

*dr hab. Rafał Demkowicz-Dobrzański*  
Instytut Fizyki Teoretycznej  
Wydział Fizyki UW  
ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa  
[demko@fuw.edu.pl](mailto:demko@fuw.edu.pl)

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Filipa Gampela p.t. „Ciągły pomiar położenia i pędu cząstki kwantowej”**

### **Streszczenie pracy**

Rozprawa doktorska mgra Filipa Gampela dotyczy zagadnienia ciągłego monitorowania stanu cząstki kwantowej poprzez siatkę detektorów równomiernie rozmieszczonych w przestrzeni położeń jak i w przestrzeni pędów. W pracy sformułowano oryginalne podejście do tego zagadnienia i uzyskano zarówno analityczne (w najprostszych przypadkach) jak i numeryczne wyniki zachowania się cząstki swobodnej jak i cząstki w pułapce harmoniczej w obecności tego typu monitorowania dynamiki.

W rozdziale pierwszym autor daje bardzo klarowne i obszerne wprowadzenie do „problemu pomiaru” w mechanice kwantowej, pokazując najważniejsze nurty interpretacyjne, aby następnie w tym kontekście wprowadzić idee pomiaru ciągłego oraz zagadnienia jednoczesnego pomiaru położenia i pędu cząstki kwantowej.

W rozdziale drugim wprowadzone są najważniejsze pojęcia z teorii pomiarów kwantowych oraz formalizm matematyczny opisujący zagadnienie pomiaru ciągłego, w tym metoda trajektorii kwantowych oraz stochastyczne równanie Schroedingera.

Rozdział trzeci zawiera oryginalne wyniki autora. Przedstawiony jest model sieci detektorów monitorujących położenie i pęd cząstki. Następnie przedstawione są wyniki analityczne ewolucji cząstki swobodnej w przypadku obecności jednego i dwóch detektorów oraz omówione są przypadki graniczne krótkich czasów oraz silnej obserwacji. Ogólne zagadnienie uwzględniające całą sieć detektorów jest analizowane głównie metodami numerycznymi opartymi o metody trajektorii kwantowych. Wyniki porównane są z symulacjami opartymi o modele klasyczne z dodatkowym białym szumem pokazując dość dobrą zgodność. Przedyskutowane są różnice rozważanego modelu (bazującego na pomiarach rzutowych) z istniejącym w literaturze modelem opartym o idee słabych pomiarów. Problem jest również przeanalizowany dla zagadnienia cząstki w potencjale harmonicznym, gdzie można uzyskać symetrię problemu ze względu na zamianę pędu i położenia.

Wyniki zawarte w rozprawie zostały opublikowane w dwóch pracach, jednej w *Physical Review A*, drugiej w *Acta Physica Polonica*.

### **Ocena i uwagi**

Zacznę od oceny części wstępnej pracy. Rozdziały 1 i 2 stanowią doskonałe i niezwykle przejrzyste wprowadzenie do pracy. W szczególności, rozdział 1 jest niezwykle zgrabnym przeglądem

najważniejszych interpretacji mechaniki kwantowej, który dowodzi, że doktorant ma bardzo szerokie i dojrzałe spojrzenie na to zagadnienie. Mimo, że z technicznego punktu widzenia wstęp taki nie jest ściśle związany z wynikami pracy, daje on bardzo ciekawy kontekst dla zaprezentowanych wyników. Podobnie rozdział 2, daje bardzo jasne wprowadzenie do pojęcia pomiarów ciągłych, ponownie dowodząc głębokiego zrozumienia autora wszystkich pojęć, których używa w pracy.

Przejdę teraz do oceny oryginalnych wyników zaprezentowanych w rozdziale 3. Oryginalność podejścia zaprezentowanego przez autora polega na analizie ciągłego monitorowania cząstki kwantowej przez detektory mierzące jednocześnie położenie i pęd cząstki. To odróżnia tę pracę, od wielu innych gdzie analiza zazwyczaj skupiona jest na analizie wyłącznie trajektorii przestrzennej cząstki. Drugim elementem odróżniającym zaprezentowane podejście od literaturowego, jest założenie o rzutowości pomiarów w przeciwieństwie do typowych podejść gdzie przyjmuje się założenie dotyczące słabych pomiarów. To drugie założenie szczególnie rzutuje na charakter uzyskanych wyników.

Rzutowy charakter pomiarów powoduje, że od momentu „pierwszego kliknięcia” któregoś z detektorów dalsza ewolucja jest już całkowicie niezależna od stanu początkowego cząstki. Powoduje to, że jedynym śladem oryginalnego stanu cząstki jest rozkład prawdopodobieństwa „pierwszych kliknięć” detektorów, a dalsza ewolucja jest już efektem relacji pomiędzy stanami na które rzutują detektory. Jest to jak sądzę główny powód, dla którego autor był w stanie wykonywać obliczenia, które efektywnie sprowadzały się do sumowania prawdopodobieństw (a nie amplitud prawdopodobieństwa!) po wielu trajektoriach. Oczywiście, w ramach poczynionych założeń, uzyskane wyniki są poprawne i ciekawe fizycznie, nie mniej brakowało mi pewnych głębszych fizycznych motywacji w jakich sytuacjach tego typu model monitorowania cząstki jest bardziej uzasadniony od modeli opartych na słabych pomiarach.

Bardzo ważnym elementem pracy, jest porównanie uzyskanych wyników właśnie z modelem słabych pomiarów (rysunek 3.8). Autor zwrócił uwagę na różnicę zachowań się dyspersji położenia dla obu modeli. Zabrakło tu jednak trochę głębszego komentarza tłumaczącego te różnice. Przy okazji, w równaniu 3.83 funkcja  $f()$  powinna być w kwadracie, albo w równaniu 3.84,  $4\sigma^2$  powinno być zastąpione  $2\sigma^2$ , bo mówimy tu o prawdopodobieństwach a nie amplitudach prawdopodobieństwa – wierzę, że w wynikach numerycznych ten błąd się nie przepropagował.

Podczas gdy założenie o detektorach równomiernie rozmieszczonych w przestrzeni nie budzi wątpliwości, brakowało uzasadnienia dla równomiernego rozmieszczenia detektorów w przestrzeni pędowej. Rozumiem, że autorowi zależało aby w pracy zachować pewną symetrię pomiędzy pędem a położeniem, ale przydałoby się przedstawić przykład fizyczny sytuacji kiedy taki model byłby modelem odpowiadającym sytuacji eksperymentalnej.

W kontekście powyższych komentarzy, wydaje się, że dość ciekawym przypadkiem wartym analizy, jest zachowanie się stanu cząstki „do momentu pierwszego kliknięcia”, gdyż w tym przypadku będziemy mieli do czynienia z pewnym uogólnieniem zagadnienia „bomby Vaidmana”, gdzie funkcja falowa będzie unikać miejsc (i pędów) gdzie znajdują się detektory. Byłoby ciekawe porównać taką ewolucję warunkową, z ewolucją przy braku jakiegokolwiek monitorowania cząstki. Tak jak pisałem powyżej od momentu pierwszego kliknięcia problem traci sporo kwantowego smaczku dotyczącego monitorowania trajektorii cząstki kwantowej.

Należy docenić dużą pracę autora w przeprowadzeniu bardzo dokładnej analizy numerycznej i tam gdzie to możliwe analizy analitycznej lub przybliżonej. Uzyskane wyniki są dobrze uzasadnione, a wnioski poprawne. Bardzo ciekawe było pokazanie równoważności wyników uzyskanych w ramach rozważanego modelu z modelem klasycznym połączonym z białym szumem.

W dyskusji zagadnienia oscylatora harmonicznego, ciekawą obserwacją był efekt grzania układu i jego efektywnej termalizacji – zabrakło tu natomiast na koniec jakiegoś komentarza na ile to ważna fizycznie obserwacja.

#### **Podsumowanie.**

Rozprawa doktorska Pana magistra Filipa Gampela zawiera ciekawe fizycznie wyniki, które są komplementarne do wyników istniejących w literaturze. Pozwala zrozumieć rolę założenia rzutowości pomiarów w zagadnieniu ciągłych pomiarów i dzięki temu daje ciekawy kontrastujący paradygmat w porównaniu z modelami opartymi na pomiarach słabych. Praca dowodzi, że doktorant ma bardzo głębokie zrozumienie fizyki kwantowej i świetnie porusza się w bogatej literaturze dotyczącej kwantowej teorii pomiaru jak i literatury z pogranicza fizyki i filozofii dotyczącej zagadnień interpretacji mechaniki kwantowej. Widać bardzo dużą dojrzałość naukową doktoranta i umiejętność prowadzenia spójnego logicznego wywodu naukowego. Stwierdzam, że rozprawa spełnia wymogi stawiane przed rozprawami doktorskim i wnoszę o dopuszczenie doktoranta do dalszej części postępowania.

dr hab. Rafał Demkowicz-Dobrzański

