



dr hab. Łukasz Cywiński, prof. IF PAN  
Instytut Fizyki PAN  
Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

18 stycznia 2024 r.

## **Ocena osiągnięcia naukowego i dorobku Pana dr Waldemara Jarosława Kłobusa w związku z postępowaniem o nadanie stopnia doktora habilitowanego**

**Sylwetka naukowa habilitanta i ogólne omówienie osiągnięcia naukowego oraz udokumentowania wkładu habilitanta w prace składające się na osiągnięcie**

Dr Waldemar Kłobus uzyskał stopień doktora nauk fizycznych w lipcu 2014 roku na Wydziale Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, broniąc rozprawę p.t. „Wybrane własności korelacji w mechanice kwantowej i ogólnych teoriach probabilistycznych”, której promotorem był prof. dr hab. Andrzej Grudka. Od końca 2014 r. do grudnia 2016 r. odbywał staż podoktorski na tym samym uniwersytecie, będąc wykonawcą w grantie ERC Advanced Grant QOLAPS. W latach 2018-2021 odbył trzyletni staż podoktorski na Uniwersytecie Gdańskim, będąc tam wykonawcą w grantie NCN Beethoven kierowanym przez prof. dr hab. Wiesława Laskowskiego. Od lutego 2021 roku jest zatrudniony jako adiunkt na Uniwersytecie Gdańskim.

Dziedziną badań dr Kłobus jest teoretyczna informatyka kwantowa. Jego zainteresowania od czasu pracy nad doktoratem krążą wokół splątania układów dwu- i wielo-częściowych, silnie odzwierciedlając dominujące kierunki badań kwantowo-informatycznych w obu ośrodkach naukowych w których dr Kłobus pracował. Podczas staży podoktorskich na UAM w Poznaniu i na UG dr Kłobus współpracował z wieloma bardzo dobrze znanymi w informatyce kwantowej naukowcami pracującymi w Polsce i za granicą.

Jako osiągnięcie habilitacyjne dr Waldemar Kłobus przedstawił cykl powiązanych tematycznie publikacji naukowych p.t. „Analiza układów złożonych i wpływu nieklasycznych korelacji na ich własności”. Elementem wiążącym te publikacje jest analiza różnych aspektów korelacji układów kwantowych składających się z więcej niż dwóch części, tak zwanych „multipartite systems”. Na cykl ten składa się siedem prac opublikowanych w bardzo dobrych lub dobrych czasopismach naukowych: trzy w Phys. Rev. A, oraz po jednej w Phys.

Rev. E, New Journal of Physics, The European Physical Journal D, oraz Foundations of Physics. Wszystkie prace są wieloautorskie. W sześciu z nich dr Kłobus jest pierwszym autorem, a w jednej z nich jest drugim. W przypadku sześciu z siedmiu prac lektura deklaracji wszystkich autorów pozwala wskazać dr Waldemara Kłobusa jako autora o największym (choć nie we wszystkich silnie dominującym, np. wynoszącym wyraźnie ponad 50%) wkładzie. W pracy [H7] analiza deklaracji sugeruje, iż to raczej drugi autor, dr hab. Paweł Kurzyński, miał wiodący wkład, zaś trzech z pozostałych autorów miało znaczące wkłady w obliczenia analityczne i numeryczne, które wydają się mi porównywalne z zadeklarowanym wkładem dr. Kłobusa. Być może wrażenie to wynika z różnych podejść do samooceny własnej pracy – dr Kłobus wydaje mi się w swoich deklaracjach być bardzo precyzyjnym i ostrożnym, zaś badania opisane w pracy [H7] ewidentnie silnie zaangażowały wszystkich jej współautorów. Dołączenie tej pracy do cyklu uważam za niekoniecznie potrzebne (również ze względu na mniejsze niż w większości pozostałych prac znaczenie w niej analizy korelacji międzyproduktowych), choć z drugiej strony tematycznie wzbogacające osiągnięcie i podkreślające szeroki zakres zainteresowań dr. Kłobusa.

Prace składające się na cykl zostały opublikowane w latach 2016-2022 i zostały dotąd zacytowane wg. Web of Science 21 razy (18 razy bez autocytowań). Dane te świadczą o dość dobrym przyjęciu tych artykułów przez środowisko.

Elementem tematycznie spinającym cykl prac są kwantowe korelacje więcej niż dwóch układów. Choć niektóre ze stosowanych teoretycznych narzędzi lub koncepcji pojawiają się w podzbiorach prac, cykl ma raczej charakter zbioru artykułów na dość różne tematy, które w ostatnich latach były obiektami zainteresowania informatyków kwantowych skupiających się na kwantowych korelacjach. Należy więc docenić różnorodność zainteresowań dr. Kłobusa w ramach tej tematyki, oraz umiejętność współpracy z wieloma naukowcami, choć drugą stroną medalu w przypadku takiego podejścia jest mniej wyraźne odcisnięcie własnego „piętna” na prowadzonych badaniach. Trudniej też pracując w taki sposób znaleźć wyraźnie własny kierunek badań. Pewien niedosyt, który odczułem czytając Autoreferat, w którym brakowało mi szerszego opisu stanu wiedzy w dziedzinie, i dokładnego umiejscowienia cyklu prac w kontekście kluczowych pytań pozostałych do rozwiązania w badaniach nad wieloczęściowymi układami, potęguje wrażenie, iż osiągnięcie naukowe to zbiór prac ciekawych, ale nie do końca pokazujących osiągnięcie pełniej samodzielności naukowej. Przedstawiony cykl prac jest jednakże osiągnięciem naukowym o wystarczająco znaczącym wkładzie w rozwój dyscypliny aby uznać, iż całkowicie spełnia ono ustawowe i zwyczajowe warunki.

### **Szczegółowe omówienie osiągnięcia naukowego**

Praca [H1] poświęcona jest zbadaniu tego, w jaki stopniu złamanie relacji monogamii w trójczęściowym układzie pozwala na stworzenie kanału komunikacyjnego przez który można

przesyłać klasyczną informację pomiędzy częściami układu. W pracy [H2] pokazano, jak istnienie „nieoznaczoności pomiarowej” (tzn. cechy mechaniki kwantowej powodująca, iż pomiaru jednej obserwabli zazwyczaj zaburza statystyki wyników pomiaru innej obserwabli) może zostać wyprowadzone jedynie z zasady niesygnalizowania, oraz z nielokalności bellowskiej. Chciałbym zauważyć, iż dla rozważań opisanych w pracy kluczowe są korelacje w układzie składającym się z dwóch części, zaś trzeci układ, sprzężony do jednego z tych dwóch układów, pełni raczej rolę pomocniczą, i korelacje trój-układowe nie są tu głównym obiektem badań. Praca ta przez to słabiej niż pozostałe wpisuje się więc w tematykę kwantowych korelacji wielo-układowych – ale wspólnie z [H1] tworzy podgrupę artykułów dotyczących bardzo ciekawej i koncepcyjnie nietrywialnej tematyki: badania wzajemnych relacji pomiędzy różnymi cechami, które ma mechanika kwantowa (ale rozważając opis rzeczywistości niekoniecznie tożsamy z mechaniką kwantową), oraz sprawdzania skutków usunięcia pewnych cech z listy definiującej mechanikę kwantową.

W pracy [H3] opisano nową teorio-informacyjną wielkość, zwaną „współzależnością” (ang. „dependence”) charakteryzującą wzajemne korelacje kwantowych układów składających się z  $N > 2$  części. Określona jest jako „informacyjny zysk, który w wyniku kooperacji uzyskuje grupa osób współdzieląca układ wielocząstkowy względem innego skorelowanego z nimi układu”. Niezerowa współzależność oznacza, iż w układzie składającym się z trzech podukładów, wspólne pomiary na dwóch podukładach pozwalają dowiedzieć się czegoś o stanie trzeciego podukładu. Pokazano, iż współzależność jest wielkością różną od splątania: w pewnych przypadkach współzależność może być świadkiem splątania, ale istnieją też prawdziwie stany prawdziwie wieloczęściowo splątane z zerową współzależnością. Warto jest podkreślić, iż w przeciwieństwo do miar splątania, współzależność jest relatywnie łatwa do obliczenia.

W pracy [H4] badano tzw. tensor korelacji wieloczęściowego układu kwantowego, i uzyskano ciekawy wynik: pokazano, że istnieją prawdziwie wieloczęściowo splątane mieszane stany  $N$  podukładów o wymiarze większym niż dwa, dla których znikają  $N$ -cząstkowe elementy tensora korelacji. Takie stany były wcześniej znane tylko dla układów  $N$  kubitów. Konstrukcja tych stanów dla kuditów ( $d$ -wymiarowych układów z  $d > 2$ ) opisana w tej pracy nie jest prostym uogólnieniem konstrukcji stanów  $N$ -kubitowych.

W pracy [H5] badano zagadnienia związane z mieszanymi stanami absolutnie maksymalnie splątanymi  $N$  kubitów (dla  $N$  od 2 do 7), koncentrując się na tzw.  $k$ -jednorodnych stanach (czyli takich, dla których po wysładowaniu po  $N-k$  podukładach otrzymujemy całkowicie zmieszany stan  $k$  podukładów). Dla  $N$  dla których nie istnieje czysty stan  $k$ -jednorodny, skonstruowano mieszane stany  $k$ -jednorodne o największej możliwej czystości i pokazano, że mają one mocno nieklasyczne własności, takie jak prawdziwie wieloukładowe splątanie.

W artykule [H6] pokazano, iż można scharakteryzować (do pewnego stopnia) splątanie dwóch układów o ciągłych zmiennych poprzez sprzężenie ich w odpowiedni sposób z dwoma kubitami (rezultatem czego jest transfer kwantowych korelacji do układu dwóch kubitów) i następnie analizę splątania tych kubitów. Warto jest podkreślenia, iż spośród wszystkich prac składających się na osiągnięcie ta jest najbliższa doświadczalnej fizyce kwantowej: zawiera ona dyskusję tego, w jakich realistycznych układach można by opisaną w niej charakteryzację splątania przeprowadzić doświadczalnie.

W ostatniej w cyklu pracy [H7] przeanalizowano dynamikę kubitów, który oddziałuje z wieloma innymi kubitami, a wszystkie z nich poddane są periodycznie wymuszonym obrotom, tzn. każdy z nich jest „uderzonym rotatorem”. Dodatkowo, wszystkie kubity poddane są dekoherencji opisanej przez kanał tłumiący amplitudę. Po wyśladowaniu  $N-1$  kubitów, dynamika jednego z nich jest chaotyczna (co nie jest zaskakujące), ale głównym wynikiem pracy jest to, iż uzyskana chaotyczna dynamika zredukowanego układu kwantowego jest dobrze opisana klasycznym scenariuszem Feigenbauma – tak więc dekoherencja (która na pewno jest konieczna), oraz oddziaływanie między wieloma podukładami (którego konieczność jest dla mnie mniej jasna) sprawiają, iż dynamika jednego kubitów jest bardzo bliska klasycznemu zachowaniu chaotycznych układów. Należy jednak zauważyć, iż zarówno podsumowanie wyników podane w pracy, jak i jej omówienie w autoreferacie, wyraźnie sugerują, iż uzyskane wyniki nie pozwalają na wyciągnięcie bardzo silnych wniosków: pracę można podsumować jako zawierająca analizę dynamiki w pewnym układzie i zauważenie, iż jest ona bliższa zachowaniu klasycznym modeli chaotycznych niż dynamika uzyskana np. dla pojedynczego uderzanego rotatora.

### **Prezentacja osiągnięcia oraz powiązania tematycznego wskazanego cyklu prac, w autoreferacie**

Autoreferat zawiera bardzo technicznie szczegółowe omówienia wyników wszystkich prac. Napisanie rozdziałów podsumowujących każdą pracę oddzielnie musiało wiązać się z dużym nakładem pracy, której część niestety okazała się być, według mnie, niepotrzebną. Ogólny cel i znaczące wyniki każdej z prac uległy „rozwodnieniu” w szczegółowych opisach, a przejście odpowiedniego artykułu [H1-H7] bardzo często pozwalało na łatwiejsze zrozumienie kontekstu pracy, jej głównych celów, i wyników. Bardziej syntetyczne omówienia prac we wstępnym rozdziale, zatytułowanym dość niefortunnie „Podsumowanie”, o wiele lepiej spełniały rolę, jaką powinien pełnić autoreferat. Zgodnie z zaleceniami Rady Doskonałości Naukowej wykazanie powiązania tematycznego wskazanego cyklu publikacji powinno być ważnym elementem autoreferatu. Odczuwam tutaj pewien niedosyt: elementem łączącym przedstawione prace jest znaczenie w każdej z nich korelacji między więcej niż dwoma kwantowymi podukładami, i przeczytanie autoreferatu nie prowadzi do pogłębionego zrozumienia powiązania tematycznego. Wydaje mi się, iż poświęcenie więcej miejsca „state

of the art” rozumienia korelacji wielo-układowych, i umieszczenie prac w jego kontekście, dałoby bardziej satysfakcjonujący czytelnika wynik.

Mam jedną, dość poważną, uwagę do języka użytego w pracy, i do fizycznie błędnych twierdzeń implikowanych przez ten język. O ile w oryginalnych pracach zawsze jest mowa „multipartite entanglement/correlations/etc”, w autoreferacie nieustannie pojawia się termin „wielocząstkowe” – ale „multipartite” to „wieloczęściowe” lub „wieloukładowe”! Dr Kłobus zajmuje się korelacjami „wieloukładowymi” w standardowym w informatyce kwantowej ujęciu: analizuje wiele układów, z których każdy ma swoją przestrzeń Hilberta, a przestrzeń Hilberta całości to iloczyn tensorowy przestrzeni poszczególnych układów. Układy te nie muszą być pojedynczymi cząstkami – i najczęściej nie są. Większość kubitów to układy wielo-cząstkowe (w przypadku kubitów nadprzewodzących to makroskopowe układy prawie widoczne gołym okiem!), które mają dwustanową podprzestrzeń, w której łatwo jest zainicjalizować stan czysty i unitarnie przekształcać go nie wychodząc poza tę podprzestrzeń. W wersji angielskiej autoreferatu nie spotykamy terminu „multiparticle” (tylko poprawny „multipartite”), ale w wielu miejscach napotykamy na stwierdzenia zawierające słowo „particle” tam, gdzie powinien być „układ/podukład” czy „kubit/kudit”, np. „Pure AME states of N particles constitute a multipartite generalization of the concept of maximally entangled states”. Chciałem podkreślić, iż kwestie związane z „multiparticle entanglement” („splątaniem cząstkowym”, które w ogólności jest czymś innym od „splątania modowego”) w przypadku nieodróżnialnych cząstek stanowią odrębną poddziedzinę badań, w której w ostatnich latach wiele się działo. Nie jestem pewien, czy mamy tu do czynienia z dużą nieostrożnością terminologiczną, czy też z niewiedzą na temat różnic pomiędzy fizyką wielu układów w kontekście informatyki kwantowej (iloczyn tensorowy podprzestrzeni), a fizyką układów wielu cząstek („many-body physics”). Ta druga możliwość jest dość dziwna w świetle tego, iż habilitant zajmował się też teorią układów wielu cząstek, a dokładniej modelami układów silnie skorelowanych fermionów.

### **Ocena pozostałej działalności naukowej, dydaktycznej, oraz popularyzatorskiej**

Dr Kłobus jest współautorem 24 artykułów, które dotąd uzyskały wg. Web of Science 300 cytowań (285 bez autocytowań, czyli tzw współczynnik samouwielbienia na poziomie 5% nie budzi żadnych zastrzeżeń), a jego czynnik Hirscha wynosi 10. Są to co najmniej dobre wyniki dla osoby, która zaczęła publikować w 2011 r. Spośród artykułów opublikowanych po uzyskaniu przez Waldemara Kłobusa stopnia doktora nauk fizycznych sześć nie weszło w skład osiągnięcia habilitacyjnego. Cztery z tych prac dotyczyły informatyki kwantowej, a dwie teorii wielodziałowych układów silnie skorelowanych. W tym okresie dr Kłobus wygłosił 12 prezentacji konferencyjnych oraz dwa seminaria.

Dr Kłobus od czasu rozpoczęcia pracy jako adiunkt na Uniwersytecie Gdańskim prowadzi bardzo różnorodne zajęcia dydaktyczne w wymaganym na uczelni wymiarze godzinowym. W 2022 roku było promotorem pomocniczym doktoratu. W ostatnich latach wygłosił dwa wykłady popularyzujące w Liceum Akademii Dobrej Edukacji w Gdańsku.

Habilitant nie kierował dotychczas żadnym grantem. Wydaje mi się, iż aplikowanie o własny grant byłoby dobrem bodźcem do wyraźniejszego zdefiniowania w pełni własnej ścieżki naukowej.

Dr Kłobus w 2019 r. odbył miesięczny staż naukowy w Nanyang Technological University w Singapurze, oraz dwie tygodniowe wizyty: na Uniwersytecie Ludwika Maksymiliana w Monachium, w grupie prof. Haralda Weinfurtera i w Instytucie Badań Jądrowych Węgierskiej Akademii Nauk w Debreczynie na zaproszenie dr. Tamasa Vertesi. Można podejrzewać, że pandemia uniemożliwiła więcej wizyt w Monachium, i współpraca z grupą prof. Weinfurtera w ramach grantu Beethoven musiała odbywać się w sposób zdalny.

Powyżej opisaną działalność naukową, dydaktyczną, i popularyzatorską dr. Kłobusa oceniam jednoznacznie pozytywnie.

#### **Podsumowanie**

Osiągnięcia naukowe stanowiące podstawę habilitacji dr Waldemara Kłobusa oraz jego pozostałe dokonania naukowe wypełniają ustawowe i zwyczajowe wymagania. Popieram wniosek o nadanie dr Waldemarowi Kłobusowi stopnia doktora habilitowanego.



dr hab. Łukasz Cywiński, prof. IF PAN