

Prof. dr hab. Paweł Horodecki
Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej
Politechnika Gdańska
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

Gdańsk, 11.04.2018

DZIEKANAT WYDZIAŁU FIZYKI
WPŁYNEŁO

2018 -04- 13

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Krzysztofa Lorka pt. „Effects
of uniform acceleration on quantum states and vacuum entanglement in relativistic
quantum physics”**

Rozprawa magistra Krzysztofa Lorka mieści się w gałęzi fizyki nazywanej relatywistyczną informacją kwantową. Jest to dziedzina z pogranicza teorii względności i optyki kwantowej, która czerpie szeroko z metod teorii-informacyjnych rozwiniętych w ciągu ostatnich dwudziestu lat na gruncie mechaniki kwantowej. Rozprawa oparta jest na publikacjach wspólnych autora, jego promotora dr hab. Andrzeja Dragana oraz ich współpracowników, przy czym doktorant jest pierwszym autorem dwóch z nich oraz drugim w pozostałych. Prace ukazały się na łamach renomowanych czasopism naukowych: Physical Review D (dwie), Physical Review A oraz Classical and Quantum Gravity. Rozprawa zawiera również wyniki niepublikowane.

Omawiana praca doktorska rozpoczyna się wstępem, w którym na tle osiągnięć fizyki XX wieku autor sytuje rozwój relatywistycznej teorii informacji, pokrótce prezentuje zamysł pracy, jej układ i zasadnicze wyniki. W obszernej części pierwszej autor przypomina podstawowe elementy teorii kwantowego splątania ze szczególnym uwzględnieniem stanów gaussowskich. Następnie omawia współrzędne Minkowskiego i Rindlera, po czym przedstawia podstawowe elementy teorii pola w układzie inercjalnym i jednostajnie przyspieszonym, kładąc szczególny nacisk na stany pola we wnętrzu w dwóch wariantach warunków brzegowych (periodycznych i Dirichleta). Ostatni z rozdziałów części pierwszej jest poświęcony efektowi Unruha. Część druga zawiera wyniki oryginalne dotyczące zagadnienia przyspieszającego zegara. Postawiono tu podstawowe pytanie, mianowicie, czy istnieje zegar, który mierzy czas własny w układzie przyspieszającym niezależnie od ruchu, który jest jego udziałem. Rozważono najprostszy model takiego zegara bazującego na linowym sprzężeniu stanu bozonowego bezmasowego pola wnętrza z masowym polem określonym w całej przestrzeni. W pierwszym rzędzie rachunku zaburzeń obliczono prawdopodobieństwo detekcji wzbudzenia pola zewnętrznego i wykazano, że przypadki układu inercjalnego i przyspieszającego są różne, a także w ramach testu zbadano granicę zerowego przyspieszania. W konkluzji zaobserwowano, że nie istnieje zegar, którym można by mierzyć czas własny bez znajomości jego trajektorii. Nie kwestionując samego wyniku uzyskanego w ramach określonych założeń, warto pamiętać, że pojęcie trajektorii zegara jest w kontekście mechaniki kwantowej zawsze obciążone pewną słabością.

Część trzecią autor poświęcił oryginalnym wynikom dotyczącym skutków jednostajnego przyspieszenia w odniesieniu do dwumodowych stanów gaussowskich. W tym celu

zmodyfikowano współrzędne Rindlera, aby mieć swobodę w wyborze początkowej odległości obu wyróżnionych, przestrzeniopodobnych obszarów. Wyprowadzono strukturę macierzy wariancji stanu gaussowskiego, a następnie zaprezentowano wyniki dla przypadku $1 + 1$. Wybrano specjalne kształty modów, aby były tak dobrze zlokalizowane, żeby przypisanie im przyspieszenia miało sens, a także w celu uniknięcia wkładu od ujemnych częstości. W wyniku obliczeń numerycznych uzyskano dla obserwatorów poruszających się przeciwbieżnie splątanie symetrycznie monotoniczne względem obu przyspieszeń oraz potwierdzono poznane wcześniej zachowanie splątania, które w takim wypadku rośnie wraz ze spadkiem częstości i odległości regionów. Zasadniczym rezultatem tego rozdziału jest wykrycie nietypowego zachowania - gwałtownego zniknięcia splątania powyżej pewnej odległości początkowej D . Dochowano staranności w analizie wyników sprawdzając, czy przejścia graniczne ze względu na odległość reprodukuja odpowiednie wielkości. Podano informację, że dla obserwatorów poruszających się w tym samym kierunku w zakresie przyspieszeń, które uznano za sensowne fizycznie, nie zaobserwowano splątania.

W końcowej części rozdziału wspomniano, że transformację z układu inercjalnego do nieinercjalnego można też zastosować do innych stanów początkowych, w tym dwumodowego stanu ścięsnionego. Wzmiankuje się tu nieco pobieżnie, że zaobserwowano spadek tzw. wierności związany głównie ze zmianą charakterystyki modów pod wpływem przyspieszenia.

Badania powtórzono dla przypadku $3 + 1$ otrzymując podobne wyniki jeżeli chodzi o zależność splątania od przyspieszeń i rozmiaru pakietu w kierunku ruchu. W tym przypadku jednak pakiet miał także poprzeczny rozmiar oraz poprzeczny wektor falowy. Okazuje się, że aby uzyskać więcej splątania warto zmniejszać rozmiar, ale zwiększać długość poprzecznego wektora falowego. Nasuwa się pytanie, czy istnieje jakieś intuicyjne wyjaśnienie tego zjawiska.

Krótko wspomniano również, że w analogii do przypadku $1 + 1$ przypadek współbieżnych obserwatorów także nie pokazuje splątania w interesujących przypadkach. Szkoda, że autor nie precyzuje tu - podobnie jak i w rozdziale 7.7 - jakie rzędy przyspieszeń i jakie ich różnice, byłyby wystarczające do zaobserwowania splątania w tym przypadku. Wspomniano tutaj natomiast, jak można by kontynuować bieżące badania rozciągając je na przypadek obserwatorów poruszających się względem siebie pod pewnym kątem.

Kolejnym procesem było zbadanie analogicznego do powyższych efektu dla spinorowych pól Diraca $1 + 1$. W związku z trudnością przy obliczaniu miary ujemności w przypadku gaussowskich stanów fermionowych posłużono się ograniczeniem dolnym. Uzyskano podobne efekty, jednak wyliczona wielkość jest o 7 rzędów wielkości mniejsza niż splątanie uzyskane dla stanów bozonowych. Autor słusznie zwraca uwagę, że rezultat ten można by przypisywać zarówno innej statystyce, jak i faktowi użycia ograniczenia dolnego badanej wielkości, co uniemożliwia chwilowo konkluzję czy mamy do czynienia z efektem fizycznym.

Ostatnia część doktoratu jest poświęcona splątaniu trójcząstkowemu stanu próżni bez przyspieszenia. Koncepcja detekcji dwucząstkowego splątania stanu próżni pojawiła się w pracy B. Reznika [Found. Phys. (2003)] i była następnie rozwinięta w pracach B. Reznika i współpracowników [B. Reznik et al. Phys. Rev. A 71, 042104 (2005)] oraz R. Verscha i R. F. Wernera [Rev. Math. Phys. 17, 545 (2005)]. *Nota bene* ta ostatnia praca powinna być przytoczona w bibliografii jako praca klasyczna z dziedziny, o której mowa w rozprawie.

W ostatniej, czwartej części doktoratu zaprezentowano schemat detekcji splątania próżni przy pomocy trzech detektorów typu Unruha - De Witta o tej samej częstotliwości Ω oddziałujących z bozonowym polem zewnętrznym. Badania te są inspirowane, in. wcześniejszymi wynikami J. Silmana i B. Reznika [Phys. Rev. A 71, 054301 (2005)] oraz E. G. Browna i współpracowników [Phys. Rev. D 87, 084062 (2013)]. W rozprawie zaproponowano położenie detektorów, które dla periodycznych warunków brzegowych gwarantuje symetrię permutacyjną. Własność ta nie stosuje się do warunków brzegowych Dirichleta. Liniowy charakter sprzężenia w detektorze oraz ogólna charakterystyka układu pozwala na operowanie formalizmem stanów gaussowskich. Dla przypadku symetrycznego przeprowadzono analizę ewolucji wybranego parametru splątania stanu próżni w zależności od częstotliwości detektorów przy początkowym stanie o wariancji identycznościowej. Ponadto zbadano zależność wartości tego parametru od rozmiaru wnęki. Badanym parametrem była średnia geometryczna splątania pojedynczych modów z dwoma pozostałymi, przy czym w obliczeniach skorzystano z lokalnej unitarnej niezmienniczości splątania. Trafnie wydzielono przypadek przestrzeniopodobnej lokalizacji detektorów, dla której zaobserwowano detekcję splątania. We wszystkich zależnościach jakościowy kształt parametru splątania jest w pewnym stopniu podobny do splątania dwóch modów, co pozostaje zgodne z obserwacją autora, że mamy tu do czynienia ze splątaniem typu W (w rzeczy samej trójciałowe funkcje korelacji w stanie próżni znikają). W przypadku warunków brzegowych Dirichleta uzyskano jakościową zgodność co do splątania dwucząstkowego, choć było ono mniejsze. Zrezygnowano z badania splątania trójcząstkowego, ze względu na brak symetrii, który uniemożliwił otrzymanie formuły analitycznej.

W omawianym rozdziale nie zamieszczono niestety wzmianki o wcześniejszej (wspomnianej powyżej) pracy Silmana i Reznika, którzy badali detekcję splątania typu W ze stanu próżni z pomocą detektorów. Co prawda wyniki poprzedników dotyczyły przypadku bez wnęki i miały charakter perturbacyjny. Ważne, że autor podał rozwiązanie o charakterze nieperturbacyjnym i dużo bliższe ewentualnej realizacji eksperymentalnej lub jej symulacji z pomocą analogicznego układu fizycznego. Wypadało jednak wspomnieć o pionierskiej pracy obu badaczy - ta nie pojawia się w ogóle w bibliografii. Fakt ten wynika prawdopodobnie z przeoczenia, bo w publikacji stanowiącej podstawę części czwartej rozprawy [1] bieżące wyniki rzetelnie porównano z rezultatami poprzedników przytaczając m. in. pozycję bibliograficzną [8]. Kończąc omówienie treści pracy, wspomnijmy jeszcze, że rozprawę kończą krótkie konkluzje oraz dwa dodatki matematyczne.

Oprócz uwag zawartych w powyższym omówieniu, przed ostateczną oceną pracy można dorzucić kilka spostrzeżeń. Analiza splątania trójcząstkowego z pomocą średniej geometrycznej i operacji lokalnych jest trafnym pomysłem. Warto na marginesie zwrócić uwagę, że można również było zastosować wielkość proponowaną przez Adesso i współpracowników (ang. *cotangle*) w obu wersjach (gaussowskiej i ogólnej). Dla dobra czytelnika można było też zamieścić jakąś uwagę o ograniczonym charakterze analogii podziału GHZ/W dla przypadku stanów Gaussowskich (por. rozdział 4 pracy [G. Adesso, F. Illuminati, New J. Phys. 8, 15 (2006)]). Czytając pracę odnosi się ogólne wrażenie, że zyskałaby ona na umieszczeniu kilku dodatkowych pozycji bibliograficznych, które poszerzałyby ogólną perspektywę rozważań (mogłoby się tu pojawić np. odniesienie do znanej pracy Ashera

Peresa o kwantowych zegarach [Am. J. of Phys. 48, 552 (1980)] czy też niedawna publikacja P. Erkera i współpracowników [Phys. Rev. X 7, 031022 (2017)]).

Wydaje się, że konkluzja „this strongly suggests that there is no vacuum entanglement within parallel accelerations setup, in the regime whereby (...) are much smaller than unity” ma charakter tautologii (pierwszy akapit str. 84). W rzeczy samej niewielka wartość splątania dla małych parametrów N jest własnością dwumodowego splątania *per se*, niezależną od źródła ich pochodzenia tj. przyspieszenia (w przypadku gdy parametry te znikają mamy do czynienia z sumą prostą wariancji). Sensownym byłoby tu chyba stwierdzenie, że dla rozważanych przypadków i fizycznie interesujących zakresów przyspieszeń (jakich ?) te parametry są małe. Na pochwałę zasługuje systematyczne analityczne sprawdzanie, czy wyniki rzeczywiście nie zależą od niefizycznego, arbitralnego parametru a , a także m. in. sprawdzanie zgodności formuł przy przejściach granicznych z parametrem odległości. W rzeczy samej w rozprawie przeprowadzanie tego rodzaju testów poprawności przyjęto za element swoistej metody, co należy cenić w czasach, gdy często testy komputerowe uznaje się za wystarczające.

W ramach uwag natury ogólnej wypada wspomnieć, że w rozprawie używa się zasadniczo metod relatywistycznej teorii informacji znanych z prac poprzedników. Autor pokazał, że potrafi swobodnie operować tymi technikami, uzyskując wartościowe wyniki. Dysertacja jest napisana w sposób bardzo przejrzysty, w szczególności układ rozdziałów jest przemyślany. Niewielka ilość usterek typograficznych nie wpływa zupełnie na pozytywną ocenę formalnej strony rozprawy.

Po przeczytaniu rozprawy nasuwają się jeszcze pewne „nadobowiązkowe” pytania. Czy za różnicą w nachyleniu rys. 7.6, 8.3 kryje się jakaś poważniejsza różnica jakościowa między przypadkami jedno- i trzywymiarowym, czy jest tylko rezultatem takiego, a nie innego wyboru pozostałych parametrów ? Czy istnieje jakaś szansa na porównanie ilościowe i jakościowe detekcji splątania stanu próżni w przypadku z wnęką i bez w kontekście wyniku Silmana i Reznika ? Czy można wskazać jakiś bliższy jakościowy i ilościowy związek rezultatów uzyskanych w części czwartej z efektem Casimira jako takim ? Wydaje się bowiem, że obecność wnęki silnie determinuje tu uzyskane własności splątania.

Rozprawę doktorską mgr. Krzysztofa Lorka oceniam pozytywnie. Badanie wykluczające szansę na idealnie działający model pewnego zegara należy do zakresu nauki *par excellence*, gdzie pyta się o naturę rzeczy, niekoniecznie ze względu na potencjalne zastosowanie praktyczne. Wyniki dotyczące detekcji splątania przez dwóch przyspieszających obserwatorów porządkują wiedzę o tego typu efektach. Obserwacja dotycząca całkowitego zaniku splątania jest sama w sobie interesująca, a otwarte pytanie o faktyczne wartości splątania w przypadku pola spinorowego może stanowić inspirację do dalszych badań. Detekcja splątania przez detektory we wnęce stanowi wartościowy wynik, który może mieć swoje kontynuacje ukierunkowane w stronę ewentualnych doświadczeń. W podsumowaniu pragnę stwierdzić, iż w moim przekonaniu rozprawa doktorska mgr. Krzysztofa Lorka spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i tym samym wnioskuję o dopuszczenie jej autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

