

Stanisław Mrówczyński

Instytut Badań Jądrowych
Warszawa

Tachiony: cząstki szybsze niż światło

Tachions: Faster than Light Particles

Abstract: Objections to particles faster than light are discussed. The ideas of the special theory of relativity extended to tachions are also presented.

Fundamentem, na którym zbudowana jest szczególna teoria względności (STW), jest założenie, że prędkość światła c jest maksymalną i niezmienniczą prędkością występującą w przyrodzie. Doświadczalnie potwierdzony jest jedynie niezmienniczy charakter tej prędkości. Zachodzi więc pytanie, czy możliwe jest zbudowanie teorii, w której prędkość c będzie niezmiennicza oraz dopuszczalne będą zarówno prędkości mniejsze, jak i większe od c . Ponieważ nowa teoria powinna być zgodna z STW przy opisie obiektów wolniej-nych niż światło, zastanówmy się, co na gruncie STW przemawia przeciw jej rozszerzaniu.

Przy okazji warto przypomnieć zdanie Gell-Manna, że „coś co nie jest zabronione, musi istnieć”.

Pierwszym argumentem wysuwany przez przeciwników koncepcji tachionów jest stwierdzenie, że niemożliwe jest przyspieszenie cząstki do prędkości większej niż c , gdyż wymagałoby to przejścia przez barierę nieskończonej energii występującej przy tej prędkości. Wynika to z relatywistycznego związku energii E i prędkości v dla cząstki

$$E = \frac{m}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad (1)$$

gdzie m jest masą cząstki, a $\beta = v/|c|$ ($|\beta| < 1$), gdyż przyjmujemy $c = 1$.

Ale czyż nie znamy obiektów, których nie potrafimy rozpedzić, czy też w ogóle zmienić ich prędkości. Przecież zatrzymanie fotonu czy neutrino jest równoważne z jego unicestwieniem. Można więc wyobrazić sobie obiekty, które są bez przerwy w ruchu z prędkością większą niż c i których nie możemy przeprowadzić przez barierę prędkości światła. Według jednego z twórców teorii tachionów E. C. G. Sudarshana wysuwając powyższy argument przeciw istnieniu tachionów zachowujemy się jak ów indyjski demograf, który twierdził, że nie ma ludzi na północ od Himalajów, gdyż wówczas nikt nie potrafił przejść przez te

góry. Uogólnienie wzoru (1), tak, by opisywał on energię cząstek poruszających się zawsze szybciej niż światło jest dość oczywiste. Jeżeli $|\beta| > 1$, to energia staje się urojona. Gdy jednak wprowadzimy urojoną masę $m' = i \cdot m$, gdzie m jest rzeczywiste, to energia staje się wielkością rzeczywistą. Wzór na energię tachionu możemy napisać w postaci $(\sqrt{1-\beta^2} = \pm i\sqrt{\beta^2-1}$ dla $|\beta| > 1$):

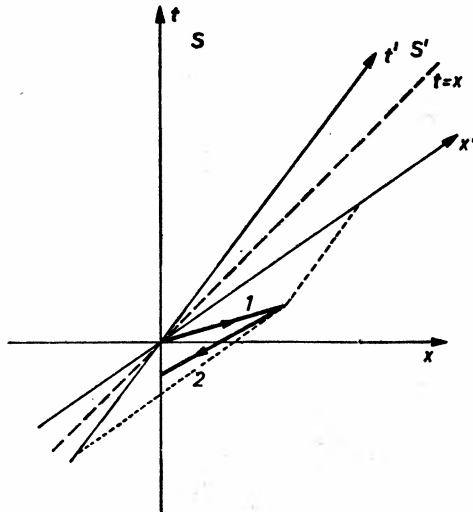
$$E = \pm \frac{m}{\sqrt{\beta^2-1}}, \quad |\beta| > 1.$$

Sprawę znaku przedyskutujemy w dalszej części artykułu, gdzie powyższy wzór wyprowadzimy i dokładniej przeanalizujemy.

Czy pomysł z urojoną masą jest do przyjęcia? Masa jest wielkością mierzalną tylko w układzie spoczynkowym. W układach poruszających się możemy zmierzyć jedynie energię. Dopóki obracamy się w świecie, gdzie masa jest rzeczywista, to nie możemy przekroczyć prędkości światła i przejść do układu spoczynkowego tachionu. Tym samym nie możemy zmierzyć jego masy spoczynkowej, lecz jedynie energię, a ta jest rzeczywista.

Drugim, znacznie silniejszym argumentem przeciw tachionom jest tzw. paradoks przyczynowy, zwany również paradoksem Tolmana [1].

Rozważmy dwa poruszające się względem siebie układy S i S' oraz dwóch obserwatorów związanych z tymi układami. Obserwator w S wysłał tachion do obserwatora w S' . Ten po odebraniu go wysłał drugi tachion do obserwatora w S . Istnieje możliwość takiego doboru prędkości tachionów oraz względnej prędkości układów (tej ostatniej mniejszej od c) że drugi tachion przybywa do obserwatora w S zanim pierwszy tachion został wyemitowany. Powyższą sytuację, określoną jako zamknięcie pętli przyczynowej, ilustruje rys. 1.



Rys. 1. Paradoks Tolmana. Obserwator z układu S wysłał tachion 1 do obserwatora znajdującego się w poruszającym się układzie S' . Obserwator z S' po odebraniu tachionu 1 wysłał tachion 2 do obserwatora z S . Widzimy, że tachion 2 przybył do punktu $x = 0$ zanim tachion 1 został wyemitowany. Strzałkami zaznaczono kierunek ruchu tachionów

Źródłem paradoksu jest to, że tachion poruszający się do przodu w czasie w jednym układzie (tutaj w układzie z którego jest wysyłany) może poruszać się wstecz w czasie w innym układzie (w naszym przypadku w układzie, w którym jest odbierany).

Istnienie przedstawionego paradoksu sformułowanego w roku 1917, którego rezultat jest niezgodny z zasadą przyczynowości, spowodował brak zainteresowania tachionami aż do lat sześćdziesiątych, kiedy to został sformułowany postulat reinterpretacji [2], umożliwiający rozwiązanie paradoksu. Zgodnie z tym postulatem tachion poruszający się do tyłu w czasie należy interpretować jako antytachion poruszający się do przodu w czasie.

Konsekwencje stosowania postulatu reinterpretacji są zadziwiające. Po pierwsze pojęcia przyczyny i skutku nie są bezwzględne. Ocena co jest przyczyną, a co skutkiem zależy od układu, w którym znajduje się obserwator. Tak samo względne są detektor i źródło, emisja i absorpcja. Po drugie, transformacja cząstka-antycząstka może być zrealizowana przez właściwą transformację Lorentza. Znaczy to, że ten sam obiekt widziany przez dwóch obserwatorów, dla jednego może być cząstką, a dla drugiego antycząstką!

Pomijając te dosyć szokujące fakty, sprawiające, że postulat reinterpretacji nie jest powszechnie akceptowany, zastanówmy się jakie argumenty za tym postulatem przemawiają. Od razu można powiedzieć, że nadawanie relatywnego charakteru pewnym pojęciom jest zgodne z duchem teorii względności i przedstawiona idea wydaje się być bardziej lub mniej logiczną kontynuacją myśli Einsteina. Dalej, warto wspomnieć, że podobny charakter do postulatu reinterpretacji ma postulat, zgodnie z którym rozwiązania równania Diraca bądź innych równań relatywistycznych z ujemnymi energiami interpretuje się jako rozwiązania odpowiadające antycząstkom, co, jak wiadomo, prowadzi do wyników zgodnych z doświadczeniem. Na gruncie mechaniki kwantowej można poczynić jeszcze jedną obserwację. Jeżeli

$$f(\vec{p}, E) = \frac{1}{(2\pi)^4} \int \tilde{f}(\vec{x}, t) \exp(i\vec{p}\vec{x} - iEt) d^4x,$$

to

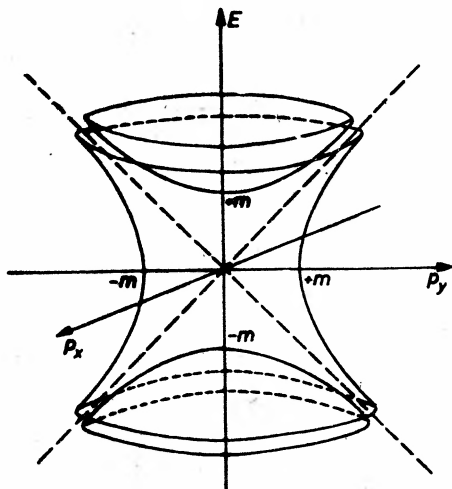
$$f(\vec{p}, -E) = \frac{1}{(2\pi)^4} \int \tilde{f}(\vec{x}, -t) \exp(i\vec{p}\vec{x} - iEt) d^4x.$$

Dwa paradoksalne fakty ujemnej energii i ruchu do tyłu w czasie można więc reinterpretować, jeśli występują jednocześnie.

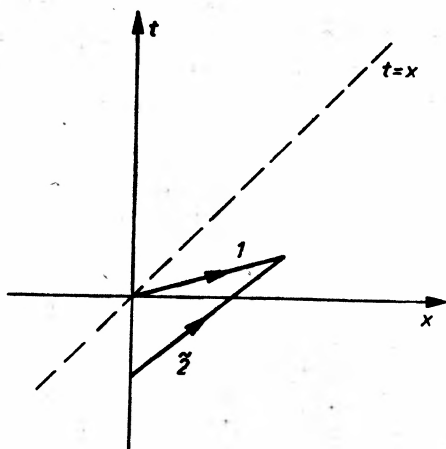
Jeśli przyjąć, że tachiony mają urojoną masę $m' = i \cdot m$, to wówczas

$$E^2 - \vec{p}^2 = \pm m^2,$$

gdzie znak plus odpowiada bradionowi, tzn. cząstce wolniejszej niż światło, znak zaś minus tachionowi. Na dualnym wykresie Minkowskiego powyższą równość możemy przedstawić w postaci dwóch hiperboloid, jak to pokazano na rys. 2. Z wykresu odczytujemy, że w przypadku bradionów dokonując właściwych transformacji Lorentza możemy uzyskać różny znak pędu cząstki. Nie możemy natomiast zmienić znaku energii, co oznacza, że przez właściwą transformację Lorentza nie możemy zmienić cząstki na antycząstkę. Ponieważ hiperboloida tachionu, w odróżnieniu od hiperboloidy bradionu, jest jednopowło-



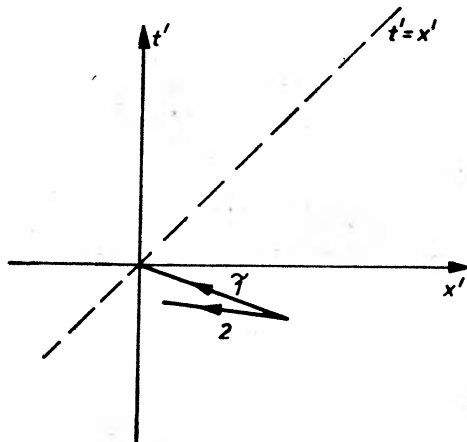
Rys. 2. Dwupowłokowa hiperboloida bradionu i jednopowłokowa hiperboloida tachionu. Niezmienniczość wielkości m^2 oznacza, że przy właściwych transformacjach Lorentza następuje przesunięcie po hiperboloidzie punktu opisującego energię i pęd cząstki. Na rysunku przedstawiona jest dualna przestrzeń Minkowskiego ograniczona do dwóch wymiarów przestrzennych



Rys. 3. Sytuacja z rys. 1 widziana przez obserwatora w S po reinterpretacji. Tachion 2 stał się antytachionem $\tilde{2}$ i zmienił kierunek ruchu

kowa, właściwymi transformacjami Lorentza możemy zmienić zarówno pęd jak i energię tachionu, co nieco wyjaśnia drugą z wyliczonych konsekwencji postulatu reinterpretacji.

Po tych uwagach zademonstrujemy, jak korzystając z postulatu reinterpretacji można rozwiązać paradoks Tolmana. Należy stwierdzić co widzą obserwatorzy w układach S i S' , pamiętając o tym, że w danym układzie tachiony poruszające się do tyłu w czasie należy reinterpretować (patrz rys. 3 i 4). Każdy z obserwatorów uważa, że to on wyemitował oba tachiony, a dokładniej tachion i antytachion, a ponieważ w żadnym z układów nie ma związków przyczynowych między aktami emisji obu tachionów, zasada przyczynowości



Rys. 4. Sytuacja z rys. 1 widziana przez obserwatora w S' po reinterpretacji. Tachion 1 stał się antytachionem $\bar{1}$ i zmienił kierunek ruchu

nie jest łamana. Cena za rozwiązanie paradoksu jest wysoka. Po pierwsze, o przyczynie i skutku można mówić tylko w danym układzie odniesienia, co odbiera tym pojęciom charakter absolutny i nadaje szczególny sens zasadzie przyczynowości. Po drugie, pojawia się przy powyższym rozwiązaniu tzw. problem wolnej woli. Chodzi o to, że wysłanie tachionu 2 z układu S jest niezależne od woli obserwatora w S . Problem wolnej woli pojawiający się przy stosowaniu postulatu reinterpretacji jest jednym z większych mankamentów teorii tachionów.

Po pokazaniu, lub jak kto woli próbie pokazania, że koncepcja tachionów nie jest pozbawiona sensu, przedstawimy postulaty i szereg ważniejszych rezultatów rozszerzonej teorii względności (RTW). Zanim to zrobimy zapoznamy Czytelnika z terminologią używaną w tej teorii. Do poprzednio wprowadzonych określeń bradion i tachion dołączymy nazwę lukson¹ oznaczającą cząstkę poruszającą się z prędkością światła [4]. Układ nazywamy subluminalnym (superluminalnym), gdy porusza się on względem danego układu z prędkością mniejszą (większą) niż c . Analogiczny sens mają: transformacja subluminalna i superluminalna. Tachion lub układ nazywamy transcendentnym, gdy porusza się on z prędkością nieskończoną względem danego układu.

Postulaty RTW

1. Czasoprzestrzeń jest jednorodna i przestrzeń jest izotropowa.
2. Prawa fizyki są niezmiennicze przy transformacjach z jednego układu inercjalnego do drugiego, przy czym układy te mogą być zarówno subluminalne, jak i superluminalne.
3. Prędkość światła jest taka sama we wszystkich układach inercjalnych subluminalnych i superluminalnych.

¹ Nazwy bradion, tachion i lukson pochodzą z języka greckiego i znaczą powolny, szybki, świetlny.

4. Nie istnieją obiekty poruszające się do tyłu w czasie. Cząstki poruszające się do tyłu w czasie należy interpretować jako antycząstki poruszające się do przodu w czasie.

Postulat drugi jest rozszerzoną zasadą względności, zaś postulat czwarty uprzednio wprowadzonym postulatem reinterpretacji. W postulatcie pierwszym zaznaczamy nieizotropowość czasu, przyjmując kierunek zgodny z kierunkiem przemian termodynamicznych i ewolucją wszechświata za wyróżniony. Dalsze rozważania ograniczymy do teorii jednowymiarowej (jeden wymiar przestrzenny i jeden czasowy), zaznaczając, że uogólnienie na pełną czasoprzestrzeń nie jest trywialne i budzi cały szereg kontrowersji (patrz np. [3]).

Zastanówmy się jakie własności będzie miał interwał czasoprzestrzenny zdefiniowany wzorem

$$s^2 = t^2 - x^2, \quad (c = 1).$$

Rozważmy transformację s^2 z jednego układu inercyjnego do drugiego

$$S'^2 = F(S^2)$$

Ze względu na jednorodność przestrzeni funkcja F nie może zależeć od współrzędnych przestrzennych. Jedynym parametrem tej funkcji może być względna prędkość układów β , co zaznaczamy

$$F(s^2) = F_{\beta}(s^2).$$

Zauważmy, że

$$F_{\beta}^{-1} = F_{-\beta}.$$

Jeżeli zażądamy, zgodnie z postulatem izotropowości przestrzeni, aby

$$F_{\beta} = F_{-\beta},$$

to dostajemy ostatecznie

$$F_{\beta} = F_{\beta}^{-1}.$$

Ponieważ,

$$F_{\beta=0}(s^2) = s^2,$$

to zgodnie z warunkiem ciągłości F jako funkcji β oraz poprzednio wyprowadzonymi warunkami otrzymujemy

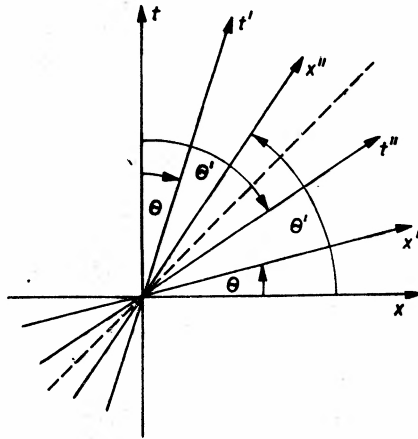
$$F_{\beta}(s^2) = s^2 \quad \text{dla} \quad |\beta| < 1$$

Ponieważ F nie musi być funkcją ciągłą β dla $|\beta| = 1$ (nie istnieją luksonowe układy odniesienia, zgodnie bowiem z STW, lukson jest obiektem bezmasowym), możemy funkcję transformującą interwał zdefiniować w sposób następujący, zgodny z wyżej wprowadzonym warunkiem

$$S'^2 = \begin{cases} +S^2 & \text{dla} \quad |\beta| < 1 \\ -S^2 & \text{dla} \quad |\beta| > 1 \end{cases} \quad (2)$$

Za wyborem takiej postaci funkcji F dla $|\beta| > 1$ przemawia fakt następujący. Na wykresie Minkowskiego układ poruszający się względem danego przedstawiamy jako układ skośno-

kątny jak to zrobiono na rys. 5, gdzie $\operatorname{tg} \theta = \beta$. Jeśli $|\beta| > 1$, to $\theta > 45^\circ$, co oznacza, że współrzędna czasowa i przestrzenna „zamieniają się rolami”. Sprawia to, że wektory przestrzenne w układach subluminalnych są wektorami czasowymi w układach superluminalnych. Analogicznie zamieniają się oczywiście wektory czasowe na przestrzenne. Zmiana typu wektora przy transformacjach superluminalnych odpowiada właśnie zmianie znaku interwału. Tak więc uzyskaliśmy pierwszą bardzo istotną cechę RTW — przy transformacjach superluminalnych typ wektora ulega zmianie, podczas gdy przy transformacjach subluminalnych zachowuje się. Na podstawie wzoru (2) można dokonać podziału układów



Rys. 5. Układ spoczywający S i dwa układy poruszające się S' i S'' . Względna prędkość S i S' jest mniejsza niż c , a S i S'' większa niż c . $\operatorname{tg} \theta = \beta$

inercjalnych względem danego obserwatora na dwa rozłączne zbory układów subluminalnych i superluminalnych. Prędkość względna dwóch dowolnych układów subluminalnych albo superluminalnych jest mniejsza niż c , zaś układu subluminalnego i superluminalnego jest większa niż c . Dalej stwierdzamy, że względem układu superluminalnego tachion jest bradionem, zaś bradion tachionem. Luksony mają charakter bezwzględny, tzn. mają stałą szybkość we wszystkich układach odniesienia. I jeszcze jedna uwaga dotycząca dualnej przestrzeni Minkowskiego. Odpowiednikiem wzoru na interwał czasoprzestrzenny jest wzór

$$E^2 - \bar{p}^2 = +m^2,$$

który dla tachionów przyjmuje postać

$$E^2 - \bar{p}^2 = -m^2.$$

Co oznacza, że

$$E^2 = \bar{p}^2 \pm m^2.$$

Widzimy więc, że nie jest konieczne traktowanie masy tachionu jako wielkości urojonej, można uważać, że

$$\begin{aligned} E^2 &= \bar{p}^2 + m^2 && \text{dla bradionów,} \\ E^2 &= \bar{p}^2 - m^2 && \text{dla tachionów.} \end{aligned}$$

Poszukując liniowej transformacji współrzędnych zachowującej interwał albo zmieniającej jego znak, otrzymujemy [5]

$$x = \mu\gamma(x' + \beta t'), \quad t = \mu\gamma(t' + \beta x'), \quad (3)$$

gdzie

$$\mu = \begin{cases} 1 & \text{dla } |\beta| < 1 \\ \beta & \text{dla } |\beta| > 1 \end{cases}; \quad \gamma = |1 - \beta^2|^{-1/2}.$$

Dla $|\beta| < 1$, powyższa transformacja jest oczywiście zwykłą transformacją Lorentza. Ze wzorów (3) otrzymujemy dobrze znane prawo składania prędkości

$$\beta = \frac{\beta_1 + \beta_2}{1 + \beta_1 \cdot \beta_2}.$$

Wzory na transformację energii i pędu są zupełnie analogiczne do wzorów (3)

$$p = \mu\gamma(p' + \beta E'), \quad E = \mu\gamma(E' + \beta p'). \quad (4)$$

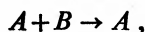
Korzystając z (4) możemy zapisać wyrażenia na energię i pęd bradionu i tachionu w funkcji prędkości

$ \beta < 1$	$ \beta > 1$
$p = \frac{m\beta}{\sqrt{ 1 - \beta^2 }}$	$p = \frac{m \beta }{\sqrt{ 1 - \beta^2 }}$
$E = \frac{m}{\sqrt{ 1 - \beta^2 }}$	$E = \frac{\beta}{ \beta } \frac{m}{\sqrt{ 1 - \beta^2 }},$

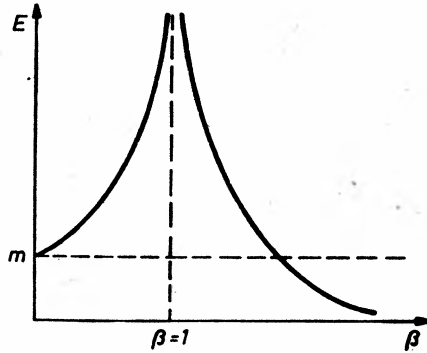
lub w bardziej zwartej postaci

$$E = \mu\gamma m, \quad p = \mu\beta\gamma m.$$

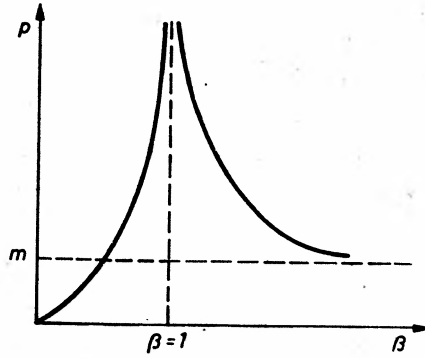
Zauważmy, że znak energii tachionu zależy od kierunku ruchu, podczas gdy znak pędu od kierunku prędkości jest niezależny. Mamy więc tutaj sytuację odwrotną niż w przypadku bradionu. Wykresy energii i pędu w pełnym zakresie zmienności β przedstawiają się jak na rys. 6 i 7. Tachion transcendentny niesie pęd, natomiast jego energia jest zerowa, co sprawia, że nie można przekazać energii z nieskończoną prędkością. Jest to niewątpliwie ładny wynik zgodny z fizyczną intuicją. Warto zwrócić uwagę na jeszcze inny fakt wynikający ze szczególnych własności kinematycznych tachionu. Otóż pewne typy reakcji niemożliwe, gdy obracamy się w świecie bradionów, stają się możliwe gdy jeden bradion zastąpić przez tachion. Np. reakcja zapisana symbolicznie



niedozwolona kinematycznie gdy cząstki A i B są bradionami, jest dozwolona, gdy cząstka A jest bradionem, a B tachionem. Co ciekawe, w takim przypadku, w pewnych ukła-



Rys. 6. Zależność energii od prędkości dla cząstki o masie m w pełnym zakresie zmienności β



Rys. 7. Zależność pędu od prędkości dla cząstki o masie m w pełnym zakresie zmienności β

dach odniesienia powyższa reakcja zgodnie z postulatem reinterpretacji będzie widziana jako rozpad bradionu A na bradion A i antytachion \bar{B} .

Jak dotychczas, nie została sformułowana teoria oddziaływania tachionów z bradionami, a co za tym idzie brak jest opisu oddziaływania tachionów z materią (bradionową). Nie wiadomo również jak powinien wyglądać detektor tachionów. Cały szereg eksperymentów, w których próbowano wykryć tachiony, okazał się oparty na błędnych, bądź co najmniej wątpliwych, podstawach teoretycznych [3]. Jedyne eksperyment, którego wartość jest niepodważalna, to doświadczenie, w którym poszukiwano tachionów wyprodukowanych w zderzeniach mezonu K^- z protonem [6]. Nie zakładając nic o oddziaływaniu tachionów z bradionami, a korzystając jedynie z własności kinematycznych obiektów nadświetlnych, wyznaczono górne granice przekrojów czynnych na produkcję tachionu w kilku reakcjach badając tzw. masę brakującą w reakcji. I tak np.

$$\frac{\sigma(K^- p \rightarrow \Lambda^0 + t^0)}{\sigma(K^- p \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0)} < 2 \cdot 10^{-3},$$

gdzie t^0 oznacza neutralny tachion, zaś symbol $\sigma(K\bar{p} \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0)$ przekrój czynny na produkcję hiperonu Λ^0 i mezonu π^0 w zderzeniu mezonu K^- z protonem. Trzeba stwierdzić, że zebrany dotychczas materiał doświadczalny dotyczący tachionów jest bardzo ubogi i niewiele dostarcza argumentów zarówno zwolennikom jak i przeciwnikom tachionów.

Na koniec wyliczę już tylko kilka zagadnień szeroko dyskutowanych wśród „tachionologów”, które z powodu ograniczonej objętości artykułu zostały zupełnie w nim pominięte. Są to: tachiony w ogólnej teorii względności [7], elektrodynamika tachionów i związków tachionów z monopolami magnetycznymi, kwantowe teorie obiektów szybszych niż światło, tachiony w astrofizyce. Materiały dotyczące tych i szeregu innych problemów można znaleźć w sprawozdaniu z pierwszej międzynarodowej konferencji poświęconej tachionom jaka odbyła się na Sycylii w roku 1976 [8].

Literatura

- [1] R. C. Tolman, *The Theory of Relativity of Motion*, Univ. of California Press, Berkeley 1971, str. 54—55
- [2] O. M. P. Bilaniuk, V. K. Deshpande, E. C. G. Sudarshan, *Am. J. Phys.* **30**, 718 (1962).
- [3] E. Recami, R. Mignani, *Riv. Nuovo Cimento* **4**, 209 (1974).
- [4] G. Feinberg, *Phys. Rev.* **159**, 1089 (1967).
- [5] A. F. Antippa, *Nuovo Cimento* **10A**, 389 (1972).
- [6] C. Baltay et al., *Phys. Rev.* **D1**, 759 (1970).
- [7] J. K. Kowalczyński, *Phys. Lett.* **65A**, 269 (1977), **74A**, 157 (1979).
- [8] *Proceedings of the First Session of Interdisciplinary Seminars on Tachions and Related Topics*, Erice 1—15 September 1976, ed. Erasmo Recami 1978.