Wykład 1

Od przeszło 300 lat, tj. od czasu wiekopomnych osiągnięć Newtona, podstawy fizyki (mechanika) wykładane są, zasadniczo, w jednakowy sposób. Najważniejszym wysiłkiem w przyswajaniu teorii Newtona jest poznanie i zrozumienie, czym są: położenie, czas, prędkość, przyspieszenie, masa, siła, pęd, energia.

Stosunkowo najmniej kłopotu sprawia prędkość i przyspieszenie. Zakładając, że wiadomo już, co to jest położenie i co to jest czas, prędkość określa się jako granicę stosunku przyrostów położenia do przyrostów czasu. Jest to wprawdzie operacja nieco subtelniejsza, niż proste operacje arytmetyczne na liczbach, ale większość uczniów potrafi zrozumieć pojęcie prędkości chwilowej – tych, którzy nie są w stanie tego opanować, fizyki nauczyć się nie da.

Brak poważniejszych kłopotów z określeniem powyższych dwóch pojęć jest jednak tylko pozorny. Założyliśmy przez chwilę, że wiemy, co to jest położenie i czas. Ale czy rzeczywiście? Weźmy pod rozwagę położenie.

Jeśli położenie, to **względem**, czego? Nim zaczniemy cokolwiek robić, nim wypowiemy jakiekolwiek zdanie na temat fizyki, już napotykamy na problem względności i problem układu odniesienia!

W praktyce, najważniejszych dla fizyki pojęć położenia i czasu faktycznie w podręcznikach przeważnie nie definiuje się! W konkretnych przykładach, przynajmniej na początku, używa się położenia względem obiektów nieruchomych na powierzchni Ziemi. A czas - zakłada się, że każdy od dziecka zna zegarek, więc niby wie, co to jest czas. Zobaczmy jak sprawę ujmuje np. Feynman w swych słynnych „Wykładach”.

„Może najlepiej pogodzić się z faktem, że czas należy prawdopodobnie do tych pojęć, których nie da się zdefiniować (w sensie definicji słownikowej) i powiedzieć sobie, że czas oznacza rzecz dobrze nam znaną, mówi mianowicie, jak długo musimy czekać!”

Przy takim podejściu, gdy na pewnym etapie nauki, trzeba zapoznać adepta ze szczególną teorią względności, jawi się ona większości z nich (ogromnej większości) jako coś nienaturalnego, trudnego - w praktyce nie do pojęcia.

A jak ma się rzecz z pojęciami dynamicznymi? Tradycyjne podejścia spotykane we wszystkich niemal podręcznikach można poddać miażdżącej krytyce. Mało mówi się na ten temat, ale skutek jest taki, że ułomnie uczona fizyka bardzo źle wchodzi do głowy.

Weźmy pod uwagę „drugą zasadę dynamiki Newtona”. Napisać wzór potrafi każdy: $\vec{F} = m\vec{a}$. I co dalej? Co to jest?

Najbardziej naiwne podejście (zbliżone do tego, które reprezentował sam Newton) polega na uznaniu, że „wiemy”, co to jest masa. „Miara ilości substancji” powiadają jedni. „Nie ważne jak zdefiniować, ważne, że umiemy masę wyznaczyć - każdemu można pokazać wagę laboratoryjną, czy sklepową” powiadają inni.

Więcej uwagi poświęca się sile. Mało kto odważy się przyjąć, że pojęcie siły jest oczywiste samo z siebie i nie wymaga objaśnień. Lekcje dynamiki poprzedzane są najczęściej lekcjami statyki. Pokazuje się dynamometr, porównuje jego wskazania w różnych sytuacjach i w ten sposób „oswaja” pojęcie siły. Nie docieka się istoty wielkości siły, a raczej zwraca uwagę na jej wektorowy charakter i analizuje ten czysto geometryczny aspekt.

Gdy już uczeń niby „wie”, co to jest masa i co to jest siła, ogłasza się kluczowe prawo fizyki, właśnie owo $\vec{F} = m\vec{a}$. Skoro wszystkie trzy wielkości są mierzalne, prawo można poddać weryfikacji.

Gdzie są słabe punkty tego, klasycznego w końcu, podejścia?

Po pierwsze, waga pozwala wyznaczać *ciężary*. Gdy pojęcie masy wprowadza się poprzez ważenie, trudno potem wytłumaczyć, na czym polega osobliwość równości masy ważkiej i bezwładnej. Po drugie, na wadze nie da się wyznaczyć masy Księżyca, czy masy neutronu. A po trzecie, i to jest chyba najważniejszy problem, siła wyznaczona w statyce, nie musi mieć wiele wspólnego z siłą działającą w konkretnym procesie rozpędzania. Gdy naciągniemy procę do określonej długości i jakoś tam zmierzymy siłę (w warunkach równowagi), a następnie zaczniemy wystrzeliwać z tej procy coraz mniejszy kamień, to nie możemy oczekiwać, że przyspieszenie chwilowe ciała przy wcześniej zbadanym stanie wydłużenia procy, będzie odwrotnie proporcjonalne do jego masy! Wszak proca bez żadnego kamienia (czyli z kamieniem o masie zero), musiałaby mieć przyspieszenie nieskończone!!! Żeby potwierdzić II prawo Newtona, musielibyśmy umieć mierzyć siłę, z jaką proca działa na konkretny kamień **w trakcie** rozpędzania, w trakcie strzelania. A w tej sytuacji żadnego dynamometru wstawić się nie da! A nawet, gdyby się uprzeć i zrobić miniaturowy dynamometr wstawiony pomiędzy gumę procy, a rozpędzany kamień, to i ten dynamometr ulegałby rozpędzaniu. A taki rozpędzany dynamometr, to już co innego! Nawet, gdy usunąć kamień i rozpędzać sam dynamometr, wskaże on wynik różny od zera! Po to, by zwoje sprężyny dynamometru nie rozpadły się, a wspólnie podążały ruchem przyspieszonym, sprężyna, mimo braku obciążenia zewnętrznego musi się rozciągnąć.

Nie mogąc poradzić sobie z tymi wszystkimi problemami, autorzy, na przykład Feynman, piszą mniej więcej tak:

„Formułując prawo fizyczne takie jak powyższe, używamy wielu intuicyjnych pojęć, wskazówek i założeń, które najpierw wiążemy ze sobą w sposób przybliżony, budując nasze „prawo”. Z czasem może się zdarzyć, że będziemy musieli powrócić i szczegółowo badać znaczenie każdego użytego wyrazu, ale gdybyśmy próbowali zrobić to zbyt wcześnie, mogłoby to doprowadzić do zamętu”.

Obawiam się, że te nieustanne „powroty”, korekty i uściślenia, też powodują wiele zamętu!

Cytuję akurat, Feynmana w takim krytycznym kontekście nie, dlatego iżbym uważał jego „Wykłady” za zły podręcznik. Wręcz przeciwnie!! To moja ulubiona książka. W tej kategorii, najlepsza, jaką znam. W innych można spotkać takie „kwiatki” jak następująca „definicja” masy: *„Masa jest to iloraz siły i przyspieszenia”*. I definicja siły: *„Siła to iloczyn masy i przyspieszenia”*. Przy takim ujęciu drugie prawo dynamiki jest po dwakroć odarte ze swego fizycznego znaczenia. Jako równość arytmetyczna „musi” być spełnione, bo przy jego pomocy zdefiniowaliśmy masę. A także siłę. Zatem żeby wyznaczyć masę trzeba wcześniej znać siłę. Ale żeby wyznaczyć siłę trzeba najpierw znać masę. Zatem żeby wyznaczyć masę, musimy wpierw znać...masę. Jest to błędne koło.

Czy nie da się poznawać (samemu) i uczyć (innych) fizyki inaczej niż metodą kolejnych przybliżeń? Nie musieć budować na ruchomych piaskach intuicji, a potem stopniowo umacniać konstrukcję coraz nowymi zależnościami i obszarami zastosowań? Nie musieć przyzwyczajać się do fizyki Newtona, by potem musieć łamać sobie wyobraźnię usiłując zrozumieć „paradoks” bliźniąt? Jakże różna jest ta metoda przybliżeń od metody poznawania i nauczania geometrii. Tam raz poznanej definicji nie zmieniamy do końca kursu!

Im jestem starszy, tym bardziej jestem przekonany, że myślenie o podstawach fizyki, a przede wszystkim, że nauczanie fizyki od bardzo wstępnego etapu poczynając, powinno być gruntownie zmienione.

Powinno też być zmienione podejście do rzekomej różnicy między fizyką i geometrią. Pogląd, że geometria to matematyka, oraz że matematyka jest narzędziem fizyki jest tylko wyświechtanym sloganem. Geometria euklidesowa jest częścią fizyki, a za to spory kawał mechaniki jest ... geometrią pewnej, bardzo realnej, wcale nie abstrakcyjnej, nie wydumanej przestrzeni.

Geometrię można by istotnie uznawać za dyscyplinę matematyczną, gdyby przyjąć dowolnie jej aksjomaty i skupić się na dowodzonych twierdzeniach. Ale gdyby tylko takim intelektualnym ćwiczeniem miała być geometria, powstała by ona zapewne dopiero ze sto, czy dwieście lat temu, gdy liczba ludzi robiących kariery naukowe przekroczyła pewien poziom ponad potrzeby praktyki. Gdy 2 czy nawet 3 tysiące lat temu powstawała geometria, prowokowana była ona potrzebami praktyki. Była to zatem nauka *par excellence* praktyczna, przyrodnicza. Jej przyrodniczy charakter tkwił nie w dowodach twierdzeń, ale w aksjomatach, które były brane z obserwacji - nie bez udziału idealizacji, rzecz jasna. Tym samym**geometria**, to nic innego jak dział fizyki ujmujący pewne najogólniejsze własności przedmiotów. Każdy widział ziarnko maku. Każdy widział naciągnięty sznurek, czy porządnie wykonany stół prostokątny. Idea punktu, idea linii prostej, odcinka, czy czworokąta, ma bliski kontakt z realnością.

Złudzenie, że geometria jest czystym tworem umysłu, a nie nauką przyrodniczą liczącą się z realiami świata, brało się stąd, iż własności obiektów geometrycznych ujmowane postulatami są niezwykle oczywiste. A są oczywiste, gdyż niezależnie od ich (wcale nie takiej łatwej, gdy nalega się na dużą dokładność) sprawdzalności bezpośredniej, **zgodne są one z maksymalną możliwą do pomyślenia symetrią!** Prostą można przedłużać i przedłużać, a własności każdego z jej punktów są identyczne. Z którego punktu by nie zacząć analizować otaczający go kawałek prostej, zawsze uzyska się takie same wyniki. Istotną własnością prostej na płaszczyźnie jest też istnienie prostych równoległych. Proste równoległe nie tylko nie mają punktów wspólnych, ale z dowolnego punktu jednej prostej, ta druga „wygląda" tak samo. Inną istotną cechą jest to, że dwie proste równoległe do trzeciej, są i do siebie równoległe.

Żeby docenić maksymalną prostotę realnej geometrii, żeby zrozumieć, że własności prostych nie są, by tak rzec, „obligatoryjne" (jak obligatoryjne jest równanie 2 + 2 = 4), wystarczy uświadomić sobie, co dzieje się na powierzchni kuli. Na powierzchni kuli też są punkty. Dwa punkty można łączyć najkrótszymi liniami leżącymi na powierzchni kuli, które są (jak wiadomo) łukami kół wielkich. Są to zatem linie „najprostsze". Każda linia na sferze różna od łuku koła wielkiego, zakrzywiająca się już w płaszczyźnie stycznej do sfery, a nie tylko wraz ze sferą, jak łuk koła wielkiego, jest, między dwoma tymi samymi punktami, dłuższa od owej najprostszej. Dla kół wielkich na sferze, niektóre własności linii prostych z płaszczyzny pozostają słuszne (np. wszystkie punkty na kole wielkim są równouprawnione), ale nie są to wszystkie własności. Nie ma, na przykład, żadnego koła wielkiego, które nie przecinałoby się z wybranym, jednym kołem wielkim. Nie ma więc par równoległych linii najprostszych.

Jest interesujące, że badając niewielki obszar na powierzchni kuli, i wykonując pomiary z ograniczoną dokładnością, możemy nie umieć rozróżnić, czy w rzeczywistości mamy do czynienia z powierzchnią płaską, czy zakrzywioną. Gdy raz to sobie uświadomimy, widzimy, że tylko doświadczenie, dokładniejszy pomiar, albo zbadanie większego obszaru, może rozstrzygnąć, jaki aksjomat dla linii najprostszych, (czyli najkrótszych) należy przyjąć. „Czyste myślenie" nic tu nie pomoże! Nie pomoże, więc matematyka (którą tu utożsamiam z myśleniem i dedukcją). Przed pomiarem możemy tylko uświadomić sobie, że najprostszy jest wariant płaski, z prostymi równoległymi. To chyba dlatego, kiedyś, kiedyś, sądzono że Ziemia jest płaska. Tu akurat argument prostoty okazał się zwodniczy.

Gdy badamy linie najprostsze w przestrzeni trójwymiarowej, mamy też różne możliwości. Albo linie równoległe istnieją, albo nie. Innymi słowy, przestrzeń trójwymiarowa może być zbiorem (nieskończonym) dwuwymiarowych płaszczyzn, albo też nie da się na taki zbiór płaszczyzn rozłożyć. Tu pojawia się pewna mentalna trudność, związana z tym, że zakrzywioną przestrzeń dwuwymiarową łatwo sobie wyobrazić jako podzbiór płaskiej przestrzeni trójwymiarowej. Trudniej myśleć abstrakcyjnie o dwuwymiarowym czymś, co nie jest płaskie, a co nie „siedzi" w trójwymiarowym płaskim świecie. Bo krzywa przestrzeń trójwymiarowa rozbijana na podzbiory dwuwymiarowe, prowadzić może do takich właśnie tworów.

Najbardziej symetryczna możliwość, to zwykła trójwymiarowa przestrzeń, tzw. euklidesowa, ta znana ze szkolnej nauki geometrii.

Nalegałem przed chwilą, by czytelnik uświadomił sobie, że geometria ujmuje ogólne własności realnych przedmiotów. Na przykład, łańcuszek, czy sznurek, zawiązany w pętlę, podzielony na 12 jednakowych fragmentów (jakimiś znaczkami, czy supełkami), po rozciągnięciu trzech węzłów wyznaczających odcinki zbudowane z 3, 4 i 5 segmentów, może być użyteczny przy budowie domu! W szczególności, użyty do wyznaczenia kierunku stawiania kolejnych ścian, doprowadzi do eleganckiego kształtu z **jednakowymi** czterema kątami. Można też zestawić takie 4 pętle i stwierdzić, że wypełniają one kat pełny. Ogólność własności polega tu na tym, że pętle mogą być wykonane z jedwabiu, bawełny, nici złotych, czy srebrnych i zawsze będzie dobrze. Ale uwaga! Na powierzchni kuli, ta prosta własność**nie obowiązuje**.

Własności przedmiotów uchwycone już przez starożytną geometrię Euklidesa są szalenie niekompletne! Realny przedmiot, którego idealizacją miałby być punkt, ma coś, czego punkt geometrii Euklidesa nie ma.

Realny mały przedmiot ma swoją historię!

Można też powiedzieć, że ma swój byt, swój życiorys. O danym ziarnku maku można się wypowiadać jako o świeżutkim ziarenku, co dopiero wypadło z makówki, albo o ziarenku złożonym na wiosnę do gruntu stykającym się z pierwszą w jego dziejach kroplą wody. Można opisać historię tegoż ziarenka, wyróżnić zdarzenie, gdy wpadał do worka z większą ich liczbą, gdy worek ładowano na przyczepę traktora, gdy go złożono w magazynie jakiejś hurtowni, itp. itd. Jego historia składa się ze zdarzeń. Są zdarzenia, które w oczywisty sposób możemy wyróżnić i nazwać, ale i między takimi zdarzeniami jest mnóstwo zdarzeń bezimiennych, co których mamy pewność, że po prostu są. Zbiór tych zdarzeń dla danego punktu materialnego ma własność linii. Linie te zwą się liniami świata. Między każdymi zdarzeniami na linii świata mieszczą się inne zdarzenia (faktycznie nieskończenie wiele innych zdarzeń).

Pojawiło się pojęcie zdarzenia i pojęcie sekwencji zdarzeń tworzących historię maleńkiego realnego przedmiotu. Pojęcia te musimy uznać za elementarne, zrozumiałe same przez się, nie wymagające definicji. Wszak definicje musiałaby zawierać jakieś słowa wymagające zdefiniowania za pomocą jeszcze innych (prostszych) słów i pojęć. A skąd takie brać?

Odpowiednikiem punktu w geometrii, w fizyce jest zdarzenie.

Skoro realne ciała, choćby najmniejsze, są liniami raczej niż punktami, to, o czym traktuje geometria ignorująca ów aspekt istnienia materii? Owo trwanie ciał może być zignorowane w bardzo szczególnych okolicznościach. Grupa ciał, których niektóre własności opisane mają być językiem zwykłej geometrii, musi, że pozwolę sobie użyć dość poetyckiego zwrotu, „trwać solidarnie”. Ich byt musi być ściśle związany. Możemy zwyczajnie powiedzieć, że wszystkie rozważane ciała i ich części, muszą być wzajemnie nieruchome. Ale cząstki wzajemnie nieruchome nigdy się nie spotykają, nie kontaktują. Ich historie nie mają wspólnych zdarzeń. Ich linie świata są równoległe!

Człowiek na Ziemi ma do czynienia z wieloma obiektami będącymi w stanie takiego „solidarnego bytowania”. Sam grunt, po którym stąpamy, domy, place, drzewa itp. są stale razem.

(Pomyślmy jakby opisywał sytuację jakiś Marsjanin obserwujący nas przez teleskop. Według niego, cała Ziemia, to by się zbliżała, to oddalała. Raz byłaby z tej strony Słońca, raz z innej. Ale gdyby się skryła za Słońcem, to wszystkie drzewa na Ziemi, i wszystkie domy, i wszystkie place byłyby skryte za Słońcem. To bardzo szczególnie spokrewniona grupa ciał). Własności (oczywiście nie wszystkie) takich - wzajemnie nieruchomych - ciał są przedmiotem zwykłej geometrii.

W niektórych podręcznikach piszą, że zdarzenie to jest coś, co zachodzi gdzieś i kiedyś. To stawianie wozu przed koniem! Cóż to, bowiem, jest „gdzieś"? Czy określenie „w tej sali" coś ogólnego znaczy? Pozornie można sądzić, że mój wykład zacznie się i skończy „w tym samym miejscu". Gdyby jakiś Marsjanin oglądał, co się dzieje, stwierdziłby, że ja wykładam w szalonym pędzie przemieszczając się o jakieś 100 000 km w czasie tego wykładu! Natomiast fakt, że linie świata moja i wszystkich Państwa stały się równoległe pomiędzy zdarzeniem polegającym na rozpoczęciu wykładu i pozostaną przypuszczalnie takie do jego końca, jest obiektywnym faktem geometrycznym, którego nic i nikt nie jest w stanie zakwestionować.

Badać trzeba przestrzeń zdarzeń według identycznego schematu, jaki możliwy jest dla tzw. geometrii. Patrzeć na fakty (idealizować je), ale przede wszystkim wykorzystywać symetrie. A okaże się, że symetria jest maksymalna możliwa!! Tym samym własności przestrzeni zdarzeń są „do bólu" oczywiste i intuicyjne!!

Nie ulega wątpliwości, że „zamieszkujemy" – my wszyscy, przyroda - **czasoprzestrzeń**! Przygotowanie do studiowania fizyki powinno się od tej konstatacji zaczynać! Niestety, historia, codzienność, programy fizyki, ukształtowały całkowicie mylny pogląd, że mieszkamy w **przestrzeni.** Poważny grzech obciąża samego Newtona, który w sporze z Leibnizem, dostrzegającym „względność przestrzeni" upierał się przy przestrzeni absolutnej. Pisał bzdury w rodzaju: „Pozory wskazują, że przestrzeń jest względna – trzeba wielkiego wysiłku by ten pozór przezwyciężyć"

Oto popularne myślenie: jest przestrzeń, płynie czas, wraz z upływem tego czasu, różne ciała zajmują różne położenia. By zacząć zajmowanie się teorią względności, należy zrozumieć, co fałszywego jest w tym obrazie. Moja rada jest następująca. Pomyślmy o podróży pociągiem i o obiedzie w wagonie restauracyjnym. Na początku obiadu możemy wyróżnić **zdarzenie**: pierwszy łyk mineralnej przechodzi przez nasz przełyk. Na koniec możemy wyróżnić, na przykład, schowanie do kieszeni reszty wydanej przez kelnera. I teraz pytamy: Czy zaczynaliśmy i kończyli obiad **w tym samym miejscu.**? Gdyby istniała jedna przestrzeń **jako zbiór miejsc**, dobrze określonych, dających się ponazywać, odpowiedź na powyższe pytanie nie powinna sprawiać kłopotu. A sprawia!! Wszak według kelnera (o ile tylko nie zmienialiśmy stolika w trakcie obiadu), początek i koniec obiadu zaszedł w tym samym **miejscu,** czyli w tym samym punkcie (z lekka rozmytym, byśmy mogli się zmieścić ze swym ciałem, stolikiem i talerzami). A według kolejarza nasz obiad zaczął się, dajmy na to, w Koluszkach, a skończył w Piotrkowie Trybunalskim. Jeszcze innej odpowiedzi udzieliłby Marsjanin, uwzględniający w sposób naturalny, że przez godzinę, sama kula ziemska przebyła drogę ok. 100 000 000 m, co on, patrząc z „góry” widzi wyraźnie.

Użyteczne pojęcie przestrzeni da się skonstruować na wiele **różnych** sposobów, ale nie jest ono dane *a priori*, nie jest jednoznaczne. To miał na myśli Leibniz mówiąc, że przestrzeń jest względna. I miał 100% racji. W tej sytuacji przestrzeń nie powinna stanowić punktu wyjścia konstrukcji użytecznych pojęć. Skoro nie ma (na początek) przestrzeni, to nie ma pojęcia położenia, ani prędkości, nie można powiedzieć, co to znaczy ruch jednostajny.

Od czego więc zacząć?

Zauważyliśmy, iż punkt w przestrzeni nie da się sensownie określić, ale **zdarzenie, jako miejsce, czy punkt w czasoprzestrzeni,** nie budzi takich wątpliwości. Jeśli wraz z nami, jadł przy tym stoliku obiad nasz towarzysz podróży, który i zaczął i skończył z nami, to (pomijając drobne rozsunięcie naszych ciał), i kelner, i kolejarz i Marsjanin potwierdzą, że zdarzenia rozpoczęcia obiadu przez każdego z nas **koincydują**, są identyczne, podobnie jak i zdarzenia zakończenia obiadu. Więcej, cały zbiór zdarzeń ciągnących się od początku do końca tego obiadu, jest dla nas (prawie) wspólny. Potwierdzi to i kelner i kolejarz i Marsjanin.

Koincydencja zdarzeń (o ile ma miejsce) ma charakter bezwzględny, koincydencja samych „miejsc” w „przestrzeni” dla dwóch zdarzeń rozdzielonych czasowo, nie ma tej własności. Zatem zdarzenia, ciągi zdarzeń (zwane liniami świata w nieco pompatycznej nomenklaturze), no i cały czterowymiarowy zbiór zdarzeń (lub zdarzeń potencjalnych) mają obiektywny sens. Czasoprzestrzeń jest jedna, wspólna dla nas wszystkich. „Przestrzeni” jest wiele.

To zanegowanie racjonalności pojęcia przestrzeni i podkreślenie ważności czasoprzestrzeni, nie musi być wiązane koniecznie z fizyką XX wieku. Jak wspominaliśmy, wątpliwości nurtowały już Leibniza. Jednak wraz z odkryciem nowego zachowania się zegarów niż to sądzono w fizyce klasycznej, względność przestrzeni stała się jeszcze bardziej wyraźna i znacząca.

Przeciętnego ucznia, czy studenta może przerażać pojęcie czasoprzestrzeni czterowymiarowej. Łatwo temu zaradzić. Wystarczy zająć się zdarzeniami zachodzącymi w pobliżu wyróżnionego kierunku (w jakimś tunelu, powiedzmy), a nasza czasoprzestrzeń zrobi się tylko dwuwymiarowa. Naukę geometrii też zaczyna się od planimetrii.

Zasadę bezwładności Galileusza, przy użyciu poznanych pojęć należy sformułować następująco:

Linie świata ciał swobodnych są liniami prostymi.

I już.

W czasoprzestrzeni istnieją nie tylko linie świata cząstek. Możemy pomyśleć o innych zbiorach zdarzeń układających się na takich, czy innych liniach. Możemy tworzyć i badać figury, na przykład trójkąty.

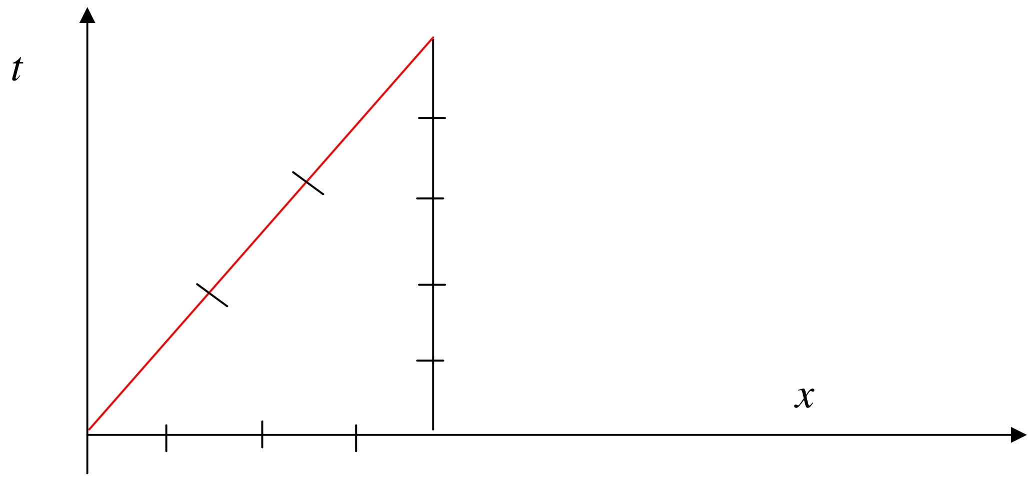
Przyjrzyjmy się pewnemu, możliwemu trójkątowi dla utworzenia którego pomyślimy (półżartem) o prostoliniowym, zagłębiającym się w ziemię by owa prostoliniowość zrealizować, tunelu łączącym Warszawę z Paryżem, a ściślej, Laboratorium Cyklotronu w Warszawie z jakimś laboratorium jądrowym w Paryżu. Odległość wzdłuż tunelu będziemy mierzyć w (nietypowych) jednostkach równych 300km. Tunel ma więc długość 4 jednostek.

Zbiór wszystkich zdarzeń na osi tunelu dokładnie wtedy, gdy rozmieszczone wzdłuż tunelu zegary pokazują godzinę, powiedzmy 12 w południe, jest niewątpliwie prostoliniowym odcinkiem w czasoprzestrzeni. (Może nam się wydawać, że to nic innego jak „zwykły” odcinek w **przestrzeni**, ale gdy uświadomimy sobie, że zbiór zdarzeń wzdłuż tej osi o godzinie, np. 12:01, jest **innym** zbiorem zdarzeń, widzimy że to nie to samo. Wszak odcinek „zwykły” od Warszawy do Paryża jest tylko jeden!). Niech ten trójkąt będzie pierwszym bokiem tworzonego trójkąta.

Jako drugi bok, weźmy znów **zbiór zdarzeń**, ale tym razem zbiór wszystkich zdarzeń dziejących się na końcu tunelu w Paryżu, w przedziale czasu od 12:00 do godz. 12:00 plus 5 milisekund. Ciało idealnie swobodne, spoczywające u wylotu tunelu ma prostoliniową linię świata i jej 5-cio milisekundowy odcinek, to nasz drugi bok trójkąta.

A jak ma wyglądać trzeci bok? Otóż ciało swobodne, (lub grupa ciał – na przykład atomów promieniotwórczych wyprodukowanych w Cyklotronie) obecne o godz. 12:00 w Warszawie, a o godz. 12:00 plus 5 milisekund w Paryżu wytycza linię prostą w czasoprzestrzeni, której fragment między startem w Warszawie, a metą w Paryżu jest tym trzecim bokiem.

Sporządzając zwykły wykres ruchu tej grupy atomów mamy:



Odcinek narysowany na czerwono to wykres ruchu grupy atomów wędrujących z oszałamiającą prędkością 4 jednostek, (czyli 1200km) na 5 milisekund, czyli 0,8 w naszych śmiesznych jednostkach, co daje 240000km/s w jednostkach zwykłych.

Odcinek zdarzeń na osi *x*-ów ma, z konstrukcji długość 4, odcinek zdarzeń na osi pionowej ma długość 5 (stosownych jednostek).

Powstaje **kluczowe pytanie**. Jaką długość ma odcinek czerwony? Jak ją mierzyć? Na pewno nie na rysunku! Rysunek to tylko mapa zdarzeń w czasoprzestrzeni wykonana na kartce o swej własnej geometrii. Owa czerwona kreska wydaje się dłuższa od każdego z pozostałych boków, ale czy tak jest naprawdę?

Czerwono zaznaczony odcinek jest zbiorem zdarzeń ciała swobodnego. Praktycznie myślimy o tym ciele jako lecącym z Warszawy do Paryża, ale względność ruchu oznacza, iż można uważać też, że to owe atomy sobie spoczywają (po prostu sobie egzystują), a laboratorium w Paryżu leci im na spotkanie.

Długość takiej linii zdarzeń musi być określana tak jak długość innej linii zdarzeń, np. tej której już przypisaliśmy wartość 5 milisekund. Innymi słowy, długość owej czerwonej przeciwprostokątnej, to nic innego jak czas zmierzony na zegarze wędrującym wraz z tymi atomami.

W rzeczywistości realny zegar niekoniecznie będzie nam potrzebny. Przyjmijmy jeszcze w tym naszym **pomyślanym,** trochę surrealistycznym eksperymencie, że wyprodukowane i przesyłane atomy są promieniotwórcze, a ich okres połowicznego zaniku wynosi akurat 1 milisekundę. Oznacza to, na przykład, że z grupy 1024 atomów trzymanych po wytworzeniu w Warszawie, po 1 milisekundzie zostanie 512, po dwóch milisekundach 256, po trzech 128, po pięciu milisekundach 32, itd.

Jeśli chcemy wiedzieć, jak długi jest odcinek linii świata atomów wędrujących z Warszawy do Paryża, wystarczy policzyć ile z nich doleci do Paryża!

Naiwna odpowiedź brzmi: Podróż trwała 5 milisekund, no to pozostało $1024/2^5 = 32$ atomy. Oznaczałoby to, przypisanie czerwonej przeciwprostokątnej długości też 5 – tyle, co długość jednej z przyprostokątnych. W takie zachowanie ciał w czasoprzestrzeni, a właściwie taką własność samej czasoprzestrzeni przypisywali fizycy **prawdziwej** czasoprzestrzeni przez setki lat.

Wyprzedając bieg wydarzeń powiem już teraz, a wykażę na następnych wykładach, że nasza przeciwprostokątna **ma długość 3 (trzy milisekundy).** Tak jak istnieje trójkąt „Pitagorejski" o bokach 3,4,5 w zwykłej przestrzeni, tak istnieje trójkąt o bokach 3,4,5 w czasoprzestrzeni, tyle, że teraz przeciwprostokątna jest najkrótsza!!!