba te kierunki, zarówno aplikacyjny jak i poznawczy, są rozwijane w pracach dr Korzekwy, przy czym głównymi celami są zrozumienie jak w najbardziej wydajny sposób można przetwarzać informację kwantową w zależności od zadanych warunków, gdzie wydajność definiuje się w różny sposób w zależności od rozważanego problemu, a także wyodrębnienie zastosowań, w których użycie układów kwantowych może prowadzić do uzyskania

RA

przewagi nad układami klasycznymi oraz zrozumienie, które z czystokwantowych zasobów (splątanie, koherencja) za tą przewagę odpowiadają.

Dr Korzekwa w swoim osiągnięciu realizuje powyższe cele w czterech różnych scenariuszach, przy czym owe scenariusze określone są przez różne więzy, które nakłada się na rozpatrywane układy fizyczne, a które mogą mieć różnorakie podłoże; więzami mogą być bowiem zarówno zasady fizyczne jak i też ograniczenia wynikające z braku dostępu do zasobów czy ograniczenia eksperymentalne. W każdym z kierunków habilitant uzyskuje szereg interesujących a zarazem istotnych dla zrozumienia fizyki przetwarzania informacji kwantowej wyników. Powstrzymam się tutaj przed streszczaniem każdego z nich. Zostały one bowiem bardzo dobrze opisane i jednocześnie streszczone w autoreferacie i nie sądzę, abym był w stanie zrobić to lepiej. Ograniczę się tylko do opisanie kilku rezultatów, które przykuły moją uwagę, jednocześnie nakreślając każdy z rozpatrywanych scenariuszy.

1) *Więzy termodynamiczne* ([H1,H4,H5,H6,H12,H14,H15]). Celem było badanie możliwych transformacji układów kwantowych generowanych przez ich oddziaływanie z łaźnią cieplną o ustalonej temperaturze, przy czym rozpatrywane układy składają się ze stosunkowo małej liczby podukładów, przez co standardowy opis termodynamiczny się tutaj nie stosuje. Węzami w tym przypadku są zasada zachowania energii i/lub druga zasada termodynamiki. W pracy [H4] zostały wyznaczone optymalne współczynniki konwersji pomiędzy wieloma kopiami dwóch różnych stanów kwantowych o ustalonej energii dla zadanego błędu transformacji, przy czym optymalność w tym scenariuszu z grubsza oznacza największą liczbę kopii stanu wyjściowego. Następnie przy użyciu uzyskanych formuł przebadano w [H4], czy i w jakich warunkach takie operacje termiczne na skończonej liczbie kopii układu stają się odwracalne. Warto również tutaj wspomnieć, że formalizm z pracy [H4] został następnie zastosowany w [H5] do wyznaczenia optymalnych współczynników konwersji w przypadku transformacji kopii stanów kwantowych przy użyciu np. operacji LOCC. Bardzo ciekawa, również od strony matematycznej, jest praca [H1], w której habilitant bada strukturę termodynamiczną strzałki czasu generowanej przez kanały kwantowe zachowujące stan Gibbsa, co odpowiada zachowaniu drugiej zasady termodynamiki i pokazuje, że w niektórych przypadkach takich dowolne układy dwuwymiarowe struktura ta to krata, która jest pewną formą porządku częściowego. Z drugiej strony dowodzi on również, że w reżimie klasycznym struktura ta zanika, z czego wywodzi bardzo ciekawy wniosek, że za strukturę kraty odpowiedzialne są kwantowe koherencje.

2) *Więzy pamięci* ([H2,H9,H14,H15]). Celem ponownie było badanie transformacji termodynamicznych układów kwantowych oddziałujących z łaźnią cieplną, w sytuacji, gdy owo oddziaływanie odbywa się w sposób markowski (bezpamięciowy). W pracy [H14] wyprowadzono warunek konieczny i wystarczający, sformułowany zresztą przy użyciu wprowadzonego w pracy nowatorskiego pojęcia ciągłej termomajoryzacji, na to, aby dany stan końcowy mógł powstać w wyniku markowskiego procesu termicznego z zadanego stanu początkowego. Co więcej podano również konstrukcję samego procesu, który ten stan końcowy pozwala otrzymać. Druga niezmiernie interesująca praca w tym podcyklu, opublikowana w prestiżowym *Physical Review X*, to [H9]. Dotyczy ona dowolnych procesów markowskich opisywanych równaniem typu GKSL, ale już bez dodatkowych ograniczeń o podłożu termodynamicznym, branych pod uwagę w [H14]. Pokazano w niej, że pewne procesy klasyczne, które wymagają pamięci mogą być symulowane przez markowskie procesy kwantowe. Pozwoliło to autorom pracy [H9] podać kolejny przykład problemu, w którym układy kwantowe pozwalają uzyskać przewagę nad układami klasycznymi.

3) *Więzy symetrii* ([H2,H8,H13]). W tym przypadku głównym zadaniem było zbadanie możliwych procesów pozwalających przetwarzać informację kwantową w przypadku, gdy procesy te spełniają pewne symetrie takie jak niezmienniczość na translacje w czasie czy niezmienniczość na obroty. W pracy [H13] wprowadzono ogólny formalizm pozwalający badać schematy komunikacji kwantowej, w których nadawca koduje informację klasyczną w stanie kwantowym, który następnie jest przesyłany bezstratnie do odbiorcy, przy czym na możliwe kodowania, opisywane kanałami kwantowymi, nałożona są więzy generowane przez grupy symetrii. Kodowanie informacji odbywa się w wtedy w stopniach swobody stanu kwantowego, które nie są niezmiennicze ze względu na działanie tych grup. Choć jest to bardzo ogólny scenariusz komunikacyjny, nałożone więzy pozwalają na uzyskanie wyników analitycznych. W szczególności habilitant wyznaczył ograniczenia na maksymalną liczbę bitów, którą można zakodować w stanie kwantowym o ustalonym wymiarze oraz dla ustalonego średniego prawdopodobieństwa błędnego odekodowania oraz udowodnił, że owa maksymalna liczba jest realizowana przez kodowanie unitarne. Ponadto, w przypadku kodowania informacji w wielu kopiach danego stanu wyznaczył optymalny współczynnik kodowania, który

określa liczbę zakodowanych bitów na jedną kopie stanu. Otrzymane wyniki zostały następnie zastosowane do schematów supergęstego kodowania oraz bezpiecznej komunikacji.

4) *Więzy klasyczości (prace [H3,H7,H10,H11,H13]).* W ostatnim podcyklu osiągnięcia Autor badał transformacje układów kwantowych (nazywane przez Autora koheryfikacjami), które na poziomie klasycznym odtwarzają ten sam proces losowy reprezentowany przez zadaną macierz przejścia. Celem było zrozumienie jak bardzo deterministyczny może być taki proces kwantowy dla zadanego procesu klasycznego, a przez to zrozumienie różnic pomiędzy losowością klasyczną i kwantową. Okazuje się bowiem, że procesy kwantowe odpowiadające klasycznym procesom losowym mogą być w pełni deterministyczne; w takiej sytuacji mamy do czynienia z kanałami unitarnymi. Autor udowodnił w [H3], że koheryfikacje procesów klasycznych są deterministyczne wtedy i tylko wtedy, gdy odpowiadające tym ostatnim macierze przejścia są unistochastyczne. Dla pozostałych macierzy przejścia sformułowano warunki ograniczające możliwe ich koheryfikacje, które następnie dogłębnie przepadano w przypadkach dwu i trójwymiarowych; w przypadku dwuwymiarowym optymalne kanały kwantowe zostały wyznaczone analitycznie dla pewnej dwuparametrowej klasy macierzy przejścia. Powyższy fakt dotyczący macierzy unistochastycznych oraz to, że pojawiają się one w innych zagadnieniach, skłonił autora do przebadania w kolejnej, bardziej zmatematyzowanej pracy [H11] struktury zbioru tych macierzy oraz ich własności, przy czym zajmowano się nieco ogólniejszym zbiorem tzw. macierzy łańcuskowych.

Bardzo wysoko oceniam osiągnięcie habilitacyjne dr. Korzekwy. Uważam, że zawarte w nim prace są bardzo wartościowe dla rozwoju takich obszarów fizyki jak termodynamika kwantowa czy informacja kwantowa. Przedstawione wyniki są mocno nietrywialne i świadczą o tym, że habilitant w swojej działalności naukowej nie boi się trudnych wyzwań. Ponadto, prace używają wyrafinowanych i różnorodnych metod matematycznych co bardzo dobrze świadczy o warsztacie naukowym habilitanta. Warto wreszcie dodać, że liczba przedstawionych wyników jest ogromna, można by nimi bez problemu obdzielić przynajmniej dwie habilitacje, a także to wiele z prac składających się na osiągnięcie habilitacyjne jak np. [H2] czy [H3], zyskało już uznanie środowiska o czym świadczy spora liczba cytowań przez nie zebranych. Na podstawie powyższych faktów jednoznacznie stwierdzam, że wyniki przedstawione w powyższym osiągnięciu habilitacyjnym stanowią bardzo duży wkład dr. Korzekwy w rozwój fizyki i dlatego uważam, że jeden z wymogów ustawowych jest w tym przypadku spełniony.

Na koniec jeszcze dodam, że autoreferat jest bardzo starannie przygotowany; jest to bodaj najlepiej napisany autoreferat habilitacyjny jaki czytałem. Dzięki temu można sprawnie rozeznąć się w działalności naukowej habilitanta bez konieczności zagłębienia do poszczególnych prac.

Całkowity dorobek naukowo-badawczy oraz działalność naukowa w różnych ośrodkach

Całkowity dorobek publikacyjny dr. Korzekwy prezentuje się równie solidnie co omówione powyżej osiągnięcie habilitacyjne i składa się z 27 prac naukowych, z czego 26 zostało opublikowanych w recenzowanych czasopismach fizycznych z listy JCR, a jedna to materiały pokonferencyjne, które ukazały się w *Proceedings of SPIE*. Habilitant publikuje swoje prace w całym szeregu czasopism fizycznych i nie ma sensu ich tutaj wymieniać. Warto jednak podkreślić, że dr Korzekwa regularnie publikuje w najlepszych czasopismach fizycznych takich jak *Physical Review X* (3 prace) i *Physical Review X Quantum* (1 praca) czy *Physical Review Letters* (2 prace). Ponadto, szereg prac zostało wyróżnionych przez edytorów kilku czasopism, w tym także *Physical Review Letters* oraz *Physical Review X*, a co więcej artykuły [H15] (wraz z towarzyszącą mu długą pracą [H14]) oraz [KK10] zostały opatrzone dodatkową notką w *Physics Viewpoints*. To bardzo pozytywnie świadczy o jakości badań prowadzonych przez habilitanta.

Zgodnie z wnioskiem prace dr. Korzekwy zyskały łącznie prawie 700 cytowań, a jego H-index wynosi 10. Liczby te świadczą o dużej rozpoznawalności prac habilitanta, a także poniekąd o wysokiej jakości badań przez niego prowadzonych. Muszę przyznać, że od tej strony wniosek habilitacyjny dr. Korzekwy zdecydowanie wyróżnia się na tle wszystkich wniosków habilitacyjnych jakie widziałem i recenzowałem.

Pozostałe elementy dorobku naukowego habilitanta również prezentują się bardzo dobrze. Jest on bardzo aktywny pod kątem rozpowszechniania swoich wyników naukowych na międzynarodowych konferencjach naukowych, a na wielu z nich występuje jako mówca zaproszony. Habilitant pełni często rolę recenzenta dla wielu czasopism naukowych, uwzględniając również te najbardziej prestiżowe jak *Nature Physics* czy

Physical Review Letters, co również świadczy „na plus” o rozpoznawalności habilitanta w środowisku naukowym. Dr. Korzekwa prowadzi również własną grupę badawczą na Uniwersytecie Jagiellońskim w ramach dużego projektu Team-NET, która składa się z aż trzech stażystów podoktorskich oraz jednego doktoranta. Należy wreszcie wspomnieć, że pełni on funkcję promotora pomocniczego w dwóch postępowaniach doktorskich, przy czym jak rozumiem przynajmniej w jednym z nich jest de facto głównym promotorem. Oba te fakty dobrze świadczą o samodzielności naukowej habilitanta.

Może jako słabszą stronę dorobku naukowego wymienilibym tutaj brak grantów kierowanych przez habilitanta, choć rozumiem, że ani jako stażysta podoktorski ani teraz jako kierownik grupy w ramach projektu Team-NET o takie granty nie musiał albo i nawet nie mógł występować. Z drugiej strony warto podkreślić, że otrzymał on wiele stypendiów naukowych takich jak *Stypendium MEiN dla wybitnych młodych naukowców* uzyskane w 2020 roku.

Powyższe fakty wzmacniają sformułowaną już przeze mnie w poprzedniej części recenzji konkluzję, że działalność naukowa dr Korzekwy ma znaczący wpływ na rozwój fizyki i spełnia jeden z wymogów ustawowych dotyczących nadawania stopnia naukowego doktora habilitowanego.

Jeśli chodzi o kolejny warunek ustawowy, który na habilitanta nakłada konieczność wykazania „się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej”, to dr Korzekwa spełnia go z całą pewnością, i to z naddatkiem. Otóż dr Korzekwa swoją działalność naukową realizował w aż pięciu instytucjach naukowych (trzy w Polsce i dwie poza Polską) i w każdej z nich wygenerował pokaźny zbiór publikacji naukowych. Jeszcze jako student Politechniki Wrocławskiej dr Korzekwa był współautorem aż pięciu prac naukowych, co jest swoją drogą bardzo rzadkim zjawiskiem. Ponadto, prace wchodzące w skład cyklu habilitacyjnego powstawały w aż czterech instytucjach, np. na Uniwersytecie Jagiellońskim oraz Uniwersytecie w Sydney w Australii.

Konkluzja

Podsumowując, uważam, że dr. Kamil Korzekwa jest już w pełni ukształtowanym i samodzielnym, choć wciąż jeszcze młodym, naukowcem i z całą mocą rekomenduję Radzie Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Jagiellońskiego nadanie mu stopnia doktora habilitowanego. Dodam jeszcze, że bardzo dobrze się stało, że badacz z takimi umiejętnościami i doświadczeniem zdecydował się prowadzić, przynajmniej przez pewien czas, badania w Polsce.

Remigiusz Auguśnik