O fatalnym błędzie w fizyce tachionów.

Edward Kapuścik

WFiIS AGH

18 styczeń 2013

PLAN

1. Wstęp
2. Prędkości ruchów w STW
3. Narodziny tachionów
4. Eksperymenty Guentera Nimtza
5. Historyczna dygresja
6. Fatalny błąd G. Feinberga
7. Poprawne wyrażenia dla energii i pędu tachionów
8. Dynamika tachionów
9. Wnioski

Wstęp

Einstein stworzył Szczególną Teorię Względności (STW) w 1905 roku. Historia przytacza również wkład Lorentza, Fitzgeralda, Poincar'e'go, a później i Minkowskiego, który wprowadził pojęcie czwartego wymiaru.
Einstein poprawnie zrozumiał względność zarówno współrzędnych przestrzennych, jak i czasu oraz zapostulował uniwersalną postać zasady względności.

STW opiera się na transformacjach Lorentza postaci

$$t \to t' = \gamma \left(t - \frac{\vec{V} \cdot R\vec{x}}{c^2} \right),$$

$$\vec{x} \to \vec{x}' = R\vec{x} + (\gamma - 1)\frac{(\vec{V} \cdot R\vec{x})}{\vec{V}^2}\vec{V} - \gamma \vec{V} t,$$

gdzie

$$\gamma = \left(1 - \frac{\vec{V}^2}{c^2} \right)^{-1/2}$$

jest słynnym czynnikiem Lorentza, $\vec{V}$ jest względną prędkością dwóch obserwatorów używających współrzędnych $(t, \vec{x})$ i $(t', \vec{x}')$, R opisuje obroty układów współrzędnych przestrzennych, zaś c jest prędkością światła.

W dwuwymiarowych czasoprzestrzeniach wzory te znacznie się upraszczają i mają postać

$$t \to t' = \gamma \left(t - \frac{Vx}{c^2} \right),$$

$$x \to x' = \gamma (x - Vt).$$

Taka postać jest używana prawie we wszystkich podręcznikach i dyskusjach o STW.

Obecność pierwiastka kwadratowego w czynniku γ jest podstawą wniosku, że w STW niemożliwe są prędkości większe od prędkości światła. Należy jednak pamiętać, że w czynniku γ występują jedynie prędkości względne ruchu obserwatorów, a nie prędkości dowolnych ruchów.

Powstaje więc zasadne pytanie, czy STW ogranicza prędkości ruchów, czy też nie?

Prędkości ruchów w STW

Aby odpowiedzieć na to pytanie, popatrzmy na prawo transformacyjne dla prędkości w STW:

$$\vec{v}(t) = \frac{d\vec{x}(t)}{dt} \rightarrow \vec{v}'(t') = \frac{d\vec{x}'(t')}{dt'} = \frac{R\vec{v}(t) + (\gamma - 1)\frac{(\vec{V}\cdot R\vec{v}(t))}{\vec{V}^2}\vec{V} - \gamma\vec{V}}{\gamma\left[1 - \frac{(\vec{V}\cdot R\vec{v}(t))}{c^2}\right]},$$

gdzie zastosowano konwencję, że wielkości zmienne w czasie oznacza się małymi literami alfabetu, zaś wielkości stałe oznacza się dużymi literami alfabetu.

W dwuwymiarowej czasoprzestrzeni wzór ten znacznie się upraszcza i ma postać

$$v'(t') = \frac{v(t) - V}{1 - \frac{v(t)V}{c^2}}.$$

Ze wzorów tych widać, że transformacje Lorentza nie ograniczają prędkości ruchów. Na podstawie prawa transformacyjnego dla prędkości tak uważa wielu fizyków.

Czyżby więc w STW mogą występować dowolne prędkości?

Dla ostudzenia entuzjazmu tych fizyków przypomnę, że Einstein wyprowadził również wyrażenia dla energii i pędu punktów materialnych w postaci

$$E(t) = \frac{Mc^2}{\sqrt{1 - \frac{\vec{v}^2(t)}{c^2}}},$$

$$\vec{P}(t) = \frac{M\vec{v}(t)}{\sqrt{1 - \frac{\vec{v}^2(t)}{c^2}}}$$

i z tych wzorów już jednoznacznie wynika, że $|\vec{v}(t)| < c$.
Przez wiele lat oznaczało to wyrok śmierci dla tachionów!

Na przykład, Stephen Hawking w swojej książce *A Brief History of Time* napisał "that nothing may travel faster than the speed of light". Ale nastepnie, już nieco bardziej ostrożnie, stwierdził: "any normal object is forever confined by relativity to move at speeds slower than the speed of light" , nie specyfikując jednakże co należy rozumieć pod pojęciem normalnych obiektów. Później pokażę, że"normalnymi obiektami" w sensie Hawkinga są obiekty, dla których istnieje układ odniesienia, w którym one spoczywają.

Podobne stwierdzenia o maksymalności prędkości światła można znaleźć w tysiącach podręczników fizyki i monografii poświęconych STW.

Jedną z konsekwencji wzorów na energię i pęd jest związek

$$E^2 - c^2 \vec{P}^2 = M^2 c^4,$$

oznaczający, że czterowektor energii-pędu jest czasopodobnym wektorem. Związek ten jest podstawą kinematyki cząstek elementarnych i m. in. służy do wyznaczania mas cząstek elementarnych, powstających w procesach produkcji tych cząstek. Prędkość ruchu punktu materialnego o energii E i pędzie $\vec{P}$ wyznacza się przy tym ze wzoru

$$\vec{v} = c^2 \frac{\vec{P}}{E}.$$

Ponieważ $|c\vec{P}| < E$, to $|\vec{v}| < c$.

Narodziny tachionów

Mimo wyroku śmierci wydanego przez znawców STW tachiony jednak się pojawiły w świecie fizyki. W 1967 roku w *Physical Review* **159** 1089 (1967) pojawiła się praca wybitnego i wpływowego fizyka amerykańskiego Geralda Feinberga (1933 - 1992) pt. "Possibility of Faster-Than-Light Particles", w której autor stwierdza, że wszystkie argumenty używane przeciwko istnieniu tachionów są nieprzekonywujące. Idzie nawet dalej i mówi, że żaden eksperyment nie może wykazać logicznej sprzeczności istnienia tachionów, gdyż dla dowodu ich istnienia (lub nieistnienia) wystarczy zmierzyć energię i pęd i przekonać się, że $E^2 < c^2\vec{P}^2$ (lub $E^2 > c^2\vec{P}^2$).

Gerald Feinberg wprowadził do fizyki termin *tachion*. Jego rozważania natychmiast podjął inny bardzo wpływowy amerykański fizyk E. C. G. Sudarshan, który wraz ze swoimi współpracownikami opublikował w *American Journal of Physics* i *Physics Today* artykuły poświęcone tachionom. Wszyscy oni zupełnie formalnie zamienili masę cząstki M przez urojoną wielkość $i\mu$ i przekształcili wyrażenia na energię i pęd w nowe wyrażenia typu

$$E = \frac{\mu c^2}{\sqrt{\frac{\vec{v}^2}{c^2} - 1}},$$

$$\vec{P} = \frac{\mu \vec{v}}{\sqrt{\frac{\vec{v}^2}{c^2} - 1}}.$$

Ze wzorów tych widać, że tym razem prędkości $v > c$. A zatem, wydawało się, że najpoważniejsza przeszkoda dla istnienia tachionów została usunięta. Parametr μ o wymiarze masy nazwano *metamasą*.

Wartości tego parametru nie mogą jednak być zmierzone, gdyż pomiaru masy można dokonać tylko dla spoczywających obiektów a tachiony nie mogą znajdować się w stanie spoczynku. W całej historii tachionów nigdy nie zaproponowano żadnego pośredniego pomiaru metamasy.

Ze wzorów Feinberga na energię i pęd wynika że

$$E^2 - c^2 \vec{P}^2 = -\mu^2 c^4 < 0$$

a więc czterowektor energii-pędu jest wektorem przestrzennopodobnym. Z faktu tego wynika m. in., że $|\vec{P}| > \mu c$. Powoduje to ogromne kłopoty w procedurze kwantowania pola tachionowego, gdyż dozwolony przedział zmienności pędu nie pokrywa obszaru całkowania po pędach w tranformacie Fouriera pola, a to właśnie transformata Fouriera pola wprowadza operatory kreacji i annihilacji kwantów pola. Dlatego wielokrotne próby kwantowania pola tachionowego nigdy nie doprowadziły do konsystentnej kwantowej teorii.

Oprócz tego, procedura Feinberga wprowadzenia urojonej masy wyklucza istnienie pól z niezerowymi wartościami spinu, gdyż grupa Poincaré'go posiada tylko jedną jedyną skalarną reprezentację z urojoną wartością masy.

G. Feinberg zastosował następnie tradycyjne prawo transformacyjne dla energii i pędu, które mówi, że w nowym układzie odniesienia mamy

$$E' = \gamma(E - \vec{P} \cdot \vec{V}),$$

$$\vec{P}' = \vec{P} + (\gamma - 1)\frac{\vec{P} \cdot V}{\vec{V}^2}\vec{V} - \gamma\frac{E\vec{V}}{c^2}.$$

W dwuwymiarowej czasoprzestrzeni oczywiście mamy

$$P' = \gamma \left(P - \frac{EV}{c^2} \right)$$

Ponieważ $c|\vec{P}| > E$, to zawsze istnieje taka prędkość $\vec{V}$, że $E' < 0$. Od tego momentu w fizyce tachionów ugruntowało się przekonanie, że tachiony mogą, a nawet powinny, istnieć w stanach o ujemnych energiach.

Na temat ujemnych energii tachionów napisano ogromną liczbę artykułów naukowych. Niżej pokażę, że wszystkie te artykuły są chybione, jeśli nie kompletnie fałszywe.
Problem ujemnych energii ściśle wiąże się z problemem przyczynowości dla tachionów. Polega to na tym, że z lorentzowskiego prawa transformacyjnego dla przedziałów czasowych

$$\Delta t' = \gamma \Delta t \left(1 - \frac{1}{c^2} \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} \vec{V}\right)$$

wynika, że dla $|\frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t}| > c$ dla pewnych prędkości $\vec{V}$ otrzymuje się $\Delta t' < 0$. Problem naruszenia przyczynowości w fizyce tachionów jest bardzo skomplikowany i w tym referacie nie będę go omawiać.

Historyczna dygresja

Okazuje się, że ani Feinberg ani Sudarshan ze współpracownikami nie byli pionierami w fizyce tachionów. W listopadzie 2012 roku w rosyjskim poważnym czasopiśmie "Uspekhi fizicheskikh nauk" pojawił się artykuł dokumentujący fakt, że już w 1921 roku na II Wszechrosyjskim Zjeździe Asocjacji Fizyków był omawiany referat Lva Yakovlevicha Strumma, poświęcony możliwości istnienia nadświetlnych prędkości w ramach STW. Później pojawiło się kilka jego artykułów na ten temat w czasopismach naukowych. Po rozstrzelaniu Strumma w 1936 roku ślady tych publikacji zostały usunięte z ogólnie dostępnych źródeł.

Oprócz Strumma również inny fizyk rosyjski F. R. Terleckij (1912 - 1993) zajmował się fizyką nadświetlnych prędkości. Napisał nawet na ten temat książkę. Jego wyniki ostatnio zostały przypomniane na specjalnej konferencji, która w zeszłym roku odbyła się w Moskwie, z okazji stulecia jego urodzin.

Oczywiście, ani Strumm ani Terlecki nie używali nazwy *tachion*.

Eksperymenty Guentera Nimtza

Zupełnie nieoczekiwanie w 1991 roku w literaturze pojawiły sie doniesienia o eksperymentach niemieckiego fizyka Guentera Nimtza, profesora Uniwersytetu w Kolonii. Opis tych eksperymentów można znaleźć w, niedawno wydanej przez wydawnictwo Prószyński i S-ka, książce G. Nimtza i A. Haibel pt."*Przestrzeń czasu zerowego*". Eksperymenty te zostały przez społecznośc fizyków przyjęte z niedowierzaniem, mimo ich wielokrotnego powtarzania. Nawet fakt przesłania całej symfonii g-moll Mozarta z prędkością znacznie większą niż prędkość światła nie przekonało sceptyków.

Do tej pory nie ma jednolitego wytłumaczenia tego zjawiska. Jedni uważają, że jest to zwykłe oszustwo i nie warto tym się zajmować. Inni znajdują proste wyjaśnienia w ramach klasycznej optyki rozważając różnego rodzaje fale w różnych ośrodkach optycznych (o ujemnych współczynnikach załamania) i pokazując, że ich prędkości grupowe są większe niż prędkość światła.
Wiele fizyków uważa, że efekt prędkości większych niż prędkość światła jest wynikiem makroskopowego efektu tunelowania w szczelinie między ośrodkami dielektrycznymi. Moim zdaniem taki pogląd nie jest wystarczającym wyjaśnieniem, gdyż makroskopowe efekty kwantowe występują tylko w wyniku długozasięgowych korelacji kwantowych, a te z kolei są odbiciem fundamentalnych procesów mikroskopowych.

W podawanych wyjaśnieniach nie wskazuje się nigdy na fizyczne źródło takich ewentualnych korelacji. Takie korelacje mogą powstać np. w wyniku kreacji długozasięgowych ekscytonów, których funkcja falowa rozciąga się na cały obszar materii. Przekonanie o istotnej roli korelacji długozasięgowych wiąże się właśnie z prawie natychmiastowym pojawieniem się efektu nadświetlnego.
Bez wskazania mikroskopowego mechanizmu powstania nadświetlnych prędkości trudno uwierzyć, że jest to fundamentalne zjawisko. Nie wykluczone, że na opracowanie adekwatnego modelu generacji nadświetlnych prędkości będzie trzeba jeszcze długo poczekać. Sytuację można porównać ze zjawiskiem nadprzewodnictwa, które czekało ponad pół wieku na swoje wyjaśnienie.

Fatalny błąd G. Feinberga

Nieprawdopodobnym wydaje sie fakt, że w prawie 50-letniej historii tachionów nikt nie zauważył, że Gerald Feinberg popełnił fatalny błąd. A czym polega ten bład?
Otóż, wprowadzone przez niego *ad hoc* wyrażenie na energię

$$E = \frac{\mu c^2}{\sqrt{\frac{\vec{v}^2}{c^2} - 1}}$$

niewątpliwie zawsze jest wyrażeniem dodatnim. W jaki więc sposób, przy zmianie układu odniesienia, może ono nagle przyjmować wartości ujemne?

Feinberg dla dowodu posłużył się transformacją Lorentza

$$E' = \gamma(E - \vec{P} \cdot \vec{V}),$$

ale nie zauważył przy tym, jego wyrażenie na energię nie transformuje się zgodnie z transformacją Lorentza.

Rzeczywiście, korzystając (dla prostoty zademonstruję to na przykładzie dwuwymiarowej czasoprzestrzeni) z prawa transformacyjnego dla prędkości

$$v'(t') = \frac{v(t) - V}{1 - \frac{v(t)V}{c^2}}$$

otrzymujemy

$$E' = E(v') = \frac{\mu c^2}{\sqrt{\frac{v'^2}{c^2} - 1}} = \frac{\mu c^2}{\sqrt{\frac{1}{c^2}\left(\frac{v-V}{1-\frac{vV}{c^2}}\right)^2 - 1}}.$$

Przekształcając teraz wyrażenie pod pierwiastkiem otrzymujemy

$$E' = \frac{\mu c^2}{\sqrt{\frac{(1-\frac{V^2}{c^2})(\frac{v^2}{c^2}-1)}{(1-\frac{vV}{c^2})^2}}} = \gamma|E - PV|$$

a nie

$$\gamma(E - PV),$$

jak to mylnie napisał G. Feinberg! Wynik Feinberga byłby poprawny gdyby $\sqrt{\left(1-\frac{vV}{c^2}\right)^2}$ był równy $1-\frac{vV}{c^2}$. Ale dla $|v| > c$ zawsze istnieje takie V, że ostatnie wyrażenie jest ujemne i wtedy mamy $\sqrt{\left(1-\frac{vV}{c^2}\right)^2} = |1-\frac{vV}{c^2}|$.

Aż dziw bierze, że tak wybitny fizyk jak Gerald Feinberg popełnił tak dziecinny błąd oraz, że wszyscy to tak bezkrytycznie przyjęli!

Podobnie, poprawny wynik dla transformacji pędu, podanego przez Feinberga, ma postać

$$P' = sign(E - PV)\gamma\left(P - \frac{EV}{c^2}\right),$$

a nie po prostu

$$P' = \gamma\left(P - \frac{EV}{c^2}\right),$$

jak to napisał G. Feinberg.

Problem polega na tym, że geometria STW nie dopuszcza istnienia obiektów o takich własnościach transformacyjnych. Poprawne reguły transformacyjne wyrażeń dla energii i pędu Feinberga nie posiadają tzw. własności grupowej. A jest to jeden z podstawowych postulatów STW mówiący o tym, że wszystkie wielkości fizyczne transformują się zgodnie z reprezentacjami grupy Poincaré.

Czyżby więc tachiony nie mogą istnieć, gdyż niosą ze sobą sprzeczne własności?

Poprawne wyrażenia dla energii i pędu tachionów

Okazuje sie, że bardzo łatwo można wyprowadzić (właśnie wyprowadzić, a nie po prostu wyspekulować, jak to zrobił G. Feinberg) poprawne wyrażenia dla energii i pędu tachionów. Punktem wyjścia jest założenie, że energia i pęd są składowymi czterowektora. Jest to naturalne założenie, gdyż zawsze jest ono spełnione przez wyrażenia dla energii i pędu obiektów subluminarnych.

Oznacza to, że mamy

$$E' = E(\vec{v}') = \gamma(\vec{V})\left(E(\vec{v}) - \vec{P}(\vec{v})\cdot\vec{V}\right),$$

oraz

$$\vec{P}' = \vec{P}(\vec{v}') = R\vec{P}(\vec{v}) + (\gamma(\vec{V}) - 1)\frac{(\vec{V}\cdot R\vec{P}(\vec{v}))}{\vec{V}^2}\vec{V} - \gamma(\vec{V})\frac{\vec{V}E(\vec{v})}{c^2},$$

gdzie

$$\vec{v}'(t') = \frac{R\vec{v}(t) + (\gamma - 1)\frac{(\vec{V}\cdot R\vec{v}(t))}{\vec{V}^2}\vec{V} - \gamma\vec{V}}{\gamma\left[1 - \frac{(\vec{V}\cdot R\vec{v}(t)}{c^2}\right]},$$

oraz szczegółowo wypisane zostały argumenty odpowiednich wielkości.

Ze względu na niezmienniczą funkcjonalną zależność energii i pędu od prędkości powyższe reguły transformacyjne są w istocie równaniami funkcjonalnymi dla energii i pędu. Spróbujmy rozwiązać te równania.

Załóżmy najpierw, że dla rozpatrywanych obiektów istnieją układy spoczynkowe. Wówczas możemy przyjąć, że $\vec{v} = \vec{0}$. Otrzymujemy zatem $\vec{v}' = -\vec{V}$, co oznacza, że w innych układach odniesienia prędkości nie mogą przekraczać prędkości światła. I odwrotnie, gdy prędkość obiektu $\vec{v}$ nie przekracza prędkości światła, to zawsze przez transformację Lorentza możemy znaleźć taki układ odniesienia, w którym $\vec{v}' = \vec{0}$, a zatem dla takiego obiektu istnieje układ spoczynkowy.

Podstawiając otrzymany wynik do reguł transformacyjnych dla energii i pędu otrzymujemy

$$E(-\vec{V}) = \gamma(\vec{V})\left(E(\vec{0}) - \vec{P}(\vec{0}) \cdot \vec{V}\right),$$

oraz

$$\vec{P}(-\vec{V}) = R\vec{P}(\vec{0}) + (\gamma(\vec{V}) - 1)\frac{(\vec{V} \cdot R\vec{P}(\vec{0}))}{\vec{V}^2}\vec{V} - \gamma(\vec{V})\frac{\vec{V}E(\vec{0})}{c^2},$$

Pęd każdego obiektu zawsze jest nieparzystą funkcją prędkości, co oznacza, że powinniśmy przyjąć $\vec{P}(\vec{0}) = \vec{0}$. W końcu zamieniając znak argumentu dla energii i pędu otrzymujemy

$$E(\vec{V}) = \gamma(\vec{V})E(\vec{0})$$

oraz

$$\vec{P}(\vec{V}) = \gamma(\vec{V})\frac{E(\vec{0})\vec{V}}{c^2}.$$

Przyjmując za Einsteinem $E(\vec{0}) = Mc^2$ otrzymujemy standardowe wyrażenia dla energii i pędu obiektów subluminarnych.

Zajmijmy się teraz obiektami, dla których nie istnieją układy spoczynkowe. Wówczas ich prędkości nie mogą być mniejsze niż prędkość światła. Nie mogą one jednak być ograniczone od góry, bo istniała by wówczas nowa, oprócz prędkości światła, niezmiennicza prędkość. Ale w STW nie ma takiej prędkości. A więc, jedynym wyjściem jest dopuszczenie, że obiekty superluminalne mogą się poruszać nawet z nieskończoną prędkością. Taką nieskończoną prędkość mogą posiadać tylko w jednym układzie odniesienia (generalnie, innym dla każdego obiektu), gdyż zgodnie z relatywistyczną regułą transformacyjną dla prędkości w innym układzie, poruszającym się względem takiego układu z prędkością $\vec{V}$, mamy

$$\vec{v}' = -\frac{c^2\vec{V}}{\vec{V}^2}.$$

Podstawiając ten wynik do równania funkcjonalnego dla energii i pędu otrzymujemy

$$E\left(-\frac{c^2\vec{V}}{\vec{V}^2}\right) = \gamma(\vec{V})\left(E(\infty) - \vec{P}(\infty)\cdot\vec{V}\right),$$

oraz

$$\vec{P}\left(-\frac{c^2\vec{V}}{\vec{V}^2}\right) = R\vec{P}(\infty) + (\gamma(\vec{V}) - 1)\frac{(\vec{V}\cdot R\vec{P}(\infty))}{\vec{V}^2}\vec{V} - \gamma(\vec{V})\frac{\vec{V}E(\infty)}{c^2}.$$

Zakładając, że pęd obiektu jest nieparzystą funkcją prędkości musimy przyjąć, że $\vec{P}(\infty) = \vec{0}$. Oznaczając $E(\vec{\infty})$ przez E_∞ oraz wprowadzając oznaczenie

$$\vec{W} = -\frac{c^2 \vec{V}}{\vec{V}^2}$$

i wyrażając prędkość $\vec{V}$ przez prędkość $\vec{W}$ ostatecznie otrzymujemy

$$E = \frac{E_\infty}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{\vec{W}^2}}}$$

$$\vec{P} = \frac{E_\infty}{\vec{W}^2 \sqrt{1 - \frac{c^2}{\vec{W}^2}}}.$$

Otrzymaliśmy bardzo ważne wyniki. Były one opublikowane w następujących pracach:

1. E. Kapuścik; *Condensed Matter Physics*, **13**, 1-8 (2010)

2. E. Kapuścik; *Physics of Atomic Nuclei*, **74**, 1-4 (2011)

3. E. Kapuścik, R. Orlicki; Annalen der Physik; **523**, 235 - 238 (2011)

Dynamika tachionów

W tradycyjnym sformułowaniu relatywistycznej dynamiki wprowadza się pojęcie tzw. czasu własnego

$$\Delta\tau = \Delta t\sqrt{1 - \frac{\vec{v}^2}{c^2}}$$

i równania ruchu Newtona

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = \vec{v}(t),$$

$$\frac{d\vec{p}(t)}{dt} = \vec{F}(t)$$

zapisuje się w postaci

$$\frac{dx^\mu}{d\tau} = u^\mu,$$

$$\frac{dp^\mu}{d\tau} = f^\mu,$$

gdzie wprowadza się pojęcie czterowektora prędkości u^μ i czterowektora siły f^μ.

Formalizm czasu własnego ma tyle dziwnych własności, że co najmniej dziwne jest, że jest tak powszechnie akceptowany.

Jest oczywiste, że tradycyjne sformułowanie relatywistycznej dynamiki, korzystające z pojęcia czasu własnego, nie może być stosowane w dynamice tachionów, gdyż wyrażenie dla czasu własnego w przypadku $|\vec{v}| > c$, staje się wielkością urojoną. Na szczęście, istnieje inny formalizm korzystający z tzw. tensora prędkości. Został on zaproponowany w pracy:

E. Kapuścik, T. Lanczewski; Physics of Atomic Nuclei, **72**, 800 - 812 (2009).

W formalizmie tym, równania ruchu Newtona zapisane są w kowariantnej postaci

$$G^{\mu}_{\nu}(\vec{v})dx^{\nu} = 0,$$

oraz

$$M\partial_{\mu}G^{\mu}_{\nu} = f_{\nu},$$

gdzie $G^{\mu}_{\nu}(\vec{v})$ jest mieszanym tensorem skonstruowanym z trójprędkości $\vec{v}$. Postać tego tensora można wyznaczyć z jego własności transformacyjnych oraz z założenia, że $G'^{\mu}_{\nu} = G^{\mu}_{\nu}(\vec{v}')$.

Wnioski

Przedstawione wyniki prowadzą do nastepujących wniosków:

Po pierwsze, czterowektor energii-pędu tachionów okazuje się być wektorem czasopodobnym, gdyż

$$E^2 - c^2\vec{P}^2 = E_\infty^2 > 0.$$

A zatem znikają wszystkie trudności istniejące przy kwantowaniu pola tachionowego. Pola takie istnieją dla wszystkich możliwych wartości spinu. Obszar całkowania w transformacie Fouriera obejmuje wszystkie możliwe fizyczne wartości pędu.

Po drugie, energia tachionu poruszającego się z nieskończoną prędkością jest skończona, zaś pęd takiego tachionu jest równy zeru. Istnienie niezerowej wartości energii dla tachionów o nieskończonej prędkości pozwala wysnuć hipotezę, że być może są one związane z ciemną materią we Wszechświecie. Fakt znikania pędu takich tachionów oznacza również słabość ich oddziaływania z materią, gdyż posiadając znikomo małe wartości pędu nie mogą one go przekazywać innym obiektom, a więc oddziaływują ze znikomą siłą.

Po trzecie, z otrzymanych wzorów możemy wyznaczyć prędkość poruszania się obiektów superluminalnych, w zależności od ich energii i pędu. W wyniku otrzymujemy

$$\vec{W} = \frac{E\vec{P}}{\vec{P}^2}.$$

Dla porównania, dla obiektów subluminarnych mamy

$$\vec{V} = \frac{\vec{P}}{E}.$$

Oznacza to, że dla wyznaczenia prędkości ruchu obiektów nie wystarczy mierzyć ich energie i pędy, gdyż dla tych samych wartości energii i pędu otrzymamy prędkości subluminarne jeśli korzystamy z drugiego wzoru, podczas gdy otrzymamy prędkości superluminarne kiedy korzystamy z pierwszego wzoru. Jest to odbiciem drugorzędności pojęcia prędkości w STW, gdzie pierwszorzędnymi wielkościami są energia i pęd. Jest to zupełnie podobnie jak w mechanice kwantowej.
Oznacza to konieczność bezpośrednich pomiarów prędkości z czasów przelotu.

Po czwarte, czasoprzestrzenność energii-pędu otwiera drogę do zbudowania kwantowej teorii pola tachionów i ich oddziaływań z polami innych cząstek elementarnych. Stożek świetlny jest nieprzekraczalną barierą zarówno dla cząstek podświetlnych jak i cząstek nadświetlnych. Jednak pola określone na stożku świetlnym, np. pole elektromagnetyczne, mogą być łącznikiem między polami podświetlnymi i nadświetlnymi. W ten sposób, poprzez pola na stożku świetlnym (nie koniecznie tylko przez pole elektromagnetyczne) mogą oddziaływać pola podświetlne z polami nadświetlnymi. Ale to jest sprawą przyszłości.

DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ.