

Piotr Bułka

Nielokalne przesyłanie informacji a zasada przyczynowości

1. WSTĘP

Zjawisko tunelowania jest efektem, który został opisany teoretycznie już w pierwszej połowie ubiegłego wieku, w okresie powstawania mechaniki kwantowej oraz przełomowych badań eksperymentalnych z zakresu fizyki jądrowej. Trochę później, w latach sześćdziesiątych, został poznany i teoretycznie opisany efekt tunelowania fal elektromagnetycznych. Zarówno opis falowy (fale zanikające), kwantowo-mechaniczny, jak i wynikający z elektrodynamiki kwantowej wskazywały, że przebieg tego typu zjawisk jest niezgodny z klasycznymi intuicjami oraz paradygmatem wynikającym ze szczególnej teorii względności (STW). W formalizmie kwantowym czas propagacji fali w obszarach zabronionych (barierach — miejscach, w których fala nie może się rozprzestrzeniać) wyrażony jest jednostkami urojonymi, które zaczęto interpretować jako zerowy czas propagacji fali reprezentowanej w barierze przez cząstki wirtualne, tj. wirtualne fotony o ujemnej energii. Od lat dziewięćdziesiątych do dziś pojawia się coraz więcej eksperymentalnych potwierdzeń wspomnianej teorii: w układach pomiarowych do badania fal tunelujących otrzymuje się wyniki wskazujące na wyższe niż prędkość światła prędkości przesyłania impulsów falowych. W artykule będę chciał przybliżyć skrótowo problematykę tunelowania fotonów (tunelowanie fal elektromagnetycznych) zarówno w kontekście eksperymentalnych potwierdzeń możliwości istnienia zjawiska nielokalnego rozchodzenia się fal, jak i praktycznego wykorzystania tego efektu do przesyłania informacji z prędkościami nadświatłymi.

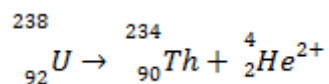
W pierwszej części dokonam prezentacji od strony teoretycznej oraz eksperymentalnej. W drugiej — przedstawię możliwość praktycznej implementacji zjawiska

tunelowania do przesyłania paczek falowych niosących zakodowaną informację binarną; zakodowaną w taki sposób, aby paczka przetunelowana nadal zawierała pierwotną informację możliwą do odczytania. Trzecią część tekstu poświęcę kwestiom dotyczącym zasady przyczynowości i odpowiedzi na pytanie, czy przesyłanie możliwych do odczytania sygnałów z prędkościami nadświatelnymi nie narusza tej fundamentalnej zasady. Wreszcie podsumuję wnioski z przedstawionych osiągnięć, które mogą wskazywać na konieczność rozszerzenia pola interpretacji mechaniki kwantowej.

2. TUNELOWANIE FOTONÓW

2.1. Co to jest?

Tunelowanie fotonów (fali elektromagnetycznej) jest szczególnym wypadkiem zjawiska tunelowego rozumianego ogólnie i opisywanego od początku formułowania teorii kwantowej. Zanim przejdę do jego charakterystyki, przybliżę sam efekt tunelowy, co pozwoli na pełniejsze zrozumienie tego szczególnego wypadku. Zjawisko tunelowe jest efektem charakterystycznym dla mikroświata opisywanego formalizmem mechaniki kwantowej, przez którą jest objaśniane. Polega ono w uproszczeniu na przekroczeniu przez obiekt kwantowy posiadający określoną energię tzw. bariery potencjału o wysokości wyższej niż posiadana przez ten obiekt energia. Innymi słowy, energia, która jest konieczna do pokonania bariery, jest wyższa od tej, którą dysponuje cząstka ją pokonująca. Sytuacja taka jest niedopuszczalna na gruncie mechaniki klasycznej ze względu na łamanie zasady zachowania energii, dlatego też, przykładowo, opis klasyczny załamywał się podczas próby wyjaśniania rozpadu α . Realizacją tego typu rozpadu może być reakcja, w której jądro uranu 238 rozpada się według następującego schematu:



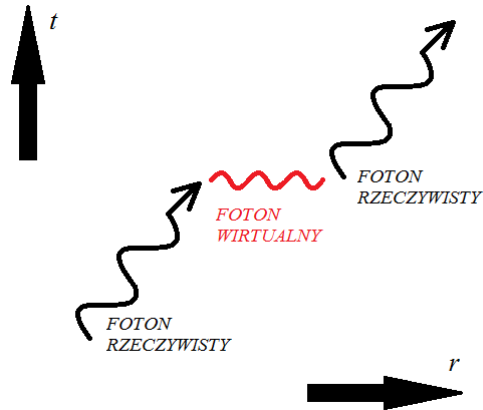
Powstające w wyniku rozpadu jądro helu (cząstka α) posiada na zewnątrz jądra uranu, z którego została wyemitowana, energię 4 MeV. Jest to energia niewystarczająca do tego, żeby zbliżyć się do jądra uranu na odległość mniejszą niż $6 \cdot 10^{-14} \text{ m}$ ze względu na odpychanie kulombowskie związane z ładunkiem cząstki α ¹. Niemniej w jakiś sposób cząstka α pokonuje tę „barierę” i jądro uranu ulega rozpadowi. Teoria klasyczna wyklucza zachodzenie tego typu zjawisk. Ich wyjaśnienie jest natomiast możliwe na gruncie praw mechaniki kwantowej i takie właśnie wytłumaczenie zostało podane w 1928 r. (dwa lata po odkryciu efektu tunelowego w rozpadzie uranu) przez George’a Gamow. Wprowadzone zostało pojęcie przepuszczalności bariery (D) mające charakter prawdopodobieństwa przejścia cząstki α przez barierę potencjału:

¹ Odpychanie się ładunków jednoimiennych — posiadających ten sam „znak”.

$$D = D_0 e^{-\frac{2}{\hbar} \int_R^{\infty} \sqrt{2M[U(r) - E_\alpha]} dr},$$

gdzie D_0 jest stałą, R promieniem bariery, E_α całkowitą energią cząstki α o masie M , a $U(r)$ oznacza energię potencjalną cząstki α w odległości r od jądra (zob. Massalski 1977: 445-447). Prawdopodobieństwo to jest niezerowe nawet dla dużych barier, jednak w miarę zwiększania ich wysokości (czyli powiększania różnicy energii między tą, którą dysponuje obiekt dochodzący do bariery, a tą potrzebną do jej pokonania) maleje do tak nieznacznych wartości, że w pewnym momencie stają się one całkowicie zaniedbywalne. Dlatego też dla obiektów klasycznych nie obserwujemy zjawiska tunelowania. Efekt tunelowy został zbadany w wielu doświadczeniach fizyki jądrowej. Opis kwantowy wskazujący na możliwość zaistnienia zjawiska całkowicie niezgodnego z intuicjami klasycznymi okazał się modelem rzeczywistości poddającej się eksperymentalnemu badaniu. Co więcej, to nieintuicyjne zjawisko znalazło zastosowania praktyczne w elektronice (diody tunelowe), wchodząc tym samym do naszego codziennego życia.

Tak jak w wypadku cząstek α i elektronów również fotony mogą podlegać zjawisku tunelowania. Opis kwantowy tego zjawiska jest szczególnie interesujący w kontekście możliwości eksperymentalnych, do których przejdę w kolejnym punkcie, oraz ze względu na to, że z propagacją fotonów związana jest również propagacja fali elektromagnetycznej, w wypadku której zjawisko tunelowania może być opisywane analogicznie do tunelowania cząstek (Martin, Landauer 1992: 2611-2617). Fala natomiast może być w sposób bardzo prosty wykorzystana jako nośnik informacji. Model teoretyczny oparty na formalizmie kwantowym przewiduje, że czas, jaki tunelujący obiekt przebywa w barierze, zadany jest wyrazem urojonym. Tego typu obliczenia znane były już w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku, ale dopiero w latach dziewięćdziesiątych zaczęto je interpretować w sposób całkowicie odbiegający od intuicji klasycznych, a nawet relatywistycznych. Zarówno podejście kwantowe, jak i falowe (tunelowanie fali jest opisywane przez tzw. fale zanikające) wskazują, że czas, w którym pokonywana jest bariera potencjałów, jest czasem zerowym. W kontekście korpuskularnym foton nie może przebywać w barierze potencjałów, dlatego też jest reprezentowany w tej przestrzeni jako foton wirtualny, czyli łącznik między dwoma rzeczywistymi fotonami, tym docierającym do bariery oraz tym opuszczającym ją z drugiej strony (Nimtz 2009: 1346-1355). Foton wirtualny jest cząstką niemożliwą do zaobserwowania, a w diagramach Feynmana przedstawiających zdarzenia z jego udziałem reprezentowany jest przez linię wskazującą na pokonywanie przez niego niezerowej drogi:



Niemniej linia ta nie jest skierowana (nie posiada zwrotu), co oznacza nielokalność fotonu wirtualnego. Zgodnie z zasadą lokalności obiekty fizyczne, które są od siebie odseparowane przestrzennie, mogą na siebie oddziaływać tylko za pomocą innych obiektów fizycznych bądź oddziaływania z polem (pole jest nośnikiem fizycznego sygnału, zob. Pabjan 2009: 166-169). Oddziaływanie natychmiastowe między dwoma obiektami jest możliwe tylko w sytuacji, gdy oba zajmują to samo miejsce w przestrzeni (założenie idealizujące; faktycznie chodzi o fizyczne stykanie się obiektów). W opisywanym zjawisku mamy zaś do czynienia z fotonem wirtualnym (falą zanikającą), będącym nieobserwowalnym (niefizycznym) obiektem przenoszącym oddziaływanie natychmiast na odległość. Są to dość zdumiewające wnioski teoretyczne, z których wyłania się obraz fotonów (fal elektromagnetycznych) pokonujących niezerową przestrzeń bariery zabronionej w czasie zerowym. Można wnioskować, że ustawienie bariery możliwej do pokonania przez fotony (zgodnie z teorią efektu tunelowego) na ich drodze może doprowadzić do sytuacji, w której ich prędkość na tej drodze przewyższy prędkość światła.

Ta spektakularna konkluzja zdaje się jednoznacznie niezgodna z postulatami szczególnej teorii względności, a ponadto łamie zasadę przyczynowości, do której wrócę w dalszej części artykułu. Zanim dojdę jednak do tego aspektu, powinienem zaznaczyć, że przedstawione wyżej informacje nie są dzisiaj już tylko i wyłącznie propozycjami teoretycznych modeli efektu tunelowego. Od ponad dwudziestu lat znane są i coraz bardziej ulepszane doświadczenia pozwalające na zmierzenie czasu propagacji fali w barierze. Wskazują na zgodność zachowania tunelowanych fal elektromagnetycznych z opisaną wcześniej teorią: impulsy falowe pokonujące barierę zabronioną propagują się z prędkościami większymi niż prędkość światła w tych samych warunkach (Nimtz 2003a). A ponieważ fala elektromagnetyczna może być nośnikiem informacji, z ponadświetlną prędkością można w tych doświadczeniach przesyłać informacje, które będą możliwe do odczytania po pokonaniu bariery.

2.2. Eksperymenty

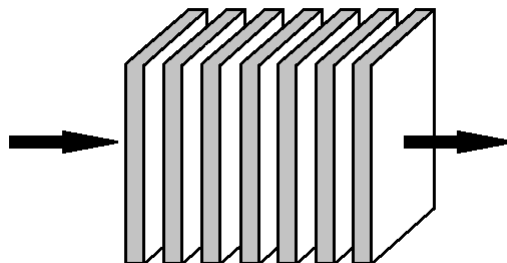
Najczęściej przywoływanymi w literaturze oraz praktyce eksperymentalnej przykładami realizacyjnymi pozwalającymi na badanie efektu tunelowania fal są trzy układy, każdy w trochę inny sposób ustanawiający barierę dla propagacji fali elektromagnetycznej. Są to zwężony falowód, struktura sieciowa (okresowa) oraz dwa pryzmaty (Nimtz 2003ab, Haibel, Nimtz, Stahlhofen 2001). Mimo że każdy z nich wykorzystuje zupełnie inny mechanizm, za każdym razem mamy do czynienia z efektem tunelowania fal elektromagnetycznych (tunelowania fotonów), w którym czas propagacji fali w obszarze zabronionym jest zerowy. Umożliwia to zaobserwowanie większych niż prędkość światła prędkości rozprzestrzeniania się fal.

Zwężony falowód jest zwykłym falowodem, do którego wstawia się element tak dobrany geometrycznie, żeby fala, która normalnie może się rozprzestrzeniać po obu jego stronach, we wnętrzu tego elementu istnieć nie mogła. Warunkiem propagacji fali elektromagnetycznej o długości λ w pustym falowodzie jest taki jego kształt, aby oba wymiary jego przekroju (prostokąt) miały długość nie mniejszą niż połowa długości fali. Wystarczy więc, aby element zwężenia miał wymiary mniejsze niż $\lambda/2$ — wtedy będzie stanowił barierę zabronioną dla fali:



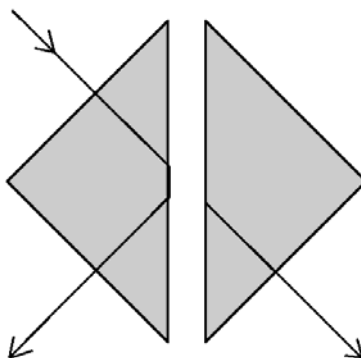
Zgodnie z opisem falowym w elemencie stanowiącym obszar zabroniony dla fali pojawia się fala zanikająca, która umożliwia przetunelowanie fali na drugą stronę, gdzie możliwa jest już normalna jej propagacja. Jak wcześniej wspomniałem, w kategoriach mechaniki kwantowej zjawisko to opisuje się za pomocą wirtualnych fotonów. Teoretyczny opis tej sytuacji uwzględniający te cząstki (o ujemnej energii) wskazuje, że fala zanikająca pojawia się natychmiast w całej przestrzeni obszaru zabronionego w momencie dotarcia czoła fali do zwężenia. Jest to zjawisko nielokalne, które sprawia, że fala w falowodzie, w którym ustawione jest zwężenie będące przestrzenią tunelowania, będzie poruszała się z prędkością przewyższającą prędkość światła. W eksperymentach wykorzystujących ten układ porównywano czas propagacji mikrofal wewnątrz pustego falowodu ze zwężeniem do czasu propagacji mikrofal o identycznej charakterystyce częstotliwościowej w powietrzu, na tej samej drodze. Okazało się, że czas propagacji wewnątrz falowodu był prawie trzykrotnie krótszy od czasu przesłania impulsu w powietrzu.

Drugim układem umożliwiającym eksperymentalne badanie tunelowania fotonów jest okresowa struktura zbudowana z materiałów dielektrycznych — siatka fotoniczna (*photonic lattice*). W tym wypadku barierę stanowią periodycznie ustawione (w odległości $\lambda/4$) przegrody szklane:



Taka geometria układu zapewnia całkowite wygaszanie fal na zasadzie interferencji destruktywnej między falą padającą na taflę a falą od niej odbitą. W wyniku efektu tunelowania część fotonów przechodzi na drugą stronę tafli, gdzie podlega analogicznemu zjawisku falowemu do tego przy pierwszej przeszkodzie: fala ulega wygaszeniu w wyniku odbicia od drugiej przegrody, przy czym zjawisko tunelowania umożliwia znowu przejście części fotonów do kolejnego modułu. Każda przegroda powoduje zwiększenie prędkości propagacji fali dzięki efektowi tunelowania: fala w barierze propaguje się z czasem zerowym. Ten układ również jest wykorzystywany do przeprowadzania eksperymentów, w których porównywany jest czas propagacji mikrofal w powietrzu z czasem propagacji sygnału doświadczającego tunelowania na sieci. W tym wypadku uzyskiwano dziesięciokrotne różnice w czasach na korzyść sygnału tunelującego.

Trzeci układ — dwa pryzmaty — wykorzystuje zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia fali elektromagnetycznej na granicy ośrodków o różnej gęstości optycznej, przy odpowiednio dobranym kącie padania (prawo Snella, por. Feynman, Leighton, Sands 2007: 26-2). Dwa pryzmaty są ustawione naprzeciw siebie dłuższymi krawędziami, a mikrofałe padają na jedną z tych krawędzi pod kątem większym niż kąt graniczny dla odbicia całkowitego:



Mimo występowania zjawiska odbicia całkowitego, w przerwie między pryzmatami pojawia się fala zanikająca, a w drugim pryzmacie dochodzi do dalszej propagacji przetunelowanej fali elektromagnetycznej. Fala zanikająca wypełnia przerwę między pryzmatami natychmiastowo, dochodzi do tunelowania fotonów: wewnątrz obszaru zabronionego rozprzestrzeniają się w zerowym czasie fotony wirtualne. Również w tym wypadku opis teoretyczny jest potwierdzany wynikami eksperymentów wykorzystujących taki układ. Ustawienie odbiorników w takich samych odległościach od obu pryzmatów pozwala stwierdzić, że sygnał odbity potrzebuje dokładnie tyle czasu, co sygnał przetunelowany. Przy czym sygnał przetunelowany pokonuje dłuższą drogę niż ten pierwszy — drogę powiększoną o szerokość przerwy między pryzmatami. Jest to potwierdzenie teoretycznych przewidywań, pozwalające jednocześnie na stwierdzenie różnicy w prędkości sumarycznej obu sygnałów. Sygnał przetunelowany pokonuje swoją drogę z prędkością ponad dwa i pół razy wyższą niż prędkość światła.

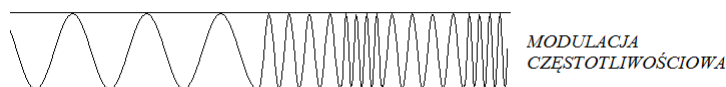
Warto podkreślić, że doświadczenia tego typu są znane już od lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku: w 1965 roku eksperyment z dwoma pryzmatami został przeprowadzony przez Darryla D. Coona, studenta Uniwersytetu w Princeton (Coon 1966). Natomiast dopiero między innymi prace Güntera Nimtza, Astrid Haibel i Alfonsa A. Stahlhofena, publikowane do dziś od lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku, zapoczątkowały teoretyczne oraz doświadczalne badanie najbardziej interesującego aspektu zjawiska tunelowania fotonów — czasu propagacji fali w barierze (por. np. Nimtz 2003a,b, Haibel, Nimtz, Stahlhofen 2001). Dzisiaj dysponujemy nie tylko teoretyczną wiedzą o tym, że zgodnie z formalizmem kwantowo-mechanicznym czas propagacji fali w barierze jest czasem urojonym, interpretowanym jako zerowy czas propagacji (w barierze rozprzestrzeniają się fotony wirtualne). Jesteśmy w posiadaniu empirycznych dowodów na to, że prędkość, z którą fala elektromagnetyczna pokonuje barierę, jest prędkością znacznie przekraczającą prędkość światła. To, że jest to bardzo duża, choć mierzalna wartość, wynika oczywiście z samej geometrii eksperymentów (skończona szerokość bariery) oraz z faktu, że fotony spędzają pewien skończony czas na granicy bariery (niezależnie od jej szerokości — efekt Hartmana, por. Nimtz 2003a). Foton, jako zlokalizowana cząstka, nie spędza w barierze żadnego czasu. Mamy tu do czynienia z *nielokalnością*, która przejawia się w sposób empirycznie weryfikowalny w postaci możliwości zaobserwowania tunelowania sygnału z prędkościami ponadświatłymi. Powstaje pytanie o możliwość wykorzystania tego zjawiska do przekazywania sygnału z takimi właśnie prędkościami.

3. SYGNAŁY NADŚWIETLNE

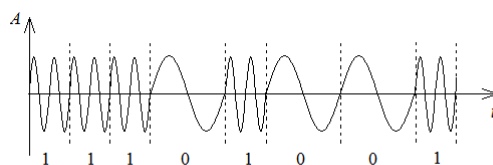
Ponieważ opisywane zjawisko jest związane z propagacją fal elektromagnetycznych, możliwość wykorzystania go do przesyłania informacji wymaga jej zakodowania w postaci paczki falowej. Jest to stosunkowo proste zadanie, które od czasu

rozwoju teorii fal elektromagnetycznych oraz ich wykorzystania w technice radiowej znalazło bardzo wiele możliwych implementacji. Właśnie takie czysto falowe podejście można zastosować w celu rozszerzenia eksperymentów z tunelowaniem o aspekt informacji. W opisywanych eksperymentach dokonywano tunelowania sygnałów zakodowanych za pomocą modulacji amplitudowej (AM) oraz częstotliwościowej (FM) na fali nośnej o określonej częstotliwości (por. np. Crawford 1975).

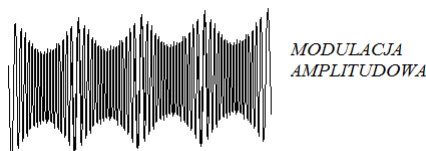
O modulacji częstotliwościowej (FM) mówimy wtedy, gdy „nośnikiem” informacji są zmiany częstotliwości fali podstawowej, której amplituda pozostaje stała:



Zmiany częstotliwości fali nośnej odpowiadają zmianom amplitudy sygnału modulującego: im wyższa amplituda, tym wyższa częstotliwość fali zmodulowanej. Zmiany te są chwilowe — w momencie zaniku sygnału modulującego częstotliwość fali nośnej powraca do swojej wartości podstawowej. Wartość różnicy między częstotliwością podstawową fali nośnej a maksymalną częstotliwością zmodulowaną nazywana jest dewiacją częstotliwości (ΔF). Analogowy sygnał modulujący może być również procesowany cyfrowo, co pozwala na zakodowanie w ten sposób informacji binarnej. Do tego celu wykorzystuje się ustalenie dwóch wartości częstotliwości (łatwo rozróżnialnych na poziomie odbioru sygnału), którym przypisuje się odpowiednio wartość 1 i 0. Sygnał zmodulowany częstotliwościowo dla danych binarnych może wyglądać w następujący sposób:



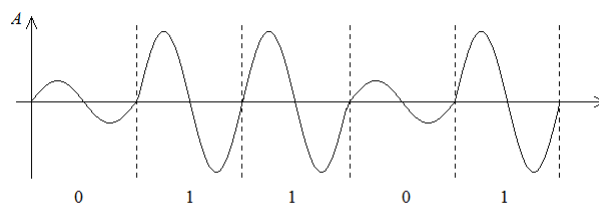
O modulacji amplitudowej mówimy wtedy, gdy „nośnikiem” informacji są zmiany amplitudy fali o określonej stałej częstotliwości:



W tego typu wypadkach sygnał modulowany reprezentowany jest przez obwiednię — grzbiet fali o modulowanej amplitudzie (falę o modulowanej amplitudzie opisuje się jako superpozycję dwóch biegnących fal sinusoidalnych: fali nośnej oraz fali reprezentującej sygnał, tj. fali modulującej). Zasadne jest więc pytanie o to, z jaką prędkością rozchodzi się ta modulacja; jest to prędkość poruszania się grzbietów modulacji, która jest różna od prędkości poruszania się grzbietów fali nośnej. Nazywa się ją prędkością grupową i jest ona zadana wzorem:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk},$$

gdzie ω to częstość kołowa fali o modulowanej amplitudzie, a k to wektor falowy. Prędkość grupowa poza próżnią jest niższa niż prędkość światła i jest właściwą prędkością sygnału zakodowanego w opisany sposób. W próżni prędkość grupowa jest równa prędkości światła. Mimo że w wypadku analizowania sygnałów kodowanych amplitudowo (AM), przy analizach prędkości ich przesyłania powinniśmy posługiwać się prędkościami grupowymi, ich różnice w stosunku do prędkości światła w rozpatrywanych układach eksperymentalnych są na tyle małe, że nie kompensują w żaden znaczący sposób różnicy w czasach propagacji fal tunelowanych w stosunku do fal, na których drodze nie znajduje się bariera. Nadal są to wartości przewyższające nawet kilkukrotnie prędkość światła. Ten typ modulacji również może być z powodzeniem użyty do kodowania informacji binarnych: analogowy sygnał modulacji może być procesowany cyfrowo. W tym celu należy określić zależność między poziomem amplitudy a wartością binarną. Najczęściej ustala się, że bit 1 reprezentowany jest przez amplitudę przewyższającą połowę maksymalnej amplitudy sygnału, a bit 0 przez amplitudę niższą niż połowa maksymalnej amplitudy sygnału. Tego typu umowa pozwala w prosty sposób odróżnić obie sytuacje na poziomie odbiornika transmitowanego sygnału. Przykładowa transmisja informacji binarnej zakodowanej amplitudowo na fali elektromagnetycznej o stałej częstotliwości wygląda w następujący sposób:



Maksymalna ilość informacji (wyrażona w bitach), którą można zakodować w sygnale trwającym Δt sekund (zmodulowanym zarówno częstotliwościowo, jak i amplitudowo), wynosi:

$$I = \frac{1}{3} \cdot \Delta\nu \cdot \Delta t \cdot \log_2(1 + SN),$$

gdzie $\Delta\nu$ oznacza szerokość pasma wyrażoną w hercach², a SN symbolizuje stosunek sygnału do szumu i wyrażony jest w decybelach (por. Nimitz 2003a).

W eksperymentach związanych z badaniem efektu tunelowania mikrofal przesyłane były paczki falowe reprezentujące informacje zakodowane w opisany sposób. Informacje te są z powodzeniem odczytywane po przejściu przez bariery. Biorąc pod uwagę konsekwencje zjawiska tunelowania dla prędkości propagacji fal, można stwierdzić, że w eksperymentach tych informacja została przekazana na odległość z prędkościami nadświetlnymi. Najbardziej spektakularnym przykładem jest eksperyment Horsta Aichmanna i Güntera Nimitza przeprowadzony w 1994 roku. Na fali nośnej o częstotliwości 8,7 GHz (mikrofale) zakodowana została w sposób częstotliwościowy XL symfonia Mozarta, a następnie sygnał został przesłany na drodze 114,2 mm, na której ustawiono siatkę fotoniczną. Zmierzona została prędkość $4,7c$ (c jest prędkością światła) dla propagacji tego sygnału, przy czym z sukcesem został on rozkodowany przez odbiornik (zob. Nimitz, Heitmann 1997, Raman 2001). Jeżeli więc mamy do czynienia z konkretnymi sygnałami możliwymi do przekazywania z nadświetlnymi prędkościami, to rodzi się pytanie, czy nie jest to przykład doświadczeń wskazujących na możliwość złamania zasady przyczynowości.

4. ZASADA PRZYCZYNOWOŚCI

Zasada przyczynowości, w najprostszym sformułowaniu (zasada lokalnej przyczynowości Einsteina), nakłada warunek na zdarzenie zachodzące w świecie. Zdarzenie posiadające przyczynę występuje w porządku chronologicznym później w stosunku do zdarzeń stanowiących tę przyczynę. Zgodnie ze szczególną teorią względności wszystkie przyczyny fizyczne poruszają się z prędkościami mniejszymi od prędkości światła lub jej równymi. Stałość i nieprzekraczalność prędkości światła są tymi postulatami teorii względności, które zapewniają zachodzenie zasady przyczynowości w świecie. Jednak dysponujemy dzisiaj teoriami opisującymi możliwość poruszania się cząstek i fal w pewnych specyficznych okolicznościach z prędkościami przewyższającymi prędkość światła. Empiryczne przewidywania tych teorii znajdują potwierdzenie w danych eksperymentalnych. Co więcej, tak zachowujące się fale mogą być (i w eksperymentach już są) nośnikami konkretnej, odczytywalnej informacji. Informacja może dotyczyć jakiegoś zdarzenia, dlatego też całkowicie zasadne staje się pytanie, czy w świetle przedstawionych wcześniej faktów związanych z możliwością przekazywania sygnałów z prędkościami ponadświetlnymi nie mamy do czynienia z łamaniem zasady przyczynowości. Zapoczątkowane przez Nimitza

² Szerokość pasma sygnału modulowanego amplitudowo równa jest podwojonej częstotliwości sygnału modulującego. Szerokość pasma sygnału modulowanego częstotliwościowo określa się jako podwojoną sumę dewiacji częstotliwości i częstotliwości maksymalnej sygnału.

eksperymenty z tunelowaniem mikrofal³ stały się przyczynkiem do dyskusji związanej z tą obawą. Ponieważ zjawisko opisuje propagację fali elektromagnetycznej, zgodnie z podstawową dla mechaniki kwantowej koncepcją dualizmu korpuskularno-falowego może być — jak widzieliśmy — opisane w dwojaki sposób. Tym samym można odpowiednio podzielić obszar dyskusji związanych z zasadą przyczynowości w świetle przedstawionych eksperymentów.

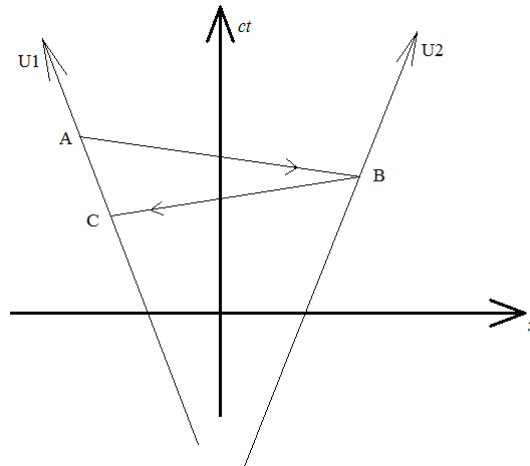
Rozważmy cząstkę, która jest w stanie poruszać się z prędkością większą od prędkości światła. Przedstawiłem opis korpuskularny oparty na koncepcji wirtualnego fotonu. Ponieważ „zwykły” foton nie może przebywać w barierze, to niemożliwa do zaobserwowania cząstka wirtualna jest obiektem tunelującym, z którym jest związana tunelowana fala. Z punktu widzenia realistycznych rozstrzygnięć nakładanych na teorie fizyczne nie jest to hipoteza satysfakcjonująca, a tym bardziej nie prowadzi do mechaniczno-relatywistycznego modelu pozwalającego na prezentację argumentacji w dyskusji nad zasadą przyczynowości w kontekście korpuskularnym. Hipotezą spełniającą te warunki jest założenie istnienia *realnej* cząstki, która jest w stanie poruszać się z prędkościami ponadświatłymi. Taki kierunek rozumowania jest wspierany przez istniejącą w fizyce koncepcję specjalnej cząstki — *tachionu* — która porusza się tylko z prędkościami ponadświatłymi (jak foton nie jest w stanie przekroczyć prędkości światła c , tak tachion nie jest w stanie zwolnić do prędkości c).

Ta propozycja teoretyczna wciąż budzi wiele kontrowersji, szczególnie z powodu braku jakichkolwiek empirycznych dowodów na istnienie tego typu obiektów. Jednak zarówno samo potencjalne istnienie tachionów (zob. Lunetta 2006), jak i mechanika tachionów są przedmiotem rozważań fizyków (zob. Recami, Giannetto 1985). Istotnym faktem jest uznawana dziś zgodność tej koncepcji z STW. Podawane są (również przez polskich autorów) przeformułowania transformacji Lorentza umożliwiające opisanie zarówno cząstek poruszających się z prędkościami podświatłymi, jak i nadświatłymi (zob. Kapuścik 2011). Oczywiście, sama zgodność z transformacjami będącymi podstawą STW nie wystarcza jako argument na rzecz zasady przyczynowości. Przeformułowania transformacji i wyrugowanie z teorii założenia o nieprzekraczalności prędkości światła nadal pozostawia otwartym pytanie związane z teoretyczną *możliwością* złamania zasady przyczynowości. Nowe okoliczności pozwalają na zbudowanie eksperymentów myślowych przedstawiających sytuacje, w których sygnał jest wysyłany w przeszłość.

Tego typu eksperyment myślowy pojawia się w koncepcji „tachionowego anty-telefonu” (paradoks Tolmana, zob. Tolman 1917) oraz w dowodzie przeciwko możliwości istnienia tachionów zaproponowanym przez Rogera Penrose’a (zob. Penrose 2000). Propozycja Penrose’a opiera się na analizie hipotetycznego układu dwóch wymieniających się informacją przyrządów, które oddalają się od siebie. Obydwa są zbudowane z materii różnej niż tachionowa („normalnej” materii), dlatego też należy

³ W literaturze specjalistycznej odwołania do tych eksperymentów bardzo często są oznaczane przez sformułowanie „koloński eksperyment z mikrofalami” (*Cologne microwave experiment*).

dodać założenie, że każdy z nich w każdym układzie odniesienia ma prędkość mniejszą od prędkości światła (c) — na diagramie czasoprzestrzennym będą więc reprezentowane przez linie świata nachylone do osi czasu pod kątami mniejszymi niż 45 stopni (oczywiście, jest to założenie idealizujące, wskazujące na zaniedbywalne rozmiary geometryczne urządzeń):



Rysunek przedstawia możliwą teoretycznie sytuację takiego układu inercjalnego, w którym emitowane cząstki szybsze niż światło poruszają się w tył w czasie. Jeżeli założymy, że cząstki te mogą przenosić informację — w propozycji Penrose'a są to sygnały „TAK” (przyjmijmy 1) i „NIE” (przyjmijmy 0) możliwe do zakodowania w jednym bicie — to, nakładając pewne warunki logiczne na emisję sygnału przez urządzenia, możemy wskazać na pojawienie się logicznej sprzeczności. Otóż założymy, że przyrząd U1 odpowiada na sygnał 1 emisją sygnału 0, a na sygnał 0 emisją sygnału 1. Przyrząd U2 natomiast wysyła dokładnie taki sam sygnał, jaki odebrał. Jeżeli w zdarzeniu B zostanie wyemitowany sygnał 1, to w zdarzeniu A zostanie wyemitowany sygnał 0. W tym przypadku w zdarzeniu B powinien zostać wyemitowany sygnał 0, a nie 1.

Propozycja Penrose'a jest typowym przykładem rozumowania wskazującego na możliwość doprowadzenia do paradoksu w razie złamania zasady przyczynowości, a takie złamanie jest możliwe w podanym przykładzie. Opiera się on na ukrytych założeniach, o których nie jesteśmy dziś w stanie wyrokować, nie mając żadnych danych empirycznych co do hipotetycznych tachionów. Nie wiadomo, w jaki sposób oddziaływałyby one z „normalną” materią i czy takie oddziaływanie byłoby w ogóle możliwe, a tym samym, czy możliwe byłoby odczytywanie sygnałów niesionych przez te cząstki przez jakiegokolwiek urządzenia. Jednak przywoływane przeze mnie przykłady eksperymentów świadczą o tym, że jest możliwe przesyłanie sygnałów z prędkościami przekraczającymi prędkość światła. A zatem analizując problem przyczynowości

z perspektywy korpuskularnej, powinniśmy założyć, że oddziaływanie cząstek poruszających się z prędkościami nadświatłymi z „normalną” materią jest możliwe.

Argumentację przeciwko przytoczonym paradoksom przedstawił między innymi Erasmo Recami (2009). Założył, że takie oddziaływanie zachodzi: jest to tzw. wewnętrzna emisja (*intrinsic emission*) i wewnętrzna absorpcja (*intrinsic absorption*), które powinny być opisywane w ramach układów odniesienia ciał absorbujących lub emitujących cząstki nadświatłne. Wykazał, że paradoksy wynikają z „mieszania” opisu otrzymywanego przez różnych obserwatorów (np. „wybranie” takiego zewnętrznego układu odniesienia w opisie paradoksu Penrose’a, z którego można zaobserwować ruch cząstki „w tył” w czasie). Opis warunków emisji i absorpcji tachionów wewnątrz układu spoczynkowego (*rest-frame*) związanego z emitującym bądź absorbującym przyrządem oraz analiza zdarzeń w paradoksie każdorazowo w ramach układu spoczynkowego związanego z urządzeniem, które bierze udział w danym zdarzeniu, pozwoliły autorowi na pokazanie, że zasada przyczynowości *nie* jest łamana. Analogiczne rozumowanie zostało wykorzystane przy analizie eksperymentów tunelowania mikrofal, by wykazać, że otrzymane wyniki, które świadczą o możliwym przesłaniu sygnału z prędkością nadświatłną, nie naruszają zasady przyczynowości (zob. Recami 1997).

Drugi obszar dyskusji jest związany z perspektywą falową, w której interpretowane są wyniki i warunki przeprowadzonych eksperymentów. Wprawdzie jest ona wspierana przez perspektywę korpuskularną, lecz posiada własną przestrzeń interesujących konkluzji dotyczących zasady przyczynowości, związanych z typowo falowym formalizmem opisu zjawisk. W analizowanych eksperymentach związanych z tunelowaniem fal elektromagnetycznych sygnał jest kodowany na fali nośnej przy wykorzystaniu modulacji częstotliwościowej bądź amplitudowej. W każdym z tych wypadków, niezależnie jak krótki jest sygnał (może to być nawet jeden bit), mamy do czynienia z rozciągniętym przestrzennie fragmentem poruszającej się fali nośnej. Przedstawiona analiza korpuskularna wiąże prędkość sygnału z prędkością cząstki, która może być traktowana jako obiekt punktowy. W jaki natomiast sposób można określić prędkość sygnału zakodowanego na fali? Okazuje się, że jest to wciąż nierozwiązany problem, szczególnie w kontekście eksperymentu kolońskiego (Goenner 1998). Nie ma jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, w jaki sposób można przypisać fali fizycznie znaczącą prędkość odpowiadającą ruchowi cząstki. Propagacja fali może być określona wieloma różnymi rodzajami prędkości: prędkością fazową⁴, prędkością grupową⁵, prędkością czoła fali⁶ itd. Dla analizy problemu przyczynowości

⁴ Prędkość fazowa to prędkość, z jaką porusza się faza fali (np. węzeł pojedynczej fali, szczyt fali): $\omega_f = \omega/k$ (ω — częstość fali, k — liczba falowa), por. Feynman, Leighton, Sands 2001: 48-4.

⁵ Prędkość grupowa to szybkość rozchodzenia się modulacji $v_M = (\omega_1 - \omega_2)/(k_1 - k_2)$ (indeksy oznaczają dwie różne fale, które sumujemy w ramach modulowania fali nośnej), por. Feynman, Leighton, Sands 2001: 48-4.

⁶ Prędkość czoła fali to prędkość rozchodzenia się punktu będącego początkiem zaburzenia ośrodka wywołanego propagacją fali.

ści istotny jest nie sam fakt, że któraś z tych prędkości została zmierzona jako większa niż prędkość światła w eksperymencie, lecz to, czy nadal jest to prędkość związana z *transportem* energii i informacji (Goenner 1998). Wątpliwości dotyczą wskazania wpływu czasu (na propagację sygnału) związanego z przedsięwzięciem polegającym na odczytaniu sygnału zakodowanego na fali, zakodowaniem odpowiedzi i odesłaniem jej również zakodowanej na rozciąglej geometrycznie fali, która też powinna być poddana detekcji przez odbiornik.

Wątpliwości tego rodzaju nabierają większej wagi w kontekście wyników eksperymentów związanych z tunelowaniem fali elektromagnetycznej. Wskazują, że różnica w czasie nadejścia sygnału tunelowanego w stosunku do sygnału porównawczego jest stała i niezależna od szerokości bariery. Zmiana porządku chronologicznego w ramach układu inercjalnego, w którym prowadzony jest eksperyment, wymagałaby odesłania sygnału na tej samej drodze. Biorąc pod uwagę otrzymane wyniki oraz ich niezależność od szerokości bariery, musimy dojść do wniosku, że w badanych układach niemożliwe jest złamanie zasady przyczynowości, co przekonująco wykazał Hubert Goenner (1998).

5. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

Przedstawione eksperymenty oraz ich interpretacje można podsumować w formie następujących wniosków:

- Fale elektromagnetyczne mogą rozprzestrzeniać się z prędkościami przekraczającymi prędkość światła przy wykorzystaniu zjawiska tunelowania.
- Na fali elektromagnetycznej można zakodować informację bez wpływu na fakt możliwości przetunelowania tej fali.
- Informacja zakodowana na fali elektromagnetycznej jest możliwa do odczytania po przejściu tej fali przez barierę (po przetunelowaniu).
- Istnieje zatem możliwość przesłania informacji z prędkością wyższą niż prędkość światła.
- Teoria przewiduje zerowy czas propagacji fali elektromagnetycznej w barierze (fala zanikająca).
- Zjawisko przesunięcia Goosa-Hänchena (*Goos-Hänchen shift*) warunkuje czas propagacji fali elektromagnetycznej w barierze. Uwzględnienie tego faktu w bilansie czasu przemieszczania się mikrofal w eksperymencie z dwoma pryzmatami potwierdza zerowy czas propagacji fali elektromagnetycznej w barierze (por. Nimtz 2003a).
- Istnieją przesłanki do stwierdzenia możliwości natychmiastowego (pozbawionego opóźnienia) przekazywania sygnału.
- Zaobserwowane efekty nie naruszają zasady przyczynowości.

Wnioski te skłaniają do postawienia ogólnie sformułowanej hipotezy, że *natura dopuszcza możliwość nielokalnego przesyłania informacji*.

Jeśli założymy się spojrzenie realistyczne oraz przyjmie się wnioski dotyczące istnienia oddziaływań nielokalnych, to powstaje pytanie o nośniki tych oddziaływań. W wypadku prędkości przewyższających prędkość światła wydaje się, że dobrą odpowiedzią na to pytanie może być model fizyczny dopuszczający istnienie tachionów. W jaki sposób jednak zinterpretować wnioski mówiące o oddziaływaniach natychmiastowych? Czy w przestrzeni takich oddziaływań cząstki powinny mieć prędkość nieskończoną? Czy jest różnica między informacją zakodowaną w układzie zbudowanym z „normalnej” materii a informacją zakodowaną w cząstkach poruszających się szybciej niż światło? Czy możemy mówić o informacji zakodowanej w tych cząstkach w kontekście przedstawionych eksperymentów, gdzie nośnikiem była modulowana fala elektromagnetyczna? W jaki sposób w ogóle realizuje się zasada dualizmu korpuskularno-falowego w wypadku przestrzeni tunelowania, gdzie fala porusza się z prędkością przewyższającą prędkość odpowiadającą maksymalnej możliwej prędkości fotonów będących jej korpuskularnym aspektem (fotony wirtualne, tachiony, a może jeszcze inne cząstki)?

W chwili obecnej uważamy, że możliwość nielokalnego przesyłania informacji związana z tunelowaniem fal elektromagnetycznych nie jest zjawiskiem mającym wpływ na fundamentalne kwestie wynikające z paradygmatu STW (zasada przyczynowości) nawet przy założeniu istnienia cząstek zdolnych do poruszania się szybciej niż światło. Ta optymistyczna konstatacja oparta jest jednak na przesłankach związanych z wyobrażanym dziś procesem komunikacji wykorzystującym efekty nielokalne. Dyskusję dotyczącą wpływu zjawisk nielokalnych na STW należy więc traktować jako otwartą: nowe eksperymenty mogą wprowadzić wątki, które będą możliwymi zagrożeniami dla tego paradygmatu. Jest to kolejna klasa zjawisk, obok innych równie dynamicznie badanych przez współczesną fizykę eksperymentalną (np. doświadczenia związane z badaniem zjawisk opartych na korelacjach kwantowych), wskazująca konieczność włączenia oddziaływań nielokalnych w obszar interpretacyjny fundamentalnych teorii fizycznych. To stwierdzenie wymusza postawienie istotnych kwestii natury ontologicznej oraz pytań związanych z samym *pojęciem* informacji. Coraz więcej przesłanek, zarówno teoretycznych, jak i empirycznych, wskazuje na to, że scenariusz zakwestionowany przez Einsteina — „upiorne oddziaływanie na odległość” — wymaga głębszej refleksji.

BIBLIOGRAFIA

- Coon D. D. (1966), *Counting Photons in the Optical Barrier Penetration*, „American Journal of Physics” 34(3), 240-243.
- Crawford F. S. (1975), *Modulacje, impulsy i paczki fal* [w:] *Fale*, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, rozdz. 6.
- Feynman R., Leighton R. B., Sands M. (2007), *Odbicie i załamanie [oraz] Zlokalizowane paczki falowe* [w:] *Feynmana wykłady z fizyki*, t. 1.2, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 26-2, 48-4.

- Goenner H. (1998), *Einstein Causality and the Superluminal Velocities of the Cologne Microwave Experiment*, „Annalen der Physik” 7(7-8), 774-782.
- Haibel A., Nimtz G., Stahlhofen A. A (2001), *Frustrated Total Reflection. The Double-Prism Revisited*, „Physical Review E” 63(4), 047601.
- Kapuścik E. (2011), *New Parametrization of Lorentz Transformations and Tachyonic Motion in Special Theory of Relativity*, „Physics of Atomic Nuclei” 74(6), 919-922.
- Lunetta M. (2006), *Theoretical Evidence of a Superluminal Carrier*, „Physics Essays” 19(4), 534-543.
- Martin T., Landauer R. (1992), *Time Delay of Evanescent Electromagnetic Waves and the Analogy to Particle Tunneling*, „Physical Review A” 45(4), 2611-2617.
- Massalski J. (1977), *Fizyka dla inżynierów*, t. 2, *Fizyka współczesna*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- Nimtz G. (2003a), *On Superluminal Tunneling*, „Progress in Quantum Electronics” 27(6), 417-450.
- Nimtz G. (2003b), *Superluminal Signaling by Photonic Tunneling*, „IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics” 9(1), 79-85.
- Nimtz G. (2009), *On Virtual Phonons, Photons, and Electrons*, „Foundations of Physics” 39(12), 1346-1355.
- Nimtz G., Heitmann W. (1997), *Superluminal Photonic Tunneling and Quantum Electronics*, „Progress in Quantum Electronics” 21(2), 81-108.
- Pabjan T. (2009), *Upiorne oddziaływanie na odległość*, „Postępy Fizyki” 60(4), 166-169.
- Penrose R. (2000), *Nowy umysł cesarza*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Raman A. (2001), *On Superluminal Propagation and Information Velocity*, Cornell University Library, maszynopis.
- Recami E. (1997), *Superluminal Motions (and Microwave Propagation) in Special Relativity. Solution of the Casual Paradoxes*, „Foundations of Physics” 17, 239-296.
- Recami E. (2009), *The Tolman-Regge Antitelephone Paradox. Its Solution by Tachyon Mechanics*, „Electronic Journal of Theoretical Physics” 6(21), 1-8.
- Recami E., Giannetto E. (1985), *Tachyon Mechanics and Tachyon Gravitational Interaction*, „Lettere al Nuovo Cimento” 43(6), 267-273.
- Tolman R. C. (1917), *The Theory of the Relativity of Motion*, Berkeley (CA): University of California Press.