



## Wcale

Andrzej DRAGAN\*

Od wielu lat się dziwię, jak to możliwe, że szczególna teoria względności czasem nawet w uczonych głowach sieje ogromny zamęt. Jest to najprostsza teoria znana fizyce. Jest niemal równoważna zasadzie względności Galileusza. Ba, nie jest to w zasadzie nawet teoria z prawdziwego zdarzenia, a jedynie elementarny schemat, szkielet, na którym dopiero buduje się mięsiste teorie fizyczne, takie jak elektrodynamika klasyczna lub kwantowa. Więc skąd te schody? Czy to przez niechęć wywołaną zaskoczeniem pojawiającym się przy pierwszym zetknięciu z teorią względności? Brak wysiłku włożonego w głębsze zastanowienie nad sensem kilku prostych zasad obowiązujących w szczególnej teorii względności?

Całkiem niedawno odbył się niezwykle spektakl, który w całej okazałości ukazał tę sprawę. Otóż grupa uczonych badających prędkość poruszania się neutrin stwierdziła ku zaskoczeniu ogółu, że cząstki te mają prędkość przekraczającą prędkość światła. Eksperyment wkrótce okazał się błędny, a wszystko za sprawą zbyt luźno wetkniętego kabla gdzieś w układzie elektronicznym urządzeń pomiarowych. Niemniej, zanim sprawa się wyjaśniła, działy się rzeczy niestworzone. W całym świecie naukowym ziemia zdrząła, aż szyszki spadały. Tegie umysły przewidywały, że jeśli eksperyment okazałby się prawdziwy, zaprzeczyłyby podstawom teorii względności, którą należałoby stworzyć od nowa. Na własne oczy, uszy i pozostałe receptory słyszałem, sam zresztą złośliwie dopytując, że słynna „teoria Einsteina” musiałaby zostać odstawiona do lamusa. No bo przecież „nic nie może poruszać się szybciej od światła”. Większość fizyków „oczywiście” nie wierzyła w poprawność rezultatów doświadczalnych, ale mimo wszystko spekulacje „co by to było, gdyby” wyraźnie dało się słyszeć.

A zatem na moment oderwijmy się intelektualnie od żucia gumy i zabawmy się w grę „co by to było, gdyby”. Wyobraźmy sobie, że wszystkie kable w laboratorium podoczepiano poprawnie, żaden biedny laborant winny zaniedbania nie siwieje z wyrzutów sumienia, a eksperyment wskazuje jak wół: neutrina są cząstkami nadświetlnymi. Jak by się wówczas musiała do tego „brzydkiego” faktu dostosować szczególna teoria względności? Odpowiedź jest prosta: **wcale**. Jasiu, podkreśl wężykiem: **wcale**. Teoria względności pozostałaby absolutnie niezmienniona.

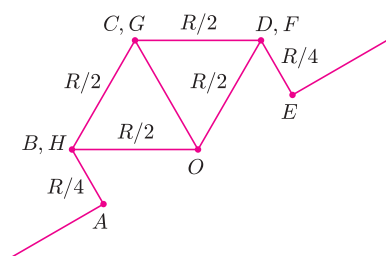
A jest tak: szczególna teoria względności nie rozstrzyga, jaki świat jest, jakie rządzą nim prawa. Nie mówi o tym, jakie cząstki mogą istnieć, jakie są ich właściwości. Nie informuje nas o kolorze trawy ani smaku herbaty. Nie wynika z niej, jaka jest masa i ładunek elektronu. Szczególna teoria względności mówi tylko o jednym: jak przebieg określonej sytuacji fizycznej transformuje się z jednego inercjalnego układu odniesienia do innego. Dla przykładu wyobraźmy sobie pewien układ inercjalny, w którym jest różowe, kwadratowe Słońce na niebie w pomarańczowe paski i spadają z niego z nadświetlną prędkością kanapki skierowane masłem w górę. Transformacja Lorentza, stanowiąca trzon szczególnej teorii względności, pozwoli nam dokładnie opisać, jak historyjka ta wyglądać będzie z punktu widzenia obserwatora jadącego rowerem z prędkością  $V$  wzdłuż osi  $x$ . Bez rozstrzygnięcia, czy historyjka może się wydarzyć, czy nie. Nie będzie żadnych sprzeczności, nie będzie żadnych zgrzytów. Co prawda, opisana sytuacja w ruchomym układzie może być jeszcze dziwniejsza niż w spoczywającym, ale cóż, zdziwienie to często jedynie oznaka ignorancji. Teoria względności jest jak tłumacz, który przekłada opis świata według jednego obserwatora inercjalnego na język dowolnego innego obserwatora. Do samego opisu się zaś nadmiernie nie wtrąca.

Jakie zmiany w naszym rozumieniu świata zaszyłyby zatem, gdyby eksperyment neutrinowy był poprawny? Zmiany byłyby bardzo poważne, o tym za chwilę, ale akurat nie teoria względności by im uległa. Szczególna teoria względności została dotąd przebadana tak dogłębnie, a jej przewidywania sprawdzone z taką precyzją, że można by nawet uznać ją za teorię fenomenologiczną. Rzeczywistość ma charakter relatywistyczny, po prostu wiemy to z doświadczenia. O ile z hipotezami polemizować można, a wręcz należy, to z faktami empirycznymi byłoby już dość niemądre.

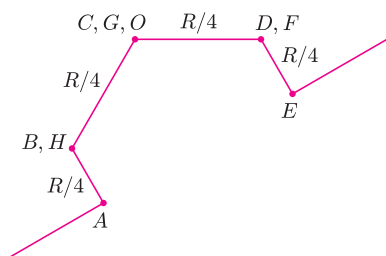
Prześledźmy typową argumentację używaną do odrzucenia hipotezy istnienia nadświetlnych cząstek. Rozważmy hipotetyczny sygnał wysłany z nadświetlną prędkością przez Alicję (zdarzenie A) do odległego odbiorcy, Boba, który rejestruje sygnał chwilę później (zdarzenie B), jak przedstawiliśmy to na rysunku (a), na którym

### Rozwiązanie zadania F 838.

Układ oporów jest symetryczny względem prostej, przechodzącej przez punkty A i E. Wynika stąd, że potencjał odpowiadających sobie punktów leżących powyżej i poniżej tej prostej jest taki sam, tzn.  $V_C = V_G, V_D = V_F, V_B = V_H$ . Łącząc punkty o jednakowym potencjale i zastępując równocześnie opory, które zostaną przy tym połączone równolegle, dostaniemy obwód zastępczy:



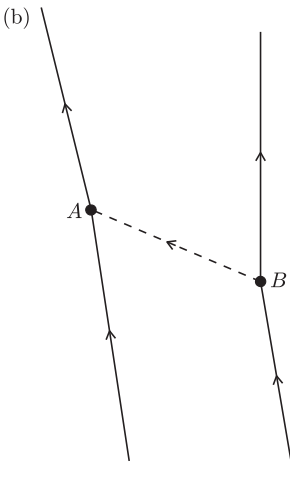
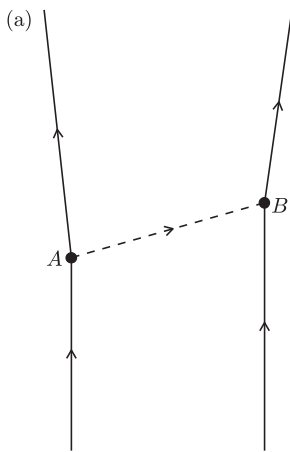
Korzystając z kolei z symetrii części obwodu w kształcie rombu, dostajemy obwód zastępczy:



a stąd znajdujemy poszukiwaną oporność zastępczą

$$R_{AE} = R/4 + R/4 + R/4 + R/4 = R.$$

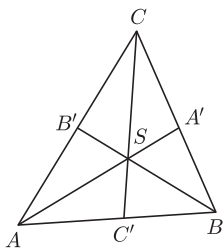
\*Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski



Schemat przekazywania cząstki nadświetlnej między Alicją (zdarzenie A) i Bobem (zdarzenie B) w dwóch układach odniesienia różniących się kolejnością oddziaływania cząstki z Alicją i Bobem.

**Odpowiedź na pytanie dlaczego? ze strony 17.**

Dlatego, że dwusieczne kątów trójkąta dzielą płaszczyznę na kąty ostre.



Gdyby  $AA'$ ,  $BB'$ ,  $CC'$  były dwusiecznymi kątów trójkąta  $ABC$  i kąt  $A'SB$  byłby rozwarty, to byłoby  $\sphericalangle CAB + \sphericalangle CBA = 2(\sphericalangle SAB + \sphericalangle SBA) = 2\sphericalangle A'SB > \pi$ , czyli dwa kąty trójkąta miałyby sumę większą od sumy wszystkich trzech – sprzeczność.

Konstrukcja opisana w artykule daje w przypadku, gdy nie wszystkie kąty są ostre, dwie dwusieczne kątów zewnętrznych.

czas płynie z dołu do góry, a przestrzeń rozciąga się poziomo. Przypuśćmy, że sygnał ten informuje Boba, jakie liczby padły przed momentem w losowaniu totolotka, które odbyło się w pobliżu zdarzenia A. Zgodnie z przewidywaniami teorii względności istnieje inny układ inercjalny – przedstawiony na rysunku (b) – w którym przebieg zdarzeń jest zgoła inny. W tym drugim układzie kolejność zdarzeń ulega odwróceniu, czyli najpierw następuje zdarzenie B, a dopiero po chwili zdarzenie A. Przebieg sytuacji wygląda tak, jakby odbiorca stał się nadawcą, a nadawca odbiorcą. Abstrahując od tego, jak dziwna byłaby to sytuacja, widzimy, że w tym układzie Bob zna wyniki losowania, jeszcze zanim zostanie o nich poinformowany. A wręcz zanim w ogóle zostanie przeprowadzone losowanie! Fakt ten jest rzeczywiście dziwny, ale fizyka przewidywania przyszłości przecież nie zabrania. Ba, fizyka to właściwie nic innego, jak metoda przepowiadania przyszłości! W końcu prawa fizyki służą właśnie do tego, by przewidywać wyniki eksperymentów naukowych. Zatem widzimy, że możliwość wysyłania nadświetlnej informacji przez Alicję pozwoliłaby odległemu obserwatorowi Bobowi przewidzieć jej przyszłość (definiowaną w pewnych układach odniesienia).

A zatem Bob mógłby w zasadzie użyć drugiego sygnału, by poinformować Alicję o wynikach zbliżającego się u niej losowania. Tego typu możliwość wysyłania informacji wstecz w czasie była dla nas wystarczającym powodem, by odrzucić nadświetlne sygnały precz sprzed naszego zatroskanego oblicza. I jest to standardowy argument, którego używa się, by nadświetlne sygnały w fizyce nie rozważać. Argument ten ma jednak kilka słabości. Zaczniemy od tego, że pierwotnie w spoczywającym układzie odniesienia rozważaliśmy pojedynczy sygnał wysłany z A do B. Natomiast ażeby ukazać paradoks, potrzeba było wprowadzić kolejny sygnał wysłany z B do A, co uczyniliśmy w ruchomym układzie odniesienia. Musimy jednak pamiętać, że nie wolno nam rozważać różnych scenariuszy w różnych układach odniesienia! Jeśli w pierwszym układzie był tylko jeden sygnał, to w drugim również musi być tylko jeden sygnał. Jeśli zaś chcemy, ażeby były dwa sygnały, wówczas oba muszą być obecne w każdym układzie odniesienia, a zatem również w układzie spoczywającym, od którego zaczęliśmy. No i całą historijkę musieliśmy przeanalizować od początku z dwoma sygnałami, a wówczas wcale nie byłoby jasne, czy paradoks w ogóle się pojawia.

Są tu jednak ciekawsze rzeczy, które przeoczyliśmy. Zaczniemy rozumowanie od początku. Pisząc o wysyłanym sygnale, zakładamy dwie rzeczy: istnienie nadświetlnych obiektów, które mogą być emitowane i pochłaniane, oraz to, że Alicja potrafi ich emisję kontrolować. Nie da się przecież tworzyć sygnałów bez możliwości kontroli przesyłanej treści. Jeśli zatem Alicja wysłała zero-jedynkowe sygnały (sygnał jest lub go nie ma), wówczas musi ona umieć emitować ciąg takich sygnałów w kontrolowanych przez siebie chwilach. Założenie, że chwilę emisji nadświetlnych cząstek w pełni kontrolujemy, jest szczególnie interesujące, o czym się za chwilę przekonamy. Wynika z niego, że w linii świata Alicji przebiega jakiś lokalny i kontrolowalny, a zatem deterministyczny proces, który określa chwilę emisji nadświetlnego obiektu, którego używamy do sygnalizacji. Istnieje zatem pewien parametr ukryty (bądź jawny), nazwijmy go  $\lambda$ , którym możemy sterować i od którego uzależniona jest emisja nadświetlnej cząstki w danej chwili. Możemy, na przykład, wyobrazić sobie, że Alicja ma pistolet strzelający takimi cząstkami. W przypadku pociągnięcia za spust ciąg przyczynowo-skutkowy byłby następujący: cząstka opuściła zdarzenie A, bo wybuchła spłonka naboju, bo Alicja nacisnęła spust pistoletu. W tym przypadku nasz parametr  $\lambda$  może odnosić się, na przykład, do reakcji chemicznej zachodzącej w wybuchającej spłonce, którą kontroluje Alicja trzymająca pistolet. Zakładamy ponadto, że odległy odbiorca Bob nic nie wie o parametrze  $\lambda$  i aż do momentu zarejestrowania wystrzelonej przez Alicję cząstki nie ma z nim absolutnie nic wspólnego. Prześledźmy teraz powyższy scenariusz okiem innego obserwatora inercjalnego, którego wersja wydarzeń znajduje się na rysunku (b). Według tego obserwatora emisja ma miejsce w zdarzeniu B, a nie zdarzeniu A! Wszystko wygląda tak, jak gdyby to Bob wysłał nadświetlny sygnał do Alicji (pamiętajmy, że czas płynie na diagramie z dołu do góry)! Zastanówmy się teraz nad następującym pytaniem: co w tym układzie odniesienia spowodowało emisję B? Spora przerwa na zastanowienie. Powód taki nie może być „zlokalizowany” w linii świata poprzedzającej zdarzenie B, bo założyliśmy w układzie spoczywającym, że odbiorca Bob nie wie nic o tym, że ma za moment zostać potraktowany cząstką wystrzeloną przez Alicję. Skoro w pierwszym układzie



**Rozwiązanie zadania F 837.**  
 W gazie spełniającym równanie stanu gazu doskonałego,  $pV = nRT$  ( $p$  – ciśnienie,  $V$  – objętość,  $n$  – całkowita liczba moli gazu), dźwięk rozchodzi się z prędkością daną równaniem

$$c^2 = \frac{c_p RT}{c_V m},$$

gdzie  $c_p$  i  $c_V$  oznaczają ciepła molowe, odpowiednio w stałej objętości i pod stałym ciśnieniem, a  $m$  masę jednego mola tego gazu. Mieszanina gazów doskonałych spełnia równanie gazu doskonałego, masa i ciepło są tzw. wielkościami ekstensywnymi, a więc odpowiednio wielkość dla mieszaniny to

$$m = x m_A + (1 - x) m_B,$$

$$c_V = x c_{V A} + (1 - x) c_{V B}$$

$$c_p = x c_{p A} + (1 - x) c_{p B}.$$

Ostatecznie więc  $c^2$  wynosi

$$\frac{(x c_{p A} + (1 - x) c_{p B}) RT}{(x c_{V A} + (1 - x) c_{V B})(x m_A + (1 - x) m_B)}$$

Wzór ten bywa w praktyce wykorzystywany do określania zawartości domieszki gazowej. Jest to możliwe, gdy gaz-domieszka ma istotnie różne właściwości od gazu, z którym jest zmieszany (np.  $\text{CO}_2$  w azocie).

nic po stronie Boba nie zapowiada zdarzenia B, to nic nie może go również zapowiadać w drugim układzie odniesienia (zasada względności!).

Jest dobrze, ale nie beznadziejnie. Są trzy możliwe rozwiązania tego „problemu”. Po pierwsze, możemy odrzucić możliwość wysyłania nadświetlnych obiektów. Snujemy jednak hipotezę o eksperymencie z neutrinami, który mógłby być przecież poprawny, co zmusza nas do poszukania innej możliwości wykaraskania się z problemów, w które zabrnęliśmy. Są jeszcze dwa wyjścia wymagające zmodyfikowania naszego rozumienia rzeczywistości (żadne jednak niewymagające modyfikacji teorii względności). Jesteśmy przyzwyczajeni do tego, że przyczyny zdarzeń zachodzą w ich przeszłości. Jest to jeden z fundamentów przyczynowości. Jeśli się jednak nad tym zastanowić, to przesłanki tego założenia są kompletnie niejasne. Przecież prawa fizyki pozwalają nam nie tylko przepowiadać przyszłość przy użyciu znanych warunków początkowych, ale także przewidywać przeszłość przy znajomości warunków końcowych! Jeśli znamy chwilową prędkość i położenie lecącego w powietrzu kamienia, możemy przecież przewidzieć, gdzie znajdzie się on za moment, ale także ustalić, gdzie znajdował się przed chwilą. Tak czy inaczej, zazwyczaj przyjmuje się, że zdarzenia determinowane są w przeszłości. Jednakże, aby wskazać przyczynę zdarzenia B w ruchomym układzie odniesienia, moglibyśmy zmodyfikować tę zasadę, przyjmując, że przyczyna zdarzenia B w ruchomym układzie odniesienia znajduje się w przyszłości, w odległym zdarzeniu A! Faktycznie, gdyby eksperyment z neutrinami był prawdziwy, musielibyśmy przyjąć, że przyczyny pewnych zdarzeń dopiero nastąpią, a nie, jak jesteśmy przyzwyczajeni, już nastąpiły. Nasze rozumienie świata musiałoby zostać gruntownie zreformowane, ale, jeszcze raz podkreślimy, prawa transformacyjne, stanowiące treść szczególnej teorii względności, nie uległyby najmniejszej zmianie. Nie jest to zresztą pierwsza próba zmodyfikowania fizyki w ten sposób. Dawno temu podobną hipotezę w odniesieniu do elektrodynamiki klasycznej sformułował Dirac. A zainspirowani tym pomysłem Feynman i Wheeler rozwinęli go w formie tzw. teorii potencjałów opóźniono-przyspieszonych. Balony próbne zostały więc już w tę stronę wypuszczone i teorii względności nikt modyfikować wcale nie musiał. Zatem o co było aż tyle krzyku?

Zauważmy jednak, że hipoteza o przyczynie zdarzenia B w przyszłości (a w dodatku poza jego stożkiem świetlnym!) zaburza symetrię pomiędzy dwoma rozważanymi układami odniesienia. Bowiem w pierwszym układzie wszystkie przyczyny zdarzeń są w przeszłości, w drugim zaś mogą być też w przyszłości. Dla ruchomego obserwatora przyglądającego się Bobowi (i jego linii świata), którego punkt widzenia ilustruje rysunek (b), zdarzenie B będzie zupełnie zaskakujące: nagle dojdzie do wystrzelenia sygnału przez Boba w sposób kompletnie (w przeszłości) niezapowiedziany. Będzie to zdarzenie czysto spontaniczne, niemające w lokalnej przeszłości żadnej przyczyny. Tu pojawia się jeszcze jedno możliwe wyjaśnienie, moim zdaniem o wiele ciekawsze. Jeśli nie chcemy w żaden sposób wyróżnić jakiegokolwiek układu odniesienia, musielibyśmy stwierdzić, że emisja nadświetlnego obiektu w sposób nieuchronny musi być równie spontaniczna w każdym układzie odniesienia. Mogłaby przecież zawsze dziać się bez żadnej przyczyny, w sposób nieprzewidywalny! Dokładnie tak, jak zgodnie z prawami mechaniki kwantowej nieprzewidywalna jest chwila zarejestrowania wyemitowanego przez wzbudzony atom fotonu. Nadświetlne cząstki mogłyby zatem istnieć, pod warunkiem że emitowane byłyby w losowych, niemożliwych do ścisłego przewidzenia chwilach. Zwróćmy uwagę, że źródło takich cząstek marnie nadawałoby się do komunikacji, gdyż nie moglibyśmy go kontrolować. A zgodnie z tym, co ustaliliśmy wcześniej, niemożność kontroli źródła skutecznie uniemożliwia komunikację za jego pomocą. Nie byłoby zatem żadnego „paradoksu” formułowanego, by podważyć możliwość istnienia nadświetlnych cząstek.

Ostatni scenariusz jest jednak inny, niż wynikałoby z omawianego eksperymentu, w którym emisja neutrin z rozpędzonej wiązki protonów jest dobrze kontrolowana i może zostać zainicjowana w dowolnie wybranym momencie. Wspominamy o tym wariantcie dlatego, że, być może, kiedyś nadświetlne cząstki zostaną odkryte i wówczas, zgodnie z naszym przewidywaniem, powinny one powstawać i ginąć w sposób losowy i niekontrolowany. A zatem w sposób dokładnie taki, w jaki zachowują się znane nam cząstki elementarne. Czyżby zatem istniał jakiś nieznan, fundamentalny łącznik pomiędzy dwiema znanymi nam teoriami: teorią względności i teorią kwantów?