



UNIwersytet
Warszawski

dr hab. Magdalena Stobińska
Instytut Fizyki Teoretycznej
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa

Warszawa, 14 sierpnia 2021 r.

Recenzja w postępowaniu w sprawie nadania dr Anie Belén Sainz stopnia doktora habilitowanego

Pani dr Ana Belén Sainz jest absolwentką Universidad Nacional de Córdoba (Córdoba, Argentyna) oraz ICFO – Institut de Ciències Fotòniques (ang. Institute of Photonic Sciences, Barcelona, Hiszpania). Stopień doktora uzyskała w 2014 roku broniąc rozprawę pt. *Characterizing and witnessing multipartite correlations: from non-locality to contextuality*, której promotorem był prof. Antonio Acín. Rozprawa ta została wyróżniona (cum laude) nagrodą pierwszej klasy. Po uzyskaniu doktoratu odbyła staż podoktorski, najpierw 3-miesięczny w grupie Kwantowej Teorii Informacji kierowanej przez prof. Antonio Acína, następnie 2-letni w grupie Kwantowej Teorii Informacji prof. Sandu Popescu (Bristol, Wielka Brytania), oraz 3-letni w zespole Fundamentów Teorii Kwantowej w Perimeter Institute for Theoretical Physics (Waterloo, Kanada). Od czerwca 2019 do chwili obecnej jest zatrudniona jako adiunkt w Międzynarodowym Centrum Teorii Technologii Kwantowych na Uniwersytecie Gdańskim, gdzie pełni funkcję Kierownika Grupy Fundamentalnych Podstaw Technologii Kwantowych.

Podstawą wniosku o przyznanie dr Anie Belén Sainz stopnia doktora habilitowanego jest cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych pt. *Teoretyczne podstawy możliwości i ograniczeń nieklasycznych zjawisk kwantowego przetwarzania informacji* (ang. *Theoretical foundations of the possibilities and limitations of nonclassical phenomena for quantum information processing*). Składa się na niego 12 publikacji z lat 2015-2020 opublikowanych w czasopiśmie: Physical Review Letters (3 publikacje), Quantum (3 publikacje), New Journal of Physics (2 publikacje) oraz Physical Review A (4 publikacje). Są to prace wieloautorские. W sześciu z nich pani dr Sainz była głównym, pierwszym autorem. Do autoreferatu pani dr Sainz dołączono deklaracje dotyczące wkładu współautorów, natomiast wkład habilitantki opisano w sekcji I.2. wykazu osiągnięć. Według nich, pani dr Ana Belén Sainz odegrała istotną rolę w inicjowaniu i prowadzeniu badań oraz kierowaniu pracami badawczymi i przygotowaniu wszystkich aspektów wymienionych publikacji. Cykl publikacji został uzupełniony 32-stronicowym przewodnikiem znajdującym się w sekcji 5 autoreferatu.

Dorobek naukowy

Zainteresowania badawcze pani dr Sainz dotyczą dziedziny fizyki kwantowej – informacji kwantowej. W szczególności prace habilitantki dokumentują ciąg jednolitych tematycznie teoretycznych badań nad korelacjami kwantowymi, kontekstualnością, nielokalnością Bella oraz kwantowym sterowaniem. Są to badania podstawowe, które istotnie przyczyniają się do zbadania możliwości i zakresów stosowania różnych kwantowych układów fizycznych w technologiach kwantowych, takich jak np. kwantowa komunikacja, czy obliczenia kwantowe.

W swojej pracy naukowej, pani dr Sainz zadaje bardzo ciekawe pytania i stawia ambitne hipotezy badawcze. Jej główna motywacja do badań wynika z tego, że o ile niezgodność statystyki kwantowej z klasycznymi strukturami przyczynowymi jest dobrze poznana np. w kontekście eksperymentu Bella, niewiele wiadomo na temat scenariuszy bardziej ogólnych, które wykraczałyby poza teorię kwantową. W szczególności wiadomo, że teoria kwantowa ma pewne ograniczone zakresy stosowania, z których wynika ograniczona efektywność kwantowych metod przetwarzania informacji, a więc także zbudowanych na ich podstawie technologii kwantowych. Poznanie natury tych ograniczeń pozwoliłoby na lepsze wykorzystanie rozmaitych układów fizycznych w zastosowaniach praktycznych.

Drugim powodem, który motywuję habilitantkę do badania tej dziedziny jest odpowiedź na pytanie, czy teoria kwantowa jest ostateczną i poprawną teorią opisującą naturę zjawisk fizycznych, nie tylko w skali mikroświata. Wprowadza nowe pojęcie korelacji postkwantowych, które są matematycznie możliwe, ale nie mogą istnieć w ramach teorii kwantowej. Mogłyby one pomóc zrozumieć naturę niektórych zjawisk, które są obserwowane w świecie rzeczywistym. Jest to nowatorskie podejście, które pozwoliło na rozwinięcie przez dr Sainz kilku ciekawych i nowoczesnych linii badań z pogranicza fizyki, matematyki i informatyki, wykorzystujących rozmaite metody analityczne i numeryczne.

W badaniach realizowanych przez dr Anę Belén Sainz można wyróżnić kilka głównych nurtów, które przeplatają się. Pierwszy obejmuje badanie kwantowego sterowania. Kwantowe sterowanie pozwala na analizowanie nieklasycznych korelacji w kontekście innych założeń niż test Bella. Wynikają z tego także inne wnioski i scenariusze kryptograficzne, które mogą być łatwiejsze w praktycznej realizacji eksperymentalnej. Problemem, który dotychczas ograniczał rozwój tej dziedziny, był jednak brak systematycznego podejścia. Habilitantka zaproponowała, aby kwantowe sterowanie scharakteryzować ilościowo na podstawie tego, ile klasycznej informacji muszą wymienić Alicja i Bob w celu zasymulowania kwantowego układu za pomocą klasycznych zasobów. W tym celu wyprowadziła ścisłe formuły dla dolnych granic kosztu komunikacyjnego, także z uwzględnieniem wydajności (błędów i strat). Następnie przeanalizowała możliwości certyfikowania sterowalności takiego układu. W tym celu typowo wyprowadza się nierówność, podobnie jak w przypadku testu Bella, jednak wymaga ona uwzględnienia niedoskonałości eksperymentalnych. Dr Sainz wyprowadziła taką nierówność i pokazała, jak modyfikować ją dla przypadku luki detekcyjnej, obejmującej także straty. Metoda taka pozwala na badanie zakresów stosowania nierówności sterowania. Habilitantka zbadała pewną rodzinę nierówności i możliwość zastosowania ich w scenariuszach wielostronnych. Dodatkowo zaproponowała modyfikację scenariuszy Bella tak, aby mogły certyfikować nielokalność w sposób wolny od takiej luki detekcyjnej.

Następnie dr Ana Belén Sainz przeszła do badania sterowania postkwantowego. Postawiła problem badawczy, którym była odpowiedź na następujące pytanie: czy mając dowolny niesygnalizujący układ sterowany można znaleźć dla niego kwantową realizację? Dr Sainz odpowiedziała na nie pozytywnie i pokazała możliwość istnienia sterowania poza obszarem teorii kwantowej. Wymagało to jednak wyjścia poza scenariusz sterowania dwustronnego. Wynikły z tego nowe wielostronne oraz uogólnione dwustronne scenariusze sterowania, zgodne z zasadą niesygnalizowania, ale niemożliwe do realizacji z użyciem zasobów kwantowych. W celu ich zbadania, habilitantka stworzyła nowy formalizm matematyczny, który ujednotacza opis sterowania postkwantowego i kwantowego oraz wiąże sterowanie kwantowe z przyczynowymi kanałami kwantowymi. Z tych prac wynikło także odkrycie nowych rodzin układów sterowalnych. Zdefiniowano np. zespoły sterowane PTP dla map dodatnio zachowujących ślad (ang. *positive-trace preserving assemblages*, *PTP assemblages*), a nawet podano przykłady takich map. Takie zespoły PTP nie wykazują postkwantowej nieklasyczności Bella. Zdefiniowano także ujemność sterowania, która jest miarą postkwantowego sterowania. Pokazano, że różne rodzaje sterowania kwantowego i postkwantowego są bezpośrednio związane z określonymi rodzajami kanałów kwantowych wcześniej znanych w literaturze.

Dr Sainz wykonała także szereg dodatkowych prac w tym nurcie. Przykładowo, zdefiniowała postkwantową nielokalność Buscemi i postkwantową nieklasyczną teleportację, a także pojęcie kanałów prawie lokalizowalnych. Pokazała możliwość konstruowania nowych układów sterowania postkwantowego. Podjęła także próby tworzenia metod certyfikacji dla układów postkwantowych. Badane przez nią formy postkwantowej nieklasyczności są nowe, dlatego habilitantka podjęła próbę znalezienia występujących między nimi zależności.

Kolejny ważny nurt badań dr Any Belén Sainz dotyczy statystycznych przewidywań, które występują w testach Bella, oraz eksperymentów z kontekstualnością. Jej celem była odpowiedź na pytanie, jak należy charakteryzować korelacje kwantowe na podstawie jak najprostszych zasad, a także zbadanie korelacji prawie kwantowych i odróżnienie ich od kwantowych. Dr Sainz zauważyła, że scenariusz testu Bella jest szczególnym przypadkiem uogólnionej sieci bayesowskiej. Takie sieci były już wcześniej przedmiotem badań w informatyce i statystyce, gdzie służą do badania wnioskowania przyczynowego. Niedawne prace w tym nurcie pokazują lukę pomiędzy statystykami dozwolonymi klasycznie oraz kwantowo. Nie wiadomo przy tym, czy istnieje prostszy scenariusz niż scenariusz Bella, który wykazuje taką lukę i jakie są tego konsekwencje. Jak dotąd inne scenariusze poza testem Bella były słabo zbadane. W celu ich analizy, pani dr Sainz stworzyła nową zasadę makroskopowej niekontekstualności. Pokazała, że związek pomiędzy zbiorem korelacji prawie kwantowych a zbiorem korelacji opisanych hierarchią Navascués–Pironio–Acín (NPA) jest bardziej złożony niż to co sugerują ich relacje w testach z dwoma obserwatorami. Należy więc zbadać układy, w których np. występują testy z większą liczbą obserwatorów. Jest to ciekawe podejście, polegające na badaniu teorii kwantowej „z zewnątrz”, w celu zaproponowania układów i eksperymentów wykraczających poza tradycyjne schematy Bella i kontekstualne.

Habilitantka zaproponowała także nowe podejście do badania korelacji kwantowych, z wykorzystaniem teorii zasobów. Przykładami takich zasobów mogą być splątanie, niegaussowskość, wiedza, koherencja, kontekstualność czy nielokalność Bella. Istotną cechą tego podejścia jest to, że zasoby można opisać wspólną teorią i wzajemnie przekształcać. Przykładowo, gdy zostanie opracowana teoria zasobów dla nielokalności Bella, można określić precyzyjnie które korelacje są bardziej klasyczne niż inne i wyrazić ilościowo nieklasyczność. Prace te przyczyniły się także do zdefiniowania pojęcia sterowania jako zasobu oraz zrozumienia prawie-kwantowych korelacji.

Pani dr Sainz opracowała teorię zasobów dla korelacji w scenariuszu Bella. Efektem jest odkrycie różnych własności porządkowania zasobów w tym scenariuszu. Przeprowadzone przez nią eksperymenty numeryczne pokazały, że potrzeba do tego co najmniej osiem monotoni, co dotąd nie było znane w literaturze. Habilitantka odkryła także, że istnieją nieskończone zbiory nieporównywalnych zasobów ograniczonych do korelacji kwantowych, dla których nie istnieją stany maksymalnie splątane. Nowa technika wykorzystująca teorię zasobów może być użyta do analizy struktur przyczynowych niezwiązanych ze scenariuszami Bella.

W swojej pracy habilitantka zwraca dużą uwagę na praktyczne znaczenie opracowanej teorii dla technologii kwantowych oraz stosuje nowoczesne, interdyscyplinarne metody badawcze. W cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych pt. *Teoretyczne podstawy możliwości i ograniczeń nieklasycznych zjawisk kwantowego przetwarzania informacji*, pani dr Ana Belén Sainz zaprezentowała nowe spojrzenie, które pozwoliło na usystematyzowanie wiedzy np. w zakresie kwantowego sterowania, opracowanie nowych miar i znalezienie nieznanych dotąd powiązań pomiędzy różnymi rodzajami zasobów kwantowych.

Publikacje, o których mowa powyżej, to nie jest cały dorobek naukowy dr Any Belén Sainz. Do chwili uzyskania stopnia doktora, habilitantka była już współautorem 5 artykułów w recenzowanych czasopismach naukowych oraz artykułu opublikowanego w materiałach konferencyjnych. Natomiast od roku 2014, w którym obroniła rozprawę doktorską, oprócz wymienionych 12 publikacji składających

się na cykl, opublikowała jeszcze 7 innych prac i artykuł konferencyjny. Łącznie jest więc autorem 26 publikacji. Ponadto, jest aktywnym członkiem społeczności naukowej i bierze udział w konferencjach. Po uzyskaniu doktoratu wygłosiła 33 referaty na konferencjach naukowych, w tym 24 na zaproszenie oraz 12 seminariów w jednostkach naukowych. Do chwili uzyskania stopnia doktora było to 5 referatów konferencyjnych i 5 seminariów na zaproszenie instytucji.

Dorobek pani dr Any Belén Sainz został doceniony przez środowisko międzynarodowe, co jest odzwierciedlone w wysokiej liczbie cytowań jej publikacji – 427 według bazy Web of Science.

Działalność dydaktyczna i organizacyjna

Dr Ana Belén Sainz jest aktywna w zdobywaniu środków finansowych na badania i ma duże doświadczenie w pracy w międzynarodowych projektach badawczych. Dotychczas była kierownikiem czterech projektów a w kolejnych czterech pracowała jako wykonawca. Należy przede wszystkim zwrócić uwagę na kierowane przez nią ostatnie projekty: grant Narodowego Centrum Nauki „Miniatura” oraz dwa małe i jeden duży grant amerykańskiego Foundational Questions Institute (FQXi). Wcześniej była wykonawcą w kilku grantach Europejskiej Rady ds. Badań Naukowych (ERC) oraz stypendystką stypendium doktorskiego w Hiszpanii i stypendium podoktorskiego w Perimeter Institute. Obecnie jest wykonawcą i Kierownikiem Grupy w programie Międzynarodowych Agend Badawczych Fundacji na rzecz Nauki Polskiej, a także stypendystką 3-letniego Stypendium dla Wybitnych Młodych Naukowców Ministerstwa Edukacji i Nauki.

Imponujący jest dorobek dr Any Belén Sainz w zakresie organizacji konferencji i seminariów naukowych dotyczących tematyki kwantowej informacji. W ciągu swojej dotychczasowej kariery naukowej współorganizowała 7 konferencji, które odbyły się w latach 2012-2020, w tym 5 po uzyskaniu stopnia doktora. Dwie z nich odbyły się w ICFO w Hiszpanii, trzy z nich miały miejsce w Kanadzie, w Perimeter Institute, jedna w Brazylii oraz jedna, online, na Uniwersytecie Gdańskim w 2020 r. W ramach tych działań była aktywnym członkiem Komitetów i była odpowiedzialna za różne aspekty konferencji, od wyboru miejsca, poprzez rozpowszechnianie informacji, obsługę prelegentów po organizację wydarzeń towarzyszących i sprawy finansowe. W latach 2014-2016 współorganizowała także serię seminariów na University of Bristol. Była także członkiem Komitetów Programowych 12 międzynarodowych konferencji w latach 2017-2021, przede wszystkim w serii *QPL – Quantum Physics and Logic*. W ramach tej działalności zajmowała się oceną i wyborem zgłoszonych artykułów oraz publikacją materiałów konferencyjnych. Ogólnie, działalność dr Any Belén Sainz w zakresie organizowania i prowadzenia wydarzeń naukowych oceniam jako ponadprzeciętną.

Pani dr Sainz jest także aktywnym recenzentem w takich czasopismach naukowych jak *Physical Review Letters*, *Physical Review X*, *Physical Review A*, *Quantum*, *New Journal of Physics*, oraz *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*. W tym ostatnim, w bieżącym roku, została redaktorem gościnnym (ang. *Guest Editor*) wydania specjalnego pt. *Foundational structures in quantum theory*. W 2021 roku została także recenzentem rozprawy doktorskiej na Universidad de Buenos Aires (Buenos Aires, Argentyna), a w 2020 r. uczestniczyła jako recenzent w programie europejskim Działań Marii Skłodowskiej-Curie COFUND.

W zakresie osiągnięć dydaktycznych, w 2017 r. pani dr Ana Belén Sainz prowadziła 1-miesięczny kurs dotyczący nielokalności i kontekstualności na Universidad de Buenos Aires. Była także asystentką dydaktyczną na Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) oraz Universidad Nacional de Córdoba, gdzie prowadziła zajęcia dotyczące fizyki oraz fotoniki. Była także zapraszana do prowadzenia wykładów w ramach szkół letnich na Chapman University (USA), ETH Zurich (Szwajcaria) oraz Hanyang University (Korea Południowa), a jej zajęcia dotyczyły nielokalności Bella oraz kontekstualności.

Pani dr Sainz udziela się także jako popularyzatorka nauk. Na swoim koncie ma kilka artykułów popularnonaukowych, wykład oraz nagranie video.

Na koniec chciałabym także zwrócić uwagę na działalność pani dr Sainz w zakresie powołania stowarzyszenia „Q-turn”, zarejestrowanego w 2020 roku w Austrii. Stowarzyszenie, którego pani dr Sainz jest współtwórczynią oraz wiceprzewodniczącą, ma na celu promocję równych szans, inkluzyjności oraz różnorodności w naukach kwantowych. Jest to bardzo potrzebna inicjatywa.

Podsumowanie

Uważam, że wniosek w sprawie nadania dr Anie Belén Sainz Stopnia doktora habilitowanego jest bardzo mocno uzasadniony z uwagi na jej istotny wkład naukowy w dziedzinę badania zjawisk nieklasycznych, w szczególności kwantowego sterowania i nielokalności Bella. Kierunek badań jest bardzo dobrze umotywowany przez habilitantkę i ma szerokie potencjalne zastosowania, przede wszystkim w kwantowej komunikacji czy obliczeniach kwantowych.

Badania przeprowadzone przez panią dr Sainz, których wyniki przedstawiono w cyklu powiązanych tematycznie dwunastu artykułów naukowych pt. *Teoretyczne podstawy możliwości i ograniczeń nieklasycznych zjawisk kwantowego przetwarzania informacji* (ang. *Theoretical foundations of the possibilities and limitations of nonclassical phenomena for quantum information processing*) stanowią istotny wkład w rozwój fizyki teoretycznej, przede wszystkim informacji kwantowej. Ponadto, pani dr Sainz cechuje się wysokimi umiejętnościami organizacyjnymi, zwłaszcza w zakresie organizacji konferencji naukowych oraz zdobywania funduszy na badania. Jest aktywnym uczestnikiem społeczności naukowej i ma duże doświadczenie dydaktyczne.

Biorąc powyższe argumenty pod uwagę, osiągnięcia pani dr Any Belén Sainz oceniam wysoko i stwierdzam, że spełniają one z naddatkiem wymogi stawiane osiągnięciom w postępowaniach w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego. Wnioskuje zatem o dopuszczenie dr Any Belén Sainz do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauki fizyczne.

M. Kobińska

