

**Teoria względności całkowicie zmieniła nasze poglądy na naturę czasu i przestrzeni. W poprzednich numerach MT mówiliśmy już o względności takich pojęć, jak równoczesność zdarzeń czy upływ czasu. Okazuje się, że również pomiar długości przedmiotów zależy od prędkości obserwatora, który tego pomiaru dokonuje.**

**MT: Na zakończenie poprzedniej rozmowy obiecał mi Pan powiedzieć, co to jest linijka. Zupełnie tego nie rozumiem. O co chodzi?**

**TS:** Tak, faktycznie to może zabrzmiało dziwnie. Ale przypominać, że rozmawiamy o teorii względności, która jest całkowicie nieintuicyjna i zupełnie odbiega od przyzwyczajeń z życia codziennego. Już sobie wytłumaczyliśmy, dlaczego musimy dokładnie powiedzieć, co to jest zegarek, prawda?

**MT: Tak. Zegarek było to urządzenie, które mierzy odstęp czasu pomiędzy dwoma zdarzeniami. Było to z jakichś powodów ważne.**

**TS:** Było to ważne, bo jak wcześniej sobie powiedzieliśmy, upływ czasu jest pojęciem względnym i zależy od obserwatora, który go mierzy. Zegary chodzą według nas wolniej, gdy obserwujemy je jako poruszające się.



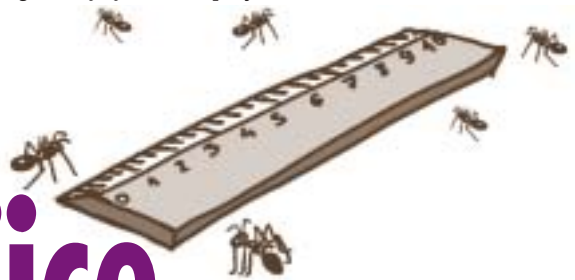
Z zamiłowania zajmuje się popularyzacją nauki. W roku 2005 był nominowany do nagrody w konkursie Popularyzator Nauki organizowanym przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji oraz Polską Agencję Prasową.

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.

**TS:** Tak. Dokładne zrozumienie na czym polega paradoks bliźniąt i dlaczego rozumowanie do niego prowadzące jest błędne, było możliwe tylko dzięki poprawnemu zdefiniowaniu co to jest upływ czasu.

**MT: Rozumiem, że przy linijce i pomiarze długości będą nowe kłopoty?**



# Linijka linijce nie jest równa!

**MT: Pamiętam! Brało się to z faktu, że prędkość światła nie zależy od obserwatora. Dla wszystkich jest taka sama. To przecież postulat teorii względności.**

**TS:** Właśnie. Dlatego tak ważne było dokładnie zdefiniowanie, co rozumiemy pod pojęciem „upływ czasu”. Definicja, którą przyjęliśmy, wydawała nam się naturalna i zgodna z naszymi oczekiwaniami. Ale prowadziła do zdumiewającego odkrycia – różne zegarki chodzą w różnym tempie, jeśli tylko się poruszają względem siebie. Definicja ta jednak pozwoliła nam uniknąć nieporozumień.

**MT: Chodziło głównie o paradoks bliźniąt, prawda?**

**TS:** Dokładnie tak! Tym razem jednak już będziemy ostrożniejsi i zaczniemy od razu od definicji co to jest pomiar odległości. Jak Pani myśli? Jak należy to zdefiniować?

**MT: Dla mnie długość to po prostu odległość pomiędzy dwoma punktami.**

**TS:** To definicja całkiem niezła. Ale ma pewne mankamenty.

**MT: Jak to? Co może być złego w odległości? Biorę linijkę i mierzę. Ot, cała filozofia.**

**TS:** Proszę sobie wyobrazić, że chce Pani zmierzyć odległość pomiędzy dwoma mrówkami, które chodzą po kartce papieru. Przykładamy linijkę do kartki i ustawiamy „zero” podziałki w miejscu, gdzie jest

pierwsza mrówka. Następnie ustawiamy linijkę tak, aby łączyła w linii prostej obie mrówki i w pozycji, gdzie jest druga mrówka, odczytujemy liczbę na podziałce.

**MT: No i odczytana liczba jest odległością w centymetrach pomiędzy mrówkami. Coś nie tak?**

**TS:** Proszę zauważyć, że pomiar ten jest bardzo trudny. Po ustawieniu linijki na pierwszej mrówce należy ustawić linijkę w kierunku drugiej mrówki. Każdy, kto widział kiedykolwiek mrówki, wie, że biegają one jak szalone. Zanim ustawimy linijkę, pierwsza mrówka już ucieknie. To, co zmierzymy, nie będzie zatem odległością pomiędzy mrówkami.

**MT: No to czym będzie to, co zmierzymy?**

**TS:** Będzie to na pewno odległość pomiędzy jakimiś dwoma zdarzeniami. Pierwsze zdarzenie polega na tym, że pierwsza mrówka znajduje się w „zerze” linijki w pewnej chwili. A drugie polega na tym, że druga mrówka znajduje się w konkretnym miejscu linijki, ale W INNYM MOMENCIE. Nie jest to zatem odległość pomiędzy mrówkami! Przypominam, że my chcemy zmierzyć odległość pomiędzy mrówkami. Trzeba znaleźć zatem inny sposób pomiaru. Jakies pomysły?

**MT: Hm... Trzeba jakoś dokonać pomiaru w jednej chwili. Ale jak to zrobić?**

**TS:** No właśnie! Tu jest pies pogrzebany. Odległość pomiędzy mrówkami to odległość zmierzona pomiędzy ich położeniami w jednej chwili. Taką definicję musimy przyjąć, bo inaczej będzie wiele nieporozumień.

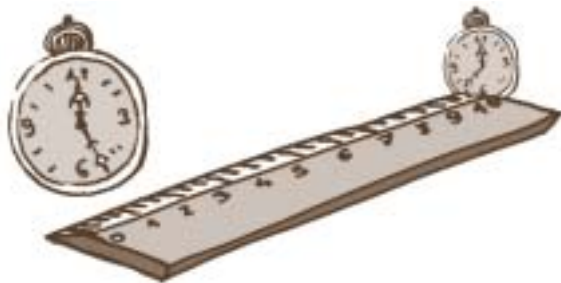
**MT: No dobrze. Z tym chyba każdy się zgodzi. O co tyle szumu?**

**TS:** Przypominam, że chcemy zastosować naszą definicję w teorii względności. Przyrodnik musi umieć kojarzyć fakty. Proszę chwilkę się zastanowić.

**MT: Nic nie rozumiem. Co ma teoria względności do odległości mrówek? Pan chyba raczej żartować!**

**TS:** Jaki był pierwszy zaskakujący wniosek płynący z postulatów teorii względności?

**MT: Zaraz, zaraz... Czy Pan chce powiedzieć, że mamy kłopoty, bo nie wiemy, co to znaczy równoczesność?**



**TS:** Eureka! Przypomnijmy, że dwa zdarzenia, które są równoczesne dla jednego obserwatora, nie są równoczesne dla drugiego, jeśli tylko się on porusza. Mamy zatem kłopot z jednoczesnym pomiarem położenia mrówek, ale nie dlatego, że jest to trudne w praktyce, ale dlatego, że nie ma obiektywnej definicji równoczesności.



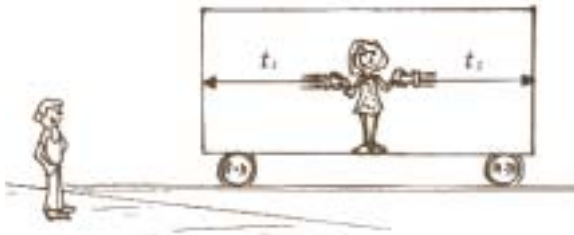
**MT: Rzeczywiście. Jak ktoś zmierzy odległość pomiędzy dwoma mrówkami w jednej chwili (tzn. równocześnie przyłoży linijkę do obu mrówek), to zaraz ktoś mu powie, że głupotę robi, bo według niego nie robi tego równocześnie.**

**TS:** Na dodatek może się zdarzyć tak, że dla jednego obserwatora linijka równocześnie zostanie przyłożona do mrówki A i mrówki B, dla innego najpierw do mrówki A, a później do mrówki B. Można znaleźć i takiego obserwatora, dla którego linijka zostanie najpierw przyłożona do mrówki B, a później do mrówki A. I każdy ma na swój sposób rację!

**MT: To jakiś absurd. To znaczy, że taki pomiar odległości nie ma sensu.**

**TS:** No chyba nie jest tak źle. Po prostu każdy mierzy odległość na swój sposób i już. Dlatego właśnie mówimy, że odległość mierzona pomiędzy dwoma punktami jest pojęciem względnym i zależy od obserwatora.

**MT: Zaraz, zaraz. Sam Pan mówił mi kiedyś, że jak prędkości są bardzo małe w porównaniu z prędkością światła, to właściwie możemy stosować teorię Galileusza. Poprawki teorii względności są wtedy bardzo małe. A przecież mrówki nie biegają tak szybko, prawda?**



**TS:** Ha! To jest jedno z nieporozumień, które ludzie popełniają pod wpływem plotek na temat teorii względności. Tu nie chodzi o prędkość mrówek. Tu chodzi o prędkość obserwatorów. To, że mrówki poruszają się względem siebie powoli, nie ma żadnego znaczenia. Ważne jest, że są różni obserwatorzy, którzy względem siebie mogą poruszać się bardzo szybko. To od ich prędkości zależy, czy teoria względności musi być stosowana, czy wystarczy ograniczyć się do przybliżenia Galileusza. Przypominam, że podobnie było w pierwszym naszym wniosku z teorii względności – WZGLĘDNOŚCI RÓWNOCZESNOŚCI.

**MT: Jak to?**

**TS:** Pamiętajcie zapewne Państwo, że tam chodziło o dotarcie dwóch sygnałów świetlnych do przeciwległych drzwi wagonu. Dla jednego obserwatora sygnały docierały równocześnie, dla innego nie. Ale dla każdego z nich drzwi względem siebie się nie poruszały! Poruszał się jedynie wagon jako całość. Odległość pomiędzy drzwiami w ogóle się nie zmieniała. Podobnie będzie z pomiarem odległości pomiędzy mrówkami. Nawet gdyby się one względem siebie nie poruszały, to i tak odległość między nimi będzie różna dla różnych obserwatorów, jeśli tylko poruszają się oni względem siebie. Zaraz to sobie udowodnimy.



**MT:** Już się spodziewam eksperymentu myślowego.

**TS:** A jakże! Ale zgodnie z tradycją eksperyment znów przeprowadzimy w pociągu. Zapomnijmy zatem o mrówkach i zastanówmy się, jak dziewczynka w pociągu (Karolinka) i chłopiec na peronie (Krzys) mogą zmierzyć długość wagonu. Ma Pani jakiś pomysł?

**MT:** Po naszych wcześniejszych rozważaniach boję się coś proponować. Przydałaby się chyba jakaś miarka. A najlepiej dwie – jedna w pociągu i druga na peronie.

**TS:** Tak, ale wtedy znów mielibyśmy problemy podobne do paradoksu bliźniąt. Tym razem zamiast różnych zegarów wystąpiłyby różne linijki. A to, jak pamiętamy, może być problem. Lepiej zastosować coś, co jest obiektywne dla obu obserwatorów. Jest tylko jedna taka rzecz! Pora rzucić okiem na postulaty teorii względności...

„Prędkość światła jest taka sama dla wszystkich obserwatorów”.

To brzmi prawie jak zaklęcie. Jedno zdanie, a tyle z niego wynika. To zdanie powinien umieć powiedzieć każdy przyrodnik nawet po przebudzeniu w środku nocy. Zastosujemy ten postulat w eksperymencie zwanym *metodą radarową*.

**MT:** Na czym on polega?



**TS:** Karolinka stoi na jednym końcu wagonu i wysyła sygnał świetlny dokładnie na drugi jego koniec. Tam za pomocą lusterka sygnał zostaje odbity i wraca z powrotem do dziewczynki. Dziewczynka mierzy czas, jaki minie pomiędzy wysłaniem sygnału a jego powrotem. Wykorzystując fakt, że wie, z jaką prędkością leciało światło, wylicza długość wagonu. Jeśli czas pomiędzy wysłaniem a odebraniem sygnału wynosi  $\Delta T$ , to długość wagonu, którą oznaczmy sobie przez  $L_0$ , dana jest wzorem

$$L_0 = \frac{1}{2} c \cdot \Delta T$$

Podkreślmy jeszcze raz, że Karolinka zmierzyła czas pomiędzy dwoma zdarzeniami – wysłaniem i otrzymaniem sygnału świetlnego. Jak pamiętamy, dla różnych obserwatorów czas ten będzie różny. To będzie miało za chwilę kluczowe znaczenie!

**MT:** A co zobaczy Krzys na peronie?

**TS:** On może również zmierzyć czas pomiędzy tymi dwoma zdarzeniami swoim zegarkiem. Wiemy już,

że skoro Krzys widzi, że wagon się porusza, to według niego pomiędzy tymi zdarzeniami minie więcej czasu. W tym przypadku bowiem obserwuje on zegar poruszający się, który, jak pamiętamy, chodzi według chłopca wolniej niż zegar na peronie. Wykorzystując wzór na dylatację czasu (MT 06/06), stwierdzamy, że jeśli pociąg porusza się z prędkością  $v$ , to czas  $\Delta t$  zmierzony pomiędzy zdarzeniami (wysłanie i odebranie sygnału przez Karolinkę) przez Krzysia wyniesie

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

**MT:** Zatem teraz Krzys może wyliczyć długość wagonu według swojego zegara, prawda? Skoro dla niego odstęp czasu pomiędzy tymi zdarzeniami jest większy, to wagon będzie według niego dłuższy.

**TS:** Absolutnie nie! Uwaga! Nie można działać tak pochopnie. Krzys nie może przecież zastosować wzoru analogicznego do wzoru Karolinki, bo wtedy to, co wyliczy, nie będzie długością wagonu! Działając w ten sposób, zapomnielibyśmy uwzględnić dość istotny fakt, że wagon podczas obserwacji się przemieszcza.

**MT:** Faktycznie! Ale zatem jak z tego wyliczyć długość wagonu?

**TS:** Jeśli pociąg porusza się z prędkością  $v$ , to w pierwszej fazie ruchu światło „goni” przód wagonu, który mu ucieka. To znaczy światło ma do pokonania drogę, która jest równa długości wagonu powiększoną o odcinek, o jaki przesunął się wagon w tym czasie. Jeśli długość wagonu w układzie odniesienia Krzysia wynosi  $L$ , to czas potrzebny na ten przelot wynosi

$$t_1 = \frac{L}{c - v}$$

Gdy światło wraca odbite od lustra, to pociąg jedzie mu „naprzeciw”. Światło ma więc do pokonania krótszą drogę. Czas, jaki na to jest potrzebny, wynosi

$$t_2 = \frac{L}{c + v}$$

Suma tych dwóch czasów to właśnie czas, jaki zmierzy Krzys pomiędzy wysłaniem a odebraniem sygnału świetlnego.  $\Delta t = t_1 + t_2$

Wykorzystując te wszystkie informacje, otrzymujemy związek pomiędzy długością wagonu zmierzoną przez Karolinkę  $L_0$  i przez Krzysia  $L$ :

$$L = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot L_0$$

Krzys stwierdza, że poruszający się wagon jest krótszy niż wynika to z pomiarów Karolinki.

**MT:** Troszkę to skomplikowane.

**TS:** Skomplikowane. Ale wystarczy sobie wyobrazić tę sytuację. Krzys widzi, że światło lecąc do lustra, musi pokonać dłuższą drogę, bo pociąg mu „ucieka”. Gdy wraca, droga jest krótsza, bo pociąg leci „naprzeciw”. Dodatkowo zegary Krzysia i Karolinki chodzą inaczej. To wszystko razem sprawia, że obliczają inną długość wagonu. Dodajmy, że gdyby nie było zjawiska dylatacji czasu (tzn. nieprawdziwy byłby drugi postulat teorii względności), to długość pociągu wyszłaby dokładnie taka sama.

**MT:** Wychodzi zatem inaczej, niż się wydawało



na początku. Bo myślałam, że skoro dłuższy czas, to dłuższy odcinek, jaki pokonuje światło.

TS: I to jest prawda. Jeśli dłuższy czas, to światło pokonuje dłuższą drogę. Droga, jaką pokonało światło, jest większa. Natomiast droga ta jest także większa niż długość wagonu, bo się on porusza. To, co nas interesuje, to długość wagonu. Ona okazuje się mniejsza dla Krzysia niż dla Karolinki. I jest tak oczywiście z każdym poruszającym się przedmiotem – nie tylko wagonem. Tym sposobem dochodzimy do kolejnego wniosku teorii względności zwanego SKRÓCENIEM DŁUGOŚCI. Możemy sformułować go następująco: **Długość przedmiotu dla obserwatora, względem którego się on porusza, jest mniejsza niż dla obserwatora, względem którego on spoczywa.** Tym samym przedmiot ma największą długość w tym układzie odniesienia, w którym spoczywa. Analogicznie do czasu własnego nazywamy ją DŁUGOŚCIĄ WŁASNĄ. W naszym eksperymencie myślowym długość własna wagonu była oznaczona przez  $L_0$ .

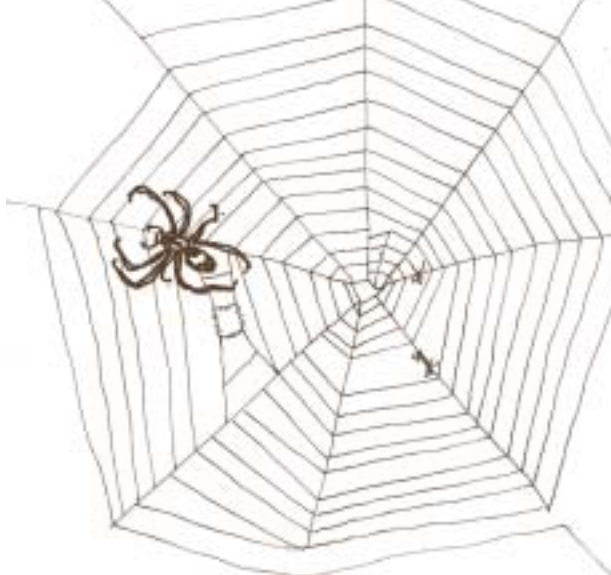


MT: To oznacza, że pomiar długości jest pojęciem względnym.

TS: Dokładnie tak. Podobnie jest z równoczesnością zdarzeń oraz upływem czasu. To wszystko są pojęcia względne, tzn. zależą od obserwatora, który dokonuje pomiarów. Wszystko ze sobą jest dokładnie powiązane, bo wynika z tego samego drugiego postulatu teorii względności. Jeśli któryś z tych wniosków nie zachodziłby w rzeczywistości, znaczyłoby to że teoria względności jest fałszywa.

MT: Czy zatem istnieją dowody doświadczalne, że skrócenie długości rzeczywiście zachodzi?

TS: Ależ oczywiście. Powiem więcej. Choć sobie może z tego jeszcze nie wszyscy zdają sprawę, ale dowód doświadczalny podaliśmy już dawniej, gdy opo-



wiadaliśmy o dylatacji czasu (MT 06/06). Jeszcze do tego wrócimy. Ze zjawiskiem skrócenia długości związane są również bardzo ciekawe paradoksy prowadzące do pozornej sprzeczności teorii względności. Wszystkie oczywiście wynikają ze złego rozumienia tej teorii. Najbardziej znane z nich to „paradoks tyczkarza i stodoły” i „samochodu i kanału”. Są to bardzo wymyślne eksperymenty myślowe, które pokazują, jak teoria względności jest z jednej strony zaskakująca, a z drugiej, jak konsystentna sama ze sobą. O tym wszystkim powiem sobie jednak następnym razem. Zapraszam!

PS.

MT: Panie Tomku, Panie Tomku – jeszcze jedno pytanie.

Dlaczego nas – poznających prawa fizyki – nazywa Pan przyrodnikami? Przecież ja na przykład nie cierpię żab, myszy i pajaków!!!

TS: Na to pytanie przy najbliższej okazji, bo odpowiedź chyba nie będzie krótka. ●



Centrum Fizyki Teoretycznej Polskiej Akademii Nauk  
serdecznie zaprasza na cykl wykładów popularnonaukowych pt.

## F jak Foton

odcinek 299792458

W programie:

10:00 – 11:00	„Fotony w astronomii”	dr hab. Lech Mankiewicz (CFT PAN)
11:00 – 11:45	„Maxwell, Lorentz, Einstein – oświeceni przez światło”	mgr Tomasz Sowiński (CFT PAN)
11:45 – 12:45	„Foton”	prof. dr hab. Iwo Białynicki-Birula (CFT PAN)
12:45 – 13:00	przerwa	
13:00 – 13:45	„Kwantowe przelewy bankowe – foton na usługach biznesu”	mgr Rafał Demkowicz-Dobrzański (CFT PAN)
13:45 – 14:15	„Anomalie sondy Pioneer – czy winne światło?”	mgr Szymon Łęski (CFT PAN)
14:15 – 14:45	„Zasady ekstremalne w fizyce? Czyli dlaczego światło wybiera zawsze najkrótszą drogę”	mgr Mirosław Hardej (CFT PAN)

Wykłady zostaną wygłoszone **16 września 2006 r.** w ramach X Festiwalu Nauki w auli Instytutu Fizyki PAN  
Al. Lotników 32/46, Warszawa

Szczegółowe informacje można znaleźć na stronie internetowej: [www.cft.edu.pl/festiwal](http://www.cft.edu.pl/festiwal)

Serdecznie zapraszamy!