

**Dr hab. Michał Oszmaniec**

**Centrum Fizyki Teoretycznej PAN**

## **Ocena dorobku oraz recenzja rozprawy habilitacyjnej dr Any Belén Sainz**

### **Sylwetka kandydatki oraz ocena jej dorobku**

Pani dr Ana Belén Sainz jest fizykiem teoretycznym specjalizującym się w podstawach teorii kwantów a w szczególności w zagadnieniach związanych z badaniem oraz charakteryzacją nieklasycznych korelacji, które pojawiają się w eksperymentach wykonywanych nad kwantowymi układami. Pani Sainz uzyskała stopień doktora w lutym 2014 roku, broniąc rozprawę pt. „*Characterizing and witnessing multiparticle correlations: from nonlocality to contextuality*”, przygotowaną pod kierunkiem prof. Antonio Acina w Instytucie Studiów Fotonicznych (ICFO) w Barcelone. Po doktoracie odbyła staże podoktorskie na Uniwersytecie w Bristolu oraz w Perimeter Institute for Theoretical Physics w Waterloo. Od czerwca 2019 roku kieruje swoją grupą badawczą w Międzynarodowym Centrum Teorii Technologii Kwantowych na Uniwersytecie Gdańskim.

Wszystkie ośrodki wymienione powyżej należą do najlepszych na świecie w dziedzinie podstaw teorii kwantów i informacji kwantowej. Analiza dorobku publikacyjnego Kandydatki (łącznie ponad 25 opublikowanych prac, ponad 800 cytowań, index  $h=13$  wg. Google Scholar) pokazuje, że w ciągu czterech lat odbywania staży podoktorskich Pani Sainz z sukcesem nawiązała współpracę z licznymi naukowcami z całego świata, w tym z niekwestionowanymi liderami w dziedzinie (Sandu Popescu, Nicolas Brunner, czy Robert Spekkens). Co ważne, współpraca jest kontynuowana również po przyjeździe kandydatki do Polski. Do moich ulubionych prac, które nie zostały ujęte w cykl składający się na rozprawę habilitacyjną zaliczam „*The Complexity of Compatible Measurements*”, która dotyczy upraszczania struktury pomiarów kwantowych, które używane są, aby łącznie zmierzyć zaszumione (ale niekomutujące ze sobą) pomiary kwantowe.

Wyniki prowadzonych przez Panią Sainz badań są wysoko cenione na świecie. Świadczą o tym publikacje w wiodących czasopismach fizycznych (mi. po 3 publikacje w *Physical Review Letters* oraz *Quantum*) jak i liczne wystąpienia i zaproszone referaty na konferencjach międzynarodowych. Warto też podkreślić, że Pani Sainz była współorganizatorem pięciu konferencji oraz wielokrotnym członkiem komitetów naukowych na najważniejszych konferencjach z dziedziny kwantowej informacji (mi. *Quantum Physics and Logic*, *Quantum Information Processing*, *Theory of Quantum Computation, Communication and Cryptography*). Warto w końcu wspomnieć, że w 2020 roku Kandydatka otrzymała prestiżowe stypendium naukowe MNiSW dla wybitnych młodych naukowców.

Dr Ana Belén Sainz ma również znaczny dorobek w zakresie popularyzacji nauki. W szczególności jest autorką kilku popularnych tekstów i wywiadów dotyczących podstaw teorii kwantów. Pani Sainz angażuje się również w społeczny wymiar pracy naukowej. Organizowane przez nią konferencje z cyklu Q-Turn dotyczą, poza aspektami czysto naukowymi, ważnych kwestii związanych z warunkami pracy w nauce, zdrowia psychicznego czy dyskryminacji objawiającej się w różnych formach w pracy naukowej.

W stosunku do swojego dorobku naukowego, Pani Sainz ma stosunkowo skromne doświadczenie w prowadzeniu grantów naukowych - obecnie jest współprowadzącą średniej wielkości grantu FQXi oraz „pilotażowego” grantu Miniatura NCN. Można to jednak wytłumaczyć różnicą w podejściu do grantów Polsce i na (szeroko rozumianym) zachodzie. Z reguły za granicą młodzi naukowcy przed uzyskaniem poziomu szefa grupy nie muszą ubiegać się o dodatkowe finansowanie swoich badań, ponieważ mają je zapewnione z innych źródeł. Pozwala im to w większym stopniu skupić się na pracy czysto naukowej. Kariera dr Any Belén Sainz stanowi bardzo dobry przykład na to, że taki model może bardzo dobrze działać w praktyce.

Reasumując, jestem pod bardzo dużym wrażeniem dorobku naukowego, organizacyjnego i popularyzatorskiego aplikantki. Bardzo się cieszę, że tak prężna badaczka zdecydowała się związać swoją karierę naukową z Polską.

### **Formalna ocena rozprawy habilitacyjnej**

Na rozprawę habilitacyjną dr Any Belén Sainz składa się cykl powiązanych tematycznie artykułów pt. „Teoretyczne podstawy możliwości i ograniczeń nieklasycznych zjawisk kwantowego przetwarzania informacji”. W jego skład wchodzi 12 prac powstałych w wyniku szerokiej międzynarodowej współpracy. Prace zostały opublikowane w wiodących czasopismach fizycznych (3x *Physical Review Letters*, 3x *Quantum*, 2x *New Journal of Physics*, 4x *Physical Review A*). Oświadczenia współautorów oraz samej kandydatki wskazują, że wkład Any Belén Sainz był decydujący dla większości prac wchodzących w skład omawianego cyklu. W artykułach [A,B,C,D,I,J] (używam numeracji używanej w autoreferacie) Pani Sainz była pierwszym autorem. Z kolei w pracach [H] oraz [J] pierwszymi autorami są studenci, którymi Kandydatka opiekowała się podczas staży podoktorskich odpowiednio w Bristolu i Waterloo.

Tematem przewodnim rozprawy jest badanie ogólnie rozumianych korelacji kwantowych, które manifestują się w różnego typu eksperymentach przeprowadzanych na (w głównej mierze) wielocząstkowych układach kwantowych. Rozważane scenariusze dotyczą schematu Bella lub jego uogólnień. W standardowym schemacie Bellowskim rozważa się dwóch lub więcej przestrzeni oddzielonych obserwatorów, którzy jednocześnie mierzą złożony układ kwantowy za pomocą lokalnych pomiarów i rejestrują otrzymanie statystyki. Otrzymane

statystyki mają nieklasyczny charakter, jeśli nie można ich wyjaśnić za pomocą modeli probabilistycznych opartych o tak zwane lokalne zmienne ukryte (*ang. local hidden variables*). Poza standardowym scenariuszem Bellowskim prace dr Sainz dotyczą również tak zwanego sterowania EPR (*ang. EPR steering*) oraz uogólnień schematu Bella w oparciu o tak zwane modele przyczynowe (*ang. causal models*). Rozprawę można podzielić na trzy odrębne części

- Sterowanie EPR; prace [A,B,C,D,E,F]
- Zrozumienie relacji między korelacjami „prawie kwantowymi” (*ang. almost-quantum*) i kwantowymi w kontekście scenariusza Bella i kontekstualności; prace [G,H,I,J]
- Uogólnione struktury przyczynowe (*ang. causal structures*); prace [K,L]

Poniżej przedstawiłem streszczenie najważniejszych wyników dotyczących każdego z zagadnień wymienionych powyżej.

### **Sterowanie EPR**

Scenariusz sterowania EPR jest uogólnieniem scenariusza Bella w którym jeden z obserwatorów (zwykle nazywany Bobem) ufa urządzeniom pomiarowym w swoim układzie, co pozwala mu tomograficzną rekonstrukcję stanów, które do niego docierają (w każdej rundzie eksperymentu, w zależności od ustawienia aparatu pomiarowego oraz wyniku drugiego obserwatora, zwykle nazywanego Alicją). Analogonem rozkładów lokalnych w tym scenariuszu stają się tak zwane sterowalne zespoły stanów (*ang. steerable assemblages*). Jeśli obserwowany doświadczalnie zespół stanów jest niesterowalny, certyfikuje to, podobnie jak w przypadku nielokalnych statystyk, splątanie między obserwatorami uczestniczącymi w eksperymencie.

W pracy [A] zadano sobie fundamentalne pytanie o koszt klasycznej komunikacji (mierzonej w bitach) między Alicją a Bobem, koniecznej do zasymulowania niesterowalnych zespołów statystycznych. Co ciekawe wykazano, że już w przypadku dwupoziomowego układu kwantowego po stronie Boba, istnieją dwucząstkowe stany dzielone między Alicją i Bobem, które dają zespoły stanów, do których konieczne jest wymienienie nieskończonej ilości komunikacji klasycznej między Alicją a Bobem. Ponadto, w pracy znaleziono również ograniczenia dolne na ilość klasycznej komunikacji w przypadku przybliżonej symulacji zespołu stanów (gdzie jakość przybliżenia mierzona jest przez normę śladową).

Praca [B] dotyczy praktycznych schematów certyfikowania niesterowalnego charakteru zespołów stanów w obecności tak zwanej luki detekcji (*ang. detection loophole*). Scenariusz ten oznacza, że z pewnym prawdopodobieństwem (zależnym od wyboru ustawienia eksperymentalnego u Alicji) Alicja nie obserwuje w danej rundzie żadnego wyniku. Głównym wynikiem pracy jest sformułowanie (z wykorzystaniem programowania dodatnio półokreślonego – *ang. semidefinite programming*) testów pozwalających wnioskować o niesterowalnym charakterze zespołu statystycznego w pełnym eksperymencie, w którym nie odrzuca się rund w przypadkach, kiedy Alicja nie rejestruje cząstki. Metoda zaproponowana w [B] działa nie tylko w scenariuszu dwucząstkowym, ale też w jego wielocząstkowych rozszerzeniach oraz w oryginalnym scenariuszu Bella.

Praca [C] wykracza poza czysto praktyczne rozważania związane ze sterowaniem EPR. Wskazuje ona na istnienie niesygnalizujących zespołów stanów kwantowych, które nie dopuszczają realizacji kwantowej w eksperymencie, w którym dwa lub więcej laboratoria (Alicje) sterują do Boba. Zjawisko to zostało nazwane „sterowaniem postkwantowym” (ang. *post-quantum steering*) i jest analogonem niekwantowej nielokalności w eksperymentach Bellowskich generowanej przez słynne PR-boxy. Co ważne, w [C] wykazano, że sterowanie postkwantowe jest niezależne od (postkwantowej) nielokalności w sensie takim, że istnieją zespoły stanów, które nie mają realizacji kwantowej, ale związane z nimi korelacje Bellowskie są nawet lokalne. Odkrycia te należy prawdopodobnie ocenić jako najważniejszy wynik niniejszej rozprawy.

Następny artykuł [D] pogłębił matematyczne zrozumienie zjawiska post kwantowego sterowania. Konkretniej, w analogu do przypadku nielokalności zaproponowano, aby używać wielocząstkowych operatorów hermitowskich (o śladzie 1), aby generować zespoły stanów eksperymentach typu sterowania EPR, które nie posiadałyby kwantowej realizacji. Konkretnie, zaproponowano wykorzystanie tak zwanych „zespołów Gleasona”, w których wspomniany wcześniej operator hermitowski jest wielocząstkowym świadkiem splątania. Istotną podklasą zespołów Gleasona są tzw. Zespoły PPT, w których ów świadek jest uzyskiwany poprzez zastosowanie częściowej transpozycji do splątanych wielocząstkowych stanów kwantowych.

Praca [E] pogłębiła zrozumienie relacji między różnego typu zespołami sterującymi. Konkretniej, wykazano jednoznaczne związki między charakterystyką zespołu sterujących a pewnymi podzbiorami kanałów niesygnalizujących (ang. *causal channels*) badanych wcześniej w literaturze (m. przez Breckmanna, Gottesmana, Nielsena i Preskilla). Związek ten pozwolił na znalezienie nowych przykładów postkwantowych zespołów sterujących oraz na rozpoczęcie badań nowych zjawisk, które mogą być możliwe w „postkwantowym świecie”: postkwantowej teleportacji i rozszerzeń tzw. nielokalność Buscemiego.

Cykl prac dotyczących sterowania EPR zamyka [F]. W artykule tym rozważane są uogólnienia oryginalnego dwucząstkowego schematu sterowania EPR. Konkretnie, wprowadzono dwa nowe scenariusze- sterowanie EPR w tzw. schemacie „Bob z wejściem” (w którym stan otrzymany przez Boba może zależeć od jego wejścia) oraz tzw. sterowanie instrumentalne (w którym stan Boba może zależeć od ustawienia eksperymentalnego wyniku pomiaru Alicji). Głównym wynikiem pracy jest wykazanie istnienia postkwantowego sterowania w obu tych scenariuszach. Głównym narzędziem użytym, aby otrzymać ten wynik są realizacje SDP zbioru zespołów sterujących realizowanych w tych scenariuszach.

## **Korelacje „prawie-kwantowe”**

Kolejnym zagadnieniem badanym w rozprawie są tak zwane korelacje „prawie kwantowe”. Ta klasa korelacji w eksperymentach typu Bella została wprowadzona w 2015 roku przez M. Navasqueza, Y. Guryanową, M. Hobana i A. Acina, jako dobrze zdefiniowana relaksacja (nadzbiór) zbioru korelacji realizowalnych kwantowo i spełniająca wiele operacyjnych postulatów takich jak nietrywialna złożoność komunikacyjna, makroskopowa lokalność czy lokalna ortogonalność.

Prace dr Any Belén Sainz i jej współautorów rozjaśniły otwarty wcześniej problem, który polegał na określeniu, relacji między zbiorem korelacji „prawie kwantowych”, korelacji generowanych przez teorie kwantów, oraz zbiorów korelacji zadawanych przez hierarchię NPA.

W pracy [G] wskazano operacyjny (tj. sformułowany bez odniesienia do matematycznej struktury teorii) postulat, który charakteryzuje zbiór korelacji prawie kwantowych. Jest nim zasada tak zwanej makroskopowej kontekstualności, która oznacza, że o wynikach uśrednionych, makroskopowych pomiarów przeprowadzonych na wielu kopiach systemu, nie można wnioskować na temat nieklasycznego charakteru eksperymentów (innymi słowy, można je wytłumaczyć w terminach niekontekstualnej teorii zmiennych ukrytych). Co ważne wyniki [G] dotyczą nie tylko scenariusza Bellowskiego, ale też bardziej ogólnych sytuacji wiążących się z testami kontekstualnego charakteru teorii kwantów.

Przedmiotem [H] było zbadanie związku między korelacjami prawie kwantowymi a hierarchią NPA dla układów wielocząstkowych (w przypadku dwóch obserwatorów wiadomo, że zbiór korelacji prawie kwantowych pokrywa się z tzw. poziomem  $1+AB$  hierarchii NPA). Dla najprostszego scenariusza z trzema obserwatorami, z których każdy posiada dwa dychotomiczne pomiary na wykazano, że korelacje prawie kwantowe są ściśle większe niż korelacje kwantowe. Ponadto, w uogólnionym  $n$ -cząstkowym scenariuszu pokazano, że  $n-1$ -ty poziom Hierarchii NPA nie jest zawarta w zbiorze korelacji prawie kwantowym i na odwrót.

W kolejnej pracy [I] zidentyfikowano operacyjny postulat, który odróżnia korelacje prawie kwantowe od kwantowych. Jest nim zasada „braku ograniczeń” (ang. *no restriction hypothesis*), która stwierdza, że na gruncie tak zwanych uogólnionych teorii probabilistycznych (ang. *generalized probabilistic theories*) dowolne liniowe funkcjonały definiujące dobrze określone prawdopodobieństwa na poziomie zdefiniowane na przestrzeni stanów teorii, są dozwolonymi efektami w teorii. Następnym operacyjnym postulatem, który odróżnia korelacje prawie kwantowe od kwantowych okazuje się być zasada Speckera [J], która orzeka, że dowolny zestaw (rzutowych) pomiarów które są parami współmierzalne, jest współmierzalny jako całość. Osobiście, mimo jego niewątpliwej matematycznej elegancji uważam ten wynik za słabszy niż ten oparty o zasadę „braku ograniczeń”. Jest tak dlatego, że pojęcie pomiaru rzutowego, konieczne do sformułowania zasady Speckera nie jest operacyjne i wydaje się zależeć od struktury teorii.

## ***Uogólnione struktury przyczynowe***

Struktury przyczynowe są matematycznymi obiektami, konstruowanymi w oparciu o skierowane grafy acykliczne, które kodują zależności przyczynowe między zmiennymi opisującymi zjawiska fizyczne, społeczne, lub psychologiczne. Mogą być one użyteczne między innymi w modelowaniu skuteczności terapii dla pacjentów cierpiących na pewne schorzenie. Formalizm struktur przyczynowych dopuszcza zależność obserwowanych zmiennych od nieobserwowanych czynników (*ang. latent variables*), które w kontekście fizycznym nazywa się zmiennymi ukrytymi. Co ciekawe, zamiana (klasycznych) zmiennych ukrytych na stany kwantowe w odpowiednio skonstruowanej strukturze przyczynowej pozwala idealnie odtworzyć rozumowanie prowadzące do nierówności Bella. Obserwacja ta motywuje rozważanie innych scenariuszy przyczynowych i rozszerzanie ich o elementy kwantowe licząc, że korelacje uzyskane z takich „kwantowych struktur przyczynowych” będą bogatsze od ich wariantów klasyczne.

W pracy [K] rozważono kwantyzację najprostszej struktury przyczynowej, zwanej scenariuszem instrumentalnym. Zbiór korelacji dostępnych w tym scenariuszu został zidentyfikowany z „cięciem” zbioru korelacji w standardowym dwucząstkowym eksperymencie Bella typu CHSH zadanych poprzez postselekcję na sytuację, kiedy ustawienie doświadczenia Boba pokrywa się z wynikiem Alicji. Obserwacji tej użyto, aby wyprowadzić z nierówności CHSH znaną z klasycznej literatury nierówność Boneta. Ponadto, z tej samej obserwacji wynika, że w celu opisanego zbioru dostępnych w tym scenariuszu korelacji kwantowych, można użyć hierarchii.

Ostatnia praca prezentowana w rozprawie habilitacyjnej [L] dotyczyła wykorzystania struktur przyczynowych w celu określenia teorii zasobów dla nielokalności Bella. Punktem wyjścia rozważań były, w opozycji do standardowego podejścia do nielokalności, zasada Reichenbacha oraz zasada niedostrojenia (patrz strona 35 rozprawy habilitacyjnej). Pozwoliły ona na znaczne uproszczenie teorii zasobów nielokalności Bella sformułowanej na gruncie uogólnionych teorii probabilistycznych. Konkretnie, klasa darmowych operacji została zawężona do klasycznie współdzielonej losowości oraz lokalnych operacji. Pozwoliło to przeprowadzić niemal kompletną analizę w przypadku najprostszego scenariusza Bellowskiego (CHSH). Co ważne, metody stosowane w pracy znajdują zastosowanie w innych scenariuszach przyczynowych.

## ***Uwagi krytyczne i ocena rozprawy***

W mojej ocenie rozprawa habilitacyjna dr Any Belén Sainz przedstawia wybitny dorobek dotyczący zagadnień ważnych dla zrozumienia różnic między korelacjami możliwymi do uzyskania na gruncie teorii klasycznej (np. mechanika klasyczna), mechaniki kwantowej oraz potencjalnych uogólnień tej ostatniej.

Motywnym przewodem, który przewija się przez wiele prac wchodzących w skład rozprawy, jest chęć opisanie i znalezienia ograniczeń na korelacje, czy też „stany” w hipotetycznych teoriach wykraczających poza fizykę kwantową. Mimo, że podejście to wydaje się z pozoru abstrakcyjne i pozbawione głębszych podstaw, potencjalne odstępstwa od teorii kwantów mogą stanowić drogowskaz w konstrukcji przyszłych teorii, które mogłyby zastąpić mechanikę kwantową. W tym kontekście szczególnie istotne wydają mi się wyniki dotyczące istnienia nowych scenariuszy, w których można obserwować post-kwantowe zachowania (scenariusz instrumentalny [K], sterowanie w scenariuszu wielocząstkowym [C] oraz uogólnienia klasycznego sterowania EPR w przypadku dwucząstkowym (dwustronnym) [F]) oraz zrozumienie operacyjnych różnic [I] między korelacjami prawie-kwantowymi a tymi generowanymi przez teorie kwantów w scenariuszu Bella. W moim odczuciu wyniki zawarte w pracach [C,D,E,F,G,H,I,J] w zupełności wystarczyłyby na kompletną i spójną rozprawę habilitacyjną.

Z drugiej strony, kolekcja wyników dotyczących tylko i wyłącznie sterowania EPR (prace [A,B, C, D,E, F] stanowią same w sobie istotny wkład w zrozumienie tego zjawiska i wystarczyłyby zapewne jako osiągnięcie habilitacyjne. Z nieznanymi mi przyczyn Kandydatka zdecydowała się umieścić w jednej rozprawie artykuły o mimo wszystko dość odległej tematyce. Jestem jednak zdania, że całość zyskałaby znacznie na spójności, gdyby zmniejszyć liczbę publikacji zawartych w samym cyklu habilitacyjnym. Pozwoliłoby to na dokładniejszą prezentację wyników w samej rozprawie. Na przykład pojęcia nielokalności Buscemiego, uogólnionych teorii probabilistycznych, czy korelacji prawie-kwantowych pozostają zupełnie niedostępne dla czytelników nie będących ekspertami od tych konkretnych zagadnień.

## **Opinia końcowa**

Podsumowując, jestem zdania, że opisane powyżej dorobek i osiągnięcia Kandydatki w zupełności spełniają ustawowe wymogi dotyczące habilitacji. W związku z tym z przyjemnością rekomenduję komisji habilitacyjnej nadanie dr Anie Belén Sainz stopnia doktora habilitowanego. Bardzo się cieszę, że tak prężna badaczka zdecydowała się związać swoją karierę naukową z Polską.

Michał Oszmaniec

Warszawa 16.08.2021

Michał Oszmaniec