

Ocena rozprawy doktorskiej mgr. Krzysztofa Lorka pt.
Effects of uniform acceleration on quantum states and vacuum entanglement in relativistic quantum information

Rozprawa doktorska pana mgr. Krzysztofa Lorka poświęcona jest zagadnieniom szeroko pojętej kwantowej teorii informacji, głównym bowiem przedmiotem badań są właściwości stanów kwantowych układów złożonych, w szczególności problemy splątania, ale też zagadnieniom luźniej związanym samą informatyką kwantową – pomiarami czasu. Wspólnym mianownikiem jest tu badanie wpływu efektów relatywistycznych. Już na początku należy stwierdzić, że dla samej informatyki kwantowej, w szczególności jej ewentualnych zastosowań praktycznych, efekty relatywistyczne wydają się grać znikomą rolę, z uwagi na to, iż w normalnych warunkach są one zaniedbywalnie małe. Nieco bardziej interesujące z tego punktu widzenia są problemy pomiaru czasu własnego za pomocą realistycznych, tzn. możliwych do zastosowania, urządzeń. Oczywiście uwagi te nie umniejszają w żadnym stopniu ani niewątpliwych walorów pracy, ani zasadności podjęcia tematyki. Przeciwnie, fundamentalne problemy, które formułuje i rozwiązuje autor rozprawy mają duże znaczenie dla zrozumienia podstawowych problemów na pograniczu mechaniki kwantowej i teorii względności.

Jak powszechnie wiadomo, wspomniane powyżej pogranicze (ogólnej) teorii względności i mechaniki kwantowej jest terenem intensywnych badań, mających na celu skonstruowanie kwantowej teorii grawitacji, co dotychczas nie zakończyło się sukcesem. Rozpatrywane w rozprawie doktorskiej pana mgr. Lorka problemy są jednak wolne od problemów trapiących próby kwantowania grawitacji. Autor skoncentrował się bowiem na zagadnieniach dotyczących zachowania układów kwantowych w nieinercjalnych układach odniesienia czy też, z innego punktu widzenia, w przestrzeni zakrzywionej. Relatywistyczne „tło” (zakrzywiona przestrzeń, nieinercjalny układ odniesienia) dane jest to więc z góry; na tym tle uprawiana jest kwantowa mechanika, czy ogólniej kwantowa teoria pola. Takie podejście wydaje się w pełni uzasadnione, gdyż właśnie takie konfiguracje mogą ewentualnie grać rolę w informatyce kwantowej (np. w układach poddanych dużym przyspieszeniom).

Rozprawa doktorska pana mgr. Lorka składa się z czterech części. Pierwsza z nich poświęcona jest, po pierwsze, elementarnemu wprowadzeniu do informatyki kwantowej, po drugie zaś opisowi podstawowych elementów mechaniki kwantowej i kwantowej teorii pola w nieinercjalnych układach odniesienia i powiązaniem zjawiskom, w szczególności efektowi Unruha. W obu wypadkach, tzn. we wprowadzeniu do informatyki kwantowej (ze szczególnym uwzględnieniem problematyki splątania i jego ilościowej charakteryzacji), jak i opisie zjawisk kwantowych w układach nieinercjalnych, udało się autorowi przekazać w sposób zwięzły, jasny i precyzyjny podstawowe informacje niezbędne przy prezentacji oryginalnych wyników zawartych w pozostałych częściach rozprawy. Wydaje mi się, że prezentacja jest na tyle klarowna, że powinna być bez trudu zrozumiała dla niespecjalistów.

Trzy części pracy zawierające oryginalne wyniki autora poświęcone są kolejno: analizie możliwości pomiaru czasu własnego dla dowolnego (tzn. poruszającego się w sposób dowolny) układu fizycznego, splątaniu stanów kwantowych pola skalarnego i dirakowskiego w układach poruszających się ze stałym przyspieszeniem oraz splątaniu próżni w skalarnej teorii pola – ta ostatnia część ma nieco luźniejszy bezpośredni związek z problematyką relatywistyczną, zawiera jednak rozwinięcie pewnych wątków zawartych w części ją poprzedzającej.

Najważniejszym rezultatem części drugiej poświęconej idealnym zegarom mierzącym czas własny układów nieinercjalnych jest wykazanie, że, z przyczyn fundamentalnych, konstrukcja takiego zegara jest niemożliwa, przy dość ogólnych i mało ograniczających założeniach dotyczących zasady działania takiego zegara. Fundamentalna niemożliwość pomiaru czasu własnego, wynika, jak wykazuje autor, z efektu Unruha zaburzającego w istotny sposób pomiar czasu. Co więcej, uwzględnienie w eksperymencie poprawek związanych z tym efektem również napotyka na fundamentalne trudności. Obliczenie ich wymaga bowiem znajomości trajektorii, co z kolei wymaga pomiaru czasu – wpadamy więc w nieuniknione *circulum vitiosum*... Wynik wydaje mi się bardzo interesujący i mający podstawowe znaczenia dla opisu układów nieinercjalnych, z praktycznego punktu widzenia „czas własny” pozostaje konstrukcją czysto teoretyczną niedostępną doświadczalnie.

Drugim oryginalnym problemem diskutowanym w rozprawie jest transformacja stanów kwantowych przy przejściu między układami poruszającymi się ruchem przyspieszonym. Autor rozważa wielomodowe stany gaussowskie skalarnego pola kwantowego (pola Kleina-Gordona). Gaussowskość stanów pozwala sprowadzić problem transformacji między układami do liniowych przekształceń pierwszych dwóch momentów paczek falowych. Dla rozważanych w rozprawie stanów dwumodowych można więc łatwo zbadać losy splątania międzymodowego. Wyprowadzony formalizm zastosowano w rozprawie do analizy splątania pojawiającego się w układzie dwóch modów przyspieszanych (detektorów) „zebranego” z próżni Minkowskiego.

Opis wyjściowej sytuacji jest dość zwięzły, być może nawet zbyt zwięzły. Nie jest dla mnie, na przykład, jasne dlaczego ostatni człon w równaniu (7.2) nie jest istotny. Także bardziej wyczerpujący opis samego zjawiska, tzn. pojawienia się i ewolucji splątania modów przyspieszanych (detektorów) i na czym polega „splątanie” stanu próżniowego, byłby na miejscu. Używany w opisie układu parametr D opisany jest w języku rysunków układów współrzędnych Rindlera, a nie jego fizycznego znaczenia. Krótkie stwierdzenie, że D to „respective displacement of accelerated observers” nie ułatwia zrozumienia dlaczego D może być ujemne, ani co to oznacza. W końcu, wszelkie opisane i analizowane zjawiska mają przebiegać w jakimś, choćby wyidealizowanym, układzie fizycznym, a nie na „wierzchołkach zmodyfikowanych współrzędnych Rindlera”.

Rezultatem przeprowadzonych badań jest dokładny opis zależności splątania od parametrów układu. Nowym, ciekawym zjawiskiem są odkryte w pracy oscylacje splątania w funkcji parametru D i przyspieszenia. Wykryto też tzw. gwałtowny zanik (*sudden death*) splątania,

czyli jego znikanie dla skończonych wartości parametrów charakteryzujących układ. Zjawisko to, z nieznanymi mi przyczyn, wzbudza zazwyczaj sporą ekscytację u badaczy splątania. Wiele funkcji zeruje się dla skończonych wartości parametru; zdarza się to też miarom splątania, ale ciekawa może być wyłącznie dyskusja, dlaczego dzieje się to dla takiej, a nie innej wartości i co z tego wynika. Takiej dyskusji brak, nie tylko w rozprawie, ale z reguły we wszystkich publikacjach dotyczących tego zjawiska.

Dalsze rozdziały tej części rozprawy poświęcone są analizie poprzednio rozpatrywanego problemu w przestrzeni 3+1 wymiarowej, oraz dla pola Diraca (zamiast masywnego pola skalarnego). Przejście do przestrzeni czterowymiarowej umożliwia zbadanie jak analizowane splątanie zależy od poprzecznych rozmiarów paczek falowych. Autor wskazuje też na możliwość badania sytuacji, w której układy przyspieszane nie poruszają się równolegle lub antyrównolegle oraz przejścia między tymi dwoma wypadkami (różniącymi się istotnie z punktu widzenia generacji splątania) w sposób ciągły, poprzez zmianę kąta między trajektoriami dwóch przyspieszanych układów. Analiza przeprowadzona dla pola Diraca pozwoliła na odkrycie różnic między przypadkiem bozonowym i fermionowym. Jak się okazuje, w tym drugim wypadku, splątanie próżniowe jest mniejsze.

Większość zawartych w rozprawie wyników została przez autora opublikowana w oryginalnych artykułach. Zarówno w nich, jak i w samej rozprawie doktorskiej, w części dotyczącej splątania próżniowego, ujrzałbym chętnie odniesienie do (przytoczonego w bibliografii) artykułu Saltona, Manna i Menicucciego (New J. Phys. 17, 035001 (2015)) oraz niecytowanej pracy Reznika (Found. Phys. 33, 167 (2002)) poświęconych podobnym problemom. Nie mniej przeto, uważam, że bibliografia rozprawy jest obszerna i reprezentatywna.

Poza wspomnianymi powyżej nie mam zastrzeżeń dotyczących konstrukcji i redakcji pracy. Czyta się ją dobrze, wywód jest logiczny i systematyczny, cele i wnioski sformułowane są jasno. Całość, zarówno pod względem merytorycznym i formalnym oceniam bardzo wysoko, a wyniki uważam za oryginalne i ciekawe. Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością problematyki, zarówno w zakresie relatywistycznej kwantowej teorii pola jaki i informatyki kwantowej.

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska pana mgr. Krzysztofa Lorka pt. *Effects of uniform acceleration on quantum states and vacuum entanglement in relativistic quantum information* spełnia z nadlatkiem wszelkie wymagania formalne i zwyczajowe stawiane tego typu rozprawom i wnoszę o dopuszczenie jej autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Warszawa, 28.02.2018

prof. dr hab. Marek Kuś