O prędkościach nadświetlnych

Leszek M. Sokołowski
Obserwatorium Astronomiczne UJ

Poskarżył się pewien nauczyciel fizyki, że w szkolnym wykładzie szczególnej teorii względności (STW) obowiązuje dogmat „nic nie porusza się szybciej od światła w próżni", a przecież istnieją prędkości nadświetlne. Więc jak to jest naprawdę?

Naprawdę z transformacji Lorentza wynika, że prędkość światła w próżni, c, jest prędkością graniczną, rozgraniczającą zbiór prędkości podświetlnych od zbioru prędkości nadświetlnych i nie można przejść z jednego zbioru do drugiego zmieniając inercjalny układ odniesienia. Zakładamy tu słuszność STW, a konkretnie transformacji Lorentza, i sprawdzamy, że nie prowadzi to do sprzeczności. (Dla ścisłości: przez prędkość nadświetlną rozumiemy taką, która przewyższa prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w pustej nieograniczonej przestrzeni, c = 299 792,458 km/s.) Rzeczywiście, weźmy inercjalny układ odniesienia S', w którym pewien obiekt porusza się z prędkością v' i niech S' porusza się z prędkością V względem układu inercjalnego S. Obie prędkości są skierowane w tę samą stronę (i są dodatnie), zatem prędkość v tego obiektu w S jest większa od v'. Z doświadczenia wiadomo, że V jest mniejsza od c, natomiast prędkość v' może być dowolna, bowiem nie sprecyzowaliśmy co to jest za obiekt.

$$v = \frac{v'+V}{1+\frac{v'V}{c^2}} \tag{1}$$

Niech $v' = ac$, gdzie $a > 0$. Wówczas $v = \frac{ac+V}{c+aV}c$ i różnica licznika i mianownika jest $ac + V - (c + aV) = (a-1)(c-V)$. Jeżeli v' jest prędkością podświetlną, czyli $a < 1$, to licznik jest mniejszy od mianownika i $v < c$. Dla prędkości nadświetlnej mamy $a > 1$ i licznik jest większy od mianownika, zatem $v > c$. Dla $a = 1$ mamy $v' = v = c$. Widzimy, że transformacja Lorentza, czyli zmiana inercjalnego układu odniesienia, przeprowadza prędkości podświetlne w podświetlne oraz nadświetlne w nadświetlne, a sama prędkość c jest niezmienna. Granicy $v' = c$ w żadną stronę przekroczyć się nie da. Po jednej stronie tej granicy znajdują się wszystkie znane dotąd fizyce obiekty materialne o masie spoczynkowej różnej od zera. Czy po drugiej stronie jest coś, co istnieje w przyrodzie?

W skarbnicy wiedzy i mądrości wszelakiej, czyli w Internecie, znajdziemy dwa przykłady prędkości nadświetlnych: świetlny „zajączek" sunący np. po Księżycu oraz zamykające się długie nożyczki. Rozpatrzmy je dokładniej.

Świetlny „zajączek"

Weźmy latarkę, która obraca się wokół osi prostopadłej do rzucanego przez nią snopu światła. Niech światło latarki pada na odległą powierzchnię i odbija się od niej, widzimy wówczas „zajączka". Jeżeli latarka obraca się ze stałą prędkością kątową ω, a powierzchnia jest odległa o r od latarki, to zajączek sunie po niej z prędkością $v = \omega r$. Gdy zajączek biegnie po Księżycu, to nawet przy niewielkiej prędkości kątowej latarki jego prędkość v jest nadświetlna. Najszybszych zajączków dostarczają pulsary — wirujące gwiazdy neutronowe z silnym polem magnetycznym, emitujące periodyczne sygnały radiowe. Jednym z najsławniejszych jest pulsar w Mgławicy Kraba, odległy o ok. 1500 parseków ($5 \cdot 10^{16}$ km) i obracający się 30 razy na sekundę, czyli $\omega \approx 200\ \mathrm{s}^{-1}$. Gdy jego impuls radiowy trafia w Ziemię, zajączek sunie po niej z prędkością $3 \cdot 10^{13}\ c$. Ruch zajączka nie jest pozorny, jest jak najbardziej realny — tworzące go światło może być rejestrowane przez fotokomórki umieszczone na jego trasie – lecz nie jest to ruch, o jakim zwykle mówimy w fizyce. Przez ruch rozumiemy zwykle przemieszczanie się w przestrzeni obiektu fizycznego niosącego energię. Zajączek nie jest obiektem fizycznym, lecz obrazem. Niech w chwili t_1 zajączek znajduje się w punkcie A na Księżycu, a w chwili t_2 w punkcie B. W chwili t_1 zajączek jest wiązką fotonów, które odbijają się w A, zaś w t_2 jest wiązką innych fotonów, które odbijają się w B. W przedziale czasu $t_2 - t_1$ zajączek przebył odległość $\omega r(t_2 - t_1)$ z nadświetlną prędkością, ale nie był to ruch ciała materialnego – żaden foton nie przeleciał z A do B, nie było żadnego przepływu masy ani energii. Najbardziej dobitnie można się o tym przekonać, gdy emitującą w sposób ciągły latarkę zastąpimy latarnią morską wysyłająca oddzielne błyski. Jeden błysk pada w punkcie A, zaś następny w B, a po drodze z A do B nic się nie przemieściło. Za pomocą zajączka nie można zawiadomić obserwatora znajdującego się w chwili t_2 w punkcie B o tym, że w chwili t_1 snop światła dotarł do A. Szybszy od światła zajączek nie przenosi energii i nie nadaje się do przenoszenia informacji. Natomiast ciała poruszające się wolniej od światła i niosące energię mogą przenosić informację, stąd też często mówi się, że „energia i informacja nie mogą przenosić się szybciej niż c". To uzupełnienie o informację ma jednak charakter bardziej poglądowy niż wnosi coś nowego, bowiem „informacja" nie jest pojęciem ściśle fizycznym. Fakt, że zajączek nie niesie energii i informacji, nie jest też dowodem, że transport energii nie może nastąpić z prędkością nadświetlną.

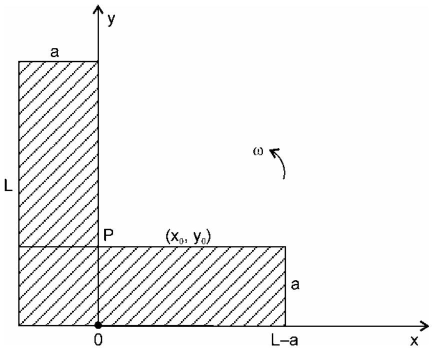
Przykład z zajączkiem pokazuje, że możliwy jest ruch nadświetlny w ciele rozciągłym. Niech wzdłuż drogi zajączka na Księżycu ustawiona będzie wielka liczba małych nadajników radiowych w postaci np. oscylujących pod wpływem przyłożonego napięcia dipoli elektrycznych. Światło zajączka padając na fotokomórkę włącza napięcie i dipol drga przez chwilę i promieniuje. Zbiór tych dipoli tworzy jedną wielką antenę radiową, która w każdym momencie promieniuje tylko w jednym miejscu – tym dipolem, który akurat jest oświetlony zajączkiem. Źródłem fal radiowych jest zmienne pole elektryczne, które przesuwa się w antenie z prędkością zajączka. Również ten ruch nadświetlny nie przenosi żadnej energii z miejsca na miejsce, bowiem to przesuwanie się pola elektrycznego nie jest ruchem fal elektromagnetycznych (wypromieniowanych fal radiowych nie wliczamy do tego pola) – po prostu w kolejnych miejscach wzbudzane jest zmienne pole. Fale radiowe generowane takim ruchem nadświetlnym mają interesujące, nietypowe własności i ostatnio zespół fizyków angielskich i amerykańskich zbudował taką antenę, ale to już odrębny temat.

Szybki zajączek daje zabawny efekt optyczny. Załóżmy, że sunie on po płaskim lustrze i obserwujemy jego odbicie od lustra. Jeżeli jego prędkość jest wielokrotnie większa od *c*, to przebiegnie on po lustrze momentalnie, natomiast odbite od lustra fotony zmierzają do nas z prędkością *c*. Nie będziemy więc widzieć zajączka tak, jak on się faktycznie po lustrze przesuwa, lecz najpierw zobaczymy go w punkcie najbliższym nas, a następnie zajączek będzie się od niego oddalać, rozbiegając się równocześnie w obu kierunkach po swojej drodze (radzę to narysować).

Obracające się nożyce

Podobnie jest z zamykającymi się nożyczkami. Dopóki prędkość liniowa końców ramion jest mniejsza od *c*, to nożyczki można uważać za doskonale sztywne i mogą obracać się ze stałą prędkością kątową ω. Gdy ramiona nasuwają się na siebie, to punkt przecięcia się ich ostrzy oddala się od osi obrotu z prędkością nieograniczenie rosnącą. Aby to ustalić bierzemy uproszczony model nożyczek, których ramiona mają kształt wydłużonych prostokątów (rys. 1). Lewe ramię jest nieruchome, a prawe obraca się z prędkością ω w kierunku dodatnim (tzn. przeciwnie do ruchu wskazówek zegara) wokół osi przechodzącej przez punkt O. Ramiona mają długość L i szerokość a. W chwili $t = 0$ prawe ramię jest prostopadłe do lewego i równoległe do osi x. Dowolny punkt (x_0, y_0) ostrza prawego ramienia ma w $t = 0$ współrzędne $x_0 = p$, gdzie p zawiera się pomiędzy $-a$ i $L - a$ oraz $y_0 = a$. W późniejszej chwili t ten punkt ostrza jest obrócony o kąt ωt wokół O, czyli ma współrzędne

$$x = p\cos\omega t - a\sin\omega t \quad \text{i} \quad y = p\sin\omega t + a\cos\omega t \tag{2}$$



Rys. 1

Punkt P przecięcia się ostrzy ramion ma w $t=0$ współrzędne $x=0$ oraz $y=a$. W dowolnej późniejszej chwili t punkt przecięcia P ma nadal współrzędną $x=0$, stąd dostajemy z pierwszego wzoru (2) wartość p tego punktu prawego ostrza, który pokrywa się z P, $p=a\dfrac{\sin\omega t}{\cos\omega t}$. Wstawiając tę wartość do drugiego wzoru (2), dostajemy współrzędną y punktu P jako funkcję czasu:

$$y(t)=\frac{a}{\cos\omega t} \tag{3}$$

Prędkość przesuwania się punktu przecięcia ostrzy jest

$$v=\frac{dy}{dt}=\frac{a\omega\sin\omega t}{\cos^2\omega t}. \tag{4}$$

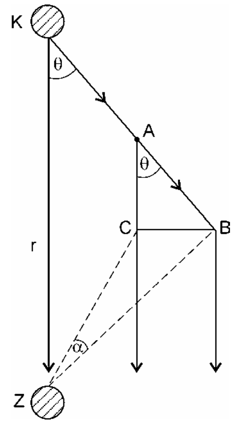
Prędkość końca ramienia nożyczek musi być mniejsza od c, czyli $(L-a)\omega<c$, a ponieważ nożyczki są długie, $L>>a$, więc $L\omega<c$ i dostajemy ograniczenie na prędkość kątową nożyczek, by ruch był sztywny, $\omega<{}^{c}\!/\!{}_{L}$. Ramiona nożyczek pokryją się dla kąta obrotu $\omega t=\dfrac{\pi}{2}$, zatem ruch punktu przecięcia P trwa od $t=0$ do chwili $t\cong\dfrac{\pi L}{2c}$. Ze wzoru (4) widzimy, że początkowo prędkość punktu P narasta liniowo z czasem, $v(t)\cong a\omega^2 t$, a dla ωt zbliżającego się do $\dfrac{\pi}{2}$ prędkość ta zachowuje się jak $\dfrac{a\omega}{\cos^2\omega t}$, czyli rośnie do nieskończoności. Również ta prędkość nadświetlna jest realna — można ją zmierzyć, lecz jest to prędkość „geometryczna” nasuwania się na siebie dwu figur i nie towarzyszy jej transport materii i energii. Wsadźmy między ramiona nożyczek w punkcie P małą kulkę, która może się ślizgać po ostrzu bez tarcia. Stykające się ostrza wypychają kulkę wzdłuż nich, tak że porusza się ona jak punkt P. Dopóki prędkość kulki jest niewielka, to pobiera niewiele energii od nożyczek i nie wpływa na ruch ich ramion. Gdy prędkość punktu P i kulki stanie się relatywistyczna, do dalszego jej przyspieszania potrzebna będzie coraz większa siła. Nawet jeżeli obrót nożyczek jest napędzany jakimś silnikiem dysponującym nieograniczonym zapasem energii, to w miarę zbliżania się prędkości kulki do c jej relatywistyczna energia będzie rosnąć do nieskończoności i kulka wyhamuje ruch ramion. Ani punkt przecięcia ostrzy, ani tym bardziej kulka, nie osiągną i nie przekroczą prędkości światła.

Tu rozważaliśmy jednostajny obrót ramion nożyczek. Co będzie, jeżeli początkowo nożyczki są rozwarte, nieruchome i w pewnej chwili ściskamy je, by je zamknąć? Punkt przecięcia ostrzy nie będzie oddalać się z prędkością (4). Para sił ściskających wywoła w ramionach nożyc impuls nadający im prędkość obrotową; impuls biegnie w postaci fali sprężystej. Mikroskopowo impuls przesuwa kolejne molekuły sieci krystalicznej metalu z ich położeń równowagi, przez co molekuły te popychają sąsiednie molekuły i ta część kryształu zaczyna się poruszać. Prędkość kawałka kryształu zależy od przyłożonej siły, natomiast sam impuls biegnie z prędkością dźwięku. Z natury dźwięku jako fali sprężystej (drgania molekuł sieci krystalicznej) wynika, że jego prędkość jest mniejsza od c. Dopiero gdy impuls przebiegnie całe ramiona, zaczynają się one obracać i szczegółowe własności dynamiczne sieci krystalicznej danego materiału (metalu) decydują o tym, kiedy ustaną drgania i nożyczki zaczną się obracać ruchem sztywnym. Ta argumentacja jest szczególnym przypadkiem ogólnego rozumowania, podanego np. w sławnym podręczniku „Teoria pola" Landaua i Lifszica: ciało rozciągłe zbudowane z atomów nie może być doskonale sztywne, bowiem wtedy dźwięk miałby prędkość nieskończoną.

Skoro proste przykłady myślowe nie dają nam ruchów ciał fizycznych z prędkościami nadświetlnymi, to może obserwacje astronomiczne dostarczają czegoś takiego?

Nadświetlne strugi z kwazarów

Gdy w latach siedemdziesiątych XX w. zaczęto prowadzić obserwacje radioastronomiczne metodą interferometrii o bardzo długiej bazie (VLBI), dokonano fascynującego odkrycia: z wielu kwazarów wytryskują strugi materii, których przesuwanie się na niebie można dostrzec po kilku miesiącach obserwacji. W licznych przypadkach strugi te poruszają się szybciej od światła w próżni! Sensacje te trafiły na łamy gazet: czyżby teoria względności była błędna? Jak powiedzieliśmy na początku, STW dopuszcza ruchy nadświetlne, zatem te kwazary jej nie obalają. Dalej, obserwacje spektroskopowe wykazały, że strugi te tworzy gorąca plazma zwyczajnej materii, na pewno nie są to hipotetyczne tachiony zawsze poruszające się z prędkościami nadświetlnymi. Szybko też zorientowano się, że jest to efekt czysto geometryczny, wynikający z ukośnego ruchu strumienia gazu. Zobaczmy jak można imitować ruch nadświetlny. Nieruchomy kwazar K wyrzuca strugę gorącej plazmy pod kątem θ do kierunku KZ obserwacji z Ziemi (rys. 2). Struga ma fizyczną prędkość $v < c$. W chwili t_A struga znajdująca się w punkcie A emituje światło obserwowane na Ziemi w chwili t_1. W późniejszej chwili t_B struga dociera do punktu B i jej światło stamtąd dochodzi do nas w chwili t_2. Kąta θ nie potrafimy zmierzyć, bowiem w promieniowaniu radiowym plazmy (dla skrótu piszemy „światło", lecz faktycznie są to głównie fale radiowe) nie ma charakterystycznych linii widmowych, dla których można zmierzyć efekt Dopplera; jedyne, co potrafimy obserwować, to ruch poprzeczny do kierunku obserwacji. Dla nas struga przesunęła się w czasie $t_2 - t_1$ z C do B („ruch na niebie"). Odcinek CB widzimy pod małym kątem α, a ponieważ odległość KZ = r do kwazara jest dużo większa od odległości KC i KB, to proste KZ, AZ i BZ są prawie równoległe i możemy przyjąć $CZ \cong BZ \cong r$, stąd długość $CB \cong \alpha r$. Zatem obserwowana prędkość poprzeczna (i pozorna) strugi jest $v_p = \frac{\alpha r}{t_2 - t_1}$. Z rysunku mamy:



Rys. 2

$$AC = AB\cos\theta = v(t_B - t_A)\cos\theta \text{ oraz } BC = v(t_B - t_A)\sin\theta,$$

więc $v_p = \frac{BC}{t_2 - t_1} = \frac{v(t_B - t_A)\sin\theta}{t_2 - t_1}$. Różnicy $t_B - t_A$ nie znamy. Aby ją wyliczyć bierzemy różnicę dróg przebytych przez światło z A i B: $AZ - BZ = c(t_1 - t_A) - c(t_2 - t_B) = AC$, jest to liniowe równanie dla $t_B - t_A$ mające rozwiązanie $t_B - t_A = \frac{t_2 - t_1}{1 - \frac{v}{c}\cos\theta}$. Mianownik jest mniejszy od 1, zatem $t_B - t_A > t_2 - t_1$. Pozorny czas przelotu strugi na niebie z C do B: $t_2 - t_1$ jest krótszy od rzeczywistego czasu przelotu z A do B i to sprawia, że v_p może być większa od *c*. Ostatecznie dostajemy

$$v_p = \frac{v\sin\theta}{1 - \frac{v}{c}\cos\theta} \tag{5}$$

Jest to funkcja dwu zmiennych. Przy ustalonej prędkości strugi v osiąga ona maksimum dla $\cos\theta = \frac{v}{c}$, jest wtedy równa $v_p = \frac{v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$. W tym przypadku prędkość pozorna przewyższa c, gdy $v > \frac{c}{\sqrt{2}}$, czemu odpowiada $\theta < \frac{\pi}{4}$. Struga musi więc mieć prędkość bliską c, natomiast kąt θ nie może być zbyt mały, bo dla $\theta \to 0$ prędkość pozorna jest $v_p \cong \frac{v\theta}{1-\frac{v}{c}}$ i też zmierza do zera. Dla $v = 0{,}9c$ i $\theta = 30°$ dostajemy $v_p = 2{,}040c$. W niektórych kwazarach pozorne ruchy nadświetlne mają prędkości ponad 10c.

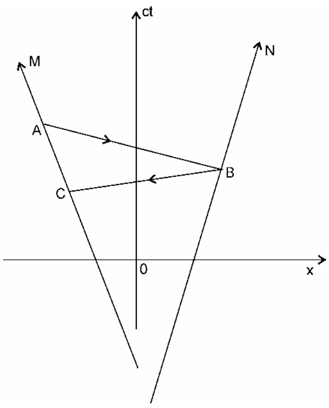
Ucieczka galaktyk

Inny przykład prędkości nadświetlnych mamy w kosmologii. Z książek popularnonaukowych dowiadujemy się, że we Wszechświecie powszechnie występuje zjawisko „ucieczki galaktyk": każde dwie galaktyki odległe o r oddalają się od siebie z prędkością wprost proporcjonalną do odległości (prawo Hubble'a): $v = Hr$, gdzie H jest tzw. stałą Hubble'a, równą ok. 22 km/s na milion lat świetlnych. Oznacza to, że dwie galaktyki odległe od siebie o ponad 14 mld lat świetlnych rozbiegają się z prędkością względną większą od c. Taki wniosek jest błędny z dwu powodów. Po pierwsze, powyższe prawo Hubble'a jest słuszne tylko dla v dużo mniejszych od c. Po drugie, nie jest to fizyczne przemieszczanie się ciała w przestrzeni, lecz wynikające z ogólnej teorii względności rozszerzanie się przestrzeni samej w sobie.

Tachiony

Na koniec „tachiony", hipotetyczne cząstki elementarne, które z definicji mają prędkości nadświetlne, lecz w konsekwencji nigdy nie mogą spowolnić i nie mogą zatrzymać się (podobnie jak fotony). STW nie wyklucza ich istnienia. Mają one zdumiewające własności. Wzór (1) jest słuszny również wtedy, gdy prędkości v' i V są przeciwnie skierowane, tj. gdy jedna z nich jest ujemna. Niech $v' > c$, wówczas jeżeli prędkość V układu S względem S' jest $V = -\frac{c^2}{v'}$ (co do modułu jest mniejsza od c), to w S tachion ma prędkość $v = \infty$ – porusza się nieskończenie szybko! Co więcej, z transformacji Lorentza wynika, że jeżeli w pewnym układzie inercjalnym S tachion w chwili t_A był w punkcie A, a w późniejszej chwili t_B dotarł do punktu B, to istnieje taki inercjalny układ odniesienia S', w którym dotarcie tachionu do A jest późniejsze (w sensie czasu mierzonego w tym układzie) od jego przybycia do B – kolejność zdarzeń w A i B jest w S' odwrócona względem kolejności w układzie S. Innymi słowy, zawsze istnieje taki układ odniesienia, w którym dany tachion porusza się z nadświetlną prędkością w tył w czasie! Prowadzi to do oczywistych problemów z przyczynowością.

Wybitny fizyk i matematyk angielski, Roger Penrose, podał logiczny dowód niemożliwości istnienia tachionów. Wyobraźmy sobie przyrząd, który może emitować i rejestrować tachiony; jest on zbudowany z normalnej materii, zatem w każdym układzie odniesienia ma prędkość mniejszą od *c*. Weźmy dwa takie przyrządy, M i N, poruszające się w przeciwnych kierunkach. Załóżmy dla prostoty, że mają znikomo małe rozmiary, zatem na diagramie czasoprzestrzennym historia każdego z nich („linia świata"), czyli zbiór jego położeń w różnych chwilach, jest linią prostą nachyloną do osi czasu pod kątem mniejszym od 45°. Istnieje taki układ inercjalny, w którym tachiony emitowane przez M i N poruszają się w tył w czasie (rys. 3). Niech M emituje w punkcie (zdarzeniu) A tachion, który dociera do N we wcześniejszym (w tym układzie) punkcie B, N momentalnie emituje inny tachion, który wraca do M jako odpowiedź w punkcie C. Odpowiedź jest wcześniejsza od pytania, zatem dla M zdarzenie C jest przyczyną, zaś A – skutkiem, a nie na odwrót. Tachiony niosą energię, więc i informację. Załóżmy, że przenoszone są dwa rodzaje informacji (sygnały), nazwijmy je TAK i NIE. Przyrząd M jest tak zaprogramowany, że na sygnał TAK odpowiada NIE, a na NIE odpowiada TAK; zaś N odpowiada takim samym sygnałem, czyli TAK–TAK i NIE–NIE. Niech z B do C dociera tachion niosący sygnał TAK, wówczas M odpowiada w punkcie A sygnałem NIE, sygnał ten przychodzi do N w B i zwrotnie zostaje wysłany tachion z sygnałem NIE. Dostajemy sprzeczność: jeżeli do C dotarł sygnał TAK, to był to sygnał NIE. Taka sama sprzeczność pojawi się, jeżeli do C dotarł sygnał NIE. Penrose stwierdza, że „urządzenie wysyłające sygnały szybsze od światła jest fizycznie niemożliwe" i wnioskuje stąd, iż tachiony nie istnieją.



Rys. 3

Rozumowanie Penrose'a wydaje się nieodparte, jednak zawiera lukę. Zakłada mianowicie, że można ze zwykłej materii zbudować urządzenie, które „strzela" tachionami jak elektronami lub fotonami. Tego jednak nie wiemy – nie mamy żadnej teorii opisującej dynamikę oddziaływań tachionów między sobą i ze zwykłymi cząstkami. W tym kontekście prof. Andrzej Staruszkiewicz podkreśla, że argumentacja w fizyce musi posługiwać się modelami, czyli teoretycznym opisem wyjaśniającym mechanizm danego zjawiska, a tego właśnie w przypadku tachionów nam brakuje. Penrose wskazał jedynie, że oddziaływania tachionów muszą być radykalnie odmienne od oddziaływań znanych cząstek. Zauważmy bowiem, że w rozumowaniu Penrose'a możemy zastąpić przyrządy M i N zbudowane ze zwykłej materii aparatami złożonymi z tachionów — wystarczy linie świata M i N narysować na rys. 3 nachylone do osi czasu pod kątem większym od 45°. Być może tachiony mogą istnieć tylko jako cząstki swobodne i nie mogą wchodzić w żadne oddziaływania.

W każdym razie o istnieniu tachionów nie da się rozstrzygnąć w ramach samej STW używając argumentów czysto logicznych. Do tego potrzebna jest teoria (i oczywiście doświadczenie!) oddziaływań cząstek elementarnych.

I na zakończenie podkreślmy, że to, co powiedzieliśmy o niemożliwości prędkości nadświetlnych, odnosi się do ciał niemal punktowych i traktowanych jako klasyczne, poruszających się w pustej nieograniczonej przestrzeni. W przypadku fal, czyli obiektów z założenia rozciągłych, oraz dla cząstek kwantowych sprawa znacznie się komplikuje. W ośrodku będącym np. atomowym gazem lub w „próżni" (nie ma cząstek elementarnych) wypełnionej polami kwantowymi, gdy uwzględnimy efekty kwantowe, mogą dziać się rzeczy doprawdy niezwykłe. W 1990 r. K. Scharnhorst przewidział, że w tzw. zjawisku Casimira fotony mogą biec z prędkością większą niż *c*! Niestety wytworzenie zjawiska Scharnhorsta jest poza zasięgiem obecnych technik eksperymentalnych. Pełne zrozumienie tego zjawiska i wykazanie, iż jest ono zgodne z STW, wymaga bardzo zaawansowanej fizyki.

W każdym razie twierdzenie, że energia nie może podróżować szybciej niż *c*, nie należy do korpusu STW, lecz do konkretnych teorii fizycznych opartych na STW, takich jak kwantowa teoria cząstek elementarnych i teoria zjawisk falowych i tylko w ich obrębie jest prawdziwe lub nie.

Gdy uwzględnimy oddziaływania grawitacyjne, czyli przejdziemy do zakrzywionych czasoprzestrzeni opisywanych ogólną teorią względności, to problem prędkości nadświetlnych dodatkowo się komplikuje, bowiem trzeba ściśle określić, co to jest odległość i przedział czasu.

Literatura

[1] M. Jaroszyński, *Galaktyki i budowa Wszechświata*, Wyd. PWN, Warszawa 1993.
[2] R. Penrose, *Nowy umysł cesarza*, Wyd. PWN, Warszawa 1995, rozdz. 5.