

dr hab. Rafał Demkowicz-Dobrzański, prof. UW
Instytut Fizyki Teoretycznej
Wydział Fizyki UW
ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa
demko@fuw.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Kamila Kostrzewy p.t. „Kryteria nieklasyczności w kwantowych układach wielu cząstek”

Rozprawa doktorska mgra Kamila Kostrzewy dotyczy zagadnienia wykrywania nieklasyczności stanów kwantowych. Autor proponuje szereg ulepszeń w odniesieniu do standardowo używanych metod wykrywania nieklasyczności stanów mogących mieć zastosowanie w przypadku różnych układów fizycznych takich jak: stany światła generowane w procesach parametrycznego podziału częstości, układu zimnych atomów czy ogólnie układy kilku rozróżnialnych podukładów kwantowych.

Wyniki

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do podstawowych pojęć teorii kwantowej teorii informacji ze szczególnym uwzględnieniem pojęcia splątania kwantowego oraz nierówności Bella. Oryginalne wyniki autora zawarte są w czterech rozdziałach (2-5), z których każdy porusza inne zagadnienie związane z wykrywaniem nieklasycznych korelacji motywowane innym kontekstem fizycznym.

W Rozdziale 2 Autor analizuje zagadnienie łamania nierówności Bella w układach wielu cząstek w sytuacji, gdy pomiary wykonywane na części mają bardzo małe prawdopodobieństwo sukcesu. Autor przeformułuje ten problem w taki sposób, aby efektywne łamanie nierówności Bella dotyczyło jedynie cząstek na których wykonywane pomiary mają wysoką wydajność, a pomiary z niską wydajnością były jedynie traktowane jako pewien dodatkowy filtr, który zmniejsza ogólna liczbę obserwacji ale nie wpływa na próg wydajności pozwalający na stwierdzenie łamania nierówności Bella.

W Rozdziale 3 analizowane jest zagadnienie łamania nierówności Bella (typu CGLMP) dla układu dwóch i trzech qutritów (układów trójpoziomowych). Zagadnienie jest analizowane korzystając z reprezentacji stanu qutritów jako stanów z podprzestrzeni symetrycznej dwóch qubitów i w tym języku analizowana jest struktura stanów pozwalających na maksymalne łamanie nierówności Bella.

W Rozdziale 4 Autor analizuje wykrywanie nieklasyczności stanów światła za pomocą interferencji Hong-Ou-Mandela. Wprowadza modyfikacje do obliczanej funkcji widzialności interferencji polegającej na normalizowaniu obserwowanych korelacji natężeń co w efekcie pozwala na zniwelowanie efektu fluktuacji całkowitej liczby obserwowanych fotonów na uzyskiwane widzialności.

Rozdział 5 dotyczy zagadnienia wykrywania splątania w układach zimnych atomów, gdzie splątanie rozumiane jest jako splątanie pomiędzy dwoma przestrzennie rozdzielonymi grupami atomów. Pokazano, że kryteria splątania oparte o własności pełnego tensora korelacji pozwalają skuteczniej stwierdzić obecność splątania w porównaniu z kryteriami bazującymi jedynie na korelacjach obserwowanych w pomiarach standardowych operatorów spinowych.



Ocena i uwagi krytyczne

1. Analizując ogólną strukturę pracy, rzuca się w oczy, że cztery merytoryczne rozdziały te nie mają ze sobą silnych związków logiczno-fizycznych, poza ogólnym faktem, że dotyczą zagadnień wykrywania nieklasycznych korelacji w stanach kwantowych. Nawet samo pojęcie nieklasyczności jest w każdym z rozdziałów nieco inaczej formułowane: albo jako łamanie nierówności Bella albo jako występowanie splątania albo wreszcie jako nieklasyczności stanów światła w rozumieniu optyki kwantowej. Praca przez to jest bardziej „kolażem” wyników niż spójną całością. Sam Autor zdaje się pogodził się z tą sytuacją i w rezultacie rozprawa (również przez swoją umiarkowaną długość 90 stron o niskiej koncentracji tekstu) ciąży bardziej w strony formy autoreferatu będącego przeglądem wyników naukowych autora niż samodzielną rozprawą, która wnosi jakąś dodatkową wartość ponad bycie sumą wymienionych wyników naukowych. Poniżej przedstawiam moją ocenę poszczególnych wyników naukowych.

2. Odnośnie wyników z Rozdziału 2. Mimo ciekawej motywacji fizycznej (istnienie sytuacji gdy na części z podukładów nie jesteśmy w stanie wykonywać wydajnych pomiarów) rozwiązanie zaproponowane przez autora jest nieco rozczarowujące. Sprowadza się ono bowiem do potraktowania układów z niewydajnym pomiarem jako układów wykorzystywanych do warunkowego przygotowania stanu na pozostałych podukładach, na których następnie analizowane są standardowe nierówności Bella. W tym sensie mówienie o „nowych nierównościach Bella” jest w tym przypadku mocno na wyrost. Równania (2.1), (2.4), (2.17) nie wnoszą nic więcej ponad to co można uzyskać ze standardowych nierówności Bella pod warunkiem, że można podzielić przez prawdopodobieństwo warunkowego przygotowania stanu. Brakuje mi w tym rozdziale silnego argumentu fizycznego, dlaczego takie rozwiązanie miałyby być lepsze od najprostszego podejścia, w którym już z góry wyrzucamy wszystkie podukłady, dla których nie dysponujemy wydajną detekcją i od początku skupiamy się tylko na podukładach o wydajnej detekcji.

3. Wyniki Rozdziału 3, które dotyczą łamania nierówności Bella w układach dwóch i trzech qutritów mają charakter „case-study” i nie pozwalają na wyciągnięcie żadnych głębszych ogólnych wniosków dotyczących zagadnienia łamania nierówności Bella. Mimo zapowiedzi z początku rozdziału, że dzięki reprezentacji stanów qutritu jako stanów symetrycznych dwóch qubitów uzyskamy zrozumienie dlaczego stany niemaksymalnie splątane najsilniej łamią nierówność Bella, po przeczytaniu rozdziału nie uzyskałem takiego wglądu. Struktura z równania (3.31) nie jest w mojej ocenie wcale bardziej iluminująca od struktury (2.26) zapisanej jawnie w języku stanów qutritu. Taki wgląd byłby możliwy gdyby operator Bella B w obrazie qubitowym miał prostszą strukturę niż w obrazie qutritowym. Tak jednak nie jest, a raczej jest wręcz przeciwnie. Nie widzę tym samym istotnego zysku koncepcyjnego związanego z przejściem do obrazu qubitowego. Brakuje też komentarza, dlaczego rozdział ten skupia się akurat na qutritach (i to tylko dwóch i trzech) i nie podejmuje żadnej próby ogólniejszej analizy problemu.

4. Modyfikacja analizy interferencji Hong-Ou-Mandela jest z pewnością wartościowa i mimo swej prostoty może faktycznie być dobrą sugestią dla eksperymentatorów. Charakter tego rozdziału jest zupełnie inny niż pozostałych, gdyż nieklasyczność jest tu rozumiana w sensie nieklasycznych stanów światła, czyli ściśle rzecz biorąc nie istnienia dodatnio określonej P reprezentacji dla stanu kwantowego. Tego autor nie pisze jawnie w swojej pracy i nie podkreśla dostatecznie wyraźnie odrębności tego rozdziału od pozostałych, przez co czytelnikowi może być trudno umieścić ten wynik

w szerszym kontekście pracy. Brakuje też dyskusji wykraczającej poza analizę jednego konkretnego stanu ściśniętego światła. W mojej ocenie to podejście będzie korzystne zawsze gdy mamy stany i nieokreślonej całkowitej liczbie fotonów.

5. Rozdział 5 zawiera w mojej ocenie najciekawsze fizycznie wyniki. Wskazanie, że kryteria splątania oparte o pełny tensor korelacji zawiera istotnie więcej informacji niż jedynie obserwabla całkowitego spinu jest ważnym faktem. Nie mniej nie jest dla mnie oczywiste na ile praktycznie przydatne wnioski z tego wypływają. Tak jak obserwabla związane z całkowitym spinem są bezpośrednio mierzone w eksperymencie, tak w przypadku ogólniejszych obserwabli nie jest to już wcale oczywiste. W pracy brakuje opisu jak takie ogólniejsze pomiary miałyby być wykonane w praktyce. Ponadto, jeśli się nie mylę analizy ilościowe są przeprowadzone jedynie dla stanów czystych co pozostawia podejrzenie, że w przypadku stanów mieszanych zastosowanie silniejszej metody nie będzie możliwe.

Ponadto wymienię kilka dodatkowych drobnych uwag krytycznych:

6. We wstępie dyskusja począwszy od równania (1.15) jest niejasna gdyż autor nie napisał wyraźnie czym fizycznie są stany $|1\rangle$, $|0\rangle$.

7. Wielkość I_{gen} pojawiająca się na stronie 38 nie jest nigdzie jawnie zdefiniowana.

8. Dość dziwny jest wzór (3.9) i następujące później oznaczenia gdzie S^2 to co innego niż $(S)^2$.

Podsumowanie.

Mimo, że żaden z wyników zaprezentowanych w poszczególnych rozdziałach z osobna nie ma wagi wystarczającej do przyznania stopnia doktora, to sumaryczny dorobek Autora zawarty w rozprawie odpowiada wymogom stawianym pracom doktorskim i rekomenduje dopuszczenie mgra Kamila Kostrzewy do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Ponadto, fakt że Autor angażował się w dość szerokie spektrum badań i uzyskał oryginalne (choć nie szczególnie mocne) wyniki analizując różne problemy badawcze świadczy również o jego szerokich horyzontach naukowych co należy zaliczyć na plus doktorantowi.

Rafał Demkowicz-Nowakowski

