

Centrum Fizyki Teoretycznej

Polskiej Akademii Nauk

Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

Tel. (+48 22) 847 09 20, Fax/Tel: (+48 22) 843 13 69

Email: cft@cft.edu.pl

NIP 525-000-92-81

REGON 000844815

Warszawa, 08.09.2023

Dr hab. Jarosław Korbicz
Centrum Fizyki Teoretycznej PAN
02-668 Warszawa

Recenzja pracy doktorskiej mgr Filipa Gampel "Ciągły pomiar położenia i pędu cząstki kwantowej"

Przedstawiona rozprawa doktorska to 94-stronicowa praca pisemna. Praca oparta jest na dwóch pierwszoautorskich publikacjach Autora wraz ze swoim promotorem, jednej w Physical Review A, innej w Acta Physica Polonica A. Poza tym Autor posiada jeszcze w swym dorobku publikację w Phys Rev. Research oraz pierwszoautorski pre-print w bazie arXiv.

Recenzję rozprawy oprę na odpowiedziach na następujące pytania.

1. Czy tematyka rozprawy jest aktualna i jak jest związana z rozwojem dyscypliny?

Tematyka ciągłej obserwacji układów kwantowych, choć nigdy nie straciła na aktualności od swego sformułowania w latach 80-ch i 90-ch, stała się szczególnie istotna w ostatnich latach. Pierwszym powodem jest gwałtowny rozwój technologii kwantowych i potrzeba kontroli układów kwantowych w czasie rzeczywistym, np. w celach inżynierii stanu. Stochastyczne równania Schroedingera (z ang. SSE) i związane z nimi stochastyczne równania master to absolutnie podstawowe narzędzie w tej dziedzinie. Drugi, bardziej fundamentalny, powód aktualności badanej tematyki to odwieczny problem mechaniki kwantowej czyli przejście kwantowo-klasyczne. Przy czym przejście to stało się ostatnio istotne również z powodów technologicznych a nie tylko poznawczych. Ciągła obserwacja, zwłaszcza tak emblematicznych dla mechaniki kwantowej niekomutujących wielkości jak położenie i pęd, dostarcza tu nowej platformy do badania przejścia kwantowo-klasycznego, szczególnie jako model kolapsu funkcji falowej.

2. Jaki jest problem naukowy podejmowany przez Autora i czy został on trafnie sformułowany?

Autor analizuje problem ciągłej, równoczesnej obserwacji położenia i pędu cząstki kwantowej i definiuje własny schemat takiego pomiaru, różny od znanych mi schematów tego typu. Po pierwsze, Autor zakłada siatkę detektorów, równomiernie rozmieszczonych w przestrzeni fazowej, zamiast zwyczajowo zakładanych dwóch detektorów, z których jeden mierzy pęd a drugi położenie. W związku z tym, równoczesny pomiar położenia i pędu jest tu realizowany inaczej niż w dotychczasowych podejściach: poprzez rzutowanie w czasie detekcji na minimalne stany Gaussowskie, reprezentujące najlepszy możliwy kompromis w równoczesnym określeniu położenia i pędu. Po drugie, do napędzenia losowej dynamiki Autor używa procesu stochastycznego typu skokowego a nie dyfuzyjnego, co jest bardziej

naturalne w przyjętym schemacie detekcji. Rozważane są cząstki swobodne oraz w potencjale harmonicznym. Wszystko to Autor opisuje jasno i zwięźle, trafnie definiując problem badawczy.

3. Czy Autor rozwiązał postawiony problem i czy wykorzystał w tym celu właściwe metody?

Pracując w zdefiniowanym przez siebie schemacie pomiarowym, Autor wyprowadza własną wersję stochastycznego równania Schroedingera. Otrzymane równanie Autor rozwiązuje numerycznie metodą Monte Carlo, co jest standardową metodą badania tych skomplikowanych, nieliniowych równań. Autor wprowadza również alternatywną metodę symulacji dynamiki w Rozdziale 3-cim, przyspieszającą obliczanie wartości średnich. Otrzymuje szereg interesujących i intuicyjnie poprawnych wyników numerycznych, np. lokalizację funkcji falowej, zachowanie średniego położenia i dyspersji z szumem śrutowym i charakterystyczne „nagrzewanie się” układu pod wpływem pomiarów. Co ciekawe, Autor bada również swoje równanie analitycznie tam gdzie to jest możliwe. Operuje przy tym sprawnie parametrami modelu, np. bada zachowanie przy małej gęstości detektorów czy rzadkich detekcjach. Wykorzystuje przy tym dość specyficzną wiedzę z teorii procesów Poissona.

Nasuują się następujące pytania w związku z przedstawionym schematem:

1. Gdyby założyć, że minimalne stany Gaussowskie to stany koherentne, co się dzieje jeżeli gęstość detektorów jest tak dobrana, że odpowiada liniowo niezależnemu układowi stanów koherentnych?
2. Dlaczego dyspersja w modelu filtracyjnym narasta szybciej niż w rzutowym?

4. Na czym polega oryginalny wkład Autora w dyscyplinę?

Problem równoczesnego pomiaru położenia i pędu w mniej lub bardziej realistycznych scenariuszach badany był od czasu pracy Arthursa i Kellego z 1965r. Rozszerzenie do byłej ciągłej obserwacji badane było np. w pracy Scotta i Milburna z 2001r. lub niedawnej Jiang i Watanabe z 2020r. Wszystkie te prace w zasadzie powielały schemat Arthursa i Kellego z dwoma detektorami, sprzężonymi z układem poprzez Hamiltoniany pomiarowe von Neumanna. Autor znacząco wykracza poza ten schemat, proponując inny mechanizm pomiaru oparty na: i) siatce zamiast pary detektorów; ii) równoczesnym pomiarze opartym na rzutowaniu na stan koherenty; iii) modelowaniu szumu pomiarowego poprzez proces skokowy. Otrzymuje się w ten sposób m.in. alternatywny opis ukłaskowania się cząstki pod wpływem obserwacji. Sformułowanie i przedstawioną analizę takiego schematu jak najbardziej należy uznać za oryginalny wkład Autora w dziedzinę kwantowych pomiarów ciągłych.

5. Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy Autora w dziedzinie i w szczególności wiedzy odpowiadającej zakresowi badań?

Rozprawę otwiera świetny wstęp, gdzie w zwięzły sposób Autor przedstawia najważniejsze nurty interpretacyjne mechaniki kwantowej oraz rozwój teorii pomiaru. Następnie Autor sprawnie wprowadza niezbędny aparat teorii pomiaru, w tym metodę Monte Carlo. Następująca po tym konstrukcja i analiza schematu pomiarowego wskazuje na bardzo dobre obeznanie z tematem. Autor dokonuje szeregu trafnych, bardzo dobrze umotywowanych przybliżeń, co świadczy o bardzo dobrym warsztacie fizycznym i pewnym doświadczeniu w operowaniu przybliżeniami. Na uwagę zasługuje również

rozbudowana analiza statystyki procesów Poissona, wymagająca specyficznej wiedzy matematycznej. Dobór literatury jest dobry choć można było uwzględnić np. najnowszą pracę z tej tematyki, Jiang i Watanabe z 2020r., gdzie autorzy rozszerzają pracę Scotta i Milburna o kontrolę ze sprzężeniem zwrotnym. Oraz doskonałą książkę Kurta Jacobsa z 2014r. poświęconą opisowi pomiarów kwantowych, w tym ciągłych, od strony teorii informacji.

Reasumując, przedstawiona rozprawa świadczy o bardzo dobrej wiedzy Autora zarówno w zakresie podstaw mechaniki kwantowej jak i dziedziny ciągłych pomiarów.

6. Jakie są słabe strony rozprawy?

Najbardziej brakuje mi dyskusji związków z pracą Scotta i Milburna, poświęconej temu samemu zagadnieniu ale w schemacie Arthursa Kellego i z szumem dyfuzyjnym. Autor co prawda porównuje swoje podejście z pracą dyfuzyjną Ashidy i Uedy z 2017r. ale stosuje się to tylko ciągłego pomiaru położenia. Tym czasem najbardziej interesujący aspekt pracy to równoczesna obserwacja położenia i pędu i praca Scotta Milburna jest tu najbliższa tematycznie.

Również dyskusja przejścia kwantowo-klasycznego mogłaby być trochę pełniejsza. Autor co prawda rozważa kilka aspektów, np. jak uzyskane trajektorie przechodzą w klasyczne, ale można było jawnie omówić jak przejawia się w badanym schemacie zasada nieoznaczoności Heisenberga. Jest to pewno jedno z najbardziej naturalnych pytań przy pomiarze położenia i pędu.

Na koniec uwaga techniczna – na stronie 66 niejasne jest czy rozważane są rzadkie czy gęste detektory. Pewno jest to wynik literówek.

Krytyka ta jednak nie umniejsza głównej wartości pracy jako oryginalnego rozwiązania problemu równoczesnej obserwacji położenia i pędu w czasie rzeczywistym. Mając na uwadze powyższe, stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska mgr-a Filipa Gampel spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim. Wnoszę więc o dopuszczenie mgr-a Filipa Gampel do dalszego etapu przewodu doktorskiego.



dr hab. Jarosław Korbicz