

Streszczenie

Relatywistyczna informacja kwantowa jest dziedziną fizyki z pogranicza ogólnej teorii względności i kwantowej teorii pola. Bada ona przebieg zjawisk kwantowych, w szczególności tych związanych z teorią informacji kwantowej, w obecności pól grawitacyjnych, opisanych jako klasyczna czasoprzestrzeń. Najważniejsze efekty w relatywistycznej informacji kwantowej to efekt Unruha, dotyczący obecności cząstek w kwantowej próżni, gdy obserwowana jest ona z przyspieszonego układu odniesienia; promieniowanie Hawkinga, tj. promieniowanie emitowane przez czarną dziurę; oraz dynamiczny efekt Casimira, który dotyczy produkcji cząstek we wnęce rezonansowej z ruchomą ścianką. Relatywistyczna informacja kwantowa jest szybko rozwijającą się dziedziną, w ramach której formułowane są nowe teoretyczne przewidywania i wykonywane są pierwsze eksperymenty, jak np. weryfikacja dynamicznego efektu Casimira.

Tematem tej rozprawy jest wpływ jednostajnego przyspieszenia na stany kwantowe i ich właściwości, jak również splątanie kwantowe obecne w próżni.

W pierwszej kolejności rozważamy zegar kwantowy, mierzący czas za pomocą czasu połowicznego rozpadu nietrwałej cząstki. Porównujemy tempo tykania takiego zegara, gdy jest on w spoczynku, z sytuacją gdy przyspiesza on jednostajnie. Otrzymana różnica temp odbiega od przewidywań szczególnej teorii względności. Jest to spowodowane faktem, że przyspieszający zegar otaczają cząstki obecne z uwagi na efekt Unruha.

Stany kwantowe mają różne formy, gdy są obserwowane z inercjalnego lub z jednostajnie przyspieszonego układu odniesienia. W dalszej części rozprawy zajmujemy się dwumodowymi stanami gaussowskimi dwóch zlokalizowanych modów pola kwantowego. Opracowujemy ogólną metodę badania właściwości takich stanów, gdy obserwowane są przez dwóch jednostajnie przyspieszających obserwatorów, mających dostęp do kolejnej pary zlokalizowanych modów. W szczególności koncentrujemy się na stanie próżni i badamy ilość splątania kwantowego rejestrowanego przez obserwatorów. Metoda jest opracowana dla trzech przypadków: kwantowe pole skalarne w $1+1$ i $3+1$ wymiarach, oraz pole spinorowe Diraca w $1+1$ wymiarach. Wyniki wykazują, że obserwatorzy rejestrują więcej splątania, gdy ich przyspieszenia rosną, oraz gdy rozmiary modów i ich częstotliwości środkowe maleją. Pon-

adto dla $1+1$ -wymiarowego pola skalarnego wykreślamy zależność ilości splątania od odległości między obserwatorami i od ich przyspieszeń i obserwujemy przypadki nagłego zaniku splątania.

Następnie badamy ekstrakcję trzyciałowego splątania z próżni kwantowej, przez trzy detektory cząstek we wnęce rezonansowej, oddziałujące z polem kwantowym przez skończony czas. Otrzymujemy szczegółowe diagramy przedstawiające ilość wydobytego trzyciałowego i dwuciałowego splątania i porównujemy je dla dwóch typów warunków brzegowych. Wyniki wykazują, że splątanie najłatwiej jest wydobywać przy okresowych warunkach brzegowych, oraz że łatwiej jest wydobywać trzyciałowe splątanie niż dwuciałowe splątanie.

Krzysztof Lorek

Abstract

Relativistic quantum information is a field at the intersection of general relativity and quantum field theory. It investigates quantum phenomena, in particular those related to quantum information theory, in the presence of gravity, which is treated as a classical spacetime. Effects that are of fundamental importance for relativistic quantum information include the Unruh effect, regarding the presence of particles in quantum vacuum, when observed from an accelerated frame of reference; the Hawking radiation, which is the radiation emitted by a black hole; and the dynamical Casimir effect, which concerns the production of particles in a cavity with a moving boundary. The field is rapidly developing as new effects are predicted, and first empirical tests are performed, such as one of the dynamical Casimir effect.

In this thesis we focus on the influence of uniform acceleration on quantum states and their properties, as well as on quantum entanglement contained in the vacuum.

First, we analyze a quantum clock measuring time in terms of the decay of an unstable particle. We compare the rate of ticking of a stationary clock to the one of a uniformly accelerating clock. We discover that there exists a deviation from what the discrepancy between those rates is predicted to be by special relativity. This is caused by the fact that the accelerating clock is surrounded by particles arising due to the Unruh effect.

It is known that quantum states have different forms when observed from an inertial and a uniformly accelerated frame. In a further part of this thesis we focus on the family of two-mode Gaussian states of two localized modes of a given quantum field. A general framework is developed for investigating the properties of such states, when observed by two uniformly accelerated observers, having access to another pair of localized modes. In particular, we focus on the vacuum state and examine the amount of quantum entanglement perceived by the observers. The framework is developed for three cases: the quantum scalar field in $1 + 1$ and $3 + 1$ dimensions and the Dirac spinor field in $1 + 1$ dimensions. We find that in general more entanglement is seen when the accelerations of the observers increase and when the size of the modes of the observers and their central frequencies decrease. Also, for the $1 + 1$ -dimensional scalar field we plot the dependence of the amount

of entanglement on the separation of the observers and their accelerations independently and discover cases of sudden death of entanglement.

Furthermore, we extend our attention also to tripartite entanglement and investigate its extraction from the quantum vacuum by three particle detectors in a cavity, interacting with a quantum field for a finite time. Detailed maps of amounts of tripartite and bipartite entanglement extracted by the detectors, are produced and compared between two types of boundary conditions. It is found vacuum entanglement is most easily extracted in the case of periodic boundary conditions and it is easier to extract tripartite than bipartite entanglement.

Krzysztof Lorek