



Warszawa 3.01.2014

prof. dr hab. Jan Dereziński
Katedra Metod Matematycznych Fizyki
Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski.

**Recenzja pracy habilitacyjnej dr A. Bednorza
“Kwaziprawdopodobieństwo, lokalny realizm
i łamanie symetrii czasu
w nieinwazyjnych pomiarach kwantowych”**

Autoreferat do pracy habilitacyjnej dr Bednorza zaczyna się od efektownego cytatu “Zamknij się i licz”, którym znany fizyk Mermin podsumował standardową kopenhaską interpretację mechaniki kwantowej. Słowa te można również zinterpretować jako zalecenie dla młodych fizyków aby powstrzymywali się od zadawania fundamentalnych pytań i zajęli się robotą dotyczącą konkretnych zjawisk i problemów. Jest w tym zaleceniu pewna doza zdrowego rozsądku. Sam znam młodych fizyków, którzy ignorując je nie wyszli najlepiej.

Praca habilitacyjna dr Bednorza dotyczy pomiarów w mechanice kwantowej. Każdy, kto studiuje mechanikę kwantową, jest bardziej lub mniej zdziwiony tym, co podręczniki piszą o pomiarze. Po pewnym czasie każdy, albo prawie każdy się do tego opisu przyzwyczaja. W rzeczywistości pomiar kwantowy jest jedną z największych zagadek filozoficznych. Mętny i zabagniony jest zresztą nie tylko aspekt filozoficzny pomiaru kwantowego – wcale nie jest oczywiste jak go adekwatnie opisać matematycznie. To, jak opisywać i interpretować pomiar w mechanice kwantowej jest do dziś nie w pełni zrozumianym problemem fundamentalnym. Dotyczy to zwłaszcza pomiarów dokonywanych w różnych chwilach czasu na tym samym układzie kwantowym – a to jest główny temat pracy habilitacyjnej dr Bednorza. Dr Bednorz nie posłuchał zatem zaleceń Mermina.

W standardowym kursie mechaniki kwantowej podstawą opisu pomiaru jest tzw. interpretacja Borna, która w bardziej wyabstrahowanej postaci jest

wyrażona przez rzutowy pomiar von Neumanna z jego dzieła "Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik". Nie trzeba być bardzo krytycznym by dostrzec słabości von-neumannowskiego podejścia do pomiaru. W szczególności, jest to dość daleko posunięta idealizacja niezbyt adekwatna w doświadczeniach w których pomiar ma miejsce w krótkich skalach czasowych. Do takich sytuacji bardziej nadaje się formalizm tzw. pomiaru pośredniego, w którym rzuty zastąpione są przez tzw. miary o wartościach w dodatnich operatorach, czy też ogólniej w trasformacjach w pełni dodatnich (operatorach Krausa).

Praca dr Bednorza składa się z 7 artykułów oznaczanych jako H1-H7. Muszę przyznać, że jest to ciekawa lektura. Artykuły są powiązane ze sobą tematycznie. Widać w nich jak ewoluowało zrozumienie problemu u habilitanta.

W pracach H1 i H2 rozważana jest konkretna sytuacja fizyczna – nanozłącze w którym mierzony jest w czasie rzeczywistym płynący prąd. Jest to układ doświadczalny całkiem bliski temu, co jest w rzeczywistości realizowane we współczesnych laboratoriach. Naturalne przybliżenia prowadzą do opisu nanozłącza przy pomocy 1-wymiarowych ściśle rozwiązalnych modeli. Do pełnego opisu potrzebna jest też pewna wiedza o szczegółach urządzenia pomiarowego. Dość naturalny wydaje się wybrany przez habilitanta opis pomiaru przy pomocy operatora Kraussa zbudowanego z gaussowskiej funkcji od mierzonej obserwabli (w tym wypadku, natężenia prądu). W opisie tym występuje stała τ odpowiedzialna za tzw. szum detektora. Granica $\tau \rightarrow 0$ odpowiada mocnemu, von-neumannowskiemu pomiarowi, który jest precyzyjny ale maksymalnie zaburza badany układ. Dla dużych τ pomiar jest słaby – w niewielkim stopniu zaburza on układ, natomiast szum dąży do nieskończoności. Słaby pomiar ma swoje zalety – teoretycznie, jeśli dobrze znamy detektor, możemy odjąć jego szum od wyników pomiaru i dostać dane dotyczące samego badanego układu niewiele go zaburzając. Habilitant przeprowadza szczegółową ilościową analizę układu, która możliwa jest dla używanych przez autora ściśle rozwiązalnych modeli.

Główną ideą habilitacji dr Bednorza jest analiza granicy nieskończenie słabego pomiaru, odpowiadająca $\tau \rightarrow \infty$. W granicy tej dr Bednorz dostaje interesujący wzór na korelacje obserwabli w różnych chwilach czasu wyrażony poprzez sukcesywne jordanowskie mnożenie operatorów $\frac{1}{2}(A_1 A_2 + A_2 A_1)$. Jordanowskie mnożenie jest przemienne ale nie łączne. Prowadzi to do asymetrii w czasie przy pomiarach w 3 lub więcej chwilach czasu. Ta asymetria została omówiona w H7.

W formalizmie używanym przez dr Bednorza funkcje korelacyjne pomiarów kwantowych mogą być wyrażone pewną funkcją charakteryzującą badany układ. Funkcja ta ma wiele podobieństwa z rozkładem prawdopodobieństwa, choć nie musi być dodatnia. Habilitant nazywa ją *rozkładem kwaziprawdopodobieństwa*. Wynik pomiaru jest zadany przez spłot kwaziprawdopodobieństwa z funkcją (np. gaussowską) wyrażającą wpływ detektora. Przykładem rozkładu kwaziprawdopodobieństwa jest dobrze znana funkcja Wignera – można ją interpretować jako rozkład opisujący kolejne słabe pomiary położenia i pędu.

Niedodatniość rozkładu kwaziprawdopodobieństwa otrzymanego ze słabego pomiaru jest przejawem kwantowej natury układu. W artykułach H3, H4 i H5 jest przeprowadzona analiza tej niedodatniości.

Jak wspominałem we wstępie, praca dr Bednorza dotyczy tematu dosyć fundamentalnego. Jest to temat, którego waga jest widoczna nawet niespecjalistom. Rodzi się więc naturalne podejrzenie, że idee zawarte w pracy habilitacyjnej mogą być niezbyt oryginalne i być może są już opisane w literaturze. Sam dr Bednorz stwierdza, że miał trudności z opublikowaniem niektórych artykułów, gdyż recenzenci zarzucali mu, iż ich treść powielił materiał ze standardowych podręczników. W końcu jednak artykuły zostały opublikowane – i to w niezłych czasopismach. Na pewno wiele elementów znajdujących się w tych artykułach jest znanych. Niemniej jednak wydaje się, że systematyczna analiza słabych pomiarów przedstawiona przez dr Bednorza jest oryginalnym osiągnięciem autora. Zresztą nawet jeśli wiele elementów tych artykułów jest znanych, to często u dr Bednorza pojawiają się one w nowym kontekście. Na przykład, w analizie niedodatniości 4-krotnych korelacji dla funkcji Wignera rozpoznałem znaną mi własność kwantyzacji Weyla opisaną w Przykładzie 18.6.12 w *The Analysis of Linear Partial Differential Operators* tom III Larsa Hörmandera. Oczywiście, nie jest to żaden zarzut – jest naturalne, że ważne własności rachunku pseudoróżniczkowego znajdują interesujące fizycznie zastosowanie.

Ważną zaletą prac dr Bednorza jest to, że blisko wiążą się z prawdziwymi doświadczeniami dokonywanymi w laboratoriach współczesnych fizyków. Wydaje się, że dr Bednorz zna i rozumie zagadnienia doświadczalne i one w dużym stopniu stanowią motywację dla jego analiz. Jest to godne uwagi, bo nierzadko rozważania o charakterze fundamentalnym są prowadzone przez badaczy odległych od laboratoryjnej rzeczywistości.

W niektórych miejscach w pracy habilitacyjnej dr Bednorza dostrzegam pewną skłonność do przesady. W autoreferacie przy omawianiu słabego po-

miaru pojawia się zdanie “ Takie podejście to **nowa interpretacja mechaniki kwantowej.**” Nie bardzo rozumiem to zdanie. Według mnie wszystkie wyniki dr Bednorza mieszczą się w ramach standardowej interpretacji mechaniki kwantowej.

Dr Bednorz często posługuje się pojęciem “pomiar nieinwazyjny”. Nie jest dla mnie do końca jasne, co habilitant przez to rozumie. Moim zdaniem czasem stosuje ten termin nieadekwatnie. W autoreferacie pada np. zdanie: “z doświadczalnego punktu widzenia pomiar nieinwazyjny jest bardziej naturalny niż rzutowy, i tak naprawdę większość współczesnych pomiarów to właśnie [pomiar] nieinwazyjne.” Nie zgadzam się z tym zdaniem, przynajmniej przy dosłownym rozumieniu określenia “pomiar nieinwazyjny”. Ja bym powiedział, że duża część (choć raczej niekoniecznie większość) pomiarów to pomiary słabo inwazyjne. Nieinwazyjny pomiar nie istnieje – w rzeczywistości można jedynie mówić o nieinwazyjnej granicy pomiarów słabo inwazyjnych.

Mimo powyższych słów krytyki, podoba mi się praca habilitacyjna dr Bednorza. Podoba mi się również jego postawa jako fizyka zadającego interesujące i odważne pytania. Cechuje go przy tym duża samodzielność – mimo że wszystkie należące do habilitacji prace były współautorskie (głównie z prof. Belzigiem z Konstanz), udział dr Bednorza w ich pisaniu był dominujący (tak przynajmniej wynika z deklaracji habilitanta, z którymi zgodne są deklaracje współautorów).

Dr Bednorz ma bardzo dobrą opinię jako dydaktyk. W 2005 roku dostał nagrodę dydaktyczną na Wydziale Fizyki UW, co jest wysokim wyróżnieniem. Miałem okazję słuchać jego referatu na seminarium, gdzie mogłem się przekonać, że potrafi starannie, w sposób uporządkowany i interesujący opowiadać o fizyce.

Moim zdaniem przedłożona praca habilitacyjna spełnia wymagania potrzebne do uzyskania tytułu doktora habilitowanego.



Jan Dereziński.