

Autoreferat

25 marca 2014

1 Imię i Nazwisko.

Andrzej Dragan

2 Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- Doktor nauk fizycznych w zakresie fizyki (wyróżnienie), *Uniwersytet Warszawski*, Warszawa 2006. Tytuł rozprawy: *Single photon communication through noisy quantum channels*. Promotor: prof. dr hab. Krzysztof Wódkiewicz.
- Magister fizyki teoretycznej (wyróżnienie), *Uniwersytet Warszawski*, Warszawa 2001. Tytuł pracy: *Homodynamiczne nierówności Bella dla optycznych stanów typu kota Schrödingera*. Promotor: dr Konrad Banaszek.

3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych.

- 2010-2012: *Research Fellow* w *University of Nottingham*.

- 2008-2009: *Research Fellow w Imperial College London.*
- 2006-obecnie: Adiunkt, *Instytut Fizyki Teoretycznej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski.*
- 2003-2004: *Sekretarz Naukowy Komitetu Głównego Olimpiady Fizycznej.*

4 Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

Cykl publikacji: *Relatywistyczna Informacja Kwantowa.*

b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa)

- [1] A. Dragan, J. Doukas, E. Martin-Martinez, and D. E. Bruschi, *Localized projective measurement of a quantum field in non-inertial frames*, *Class. Quantum Grav.* **30**, 235006 (2013).
- [2] D. E. Bruschi, A. Dragan, A. Lee, I. Fuentes, and J. Louko, *Relativistic Motion Generates Quantum Gates and Entanglement Resonances*, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 090504 (2013).
- [3] A. Dragan, J. Doukas, and E. Martin-Martinez, *Localized detection of quantum entanglement through the event horizon*, *Phys. Rev. A* **87** 052326 (2013).
- [4] J. Doukas, E. G. Brown, A. Dragan, and R. B. Mann, *Entanglement and discord: Accelerated observations of local and global modes*, *Phys. Rev. A* **87**, 012306 (2013).

- [5] D. E. Bruschi, A. Dragan, I. Fuentes, J. Louko, *Particle and antiparticle bosonic entanglement in noninertial frames*, Phys. Rev. D **86**, 025026 (2012).
- [6] A. Dragan, I. Fuentes, and J. Louko, *Quantum accelerometer: Distinguishing inertial Bob from his accelerated twin Rob by a local measurement*, Phys. Rev. D **83**, 085020 (2011).
- [7] D. E. Bruschi, J. Louko, E. Martin-Martinez, A. Dragan, and I. Fuentes, *Unruh effect in quantum information beyond the single-mode approximation*, Phys. Rev. A **82**, 042332 (2010).

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Wymienione powyżej publikacje [1-7] stanowią cykl prac będących podstawą niniejszego wniosku habilitacyjnego, natomiast referencje [8-23] odnoszą się do pozostałych prac wnioskującego, nie należących do cyklu. Wprowadzenie do tematyki badawczej znajduje się w rozdziale wstępnym 4.1, zagadnienie zależności splątania od układu odniesienia omówione jest w rozdziale 4.2, rozdział 4.3 przedstawia ideę bramek kwantowych sterowanych ruchem, w rozdziale 4.4 przedstawiono pracę dotyczącą kwantowego badania nieinercjalności układu odniesienia, a rozdział 4.5 stanowi podsumowanie przedstawionych wyników.

4.1 Wstęp

Teoria Informacji kwantowej zapoczątkowana w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku odniosła wielki sukces. Obecnie jest to jedna z najważniejszych dziedzin współczesnej fizyki, zarówno teoretycznej, jak i doświadczalnej. Zagadnienia dotyczące nielokalności kwantowej, teleportacji, kryptografii, estymacji, komunikacji, czy obliczeń kwantowych są badane w większości wiodących ośrodków badawczych na świecie. Wyniki doświadczalne uzyskiwane w oparciu o teorię kwantowej informacji od wielu lat znajdują już praktyczne zastosowania komercyjne, podstawowe eksperymenty wykonywane są już w skalach sięgających kilkuset

kilometrów, a idea zbudowania komputera kwantowego stanowi jeden z najważniejszych celów współczesnej nauki. Sama teoria informacji kwantowej stanowi uogólnienie rozwijanej od dziesięcioleci klasycznej teorii informacji wywodzącej się z prac Shannona. Uogólnienie to polegało na uwzględnieniu w opisie sytuacji fizycznej zjawisk kwantowych i zastąpieniu klasycznego pojęcia *bitu* przez *qubit* - podstawową jednostkę informacji zakodowanej w elementarnym stanie układu kwantowego. Zmiana paradygmatu pozwoliła nie tylko uogólnić wcześniejsze rezultaty, ale przede wszystkim odkryć nowe możliwości w teorii informacji, które nie byłyby możliwe w fizyce klasycznej. Doskonałym przykładem są protokoły kryptografii kwantowej, które pozwalają na szyfrowanie przesyłanej informacji niemożliwe do złamania ze względu na fundamentalne ograniczenia teorii kwantowej. Mogło się pierwotnie wydawać, że teoria kwantowa może jedynie prowadzić do nowych ograniczeń, wynikających chociażby z zasady nieoznaczoności Heisenberga. Okazało się jednak, że użyta w sposób kreatywny teoria kwantowa pozwoliła stworzyć zupełnie nowe protokoły, które w fizyce klasycznej byłyby niemożliwe do zrealizowania.

Rzeczywistość jest jednak nie tylko kwantowa, ale również relatywistyczna. Pojawia się zatem pytanie, w jaki sposób teoria względności wpływa na zagadnienia informacji kwantowej. Czy prowadzi ona do nowych ograniczeń, czy też może również prowadzić do poprawienia dotychczasowych rezultatów, a nawet złamania narzuconych przez teorię niereleatywistyczną ograniczeń? Niemal wszystkie ważniejsze wyniki teorii informacji kwantowej uzyskane zostały w przybliżeniu nierelatywistycznym lub przy założeniu, że cały schemat osadzony jest w ustalonym, inercjalnym układzie odniesienia. W większości przypadków nie jest jasne, w jaki sposób uzyskane wyniki zmieniają się, gdyby dopuścić ruch obserwatorów lub efekty grawitacyjne. Często samo sformułowanie danego zagadnienia w języku relatywistycznym, czyli operującym pojęciami kwantowej teorii pola, może już stanowić problem. Pytanie, które więc warto postawić na początku, czy warto podejmować aż taki wysiłek? Efekty relatywistyczne w większości przeprowadzanych eksperymentów są przecież zaniedbywalne.

Należy w związku z tym zwrócić uwagę na kilka interesujących faktów. Jak wiadomo, efekty relatywistyczne ogólnej teorii względności odgrywają kluczową rolę w osiągnięciu wysokiej precyzji urządzeń systemu *GPS*. Bez uwzględnienia poprawek relatywistycznych pozycjonowanie odbiorników satelitarnych obarczone byłoby ogromnym błędem. Istnieje za-

tem poważna przesłanka sugerująca, by uważnie badać wpływ tych i podobnych efektów na eksperymenty kwantowe wykonywane w coraz większych skalach. Z chwilą, gdy urządzenia *GPS* zastąpione zostaną ulepszonymi wersjami kwantowymi, wiedza ta, z pewnością będzie już absolutnie niezbędna.

Istnieje jednak wiele innych powodów wskazujących na potrzebę uogólnienia teorii informacji kwantowej na przypadek relatywistyczny. Słynna praca Hawkinga [24] na temat parowania czarnych dziur wydaje się sugerować, że sama informacja kwantowa nie musi być wcale wielkością zachowaną we wszystkich procesach fizycznych. Istnieją przesłanki sugerujące, że w pewnych skrajnych sytuacjach informacja może bezpowrotnie ginąć, a zatem ewoluować w sposób nieunitarny. W obecnym sformułowaniu teorii informacji kwantowej, wariant taki jest absolutnie wykluczony. Jeśli hipoteza Hawkinga o ginięciu informacji kwantowej w czarnej dziurze okazałaby się prawdziwa, cała obecna teoria informacji kwantowej stanowiłaby jedynie pewne przybliżenie nieznannej, relatywistycznej teorii informacji kwantowej. Czy zatem może istnieć ważniejsza, z punktu widzenia tej teorii obserwacja?

Wiemy ponadto, że sam stan kwantowy, znajdujący się w centrum zainteresowania teorii informacji, zmienia się w sposób nietrywialny przy zmianie układu odniesienia na nieinercjalny. Przykładem tego zjawiska jest efekt Unruha [?], zgodnie z którym próżnia pola kwantowego dla jednego obserwatora inercjalnego jest stanem termicznym wypełnionym cząstkami dla innego, jednostajnie przyspieszanego obserwatora. Fakt ten ma trudny do przecenienia wpływ na konstrukcję i opis protokołów informacji kwantowej przez dowolnych, a nie wyłącznie spoczywających, obserwatorów. Wydaje się, że uwzględnienie ruchu obserwatorów biorących udział w protokole kwantowym, a także wpływ efektów grawitacyjnych może mieć w pewnych okolicznościach istotny wpływ na większość znanych wyników.

Można również stawiać konstruktywne pytania: czy teoria względności może dostarczyć sposobów na poprawienie skuteczności znanych protokołów informacji kwantowej? Interesującym przykładem jest tak zwane zjawisko splątania próżni [26]. Wiadomo, że stan próżni relatywistycznego pola kwantowego obserwowanego z nieinercjalnych układów odniesienia ujawnia bogatą strukturę zawierającą splątanie. W różnych modelach oddziaływania materii z polem kwantowym można wykazać, że splątanie to można wydobyć i użyć następnie w protokołach komunikacyjnych, takich jak teleportacja. Oznacza to, że teoria relatywistyczna dostarcza sposobu na korzystanie z nowych zasobów kwantowych zupełnie niedo-

stępnym w wersji nierelatywistycznej. Warto więc zadać pytanie o praktyczną możliwość wykorzystania tego typu zasobów w realnej fizycznej sytuacji.

Niniejsza rozprawa przedstawia szereg nowych wyników dotyczących relatywistycznego rozszerzenia teorii informacji kwantowej i stanowi krok w stronę pełnego zrozumienia pojęcia informacji i jego związku z podstawowymi prawami fizyki. W przedstawionych tu pracach stawiamy i rozwiązujemy problemy znajdujące się na froncie współczesnych badań z zakresu relatywistycznej informacji kwantowej. Staramy się również kłaść nacisk na nadanie otrzymany wynikom sensu operacyjnego, a w niektórych przypadkach wskazujemy na związek z możliwymi do przeprowadzenia obecnie lub nieodległej przyszłości eksperymentami pozwalającymi na empiryczną weryfikację wyników.

4.2 Zależność splątania od obserwatora

Jednym z najbardziej fundamentalnych zagadnień z punktu widzenia teorii informacji kwantowej jest zależność stanu kwantowego od obserwatora. Załóżmy, że pewien obserwator przygotowuje dany stan kwantowy, a inny obserwator go mierzy. Wówczas w ogólności otrzymywane wyniki będą zależały od ruchu względnego lub przyspieszenia bezwzględnego obu układów odniesienia, co ma szczególnie ważne znaczenie w protokołach komunikacyjnych. Jeśli pewien stan splątany dwóch podukładów użyty jest do teleportacji informacji pomiędzy dwoma obserwatorami znajdującymi się w różnych układach odniesienia, sprawność teleportacji może bezpośrednio zależeć od wspomnianego ruchu [27]. Zagadnienie to jest szczególnie interesujące w wariancie, gdy jeden z obserwatorów spoczywa, a drugi podlega ruchowi jednostajnie przyspieszonemu. Zgodnie z zasadą równoważności Einsteina rozważana sytuacja fizyczna jest równoważna sytuacji, gdy jeden z obserwatorów podlega wpływowi pola grawitacyjnego. Schemat ten pozwala zatem zbadać wpływ pola grawitacyjnego na splątanie kwantowe. Pierwsze prace na ten temat [28] zawierały, jak później się okazało, niemożliwe do spełnienia założenia i pierwszy, matematycznie poprawny opis zależności ilości splątania od przyspieszenia jednego z obserwatorów został podany w pracy [7]. W pracy tej rozważaliśmy maksymalnie splątany stan modów A i B skalarnego, rzeczywistego pola Kleina-Gordona zakładając, że mod A mierzony jest przez inercjalnego obserwatora, który również przygotował stan obu modów, zaś mod B podlega pomiarom

przeprowadzanym przez obserwatora poruszającego się relatywistycznym ruchem jednostajnie przyspieszonym. Transformację Bogoliubowa przekształcającą stan z układu inercjalnego (Minkowskiego) do układu jednostajnie przyspieszonego (Rindlera) można rozbić na dwa etapy wprowadzając pośrednią bazę modów (Unruha), posiadającą ten sam stan próżni, co baza modów Minkowskiego. Mody Unruha mają tę własność, że transformacja Bogoliubowa $M \rightarrow U$ jest zmianą bazy modów pola nie mieszającą częstości dodatnich i ujemnych, natomiast transformacja $U \rightarrow R$ jest diagonalna (nie miesza pomiędzy sobą częstości dodatnich), ale zmienia stan próżni. Ponadto matematyczna postać transformacji $U \rightarrow R$ jest szczególnie prosta w obliczeniach, zatem wygodnie jest badać stan kwantowy wyrażony w bazie modów Unruha, by następnie transformować jego część do układu przyspieszonego. Zaproponowana przez nas metoda okazała się nie tylko bardzo skuteczna i prosta w rachunkach, ale poddała się łatwym uogólnieniom na inne typy pól i stanów [29]. Przebadaliśmy pola spinorowe, a także skalary Grassmana, a w pracy [5] rozszerzyliśmy analizę na zespolone pola skalarne dopuszczając ładunek elektryczny odróżniający cząstki od antycząstek.

Uzyskane wyniki pozwoliły lepiej zrozumieć strukturę matematyczną efektu Unruha i związanego z nim zjawiska degradacji splątania pod wpływem przyspieszenia lub grawitacji. Wciąż jednak brakowało kilku ważnych kroków do pełnego zrozumienia wszystkich aspektów tego zjawiska. Przede wszystkim mody Unruha są, podobnie jak fale płaskie, modami globalnymi, w dodatku o bardzo skomplikowanej strukturze przestrzennej, w zasadzie niemożliwej do eksperymentalnego przygotowania. Byłoby o wiele bardziej pożądane, żeby rozważane stany splątane były przygotowane dla pary zlokalizowanej w przestrzeni modów, nawet jeśli paczki falowe miałyby jedynie odpowiednio szybko zanikać w nieskończoności. Lokalizacja modów pozwoliłaby na o wiele czytelniejszą interpretację fizyczną wyników, bo przyspieszenie własne w układzie Rindlera zależy od położenia. Ponadto, schemat matematyczny użyty w pracach [7, 5] pozwalał jedynie na analizę splątania danego stanu w układzie Rindlera dla pojedynczej wartości przyspieszenia. Zatem dla każdego przyspieszenia konieczne było rozważenie innego stanu. Warto byłoby więc znaleźć schemat, w którym rozważany, zlokalizowany stan splątany mógłby być analizowany przez obserwatorów poruszających się z dowolnymi przyspieszeniami. Model takiego pomiaru został wprowadzony i zbadany w pracy [1]. Rozważyliśmy rozkład operatora pola zawierający zlokalizowane

(z dokładnością do szybko zanikających ogonów) paczki falowe, których stan był badany przez parę obserwatorów, z których jeden spoczywał, a drugi poruszał się z dowolnym przyspieszeniem własnym. Ze względu na fakt, że transformacja Bogoliubowa jest liniowa, zaproponowany model szczególnie dogodnie nadaje się do opisu stanów gaussowskich, których rodzina jest niezmiennicza ze względu na przekształcenia liniowe. Najprostszym stanem gaussowskim jest stan próżni pola kwantowego, którego własności zostały zbadane, a następnie porównane ze znanymi z literatury rezultatami otrzymanymi innymi metodami [30]. Na poziomie zlokalizowanych modów zbadaliśmy między innymi efekt Unruha, a także zjawisko splątania próżni i zależność obserwowanego splątania od przyspieszenia detektorów. Oprócz pełnej zgodności uzyskanych wyników w obszarze stosowalności wszystkich modeli, wyznaczyliśmy również nieznaną wcześniej poprawkę do efektu Unruha wynikającą z rozważania układu pomiarowego skończonych rozmiarów.

Model pomiaru stanu pola w układzie jednostajnie przyspieszonym posłużył nam do zbadania zależności splątania od ruchu obserwatora. W pracy [3] rozważony został dwumodowy stan ściśnięty pary zlokalizowanych modów przygotowanych w inercyjnym układzie odniesienia. Następnie jeden z modów zmierzony został przez spoczywające w tym układzie urządzenie pomiarowe, zaś drugi mod zmierzony został przez identyczny detektor, lecz poruszający się z dowolnym przyspieszeniem. Przeprowadzona analiza wykazała, w jaki sposób mierzone splątanie zanika ze wzrostem przyspieszenia własnego jednego z detektorów. Okazało się, że w granicy dużych przyspieszeń splątanie zanika zupełnie. Postawiliśmy jednak również drugie pytanie: czy możliwe jest skompensowanie efektów związanych z przyspieszeniem detektora przez przyspieszającego obserwatora w taki sposób, by wydobyć jak najwięcej splątania z rozważanego stanu. Rozważaliśmy w tym celu przyspieszający detektor, którego właściwości mogą być modyfikowane w zależności od przyspieszenia i zoptimalizowaliśmy jego charakterystykę pod kątem maksymalizacji wykrywanego splątania. Okazało się, że degradacja splątania w dużym zakresie przyspieszeń może być niemal w całości skompensowana. Dopiero dla przyspieszeń, dla których rozważane mody nieuchronnie zaczynają zanurzać się pod horyzontem zdarzeń, który zbliża się do przyspieszającego detektora wraz ze wzrostem przyspieszenia, ilość otrzymywanego splątania zaczynała się istotnie zmniejszać. Co ciekawe, w granicy nieskończenie dużych przyspieszeń część pierwotnego splątania pozostała wciąż mierzalna, gdyż z powodów geometrycznych jedynie

połowa rozważanego modu może zniknąć za horyzontem zdarzeń. Zatem część modu zawsze pozostanie w zasięgu przyczynowym przyspieszanego detektora, dzięki czemu nawet w granicy nieskończenie dużych przyspieszeń pewna ilość splątania będzie wciąż mierzalna. Wynik ten jest inny od rezultatów analizy przeprowadzonej z wykorzystaniem globalnych modów Unruha, co pokazuje, z jak dużą uwagą należy podchodzić do zagadnienia lokalizacji badanego stanu kwantowego. Pojawiające się różnice związane z lokalizacją modów zostały szczegółowo przeanalizowane i wyjaśnione w pracy [4], gdzie znajduje się również szczegółowe studium zależności nie tylko splątania, ale również dyskordu (ang. *discord*) od ruchu obserwatora zarówno w przypadku modów zlokalizowanych, jak i modów globalnych.

Opisany w niniejszym podrozdziale ciąg prac [1, 3, 4, 5, 7] stanowi pierwszy kompletny opis zjawiska degradacji splątania w przyspieszanych układach odniesienia i wyjaśnia różnice pomiędzy sformułowaniem globalnym i lokalnym problemu. Warto podkreślić, że dla stanów gaussowskich wprowadzony przez nas opis pozwala dokonywać ścisłych rachunków na poziomie macierzy kowariancji, która w pełni charakteryzuje stan kwantowy. Zatem pełna sytuacja fizyczna przedstawiona w pracach [1, 3, 4] jest scharakteryzowana poprzez podanie symplektycznej macierzy kowariancji o wymiarze 4, reprezentującej dwa mody pola kwantowego mierzone przez dwóch różnych obserwatorów.

4.3 Bramki kwantowe generowane ruchem

Jedną z koncepcji, która przyczyniła się do rozkwitu teorii informacji kwantowej jest idea komputera kwantowego, czyli urządzenia działającego w oparciu o prawa mechaniki kwantowej, a nie klasyczną logikę binarną. Pojęcie bitu zastąpione jest tu pojęciem *qubitu*, dzięki czemu w teorii komputer kwantowy mógłby uzyskiwać moce obliczeniowe nieosiągalne przy obecnych technologiach. Na przykład algorytm kwantowy służący do rozkładu dużych liczb na liczby pierwsze umożliwiłby szybkie złamanie wielu ważnych systemów bezpieczeństwa, na których bazuje współczesna kryptografia. Podobnie jak komputer klasyczny, komputer kwantowy bazuje na układzie bramek zmieniających stany wejściowe qubitów, zaś z kilku podstawowych rodzajów bramek możliwe jest zbudowanie dowolnego algorytmu. Bramki dwuqubitowe zbudowane są w praktyce w oparciu o mechanizmy oddziaływania dwóch układów kwantowych, dzięki czemu stan wejściowy dwóch qubitów podlega zadanej ewolu-

cji. Istniejące oddziaływania muszą być wystarczająco silne, żeby qubity ulegały splątaniu, jednakże trudno wówczas w pełni wyeliminować oddziaływania z otoczeniem, które wprowadza niepożądaną dekoherencję mającą zabójczy wpływ na przeprowadzane obliczenia. Głównym obecnie wyzwaniem związanym z budową komputera kwantowego jest zmniejszenie wpływu otoczenia na prowadzone obliczenia oraz sformułowanie skutecznych i możliwych do zaimplementowania algorytmów korekcji błędów, które muszą nieuchronnie się pojawiać.

W pracy [2] przedstawiona została idea zbudowania bramek kwantowych, które działałyby bez jakichkolwiek oddziaływań, co mogłoby pomóc ograniczyć wpływ otoczenia na badany układ. W zaproponowanym schemacie dwa stany wejściowe podlegają przekształceniu wprowadzającemu pomiędzy nimi splątanie wyłącznie za pomocą ruchu układów. Ten czysto relatywistyczny efekt nieosiągalny w teorii relatywistycznej został zaproponowany w oparciu o schemat wnęki rezonansowej, której lustra poruszają się wzdłuż kontrolowanych trajektorii klasycznych. Ruch wnęki powoduje, że stan pola kwantowego znajdującego się wewnątrz podlega transformacji zależnej od wyboru trajektorii. W pracy [2] pokazane zostało, w jaki sposób wykorzystać naturalne rezonanse związane z ruchem, by w sposób kontrolowany wytworzyć i wzmocnić splątane pomiędzy poszczególnymi modami wnęki rezonansowej. Ażeby uzyskane ilości splątania były mierzalne, konieczne do tego przyspieszenia a wnęki muszą sięgać wartości $a \propto \frac{c^2}{L}$, gdzie L jest długością wnęki, a c prędkością światła. Wartości te są praktycznie niemożliwe do uzyskania dla rzeczywistych wnęk, jednakże skorzystanie z naturalnych rezonansów pozwala wzmocnić nawet niewielkie ilości splątania generowane dla małych przyspieszeń. Można to osiągnąć poprzez cykliczne powtarzanie odpowiednio dobranego ruchu luster. W pracy [2] pokazaliśmy, jak należy dobrać trajektorie luster, by ilość splątania generowana we wnęce wrastała liniowo z liczbą cykli ruchu.

Wykorzystany w pracy [2] schemat bazuje ponownie na obserwacji, że transformacja Bogoliubowa odpowiedzialna za zmianę stanu kwantowego pod wpływem ruchu zachowuje rodzinę stanów gaussowskich. Dzięki temu obliczenia można prowadzić na poziomie macierzy kowariancji stanu, pod warunkiem, że stan początkowy układu jest również gaussowski. Obliczenia przeprowadzono dla wnęki znajdującej się początkowo w stanie próżni wszystkich modów charakteryzując stan końcowy pola wewnątrz wnęki i zawarte w nim

splątanie. Okazało się, że w dobrym przybliżeniu, dwa podstawowe mody wnęki przechodzą w czysty stan splątany pod wpływem zmian przyspieszenia. Uzyskany stan splątany, z dokładnością do operacji lokalnych jest dwumodowym stanem ściśniętym, a przedstawiony formalizm daje możliwość pełnej charakterystyki stanu końcowego w zależności od wyboru ruchu wnęki. Praktycznie oznacza to możliwość wzmacniania generowanego dwumodowego ściskania poprzez wykorzystanie naturalnych rezonansów relatywistycznego ruchu.

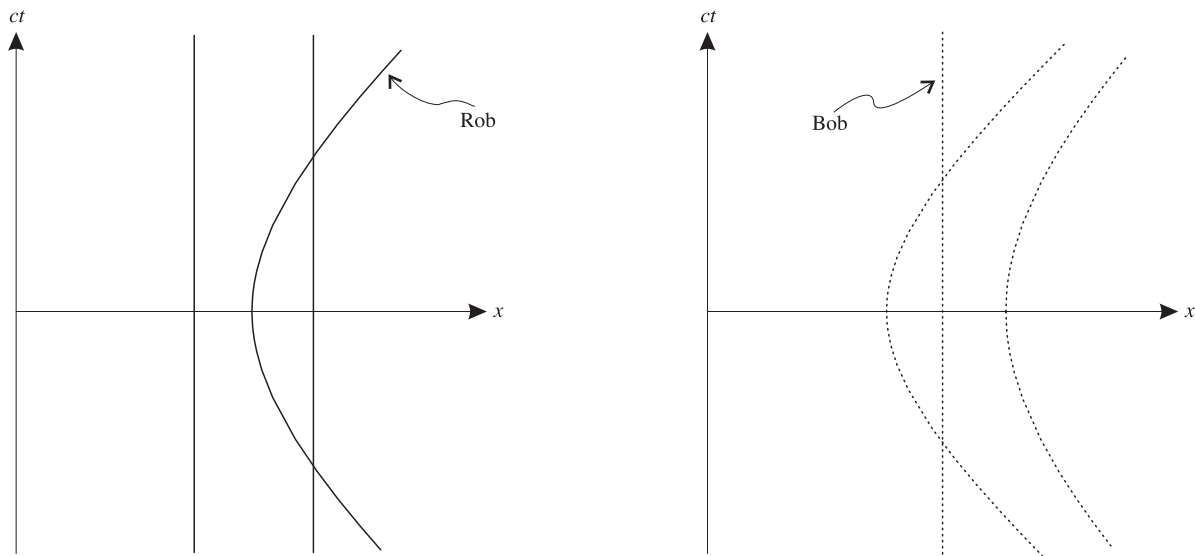
4.4 Badanie nieinercjalności układu odniesienia przy pomocy lokalnych pomiarów stanu pola

Zależność stanu kwantowego od ruchu obserwatora niesie różne interesujące konsekwencje. Jak pokazaliśmy w pracy [2], stan kwantowy pola może również podlegać zmianom, gdy wnęka rezonansowa zawierająca pole wprawiana jest w ruch przyspieszony. Zjawisko to można wykorzystać między innymi do wyznaczenia przyspieszenia obserwatora. W pracy [6] zbadana została możliwość wykorzystania tego efektu do wykrywania absolutnego przyspieszenia detektora cząstek. Rozważony został relatywistyczny model detektora typu Unruha-DeWitta [30], w którym urządzenie pomiarowe opisane jest pojedynczym kwantowym stopniem swobody charakteryzowanym operatorem anihilacji \hat{d} . Detektor ten ma w przybliżeniu punktowe położenie i podlega ruchowi wzdłuż zadanej z góry, klasycznej trajektorii. Opis detektora jest zatem kwaziklasyczny. Detektor ten oddziałuje z w pełni kwantowym, relatywistycznym polem skalarnym poprzez minimalne sprzężenie dane Hamiltonianem:

$$\hat{H}_I(\tau) \propto \epsilon(\tau)\hat{\phi}[x(\tau)]\left(\hat{d}e^{-i\omega\tau} + \hat{d}^\dagger e^{i\omega\tau}\right), \quad (1)$$

gdzie τ jest czasem własnym wzdłuż zadanej trajektorii $x(\tau)$ detektora, $\epsilon(\tau)$ jest zależną od czasu stałą sprzężenia, $\hat{\phi}$ jest operatorem pola, zaś ω jest częstością charakteryzującą detektor. W pracy [13] rozważone zostały dwa różne scenariusze ruchu przedstawione na rysunku 1.

W pierwszym scenariuszu jednostajnie przyspieszony detektor porusza się wewnątrz spoczywającej wnęki rezonansowej, jak przedstawiono to w lewej części rysunku 1. Stan początkowy wnęki według obserwatora spoczywającego jest stanem próżni, to znaczy wszyst-



Rysunek 1: Po lewej: jednostajnie przyspieszony obserwator Rob mierzy stan spoczywającej wnęki; po prawej: spoczywający obserwator Bob mierzy stan przyspieszającej wnęki.

kie mody własne wnęki są według niego nieobsadzone. Z punktu widzenia obserwatora poruszającego się przez wnękę z przyspieszeniem nie jest ona jednak pusta, lecz zawiera cząstki we wszystkich modach. Można się o tym przekonać badając stan końcowy detektora po opuszczeniu wnęki. Zakładamy przy tym, że stanem początkowym detektora był jego stan podstawowy, a oddziaływanie włączone zostało w momencie, gdy znalazł się on wewnątrz wnęki. W pracy [6] wyliczone zostało prawdopodobieństwo wzbudzenia detektora w chwili opuszczania przez niego wnęki, w zależności od przyspieszenia własnego. Obliczenia prowadzone były w pierwszym rzędzie rachunku zaburzeń.

Drugi scenariusz zakładał wariant odwrotny: spoczywający detektor trafia do przyspieszającej wnęki, która z punktu widzenia współporuszającego się z nią obserwatora jest początkowo pusta. Z punktu widzenia spoczywającego detektora, we wnęce są jednak cząstki, co można stwierdzić wyznaczając, podobnie jak w pierwszym scenariuszu, prawdopodobieństwo wzbudzenia detektora po opuszczeniu wnęki.

Dla niewielkich przyspieszeń własnych, gdy horyzont zdarzeń znajduje się daleko poza obszarem oddziaływania detektora z polem, oba scenariusze są kinetycznie równoważne. Z punktu widzenia obserwatora poruszającego się wraz z detektorem, w obu wariantach wnęka porusza się ze względnym przyspieszeniem początkowo zbliżając się, a następnie

oddalając od detektora. Pytanie, które postawione zostało w pracy [6], to w jakich okolicznościach prawdopodobieństwo wzbudzenia detektora w obu scenariuszach różni się. W wyniku obliczeń stwierdzono, że w przypadku, gdy wnęka rezonansowa w obu scenariuszach jest nieobsadzona (z punktu widzenia współporuszającego się obserwatora), a pole skalarne, które znajduje się w niej jest bezmasowe - oba scenariusze dają identyczny wynik w granicy małych przyspieszeń własnych. Podobnie jest, gdy wnęka (z punktu widzenia obserwatora współporuszającego się) zawiera cząstki w jednym z modów własnych. Sytuacja zmienia się dopiero, gdy pole we wnęce jest masowe. Co prawda, dla nieobsadzonych wnęk różnica pomiędzy obydwoma scenariuszami jest wciąż nieistotna, jednakże w sytuacji, gdy jeden z modów jest obsadzony, oba scenariusze stają się rozróżnialne. Oznacza to, że scenariusz pierwszy i drugi prowadzą do różnych prawdopodobieństw wzbudzenia detektora nawet dla niewielkich przyspieszeń tylko wtedy, gdy rozważane pole jest masowe, a wnęka zawiera cząstki (w rozważanym przypadku była ona w niezerowym stanie Foka jednego z modów). Wniosek ten stanowi ciekawy przyczynek do dyskusji o roli masy w teorii względności. Okazuje się, że do wykazania absolutnego ruchu przyspieszonego detektora potrzebne jest pole masowe zawierające cząstki. Tylko w tym przypadku detektor oddziałujący punktowo z polem może dać rozstrzygającą informację o swoim absolutnym przyspieszeniu. W rozważanym schemacie sposób, w jaki masa wprowadza asymetrię pomiędzy rozważanymi scenariuszami odbywa się poprzez złamanie symetrii konforemnej rozważanego równania pola: tylko dla pól bezmasowych (w dwuwymiarowej czasoprzestrzeni, którą dla uproszczenia rozważono w pracy [6]) równania pola (równanie Kleina-Gordona) są konforemnie niezmiennicze. Można wprost pokazać, że przewidywania modelu Unruha-DeWitta są identyczne w obydwu scenariuszach zawsze wtedy, gdy rozważane pole kwantowe posiada konforemną niezmienniczość. Niezmienniczość tę łamie istnienie masy.

4.5 Podsumowanie

Niniejszy cykl prac [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] dotyczących problematyki relatywistycznej informacji kwantowej stanowi próbę wyjścia poza standardowe ramy teorii informacji kwantowej. Bywa często, że samo sformułowanie relatywistyczne tego typu zagadnień stanowi nie lada wyzwanie, zatem fakt, że zaprezentowane tu problemy dają się od początku do

końca postawić i rozwiązać, często bez konieczności stosowania przybliżeń, jest niewątpliwym sukcesem. Stosowany od początku paradygmat mówiący, że efekty grawitacyjne uwzględnia się poprzez zapisanie równań kwantowej teorii pola na zakrzywionym tle czasoprzestrzennym jest naturalnie jedynie koncepcyjnym uproszczeniem. Powszechnie oczekuje się, że kwantowa teoria grawitacji powinna być teorią o wiele bardziej złożoną. Jednakże zastosowane tu podejście pozwala otrzymać wyniki pośrednie pomiędzy teorią relatywistyczną, a wciąż nieodkrytą grawitacją kwantową, co więcej, oczekuje się, że w pewnej granicy wyznaczone w ten sposób efekty powinny być obserwowalne. Zatem relatywistyczna informacja kwantowa jest także jednym ze sposobów badania asymptotyki poszukiwanej kwantowej teorii grawitacji. Stawiane pytania o charakter pojęcia informacji kwantowej i jej właściwości w kontekście relatywistycznym przypominają do pewnego stopnia pytania, które stawiane były we wczesnej fazie powstawania teorii kwantów. Model atomu Bohra stanowiący połączenie teorii klasycznej i arbitralnych postulatów kwantowych był także w gruncie niepoprawny, a jednak pozwolił dotrzeć do głębszego zrozumienia teorii atomu i w efekcie - odkrycia równania Schroedingera. Przedstawiony tu cykl prac jest krokiem w stronę głębszego zrozumienia właściwości informacji kwantowej oraz splątania kwantowego oraz ich relatywistycznej struktury.

5 Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych).

a) dane bibliometryczne (stan na dzień 25 marca 2014)

21 prac naukowych w najpoczytniejszych periodykach naukowych (głównie Phys. Rev. Lett., Phys. Rev. A, Phys. Rev. D, Class. Quantum Grav.) oraz 5 preprintów o łącznej liczbie 394 cytowań i indeksem Hirscha 9 według *Google Scholar* oraz 246 cytowań i indeksem Hirscha 8 według *Web of Science*. Łączny Impact Factor: 67.5.

b) badania naukowe nie stanowiące wkładu do habilitacji

Poniżej przedstawiona została pozostała część dorobku naukowego habilitanta. Dotyczy ona między innymi zagadnień nielokalności kwantowej (5.1), zastosowania stanów splątanych w komunikacji kwantowej (5.2), pojedynczego pomiaru rzutowego dużej liczby cząstek (5.3) oraz szeregu innych zagadnień nie związanych bezpośrednio z głównym tematem niniejszej rozprawy habilitacyjnej (5.4).

5.1 Nielokalność kwantowa

Jednym z najciekawszych aspektów teorii kwantowej jest jej nielokalność, czyli niemożność opisania wyników wszystkich możliwych eksperymentów przy pomocy teorii lokalnych parametrów ukrytych. Oznacza to, że przyroda, tak jak opisuje ją mechanika kwantowa, nie może być jednocześnie deterministyczna oraz lokalna. Zagadnieniu temu poświęcone są prace [20, 21]. W pracy [21] rozważony został stan splątany qubitu i stanu koherentnego oscylatora harmonicznego. Przedstawiony został optymalny schemat łamania nierówności Bella przy użyciu zbalansowanej detekcji homodynowej wykorzystującej niedoskonałe detektory. Przeprowadzono analizę kwantowej nielokalności mierzonej stopniem łamania nierówności Bella, w zależności od sprawności kwantowej detektorów oraz siły splątania rozważanego stanu. Wyznaczone zostały minimalne sprawności kwantowe pozwalające na obserwację nielokalności stanu.

W pracy [20] rozważono inny schemat łamania nierówności Bella przy pomocy stanu pojedynczego fotonu rozdzielonego na symetrycznej płycie światłodzielącej, a także dwumodowego stanu ściśniętego próżni. Schemat pomiaru zawierał niezbalansowany detektor homodynowy, który mierząc operator parzystości pozwala na bezpośredni pomiar kwazirozkładu prawdopodobieństwa w przestrzeni fazowej. Pokazano, że dokonując pomiaru parzystości w wybranych punktach przestrzeni fazowej można złamać nierówności Bella dowodząc nielokalności rozważanego stanu. W pracy [20] zoptymalizowano dokonywany pomiar ze względu na wybór punktów, w których próbkowana była przestrzeń fazowa. Optymalny schemat pomiarowy został wyznaczony dla układu detektorów o nieidealnej sprawności kwantowej, zatem w przypadku realistycznym, możliwym do porównania z eksperymentami.

5.2 Optymalna komunikacja kwantowa przy pomocy splątanych stanów światła

Cykl prac [13, 14, 15, 16, 17] dotyczący zagadnienia komunikacji kwantowej przy pomocy splątanych stanów światła stanowił podstawę naukową rozprawy doktorskiej habilitanta obronioną z wyróżnieniem w 2006 roku na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

W pracy [17] zbadano zagadnienie niedoskonałej komunikacji kwantowej poprzez kanał komunikacyjny z idealnie skorelowanym szumem, czyli zaburzeniami działającymi na każdą transmitowaną cząstkę wchodzącą w skład bitu informacji w jednakowy sposób. Zbadano i wyznaczono optymalny schemat kodowania informacji w alfabecie zbudowanym z par cząstek w stanach separowalnych (scenariusz klasyczny), a także par cząstek w stanach splątanych (scenariusz kwantowy). W obu przypadkach wyznaczono alfabet gwarantujący najlepszy możliwy sposób komunikacji. Pokazano, że użycie stanów splątanych zwiększa pojemność informacyjną kanału około 2.5 raza potwierdzając praktyczną użyteczność nielokalnych stanów światła w komunikacji.

W pracy [13] zastosowano podejście stochastyczne do opisu niedoskonałych kanałów komunikacyjnych badając inne typy szumów obecnych w kanałach komunikacyjnych oraz ich wpływ na jakość komunikacji.

Jedną z najprostszych możliwych realizacji kanału kwantowego ze skorelowanym szumem jest światłowód jednomodowy transmitujący pojedyncze pary fotonów w określonych stanach wejściowych polaryzacji. Fluktuacje termiczne i mechaniczne zaburzają stan polaryzacji par fotonów w taki sposób, że stan wyjściowy polaryzacji fotonów można uznać za losowy. Jednakże ze względu na długie skale czasowe typowe dla rozważanych fluktuacji w porównaniu do odstępów czasowego pomiędzy parą fotonów, wprowadzone przez kanał zaburzenie jest niemal identyczne dla każdego składnika pary. Oznacza to, że w wyniku niedoskonałości kanału kwantowego każda para fotonów podlega identycznej transformacji zastosowanej do każdego fotonu z osobna. Powyższa obserwacja pozwoliła wykonać eksperymenty potwierdzające uzyskane wcześniej wyniki teoretyczne. W pracach [16, 14] zbudowano układ doświadczalny, w którym generowane były pary fotonów w dobrze kontrolowanych stanach, które wpuszczane były następnie jeden za drugim do 20m światłowodu jednomodowego podlegającego mechanicznym zniekształceniom. Po wyjściu

ze światłowodu stany fotonów były mierzone. Udało się potwierdzić możliwość skutecznej komunikacji w tak niedoskonałym kanale komunikacyjnym mimo skrajnie wysokiego poziomu szumu. Potwierdzono, że zgodnie z wynikami teoretycznymi, użycie stanów splątanych istotnie poprawia sprawność komunikacji przy użyciu stanów polaryzacyjnych.

Źródłem par fotonów użytych w eksperymencie [16, 14] był kryształ nieliniowy BBO, w którym zachodził proces parametrycznego podziału częstości. W pracy [15] zbadano właściwości tego źródła pod kątem efektywności generowania par fotonów, a następnie sprzęgania ich do światłowodów jednomodowych. Analiza przeprowadzona została pod kątem wykonywanego eksperymentu i miała na celu zoptymalizowanie procesu generowania i rejestrowania par.

5.3 Pojedynczy pomiar dużej liczby cząstek

Jednym z mniej zbadanych podstawowych zagadnień teorii kwantowej był problem pojedynczego pomiaru kolektywnego dużej liczby cząstek. Luka ta została częściowo zapełniona pracą [12], w której zbadany został rozkład prawdopodobieństwa uzyskiwania określonych histogramów w trakcie pomiarów położenia dużej liczby interferujących cząstek. Mimo, że wynik pojedynczego pomiaru w mechanice kwantowej nie jest w ogólności z góry przewidywalny, to w przypadku pomiarów kolektywnych można przewidzieć ogólne cechy charakteryzujące otrzymywany histogram. W pracy [12] pokazane zostały po raz pierwszy w pełni teoretycznie i analitycznie wyniki znane wcześniej z prac eksperymentalnych dotyczących interferencji kondensatów Bosego-Einsteina. Pokazane zostało, że nawet w sytuacji, gdy faza względna interferujących wiązek atomów nie jest określona zawczasu, wyindukuje się ona spontanicznie w wyniku przeprowadzonego pomiaru.

Problematyce dynamiki kondensatu Bosego-Einsteina, a konkretnie zagadnieniu wymiany cząstek pomiędzy stanem podstawowym, a chmurą termiczną, poświęcona jest także praca [19]. Obliczenia wykonane zostały dla kondensatu atomów Helu-4 na potrzeby eksperymentu przeprowadzanego w grupie doświadczalnej z Vrije Universiteit w Amsterdamie (Holandia).

5.4 Inne zagadnienia

Pozostałe prace habilitanta poruszają szerokie spektrum różnych zagadnień. Prace [8, 18] dotyczą szczególnej teorii względności: w pracy [18] wyprowadzono ogólne wyrażenie opisujące obserwowalne kształty obiektów poruszających się z relatywistycznymi prędkościami uwzględniając opóźnienie docierającego do obserwatora światła, natomiast w pracy [8] podano oryginalne, wyjątkowo proste i ogólne wyprowadzenie precesji Thomasa, czyli efektu polegającego na zmianie orientacji przestrzennej obiektu poruszającego się po zależnej od czasu trajektorii trójwymiarowej.

W pracy [11] zbadano model oddziaływania pomiędzy siecią qubitów prowadzący do generowania stanów klastrowych (*cluster states*), czyli podstawowego zasobu niezbędnego do obliczeń kwantowych w modelu opartym wyłącznie na pomiarze rzutowym. Zbadane zostały warunki, jakie muszą być spełnione, ażeby stany klastrowe mogły być generowane poprzez schłodzenie układu o odpowiednio dobranym hamiltonianie oddziaływania.

Praca [10] przedstawia natomiast zagadnienie oddziaływania qubitów z układem o ciągłych stopniach swobody w modelu Jamesa-Cummingsa. W sposób analityczny zbadane zostało zagadnienie przerzucania splątania pomiędzy dyskretnym i ciągłym stopniem swobody i wskazany został efekt kolapsów i powrotów znany z ewolucji układów charakteryzowanych widmem oscylatora harmonicznego.

Natomiast w pracy [9] zaproponowany został nowy sposób precyzyjnego pomiaru niskich temperatur w oparciu o fazę Berry'ego indukowaną w modelu oddziaływania typu Unruha-DeWitta dla przypadku, gdy oddziaływanie zachodzi efektywnie z pojedynczym modelem pola kwantowego. Pokazano, że wysoka precyzja pomiarów może zostać osiągnięta pomimo, że urządzenie pomiarowe nie uzyskuje równowagi termicznej z badaną próbką, jak ma to miejsce w większości klasycznych termometrów.

c) nagrody

- Stypendium *Socrates-Erasmus, Vrije Universiteit, Amsterdam, Holandia* (2000).
- Stypendium *European Science Foundation, University of Oxford, Wielka Brytania* (2001).

- *Pierwsza Nagroda Polskiego Towarzystwa Fizycznego* za najlepszą pracę magisterską z fizyki w 2001 roku.
- Stypendium *Clarendon Laboratory, University of Oxford*, Wielka Brytania (2002).
- Stypendium *European Science Foundation, University of Oxford*, Wielka Brytania (2002).
- *Stypendium Krajowe dla Młodych Naukowców Fundacji Nauki Polskiej* (2003).
- *Stypendium Krajowe dla Młodych Naukowców Fundacji Nauki Polskiej* (2004).
- Nagroda tygodnika *Polityka Zostańcie z Nami* (2004).
- *Stypendium dla wybitnych młodych naukowców Ministra Edukacji Narodowej* (2010-2013).

d) kierowanie projektami badawczymi

- *Sonata BIS - Relatywistyczna Informacja Kwantowa*, grant *Narodowego Centrum Nauki* na zbudowanie własnej grupy badawczej (2013-2017).

e) udział w projektach badawczych

- Grant *Laboratorium Krajowe FAMO* (2002).
- Grant *Coherent States in Quantum Information*, *Imperial College London*, Wielka Brytania (2008-2009).
- Grant *Relativistic Quantum Information*, *University of Nottingham* (2010-2012).

f) zaproszone wykłady konferencyjne

- *International Conference of Quantum Optics*, Mińsk, Białoruś (2004).
- *Relativistic Quantum Information*, Brisbane, Australia (2010).
- *Relativistic Quantum Information*, Durban, RPA (2010).

- *Relativistic Quantum Information*, Brisbane, Australia (2011).
- *Relativistic Quantum Information Workshop*, Nottingham, Wielka Brytania (organizator, 2013).
- *Entanglement in Curved Spacetimes*, BANFF, Kanada (2013).
- *Konferencja Krajowego Centrum Informacji Kwantowej*, Gdańsk, Polska (2013).
- *Zjazd Fizyków Polskich*, Poznań, Polska (2013).
- *International Program on Quantum Information*, Bhubaneswar, Indie (2014; rezygnacja z uczestnictwa).
- *Relativistic Quantum Metrology*, Nottingham, Wielka Brytania (2014).
- *SPIE Quantum Communications and Quantum Imaging XII Conference*, San Diego, USA (2014).
- *International Workshop on Relativistic Quantum Information*, Seul, Korea Południowa (2014).

g) współpraca krajowa i zagraniczna

- *Vrije Universiteit* (Amsterdam, Holandia) - współpraca z prof. Wimem Vassenem dotycząca dynamiki kondensatu Bosego-Einsteina (1999-2000).
- *University of Oxford* (Wielka Brytania) - współpraca z prof. Konradem Banaszkiem dotycząca nielokalności kwantowej i optymalnej strategii w komunikacji kwantowej (2001-2002).
- *National Institute for Informatics* (Tokio, Japonia) - współpraca z dr. Jasonem Dukasem dotycząca zlokalizowanych pomiarów pól kwantowych w nieinercjalnych układach odniesienia (2011-2013).
- *IQC, University of Waterloo, Perimeter Institute* (Kanada)- współpraca z prof. Robertem Mannem dotycząca wykorzystania oddziaływań kwantowych w precyzyjnej termometrii (2012-2014).

- *University of Queensland* (Australia) - współpraca z prof. Timem Ralphem dotycząca komunikacji kwantowej w zakrzywionej czasoprzestrzeni (2012).
- Członkostwo w Radzie *International Society of Relativistic Quantum Information* (2013).
- Współtworzenie grupy badawczej *Relativistic Quantum Information Group of University of Nottingham and University of Warsaw* (Wielka Brytania), (2013).
- *Uniwersytet Adama Mickiewicza* (Poznań, Polska) - współpraca z prof. Andrzejem Grudką dotycząca oddziaływania układów kwantowych z próżnią (2013-2014).
- *Centre for Quantum Technologies* (Singapur) - współpraca z dr Agatą Chęcińską dotycząca niezmienników transformacji Bogoliubowa w zagadnieniu czarnych dziur (2013-2014).
- *Hebrew University of Jerusalem* (Izrael) - współpraca z dr. Davidem Bruschim dotycząca rezonansów we wnękach pola kwantowego poruszających się z przyspieszeniem (2013-2014).

Literatura

- [1] A. Dragan, J. Doukas, E. Martin-Martinez, and DE Bruschi, *Localized projective measurement of a quantum field in non-inertial frames*, *Class. Quantum Grav.* **30**, 235006 (2013).
- [2] D. E. Bruschi, A. Dragan, A. Lee, I. Fuentes, and J. Louko, *Relativistic Motion Generates Quantum Gates and Entanglement Resonances*, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 090504 (2013).
- [3] A. Dragan, J. Doukas, and E. Martin-Martinez, *Localized detection of quantum entanglement through the event horizon*, *Phys. Rev. A* **87** 052326 (2013).
- [4] J. Doukas, E. G. Brown, A. Dragan, and R. B. Mann, *Entanglement and discord: Accelerated observations of local and global modes*, *Phys. Rev. A* **87**, 012306 (2013).

- [5] D. E. Bruschi, A. Dragan, I. Fuentes, J. Louko, *Particle and antiparticle bosonic entanglement in noninertial frames*, Phys. Rev. D **86**, 025026 (2012).
- [6] A. Dragan, I. Fuentes, and J. Louko, *Quantum accelerometer: Distinguishing inertial Bob from his accelerated twin Rob by a local measurement*, Phys. Rev. D **83**, 085020 (2011).
- [7] D. E. Bruschi, J. Louko, E. Martin-Martinez, A. Dragan, and I. Fuentes, *Unruh effect in quantum information beyond the single-mode approximation*, Phys. Rev. A **82**, 042332 (2010).
- [8] A. Dragan and T. Odrzygózd, *Half-page derivation of the Thomas precession*, Am. J. Phys. **81**, 631 (2013).
- [9] E. Martin-Martinez, A. Dragan, R. B. Mann, and I. Fuentes, *Berry phase quantum thermometer*, New. J. Phys **15**, 053036 (2013).
- [10] R. Kennedy, L. Horstmeyer, A. Dragan, and T. Rudolph, *Qubit initialization and readout with finite coherent amplitudes in cavity QED*, Phys. Rev. A **82**, 054302 (2010).
- [11] D. Jennings, A. Dragan, S. D. Barrett, S. D. Bartlett, and T. Rudolph, *Quantum computation via measurements on the low-temperature state*, Phys. Rev. A **80**, 032328 (2009).
- [12] A. Dragan and P. Zin, *Interference of Fock states in a single measurement*, Phys. Rev. A **76**, 42124 (2007).
- [13] A. Dragan and K. Wodkiewicz, *Depolarization channels with zero-bandwidth noises*, Phys. Rev. A **71**, 012322 (2005).
- [14] A. Dragan, W. Wasilewski, K. Banaszek, and C. Radzewicz, *Demonstrating Entanglement-Enhanced Communication over Noisy Comm. Channels*, AIP Conf. Proc. **734**, 55 (2004).
- [15] A. Dragan, *Efficient fiber coupling of down-conversion photon pairs*, Phys. Rev. A **70**, 053814 (2004).

- [16] K. Banaszek, A. Dragan, W. Wasilewski, and C Radzewicz, *Experimental demonstration of entanglement-enhanced classical communication*, Phys. Rev. Lett. **92**, 257901 (2004).
- [17] J. Ball, A. Dragan, and K. Banaszek, *Exploiting entanglement in communication channels with correlated noise*, Phys. Rev. A **69**, 042324 (2004).
- [18] A. Nowojewski, J. Kallas, and A. Dragan, *On the Appearance of Moving Bodies*, Amer. math. month. **111**, 817 (2004).
- [19] P. Ziń, A. Dragan, S. Charzyński, N. Herschbach, P. Tol, W. Hogervorst, and W. Vassen, *The effect of atomic transfer on the decay of a BEC*, J. Phys. B **36**, L149 (2003).
- [20] K Banaszek, A Dragan, K Wódkiewicz, and C Radzewicz, *Direct measurement of optical quasidistribution functions: Multimode theory*, Phys. Rev. A **66**, 043803 (2002).
- [21] A. Dragan, and K. Banaszek, *Homodyne Bell's inequalities for entangled mesoscopic superpositions*, Phys. Rev. A **63**, 062102 (2001).
- [22] J. Lindkvist, C. Sabín, I. Fuentes, A. Dragan, I. Svensson, P. Delsing, and G. Johansson, *Twin paradox with superconducting circuits*, arXiv/quant-ph:1401.0129 (2014).
- [23] J. Doukas, G. Adesso, S. Pirandola, and A. Dragan, *Discriminating quantum field theories in curved spacetime*, arXiv/quant-ph:1306.4474 (2013).
- [24] S. W. Hawking, *Black hole explosions?*, Nature **248**, 5443 (1974):
- [25] W. G. Unruh, *Notes on black-hole evaporation*, Phys. Rev. D **14**, 870 (1976).
- [26] B. Reznik, A. Retzker, and J. Silman, *Violating Bell's inequalities in vacuum*, Phys. Rev. A **71**, 042104 (2005).
- [27] N. Friis, A. R. Lee, K. Truong, C. Sabín, E. Solano, G. Johansson, and I. Fuentes, *Relativistic Quantum Teleportation with Superconducting Circuits*, Phys. Rev. Lett. **110**, 113602 (2013).

- [28] P. M. Alsing and G. J. Milburn, Phys. Rev. Lett. **91**, 180404 (2003); I. Fuentes-Schuller, and R. B. Mann, Phys. Rev. Lett. **95**, 120404 (2005).
- [29] M. Montero and E. Martín-Martínez, Phys. Rev. A **85**, 024301 (2012); J. Chang and Y. Kwon Phys. Rev. A **85**, 032302 (2012); D. Hosler, C. van de Bruck, and P. Kok Phys. Rev. A **85**, 042312 (2012); M. Ramzan, Quantum Information Processing, January 2013, Volume 12, Issue 1, pp 83-95; M. Ramzan Chinese Physics Letters **29**, 020302 (2012); J. Wang and J. Jing Phys. Rev. A **83**, 022314 (2011); E. Martín-Martínez and I. Fuentes Phys. Rev. A **83**, 052306 (2011); M. Montero and E. Martín-Martínez Phys. Rev. A **83**, 062323 (2011); M. Montero and E. Martín-Martínez Phys. Rev. A **84**, 012337 (2011); B. Nasr Esfahani, M. Shamirzaie, and M. Soltani Phys. Rev. D **84**, 025024 (2011); M. Montero, J. Leon, and E. Martín-Martínez Phys. Rev. A **84**, 042320 (2011); N. Friis, P. Kohler, E. Martín-Martínez, and R. A. Bertlmann Phys. Rev. A **84**, 062111 (2011); A. Smith and R.B. Mann, Phys. Rev. A **86**, 012306 (2012); M. Ramzan, M. K. Khan Quant. Inf. Process. **11**, 443 (2012); J. Wang, J. Jing Ann. Phys. (NY) **327**, 283 (2012); Min-Zhe Piao, X. Ji, J. Mod. Opt. **59** 21 (2011); S. Khan J. Mod. Opt. **59** 250 (2012); Y. Wang, X. Ji, J. Mod. Opt. **59** 571 (2012); J. Deng, J. Wang, J. Jing, Phys. Lett. B **695**, 495 (2011).
- [30] N. D. Birrell, P. C. W. Davies, *Quantum Fields in Curved Space*, Cambridge Monographs on Mathematical Physics (Cambridge, 1984).

