

Szczególna teoria względności, której postulaty przedstawił na początku XX wieku Albert Einstein, wydawała się całkiem irracjonalna i sprzeczna ze zdrowym rozsądkiem. Okazało się jednak, że tylko w jej ramach można poprawnie opisać otaczającą nas rzeczywistość. Wnioski z niej płynące były dużo poważniejsze, niż wydawało się na pierwszy rzut oka.

**MT:** Choć już o tym mówiliśmy, przypomnijmy główne założenia teorii względności.

**TS:** Gdy pytamy, jakie są główne założenia teorii względności, mamy na myśli jej postulaty. Ja zawsze jednak na tak postawione pytanie odpowiadam z precyzją. Głównym założeniem teorii względności jest poprawne wytłumaczenie doświadczenia Michelsona-Morleya. Przypomnijmy, że to doświadczenie stało się pięcią achillesową teorią Newtona.



Wyjaśnień udziela **Tomasz Sowiński**.

W 2005 roku skończył z wyróżnieniem studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w zakresie fizyki teoretycznej. Obecnie jest asystentem w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN.

Z zamięłowania zajmuje się popularyzacją nauki. W roku 2005 był nominowany do nagrody w konkursie Popularyzator Nauki organizowanym przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji oraz Polską Agencję Prasową.

mień światła. W wyniku dokonanych pomiarów prędkości rozchodzenia się tego promienia stwierdzają, że wyszła im dokładnie ta sama wartość tejże prędkości. To w oczywisty sposób jest sprzeczne z zasadą dodawania prędkości Galileusza i tym samym teorią Newtona.

# Jak umysł pokonał przyzwyczajenie!



**MT:** O ile dobrze pamiętam, w tym doświadczeniu pokazano, że prędkość światła jest stała, prawda?

**TS:** W swoim doświadczeniu Michelson i Morley wykazali, że pomiar prędkości światła zupełnie nie zależy od tego, jak porusza się źródło światła, ani od tego, jak porusza się obserwator. Obrazowo można powiedzieć tak: dwaj obserwatorzy poruszają się względem siebie z dowolną prędkością i obserwują ten sam pro-

**MT:** Ta obserwacja stała się postulatem Einsteina.

**TS:** Dokładnie tak. Skoro doświadczenie mówi, że prędkość światła nie zależy od układu odniesienia, w którym jest mierzona, i jest to fakt sprzeczny z poprzednią teorią, to należy przyjąć ten fakt jako pewnik nowej teorii i sprawdzić, co z tego wynika. A wynika wiele...

**MT:** Tak, mówiliśmy już o innym prawie dodawania prędkości i o względności równoczesności. Chyba już nic bardziej zaskoczyć nie może?

**TS:** Oj. Powiedziałbym, że teraz dopiero się zaczyna. Skoro jesteśmy już przy upływie czasu, to przeprowadźmy kolejny eksperyment myślowy w ramach teorii Einsteina. Tym razem będzie on wymagał kilku prostych rachunków.

**MT:** Zapewne będzie potrzebny pociąg, dziewczynka i chłopiec?

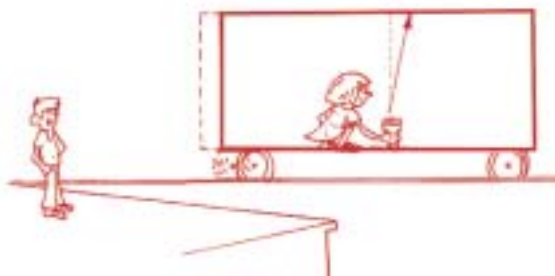
**TS:** Oczywiście! Teraz jednak dziewczynka wykonuje inny eksperyment. Załóżmy, że stoi ona na środ-



ku wagonu i z podłogi wysłała sygnał prosto w górę do sufitu. Podkreślmy, że sygnał świetlny zostaje wysłany dokładnie ze środka podłogi i dociera dokładnie do środka sufitu. Ponieważ dziewczynka znajduje się w wagonie, który w jej odczuciu się nie porusza, to światło leci dokładnie po linii pionowej. Jeśli wysokość wagonu, tzn. drogą, jaką ma przebyć światło, wynosi powiedzmy  $H$ , a prędkość światła wynosi  $c$  (tak jak w każdym inercyjnym układzie odniesienia, co wynika z drugiego postulatu STW), to czas, po którym światło doleci do sufitu, wynosi:

$$\Delta T = \frac{H}{c}$$

Lub inaczej: Wysokość wagonu wynosi  $H = c \cdot \Delta T$ . Zastanówmy się teraz, jak wygląda to doświadczenie z punktu widzenia chłopca na peronie. On widzi, że pociąg porusza się z pewną prędkością  $v$ . Światło startując ze środka podłogi i uderzając po pewnym czasie w środek sufitu, nie może się poruszać po linii dokładnie pionowej, ale trochę po skosie. W przeciwnym razie nie mogłoby dotrzeć do środka sufitu, a to jest fak-



tem obiektywnym. Droga, jaką musi przebyć światło (patrz rysunek), jest równa zgodnie z twierdzeniem Pitagorasa:

$$s = \sqrt{H^2 + x^2}$$

$x$  jest oczywiście drogą, jaką przebędzie pociąg w czasie, gdy światło leci od podłogi do sufitu. Jeśli ten czas przelotu oznaczymy przez  $\Delta t$ , to wynosi ona  $x = v \cdot \Delta t$ . Z drugiej strony wiemy, że światło w tym samym czasie przebędzie drogę  $s$ , poruszając się z prędkością  $c$ , która jest taka sama zarówno dla dziewczynki, jak i chłopca. Mamy zatem równanie:

$$c \cdot \Delta t = \sqrt{H^2 + (v \cdot \Delta t)^2}$$

Wstawiając do tego wzoru wysokość wagonu, wyznaczoną wcześniej, otrzymujemy wzór, który wiąże nam upływ czasu dla dziewczynki ( $\Delta T$ ) z upływem czasu dla chłopca ( $\Delta t$ ) oraz prędkością pociągu ( $v$ ) i prędkością światła ( $c$ ). Po małych przekształceniach, które zostawiamy czytelnikowi jako ćwiczenie, otrzymujemy:

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

**MT: Czy to oznacza, że... (???)**

**TS:** Mam podejrzenia, że Pani jeszcze nie wierzy w to, co widzi.

**MT: Czas płynie inaczej dla dziewczynki i dla chłopca?**

**TS:** Tak! Taki jest wniosek z tego wzoru. Uporządkujmy to. Ważne są dwa zdarzenia, które rozgrywają się w pociągu. Pierwsze, to zdarzenie polegające na wysłaniu sygnału świetlnego z podłogi wagonu. Drugie, to dotarcie tego sygnału do sufitu. Te dwa zdarzenia zachodzą po sobie w pewnym odstępie czasu. Dla dziewczynki ten odstęp wynosi  $\Delta T$ , a dla chłopca  $\Delta t$ . Jak widać z tego wzoru, te dwa przedziały czasu są różne, tzn. **między tymi dwoma zdarzeniami dla chłopca minął inny czas niż dla dziewczynki**. Oczywiście sam fakt, że te dwa zdarzenia łączy jakiś wymyślony przez nas eksperyment, teraz już nie ma znaczenia. Mogą to być dowolne dwa zdarzenia.

**MT: Czy można to jakoś łatwiej wyjaśnić?**

**TS:** Najlepiej jest zawsze posłużyć się przykładem. Załóżmy, że pociąg jedzie z dużą prędkością, np. z prędkością równą 60% prędkości światła, czyli  $\frac{3}{5}c$ . Jeśli u chłopca pomiędzy jakimiś dwoma zdarzeniami minęła jedna sekunda, to jak z powyższego wzoru wynika, że u dziewczynki minie tylko 0,8 sekundy, bo w tym przypadku:

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \sqrt{1 - \frac{9}{25}} = \frac{4}{5}$$

Czyli na każde pięć sekund chłopca przypadają tylko cztery u dziewczynki. Czym prędkość pociągu jest większa, tym ta różnica staje się bardziej dramatyczna. Krótko mówiąc, u dziewczynki czas płynie wolniej! To zjawisko nazywamy **DYLATACJĄ CZASU**.

**MT: Co jak co, ale to chyba oznacza, że teoria względności nadaje się tylko do SF?**

**TS:** Hm. Rzeczywiście jest to sprzeczne z naszym codziennym myśleniem, z naszymi przyzwyczajeniami. Od urodzenia mamy jakieś takie wewnętrzne przecucie, że czas dla wszystkich płynie tak samo,





m.in. dlatego jest sens go mierzyć. Ale przypomnijmy sobie wcześniejsze doświadczenie myślowe, które doprowadziło nas do względności równoczesności. To również wydawało nam się absurdalne. Ale skoro już się zgodziliśmy, że równoczesność zdarzeń jest względna, to czemu mielibyśmy odrzucić nowe zjawisko przewidywane przez teorię względności – względność upływu czasu. Oczywiście jeśli prędkości, z którymi poruszają się względem siebie obserwatorzy, są małe w porównaniu z prędkością światła, to wyrażenie pod pierwiastkiem prawie nie różni się od jedności. Tym samym w codziennym życiu możemy zakładać, że czas dla wszystkich płynie tak samo. Znowu zadziałała zasada korespondencji.

**MT: Nie chce mi się wierzyć, że to zjawisko naprawdę zachodzi.**

**TS:** Nie trzeba wierzyć – mamy na to dowody eksperymentalne! Podobnie jak w przypadku nowego wzoru na dodawanie prędkości znow z pomocą przychodzą nam drobiny materii poruszające się z ogromnymi prędkościami.

**MT: Jak to? Przecież cząstki nie mają zegarków!**

**TS:** Może to wyda się zaskakujące, ale niektóre cząstki mają coś w rodzaju zegara. Otóż niektóre cząstki występujące w przyrodzie (a właściwie większość z nich) nie są trwałe i po pewnym czasie rozpadają się na inne. To, co jest istotne, to fakt, że czas ten jest ściśle określony dla danego typu cząstek i tylko od tego typu zależy. Np. neutron (jeden ze składników jąder atomowych), gdy jest swobodny, rozpada się po ok. 15 minutach. Proton jest natomiast taką cząstką, której rozpadu jeszcze nie udało się zaobserwować. W przyrodzie występuje całe zoo różnych cząstek. W tej chwili nas najbardziej interesują cząstki zwane mionami, których czas życia jest bardzo mały i wynosi zaledwie 2  $\mu$ s (2 milionowe części sekundy). W warunkach nielaboratoryjnych powstają one na Ziemi jedynie w górnych warstwach stratosfery, na skutek oddziaływania z promieniowaniem kosmicznym. Ze względu na ich krótki czas życia nie są one w stanie dotrzeć do powierzchni Ziemi przed tym, jak się rozpadną.

**MT: Jaki to ma związek z teorią względności?**

**TS:** Cząstki te obserwujemy na Ziemi! Choć nie są one w stanie dolecieć do Ziemi, bo za krótko żyją, to jednak do nas docierają. Mało tego, docierają kilkaset metrów pod powierzchnię Ziemi!

**MT: Zupełnie nie rozumiem!**

**TS:** Otóż w tym miejscu należy podkreślić, że czas życia cząstki określany jest zawsze w takim ukła-

dzie odniesienia, w którym ta cząstka spoczywa. Jest to naturalny układ odniesienia dla cząstki – przez nią wyróżniony. Jeśli teoria względności jest prawdziwa, to cząstka obserwowana w układzie odniesienia, w którym się porusza, będzie miała dłuższy czas życia niż w układzie, w którym spoczywa. No bo czas życia to nic innego, jak przedział czasu pomiędzy dwoma zdarzeniami – powstaniem i rozpadem danej cząstki. A jak wykazaliśmy wcześniej, czas pomiędzy każdymi dwoma zdarzeniami będzie różny dla różnych obserwatorów, a najmniejszy dla tego obserwatora, dla którego cząstka spoczywa.

**MT: Czyli to pozwala zwiększyć czas życia cząstki.**

**TS:** Dokładnie tak! I właśnie dlatego miony powstające w górnych warstwach atmosfery możemy zaobserwować na Ziemi. Poruszają się one bowiem z gigantyczną prędkością ponad 99% prędkości światła i tym samym ich czas życia wydłuża się ponad 30 razy. Tym samym mogą one pokonać 30-krotnie dłuższą drogę, niż gdyby zjawisko dylatacji czasu nie zachodziło. Fakt, że miony kosmiczne wykrywamy na Ziemi, jest niepodważalnym dowodem na to, że teoria względności rzeczywiście działa. Wcześniej poprawnie opisywała rozpędzanie cząstek (Młody Technik 3/2006), tym razem przewiduje i poprawnie opisuje dylatację czasu! Nie ma innego sensownego wytłumaczenia tych obserwacji.

**MT: Zatem dylatacja czasu naprawdę zachodzi.**

**TS:** Tak! Bez żadnych wątpliwości możemy powiedzieć, że dylatacja czasu zachodzi. Upływ czasu jest pojęciem względnym i zależy od obserwatora, który go mierzy. Choć teraz umiemy to potwierdzić doświadczalnie, w czasach gdy rodziła się teoria względności, fizycy mogli tylko wierzyć lub nie, że jest to prawda. Nie wszyscy od razu uwierzyli.

**MT: Dlaczego?**

**TS:** Z dylatacją czasu jest związana pewna bardzo ciekawa konstrukcja logiczna zwana w literaturze **paradoksem bliźniąt**. Jest to rozumowanie, które rzekomo prowadzi do sprzeczności teorii względności samej ze sobą. Paradoks bliźniąt miał być jednym z argumentów przeciwko teorii względności.

**MT: Proszę powiedzieć na czym polega paradoks bliźniąt?**

**TS:** Z wielką chęcią opowiem, ale na samym początku chciałbym wyraźnie powiedzieć, że **przedstawione tu rozumowanie jest BŁĘDNE!** Tym samym nie może ono obalić teorii względności. Otóż całe rozumowanie jest oparte na obserwacji, że zgodnie z pierwszym po-

stulatem teorii względności, żaden obserwator nie jest wyróżniony. Chłopiec na peronie widzi, że dziewczynka się porusza, a zatem czas płynie u niej wolniej. Ponieważ jednak sytuacja jest całkowicie symetryczna, to dziewczynka może powiedzieć, że to ona spoczywa, a peron razem z chłopcem się porusza. Tym samym, wg dziewczynki to u chłopca czas płynie wolniej.

**MT: To brzmi co najmniej dziwnie!**

**TS:** Faktycznie, ale tylko na pierwszy rzut oka. Niektórzy myślą, że to jest paradoks i odrzucają teorię względności już w tym miejscu. Ale proszę zwrócić uwagę na fakt, że w pierwszym przypadku obaj obserwatorzy mówią o zegarze dziewczynki, a w drugim o zegarze chłopca. Dlatego dylatację czasu należałoby wyrazić bardziej ściśle tak: zegar gdy widziany jest w ruchu, chodzi wolniej niż wtedy, gdy jest widziany jako spoczywający. Wracając do chłopca i dziewczynki: w pierwszej sytuacji chodzi zegar w wagonie, w drugiej zegar na peronie. Nic więc dziwnego, że wydaje się iż raz jeden, a raz drugi chodzi wolniej. To są różne zegary! Pytanie zatem, czy można jakoś te zegary utożsamić?

**MT: Pewnie nie można, bo wtedy to faktycznie byłby problem.**

**TS:** Otóż sposobem na utożsamienie zegarów jest ich synchronizacja. Należy jej dokonać w sprytny sposób – w momencie gdy zegary się mijają. Wtedy mamy pewność, że istniał taki moment, że zegary wskazywały tę samą godzinę. Ponieważ się poruszają względem siebie, to jeden chodzi wolniej, a drugi szybciej (w zależności od obserwatora). Oczywiście nie ma w tym nic złego, bo gdy zegary się miną, znów przestają być utożsamione, bo są w różnych miejscach i dokładnie wiadomo, który jest który. Ale gdyby udało nam się zawrócić pociąg (np. po okręgu) i znów sprawić, aby zegary znalazły się w jednym miejscu, to moglibyśmy sprawdzić, czy nadal są zsynchronizowane. Po prostu porównać ich wskazania. Gdyby była różnica, to moglibyśmy z całą pewnością powiedzieć, że czas w pociągu płynął inaczej niż czas na peronie. No bo zegary były zsynchronizowane, a później się rozsynchronizowały. Jakby ktoś zamknął oczy dokładnie w momencie, gdy zegary były zsynchronizowane, a następnie otworzył, gdy znów się spotkały, to nie mógłby nic powiedzieć o tym, który zegar się poruszał, a który nie, a zegary wskazywałyby inną godzinę! Zgoda?

**MT: Zgoda. Zatem jak będzie naprawdę?**

**TS:** Sprawa jest gorsza, niż się wydaje. Popatrzmy, co powiedzą nasi obserwatorzy. Załóżmy, że chłopiec i dziewczynka są bliźniakami. W pewnym momencie synchronizują zegary i dziewczynka wyrusza w podróż z dużą prędkością. Następnie gdzieś daleko zawraca i przyjeżdża do chłopca. Ponieważ cały czas się poruszała, to czas u niej względem czasu u chłopca musiał płynąć wolniej. Chłopiec zatem się zestarzał bardziej, a dziewczynka mniej. Tak przynajmniej widzi tę sytuację chłopiec. Dziewczynka widzi oczywiście coś zupełnie odwrotnego. Może przecież powiedzieć: „Nie, to ja spoczywałam, a mój brat się poruszał. Zatem on starzeje się wolniej”. I oczywiście gdyby się nie spotkali, to nie mogliby rozstrzygnąć, kto ma rację. Ale przecież się spotkali! Zatem mogą porównać swój wiek. Kluczowy jest tu moment spo-



tkania (podobnie jak poprzednio ponowne spotkanie się zegarów), bez niego nie można sprawdzić kto ma rację. Zatem na pierwszy rzut oka wydaje się, że teoria względności jest sprzeczna ze sobą, bo mówi, że wg jednego obserwatora jest się młodszym, a wg drugiego starszym. A to jest po prostu niemożliwe. Nie można być równocześnie starszym i młodszym od kogoś. Jest tak albo tak. Jakby nie było, to będzie to sprzeczne z teorią względności zastosowaną przez któregoś z obserwatorów.



**MT: Czy zatem teoria względności nie jest kompletna?**

**TS:** Jak już mówiłem, w tym rozumowaniu jest pewien podstawowy błąd. Jeśli rozumowanie przeprowadzi się prawidłowo, to wynik wychodzi jednoznaczny – to dziewczynka zestarzeje się mniej.

**MT: Jak to? Przecież obserwatorzy są równo-uprawnieni! To mówi pierwszy postulat!**

**TS:** Czy aby na pewno? Bardzo mnie kusi, żeby podać rozwiązanie już teraz. Ale chciałbym jednak, aby czytelnicy zastanowili się nad tym problemem. Tak jak musieli zrobić fizycy, gdy po raz pierwszy rozgryzali ten paradoks. Zostawmy tę zagadkę do następnego spotkania – wtedy wszystko dokładnie wyjaśnimy. Chciałbym jedynie jeszcze raz tylko podkreślić, że paradoks bliźniąt nie podważa teorii względności, a pokazuje jedynie, że trzeba ją poprawnie i roztważnie stosować. Zapraszam na następny odcinek! ●

Rozmawiała *Wisława Karolewska*