Błysk szybszy niż światło

Stanisław MRÓWCZYŃSKI

W lipcu 2000 roku doniesiono o niezwykłym eksperymencie przeprowadzonym w laboratorium firmy NEC. Impuls świetlny przechodzący przez sześciocentymetrową komorę wypełnioną wzbudzonymi atomami cezu, był szybszy niż światło; poruszał się tak szybko, że opuszczał komorę, zanim zdążył do niej wejść. Wynik doświadczenia, choć sprzeczny ze zdrowym rozsądkiem, pozostaje w zgodzie z prawami fizyki.

Teoria względności, przynajmniej w swej standardowej postaci, wyklucza istnienie obiektów poruszających się szybciej niż światło w próżni. Ich obecność jest nie do pogodzenia z zasadą przyczynowości, czyli banalną prawdą, że przyczyna poprzedza skutek. Rzecz w tym, że obiekt, który dla jednego obserwatora jest tylko szybszy niż światło, dla innego cofa się w czasie. Na gruncie teorii względności ruch z prędkością większą od prędkości światła i podróżowanie wstecz w czasie są nierozerwalnie związane. (Szczegółowe omówienie tego problemu zawarłem w artykule „Szybciej niż światło?”, *Delta* 8/1991.) Możliwość zaś powrotu do przeszłości prowadzi do konfliktu z zasadą przyczynowości. Aby zrozumieć, dlaczego tak się dzieje, wyobraźmy sobie, że jakiś szalony konstruktor buduje wehikuł czasu i rusza w przeszłość. Spotyka tam swego dziadka i zabija go, nim ten zdążył spłodzić ojca konstruktora. Mordując dziadka, unicestwia również ojca, więc sam nie może istnieć. A przecież istnieje! Całe zamieszanie wynikło z naruszenia chronologii przyczyn i skutków – wnuczek pojawił się przed swą przyczyną, czyli ojcem. Aby pogwałcić zasadę przyczynowości, nie trzeba nawet podróżować wstecz w czasie, wystarczy przesłać informację do przeszłości. Jeśliby Ewę powiadomić o wszelkich konsekwencjach zjedzenia feralnego jabłka, może nie uległaby podszeptom węża. My pozostalibyśmy w raju, lecz odbyta już pokuta za grzech pierworodny straciłaby wszelką rację istnienia. Teoria względności pozwala uniknąć takich kłopotliwych sytuacji, orzekając, że przesyłanie sygnałów szybszych niż światło, a zatem i wstecz w czasie, jest niemożliwe. Jednak fizycy od dawna zastanawiają się, czy nie można jakoś „obejść” owego zakazu einsteinowskiej teorii. W ostatnich latach poczynili na tej drodze spore postępy.

Jak ustalono jeszcze na początku XIX wieku, światło ma naturę falową. Światłu monochromatycznemu (jednobarwnemu) odpowiada fala elektromagnetyczna o ściśle ustalonej długości i częstości. W przypadku światła białego mamy do czynienia ze złożeniem fal o różnych częstościach, co uwidacznia się przy przechodzeniu takiego światła przez pryzmat. Rozszczepienie na różnobarwne składowe jest przejawem tzw. dyspersji szkła – współczynnik załamania zmienia się wraz z długością fali. Świat jest tak wielobarwny, gdyż substancje nas otaczające bardzo różnie reagują na fale świetlne zależnie od ich długości. Pomidory są czerwone, bo pochłaniają fale o wszystkich długościach z wyjątkiem tej odpowiadającej czerwieni, którą odbijają. Biała kreda równomiernie odbija fale o różnych długościach, węgiel zaś zawdzięcza swój kolor ich silnemu pochłanianiu.

Każdy impuls świetlny można przedstawić jako złożenie fal o różnej częstości. Stanowi to niezwykle sugestywny przejaw matematyczności fizycznego świata. Z jednej strony mamy matematyczne twierdzenie orzekające, że każdą funkcję gładką i całkowalną, niech to będzie zależność intensywności światła od czasu, można przedstawić jako sumę fal o różnych częstościach. Z drugiej strony można wytworzyć światło o żądanej charakterystyce, a następnie za pomocą filtrów wydzielić składowe o określonych częstościach. Intensywność tych składowych okazuje się, oczywiście, całkowicie zgodna z wynikami matematycznej analizy. Oznacza to, że dowolny sygnał nie tylko można przedstawić jako sumę fal, lecz że dowolny sygnał jest sumą fal. Brak sygnału oznacza zaś, że różne fale wzajemnie się znoszą.

Falę o określonej częstości charakteryzuje prędkość fazowa równa szybkości, z jaką poruszają się jej góry i doliny. W przypadku impulsu, będącego złożeniem wielu fal, posługujemy się pojęciem prędkości grupowej, która określa szybkość,

Rozwiązanie zadania M 940.
Oznaczmy środki okręgów odpowiednio przez A', B', C'. Niech D będzie rzutem prostokątnym C na AA'. Z twierdzenia Pitagorasa mamy

$$AC^2 = C'D^2 = C'A'^2 - A'D^2 = (a+c)^2 - (a-c)^2 = 4ac.$$

Analogicznie otrzymujemy $AB^2 = 4ab$ i $BC^2 = 4bc$. Wobec tego

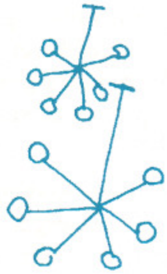
$$\sqrt{4ab} = AB = AC + BC = \sqrt{4ac} + \sqrt{4bc}.$$

Dzieląc otrzymaną równość przez $\sqrt{4abc}$ otrzymujemy tezę.

Rozwiązanie zadania M 941.
Odbijamy punkt C symetrycznie względem prostej AB otrzymując punkt C'. Ponieważ $\angle C'MD = 90^\circ$ więc z twierdzenia Pitagorasa otrzymujemy

$$CM^2 + DM^2 = C'M^2 + DM^2 = C'D^2.$$

Zauważmy jednak, że $\angle C'CD = 45^\circ$, a wszystkie kąty o tej rozwartości, wpisane w okrąg o, wyznaczają jednakowe cięciwy (można oczywiście obliczyć ich długość, choć i bez tego teza jest dowiedziona).

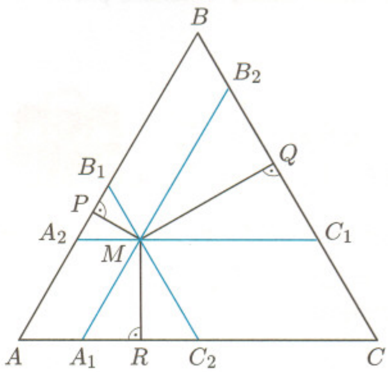


z jaką przemieszcza się maksimum intensywności impulsu. Prędkość fazowa fali świetlnej, rozchodzącej się w próżni, jest równa prędkości grupowej dowolnego impulsu. Prędkość ta, oznaczana tradycyjnie literą c, wynosi 300 000 km/s. W ośrodku dyspersyjnym fale o różnych częstościach różnie się propagują. Sprawia to, że impuls będący sumą różnych fal ulega w takim ośrodku modyfikacji, zmienia się jego prędkość grupowa. Gdy staje się mniejsza od c, mówimy o zwykłej dyspersji. Przed laty już jednak zauważono, że prędkość grupowa mogłaby być większa od c, jednak takiej anomalnej dyspersji towarzyszy bardzo silna absorpcja. Szybki impuls świetlny jest więc niemal całkowicie pochłaniany przez materiał, w którym się rozchodzi.

Wspomniany na wstępie sukces fizyków z laboratorium NECa w Princeton polegał właśnie na stworzeniu ośrodka, w którym z anomalną dyspersją nie wiąże się silna absorpcja. Zamknięte w niewielkiej komorze opary cezu wprowadzono w stan przypominający gotowy do pracy laser – znaczna część atomów została wzbudzona. Światło o częstości zbliżonej do częstości światła owego lasera nie tylko nie było absorbowane, lecz nawet ulegało wzmocnieniu. Przez tak przygotowany ośrodek przepuszczano impuls światła. Zgodnie z oczekiwaniami, jego prędkość grupowa była większa od szybkości rozchodzenia się światła w próżni; na tyle duża, że szczyt impulsu opuszczał komorę, nim zdążył do niej wejść. Ośrodek powodował wzmacnianie początkowej części impulsu i osłabianie końcowej. W rezultacie szczyt impulsu przesunął się do przodu. Należy jednak podkreślić, że zysk ten był dużo mniejszy od długości trwania całego impulsu. Choć więc prędkość grupowa była większa od c, to szybkość, z jaką impuls mógł przenieść informację, nie przekraczała c. Wyjaśnijmy to nieco dokładniej.

Przyjmijmy, że informację nadajemy w postaci błysków; błysk bądź jego brak stanowi jeden bit informacji. Załóżmy, że odbiornikiem odległym o l od nadajnika jest urządzenie, które reaguje na światło o odpowiednio dużej intensywności, bliskiej maksimum wysyłanych błysków. Niech czas, w jakim szczyt impulsu pokonuje odległość od nadajnika do odbiornika, wynosi t. Prędkość, z jaką podróżuje maksimum, jest większa od c, tj. $l/t >$ c. Gdy jednak obliczamy czas potrzebny na przesłanie informacji, musimy uwzględnić czas Δt między rozpoczęciem nadawania sygnału świetlnego a wysłaniem jego maksimum. Wtedy okazuje się, że $l/(t+\Delta t) <$ c. Wbrew więc sensacyjnym doniesieniom prasowym wyniki przedstawionego eksperymentu żadnego z fundamentalnych praw fizyki nie naruszają.

Rozwiązanie zadania M 942.



Zacznijmy od drugich potęg. Z twierdzenia Pitagorasa mamy

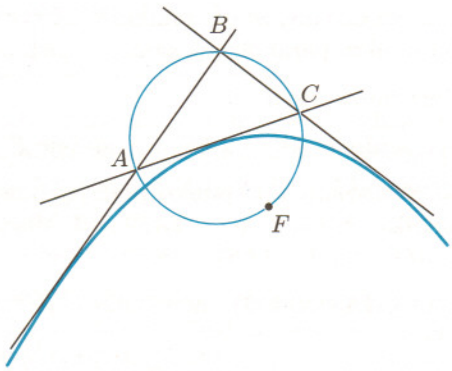
$$AP^2 + BQ^2 + CR^2 = (AM^2 - MP^2) + (BM^2 - MQ^2) + (CM^2 - MR^2) = (BM^2 - MP^2) + (CM^2 - MQ^2) + (AM^2 - MR^2) = PB^2 + QC^2 + RA^2.$$

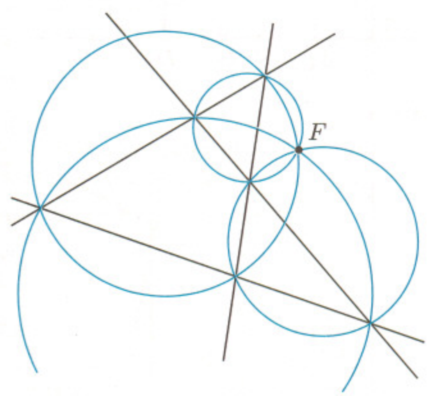
Dla sprawdzenia równości sum pierwszych potęg dogodnie jest przez M poprowadzić proste równoległe do każdego z boków trójkąta, jak na rysunku. Punkty P, Q, R są, odpowiednio środkami odcinków A_2B_1, B_2C_1, C_2A_1. Ponadto $AA_1 = BB_2$, $BB_1 = CC_2$, $CC_1 = AA_2$. Wobec tego

$$AP + BQ + CR = AA_2 + A_2P + BB_2 + B_2Q + CC_2 + C_2R = PB_1 + B_1B + QC_1 + C_1C + RA_1 + A_1A = PB + QC + RA.$$

Czy na pewno?

Oto pogląd dotyczący znanej ze szkoły paraboli:
Jeśli parabola jest styczna do prostych zawierających boki trójkąta ABC, to jej ognisko F leży na okręgu opisanym na ABC.
A oto mocniejsza opinia:
Dane są cztery proste, z których żadne trzy nie przechodzą przez jeden punkt, ani żadne dwie nie są równoległe; wówczas cztery okręgi opisane odpowiednio na utworzonych przez proste trójkątach przecinają się w jednym punkcie – jest to ognisko F paraboli stycznej do każdej z tych prostych.





Czy to prawda? Jedynym sposobem, aby się o tym przekonać jest spróbować to udowodnić. Gdy się udowodni pierwsze, to do drugiego potrzebny będzie tylko fakt(?), że istnieje parabola styczna do takich czterech prostych.