

Pod koniec XIX wieku przeprowadzono doświadczenia, które całkowicie podważyły teorię Newtona. Trzeba było podjąć decyzję – albo odrzucić nowe doświadczenia, albo teorię Newtona zastąpić czymś jeszcze lepszym. Po wielu nieudanych próbach zdyskredytowania wyników nowych doświadczeń, było jasne, że zbliża się rewolucja w fizyce. Nikt jednak się nie spodziewał, że będzie ona aż tak głęboka.

MT: Przypomnijmy jak wyglądała fizyka pod koniec XIX wieku.

TS: Wydawało się wówczas, że poza kilkoma drobnymi sprawami, które trzeba wyjaśnić, fundamenty nowoczesnej nauki zostały określone. Dzięki pracom Newtona, a później Lagrange'a i Hamiltona zrozumiano, czym jest ruch i matematycznie sformalizowano, jak należy go opisywać. Znano oddziaływania grawitacyjne i elektromagnetyczne, które w piękny sposób wpisy-



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 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.

opisywać te zjawiska, prowadziły do absurdalnych wniosków – nieskończenie wielkich energii emitowanych w ciągu sekundy. Trafiły się też wyliczenia sprzeczne z wynikami doświadczeń.

MT: Ups. A drugi rodzaj problemów?

TS: To problem, o którym wspominaliśmy już w poprzednim numerze Młodego Technika. Otóż, tak jak już sobie to wyjaśnialiśmy, doświadczenia przeprowadzone przez Michelsona i Morleya wykazały ponad wszelką wątpliwość, że światło nie stosuje się do zasady dodawania prędkości Galileusza, tzn. niezależnie od tego jak się poruszamy i jak porusza się źródło światła, to jego prędkość dla

Jak absurd stał się prawdą!

wały się w ten formalizm. Matematycznie określono, jak należy te zjawiska poprawnie opisywać. Z powodzeniem zastosowano też ten opis do atomów – drobin materii, dzięki czemu udało się (choć przynajmniej, że z dużymi problemami natury rachunkowej) przewidywać zachowanie płynów i ciał stałych. Było jednak kilka drobnych, „nieistotnych” problemów.

MT: Co to za tajemnicze problemy?

TS: Dwojakiego rodzaju. Pierwszy możemy nazywać problemem z promieniowaniem ciała. Chodzi zarówno o promieniowanie termiczne ciała, jak i później odkryte zjawisko fotoelektryczne, polegające na przepływie prądu elektrycznego w materiale, pod wpływem zewnętrznego oświetlenia. Problem polegał na tym, że wszystkie rozsądne modele matematyczne, które miały

wszystkich, zawsze i wszędzie jest taka sama i wynosi tyle ile wynika z teoretycznych wyliczeń Maxwella.

MT: Dlaczego taki mały szczegół jest tak bardzo ważny?

TS: To kluczowy problem, bo zasada Galileusza leży u podstaw mechaniki newtonowskiej.

Mówi ona, że we wszystkich układach odniesienia czas płynie tak samo. Gdy natomiast przechodzimy z jednego układu odniesienia do innego poruszającego się z prędkością V to w nowym układzie odniesienia prędkości będą miały wartość $v' = v - V$ gdzie v jest prędkością w starym układzie odniesienia, a v' w nowym.

Prędkości po prostu dodaje się odpowiednio do siebie (szczegółowo omówiliśmy ten problem w numerze 02/2006 MT). Ta właśnie reguła nie stosuje się do światła!

Dla dociekliwych:

Zjawisko fotoelektryczne polega na przepływie prądu elektrycznego w materiale pod wpływem zewnętrznego oświetlenia.



MT: Gdzie zatem leży błąd?

TS: Może zabrzmi to tajemniczo, ale błędy nie ma nigdzie. Po prostu taki jest świat. Światło rzeczywiście tak się zachowuje. Mamy przecież niepowtarzalne dowody (doświadczenie Michelsona-Morleya). Trzeba teraz tylko wymyślić jak opisać to zjawisko w ramach jakiejś teorii, która będzie nam pokazywała jak to się ma do teorii Newtona, która jak wiemy jednak jest prawdziwa jeśli tylko nie stosujemy jej do światła.

MT: Dziwne! I co na to fizycy?

TS: No właśnie, to było wielkie wyzwanie dla fizyków. W roku 1905, wówczas jeszcze mało znany pracownik biura patentowego w Bernie zaproponował rozwiązanie bezkompromisowe. Albert Einstein, bo o nim tu mowa, oparł się całkowicie na doświadczeniu Michelsona i Morleya, odrzucając teorię eteru (patrz MT 4/2006) i zasadę Galileusza. I znow jak zawsze zadziałała zasada naukowego myślenia: założenie → wnioski → sprawdzenie w doświadczeniu.

MT: Jakie były założenia Einsteina?

TS: Jego szczególna teoria względności (STW) opiera się na dwóch postulatach:
I: Wszystkie prawa fizyki są takie same we wszystkich układach odniesienia
II: Prędkość światła nie zależy od układu odniesienia, w którym jest mierzona i zawsze wynosi tyle samo.
Pierwszy postulat jest całkiem naturalny. Mówi on po prostu, że prawa fizyki nie powinny zależeć od miejsca, z którego opisujemy jakieś zjawisko. Prawa fizyki nie zmieniają się, gdy my się poruszamy. Czujemy wewnętrznie, że jeśli uprawianie fizyki ma mieć w ogóle jakiś sens, to musi tak być.

Drugi postulat to wielka bomba. Wydaje się, że jest to całkowite odrzucenie mechaniki Newtona, która dorastała przez ostatnie 400 lat. Zupełnie nowa jakość.

Einstein jeszcze w tej samej pracy przeszedł do drugiego punktu zasady naukowego myślenia. Sformułował wnioski, które dawały się, przynajmniej teoretycznie, sprawdzić w doświadczeniu.

Ówczesne autorytety świata naukowego z dużą rezerwą (delikatnie mówiąc) oceniały nową teorię. Uspokajał ich fakt, że wystarczy przeprowadzić kilka do-

świadczeń, aby całkowicie zaprzeczyć tym przewidywaniom i teorię Einsteina będzie można wyrzucić do śmieci.

MT: A co by powiedziały autorytety, gdyby jednak wyniki doświadczeń okazały się zgodne z założeniami?

TS: Chyba nie myśleli o tym, bo był jeszcze drugi ważny wniosek ze szczególnej teorii względności. Również uspokajający na wypadek, gdyby okazała się ona „przez przypadek” prawdziwa. Otóż teoria względności daje dokładnie te same przewidywania co teoria Newtona, jeśli tylko prędkości (w rozważanym problemie) są bardzo małe w porównaniu z prędkością światła. To znaczy, że tutaj na Ziemi, używając do doświadczeń samochodów, a nawet samolotów, możemy spokojnie stosować teorię Newtona.

Nic więc dziwnego, że zasada dodawania prędkości, generalnie sprzeczna z teorią względności, w przybliżeniu ziemskim jest prawdziwa. Jest to tzw. **zasada korespondencji**. Mówi ona, że:

Każda nowa, racjonalna teoria fizyczna powinna być tak skonstruowana, aby w odpowiednim (dobrze zrozumianym) przybliżeniu odtwarzała teorię dotychczas obowiązującą.

Zasada ta, pierwszy raz zastosowana w teorii względności, była również stosowana przy konstruowaniu nowych teorii, np. mechaniki kwantowej.

Dla dociekliwych:

MT: Jak to zatem jest z tym dodawaniem prędkości?

TS: Czytelnik w tym miejscu musi mi niestety uwierzyć na słowo, bo przeprowadzenie prawdziwego dowodu wymaga pewnej wprawy rachunkowej na poziomie ostatniej klasy bardzo dobrego matematycznego liceum. Otóż można pokazać, że jeśli się przyjmie za punkt wyjścia podane powyżej dwa postulaty teorii względności, to prawidłowy wzór na dodawanie prędkości (jeśli ciała poruszają się po tej samej prostej)

$$\text{jest następujący: } V = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}},$$

gdzie v_1 i v_2 to prędkości zbliżających się do siebie ciał, a V to prędkość względna, tzn. prędkość jednego ciała obserwowanego z punktu widzenia drugiego. c to prędkość światła, która wynosi prawie 300 tys. km/s. Proszę zauważyć, że w mianowniku powyższego wzoru do jedynki jest dodana liczba, która w sytuacjach ziemskich jest bardzo mała. Jeśli weźmiemy za obie prędkości nawet prędkość samolotu 3000 km/h, to i tak będzie to liczba bardzo mała ze względu na prędkość światła podniesioną do kwadratu w mianowniku. W związku z tym dla sytuacji ziemskich rzeczywiście ten wzór właściwie niczym się nie różni od wzoru na dodawanie prędkości Galileusza:

$$V = v_1 + v_2$$

Dla porządku dodajmy jeszcze, że wzór na dodawanie prędkości ciał, które nie poruszają się wzdłuż jednej prostej, w teorii względności jest dużo bardziej skomplikowany.

MT: Na czym polega innowacyjność tego wzoru?

TS: Otóż cała inność tej teorii objawia się nam, gdy przejdziemy do sytuacji z dużymi prędkościami. Na początek sprawdzimy, że rzeczywiście prędkość światła nie zależy od układu odniesienia. Przyjmijmy, że jedziemy samochodem z prędkością v_1 , a drugi obiekt to światło poruszające się z prędkością $v_2 = c$. Wtedy każdy Czytelnik łatwo sprawdzi, że podany wzór mówi, że prędkość względna V wynosi $c!!!$ Niesamowite!!! Zatem rzeczywiście ten wzór jest zgodny z drugim postulatem STW. Prędkość światła, zarówno względem obserwatora stojącego, jak i poruszającego się w samochodzie, jest taka sama i wynosi c .

MT: A co się dzieje w sytuacjach pośrednich?

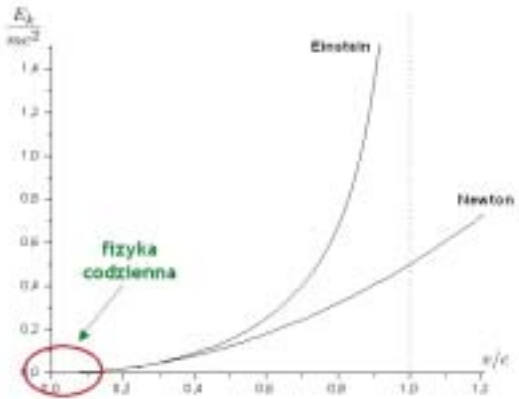
TS: Sprawdźmy! Załóżmy, że jeden samochód porusza się z prędkością równą jednej trzeciej prędkości światła, tzn. $v_1 = c/3$, a drugi z prędkością powiedzmy dwóch trzecich prędkości światła $v_2 = 2c/3$. Z teorii Galileusza wynikałoby wtedy, że prędkość względna tych dwóch samochodów wynosi $V = v_1 + v_2 = c$, czyli jest równa prędkości światła. Jak się policzy to ze wzoru, który podaliśmy dla teorii względności, to otrzymamy, że prędkość względna wynosi „zaledwie” 9/11 prędkości światła. Zatem rzeczywiście dla dużych prędkości jest różnica – czym jesteśmy bliżej prędkości światła, tym różnica jest bardziej istotna. Dzieje się to w tak ciekawy sposób, że nie można dobrać tak prędkości, aby prędkość względna była wyższa od prędkości światła.

MT: Czy prędkości większe od prędkości światła też można brać pod uwagę?

TS: Oczywiście do wzoru można wstawiać sobie co się chce. Pytanie, czy będzie to miało sens fizyczny. Znowu niestety nie jesteśmy tego w stanie matematycznie uzasadnić, ze względu na dość zaawansowane rachunki. Z teorii względności wynika jednak, że prędkość przyjęta w drugim postulacie jako niezmiennicza (w tym przypadku jest to prędkość światła, co potwierdzono w doświadczeniu Michelsona–Morleya) jest prędkością graniczną dla wszystkich prędkości fizycznych. W przeciwnym wypadku prowadziłoby to do logicznej sprzeczności. I to jest kolejne przewidywanie teorii względności – prędkość światła jest prędkością graniczną i nieprzekraczalną!

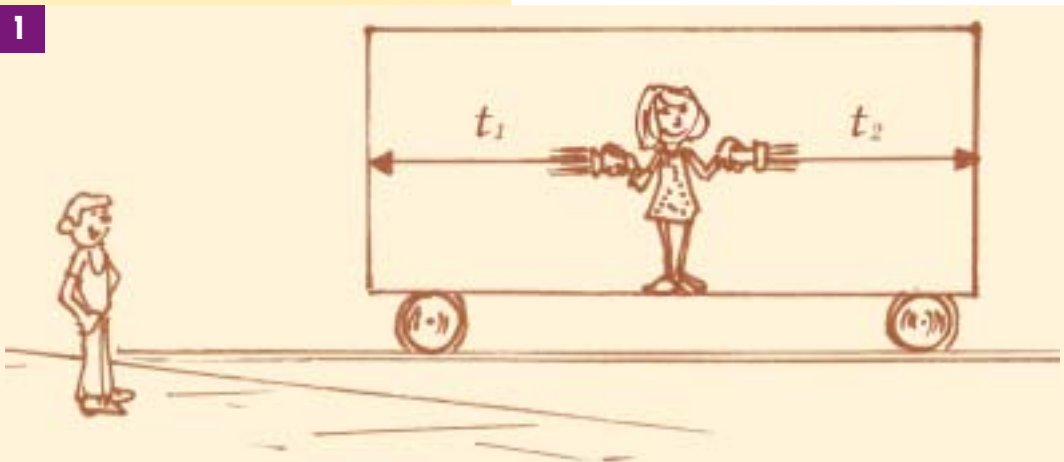
MT: Czy da się sprawdzić eksperymentalnie, że prędkość światła jest prędkością graniczną dla wszystkich prędkości fizycznych, skoro jej wartość jest tak duża?

TS: W czasach, gdy Einstein proponował swoją teorię, było to oczywiście niemożliwe. Dziś jednak fizycy rozpędzają cząstki elementarne do bardzo dużych prędkości. Okazuje się, że czym szybciej cząstka się porusza, tym trudniej jest zwiększyć jej prędkość. Tzn. gdy cząstka porusza się bardzo szybko, to trzeba włożyć bardzo dużo energii, aby rozpędzić ją choćby odrobinę mocniej. W fizyce mówi się, że cząstka staje się bardziej bezwładna. I jak łatwo zgadnąć, tą prędkością, do której nie da się dojść, bo trzeba by wpompować nieskończenie



wiele energii, jest właśnie prędkość światła. Teoria Newtona nie przewidywała takiego zjawiska. Najlepiej widać to na wykresie:

Wykres przedstawia zależność energii kinetycznej ciała od jego prędkości, tzn. mówi, ile trzeba dostarczyć energii, aby ciało rozpędzić do określonej prędkości. Na wykresie widać przewidywania dwóch teorii – teorii Newtona i Einsteina. Teoria Einsteina mówi, że potrzebna energia rośnie do nieskończoności, gdy zbliżamy się do prędkości światła (linia przerywana). Teoria Newtona w ogóle nie zauważa tego momentu. Jednocześnie wyraźnie widać, że dla bardzo małych prędkości obie teorie są właściwie nierozróżnialne – krzywe pokrywają się niemal idealnie.





stała prędkość światła = 299 792 458 m/s.

MT: Czy teoria względności daje jeszcze jakieś przewidywania?

TS: Ależ oczywiście. Teoria względności jest całą naszpikowana różnymi przewidywaniami – dlatego fizycy się nią zainteresowali. Albert Einstein był troszkę podobny do Galileusza – był specjalistą od eksperymentów myślowych. Tymi rozbrajał nawet najbardziej zajadłych przeciwników swoich teorii, głównie teorii względności.

Miejsce, gdzie teoria względności jest najbardziej dziwna, są jej przewidywania dotyczące upływu czasu. Wykonajmy za Einsteinem prosty eksperyment myślowy, który pokaże nam, jak ta teoria jest niesamowita. Warto tu dodać, że wszystkie eksperymenty myślowe Einsteina wyglądają mniej więcej tak samo – zawsze jest w nich jadący pociąg lub spadająca winda.

Po torach, na dworcu, jedzie dziwny pociąg z wagonami bez okien.

W jednym z wagonów stoi dziewczynka. Na peronie stoi natomiast chłopiec. Dziewczynka stoi dokładnie na środku wagonu. Ponieważ wagon nie ma okien, a pociąg jedzie ze stałą prędkością, dziewczynka nie jest w stanie powiedzieć, czy pociąg jedzie, czy stoi. Dopiero gdyby pociąg zmienił swoją prędkość (tzn. przechodził do innego układu inercjalnego), to ona by to odczuła, bo działałaby siła bezwładności.

Dlatego m.in. postulat pierwszy mówi, że w układach inercjalnych prawa fizyki są takie same.

Dziewczynka ma dwie latarki **1**, które są skierowane na przeciwległe ściany wagonu. Załóżmy, że wagon na końcach ma drzwi, które otwierają się natychmiast, gdy doleci do nich światło. Dziewczynka w pewnym momencie zapala latarki. Puszczą promień światła w dwóch przeciwnych kierunkach, w stronę drzwi. Ponieważ światło ma do przebycia w każdą stronę dokładnie taką samą drogę (dziewczynka stoi na środku wagonu), doleci ono do obydwu końców równocześnie – drzwi otworzą się w tym samym momencie.

MT: To proste. I chyba dla wszystkich zrozumiałe.

TS: Tak, ale zastanówmy się, co widzi chłopiec. Chłopiec widzi poruszający się wagon **2**. W pewnym momencie ze środka tego wagonu w dwóch przeciwnych kierunkach wypuszczony zostaje sygnał świetlny – jeden promień w kierunku ruchu pociągu, drugi wstecz. Zgodnie z drugim postulatem STW oba promienie świetlne, choć zostały wysłane z poruszającego się źródła, lecą z tą samą prędkością – prędkością światła. Ale przecież wagon względem chłopca się porusza, zatem jeden jego koniec jakby uciekał, a drugi jakby gonił światło. Jeśli teoria względności jest prawdziwa, to nie ma innej możliwości – chłopiec, stojąc na peronie, stwierdzi, że światło najpierw dotrze do końca wagonu, a później dogoni jego przód. To znaczy, że drzwi otworzą się najpierw z tyłu, a później z przodu!

MT: Niemożliwe!

TS: A jednak. Tak mówi teoria względności. Jest to tzw. **WZGLĘDNOŚĆ RÓWNOCZESNOŚCI**. Tzn. zjawiska, które są równoczesne w jednym układzie odniesienia, nie muszą być równoczesne w innym. Jest to niesamowite, bo pokazuje, że odczucie równoczesności zjawisk zależy od układu odniesienia. Takie zjawisko rzeczywiście w przyrodzie zachodzi, choć oczywiście ze względu na olbrzymią prędkość światła jest dla nas w ogóle niezauważalne. Niemniej jednak daje się to potwierdzić w bardzo wyrafinowanych doświadczeniach optycznych.

Proszę sobie wyobrazić, co by się działo, gdyby prędkość światła była mniejsza – porównywalna do ziemskich. Wtedy umówienie się na randkę lub przyjęcie punktualne do szkoły graniczyłyby z cudem. Jeśli np. chłopak umówiłby się z dziewczyną, że spotkają się dokładnie w tym momencie, kiedy na wieży wskazówka wskaże 12, to ta informacja nic nie musiałaby znaczyć. Chłopak czekałby pod wieżą, aż ta chwila nadejdzie, a dziewczyna jadąc autobusem, widziałaby, że ta chwila jeszcze nie zaszła lub odwrotnie.

MT: Niesamowite, rzeczywistość.

TS: A to dopiero początek naszej przygody z teorią względności. O następnych, równie niesamowitych doświadczeniach myślowych, ich konsekwencjach i potwierdzających je doświadczeniach opowiemy sobie jednak następnym razem. Zapraszam! ●

Rozmawiała Wisława Karolewska

2

