

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Piotra Szańkowskiego zatytułowanej

Quantum coherence and correlations in cold atom systems

Rozprawa doktorska mgr. Piotra Szańkowskiego jest wynikiem przemyśleń autora dotyczących natury splątania kwantowego. Piotr Szańkowski w swojej dysertacji przedstawił spójne rozważania dotyczące tego skomplikowanego konceptu, a głównym wynikiem rozprawy jest zdefiniowanie konstrukcji geometrycznej obrazującej splatanie kwantowe, a ściślej – konstrukcji pozwalającej na intuicyjną ocenę wielkości splątania.

Przedstawiona rozprawa nie mieści się w typowym schemacie współczesnej rozprawy doktorskiej. Mgr P. Szańkowski jest współautorem 8 opublikowanych i 2 wysłanych do druku prac naukowych. Praktycznie dowolny podzbiór tych prac mógłby stanowić podstawę solidnej rozprawy doktorskiej. Autor nie poszedł na taką „łatwiznę”. Jako rozprawę przedstawił wynik swoich dociekań i przemyśleń – myślę, że kwintesencję swoich doświadczeń nabytych w dotychczasowej pracy naukowej. Ta niezwykła oryginalność bardzo mi zaimponowała, choć w niektórych momentach była ona irytująca. Na przykład mgr P. Szańkowski postanowił zignorować tradycyjne zasady sztuki drukarskiej i ponumerował tylko wybrane przez siebie strony – pierwsze strony rozdziałów. Znakomicie utrudnia to recenzentowi odnoszenie się do konkretnych fragmentów tekstu.

Rozprawa jest bardzo dobrze napisana. Autor imponuje bogactwem słownictwa ale i poczuciem humoru, pisząc o sobie „ja muszelka” (I shell). Ale może chodziło mu o „ja łuskam”, jako że niby autor wyłuszcza swoje idee. Abstrahując od tego ewidentnego błędu Mgr P. Szańkowski był w stanie połączyć lekkość wypowiedzi z konieczną naukową precyzją. Pracę czyta się z przyjemnością i zainteresowaniem, chociaż spotkałem w niej wiele stwierdzeń, które wzbudziły we mnie wiele sprzecznych emocji, szczególnie we fragmentach dotyczących problemów o naturze bardziej filozoficznej niż fizycznej.

Piotr Szańkowski zaczyna od definicji splątania kwantowego i szerokiej dyskusji różnych konsekwencji przyjętej definicji. Autor podkreśla, że definicja mówi o tym, co nie jest splątaniem kwantowym. Jest to zapowiedź głównego motta rozprawy – chęci wykazania czym naprawdę jest splatanie.

Mgr Szańkowski bardzo słusznie postanawia przyjąć postawę pragmatyczną i ogranicza rozważania do problemów precyzyjnych pomiarów. Wychodząc z takiego punktu widzenia stanami splątanymi nazywa te, które pozwalają na wyznaczenie względnej fazy z dokładnością lepszą niż wynikającą z klasycznych ograniczeń. Autor analizuje przypadek, kiedy zasobem do osiągnięcia tego celu jest układ N identycznych bozonów okupujących ten sam stan kwantowy. Opis idei eksperymentu interferencyjnego w połączeniu z analizą dokładności pomiaru opartą o kwantową informację Fischera, stanowi bardzo zgrabny i pouczający wstęp.

Wprowadzając formalizm pseudospinu autor pokazuje, że eksperyment interferencyjny można opisać jako obrót lub sekwencję obrotów w przestrzeni pseudospinu.

Wykorzystując to rozumowanie, mgr P. Szańkowski pokazuje, przy wszystkich wspomnianych ograniczeniach, że kwantowa informacja Fischera przyjmuje postać zależną jedynie od stanu początkowego układu. Jest więc ona charakterystyczna dla danego stanu, i może być miarą splątania stanu. Tę miarę autor nazywa podatnością dynamiczną. Autor pokazuje, że dla układów klasycznych nie może być ona większa od N . Jeśli więc dla danego stanu podatność dynamiczna przewyższa ograniczenie klasyczne, to stan jest splątany.

Mgr P. Szańkowski pokazuje, że nierozróżnialność bozonów pozwala na większą precyzję pomiaru fazy w eksperymencie interferencyjnym i pokonanie ograniczenia klasycznego. Autor przedstawiając macierz gęstości badanego układu w bazie tensorów sferycznych, zauważył, że podatność dynamiczna (miara splątania) jest duża, jeśli stanom o dużym rzucie momentu pędu na oś obrotu odpowiadają duże elementy macierzowe. Stąd bierze się główny wynik rozprawy – definicja splątania dynamicznego i jego interpretacja: odwzorowanie macierzy gęstości w układ współśrodkowych kul, o promieniach odpowiadających różnym wartościom momentu pędu. Masa tych kul, rozłożona jest na równoleżnikach o skwantowanych promieniach równych możliwym wartościom rzutu momentu pędu. Miara splątania – podatność dynamiczna – jest sumarycznym momentem bezwładności owych sfer. Ten kwantowy moment bezwładności mierzy podatność układu na obroty, a jednocześnie jest miarą splątania użytecznego do wyznaczenia względnej fazy w eksperymencie interferencyjnym.

Najważniejszy wynik rozprawy – ów klasyczny obrazek – to zdaniem autora clue do zrozumienia kwantowego splątania przy wszystkich ograniczeniach dotyczących zarówno układu jak i unitarnych operacji, jakim może być on poddany.

Ja mam nieco mieszane odczucia dotyczące tego wyniku. Z jednej strony wyniki mgr. P. Szańkowskiego są poprawne i bardzo ciekawe. Dotyczą one odpowiedzi na bardzo trudne i mało precyzyjne pytanie: gdzie leży istota „kwantowości” układu kwantowego. I jeśli przez zrozumienie mamy na myśli wyobrażenie sobie klasycznego obrazka, co do którego mamy wyrobione intuicje, to rzeczywiście mgr Piotr Szańkowski przedstawił taki spójny obrazek. Jest to spore osiągnięcie – pokazanie natury kwantowego procesu.

Z drugiej strony ten klasyczny obrazek niewiele mi mówi. Może jest to wynikiem stosunkowo sporej zawłości konstrukcji myślowej prowadzącej od stanów splątanych i metrologii do obrazka brył sztywnych i ich obrotów. A może wynika to z faktu, że nigdy czynnie nie brałem udziału w badaniach związanych z zastosowaniem stanów splątanych w metrologii. W każdym razie nie mogę powiedzieć, że doznałem iluminacji i rozumiem lepiej kwantowe splątanie. Nie jest to zarzut, ale raczej wyraz stanu mojego umysłu, który, mimo wysiłków autora, nie doznał oświecenia.

W mechanice kwantowej znane są przykłady, kiedy podobne obrazowe konstrukcje są bardzo pomocne. Jedną z takich konstrukcji jest planetarny model atomu Bohra – mimo, iż w dużym stopniu błędny, ciągle przywoływany w kontekście prymitywnego wyjaśnienia budowy atomu. Drugim, znacznie ważniejszym przykładem polegającym na graficznym obrazowaniu dobrze określonych wyrażeń matematycznych, są diagramy Feynmana. Jednak obrazek sfer nie odpowiada żadnej z wyżej wymienionych sytuacji. Byłby on wielce

przydatny, gdyby za jego pomocą można było uzyskać jakiś nowy, wartościowy rezultat, którego nie można prosto uzyskać w inny sposób. Niestety autor nie podał żadnego takiego przykładu. Na dodatek wydaje mi się, że konstrukcja geometryczna nie jest jednoznaczna. Mgr P. Szańkowski nie mówi jak należy rozłożyć masę wzdłuż danych równoleżników. Rysunki w rozprawie, notabene niezwykle artystyczne, sugerują ciągły rozkład. Jednak podany na końcu pracy przykład pokazuje, że aby znaleźć rozkład masy dla konkretnego stanu układu dobrze jest w niektórych przypadkach, zapisać ten stan w obróconym układzie współrzędnych. I w opisanym przykładzie rozkład masy jest dyskretny. Mgr Piotr Szańkowski nic nie mówi o tym jak rozłożyć masę wzdłuż równoleżników. A przy braku tej informacji konstrukcja geometryczna nie może być użyteczna nawet do odgadnięcia osi obrotu, względem której kwantowy moment bezwładności (splątanie) jest maksymalny.

W przypadku bryły sztywnej moment bezwładności jest tensorem, który można sprowadzić na osie główne. Tensor momentu bezwładności pozwala na pełen opis zachowania się układu przy obrotach i znacznie więcej mówi o rozkładzie masy bryły sztywnej niż podanie tylko jednego momentu bezwładności. Nasuwa się więc pytanie, czy w rozważanym przypadku, nie można podać pełniejszego opisu stanu układu poprzez zdefiniowanie obiektu analogicznego do tensora bezwładności.

Na koniec chciałem się odnieść do niektórych sformułowań, które mają aspekt filozoficzny. Należy bowiem zauważyć, że rozprawa napisana jest w taki sposób, że momentami pretenduje do traktatu filozoficznego. Po jej lekturze zrodziły się we mnie obawy, że nie rozumiem głębi takich pojęć jak cząstki, stany, mody, splątanie, superpozycja czy też nierozróżnialności cząstek.

Już definicja splątania podana przez autora budzi we mnie pewien sprzeciw. Po pierwsze wykorzystuje pojęcie „parties”, które nie jest zdefiniowane i jest bardzo szerokie. Konsekwencją takiej definicji jest uznanie za stany splątane superpozycji dwóch stanów takich jak stan podstawowy i pierwszy stan wzbudzony oscylatora harmonicznego. Dalszym skutkiem takich definicji jest rozróżnianie splątania cząstkowego i modowego a stąd już krok do splątania dwóch modów klasycznego pola elektromagnetycznego. Prowadzi to do poplątania z pomieszaniem różnych pojęć klasycznych i kwantowych. Ale muszę dodać, że to nie Piotr Szańkowski odpowiada za ten stan rzeczy. Sprawdziłem, że tak wygląda literatura tego zagadnienia.

Biorąc pod uwagę subtelność analizy autora, nie wiem dokładnie co mgr Piotr Szańkowski ma na myśli mówiąc o cząstkach, modach czy stanach. Nasuwa mi się szereg pytań, które wydają się całkiem banalne, ale czytając rozprawę nie byłem pewien o co autorowi chodzi, kiedy zaczyna rozróżniać te pojęcia. Jak w formalizmie matematycznym mechaniki kwantowej odróżnić mody od cząstek? Dlaczego stan EPR to stan splątany modowo i dlaczego nierozróżnialność cząstek nie pozwala na stwierdzenie „cząstka, która poleciała w lewo”? Czy mody i stany w przestrzeni Hilberta to te same obiekty? Czy mody to potencjalna możliwość stanu cząstki? Czy nieobsadzone mody mogą być splątane? I do czego można wykorzystać nieobsadzone, splątane mody? Na koniec tych chyba w sumie mało twórczych uwag, chciałem dodać, że można definiować różne pojęcia. Ale bardzo szerokie

definicje są bezużyteczne. Przykładowo, jeśli za splątany uznamy praktycznie każdy wektor z przestrzeni Hilberta zapisany jako superpozycja stanów, to splątanie staje się bezużytecznym konceptem wymyślonym po to, żeby pocziwym ludziom namieszać w głowach.

Mój duży opór budzi też stwierdzenie, że dwa układy identycznych bozonów, jeden na Księżycu a drugi na Ziemi, muszą być opisane całkowicie symetrycznymi funkcjami falowymi. Ten dogmat nie ma większego znaczenia praktycznego i mgr Piotr Szańkowski rozumie to doskonale. Nie istnieje pomiar wykonany na tym układzie, którego wynik zależałby od tego, czy funkcje falowe cząstek są symetryczne czy antysymetryczne przy zamianie cząstek między Księżycem a Ziemią. Stwierdzenie mgr. P. Szańkowskiego, jako nie poddające się weryfikacji doświadczalnej, ma charakter czysto filozoficzny i lepiej jest unikać takich stwierdzeń.

Moje liczne uwagi i komentarze świadczą przede wszystkim o tym, że praca jest niezwykle inspirująca. Jest to bardzo dobra rozprawa doktorska. To, że jest różna pod każdym względem od wszystkich rozpraw, które do tej pory recenzowałem, to już powiedziałem. Chciałem jednak dodać, że autor wykazał się dużą odwagą. Zaryzykował przedstawienie jako swojej tezy doktorskiej wyniku głębokich przemyśleń, które mają ukazać istotę splątania kwantowego. Rozumowanie autora i wynik końcowy nie budzą wątpliwości. To czy jego punkt widzenia stanie się pomocny do zrozumienia istoty splątania wydaje się problematyczne, ale czas to pokaże. Niewątpliwie mgr Piotr Szańkowski przedstawiając tę rozprawę doktorską dowiódł swojej wielkiej dojrzałości naukowej i gotowości do podejmowania oryginalnych problemów badawczych. Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wszelkie wymagania stawiane przed rozprawami doktorskimi i wnoszę o dopuszczenie mgr. Piotra Szańkowskiego do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

M. Gajda

Prof. dr hab. Mariusz Gajda

Warszawa 04.12.2014