

Teoria względności dla humanistów

Wstęp

Teoria względności Einsteina jest jednym z najciekawszych zjawisk współczesnej nauki i cywilizacji. Prawie każdy o niej słyszał, wzór $E = mc^2$ jest najstojniejszym wzorem fizyki w ogóle, a w świadomości przeciętnego zjadacza wyrobów piekarniczych teoria ta zbliża się w równym stopniu do prawdziwej wiedzy, jak do magii i metafizyki. Jednak, mimo tak wielkiej popularności medialnej teorii Einsteina, rzadkością są osoby które znają jej podstawy. Dlaczego? - zapewne większość ludzi nie wierzy, aby kiedykolwiek mogli zrozumieć teorię względności. Słynna jest przecież anegdota o pytaniu skierowanym do Einsteina: „czy to prawda, że tylko dwie osoby na świecie rozumieją teorię względności?” – ten miał odpowiedzieć – „a kto jest tym drugim?...”.

Teoria Einsteina składa się z dwóch części: **szczególnej teorii względności** i napisanej parę lat później **ogólnej teorii względności**. I o ile ta druga teoria jest rzeczywiście bardzo trudna matematycznie, to szczególną teorię względności jest w stanie opanować w miarę zdolny uczeń ogólniaka. Prawdą jest też, że sam Einstein musiał uznać sprawność innych uczonych w posługiwaniu się jego aparatem matematycznym jego teorii (a wielu przypadkach nawet wyższą), ponieważ okazało się, że wynikające z ogólnej teorii względności modele kosmologiczne zostały niezależnie rozwinięte w sposób, który zadziwił samego twórcę.

Na czym polega „względność”?

Termin ten odnosi się do sytuacji gdy to samo zjawisko jest obserwowane z dwóch (przynajmniej dwóch, bo może i więcej) różnych pozycji, miejsc, **punktów widzenia** (w fizyce mówimy o dwóch różnych „**układach odniesienia**”) i gdy powstaje problem **uzgodnienia** jak te punkty widzenia do siebie się odnoszą. Coś jest względne, gdy przy zmianie punktu odniesienia, zmienia się także sposób widzenia zdarzeń, sytuacji.

Np. fakt słabych wyników ucznia w szkole inaczej wygląda z punktu widzenia nauczyciela, inaczej ucznia, a jeszcze inaczej rodzica. Czyli: sam fakt problemów w nauce jest niezmienny, ale **widzenie tego faktu** jest dość często różne - względne.

Powstaje zatem zasadniczy problem: **jak uzgodnić** ze sobą różne punkty widzenia (w fizyce obserwacje prowadzone w dwóch układach odniesienia)? Lub w innym ujęciu można by problem postawić tak: **jaką procedurę zastosować, aby poznać i porównać punkt widzenia drugiej strony?**

Owo uzgadnianie poglądów pomiędzy ma w istocie dwie warstwy, które dość mylą się części osób:

pierwsza to **warstwa prawdy i fałszu, pomyłek, przeoczeń i błędnych interpretacji**

druga to **obiektywna względność odniesień** – tutaj nie mówimy już o pomyłkach, czy celowym zakłamaniu sprawy. Po prostu – często jest tak, że po zmianie układu

odniesienia rzeczy w sposób naturalny i prawdziwy zaczynają być inne.

Układy odniesienia

Układ odniesienia jest podstawowym pojęciem związanym z teorią względności. Wszystkie rozważania tej teorii wiążą się z podstawowym pytaniem:

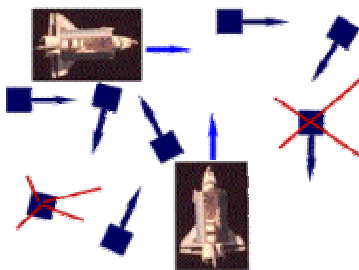
Jak ten sam zestaw zdarzeń jest opisywany **w różnych** układach odniesienia?

Mówiąc inaczej - jak dokonać **transformacji** współrzędnych przestrzennych i czasowych zdarzeń.

W fizyce przyjmowana jest zasada (będąca jednym z założeń teorii względności, ale nie tylko jej), że:

Nie ma wyróżnionych układów odniesienia.

Co to oznacza? – wyobraźmy sobie, że jest sobie obszar w kosmosie, w którym latają sobie beładnie atomy pierwiastków promieniotwórczych. Ta chmura uranu, radu, i innych atomów z jądrami gotowymi do rozpadu nie jest związana z żadną gwiazdą, galaktyką ani układem gwiazdowym – ot dryfuje sobie przez niezmiernie otchłanie wszechświata. Co jakiś czas któreś z jąder atomowych rozpada się - wypromieniowuje cząstkę alfa i zamienia się w inny atom, zaś fakt, a z nim czas i miejsce tego rozpadu jest rejestrowany przez obserwatorów w wałęsających się tu i ówdzie rakietach (na rysunku są dwie takie rakiety – A i B, prędkości rakiet i cząstek są zaznaczone niebieskimi strzałkami).



Pilot każdej z rakiet może zarejestrować ten sam rozpad inaczej – po pierwsze w innej odległości od rakiety, atom mógł też poruszać się z różną prędkością względem każdej z rakiet.

Powstaje pytanie:

pilot której rakiety widzi ten świat rozpadów promieniotwórczych bardziej „prawdziwie”?

- ten z rakiety zielonej, czy z niebieskiej?

- myślę, że jeśli ktoś nie ma jakichś bardzo sprecyzowanych preferencji kolorystycznych, to nie znajdzie argumentu przemawiającego na za wyróżnieniem którejś z rakiet, czy któregoś z pilotów. Dlatego uznajmy jako fakt - pilot każdej

rakiety obserwuje otoczenie ze swojego układu odniesienia jednakowo „prawdziwie”, choć każdy inaczej.

A to jest właśnie **niezależność od układu odniesienia** - żadna z rakiet nie jest w swoim opisie rzeczywistości faworyzowana ani dyskryminowana. Oczywiście nie tylko rakiety nie są wyróżniane, bo tak samo dobry będzie opis sytuacji w chmurze radioaktywnej sporządzony przez mieszkańca Ziemi, ufoludka z Marsa, czy przewodniczącego związku planet w układzie Syriusza. Po prostu każdy ma jednakowe „prawo” aby ten świat widzieć po swojemu. Jednocześnie żaden z nich nie ma prawa narzucać swojego układu odniesienia innym – zakładamy, że prawidłowo wykonane w jakimś układzie pomiaru **są w tym układzie prawdziwe**.

Podobną sytuację względności mamy dla dwóch obserwatorów patrzących na samochód wiozących młodą parę. Balonik przyczepiony do samochodu nowożeńców najczęściej w czasie jazdy drga i podskakuje jak szalony. Jednak inaczej widzi tę sytuację przechodzień, a inaczej kierowca samochodu. Dla przechodnia balonik drga **i jedzie**, a dla kierowcy balonik **tylko drga**. I prawda obu obserwatorów **jest obiektywna** (w tym sensie, że nikt nie popełnia błędu) – bo rzeczywiście z zewnątrz patrząc to balonik przesuwają się, a ze środka patrząc – nie. Czyli chociaż opisy obu obserwatorów różnią się, to **obaj mają rację – ruch jest względny**.

Tutaj warto wspomnieć o psychologicznej cesze większości ludzi – otóż mamy wrodzoną skłonność uznawać, że to co „było od dawna” i co jest „duże” jest bardziej prawdziwe. Gdy myślimy o „prawdziwym” kapuśniaku to zapewne takim jaki robiła mama i babcia, gdy się zastanawiamy kto ma rację, jako argument pada, że tak „wszyscy” uważają (wszyscy, czyli „dużo” ludzi). I mało kto zastanowi się, że kilkaset lat temu „wszyscy” mieli całkowicie inne poglądy na wiele spraw, a za lat sto jacyś inni „wszyscy” też będą myśleli odmiennie.

Podobnie, gdy myślimy o prędkości lecącej muchy, to oczywiście mimowolnie będziemy odnosić ją do podłoża, czyli wielkiej Ziemi, a nie do innej, poruszającej się obok, muchy, czy jadącego rowerzysty. Podświadomie uważamy, że prędkość muchy oceniana względem Ziemi jest „prawdziwa” a względem innej muchy – już nie. „Coś” duże, stabilne w naszym umyśle staje się w sposób naturalny poziomem odniesienia (naturalny oznacza tu jednak także „mimowolny”, „niezauważalny”).

W odróżnieniu od psychologii, fizyka jest bardziej „sprawiedliwa” – zakłada, że faworyzowanie wielkich układów odniesienia nie ma podstaw. Trzeba sporej pracy umysłowej aby uwolnić się od dominacji dużych i stałych obiektów i zacząć swobodnie obserwować świat z dowolnie wybranego poziomu.

Zasada względności

Jak napisano w części o układach odniesienia, wiele rzeczy w różnych układach odniesienia jest różnych, wiele wielkości będzie miało wartości zależne od tego z poziomu jakiego układu są mierzone. Pojawia się istotne pytanie: Czy wszystko jest względne? Czy dowolne elementy sytuacji mogą być różne? Odpowiedź na nie daje m.in. Einsteinska **zasada względności**.

Postuluje ona, że:

Dowolne prawo przyrody ma jednakową postać we wszystkich inercjalnych układach odniesienia.

Uczniom szkoły, chciałbym też przy okazji przypomnieć, że odwołaliśmy się przed chwilą do pierwszej zasady dynamiki Newtona, która głosi, że gdy nie ma działania siły zewnętrznej, wtedy ciała poruszają się ze stałą prędkością (może przyda się na sprawdzianie).

Jak rozumieć zasadę względności?

Ustaliliśmy wcześniej, że te same zdarzenia mogą w różnych układach odniesienia być inaczej widziane. Jednak, czy w związku z tym zmieniać się mogą również **prawa** fizyki? Odpowiedź Einsteina brzmi: NIE. Liczby w równaniach fizyki będą różne, ale ostatecznie równanie musi być zachowane. Nie ma zatem takiego układu odniesienia, w którym przestaje obowiązywać prawo grawitacji, lub w którym siła z tego prawa wynikająca nagle staje się zależna nie od kwadratu lecz od sześciangu odległości (jednak wartość tej siły i same odległości mogą się w różnych układach odniesienia różnić).

Zatem, wbrew naiwnym poglądom, Einstein nie twierdził, że „wszystko” jest względne. Faktem jest natomiast, że zjawiska obserwowane z różnych układów odniesienia mogą być różnie opisywane.

Światło i jego prędkość

Czym jest światło?

Współczesna fizyka nie wyjaśnia jeszcze wielu elementów fenomenu światła - co prawda wiemy, że ma ono dwoistą naturę: korpuskularno - falową, wiemy też, że przenosi najważniejsze (z punktu widzenia naszego obrazu świata) oddziaływanie - oddziaływanie elektromagnetyczne i wiemy, że prędkość światła w próżni jest bardzo ważną ważną stałą fizyczną. Jednak wciąż dla badaczy światło jest obiektem zagadkowym.

Światło jako nośnik informacji

Z punktu widzenia teorii względności światło jest istotne jeszcze z jednego powodu, nie wynikającego bezpośrednio z fizycznych właściwości. Jest nim fakt, że światło (a bardziej ogólnie - fala elektromagnetyczna) jest **nośnikiem informacji**.

Dla zwykłych ludzi (nawet nie fizyków) informacyjna rola światła jest dość oczywista. Przecież najczęściej właśnie za pomocą tego medium dowiadujemy się o zajściu określonych zdarzeń, jako że normalny, zdrowy człowiek większość informacji o świecie czerpie właśnie za pomocą narządu wzroku.

Jednak w odniesieniu do teorii względności fakt przenoszenia informacji za pomocą światła ma znaczenie o wiele bardziej fundamentalne - stał się on podstawą dla nowej wizji czasu i przestrzeni. Można powiedzieć, że światło poprzez swój fakt przenoszenia informacji niejako "stwarza przestrzeń i czas".

W rozważaniach relatywistycznych umiejscowienie przestrzenne jakiegoś obiektu

poznajemy po czasie w jakim dociera od tego obiektu światło (a stąd możemy łatwo obliczyć drogę jaką przebył sygnał).

$$X \text{ wysłania sygnału} = X \text{ odbioru sygnału} + \text{droga jaką przebył sygnał}$$

Podobnie czas zajścia zdarzenia wysłania sygnału świetlnego jest rejestrowany jak czas odbioru sygnału pomniejszony o czas lotu tegoż sygnału do odbiornika.

$$t \text{ wysłania sygnału} = t \text{ odbioru sygnału} - t \text{ lotu sygnału}$$

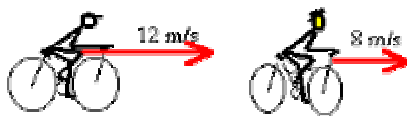
Większość wniosków szczególnej teorii względności została wyprowadzona ze stosunkowo prostych przeliczeń czasu lotu sygnałów świetlnych.

Dodatkową okolicznością, która w ogromnym stopniu zaważyła na powstaniu teorii względności było odkrycie przez fizyków amerykańskich - Michelsona i Morleya - bardzo niezwykłego faktu związanego z rozchodzeniem się światła. Okazało się bowiem, że ruch światła przeczy dość fundamentalnemu prawu fizyki klasycznej - prawu dodawania prędkości.

Klasyczne prawo dodawania prędkości

W naszym normalnym świecie obowiązuje tzw. **klasyczne prawo dodawania prędkości**. Np. jeżeli Staś jedzie na rowerze z prędkością 8 m/s, a goni go Jaś z prędkością 12 m/s, to prędkość Jasia względem Stasia wynosi 4 m/s.

Prędkość Jasia względem Stasia jest różnicą ich prędkości względem podłoża.



Prędkość względna wynosi 4 m/s

W przypadku gdyby Jaś jechał naprzeciw Stasia, to ich względna prędkość byłaby sumą prędkości względem podłoża i wynosiłaby 20 m/s. Z tą prędkością Jaś zbliża się do Stasia, a Staś do Jasia.

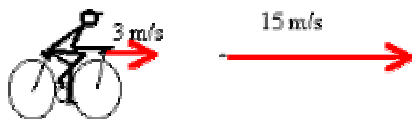
Prędkość Jasia względem Stasia jest teraz sumą ich prędkości względem podłoża.



Prędkość względna wynosi 20 m/s

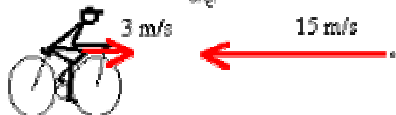
Podobna sytuacja miałaby miejsce, gdyby Jaś próbował dogonić muchę poruszającą się z prędkością 15 m/s:

Mucha oddala się od Jasia z prędkością 12 m/s.



W przypadku gdy mucha zbliża się do Jasia prędkość względna wyniesie 18 m/s:

W tej sytuacji mucha zbliża się do Jasia z prędkością 18 m/s, ponieważ prędkości muchy i Jasia względem podłoża sumują się.

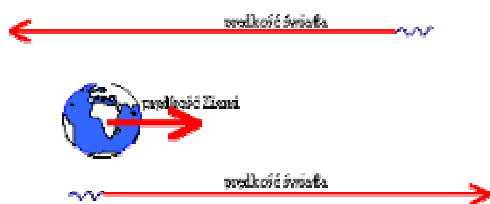


A co klasyczne prawo dodawania prędkości ma wspólnego ze światłem?

- Otóż okazuje się, że światło **nie podlega**, opisanemu wyżej, klasycznemu prawu dodawania prędkości. Tak jest i już – stwierdzono to doświadczalnie (patrz dalej Doświadczenie Michelsona - Morleya).

Doświadczenie Michelsona – Morleya

W słynnym doświadczeniu wykonanym przez fizyków amerykańskich – przez Michelsona i Morleya - próbowano sprawdzić prędkość rozchodzenia się światła w układzie związanym z Ziemią.



Jak to wynika z klasycznego prawa dodawania prędkości, ponieważ nasza planeta okrąża Słońce z prędkością 30 km/s, to powinien dać się zauważyć efekt zmiany prędkości światła względem Ziemi w sytuacjach gdy:

światło porusza się zgodnie z ruchem Ziemi
światło porusza się przeciwnie do ruchu Ziemi

Światło, "puszczone" ze źródła w eter (bo przyjmowano, że światło rozchodzi się w hipotetycznym ośrodku zwanym "eterem") powinno poruszać się wolniej, gdy Ziemia zawierająca odbiornik porusza się zgodnie z ruchem eteru (prędkości się odejmują), a szybciej, gdy porusza się przeciwnie (prędkości się dodają). Można powiedzieć, że analogiem muchy z przykładu z Jasiem jest teraz światło, rowerzystą - Ziemia.

Powstawał jednak pewien problem do rozstrzygnięcia – w którą stronę porusza się eter?

- czy „wieje” w którąś stronę, czy jest nieruchomy względem Słońca (a może względem Galaktyki)?

Pierwotnie pomyślane doświadczenie zaprojektowane przez Michelsona (odbyło się w roku 1881) miało właśnie wykryć ów ruch eteru - jako różnicę w odbieranej prędkości światła (powinna się ona zmieniać dla różnych kierunków ruchu Ziemi i różnych kierunków ustawień układu doświadczalnego). W sześć lat później doświadczenie zostało powtórzone przez Michelsona wspólnie z Morleyem. W każdym przypadku jego wynik był jednak absolutnie zaskakujący – bez względu na kierunek ruchu Ziemi, porę dnia i roku, kierunek ustawienia ramion interferometru - odczyty wykazywały na to samo – że prędkość światła względem Ziemi ma zawsze niezmienną wartość.

Prowadziło to do absurdalnego (z punktu widzenia mechaniki klasycznej) wniosku, że

Wykrywana prędkość światła względem Ziemi jest niezależna od tego, czy jest skierowana zgodnie, czy przeciwnie względem prędkości naszej planety.

Ale ponieważ doświadczenie było wielokrotnie powtarzane w różnych warunkach i

- czy to poruszając się naprzeciw światłu,

- czy zgodnie z kierunkiem jego prędkości

więc nie pozostawało nic innego jak z pokorą przyjąć jego wynik.

Czyli stwierdzić fakt, że prędkość światła dla każdego układu odniesienia ma dokładnie tę samą wartość:

$c = 299792458 \text{ m/s}$ – w przybliżeniu 300 tys. km/s.

Mówiąc obrazowo, żebyśmy nie wiem jak szybko „gonili” światło, to ono i tak będzie oddalało się od nas z tą samą prędkością i żebyśmy nie wiem jak chcieli go przyspieszyć poprzez zbliżanie się do niego, to ono i tak będzie względem nas poruszało się z prędkością c .

Dzięki temu doświadczeniu okazało się dodatkowo, że koncepcja eteru jest pozbawiona podstaw fizycznych – eteru nie ma, a światło nie rozchodzi się "w czymś", tylko po prostu "względem układu odniesienia".

Prędkości światła nie da się przekroczyć

Z doświadczenia Michelsona Morleya wypływa także kolejny ważny wniosek (jeden z postulatów teorii względności Einsteina):

Prędkość światła jest największą możliwą prędkością względną między dwoma obiektami.

Lub inaczej:

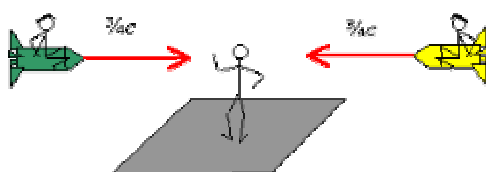
Nie ma na świecie obiektu, który by się mógł oddalać od obserwatora szybciej niż światło.

No dobrze... – ktoś powie – ale wyobraźmy sobie taką sytuację: Jedna rakietą porusza się z prędkością $\frac{3}{4}c$ w prawo, a druga z prędkością $\frac{3}{4}c$ w lewo. To przecież jedna od drugiej oddala się z prędkością $1,5c$...

Otóż nie. Prędkość względna jednej rakiety wobec drugiej jest **mniejsza** niż c , bo ruch obiektu materialnego nie może odbywać się z prędkością większą niż prędkość światła.



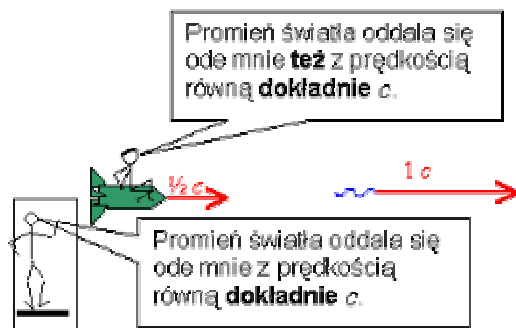
W tej sytuacji każda raketa oddala się od obserwatora na platformie z prędkością $\frac{3}{4}c$. Jednak **względem siebie** rakety nie mogą przekroczyć prędkości światła c .



Tutaj także - rakety **względem siebie** poruszają się z prędkościami mniejszymi od c .

A więc np.

Jeśli skądś wysłano promień światła, a następnie w ślad za tym promieniem wyśle się obserwatora poruszającego się z prędkością równą połowie prędkości światła, to i tak względem obserwatora prędkość promienia będzie ciągle równa c .



Promień światła oddala się ode mnie **też** z prędkością równą **dokładnie** c .

Promień światła oddala się ode mnie z prędkością równą **dokładnie** c .

Jak to jest możliwe?

- Obserwator w układzie poruszającym się **inaczej mierzy czas** i **inaczej mierzy odległość** między tymi samymi **zdarzeniami** (np. pomiędzy momentem osiągnięcia przez światło początku i końca określonego odcinka). I jak podzieli on *swoją drogę dla światła* przez *swój czas dla światła*, to z tych liczb wyjdzie dla światła zawsze prędkość równa c , bez względu na to z jaką prędkością porusza się obserwator.

Transformacje, czyli uniwersalny tłumacz dla zjawisk w różnych układach odniesienia

W sytuacji gdy mamy dwa układy odniesienia pojawia się problem (a z postawienia tego problemu wynika właśnie teoria względności):

Jak odnieść wyniki pomiarów wykonane w jednym układzie do analogicznych pomiarów wykonanych w drugim?

Transformacje w fizyce

W fizyce analogiczna sytuacja jest zazwyczaj prostsza, bo istnieje aparat matematyczny, który po podstawieniu liczb do odpowiednich równań pozwala na ściśle ustalenie co zmierzy obserwator w innym układzie odniesienia. Ten układ równań tłumaczący świat jednego obserwatora, na świat innego, nazywany jest **transformacją**. Dla układów inercjalnych (przypominam jeszcze raz – układów, które same nie poruszają się z przyspieszeniem) rozważane są zazwyczaj dwie transformacje:

Transformacja Galileusza – opisuje świat na sposób tradycyjny, czyli przed wprowadzeniem TW. W transformacji Galileusza (zgodnej z mechaniką newtonowską) czas i przestrzeń są traktowane jako jednolite, niezmiennie, niezależne od układu odniesienia. Tutaj czas jaki upływa między dwoma zdarzeniami jest niezależny od tego z poziomu jakiego układu odniesienia jest wyznaczany - powinien mieć tę samą wartość dla obserwatora spoczywającego, poruszającego się z ogromną prędkością, czy znajdującego się w silnym polu grawitacyjnym. Podobnie jest z odległością między dwoma punktami - jeśli w jednym układzie odległość ta wynosi x metrów, to tyle samo metrów odległość ta powinna mieć w dowolnym innym układzie odniesienia.

Transformacja Lorentza (Hendrik Lorentz opracował wzory tej transformacji; później skorzystał z nich Albert Einstein) – ujmuje zjawisko szerzej, z uwzględnieniem efektów relatywistycznych. Z tej to transformacji można wyprowadzić większość „bulwersujących” efektów teorii względności.

Zdarzenie - pojęcie podstawowe dla rozważań związanych z teorią względności

Podstawowym pojęciem obu transformacji jest **zdarzenie**.

Jest to o tyle novum, że transformacje zrezygnowały do pewnego stopnia z posługiwaniem się pojęciem *obiektu*. Zdarzenie tym różni się od obiektu, że jest dokładnie określone **w przestrzeni i w czasie**. Konkretnie – każde zdarzenie dzieje się w jednej **chwili** i w **jednym punkcie w przestrzeni**. Takie podejście oszczędza zbędnych dywagacji na temat rozmiarów obiektu i czasu jego istnienia. Właściwie można powiedzieć, że zdarzenie reprezentuje jeden **punkt czasoprzestrzenny**. Natomiast obiekt jest najczęściej dość nieokreślony pod jakimś względem - po pierwsze ma zazwyczaj rozmiary, a poruszając się różne części obiektu w różnych momentach osiągają ten sam punkt przestrzeni. Dlatego wygodniej jest widzieć świat teorii względności przez pryzmat zdarzeń, a nie obiektów świata materii.

Opisywanie świata za pomocą zdarzeń uświadamia nam jeszcze jeden ważny element naszego widzenia rzeczywistości – **wszystko co do nas dociera jest związane z jakimś zdarzeniem, jakąś przemianą**. Mówiąc konkretnie - gdyby tuż

obok naszego ucha przeleciał obiekt o masie większej niż słońce, ale nic by z tego nie wynikło – nie powstałoby światło, ani pole sił mogące nas o tym poinformować, a dodatkowo nie zmieniłby się żaden element otoczenia, to dla nas i tak sytuacja byłaby dokładnie taka, jakby nic nie przeleciało. Właściwie, to bez względu na to, co się wokół nas rzeczywiście dzieje, my mamy dostęp wyłącznie do tych rzeczy, które się nam objawiają przez jakieś **wykrywalne zdarzenia**.

Ale wróćmy od rozważań zmierzających w kierunku filozofii, do samych transformacji Galileusza i Lorentza...

Dla małych prędkości układów odniesienia (małych w porównaniu z prędkością światła wynoszącą ok. 300 tys. km/s) wyniki produkowane przez obie transformacje są prawie takie same (dla zwykłych życiowych prędkości różnica jest mniejsza niż miliardowe części procenta). Różnica jaka pojawia się pomiędzy przewidywaniami transformacji Galileusza i transformacji Lorentza ujawnia się dopiero dla prędkości porównywalnych z prędkością światła. Wtedy to ujawniają się następujące zadziwiające efekty transformacji Lorentza:

wydłużenie czasu skrócenie długości

Wszystkie efekty transformacji Lorentza wynikają z faktu niezależności prędkości światła od układu odniesienia, będącej wnioskiem z doświadczenia Michelsona - Morleya. Bo skoro suma dwóch prędkości różnych od zera daje w efekcie jedną z tych prędkości, to oznacza, że powinniśmy zrewidować nasze wyobrażenia na temat podstawowych składników pojęcia prędkości (przypominam, że prędkość obliczamy dzieląc drogę przez czas) - drogi (przestrzeni) i czasu.

Wszystko wynika z transformacji

W dalszych rozważaniach przedstawione zostały wnioski wynikające z teorii względności. Wszystkie one wynikają z faktu dokonania transformacji (w tym wypadku transformacji Lorentza) określonych zdarzeń z jednego układu odniesienia do drugiego (najczęściej z układu spoczywającego, do układu w ruchu). Okazuje się np., że tak zadziwiający efekt wolniejszego upływu czasu w układach poruszających (patrz rozdział o dylatacji czasu) wynika tylko z tego, że czas taki jest inaczej "widoczny", gdy jest obserwowany w ruchu. Podobnie jest z pozostałymi zjawiskami teorii względności.

Dylatacja czasu.

Po podstawieniu do równania transformacyjnego danych dla zdarzeń **obserwowanych z poruszającego się układu odniesienia**, okazuje się że te same zjawiska są widziane tak, jak by zachodziły wolniej. Mówimy więc o **wydłużeniu czasu** w układach poruszających się. Np. jeśli będziemy obserwować zegarek umieszczony w rakiecie poruszającej się z dużą prędkością, to stwierdzimy, że zegarek ten spóźnia się względem identycznego, znajdującego się na naszym ręku. Zjawisko to nie wynika w żaden z sposób z wady zegarka, czy błędów odczytu – tak po prostu jest, że **widziany w obiekcie poruszającym się czas płynie wolniej**. Chcę tu zwrócić uwagę na stwierdzenie „widziany w poruszającym się obiekcie” –

należy to rozumieć w ten sposób, że jeśli my "zaglądamy" do obszaru znajdującego się w ruchu, to zachodzące tam zdarzenia zachodzą dla nas wolniej, niż obserwowane bezpośrednio w tym układzie. Dla obserwatora w środku poruszającego się układu wszystko jest, tak jak było wcześniej – czyli zegarek chodzi zgodnie z jego normalnymi konstrukcyjnymi możliwościami.



Uzasadnienie zjawiska wydłużenia czasu jest w rozdziale...

Czy zaobserwowano gdzieś zjawisko wydłużenia czasu?

Zjawisko wolniejszego upływu czasu w układach poruszających się jest powszechnie obserwowane przez fizyków badających cząstki elementarne w akceleratorach. Większość tego typu cząstek rozpada się samorzutnie po pewnym czasie. Jednak cząstki poruszające się z dużymi prędkościami mają wyraźnie dłuższy czas życia. I wartość tego wydłużenia jest zgodna z wzorami relatywistycznymi.

Zjawisko dylatacji czasu zaobserwowano też bardziej bezpośrednio. Super dokładne zegary atomowe wysłane w jednej z raket spóźniały się dokładnie w takim stopniu jak przewiduje to teoria względności.

Jak to zrozumieć i pokazać "machając rękami"?

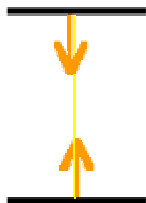
Słowo „zrozumieć” oznacza najczęściej wytworzenie sobie w umyśle określonego **obrazu**, który ilustruje mechanizm działania jakiegoś prawa. Rzeczywistość akademicka nie przejmuje się tym wyobrażeniem rozumienia – fizycy, gdy chcą coś wykazać, wyciągają kredę a następnie maczkiem zapisują kilkanaście stron tekstu matematycznego najeżonego całkami, logarytmami i innymi atrakcjami z analitycznego piekła rodem. Z kolei dla mnie (a chyba nie tylko dla mnie) najlepszym sposobem pokazania czegoś jest przekonanie delikwenta bez wzorów – najlepiej za pomocą prostych słów i gestów, a w fizyce – paru narysowanych obrazków. Powyższą metodę tłumaczenia umownie określam jako „metodę machania rękami”.

Niniejszym więc, na przykładzie prostych rozważań geometrycznych, postaram się wyjaśnić dlaczego z pewnych prostych założeń wynika, że czas w układzie poruszającym się musi płynąć wolniej oraz, że długości ulegają skróceniu w kierunku ruchu.

Zastanówmy się jak w istocie mierzymy czas. Przypomnienie sobie zasad działania większości zegarów pokazuje, że najczęściej pomiar ten jest oparty o jakieś jednostajnie zachodzące zjawisko. Pierwszymi zegarami były klepsydry przesypujące

piasek lub przelewającymi wodę, później wahadła, a dopiero ostatnio owym ruchomym medium stały się drgania elektryczne w zegarkach kwarcowych.

My, bardziej tradycyjnie, posłużymy się klepsydrą. Jednak będzie to klepsydra unowocześniona – klepsydra świetlna, w której elementem „ruchomym” jest światło.

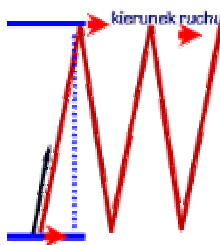


Wyobraźmy sobie, że mamy dwa idealnie odbijające zwierciadła, które uwięziły promień światła odbijający się między nimi. Dzięki prostokątnemu zwierciadeł względem ruchu promienia, będziemy mogli mierzyć czas – narasta on wraz z ilością odbić promienia świetlnego, czyli „odwróceń” naszej klepsydry. Np. jeśli odległość między zwierciadłami wynosi 3 m, to czas upływający pomiędzy odbiciami wynosi jedną setną mikrosekundy (prędkość światła to 300 tys. km/s, a więc na przebycie trzech metrów światło potrzebuje właśnie jedną stumilionową sekundy). Mierząc ilość odbić światła od zwierciadeł będziemy mogli precyzyjnie ustalić upływ czasu - np. tysiąc odbić, będzie wyznaczało czas 1/100 s, a milion odbić, to już 10 s.

Zaletą tego zegara jest zastosowanie światła, którego prędkość jest stała we wszystkich układach odniesienia. Dlatego łatwo będzie nam porównywać wskazania tego zegara dla różnych obserwatorów.

Klepsydra w ruchu

Zastanówmy się teraz jakie będą wskazania naszej klepsydry świetlnej, jeśli będziemy obserwować ją w ruchu. Zegar ustawimy prostopadle do kierunku ruchu, aby nie przeszkadzało nam dodatkowo ew. skrócenie długości jakie występuje dla ustawienia zgodnego prędkością.

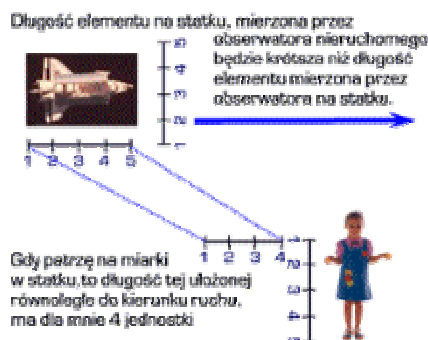


Z rysunku widać, że światło obserwowane w ruchu przebywa nie tylko drogę prostopadłą do drogi pomiędzy zwierciadłami, ale uzyskuje także składową wzdłuż kierunku ruchu. Obrazowo mówiąc: bieg promieni rozciąga nam się jak harmonia, ponieważ kolejne punkty, które odwiedza światło przesuwały się dla obserwatora ruchomego. Dlatego ostatecznie musi ono przebyć nieco dłuższą drogę niż dla zegara spoczywającego – przecież teraz porusza się po przekątnej prostokąta w którym zawiera się obraz jednego odbicia promienia. Ale przebycie dłuższej drogi przy tej samej prędkości (przypominam, że wartość prędkości światła jest stała we

wszystkich układach odniesienia), oznacza **dłuższy czas** jej przebywania. Dlatego czas pomiędzy poszczególnymi odbiciami promienia jest dłuższy w układzie poruszającym się niż spoczywającym.

Skrócenie długości.

Podobnym zjawiskiem do wydłużenia czasu jest skrócenie długości. Oznacza ono, że miarka o długości 1 metra obserwowana wtedy gdy koło nas przelatuje, jest dla nas krótsza, niż gdyby leżała sobie spokojnie obok. Efekt ten zachodzi jednak **tylko w kierunku ruchu** – gdyby miarka metrowa z naszego przykładu była ustawiona prostopadłe do prędkości, to zarówno w układzie w którym spoczywa, jak i w tym w którym się porusza – cały czas będzie miała dokładnie 1 metr. Wynika z tego np. że przelatująca kula zamienia się dla obserwatora widzącego ją w ruchu w elipsoidę.



Czy skrócenie długości zaobserwowano doświadczalnie?

Przeprowadzenie doświadczenia potwierdzającego fakt skrócenia długości w układach poruszających się jest niezwykle trudne. Mierzenie długości obiektów w ruchu musi odbywać się w oparciu o precyzyjne pomiary odbitych sygnałów świetlnych, a więc i tak nie stanowiłoby prostego, bezpośredniego potwierdzenia. Jak do tej pory nie są znane fizycznie zrealizowane doświadczenia potwierdzające lorentzowskie skrócenie długości. Zjawisko to jest jednak na tyle silnie związane z innymi efektami teorii względności (a w większości przypadków są one bardzo dobrze potwierdzone doświadczalnie), że świat nauki nie poddaje faktu skrócenia długości w wątpliwość.

Skrócenie długości - wytłumaczenie

Skrócenie długości w pewnym stopniu częściowo wynika z faktu spowolnienia czasu. Jeśli gdzieś odległość między punktami będziemy mierzyć czasem lotu promienia świetlnego, to krótszy czas lotu, w innym układzie odniesienia, automatycznie będzie odpowiadał mniejszej odległości.

Jednak dlaczego skrócenie długości występuje tylko dla kierunku zgodnego z kierunkiem ruchu? – przecież światło rozchodzi się z jednakową prędkością w każdą stronę... Czyżby czas miał „kierunek” i był inny dla promieni równoległych, a inny dla

prostopadłych względem prędkości obiektu?

Wyjaśnienie tych problemów nie jest proste, dlatego postaram się przedstawić bardziej "porządne" rozumowanie, oparte o rozważania geometryczne.

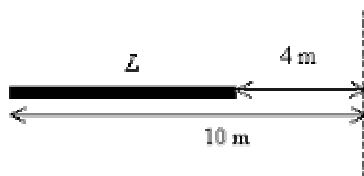
Wytłumaczenie to jest nieco skomplikowane, a chociaż nie operuje wzorami i wymagane umiejętności matematyczne sprowadzają się do zrozumienia zasady dodawania długości odcinków, to trzeba trochę nad nim "przysiąść".

Kto się nie boi – niech czyta następujący niżej rozdział.

Precyzyjne okazywanie zjawiska skrócenia długości w układzie poruszającym się jest bardziej skomplikowane, niż to ma miejsce w przypadku dylatacji czasu.

Najpierw ustalmy na czym polega **miarę długości**. Sprawa jest o tyle skomplikowana, że dla bardzo szybko poruszających się obiektów nie sposób jest przyłożyć miarki aby odczytać ile dany odcinek ma metrów, czy centymetrów. Trzeba więc posłużyć się inną metodą. Einstein zaproponował tu wykorzystanie światła (wciąż to światło...). Jeżeli obiekt spoczywa, to po prostu wyznaczamy czasy w jakich promień świetlny leci do nas od jednego i drugiego końca odcinka. Gdy odcinek się porusza, to złapanie promienia nie jest też takie proste – przecież cały czas początek i koniec mierzonego odcinka zmieniają położenie i nie bardzo wiadomo, które punkty ze sobą porównywać.

Zajmijmy się jednak najpierw tym prostszym przypadkiem. Wiadomo jeśli w linii prostej do początku odcinka jest 4m, a do końca 10m to długość odcinka będzie równa 6m.



Widać z rysunku, że długość odcinka musi być równa $L = 6$ m.

Można też wyznaczać odległości od końców odcinka mierząc odległości od środka odcinka:



Długość odcinka jest równa $L = 6$ m.

W przypadku odcinka w ruchu, wyznaczanie odległości jest trudniejsze, bo zarówno początek, jak i koniec odcinka bez przerwy się nam przesuwają. Dlatego niezwykle ważne jest, aby przypilnować tego, że położenia początku i końca trzeba wyznaczyć w tym samym czasie. Bo odległość między poruszającymi się punktami, wyznaczana w różnych momentach nie da nam na pewno dobrej długości odcinka.

Aby więc zagwarantować, określanie końców odcinka w tym samym czasie proponuję użycie następującej metody:

Do końców mierzonego odcinka przyczepimy zwierciadła.



Do tych zwierciadeł będziemy wysyłać promienie świetlne. Mierząc czas, po którym odbity promień wróci, będziemy mogli wyznaczyć odległość zwierciadła w momencie odbicia

Promienie świetlne będziemy wysyłać gdzieś z punktu położonego między zwierciadłami - tam będzie źródło sygnału radarowego sprzężone z detektorem, czyli z odbiornikiem promieni. Detektor będzie oczywiście wyposażony w zegar umożliwiający określenie **czas lotu** promieni świetlnych.



Aby zagwarantować, że odbicie od obu końców zajdzie **jednocześnie**, można postąpić tak: co niewielki ułamek sekundy wysyłane są promienie świetlne w obie strony. Każdy wysłany promień światła różni się minimalnie kolorem od poprzedniego. Później, gdy będziemy analizować światło odbite weźmiemy pod uwagę tylko te promienie, które wrócą **jednocześnie** i będą miały **ten sam kolor** (aby nie było sytuacji, w której od odebraliśmy jeden promień odbity od zwierciadła wcześniej, a drugi później, co jest możliwe gdyby punkty odbicia były w różnych odległościach od detektora). Zmierzony czas, po którym wysłane promienie wrócą po odbiciu będzie miernikiem długości odcinka – ponieważ każdy promień pokonuje swoją połowę odcinka 2 razy to znaczy, że wystarczy wymnożyć czas lotu dowolnego z dwóch promieni przez prędkość światła, aby dostać szukaną długość odcinka.

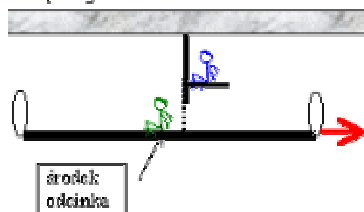
Wyobraźmy sobie teraz, że naszą długość naszego odcinka będzie mierzona w dwóch różnych układach odniesienia:

Pierwszy układ odniesienia, to układ na sztywno związany z odcinkiem. Odcinek w nim spoczywa.

Drugi układ odniesienia jest **w ruchu** względem odcinka, czy (co na to samo wychodzi) odcinek jest w ruchu względem niego

Uwaga: na tym, i następnych rysunkach, mierniczego związanego z układem spoczywającym względem odcinka będę oznaczał kolorem zielonym, a mierniczego obserwującego odcinek w ruchu – niebieskim.

Obserwator **zielony** jest „przyczepiony” do poruszającego się odcinka.
Obserwator **niebieski** obserwuje odcinek w ruchu, bo sam jest zawieszony do jakiegoś obiektu zewnętrznego.



Rozważmy teraz jak będzie zachodził pomiar długości w tych układach odniesienia.

1 układ, w którym odcinek spoczywa (zielony)

Tutaj sytuacja jest bardzo prosta – skoro nasz miernik odległości cały czas znajduje się dokładnie **w środku** odcinka, to promienie odbite będą miały identyczną drogę do przebycia i będą wracały jednocześnie.

Czas powrotu wysłanych promieni pomnożony przez prędkość światła da nam długość odcinka. Nie ma znaczenia, w którym momencie te promienie będą wysłane – byle tylko zawsze startowały ze środka odcinka - i tak wszystkie wysłane promienie tego samego koloru będą wracać jednocześnie.

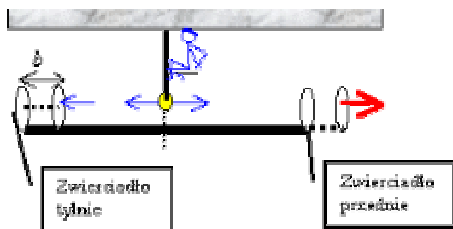
Oczywiście inaczej byłoby, gdyby nasz miernik znajdował się **nie** w środku odcinka, dlatego można powiedzieć, że fakt jednoczesnego przyjscia promieni odbitych jest jednocześnie wskaźnikiem ustawienia detektora w środku.



2. pomiar odległości odcinka poruszającego się (dla obserwatora niebieskiego)

Tutaj sytuacja jest znacznie bardziej **skomplikowana**. Dla obserwatora próbującego zmierzyć odcinek w ruchu, zwierciadła odbijające cały czas zmieniają swoje położenie. Przypadkowo wysłane promienie świetlne zapewne odbiją się od zwierciadeł w różnym czasie i dlatego nie dadzą nam informacji o długości odcinka.

Np. gdybyśmy próbowali dokonać pomiaru wysyłając promień w chwili, gdy mijają nas dokładnie środek odcinka, to jedno zwierciadło (na rysunku lewe) zdążyłoby się do momentu odbicia nieco przybliżyć do detektora (na rysunku o odcinek b). Drugie zwierciadło (prawe) miałoby za to czas, aby się oddalić. W efekcie promienie odbite nie wróciłyby jednocześnie do detektora, a my mielibyśmy odczyty położenia zwierciadeł dokonane **w różnym** czasie.



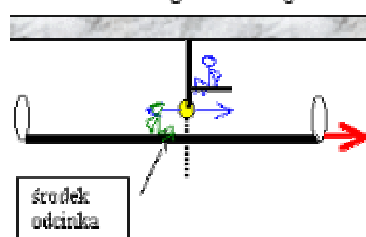
Dlatego aby zagwarantować, że odbicia od zwierciadeł będą następować **w tym samym czasie**, musimy zacząć wysyłać impulsy świetlne *szybko jeden po drugim*. Jeśli zaczniemy tak robić zaraz po tym jak detektor minie pierwszy koniec odcinka, to najpierw będą przychodzić impulsy odbite właśnie od przedniego zwierciadła (które oddala się od detektora), a dopiero po znacznie dłuższym czasie od zwierciadła tylnego. Jednak wraz z przesuwaniem się zwierciadeł czasy przylotu promieni będą

się stawać coraz bliższe sobie – pierwsze zwierciadło będzie się od detektora oddalać, a drugie przybliżać. W pewnym momencie jeden z tych czasów spełni nasz warunek **jednoczesnego** przyścia obu wysłanych promieni (zakładamy, że impulsy świetlne są wysyłane rzeczywiście bardzo często jeden po drugim) – i o ten właśnie przypadek nam chodzi. Zauważmy, że ów interesujący nas promień odbija się od obu zwierciadeł dokładnie w momencie, w którym środek odcinka mija obserwatora.

Następne impulsy będą oczywiście przychodziły rozsynchronizowane, bo przednie zwierciadło oddali się już dalej niż tylnie.

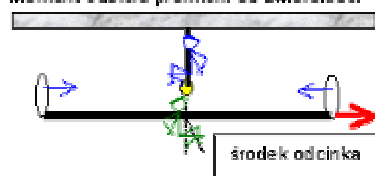
Zastanówmy się teraz nad sytuacją w dojdzie do naszego właściwego pomiaru – tzn. gdy promienie wysłane do obu zwierciadeł **jednocześnie** wrócą do detektora. Wysłanie owego kluczowego impulsu powinno nastąpić nieco **przed** momentem, w którym środek odcinka wraz z mierniczym zielonym mija detektor niebieski.

Moment wysłania impulsu przez detektor mierniczego niebieskiego



Dzięki temu, podczas lotu promienia zwierciadła przesunie się na tyle, że samo odbicie od nich nastąpi dokładnie w chwili, gdy środek odcinka i oba detektory znajdują się tym samym punkcie.

Moment odbicia promieni od zwierciadeł



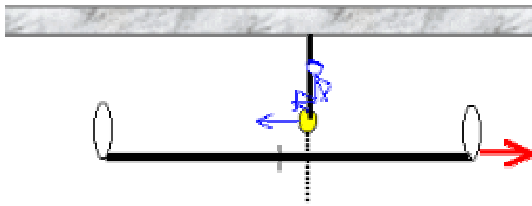
Teraz środek odcinka pokrywa się z położeniem obu detektorów.

W tym samym momencie, gdy promienie będą jednocześnie odbijane od zwierciadeł, oba detektory znajdują się w jednym punkcie. Wtedy impulsy trafią parami jednocześnie do detektora, a czas ich lotu będzie miarą długości odcinka.

Powiązanie ze sobą pomiarów zachodzących w obu układach

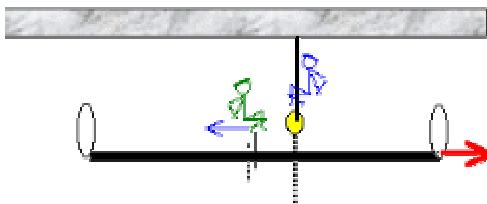
Teraz najtrudniejszy moment – musimy **powiązać ze sobą** odczyty czasów lotu promieni (a więc i długości odcinków) następujące w układzie, w którym odcinek porusza się (niebieskim) i w układzie względem odcinka nieruchomym (zielonym).

Chwila początkowa: detektor niebieski wysyła promień



W tym celu przyjrzyjmy się co dzieje się z impulsem świetlnym wysłanym przez detektor niebieski. W czasie lotu do zwierciadła tylnego, w pewnym momencie, mijają on środek odcinka (a więc także znajdujący się tam detektor zielony).

Promień światła dociera do detektora zielonego



Zwróćmy uwagę na jedną rzecz: lecący promień od detektora niebieskiego może służyć mierniczemu zielonemu „jak własny” – wystarczy tylko, że w momencie mijania go omawianego promienia dodatkowo wyśle bliźniaczy promień w przeciwnym kierunku do zwierciadła przedniego. Wtedy całość będzie mógł uznać także za swój pomiar długości. Tak więc od momentu minięcia środka odcinka przez lecący promień, pomiar czasu (a zatem i odległości) będzie dla obu mierniczych **wspólny**.

Cóż się dalej więc z owym wspólnym pomiarem dzieje?

najpierw impuls świetlny **dolatuje** do zwierciadła i oczywiście natychmiast **odbija się** od tegoż zwierciadła (w momencie odbicia pokrywają się ze sobą środek odcinka i położenie obu detektorów – tego mierzącego długość odcinka w ruchu i tego spoczywającego)

impuls **leci z powrotem**. W tym czasie detektor obserwatora zielonego związanego ze środkiem odcinka przesuwa się już za detektor mierniczego niebieskiego. impuls dociera z powrotem do detektora, z którego został wysłany (niebieskiego) – pomiar obserwatora patrzącego na odcinek z zewnątrz zostaje tu zakończony – tutaj więc kończy się wspólna część lotu promieni.

Jednak do tej chwili środek odcinka wraz z detektorem zielonym przesunął się na odległość od detektora niebieskiego równą tej, w której znajdował się podczas startu impulsu (tyko teraz jest po przeciwnej stronie). Załóżmy więc, że detektor niebieski nie pochłonie całej wiązki światła (np. jest ona szeroka), jej część przelatuje swobodnie obok i zmierza teraz do detektora zielonego, aby zostać tam zarejestrowana.

Na koniec impuls dociera do zielonego detektora.

Pojawia się teraz pytanie zasadnicze:

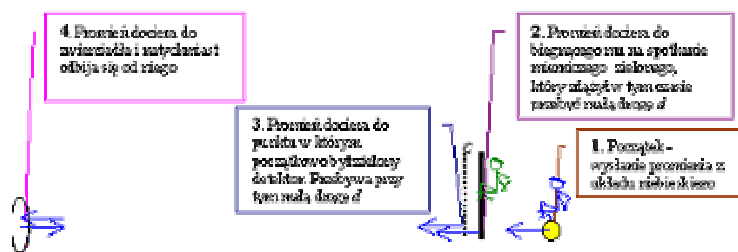
Który z naszych dwóch mierniczych (zielony, czy niebieski) zarejestrował dłuższy czas przelotu sygnału mierniczego?

A może nie było różnicy, między tymi czasami?

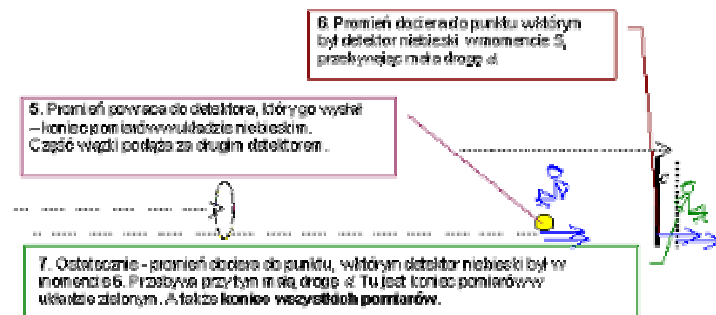
Jasne jest, że dłuższy czas odpowiada dłuższej przebytej drodze, a zatem zarejestrowaniu większej wartości **długości odcinka**.

Aby odpowiedzieć sobie na to pytanie. Trzeba prześledzić lot promieni **bardzo dokładnie**, bo istnieje dość subtelna różnica między zmierzonymi czasami przelotu.

Porównajmy jednak najpierw główne czasy przelotu promieni. W tym celu podzielimy wszystkie etapy ruchu na rozłączne odcinki (patrz rysunek). Aby wyjaśnienia były czytelne drogę promienia jest rozbita na dwa rysunki. Kolejność następujących zdarzeń wynika z numeracji opisów – od 1 do 7.



Teraz promień świetlny udaje się w drogę powrotną



Zastanowimy się teraz dla którego z układów promień mierniczy przebył dłuższą drogę.

Najpierw rozpiszemy drogę dla układu niebieskiego. Składa się ona z odcinków:

1 – 2, 2 – 3, 3 – 4, 4 – 5.

Teraz droga dla układu zielonego. Właściwe odcinki to:

2 – 3, 3 – 4, 4 – 5, 5 – 6, 6 – 7.

Widać od razu, że odcinki: 2 – 3, 3 – 4, 4 – 5 pokrywają się. Różnica zawiera się w odcinkach:

1 – 2: występujący tylko dla układu niebieskiego.

5 – 6, 6 – 7: występujące tylko dla układu zielonego.

Myślę, że uważny czytelnik zauważy, że odcinek 1 – 2 jest krótszy od sumy odcinków 5 – 6 i 6 – 7. Mało tego - jest on nawet krótszy od samego odcinka 5 – 6, i to o długość d . Ponieważ zaś dochodzi do tej różnicy jeszcze jedna wartość d (bo tyle wynosi długość odcinka 6 – 7), więc widzimy, że:

droga promienia w układzie zielonym jest dłuższa od drogi w układzie niebieskim o $2d$.

A to oznacza, że:

Czas pomiaru odległości w układzie zielonym jest **większy** niż w układzie niebieskim.

A ponieważ czas świadczy o długości odcinka, więc możemy powiedzieć:

W układzie niebieskim zmierzona długość odcinka jest krótsza!

Uogólniając:

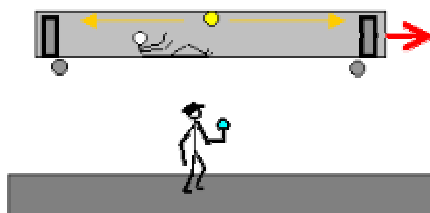
Obserwator mierzący długość odcinka będącego w ruchu uzyska rezultat **mniejszy** niż obserwator względem tego odcinka spoczywający.

A to jest właśnie owo sławetne **relatywistyczne skrócenie długości**

Jednoczesność zdarzeń

Innym ciekawym zjawiskiem TW (ale chyba już nie paradoksem) jest problem **jednoczesności zdarzeń**. Przykład, który tu opiszę pochodzi od samego Einsteina, więc postaram się nie zmieniać w nim zbyt wiele.

Wyobraźmy sobie superekspresowy pociąg przejeżdżający przez stację (pociąg Einsteina). Pociąg jest o tyle nietypowy, że porusza się z prędkością bliską prędkości światła. Poza tym pociąg ma tylko jeden wagon, na którego obu końcach znajdują się drzwi otwierane fotokomórką. W środku wagonu znajduje się lampka, która wysyła światło otwierające drzwi. Zastanówmy się nad tym jak będą otwierały się drzwi pociągu z punktu widzenia osoby znajdującej się wewnątrz pociągu, a jak dla zawiadowcy stacji.



Łatwo jest wszystko przewidzieć dla osoby wewnątrz pociągu – ponieważ prędkość światła jest stała, więc rozchodzące się promienie świetlne odbędą taką samą drogę

do jednych i drugich drzwi wagonu, dlatego fotokomórki zadziałają jednocześnie i drzwi otworzą się **jednocześnie**.

Z punktu widzenia zawiadowcy stacji sytuacja jest bardziej skomplikowana. Cóż on widzi: w pewnym momencie w środku przejeżdżającego wagonu rozbiły się światła. Jego promienie poruszające się względem zawiadowcy z prędkością światła (prędkość ta jest niezależna od układu odniesienia – patrz doświadczenie Michelsona Morleya), zachowują się jednak różnie – promień wysłany w przód goni drzwi z fotokomórką i ostatecznie, zanim je dopędzi, przebędzie znacznie dłuższą drogę, niż promień poruszający się kierunku tyłu pociągu, który zmierza na spotkanie swoich drzwi. W efekcie **najpierw otworzą się drzwi tylne, a dopiero potem przednie**.

Jak z tego widać zdarzenia równoczesne w jednym układzie odniesienia mogą być nie równoczesne w innym układzie. Mówiąc inaczej – nie ma jednolitego zegara we wszechświecie, który tak samo odmierza czas dla wszystkich zdarzeń i wszystkich układów odniesienia.

I jeszcze jedna uwaga: zachwianie jednoczesności zdarzeń przy zmianie układu odniesienia może wystąpić tylko wtedy, gdy zdarzenia odbywają się **w różnych miejscach**. Im bardziej oddalone od siebie w przestrzeni są jakieś zdarzenia, tym bardziej mogą być one rozdzielone czasowo w różnych układach odniesienia. Jednak zdarzenia zachodzące w tym samym miejscu i czasie nigdy nie będą mogły być rozdzielone.

Czas i przestrzeń są względne

Niezależność prędkości światła od układu odniesienia **nie da się wytłumaczyć** w oparciu o tradycyjne poglądy na temat czasu i przestrzeni. Skoro prędkość, wyliczana jako iloraz drogi przez czas, osiąga wartość z innych powodów absurdalną, to jedynymi możliwościami są:

- albo trzeba zmienić zasady matematyki
- albo trzeba zmienić poglądy na temat przestrzeni
- albo trzeba zmienić poglądy na temat czasu.

Ostatecznie okazało się, że nie trzeba aż uciekać się do drastycznej reformy zasad matematyki i logiki, a wystarczy zmienić nasze wyobrażenia dotyczące **czasu i przestrzeni**.

Czas i przestrzeń, czyli czasoprzestrzeń

Aby w zgodzie z fizyką wyobrażać sobie zależności czasoprzestrzenne, należałoby zmodyfikować typowe podejście do tego tematu.

- po pierwsze i najważniejsze – musimy **pożegnać się z koncepcją czasu absolutnego i przestrzeni absolutnej**.

Inaczej mówiąc trzeba się pogodzić z faktem, że nie ma takiego uniwersalnego zegara, który tyka jednakowo dla wszystkich obiektów wszechświata. W zamian za

to, każdy obiekt (precyzyjniej byłoby powiedzieć „każdy układ odniesienia”, ale na szczęście i tak układ odniesienia możemy związać z obiektem, a łatwiej się myśli o czymś co jest materialne) nosi swój własny prywatny czas, którym "mierzy" wszystko co jest w stanie zaobserwować. Jednak ten prywatny czas (tzw. **czas własny**) i związane z nim prywatne "widzenie" przestrzeni niekoniecznie da się zsynchronizować z czasem przestrzeni innego obiektu.

Podobnie jak z czasem, jest z przestrzenią – próżnia nie jest taką niewidzialną siatką, w której każde miejsce jest z góry określone dla dowolnego mierniczego ja odwiedzającego. W zamian za to, każdy obiekt „nosi ze sobą” własną przestrzeń, do której wedle aktualnej potrzeby „przyczepia” otaczające go obiekty. I często okazuje się, że odległości w przestrzeni jednego obiektu nie będą pokrywać się z odległościami innego obiektu. Jednym stwierdzeniem można to podsumować, że teraz:

Czas i przestrzeń są względne.

Ponieważ zaś przestrzeń wpływa na sposób rejestracji czasu, a czas wpływa na widzenie przestrzeni, to uznano, że dobrze jest posługiwać się pojęciem **czasoprzestrzeni**. Pojęcie to staje się szczególnie użyteczne w **ogólnej teorii względności**, gdy rozważane się zjawiska zakrzywienia czasoprzestrzeni, a więc **grawitacji**.

Paradoks bliźniąt

Zjawisko wydłużania się czasu obserwowanego w obiekcie poruszającym się prowadzi do ciekawych problemów interpretacyjnych. Najbardziej znanym jest **paradoks bliźniąt**.

Wyobraźmy sobie, że dwóch braci bliźniaków urodziło się w epoce lotów kosmicznych. Jeden z nich był mniej zaradny i został nauczycielem, więc klepał przez całe życie biedę w jakiejś szkole użerając się z coraz bardziej niesformą młodzieżą. Drugi brat w czasie rozwoju płodowego był położony bliżej źródeł pokarmu i w związku z tym lepiej się rozwijał pod wieloma względami, a ostatecznie urodził rzutki, dynamiczny, przebojowy. Dzięki tym cechom charakteru dostał się do programu lotów kosmicznych i poleciał na oddaloną o 10 lat świetlnych gwiazdę. Posiedział tam z roczeń (może dwa) i wrócił z powrotem na Ziemię, gdzie został owacyjnie powitany przez społeczeństwo świata.

Teraz do opowieści należy dołączyć wiedzę wynikającą z teorii względności. Ponieważ brat kosmonauta poruszał się z prędkościami bliskimi prędkości światła, to oczywiście jego czas płynął wolniej niż czas brata na Ziemi (patrz dylatacja czasu). W efekcie po powrocie okazuje się, że choć brat nauczyciel jest 70 letnim staruszkiem z trudem dorabiającym do kiepskiej emerytury, to kosmonauta wysiada z rakiety młody (jakieś 40 lat) i pełen werwy. Bo skoro czas w jego układzie płynął wolniej, to on musi być młodszy.



Świetnie! – mamy już paradoks – niby są bliźniacy, a jak się nierówno zestarzelili! – wykrzyknie typowy czytelnik czasopism kobiecych, sportowych i motoryzacyjnych.

A ja na to:

Hola! – to jeszcze nie paradoks, to dopiero efekt przewidziany przez teorię względności.

Paradoks zacznie się dopiero wtedy, gdy uświadomimy sobie, że **przenosząc nasz układ odniesienia do rakiety** (a przecież mówiliśmy, że żaden układ odniesienia nie jest wyróżniony), to brat nauczyciel leci sobie przez wszechświat oddalając się od rakiety na wielkim pojeździe kosmicznym zwanym Ziemia. I z tego punktu widzenia patrząc, to właśnie on powinien zestarzeć się wolniej! – przynajmniej dla brata w rakiecie. Kto więc będzie na końcu stary, a kto młody – kosmonauta, czy nauczyciel?

Bo przecież **nie ma wyróżnionych układów odniesienia** i wśród bliźniaków też powinno być równouprawnienie. Może to więc jednak nauczyciel jest młodszy od brata kosmonauty? Paradoks wreszcie jest, bo absolutnie nie widać powodu dla którego tylko jeden z braci miałby okazać się lepszym w tym wyścigu po młodość.

Rozwiązanie paradoksu bliźniąt

Jak uczą w podręcznikach, rozwiązanie paradoksu bliźniąt istnieje tylko w oparciu o **ogólną teorię względności**. Bo okazuje się, że istnieje **istotna różnica** między oboma braćmi, która powoduje, że układ odniesienia brata w rakiecie jednak **jest wyróżniony**. Brat, który pozostaje na Ziemi nie podlega działaniu silnych przyspieszeń, a brat kosmonauta musi się **najpierw rozpędzić**, potem lecieć długo ruchem jednostajnym, a potem znowu **zahamować** (u celu podróży). Podczas powrotu sytuacja się powtarza, bo znowu mamy sekwencję: rozpędzanie, lot, hamowanie. Ponieważ zaś przyspieszenia rakiety powodują, że układ z nią związany staje się **układem nieinercyjnym**, to szczególna teoria względności się do tego przypadku nie stosuje. Po odwołaniu się do **ogólnej teorii względności**, która zajmuje się sytuacjami zachodzącymi także w układach nieinercyjnych - paradoks znika.

I jak głosi gminna wieść wśród fizyków, ta różnica układów odniesienia powoduje, że brat kosmonauta rzeczywiście będzie młodszy.

Zjawiska einsteinowskiego świata

Inne efekty relatywistyczne

Relatywistyczne wydłużenie czasu (nazywane też „dylatacją” czasu) i skrócenie długości (określane przez fizyków jako skrócenie Lorentza) nie są jedynymi „dziwnymi” efektami zachodzącymi przy prędkościach bliskich prędkości światła. Jest to dość zrozumiałe, bo skoro podstawy postrzegania zjawisk – czas i przestrzeń ulegają modyfikacji, to wszystko co od nich zależy, też będzie się transformować inaczej, niż byśmy to sobie początkowo wyobrażali. Dlatego zmienić trzeba m.in.:

Klasyczne **prawo dodawania prędkości** – okazuje się, że dwa obiekty poruszające się naprzeciw siebie z prędkościami bliskimi prędkości światła, nie dają prędkości zbliżania się (obserwowanej w jednym z tych układów) większej niż prędkość światła.

Transformacja przyspieszenia – ponieważ prędkość ulega modyfikacji w układach szybko poruszających się, to i przyspieszenie z tej prędkości wynikające, zachowywać się będzie w nowy sposób.

Transformacja energii i pędu – tu dochodzimy do słynnego wzoru $E = mc^2$. Jego konsekwencje wykraczają daleko poza dywagacje u kogo zegarek się późni, a u kogo nie. W oparciu o to proste równanie można wyjaśnić tak fantastyczne efekty jak: istnienie antymaterii, wybuchy jądrowe, produkcję energii w gwiazdach, a nawet powstawanie wszechświata.

Spojrzenie na grawitację. Zjawiska które do tej pory omawiałem wynikają z tak zwanej „**szczególnej teorii względności**”, czyli ograniczonego przypadku teorii względności zajmującego się wyłącznie układami inercjalnymi. „**Ogólna teoria względności**” rozszerza naszą możliwość tłumaczenia zjawisk o układy nieinercjalne, a co za tym idzie także o zjawiska w polu grawitacyjnym. Ogólna teoria względności jest bardzo trudna matematycznie ponieważ posługuje się m.in. pojęciem tensora – obiektu zawierającego w sobie wiele danych na raz (w OTW rozpatruje się m.in. tensory o 256 składowych). Dlatego teoria ta jest dostępna jedynie dla prawdziwych matematycznych „twardzieli”.

Szczególne teoria względności

Szczególne teoria względności przewiduje między innymi następujące efekty nieznane w fizyce klasycznej:

- Dylatacja (wydłużenie) czasu obserwowanego z układu odniesienia będącego w ruchu
- Skrócenie długości obserwowanej z układu odniesienia będącego w ruchu
- Zachwianie równoczesności zdarzeń
- Równoważność masy i energii
- Nowe wzoru opisujące większość wielkości fizycznych w inercjalnych układach odniesienia. Te wielkości to m.in.: odległość, prędkość, przyspieszenie, pęd, energia.

Ogólna teoria względności

Jednak pełniejszą wiedzę o zjawiskach relatywistycznych daje stworzona przez Einsteina nieco później **ogólna teoria względności**. Teoria obejmuje:

To samo co w szczególnej teorii względności plus dodatkowo:

Wyjaśnienie pochodzenia zjawiska grawitacji
przewiduje efekt spowolnienia upływu czasu w silnym polu grawitacyjnym
Stworzenie mechanizmu opisującego ewolucję wszechświata (w szczególności rozszerzanie się wszechświata)

Czy teoria względności jest prawdziwa?

Problem jest o tyle złożony, że w nauce słowo „teoria prawdziwa” dawno już straciło sens znany przeciętnym zjadaczom chleba. Bo „prawdziwość” najczęściej oceniamy (poniekąd słusznie) po tym, czy dana rzecz poprawnie zintegruje się z naszym umysłem. Dlatego np. teoria bardzo dobra, ale przez nikogo nie zrozumiana nie ma szansy na zaistnienie w nauce.

Teoria powinna być zgodna z doświadczeniem.

Dlatego powstaje oczywiste pytanie: czy takie zjawiska jak wydłużenie czasu w układzie poruszającym się dadzą się doświadczalnie sprawdzić?

Odpowiedź brzmi: ależ tak, oczywiście! – przeprowadzono wiele doświadczeń, z których jednoznacznie wynika, że czas zachowuje się zgodnie z przewidywaniami Einsteina.

Dowody doświadczalne potwierdzające teorię względności

Najbardziej typowymi są doświadczenia na cząstkach elementarnych. Cząstki te są najczęściej obiektami o bardzo krótkim czasie istnienia – zazwyczaj po ułamku sekundy rozpadają się na inne cząstki, co daje się zaobserwować w laboratoriach. Robiono więc doświadczenia na **miuonach** – cząstkach o czasie życia rzędu mikrosekundy. Badano więc grupę szybko poruszających się miuonów (z prędkościami porównywalnymi do prędkości światła) oraz miuonów specjalnie do celów doświadczenia spowolnionych. I okazało się, że te szybkie rozpadały się po wyraźnie dłuższym czasie. Innymi doświadczeniami związanymi z względnością czasu było wysłanie na orbitę superdokładnych zegarów atomowych. Okazało się, że rzeczywiście następują odchylenia ich „chodu” od podobnych zegarów zostawionych na Ziemi.

Wreszcie słynny wzór $E = mc^2$. Gdyby nie był prawdziwy, to nigdy nie wybuchłaby bomba atomowa, nie działałyby reaktory jądrowe, ani akceleratory. Setki urządzeń wybudowanych za grube miliardy dolarów nie mogłoby działać, bo są one zbudowane z uwzględnieniem tej teorii. Czy można podejrzewać finansistów wykładających grube miliardy dolarów na te cele, o kierowanie się idealistycznymi przesłankami, a przynajmniej chęcią bezinteresownego oszukiwania świata? Czy możliwe jest, aby wyłożyliby oni pieniądze na coś, co nie przyniesie efektu?...

Poza tym większość efektów fizyki jądra atomowego, cząstek elementarnych czy ogólnie fizyki kwantowej zakłada prawdziwość tej teorii i na co dzień **wykorzystuje ją** w swoich przewidywaniach. A ponieważ wszystkie uznane aktualnie teorie muszą być (i są) potwierdzone doświadczalnie, to gdyby nagle okazało się, że teoria względności jest całkiem nieprawdziwa – oznaczałoby to **absolutną ruinę całej współczesnej fizyki i chemii...**

Czy można obalić teorię względności?

Raczej nie ma sensu dyskutować nad „prawdziwością” teorii względności w tym sensie, że np. ktoś przyjdzie i udowodni, że jednak „e nie równa się em ce kwadrat”. Bez tego wzoru fizyka nie potrafi się dzisiaj obejść. Jednak w miarę stabilna pozycja teorii względności w dzisiejszej fizyce wcale nie oznacza, że na temat czasu, przestrzeni, energii i masy zostało powiedziane ostatnie słowo. Teoria względności, oprócz wielkich sukcesów, ma również swoje słabości:

jest w pewnym zakresie niezgodna z mechaniką kwantową
są pewne doświadczenia które stawiają pod znakiem zapytania postulat nieprzekraczalności prędkości światła

Tylko problem tkwi w tym, że nie bardzo wiadomo jak ułożyć teorię, aby wszystko się zgadzało. Póki co – czekamy na kolejnego geniusza fizyki, który:

połączy fizykę kwantową z teorią względności
stworzy jednolitą teorię oddziaływań elektroślabych, silnych i elektromagnetycznych i ogólnie wyjaśni czym właściwie jest ten zadziwiający świat...

Czym jest czas?

Teoria względności na to nie odpowiada. Jedynie komplikuje sprawę w stosunku do tradycyjnych poglądów pokazując **czym czas nie jest**. Wiemy zatem, że **nie jest** to jakby jednolity strumień taktujący cały wszechświat jednym niezmiennym rytmem. Czas jest zależny od układu odniesienia.

Ciekawym matematycznym aspektem czasu w matematycznym opisie teorii względności jest fakt, że spośród czterech zmiennych czasoprzestrzeni: x , y , z , t - czas, jako jedyny, łączy się z pozostałymi zmiennymi za pomocą jednostki urojonej i (w matematyce jednostka urojona i równa jest pierwiastkowi z minus jeden). Np. wzór tzw. interwału czasoprzestrzennego - czyli jakby odległości w czasoprzestrzeni:

$$\Delta s^2 = -(\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2 - (ic\Delta t)^2$$

zawiera jednostkę urojoną i , stojącą przy zmiennej czasowej. Oznacza to, że w czasoprzestrzeni – łączącej w jedno przestrzeń i czas, ta ostatnia zmienna jest wyróżniona i zachowuje się (matematycznie rzecz ujmując) odmiennie od pozostałych.

Wzory teorii względności dotyczące czasu pokazują, że wraz ze zbliżaniem się prędkości obiektu do prędkości światła, czas zaczyna płynąć coraz wolniej, a dla samej prędkości światła czas musiałby stanąć w miejscu. Niektórzy wyciągają stąd wniosek, że gdyby tak jednak przekroczyć prędkość światła (jakimś specjalnym sposobem) to, oznaczałoby to odwrócenie biegu czasu. Jednak jest to jak na razie pomysł z obszaru fantastyki naukowej, bo rozpędzenie najmniejszego obiektu materialnego do prędkości światła wymagałoby użycia nieskończenie wielkiej energii. A co tu mówić o przekroczeniu tej prędkości?...

Jeszcze jednym ciekawym elementem teorii względności dotyczącym czasu (w tym przypadku już Ogólnej Teorii Względności) jest powiązanie upływu czasu z obecnością materii. Np. czarne dziury wytwarzające bardzo silne pole grawitacyjne powodują zakrzywienie czasoprzestrzeni, co z kolei dla obserwatora zewnętrznego daje efekt spowolnienia czasu.

Wykraczając poza teorię względności, też możemy znaleźć ślady ciekawych koncepcji związanych z pojęciem czasu. Niektórzy sugerują np., że w świecie cząstek elementarnych czas płynie inaczej niż w naszym makroskopowym świecie. Być może nawet w bardzo niewielkim obszarze czas mógłby się cofać? A może dla obiektów rzeczywiście elementarnych czas stoi w miejscu?

Istnieją też poważne teorie fizyczne opisujące zjawiska za pomocą większej ilości wymiarów czasoprzestrzennych, niż znane z teorii względności cztery wymiary (czyli trzy przestrzenne i jeden czasowy) – np. teoria strun posługuje się 10-cioma lub 11-toma wymiarami. >

Wzory teorii względności

Oznaczenia i symbole

Prędkość światła: $c = 299792458$ m/s

Prędkość obiektu względem układu odniesienia: v .

Czynnik γ - czynnik Lorentza (występuje w wielu wzorach teorii względności).

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Wartości γ :

$$v = 0 \rightarrow \gamma = 1$$

$$v < c \rightarrow \gamma > 1$$

$$v = c \rightarrow \gamma \text{ rośnie do nieskończoności}$$

Czynnik β - stosunek prędkości obiektu (obserwatora) do prędkości światła:

$$\beta = \frac{v}{c}$$

Dla

$$v = 0 \rightarrow \beta = 0$$

$$v < c \rightarrow \beta < 1$$

$$v = c \rightarrow \beta = 1$$

Transformacja Lorentza

Ustalenia początkowe:

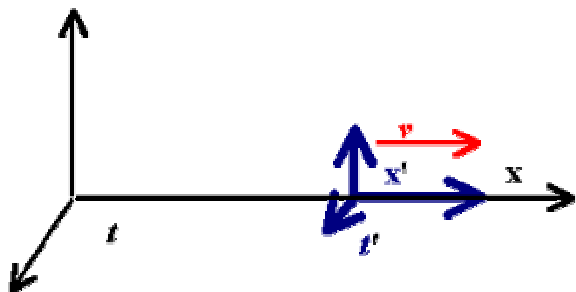
Rozpatrujemy dwa inercjalne układy odniesienia – zwykły XYZ i oznaczany ' (primem) X'Y'Z'. Oba układy mają równoległe położone osie X Y Z. W chwili początkowej środki obu układów pokrywają się – czyli:

$$x(t=0) = x'(t'=0) = 0$$

$$y(t=0) = y'(t'=0) = 0$$

$$z(t=0) = z'(t'=0) = 0$$

Prędkość układu primowanego względem układu nieprimowanego wynosi v i jest skierowana wzdłuż osi X-ów zgodnie z jej zwrotem.



Wzory transformacyjne

Oto wartości poszczególnych współrzędnych dla zdarzenia mającego w układzie nieprimowanym współrzędne: x, y, z, t :

$$z' = z$$

$$y' = y$$

$$x' = \gamma (x - vt)$$

$$t' = \gamma (t - x\beta/c)$$

Wzory transformacyjne - transformacja odwrotna:

$$z = z'$$

$$y = y'$$

$$x = \gamma (x' + vt')$$

$$t = \gamma (t' + x' \beta/c)$$

Relatywistyczna transformacja prędkości

Założmy, że mamy cząstkę, której prędkość w układzie nieprimowanym dana jest przez u . Prędkość względna układów wynosi (jak w transformacji Lorentza) v .

$$u = (u_x, u_y, u_z)$$

W układzie primowanym prędkość tej cząstki będzie widziana jako:

$$u' = (u'_x, u'_y, u'_z)$$

Przy czym zachodzi:

$$u'_{x'} = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}$$

$$u'_{y'} = \frac{u_y}{\gamma (1 - \frac{u_x v}{c^2})}$$

$$u'_{z'} = \frac{u_z}{\gamma (1 - \frac{u_x v}{c^2})}$$

Przypadek jednowymiarowy – dodawanie i odejmowanie prędkości w jednym wymiarze

Aby wzór łatwiej się oglądało pozbywamy się indeksu oznaczającego współrzędną.

Wzór na u' w postaci rozpisanej:

$$u' = \frac{u - v}{1 - \frac{uv}{c^2}}$$

Co można uznać za wzór na relatywistyczne odejmowanie prędkości (czyli gdy obiekty, a zarazem układy odniesienia, poruszają się w tym samym kierunku).

Wersja dla obiektów/układów odniesienia poruszających się w przeciwnych kierunkach (relatywistyczne dodawanie prędkości) będzie różnić się znakiem prędkości u .

$$u' = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}}$$

Wnioski – po podstawieniu do wzorów otrzymamy:

1. dla dowolnych $u < c$ oraz $v \leq c$ zachodzi $u' < c$
2. dla $u = c$ i $v = c$, $u' = c$.

Dylatacja czasu

Oznaczmy czas własny układu przez t_0 - jest to czas upływający pomiędzy dwoma zdarzeniami w układzie w którym zdarzenia zachodzą **w tym samym miejscu**. Czas t' mierzony pomiędzy tymi zdarzeniami w układzie poruszającym się dany będzie wzorem

$$t' = t_0 / \gamma$$

Jest to efekt tzw. dylatacji (wydłużenia czasu), ponieważ $\gamma \geq 1$, więc

$$t_0 \geq t'$$

Oznacza to, że w układzie primowanym upływa **mniej** minut, a więc czas się wydłuża.

Skrócenie długości

Niech długość pewnego odcinka w układzie, w którym spoczywającym względem tego odcinka wynosi l_0 . Długości tego odcinka obserwowane z układu ruchomego skracają się γ krotnie.

$$l_{\text{obserwowane_w_ruchu}} = l_0 / \gamma$$

ponieważ $\gamma \geq 1$, więc $l_{\text{obserwowane_w_ruchu}} \leq l$

Oznacza to, że odcinek poruszający się wraz z obserwatorem jest γ razy dłuższy

Zjawisko powyższe nazywane jest niekiedy **kontrakcją długości** lub **skróceniem Lorentza – Fitzgerlada**.

Interwał czasoprzestrzenny

Np. wzór tzw. interwału czasoprzestrzennego.

W postaci symetrycznej względem wszystkich współrzędnych $\Delta s^2 = -(\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2 - (ic\Delta t)^2$.

Lub prościej:

$$\Delta s^2 = (c\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2$$