

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Filipa Gampela pt. "Ciągły pomiar położenia i pędu cząstki kwantowej"**

Praca doktorska mgr. Filipa Gampela została napisana pod kierunkiem prof. dr. hab. Mariusza Gajdy. Liczy ona 94 strony. Składają się na nią cztery rozdziały. Wyniki zawarte w pracy zostały opublikowane w dwóch pracach współautorskich (współautorem jest promotor). Jedna praca ukazała się w Physical Review A, a kolejna w Acta Physica Polonica A.

W pierwszym rozdziale Autor przedstawia zarys historyczny. Ponieważ praca dotyczy jednej z podstawowych rzeczy w mechanice kwantowej, jaką jest pomiar i związane problemy z jego interpretacją Doktorant przedstawił różne interpretacje mechaniki kwantowej. Znajdziemy tutaj zarówno dobrze znane interpretacje jak interpretacja kopenhaska, wielu światów czy dekoherencji kwantowej, jak i mniej znane, do których można zaliczyć QBism, mechanikę Bohma, czy teorie obiektywnego kolapsu. Dalej Doktorant omawia pomiar kwantowy. Wychodzi od najprostszego modelu - pomiaru rzutowego, następnie omawia jego uogólnienie tzw. pomiar POVM, przeskoki kwantowe i przydatną przy ich opisie teorię układów otwartych oraz modele stochastyczne. Na zakończenie Autor omawia ciągły pomiar położenia i pędu. Przyznam, że jestem pod dużym wrażeniem tej części. Po pierwsze dlatego, że Doktorantowi udało się jasno przedstawić problem, który zawiera wiele subtelności i „pułapek”, a po drugie ze względu na ładne historyczne ujęcie zagadnienia.

Drugi rozdział przedstawia krótko formalizm potrzebny do opisu problemu i narzędzia matematyczne służące do jego rozwiązania. Autor omawia pomiar rzutowy, pomiar uogólniony, pomiar ciągły i przydatną do jego opisu metodę Monte Carlo oraz stochastyczne równanie ruchu. W dużej części jest to materiał, który można znaleźć w standardowych (pomiar rzutowy) i bardziej zaawansowanych podręcznikach (pomiar uogólniony i pomiar ciągły). Jego włączenie do pracy uważam za cenne, ponieważ ułatwia

on czytelnikowi śledzenie oryginalnych wyników Doktoranta. Jedyną rzecz którą bym dodał, to krótkie omówienie paradoksu Zenona, do którego Autor odwołuje się w dalszej części pracy.

Rozdział trzeci stanowi najważniejszą część pracy. Doktorant prezentuje w nim swoje wyniki. Autor rozważa pomiar położenia i pędu cząstki. W tym celu rzutuje stan cząstki na gaussowskie funkcje falowe o położeniu i pędzie zlokalizowanych wokół pewnych centralnych wartości. Te centralne wartości tworzą sieć równo odległych punktów. Ideę tę uważam za bardzo ciekawą. Sama dynamika cząstki opisana jest stochastycznym równaniem Schrodingera. Na rysunku 3.1 Doktorant zilustrował wyniki numerycznych obliczeń. Niestety w treści pracy doktorskiej na stronie 49 praktycznie nie skomentowano tego rysunku. Trochę więcej można się dowiedzieć z opisu rysunku, ale nawet tutaj nie napisano, czemu odpowiadają cztery kolejne wykresy. Czy jest to gęstość prawdopodobieństwa w czterech różnych chwilach czasu? Jakich? W dalszej części rozdziału Autor rozważa przypadek pomiaru położenia i pędu cząstki swobodnej. W tym celu rozważa trzy przypadki: pomiaru przez jeden detektor, pomiaru przez dwa detektory, pomiaru przez sieć nieskończenie wielu detektorów. W dwóch pierwszych przypadkach Doktorantowi udało się uzyskać analityczne wzory. Są to wzory (3.43) i (3.55) na czas ucieczki. Różne wyniki (nie tylko analityczne, ale i numeryczne) przedstawione są na rysunkach 3.2, 3.3 i 3.4. W przypadku jednego detektora czas ucieczki rośnie wraz ze wzrostem intensywności pomiaru oraz maleje ze wzrostem prędkości. Są to wyniki, których można było się spodziewać. Nową wartością są konkretne zależności funkcyjne czasu ucieczki od odpowiednich parametrów. W przypadku dwóch detektorów najpierw tylko pierwszy detektor rejestruje cząstki. Natomiast wraz z upływem czasu coraz częściej klika drugi detektor. Dla dużych czasów częstotliwości kliknięć detektorów są takie same. Przypadek pomiaru przez nieskończony szereg detektorów jest przedstawiony szerzej. Najpierw Autor numerycznie oblicza prawdopodobieństwo kliknięcia  $i$ -tego detektora w krótkim interwale czasu. Na rysunku 3.5 widać, jak wraz z upływem  $t$  zmienia się prawdopodobieństwo kliknięcia kolejnych detektorów - im bardziej odległy detektor tym później prawdopodobieństwo to przyjmuje maksymalną wartość. Następnie Doktorant rozważa przybliżenie rzadkich kliknięć i udaje mu się znaleźć analityczny wzór na zależność średniego położenia od czasu. Najbardziej podobał mi się wynik, który pokazuje, że w przypadku intensywnego pomiaru sytuacja wygląda tak, jakby cząstka wystartowała z opóźnieniem. Autor pokazuje również, że dynamika kwantowa opisana równaniem GKSL dla pewnych parametrów wygląda jak dynamika klasyczna opisana równaniami (3.77) i (3.78). Jest to bardzo ciekawa relacja między fizyką kwantową, a

klasyczną. Nasuwa mi się pytanie, o to co powoduje, że cząstka kwantowa zachowuje się podobnie do cząstki klasycznej. Chętnie usłyszałbym głębszą analizę tego zagadnienia. Wreszcie Doktorant porównuje ten model z innym modelem pomiaru i pokazuje, że istnieją rozbieżności. Tak więc wyniki są w ogólności zależne od przyjętego modelu. Na zakończenie tego rozdziału Autor rozważa pomiar położenia i pędu cząstki w potencjale harmonicznym. Trajektoria takiej cząstki przedstawiona jest na rysunku 3.9, a dyspersja położenia na rysunku 3.11. Okazuje się, że dyspersję tę można przybliżyć wzorem 3.86, co pozwoliło na wyciągnięcie wniosku, że „ruch cząstki to harmoniczna oscylacja z nałożonymi na nią ruchami Browna”. W dalszej części Doktorant uzasadnia ten wzór za pomocą modelu klasycznego. Wreszcie ciekawą obserwacją jest zauważenie, że średnia energia układu rośnie. Chętnie dowiedziałbym się, czy to aparatura pomiarowa i jeśli tak, to w jaki sposób, przekazuje energię cząstce? Ostatni rozdział zawiera krótkie podsumowanie i omawia perspektywy dalszych badań.

Recenzowana praca doktorska przedstawia rozwiązanie jednego, konkretnego problemu w różnych wariantach, co uważam za właściwe dla prac doktorskich. Moim zdaniem otrzymane wyniki posiadają dużą wartość naukową. Chciałbym zwrócić szczególną uwagę na prezentację wyników, która jest znakomita. Praca ma jasną strukturę i napisana jest klarownie. Zawiera ona właściwą ilość informacji wstępnych i dotyczących stosowanych narzędzi. Sam problem jest rozwiązany albo za pomocą metod numerycznych, albo (gdzie jest to możliwe) metod analitycznych. W szczególności te drugie metody uważam za bardzo cenne. Doktorant rozpoczyna od prostych przypadków, a potem przechodzi do trudniejszych. Ułatwia to czytanie pracy. Obliczenia zawierają wszystkie istotne szczegóły. Analiza otrzymanych wyników jest głęboka i zawiera ciekawe porównania. Ponadto praca napisana jest bardzo starannie (choć zawiera drobne błędy typograficzne).

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa spełnia wszystkie wymagania ustawowe i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do dalszej części postępowania.

*Andrzej Grudka*