

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Artura Niegody p.t. "Many-body Correlations as a Resource for Quantum Metrology"

Marek Żukowski
International Centre for Theory of Quantum Technologies (ICTQT),
Uniwersytet Gdański

26 X 2021

Ponieważ moja recenzja będzie zawierać sporo uwag krytycznych dotyczących redakcji pracy, jasności wyводу i pewnych zbyt uproszczonych interpretacji, zatem na samym początku deklaruję, że praca ta spełnia, mimo powyższych wad, wymogi stawiane rozprawom doktorskim i będę wnioskować o dopuszczenie Autora do obrony. Praca bowiem zawiera wiele wartościowych wyników, w zakresie teoretycznej kwantowej metrologii, jak metod wykrywania nieklasycznych zjawisk w obszarze fizyki dotyczącym kwantowych korelacji wielociałowych. Co więcej, jest oparta na wynikach już opublikowanych w Physical Review A (cztery prace). Dodam, że jedna z tych prac występuje w rozprawie jako e-print arXiv.org, ale została w międzyczasie opublikowana także w Phys. Rev. A, co mnie niezmiernie cieszy.

Praca zawiera wstęp ogólny, następnie próbę wprowadzenia do pojęcia splątania i twierdzenia Bella i próbę wprowadzenia to do teorii estymatorów w metrologii. Rozdziały 3-6 zawierają wyniki oryginalne oparte na pracach z Phys. Rev. A. Na początku zajmę się tymi rozdziałami.

Rozdział 3 dotyczy elementarnych modeli opisujących kondensaty Bose'a-Einsteina w podwójnej studni potencjału i celem jest wykazanie, że można ujawnić "Bellowskie korelacje" poprzez opis używający jedno-ciałowej funkcji gęstości. Przejawiać się to ma postaci interferencji dwu nakładających się kondensatów gdy potencjał je utrzymujący zostanie wyłączony. Autor w tym celu używa niedookreślonego "świadka Bellowskości". Negatywna wartość tego indykatora, wywodzącego się z prac [99,100] ma świadczyć o "korelacjach Bellowskich". Autor nie wyprowadza tego warunku, ani nie uszczególnia czy mamy tu do czynienia z nierównością Bella, czy indykatozem splątania opartym na nierówności Bella, a w zasadzie na optymalnym operatorze Bella. Dodatkowo nie jest wspomniane czy jest to operator Bella dla kolektywnych zmiennych, czy też jest takiego typu jak w następnych rozdziałach (indywidualne pomiary na poszczególnych elementarnych podukładach). Oczywiście odpowiedź możemy znaleźć w cytowanych pracach, ale tak nie powinno być. Rozprawa naukowa

powinna precyzyjnie definiować użyte pojęcia i metody. Aby trochę przybliżyć, że to jest istotne: np. nierówność CHSH jako nierówność Bella ma górne ograniczenie wynoszące 2. Natomiast operator Bella w formie CHSH zoptymalizowanej do wykrywania kwantowego splątania, ma dla stanów separowalnych co najwyżej wartość $\sqrt{2}$. Postanowiłem nie sprawdzać co autorzy prac [99,100] mieli na myśli i będzie to moje pytanie podczas obrony. To nie jest bez znaczenia, bo albo tu wykrywamy niemożność klasycznego opisu, albo nieseparowalność stanu kwantowego.

Autor studiuje w szczególności wpływ szumów, niezerową temperaturę, skończoną rozdzielczość pomiarów i fluktuacje liczby atomów. Wszystko wyprowadza, używając coraz bardziej uproszczonego opisu (przybliżenie średniego pola) dla modelu bozonowego złącza Josephsona (spin-0).

Rozdział 3 jest rozwinięciem zagadnień poruszanych przez Autora w "dysertacji związanej z drugim stopniem - Secondary Degree". Ta praca jest cytowana jako [72] ale i tak nie znajduję tam wyjaśnienia czym jest drugi stopień bo tam mamy "MA Thesis" (?) (Uniwersytet Warszawski). Czyżbym przeoczył szczegóły kolejnych reform szkolnictwa wyższego i to nie tylko u nas? Podejrzewam, że to stara dobra praca magisterska, MSc Thesis.

Rozdział 4 dotyczy kondensatów o spinie 1. Autor analizuje sposoby użycia stanów splątanych, które można by wykorzystać w metrologii, tak aby dawały precyzję większą niż możliwa metodami klasycznymi. Okazuje się że opis metodą pola uśrednionego daje zbliżony obraz do tego przedstawionego w rozdziale 3. Wyprowadzona jest optymalna interferometria, oraz wybór odpowiedniego pomiaru, tak aby uzyskać precyzję zbliżoną do granicy Heisenberga. Kwantowa informacja Fishera jest użyta jako indykator splątania.

Rozdział 5 dotyczy kwantowych korelacji w łańcuchach spinowych. Tu znowu wkraczają nierówności Bella, tym razem bez wątpliwości technicznych, ale jak pokazuje narastają wątpliwości interpretacyjne. Autor wyprowadza nierówność Bella dla wielu spinów $1/2$. Jest ona pochodną nierówności z prac innych autorów [166, 217], a właściwie ich redukcją do dyskretnych pomiarów spinów $1/2$. Tu mamy pewien chaos oznaczeniowy. Wielkości występujące we wzorze (5.2) są niezdefiniowane, choć można to jakoś wykoncypować. Na szczęście autor rozróżnia pomiędzy nierównością Bella, a indykátorem splątania na niej opartym, wzory (5.5) i (5.7). Ważnym krokiem jest zauważenie, że z racji tego, że te nierówności są oparte o właściwości operatorów $\sigma_{\pm} = \frac{1}{2}(\sigma_x \pm i\sigma_y)$, podnoszących i zniżających spin, wartość kwantowa wyrażenia algebraicznego tej nierówności da się wyrazić poprzez pojedynczy element macierzy gęstości układu dla bazy produktowej opartej na stanach własnych z poszczególnych spinów. Wynika to z faktu że $\sigma_{\pm}^2 = 0$. Autor wyraża to w sposób bardziej skomplikowany.

To wszystko jest zastosowane do łańcuchów spinowych. W takiej sytuacji rzeczywiście można sobie wyobrazić, że na każdym z elementów tego łańcucha można wykonać osobny pomiar. Autor nazywa rodzinę wyprowadzonych operatorów Bell "korelatorem", co jest mylące bo jest to właśnie rodzina korelatorów. Zastosowano ten indykator w przypadku typowych sytuacji modelowych. Rozważano też oddziaływania spinów. Dyskutowana jest możliwość

wykrywania przejść fazowych za pomocą wspomnianego "korelatora". Tu mam pewne wątpliwości, bo raczej widziałbym tu rolę pomiarów kolektywnych. Użycie wspomnianego korelatora zakłada pomiary na poszczególnych spinach.

Rozdział 6 jest poświęcony wielociałowemu złamaniu lokalnego realizmu, jako zasobu możliwego do wykorzystania w kwantowych metodach metrologicznych. Zdumiewające jest to że autor na początku jeszcze raz wyprowadza korelator Bellowski wyprowadzony w rozdziale 5. Następnie wyprowadza dolne ograniczenie dla kwantowej informacji Fischera, po to aby zauważyć że jest ono wyrażalne poprzez pewną funkcję elementów macierzy gęstości układu. A zatem poprzez wartości korelatorów ze wspomnianej wcześniej rodziny. Zatem. Autor twierdzi że mamy bezpośredni związek pomiędzy łamaniem lokalnego realizmu, vel niełokalnością", a czułością metrologiczną. Przy okazji pojawia się absurdalny w kontekście, choć prawdziwy, wzór (6.27) i znowu czytelnik musi sobie go przetworzyć do formy prawidłowej. Ponadto wprowadzenie jako dodatkowego oznaczenia wektora $\vec{n}_-$, podczas gdy cała informacja jest w $\vec{n}_+$ jest dziwnym zabiegiem, świadczącym że chyba wszystko co czytamy było robione w pośpiechu. Ponadto twierdzenie o roli łamana lokalnego realizmu, może być uzasadnione gdyby pomiary wykonywane w trakcie działań metrologicznych były wykonywane na poszczególnych spinach z osobna. Jeszcze jedna sprawa. Łatwo zauważyć, że w przypadku stanów czystych możemy mieć łamanie nierówności Bella tylko w przypadku jednego korelatora z rodziny, pozostałe nie będą złamane, a wchodzą do wyrażenia zastępującego elementy macierzy gęstości. Są też zapewne stany które nie łamią żadnego z ograniczeń Bellowskich poszczególnych korelatorów Bellowskich, ale dają spore wartości dla wielu. Co wtedy? Pewne zaczątki dyskusji nad tym problemem mamy na stronie 85, ale nie jest ona wyczerpująca.

Przechodzę do mojej opinii o pierwszych dwóch rozdziałach.

Rozdział pierwszy, dotyczący nierówności Bella i splątania, jest bardzo chaotyczny i powierzchowny. Zawiera też nieprawdziwe stwierdzenia. Przykładem tego jest przyporządkowanie stanom skrętności fotonu bezpośredniej relacji jeden-do-jeden z polaryzacją horyzontalną i wertykalną (strona 5)! Stwierdzenia dotyczące stanu (1.1) są podane jako ogólnie, a zatem są nieprawdziwe. To singlet polaryzacyjny ma własność, że jakiegokolwiek identyczne pomiary polaryzacji na jednym i drugim fotonie są, *ale anty*-, skorelowane. To jest związane z rotacyjną niezmienniczością singletu, wynikającą z faktu, że jest stanem o spinie całkowitym równym zero.

W podrozdziale dotyczącym "niełokalności Bella", widzimy, że autor nie zdaje sobie sprawy, że nierówności Bella, są oparte na trzech założeniach. Wyliczam:

- realizm, lub istnienie ukrytych zmiennych (np. w formie "przyczyn"), lub kontrfaktyczna definitywność (możliwość mówienia o tym co nie zaszło a mogło), albo nawet determinizm,
- lokalność Einsteina
- "wolna wola" - czyli istnienie lokalnych procesów losowych determinujących ustawienia eksperymentalne, niezależnych od czegokolwiek innego w

eksperymentcie.

Autor nie zauważa, że wprowadzenie ukrytej zmiennej λ czyni warunek (1.8) definicją lokalnych ukrytych zmiennych, a nie samej lokalności. λ jest ukrytą zmienną, bo jej nie ma w mechanice kwantowej w przypadku stanów czystych. W przypadku separowalnych stanów mieszanych możemy coś w tym rodzaju mieć, ale wtedy prawdopodobieństwa $p(a|x, \lambda)$ i $p(b|y, \lambda)$ muszą mieć ściśle określoną kwantową formę. Zatem stwierdzenie, że wzór (1.9)

$$p(ab|xy) = \int_{\Lambda} d\lambda q(\lambda) p(a|x, \lambda) p(b|y, \lambda)$$

reprezentuje precyzyjny warunek lokalności, bez założeń o determinizmie lub klasyczności jest fundamentalnie nieprawdziwe. To jest właśnie esencja klasyczności, bo prawdopodobieństwa $p(a|x, \lambda)$ i $p(b|y, \lambda)$ są kolomogorowskie, a te zawsze kryją w sobie determinizm. Jest jakaś sytuacja, ale nie wiemy jaka - więc używamy prawdopodobieństw. Nasz partner w brydżu ma konkretne karty, ale my musimy oszacować prawdopodobieństwa poszczególnych istotnych kart. Są też błędy literaturowe, np. nasz eksperyment [39] dotyczył wykluczenia pewnej formy *nielokalnego* realizmu, a nie lokalnego realizmu.

Ogólnie Autor w rozdziale 1 powtarza pewne klisze, czego objawem koronnym jest powtarzanie słowa "nielokalność", a które funkcjonują w części literatury, zwłaszcza autorstwa ludzi kwestionujących mechanikę kwantową jako teorię kompletną. Mam nadzieję, że przekonałem Autora, że nie mają one logicznych podstaw.

Co do rozdziału 2 to mamy tam w wielu miejscach nieprecyzyjne symbole, a wzory dotyczące informacji Fishera (2.8) i konsekwentnie (2.16) są nieprawdziwe. Zapis relacji (2.24) jest wytłumaczony dopiero pół strony niżej i to dla wzoru (2.29). Brak formuły na pierwszą pochodną $\mathcal{L}$ czyni wzory (2.29) i (2.30) bezużytecznymi dla czytelnika. Przejście z sekcji 2.4 do 2.5 jest też dziwne, bo czytelnik nie jest uprzedzony w 2.4, że teraz będzie kwantowo. Formuła (2.44) jest absurdalna, bo liczba rzeczywista nie może być w relacji $\leq$ z liczbą zespoloną...

Powyższa krytyka nie zmienia faktu, że praca zawiera dużo ciekawych wyników oryginalnych i jest ważnym wkładem do literatury przedmiotu. Zatem powtarzam, że praca ta spełnia mimo powyższych wad wymogi stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie Autora do dalszych faz procedury doktorskiej, w tym do publicznej obrony.

M. Jankowski