

Szczególna teoria względności

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki
Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
Instytut Fizyki Doświadczalnej

Wykład I:

- Informacje ogólne
- Wprowadzenie
- Teoria i doświadczenie w fizyce
- Zdarzenia i czasoprzestrzeń
- Układy odniesienia i układy współrzędnych
- Równoprawność układów odniesienia

Zasady zaliczania

Uzyskanie pozytywnej oceny końcowej z wykładu możliwe jest po pozytywnym zaliczeniu części rachunkowej i zdaniu egzaminu teoretycznego.

Część rachunkowa

Zaliczenie części rachunkowej odbywa się na podstawie

- obecności na ćwiczeniach **Obecność na ćwiczeniach jest obowiązkowa!**
Bez usprawiedliwienia student może opuścić co najwyżej 1 ćwiczenia.
Każda kolejna nieusprawiedliwiona nieobecność powodują obniżenie oceny o jeden stopień.
 - wyników “kartkówek”
W ramach ćwiczeń przeprowadzone będą 3 sprawdziany polegające każdorazowo na rozwiązaniu jednego zadania z wcześniej ogłoszonej serii zadań domowych. Z każdego sprawdzianu można uzyskać maksymalnie 2 punkty.
 - wyników egzaminu pisemnego
4 zadania rachunkowe, za rozwiązanie każdego z nich można dostać maksymalnie 5 punktów
- ⇒ Do zaliczenia konieczne jest uzyskanie łącznie przynajmniej 12 punktów.

Zasady zaliczania

Zadania domowe

Nieobowiązkowe. Będą sprawdzane przez asystentów jeśli zostaną oddane w terminie. Sprawdziany w ramach ćwiczeń będą obejmować wcześniej ogłoszone zadania domowe. Część zadań egzaminacyjnych będzie wzorowana na zadaniach domowych !

Część “teoretyczna”

Egzamin teoretyczny składa się z:

- testu pisemnego (w połączeniu z egzaminem rachunkowym)
- egzaminu ustnego
pod warunkiem zaliczenie części rachunkowej i testu pisemnego

W przypadku gdy wyniki części rachunkowej i testu pisemnego pozwolą na zaproponowanie oceny końcowej student może zrezygnować z egzaminu ustnego.

Zasady zaliczania

Materiały z wykładów

Slajdy z wykładów oraz zadania domowe będą sukcesywnie umieszczane na stronie:

<http://www.fuw.edu.pl/~zarnecki/stw/>

W wyjątkowych przypadkach indywidualnych możliwe jest zwolnienie z obowiązku uczestniczenia w ćwiczeniach - należy skontaktować się z wykładowcą w pierwszym tygodniu zajęć.

Co to jest fizyka ?

Fizyka zajmuje się badaniem
najbardziej fundamentalnych i uniwersalnych
właściwości materii i zjawisk w otaczającym nas świecie.

“Nasza **wiedza** o świecie fizycznym dzieli się na dwie kategorie:
prawa przyrody i **warunki początkowe**. Fizyka w pewnym sensie
nie interesuje się warunkami początkowymi, pozostawiając je
badaniom astronomów, geologów, geografów, i tak dalej.”

Eugene Wigner

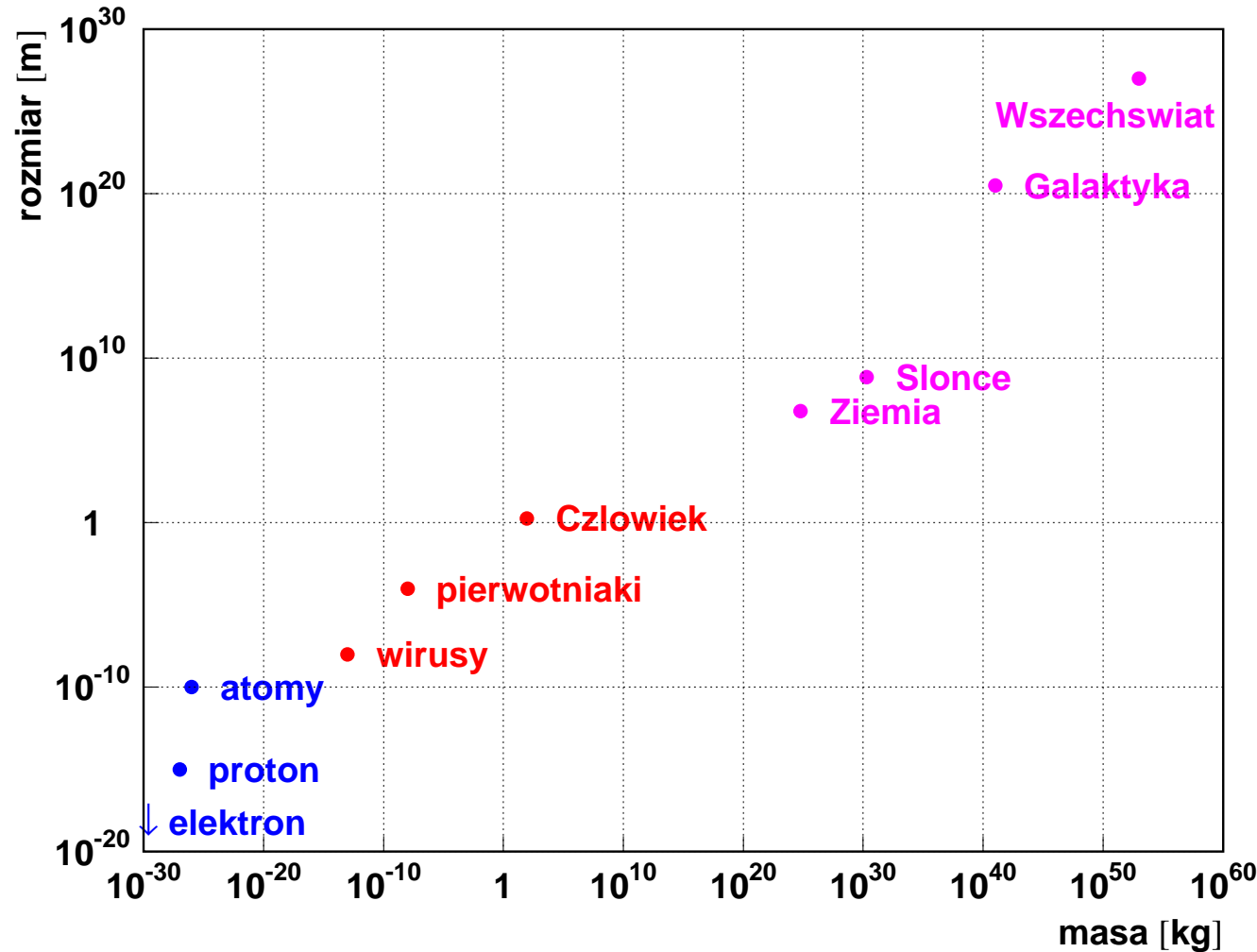
Staramy się znaleźć prawidłowości niezależne od “warunków początkowych”...

Te same prawa pozwalają czasami wyjaśnić zupełnie różne zjawiska...

Co to jest fizyka ?

Staramy się zrozumieć zjawiska zachodzące na najmniejszych i największych odległościach...

Szukamy praw opisujących zachowanie najmniejszych cząstek elementarnych oraz ewolucję wszechświata...



Teoria i doświadczenie

Doświadczenie

Skoro chcemy opisać otaczający nas świat (a nie jakąś rzeczywistość wirtualną) to oznacza, że niezbędnym elementem i punktem wyjścia wszystkich naszych rozważań powinno być doświadczenie.

Doświadczenie dostarcza nam danych, na podstawie których staramy się tworzyć modele opisujące rzeczywistość.

Teoria

Następnie od opisu zjawiska (model opisowy) staramy się przejść do wyjaśnienia jego mechanizmu - tworzymy model przyczynowy ("teorię")

Przykład:

ruch planet \Rightarrow prawa Keplera \Rightarrow prawo grawitacji Newtona

Teoria i doświadczenie

Tworząc modele i teorie staramy się ująć **istotę zjawiska**.

Dlatego często posługujemy się **idealizacją** (np. punkt materialny, układ izolowany) i/lub **uogólniamy** wnioski wynikające z doświadczenia.

Staramy się też dostrzec uniwersalne zależności, symetrie lub prawa zachowania.

Podstawowe założenia: **niezbędne żeby móc zajmować się fizyką**

⇒ Prawa fizyki są wszędzie takie same.

Nawet w najdalszych zakątkach wszechświata...

⇒ Prawa fizyki nie zmieniają się w czasie.

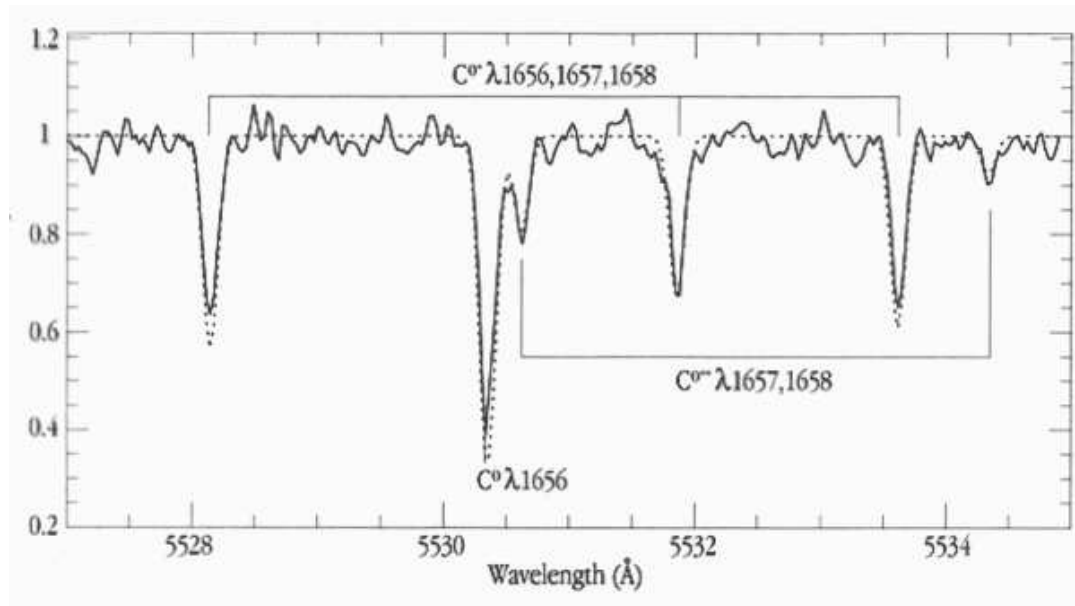
Są niezmiennie od chwili narodzin wszechświata...

też wynikają z doświadczenia...

Teoria i doświadczenie

Przykład:

Linie węgla w widmie kwazara PKS 1232+0815:



Przesunięcie linii widmowych (efekt Dopplera): $\lambda \approx 3.34\lambda_0$

⇒ prędkość oddalania $v \sim \frac{5}{6}c \approx 250\,000\text{ km/s}$

⇒ odległość od Ziemi (z prawa Hubble'a) $r \sim 10^{26}\text{ m}$

⇒ światło wysłane ok. 12 miliardów lat temu (wszechświat ~ 14 mld. lat)

Teoria i doświadczenie

Tworząc teorię często formułujemy pewne **założenia** nie wynikające wprost z doświadczenia, albo **sprawdzone** tylko w **ograniczonym obszarze** parametrów (!)

Kierujemy się kryteriami **prostoty i elegancji** modelu, staramy się dostrzec dodatkowe, głębsze **symetrie** rozważanego zagadnienia, czasami odwołujemy się także do **“naturalności”** modelu.

Jednak rozstrzygającym kryterium poprawności modelu jest **doświadczenie!**

Niestety, doświadczenie nigdy nie udowodni 100% poprawności teorii, gdyż nigdy nie jesteśmy w stanie wykonać wszystkich możliwych pomiarów. Może co najwyżej wskazać **zakres jej stosowalności**.

Natomiast pojedynczy pomiar może "obalić" teorię (ew. ograniczyć zakres jej stosowalności).

Musimy zawsze być przygotowani do rewizji poczynionych założeń!

przykład: symetria względem odbicia przestrzennego łamana w oddziaływaniach słabych

Teoria i doświadczenie

Analizując wyniki pomiarów, poszukując opisującego je modelu, trzeba dobrze zastanowić się nad wszystkimi założeniami.

Wielokrotnie już obalano najbardziej nawet utrwalone założenia.

Szczególne teoria względności jest jednym z przykładów.

Nawet najbardziej “oczywiste” założenia: (które przyjmuje w dalszej części wykładu)

- przestrzeń jest trójwymiarowa
- przestrzeń jest płaska

wcale nie muszą być spełnione!

Od kilku lat “modne” w fizyce cząstek stało się poszukiwanie “dodatkowych wymiarów”

Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

⇒ **NIE** - jeśli pytamy o nieskończone wymiary

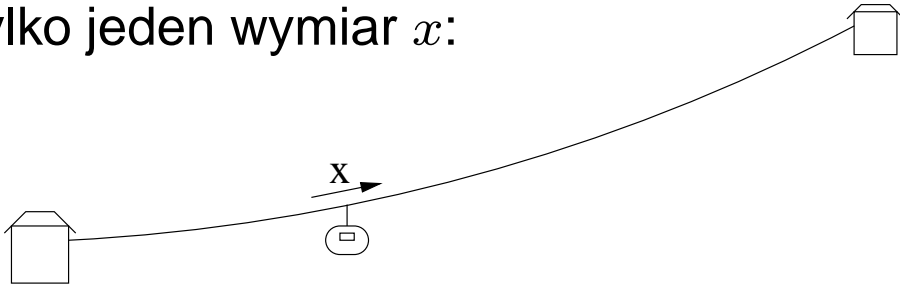
⇒ **TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone

Teoria i doświadczenie

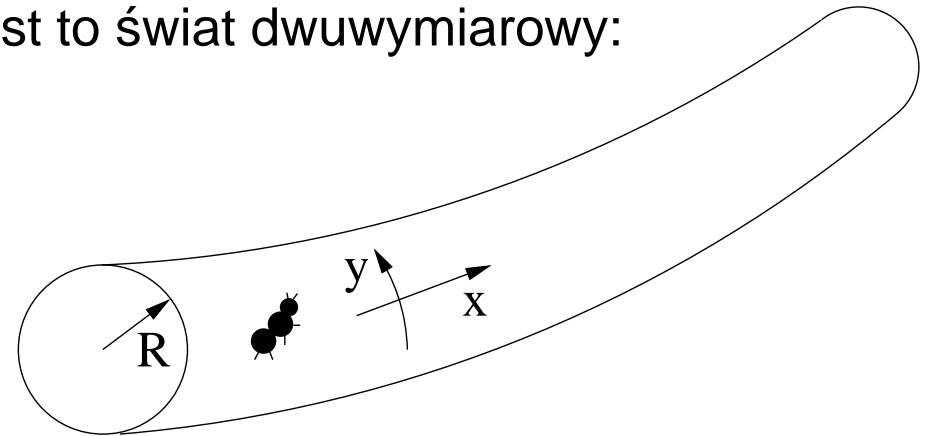
Dodatkowe wymiary

Przykład:

Gdy rozpatrujemy ruch wagonika kolejki linowej przyjmujemy, że lina ma tylko jeden wymiar x :



Ale dla mrówki, która idzie po tej linie jest to świat dwuwymiarowy:



y jest współrzędną cykliczną.

Dodatkowy wymiar zauważamy dopiero gdy przyglądamy się z rozdzielczością $\Delta < R$

Z pomiarów grawitacyjnych wykluczono dodatkowe wymiary z $R \geq 100\mu m$.

W fizyce cząstek wciąż moglibyśmy obserwować efekty dodatkowych wymiarów...

Zdarzenia i czasoprzestrzeń

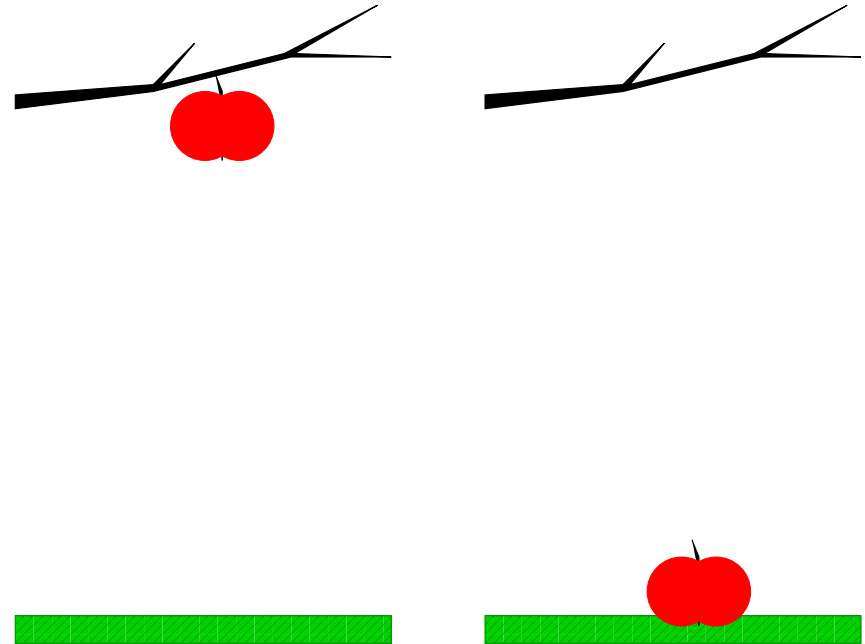
Doświadczenie to (najczęściej) pomiar jakiejś wielkości fizycznej lub (rzadziej) obserwacja jakiegoś zjawiska (np. zmiany stanu skupienia).

Oba przypadki możemy sprowadzić do rejestracji jakiejś zdarzeń.

Przykład:

pomiar przyspieszenia spadającego jabłka

- Zdarzenie A: jabłko odrywa się od gałęzi
- Zdarzenie B: jabłko upada na ziemię



Aby wyznaczyć przyspieszenie (zakładając, że ruch jest jednostajnie przyspieszony) musimy znać zarówno czas jak i położenie jabłka dla obu zdarzeń.

Zdarzenia i czasoprzestrzeń

Zdarzenie

Zdarzenie: jednoczesne określenie czasu i położenia.

Zjawisko zachodzące w pewnym miejscu w przestrzeni i w pewnej chwili czasu.

Przykłady:

- obserwacja (pomiar) położenia jabłka (w danej chwili czasu)
- zderzenie kulek (zaniedbując ich rozmiary)
- rozszczepienie jądra atomowego
- start rakiety
- lądowanie rakiety na Księżycu
- wysłanie lub rejestracja impulsu laserowego, cząstki itp.

ZDARZENIE = CZAS + POŁOŻENIE

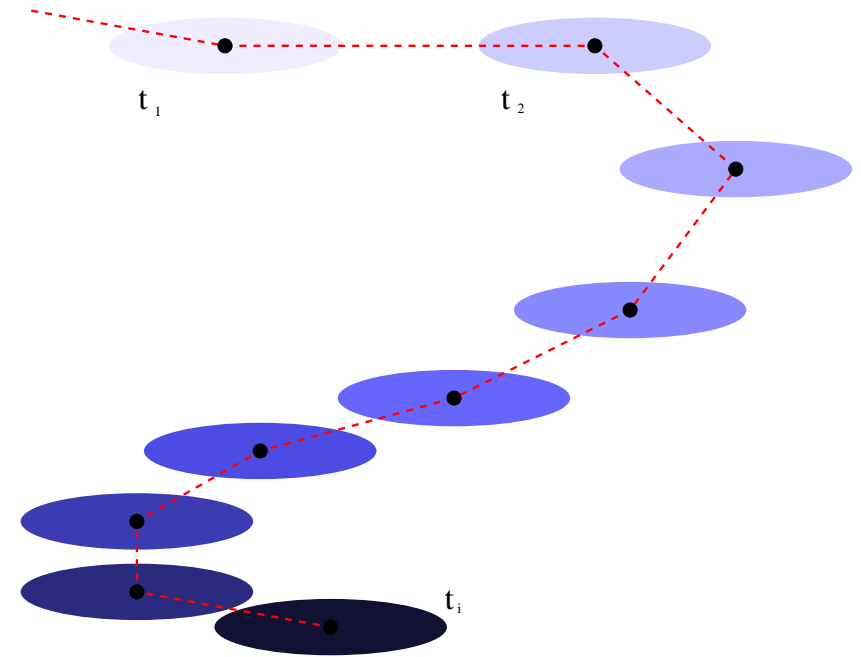
Zdarzenia i czasoprzestrzeń

Linia świata

Możemy wyróżnić pewne szczególne zbiory zdarzeń.

Wyobraźmy sobie, że obserwujemy jakiś obiekt (np. UFO) i rejestrujemy w sposób ciągły zmiany jego położenia w czasie. Mamy ciągłą serię pomiarów.

Zbiór zdarzeń opisujących ruch konkretnego ciała nazywamy "linią świata" tego ciała.



W wymiarach przestrzennych linia świata to po prostu tor.

Znając linię świata wiemy dokładnie jak poruszało się dane ciało.

Oczywiście kształt linii świata zależy od wybranego układu odniesienia.

Układy odniesienia i układy współrzędnych

Zdarzenie “lokalizujemy” podając **miejsce** i **czas**, w którym zaszło.

Miejsce i czas możemy podać **opisowo** (o północy na czubku Pałacu Kultury), ale znacznie wygodniejsze jest podanie **współrzędnych** zdarzenia.

Podając **współrzędne przestrzenne** określamy punkt w przestrzeni.

Punkt nie jest zlokalizowany w czasie, jest “wieczny” - aby zdefiniować zdarzenie konieczne jest dodanie informacji o **czasie** \Rightarrow zdarzenie to **punkt w czasoprzestrzeni**.

Nie ma możliwości określenia bezwzględnego położenia i czasu!

W każdym przypadku musimy wybrać **układ odniesienia**, najczęściej związany z jakimś ciałem lub obserwatorem.

Położenie i czas określamy **względem** wybranego punktu i zegara w tym układzie (**wybranego zdarzenia odniesienia**).

Musimy wprowadzić **układ współrzędnych**: zdefiniować jak mierzymy położenie i czas.

Układy odniesienia i układy współrzędnych

Zdarzenie można jednoznacznie określić podając jego współrzędne w **dowolnym układzie** odniesienia (zakładając, że układ ten jest precyzyjnie zdefiniowany).

Na pierwszy rzut oka wydaje się to proste,
ale **czy wszystkie układy odniesienia są równie dobre?**

NIE !

Opis praw przyrody będzie zależał od tego jaki układ wybraliśmy!!!

Wszystko jest względne! **Wybór układu odniesienia ma kluczowe znaczenie!**

Przykład:

- Ruchy planet wyglądały bardzo skomplikowanie w układzie związanym z Ziemią.
- W układzie związanym ze Słońcem opisują je bardzo proste prawa Keplera.

Zasada bezwładności

I zasada dynamiki Newtona: (1687)

“Każde ciało trwa w swym stanie spoczynku lub ruchu prostoliniowego i jednostajnego, jeśli siły przyłożone nie zmuszają ciała do zmiany tego stanu.”

Ciało, które nie podlega żadnym oddziaływaniom: **ciało swobodne**.

(idealizacja: ale przyjmijmy, że potrafimy zidentyfikować takie obiekty.)

Jest jednak inna, bardziej zasadnicza luka w podejściu Newtona: nie określa w jakim **układzie odniesienia** powinniśmy ciało obserwować.

Jeśli mamy dwa układy odniesienia, które poruszają się z przyspieszeniem lub obracają się względem siebie to I zasada Newtona nie może obowiązywać w każdym z nich!

Żeby móc w ogóle prowadzić dalsze rozważania musimy wskazać/wyróżnić pewną klasę układów odniesienia!

Zasada bezwładności

Układ w którym spełniona jest I zasada dynamiki Newtona nazywamy

układem inercyjnym

W układzie inercyjnym ciało swobodne pozostaje w spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym.

Możemy to wyrazić prościej:

w układzie inercyjnym linia świata ciała swobodnego jest linią prostą.

I zasada dynamiki w nowym ujęciu:

istnieje układ inercyjny

Jeśli istnieje przynajmniej jeden układ inercyjny to istnieje ich nieskończenie wiele.

Od tej chwili, gdy mówiąc układ odniesienia będę miał zawsze na myśli układ inercyjny.

Konstrukcja układu współrzędnych

Aby definiować zdarzenia układ odniesienia musimy wyposażyć w **układ współrzędnych**.

Dla **współrzędnych przestrzennych** jest to proste:

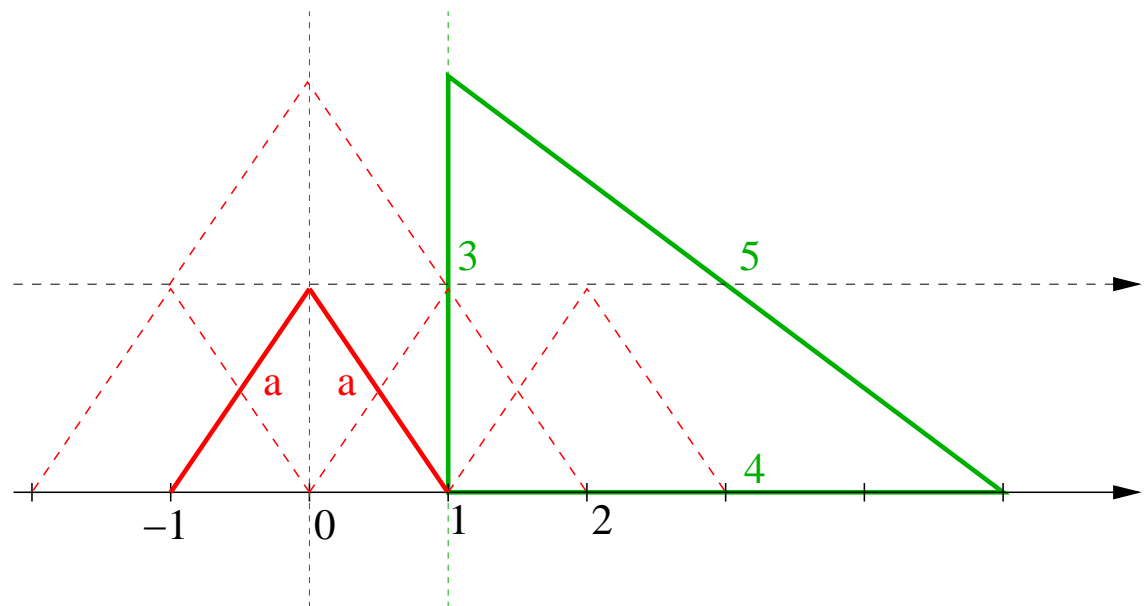
wystarczy, że mamy **wzorzec** jednostki długości, odkładając ten wzorzec wzdłuż **toru ciała swobodnego** otrzymujemy pierwszą oś współrzędnych.

Kolejne osie układu konstruujemy prostopadłe do pierwszej.

Nie potrzebujemy kątomierza.

Wystarczą nam **jednakowej długości** tyczki lub sznurki, które pozwolą nam na konstrukcję trójkąta równoramiennego.

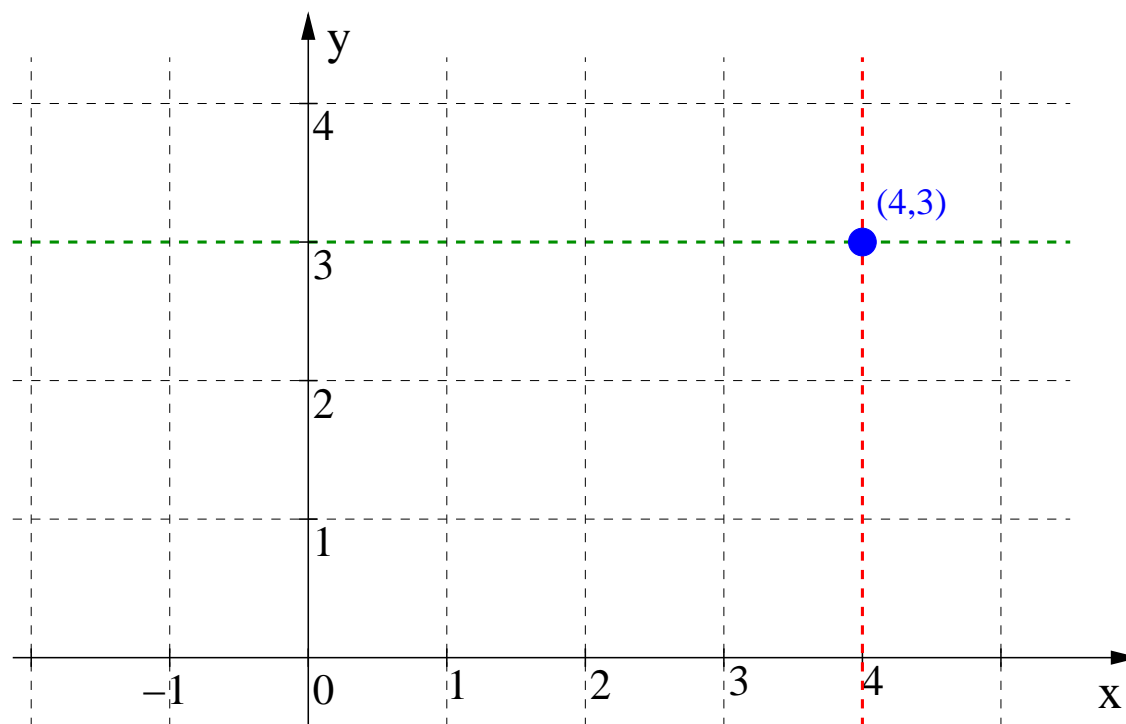
Możemy też skorzystać z **twierdzenia Pitagorasa...**



Konstrukcja układu współrzędnych

Dodatkowo kreśląc **linie równoległe** do osi przechodzących przez początek układu otrzymujemy **siatkę współrzędnych**.

Pozycję zdarzenia możemy zdefiniować poprzez podanie najbliższego węzła siatki.



Zakładamy przy tym, że przestrzeń jest płaska.

Wbrew pozorom nie jest to oczywiste założenie!...

Konstrukcja układu współrzędnych

Pozostaje nam "oś czasu".

Czy wystarczy nam jeden zegar w początku układu współrzędnych?

NIE !

Potrzebny jest nam zegar referencyjny, ale do określenia współrzędnej czasowej zdarzenia potrzebny jest zegar w każdym węźle siatki.

Inaczej pomiar będzie zależał od metody odczytu wskazań zegara referencyjnego.

Zegary siatki muszą być oczywiście zsynchronizowane z zegarem referencyjnym.

Nie można (jak się później przekonamy) zrobić tego synchronizując zegary w początku układu, a następnie roznosząc je do poszczególnych węzłów siatki -

ruch może wpływać na bieg zegarów

(wyobraźmy sobie, że mamy zegary wahadłowe).

Konstrukcja układu współrzędnych

Synchronizację można przeprowadzić poprzez wysłanie **impulsów światła**.

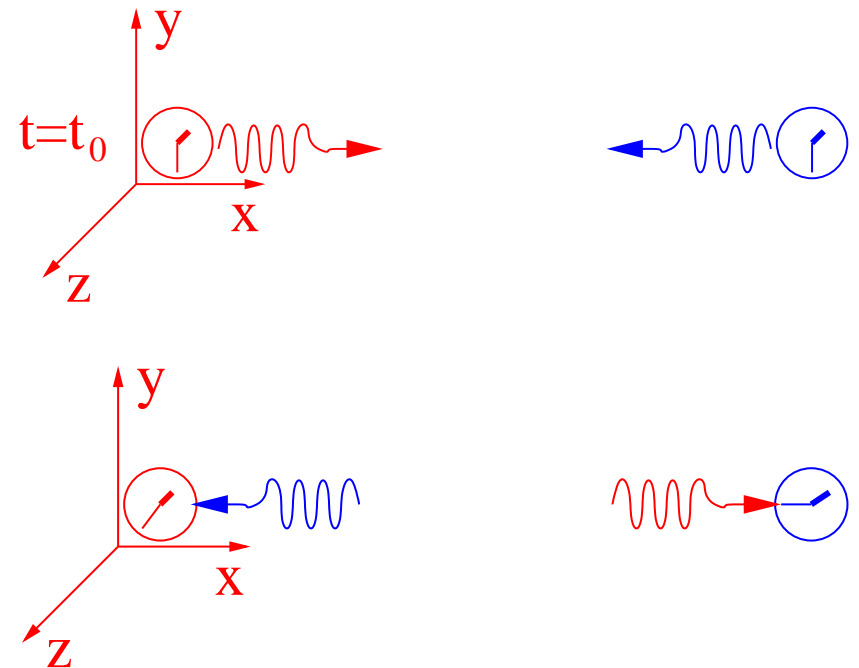
O **określonej godzinie** wysyłamy impuls z wybranego zegara do zegara referencyjnego oraz z zegara referencyjnego do wybranego zegara.

Jeśli oba impulsy dotarły o tej samej godzinie (odczytanej na zegarze do którego dotarł impuls) to oznacza, że zegary są zsynchronizowane.

Jeśli nie to połowa różnicy tych czasów daje nam poprawkę dla wybranego zegara.

Aby zastosować tą metodę synchronizacji nie musimy znać prędkości światła.

Ale zakładamy, że nie zależy ona od kierunku rozchodzenia!



Równoprawność układów odniesienia

Wszystkie zegary rozmieszczone w węzłach skonstruowanej przez nas siatki układu współrzędnych spoczywają w tym układzie.

⇒ Układ inercjalny to rodzina swobodnych (zsynchronizowanych) zegarów.

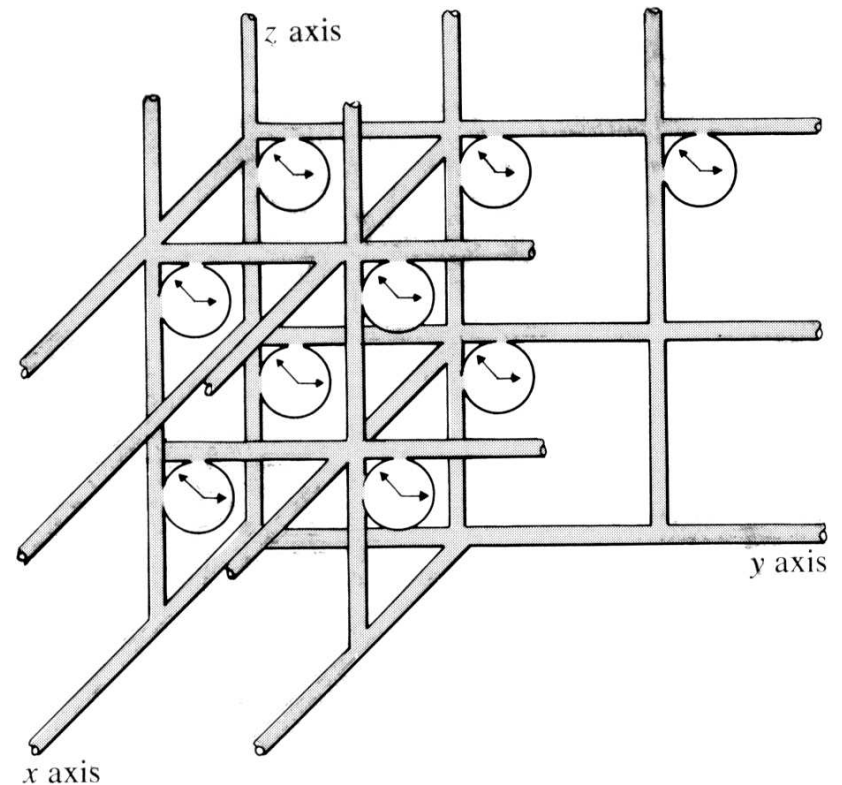
Najprostszym układem inercjalnym jest układ związany z ciałem swobodnym.

W takim układzie ciało to z definicji spoczywa.

Ale musimy pamiętać, że to jest idealizacja.

W rzeczywistości żadne ciało, które podlega obserwacji nie jest swobodne, bo każda obserwacja wiąże się z jakimś oddziaływaniem.

Nawet jeśli np. odbijanie światła słonecznego ma zaniedbywalny wpływ na ruch rakiety

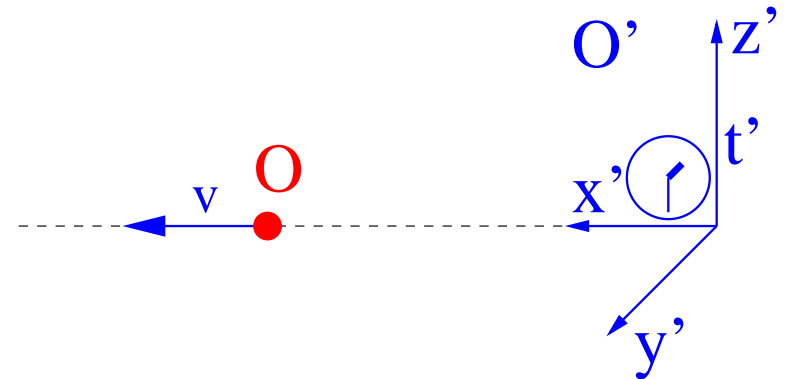
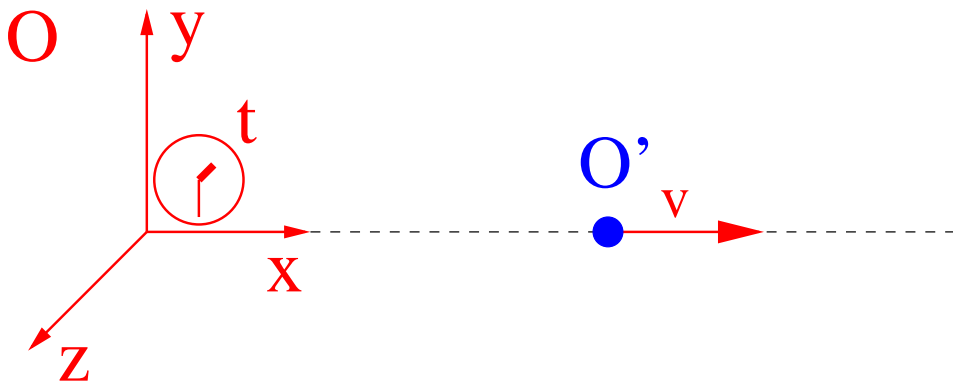


Równoprawność układów odniesienia

Jeśli będziemy mieli **dwa ciała swobodne** możemy skonstruować **dwa układy** inercjalne.

Niech oś X w układzie O zostanie wybrana zgodnie z kierunkiem ruchu ciała O'

W układzie O' możemy z kolei wybrać oś X' w kierunku ruchu O



Ponieważ nie wprowadzamy żadnych dodatkowych założeń układy te powinny być równoprawne. **Tak przynajmniej podpowiada nam intuicja.**

Potwierdza to także doświadczenie!

Wszystkie dotychczas poznane prawa przyrody nie zależą od wyboru **(inercjalnego)** układu odniesienia.

Równoprawność układów odniesienia

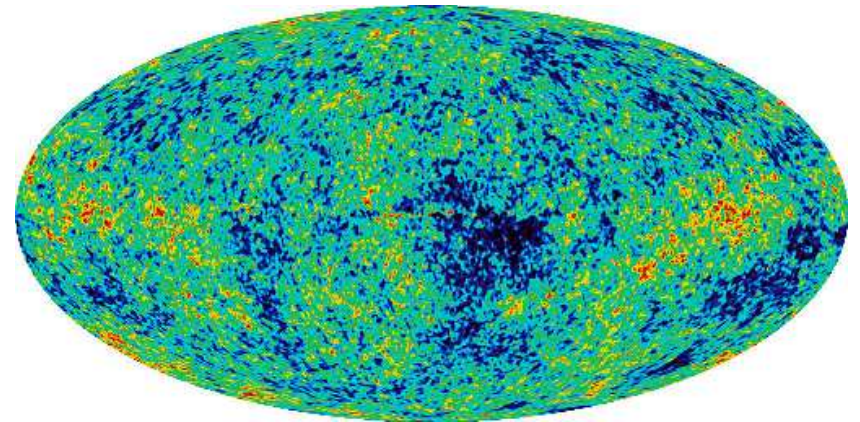
W roku 1604 **Galileusz** sformułował prawo względności:

“Wszystkie układy odniesienia poruszające się względem siebie ze stałą prędkością są równoważne”

Nie oznacza to wcale, że nie istnieje wyróżniony układ odniesienia.

Wprost przeciwnie.

Obserwacje **mikrofalowego promieniowania tła**, pozostałości **Wielkiego Wybuchu**, w którym powstał Wszechświat, pozwalają wskazać związany z nim **układ odniesienia**.

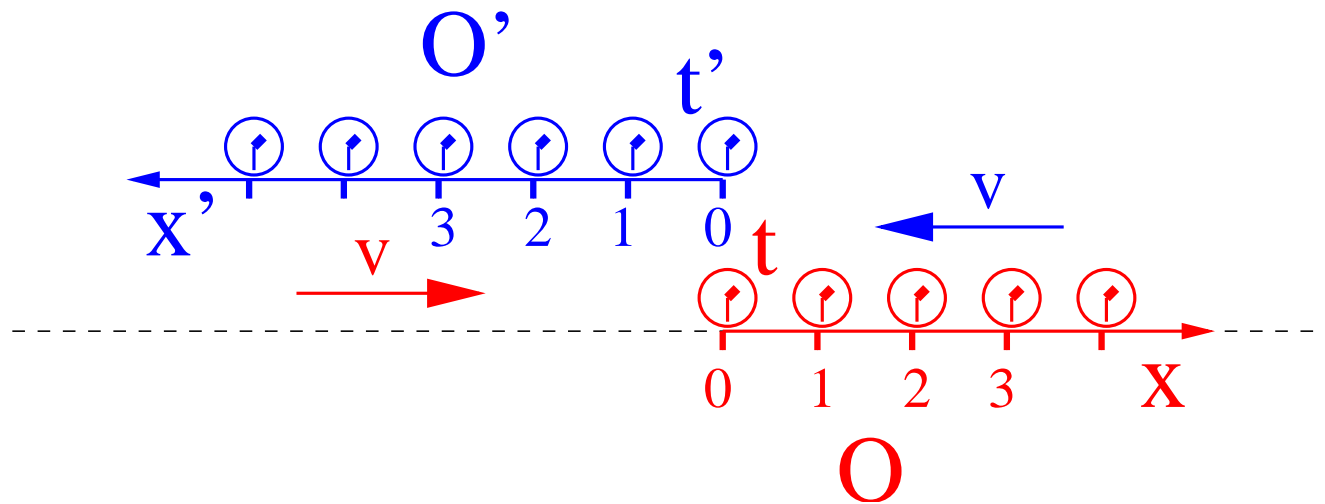


Ale to temat na osobny wykład...

Równoprawność układów odniesienia

Wprowadziliśmy dwa układy odniesienia.

Przyjmijmy, że w chwili gdy oba ciała (początki układów) mijają się $t = t' = 0$.



Jeśli w układzie O ciało O' porusza się z prędkością V : $x = Vt$

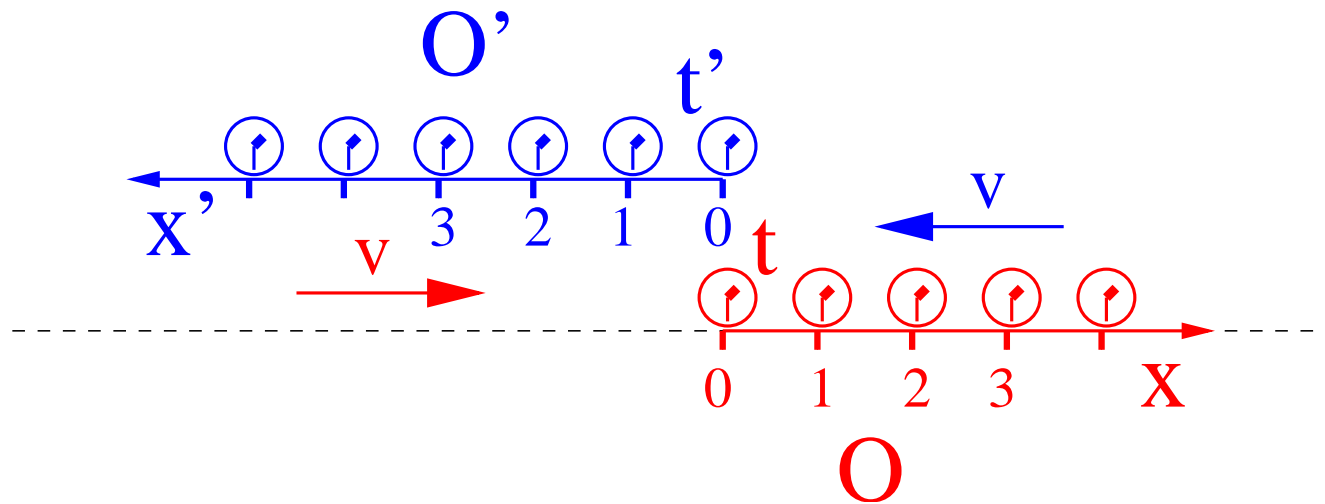
to dla dowolnego zegara z układu O' możemy też zapisać: $x = Vt - Ax'$

znak “-” pojawia się, gdyż osie są przeciwnie skierowane.

Jeśli jednostki w obu układach są takie same to oczekivalibyśmy $A \equiv 1$.

Ale czy na pewno?!

Równoprawność układów odniesienia



Skoro dla dowolnego zegara z układu O' możemy zapisać: $x = Vt - Ax'$

To z równoważności układów O i O' oczekujemy też: $x' = Vt' - Ax$

dla zegara w punkcie x układu O obserwowanego w układzie O'

Równania spełnione dla **dowolnego zegara**, w **dowolnej chwili**

\Rightarrow opisują zależności między współrzędnymi **dowolnego zdarzenia** obserwowanego w układach O i O'

Równoprawność układów odniesienia

Aby otrzymać te równania wykorzystaliśmy:

- zasadę bezwładności (definicję układu inercjalnego)
- zasadę względności (równoprawność układów odniesienia)

Odejmując je stronami otrzymujemy:

$$\begin{aligned}x - x' &= V(t - t') - A(x' - x) \\ \Rightarrow (x - x') \cdot (1 - A) &= V(t - t')\end{aligned}$$

Do Einsteina panowało przekonanie, że czas jest uniwersalny: $t \equiv t'$ ($A \equiv 1$)
czyli, że można poprawnie zsynchronizować zegary będące względem siebie w ruchu
odpowiada to transformacji współrzędnych nazywanej transformacją Galileusza

Jednak podstawowe zasady, na które się powołujemy tego nie narzucają!

Może się okazać, że czas nie jest uniwersalny jeśli dopuścimy $A \neq 1$